

## マイクロバブルの生成に及ぼす抽気の影響

安信 強, 島津公紀, 乙部由美子, 谷口 茂

### Effect of Air Supply for Generation of Microbubble

Tsuyoshi YASUNOBU, Masaki SHIMAZU, Yumiko OTOBE and Shigeru TANIGUCHI

#### Abstract

The microbubble has a lot of useful effects and is used for some industrial equipment. The low price and a simple equipment to generate the microbubble must be invented and the venture-type nozzle is used to generate the microbubble, as one solution. However, the amounts of microbubbles that occur are limited in the venture-type nozzle. This paper aims to clear the influence of air supply for the generating microbubble by the experiment. In this experiment, the venture-type nozzle is used as generation method of a microbubble and the influence of air supply is discussed. The pressure distribution on nozzle wall is measured by the transducer and the microbubble is observed by the microscope. From the experiment results, it has been found that it is possible to increase the amount of microbubbles by addition of the air to the venture-type nozzle.

**Keywords** : Microbubble, Cavitation number, Convergent-divergent nozzle, Bernoulli's equation, Steady flow

#### 1. はじめに

マイクロバブルは直径が  $\mu\text{m}$  のオーダーの微細な気泡であり, 例えば牡蠣の洗浄や湖沼の浄化<sup>(1)</sup>, 船体の摩擦抵抗の低減<sup>(2)</sup>などに応用され, 一定の効果を上げている。マイクロバブルは微細な気泡であるため, バブルに作用する浮力が非常に小さく, 液体中での上昇速度がかなり低下して液体中に留まる時間が長くなる特徴があり<sup>(3)</sup>, 洗浄や浄化では液体中に留まったバブルに不純物を吸着させて分離, 除去し, 摩擦抵抗の低減では船体近傍(境界層領域)の流体摩擦をマイクロバブルで抑制させている。

このように, マイクロバブルは多くの分野で利用され, さらにマイクロバブルより気泡径が小さいナノバブルも応用されているが<sup>(4)</sup>, マイクロバブルやナノバブルをより有効に活用するためには, 安価にマイクロバブルやナノバブルを発生させる装置の開発が必須である。そのため, 著者らは従来から構造が単純で安価に製作できるベンチュリ管型ノズルに着目し, ノズル形状や水の供給圧力などがマイクロバブルの発生に及ぼす影響を調査した<sup>(5)</sup>。本研究では, ベンチュリ管型ノズルによるマイクロバブルの発生量を増加させるためノズルに空気を抽気し, 抽気の効果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, ギア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, 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  $p_1$  と流量  $Q_w$  を

変化させることができるが, 本研究では空気の抽気効果の調査を目的としているため, ポンプの吐出圧力を  $p_1=0.2$  [MPa] に保って水の流量  $Q_w$  は一定とし, ノズルに抽気する空気の流量を  $5 \leq Q_i \leq 30$  [ml/min] で変化させて実験した。

次に, 計測については, ノズル壁面圧力の計測と, 水槽内のマイクロバブルの撮影を行った。本研究で製作したノズルは可視化のためにアクリル製であり, ノズルの大きさが比較的小さいため, 静圧孔をらせん状に設置して圧力の測定点を増やしており, 5 [mm] 間隔での圧力の測定が可能である。また, 水中にノズルを設置するため, 静圧孔にゴムチューブを取り付け, スキャンバルブを介して圧力センサにより圧力を計測しており, ほぼ同一時刻での同時計測が可能である。さらに, 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روس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。

本研究で使用したノズルの形状を Fig.2 に示す。本研究ではベンチュリ管型ノズルを基本とするが, ノズル内の断面積変化に伴う圧力変化をより有効に利用するため, 図に示すように先細末広ノズルの形状に近い。図に示したノズルのスロートからノズル出口までの長さは  $L=60$  [mm], ノズルのスロート直径は  $D^*=3$  [mm], ノズル出口直径は  $D_e=8$  [mm] であり, さらにこのノズルではノズルスロートから下流の壁面に直径  $d=2$  [mm] の孔をらせん状に12ヶ所あけ(図中の番号1~12), チューブを差し込んでいる。これは空気の抽気とノズル壁面圧力の計測のためであり, 今回の実験では, スロートにあけた穴(番号1)を抽気孔として空気の抽気に, 番号2以下の穴を静圧孔として圧力計測に使用した。次節で説明するように, ノズルスロート部の圧力は負圧であり, 大気圧との圧力差によりノズルスロート部に空気が自然に抽気され, 本

