

ファインバブルの生成に及ぼすベンチュリ管形状の影響

安信 強, 蔣 欣, 島津公紀

Effect of Venturi Tube Shape for Generation of Fine-bubble

Tsuyoshi YASUNOBU, Xin JIANG and Masaki SHIMAZU

Abstract

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

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

1. はじめに

直径が 100 [μm] の以下の気泡はファインバブルと呼ばれ、その中でも直径が 1~100 [μm] の気泡はマイクロバブル、直径が 1 [μm] 以下の気泡はウルトラファインバブルと呼ばれている⁽¹⁾。ファインバブルは浮力が弱い、洗浄効果がある、生理活性化効果があるなど様々な特徴を有しており、例えば牡蠣の洗浄や湖沼の浄化⁽¹⁾⁽²⁾、船体の近傍（境界層領域）でファインバブルによる船体の壁面での摩擦損失低減させる試みもなされ、一定の効果を上げている⁽³⁾。さらに最近では、ファインバブルより気泡径が小さいウルトラファインバブルの利用が始まっているが⁽⁴⁾、ファインバブルやウルトラファインバブルをより有効に活用するためには、安価にファインバブルやウルトラファインバブルを発生させる装置が必須であり、一つの手法として、ベンチュリ管型ノズルが使用されている。ベンチュリ管型ノズルではスロート（最小断面積部）下流の拡大部の気液二相流中の音速が低下し、相対的に超音速となる状態が気泡の崩壊が促進され、ファインバブルの生成に理想的であるが、この流動状態に対するベンチュリ管型ノズルの形状や作動条件などが及ぼす影響については、系統的な調査が十分とは言えない。そこで本研究では、ベンチュリ管型ノズルのスロート径の影響、すなわち形状は相似形でスロート径が縮小した場合、および、スロート径が一定でノズルスロート下流の広がり角が増加した場合について、生成されるファインバブルに及ぼす影響について実験的に調査し、考察することを目的とする。

2. 実験装置および実験方法

本研究で使用した実験装置の系統図を Fig.1 に示す。

作動流体は水道水で、水道水を入れた水槽の下面にノズルを設置し、ポンプでノズルに水道水を供給して水槽内にマイクロバブルを発生させる。ポンプは水槽内から取水しており、したがって実験時は水槽内の水が循環している。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 を変化させて、供給流量 Q_w を変えた実験を行うことができる。本研究では、ポンプの吐出圧力を $p_w=120\sim 210$ [kPa] の範囲で変化させ、ノズルへの水の供給流量を $Q_w=2\sim 9.75$ [L/min] の範囲で変化させて計測した。さらに本研究では、バブル量を増加させるため、ノズルスロートに直径 $d=2$ [mm] の抽気孔を設け、チューブを差し込んで $Q_m=0\sim 20$ [mL/min] の範囲で抽気し、抽気が及ぼす影響について調査した。なお、通常、ノズルスロートは負圧となるため、大気圧との圧力差で抽気が可能である。

次に、計測については、ノズル壁面圧力の計測と、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、5 [mm] 間隔でスロート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とマイクロスコープを使用して撮影し、その画像をパーソナルコンピュータに取り込んで計測した。

本研究で使用したベンチュリ管型ノズルの写真を Fig.2 に示す。ベンチュリ管型ノズルでは、ノズル内の断面積変化に伴う圧力変化を利用してマイクロバブルを生成する⁽¹⁾。本研究では、ノズル内部の可視化のため、アクリル製ノズルを使用した。図 (a) と図 (b) はノズルスロート直径の影響を調べるためのノズルで、形状は広がり角が $\theta=6$ [°] で同一の相似形であるが、スロート直径を

図 (a) では $d^*=3$ [mm] , 図 (b) では $d^*=2$ [mm] とした。また、形状は相似形のため、スロートからノズル出口までの長さ L は異なる。また、図 (c) から図 (d) はスロート下流の広がり角が及ぼす影響を調査するためのノズルで、スロート直径は $d^*=3$ [mm] の一定とし、スロート下流の広がり角を $\theta=6, 8.5, 10, 35$ [°] に変化させている。これらノズルでは、ノズル出口までの長さを一定としているため、ノズルの出口直径は異なる。

3. 実験結果と考察

Fig.2 (a) の Type A のノズルを使用した場合の壁面圧力分布を Fig.3 に示す。図の横軸はノズルスロートを原点とする距離 X , 縦軸は絶対圧力 P で、プロット点は測定結果、記号の相違はポンプの吐出圧力 p_w の相違を示す。図より、ノズル入口からスロートまではノズル断面積の減少によって速度が増加し、圧力は低下してスロートで流速は最大、圧力は最低となる。その後、スロート下流で断面積が増加するため流速は低下し、圧力は増加するが、ノズル出口直径はノズル入口直径と同一、すなわち、ベルヌーイの定理によれば、ノズル入口圧力まで圧力が回復するはずであるが、測定結果は大気圧までである。これは、ノズルが水槽内に設置されて出口圧力が大気圧となるためであり、ノズル入口圧力と大気圧との圧力差がファインバブルの生成に関係する。さらにポンプの吐出圧力 p_w を増加させると、ノズルスロート圧力は低下するが、特に $p_w=210$ [kPa] の結果では、スロート圧力は 50 [kPa] 程度まで低下し、その後、スロート下流の圧力は増加せず、ほぼ一定となったのちに急激に増加する。これは、 $p_w=165$ [kPa] の結果でも得られる。通常、スロートで圧力が低下すると供給水に溶存した空

気が気泡として析出し、粉碎されてバブルとなるが、特に $p_w=165$ [kPa] や $p_w=210$ [kPa] の結果では、スロート下流で気泡が粉碎されて気液二相流となり、ボイド率が増加してバブルにより音速が低下し、水の流速はそれほど速くないものの、音速の低下によって相対的に超音速状態となり、気泡の微細化により亜音速状態に減速される際に衝撃波が形成され、気泡の微細化を促進すると考えられる。この過程については上澤らによって調査され、ボイド率を測定して超音速状態となることは確認された

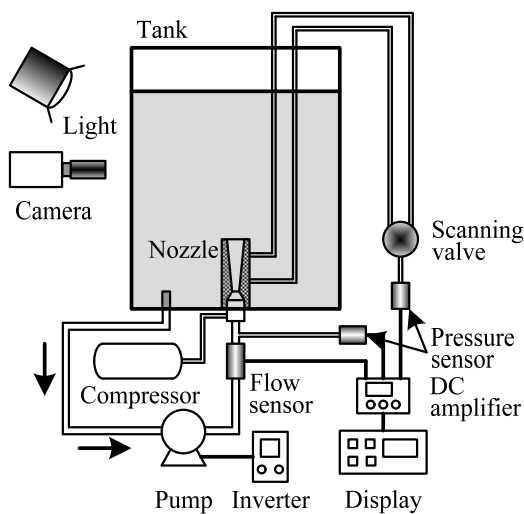
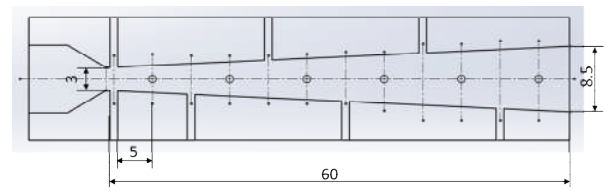
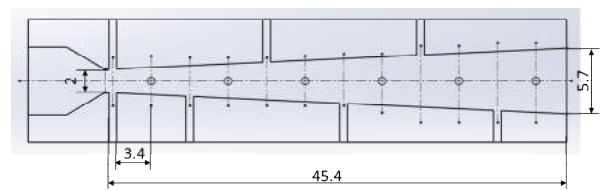


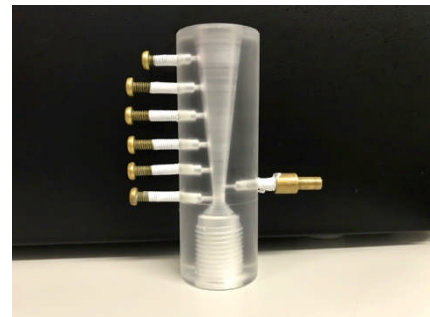
Fig.1 Schematic layout of experimental apparatus



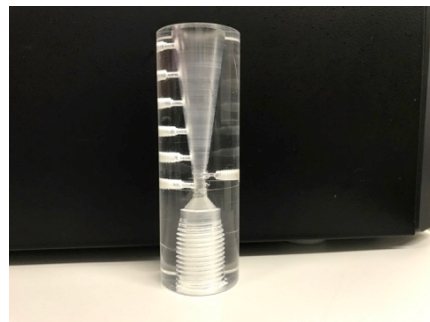
(a) Type A ($\theta=6$ [°])