研究では Fig.1 に示すようにチューブの途中に流量計を取り付けて空気の抽気量を計測し、さらにチューブを絞って1分間あたりの空気の抽気量を  $5 \leq Q_i \leq 30$  [ml/min] で変化させた。

3. 実験結果と考察

マイクロバブル生成時のノズルの写真を Fig.3 に示す。図 (a) は空気の抽気なしのときの結果で、図 (b) から図 (f) は空気の抽気量  $Q_i$  を 10 [ml/min] から 30 [ml/min] まで増加させたときの結果を示す。ノズル内に白濁した領域が観察されるが、著者らの以前の研究結果より、これはノズル内の圧力差で気泡が微細なバブルに砕かれている状態を示しており、図 (a) の抽気量  $Q_i=0$  [ml/min] では、白濁後、マイクロバブルになるまで粉碎されている。これに対して、空気を抽気した図 (b) から図 (f) では、抽気のない図 (a) と同様にノズルのスロート下流に白濁が観察できるが、ノズルのスロート下流全般に渡って発生しており、さらにノズル出口から放出されている。した

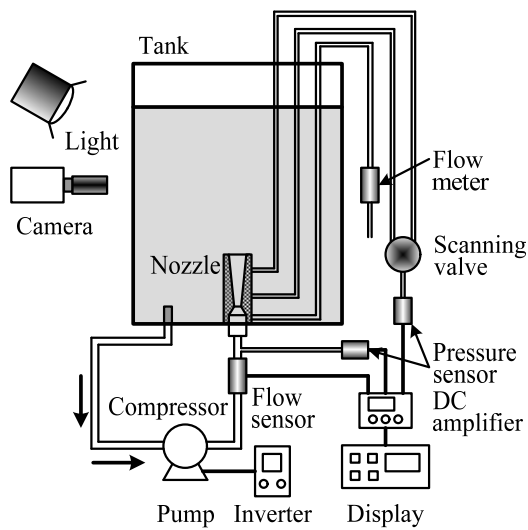


Fig.1 Schematic layout of experimental apparatus

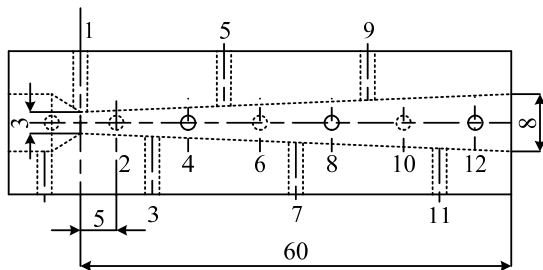
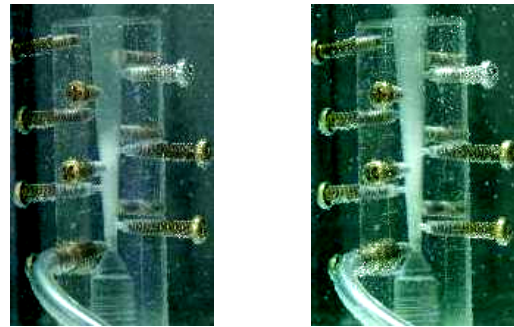


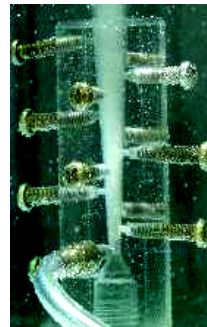
Fig.2 Nozzle geometry used in this study



(a)  $Q_i=0$ [ml/min]



(b)  $Q_i=10$ [ml/min]



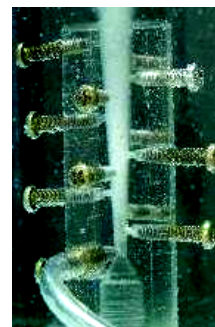
(c)  $Q_i=15$ [ml/min]



(d)  $Q_i=20$ [ml/min]

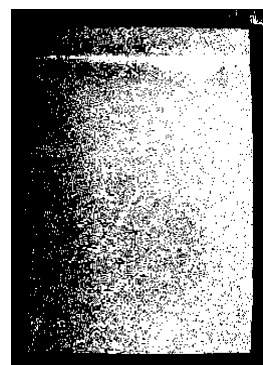


(e)  $Q_i=25$ [ml/min]

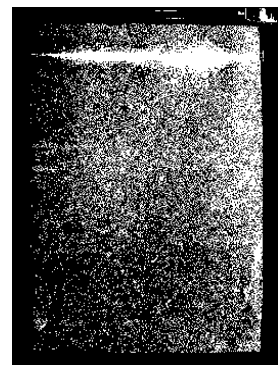


(f)  $Q_i=30$ [ml/min]