(b) Type B ($\theta=6$ [°])



(c) Type C ($\theta=8.5$ [°])



(d) Type D ($\theta=10$ [°])

Fig.2 Nozzle photograph used in experiment

が、衝撃波については、高感度の圧力センサにより衝撃波によると考えられる圧力変化を計測しているものの、気液二相流中の現象であるため、可視化はできていない。また、上澤ら⁽⁴⁾や金子ら⁽⁵⁾はベンチュリ管型ノズルの形状やポンプの吐出圧力等の作動条件の影響については、詳細に調査していない。Fig.3より、スロート下流が超音速となる流動状態は、ポンプ吐出圧力 p_w の影響を受けることがわかる。また、著者らの他の研究で得られたファインバブル径とポンプの吐出圧力との関係より、スロート下流が超音速なる流動状態は、気泡の粉碎が促進されてファインバブルの生成に有効であり、ベンチュリ管型ノズルでの理想的な流動状態と考えられる。

ポンプ吐出圧力 p_w を一定とし、Fig.2 (a) の Type A のノズルと、Fig.2 (b) の Type B のノズルで得られたノズル壁面圧力の分布を Fig.4 に示す。Type A と Type B でノズルスロート径が異なるが、相似形となるように製作したため、ノズルの長さが異なり、横軸のノズルスロートを原点とする距離は、ノズルスロート径で無次元化した x/d としている。図より、最低圧力から大気圧への圧力回復の過程に若干の相違があるものの、ノズル入口

からスロート下流の最低圧力域の圧力分布は Type A と Type B で一致しており、相似性が成り立つことがわかる。これは、ベンチュリ管型ノズルを設計する上で重要な知見となる。

ノズル広がり角 θ が及ぼす影響について、Fig.5 に示す。図 (a) は Fig.2 (c) の Type C の結果を、図 (b) は Fig.2 (d) の Type D の結果をそれぞれ示す。また、Fig.5 では抽気を行った結果も示しており、プロット点の記号の相違は抽気の有無を示す。図より、スロートの圧力に差が生じており、図 (b) の Type D はスロートの圧力低下量が減少し、さらにスロート下流で圧力が一定となる、ファインバブルの生成に理想的な流動状態は観察されない。したがって、ベンチュリ管型ノズルでは、ノズルの広がり角もファインバブルの生成に強く影響することがわかる。

ファインバブルの面積比 A^* と抽気量 Q_m との関係を Fig.6 に示す。Fig.6 は併せて水の供給流量 Q_w と、ノズル広がり角 θ が及ぼす影響についても示している。また、面積比 A^* は、水槽内のファインバブルの撮影画像を二値化処理して求めたバブル全体の面積割合で、バブルの生

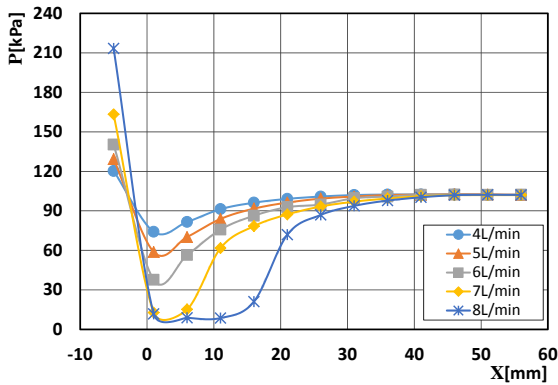


Fig.3 Pressure distribution obtained by Type A

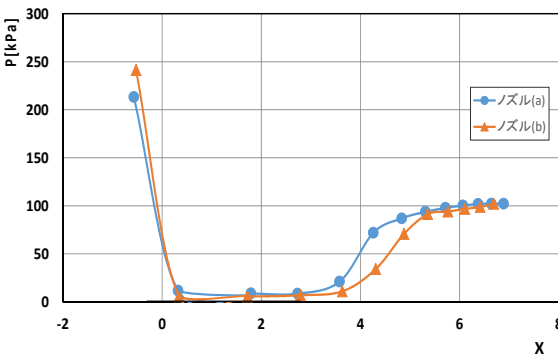
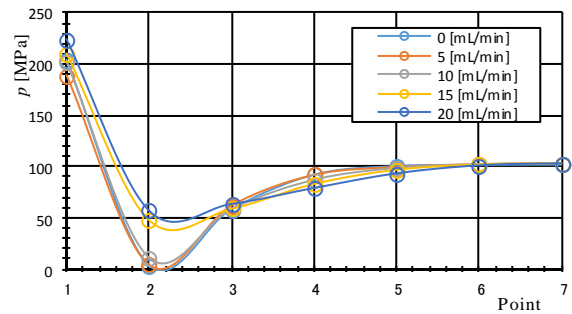
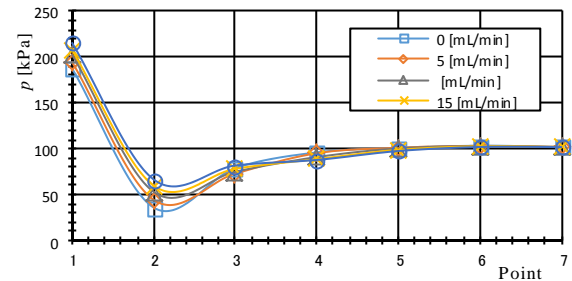