Fig.3 Typical photograph showing generation of Microbubble



(a)  $t=10$  [sec]



(b)  $t=60$  [sec]

Fig.4 Typical photograph using image thresholding method

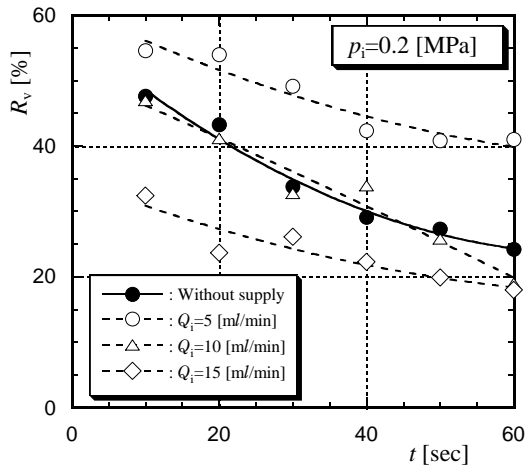


Fig.5 Relation between area ratio and time

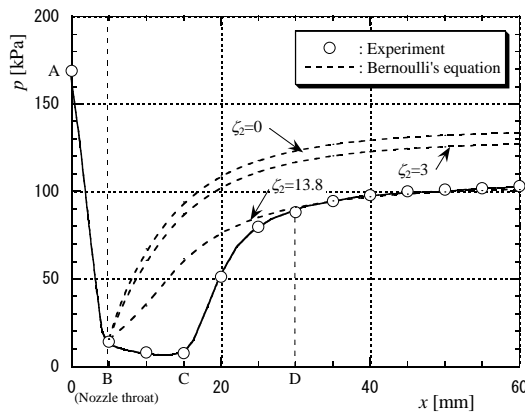


Fig.6 Pressure distribution on nozzle wall measured by pressure sensor<sup>(5)</sup>

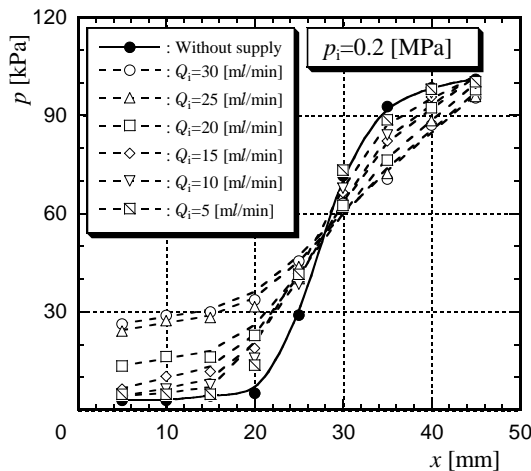


Fig.7 Pressure distribution on nozzle wall showing influence of air supply

がって、白濁領域が広いことから、微細な気泡量自体は増加しているが、マイクロバブルになるまで粉碎されているかについては、さらに詳細に調査する必要がある。

マイクロバブル生成時のノズルの写真に対して、二値化処理した結果を Fig.4 に示す。この図は空气の抽気量が  $Q_i=0$  [ml/min] のときの結果で、白色部分がバブルを示す。図より、時間の経過とともにバブル量が減少していることがわかる。

バブルの面積比率  $R_v$  の時間変化を Fig.5 に示す。図の横軸  $t$  がバブルの発生を停止させてからの時間、縦軸  $R_v$  が算出したマイクロバブルの面積比率を示しており、面積率とは、マイクロバブルの面積と二値化処理を行った解析対象領域との面積比である。図中のプロット点は実測結果、曲線は実測値に対する近似曲線である。図より、いずれの空气抽気量でも時間が経過すると緩やかに面積比率  $R_v$  が減少している。これは、マイクロバブルが発生してある程度、時間が経過すると、マイクロバブルが消滅するためである。また、空气の抽気量が  $Q_i=15$  [ml/min] まではマイクロバブルが発生しており、特に  $Q_i=5$  [ml/min] では空气供給をしていない場合よりマイクロバブル発生量が増加している。しかし、 $Q_i=15$  [ml/min] を超えると空气の抽気のない場合よりもマイクロバブルの発生量が減少しており、今回の実験条件では、空气の抽気量が  $Q_i=15$  [ml/min] 付近にマイクロバブルの量を増加させる最適な空气供給量が存在することがわかった。

ノズル壁面の圧力分布を Fig.6 に示す。この図は著者らの前回の報告<sup>(5)</sup>で示しており、本研究と同一形状のノズルを使用し、ポンプの吐出圧力を  $p_i=160$  [kPa] としたときの実験結果で、抽気のない場合のノズル内の流動状態の補足のために再掲した。

図中の○印が実験結果、実線および破線はベルヌーイの式による計算結果を示しており、記号  $\zeta_2$  はノズルのスロートから出口までの間の損失係数である。また、図中の点A はスロート上流の測定点、B はノズルスロート、C はスロート下流の圧力が増加し始める位置、D は急激な圧力増加が終わる位置を示している。ノズル内で壁面摩擦などの損失がない場合、ノズルの壁面圧力の分布は破線で示す  $\zeta_2=0$  のときの計算結果と同等となると考えられるが、実際はスロート部で圧力は最少となったのち、スロート下流で断面積が増加しても圧力は回復せず、記号 C の位置で圧力は急激に増加し、ノズル出口で大気圧となる。これは、ノズルスロートで圧力が最小となるため飽和度が低下して水中に溶解していた空气が気泡として析出し、記号 C の位置での急激な圧力上昇で気泡が碎かれ、マイクロバブルが生成されるためである。実測した圧力分布にベルヌーイの式を適用すると  $\zeta_2=13.8$  のときの結果と概ね一致し、この見かけの損失はマイクロバブルの生成に必要なエネルギーを表すと想定される。

空气を抽気したときのノズル壁面の圧力分布を Fig.7 に示す。横軸はスロートからの距離  $x$ 、縦軸が壁面の絶

対圧力  $p$  を示している。図中の●印は抽気のない場合、すなわち、Fig.3 に相当する結果であり、他の記号は注記したときの結果である。また、実線および破線は、実験結果に対する近似曲線を示す。図より、●印で示す空気の抽気がない場合はスロートとノズル出口付近の圧力差が約 100 [kPa] 程度であり、スロート下流の約  $x=20$  [mm] の位置で急激に圧力が上昇し、ここで気泡が砕かれてマイクロバブルが生成されていると推測される。これに対して、空気を抽気した場合はスロートおよびスロート下流の圧力は増加し、抽気量  $Q_i$  が増えるにつれて圧力も上昇してノズル出口付近との圧力差は減少し、空気の抽気量  $Q_i=30$  [ml/min] では約 70 [kPa] 程度となる。さらに、 $Q_i$  の増加に伴い、圧力が増加する位置がスロート側に移動し、圧力の増加割合も緩やかになる。これらのことから、空気の抽気量  $Q_i$  によってスロート下流の圧力、出口との圧力差および圧力の増加割合が変化することがわかる。そのため、空気の抽気量  $Q_i$  が増加した場合は、マイクロバブルの元となる空気量は増えるが、空気の気泡をマイクロバブルに粉碎する圧力差は減少し、微細な気泡は増えるものの、マイクロバブル量はそれほど、増加しないと推測される。

#### 4. 結論

本研究では、ベンチュリ管型ノズルを用いたマイクロバブルの生成に対して、ノズルスロート部より空気を抽気し、マイクロバブルの生成に及ぼす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) ノズルに空気供給部を設置し、空気を抽気することによりマイクロバブルの発生量を増加させることができる。
- (2) ノズルに供給する水の流量などの条件が一定の場合、マイクロバブルの発生量が最大となる最適な空気の抽気量がある。今回の実験では、 $Q_i=5$  [ml/min] が最適な空気供給量であり、これを超過すると気泡量は増えるが、マイクロバブルの発生量は増加しなかった。
- (3) ノズルのスロート部に空気を抽気した場合、スロートおよびその直後の圧力は抽気なしの場合より増加し、ノズル出口との圧力差も減少する。また、スロート下流の急激な圧力上昇で気泡が粉碎されるが、空気を抽気した場合、圧力の上昇割合が減少する。
- (4) 空気を抽気することによりノズル内の圧力分布が変化し、そのため、気泡は粉碎されるが、マイクロバブルになるまで粉碎されずに放出される。

#### 参考文献

- (1) 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.
- (2) 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.
- (3) 藤原暁子他3名, ベンチュリ管を用いたマイクロバブル発生装置における気泡微細化メカニズム, 日本機械学会年次大会講演論文集, Vol.2004, No.2, (2004), pp.83-84.
- (4) 田村 洋, 液体ロケットエンジン噴射器内の流れと振動燃焼, ながれ, 24, (2005), pp.307-341.
- (5) 先細末広ノズルを用いたマイクロバブルの発生に関する研究, 島津公紀, 安信強, 樫村秀男, 北九州工業高等専門学校研究報告, 第42号, (2009), pp.71-76.

(2014年11月10日 受理)