Fig.4 Effect of nozzle diameter for pressure distribution



(a) $\theta=8.5 [^\circ]$



(b) $\theta=10 [^\circ]$

Fig.5 Effect of nozzle angle for pressure distribution ($Q_w=8 [L/min]$)

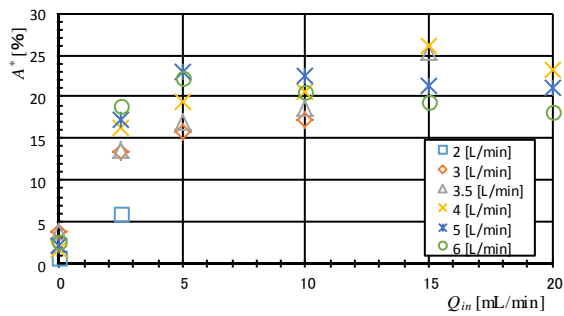
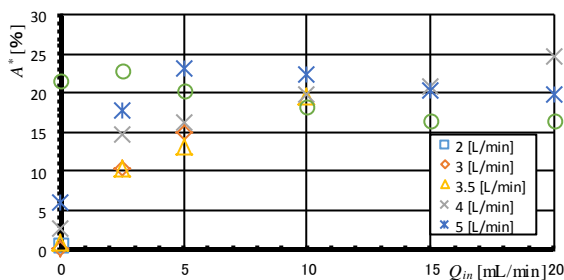
(a) $\theta=8.5$ [°](b) $\theta=10$ [°]

Fig.6 Effect of nozzle angle for bubble area

成量に相当する。図より、面積比 A^* 、すなわちバブルの総量は図 (b)、すなわち $\theta=10$ [°] のノズルが減少する傾向を示す。これは、Fig.5 で述べたように、ノズルスロートおよびスロート下流の圧力低下が減少し、気泡の粉砕が減少したためと考えられる。また、抽気量 Q_{in} の影響については、抽気を行うとバブルの面積比 A^* は増加するが、一定の面積比 A^* に達すると、その後は抽気量 Q_{in} を増加させても面積比 A^* は増加しない。これは、スロートでの気泡を増やしてもスロートおよびスロート下流の流路断面積が小さく、気泡が流れにくいこと、気泡の粉砕に限界があるためと考えられる。

以上のことから、スロート直径やノズル広がり角、ポンプの吐出圧力、ノズルへの抽気量を変化させるとノズルスロート下流の流動状態や生成されるバブル量に影響が生じ、ベンチュリ管型ノズルを使用する際は、適切な設計が必要であることがわかる。

4. 結論

本研究では、ベンチュリ管型ノズルでバブルを生成し、ベンチュリ管内の流動状態と生成されるファインバブルとの関係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) ポンプの吐出圧力 p_w もしくはノズルへの水の供給流量 Q_w が増加するとスロート圧力が低下し、断面積が増加するにも関わらず、スロート下流の圧力が一定となる流動状態が発生する。
- (2) ベンチュリ管型ノズル形状に相似則が成立し、スロート直径で無次元化すると、ノズル壁面圧力はよく一致する。今後は、成立範囲を詳細に調査する必要がある。
- (3) ノズル広がり角 θ が増加すると、ノズルスロート下流に低圧力領域が発生しにくくなり、バブル径が増加し、ファインバブルの生成量は減少する。

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) 村井裕一, 気泡による流体抵抗低減, 流体工学部門講演会講演概要集, No.07-16, (2007), pp.290.
- (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.

(2019年11月 5日 受理)