

ベンチュリ管内の気泡流の流動状態の解析

安信 強, 蔣 欣, 島津公紀

Analysis of the Flow State of Bubble Flow in Venturi Tube

Tsuyoshi YASUNOBU, Xin JIANG and Masaki SHIMAZU

Abstract

Venturi tube fine bubble generator has been focused in the recent studies due to its simple structure, high generation efficiency and low power consumption. In this work, the small fine bubble generator is developed. The venturi tube is embedded in an oral irrigator for fine bubble generation. The flow state and generation performance are investigated by numerical simulations and experiments. In the numerical simulation, the models with the same geometrical parameters with the real applications are made and Ansys Fluent is used to implement 3D CFD simulation to analyze the internal flow state and evaluate the generation performance. In the experiment, the flow states in the nozzle are photographed with a high-speed camera, and the area ratios of the bubbles in the tank are calculated to analyze the production volume of the bubbles. Both of the simulation results and experimental results show that the generation performance is dependent on the geometrical parameters of venturi tube, and the effective divergent angle and divergent length of venturi tubes, demonstrated the best performance compared with others.

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

1. 緒 論

直径 $100\mu\text{m}$ 未満の気泡はファインバブルと呼ばれ、洗浄や殺菌、消毒、脱臭などの性質を持ち、農業や食品、医療分野など幅広く利用され、応用に向けたさらなる研究が行われているが⁽¹⁾、その発生方法の1つとして、ベンチュリ管が利用されている。通常、ベンチュリ管は管内の断面積変化を利用して流量計測に用いられるが、断面積変化により圧力変化も生じる。そのため、ベンチュリ管に給水すると、流量などの条件によっては最小断面積部（以下、スロートと呼称）で大気圧以下まで減圧され、水中の溶存酸素が気泡となり、スロート下流での断面積の増加による流れの減速、圧力上昇によって気泡が微細化される。このようにベンチュリ管を用いたファインバブルの生成装置は、構造が簡単でバブル生成のための外部電力が不要であり、発生効率も良好であることから注目されているが、バブルの生成量の向上や、一層の微細化には、ベンチュリ管内の気液二相流の流動状態や気泡の挙動、ベンチュリ管の形状が及ぼす影響などを明らかにする必要がある。

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⁽²⁾を行っているが、用途や作動条件に合わせたベンチュリ管の最適な設計手法については、まだ確立されていない。この原因として、ベンチュリ管スロート部下流の気液二相流および気泡の微細化の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、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のような急激

な圧力変化が生じて気泡の微細化が促進させるとの解析^{(3) (4)}や、スロート下流で境界層がはく離して気泡と干渉し、気泡の微細化が促進される^{(5) - (7)}などの報告がなされているが、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^{(5) - (7)}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。本研究では、今後の需要を想定して、ファインバブルの生成が可能なベンチュリ管の小型化を目指しているが、流路が小型化されると流体の粘性が流れ場に及ぼす影響が大きくなり、ベンチュリ管内の気液二相流の流動状態や気泡の挙動の解析が重要となる。そのため、本研究では、スロート部の直径が $1[\text{mm}]$ 程度の小型のベンチュリ管の開発を念頭に、ベンチュリ管内の微小な流路中の気液二相流の流動状態や気泡の挙動について、数値シミュレーションをもとに実験を併用して調査し、さらに気泡の生成に最適なベンチュリ管の形状について考察することを目的とする。

2. 解析方法

本研究で解析するベンチュリ管のモデルをFig.1に示す。これまでの研究から、ベンチュリ管でのファインバブルの生成は、スロート部下流の広がり角 α 、スロート比 d/D （スロート部直径 d とベンチュリ管出口直径 D の比）が影

響を及ぼす⁽³⁾⁻⁽¹⁰⁾。本研究の目的である小型ベンチュリ管の外形寸法は直径20[mm] 以下, 全長50[mm] 以下を想定しており, スロート部直径を $d=1$ [mm] に固定し, Table 1 に示すように広がり角を $\alpha=1.2\sim5$ [°], スロート部下流の長さを $L=10\sim40$ [mm]で変化させた①～⑥の6種類のベンチュリ管を設計し, 解析する。

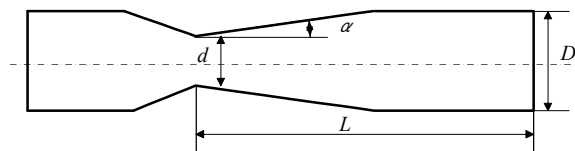


Fig.1 Geometric parameters of the venturi tube

Table 1 Geometric parameters of the venturi tube

No.	広がり角 α [°]	スロート径 d [mm]	出口径 D [mm]	スロート下流 長さ L [mm]
①	1.2	1	2.7	40
②	2.5	1	2.7	20
③	2.5	1	4.5	40
④	5	1	2.7	10
⑤	5	1	4.5	20
⑥	5	1	8	40

Table 2 Simulation conditions

Model	two-phase flow-Population Balance
Calculation function	SST $k-\omega$
Particle diameters	0.001mm, 0.002mm, 0.003mm, 0.004mm, 0.006mm, 0.010mm

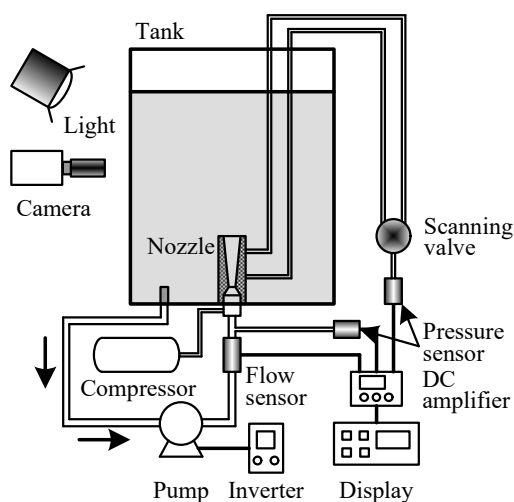


Fig.2 Schematic layout of experimental apparatus

2. 1 実験方法

本研究で使した実験装置の系統図をFig.2に示す。実

験装置は, 水槽, ノズル, ギアポンプ, 圧力センサ, 流量センサにより構成されている。作動流体には水を使い, 水槽内の下底にベンチュリ管を装着し, インバータ装置によりポンプの回転数を変化させてベンチュリ管への供給流量を $Q=2, 3$ [L/min] に設定して水槽内にバブルを発生させる。水槽内のファインバブルおよびノズル内の流動状態をデジタルカメラおよびマイクロスコープで撮影し, 二値化処理を用いて気泡の面積比 A^* を計測し, バブルの生成量とみなして解析する。さらに粒子径解析システムを用いて, 生成される気泡の粒子径の測定を行う。

2. 2 数値解析方法

本研究では, Fig.1に示すベンチュリ管を解析対象とし, Table 1に示すベンチュリ管を計算モデルとして定義して3次元シミュレーションを行う。ソルバーには, 流体解析の定番であるAnsys Fluentを使用し, 本研究では気液二相流を対象とすることから, 計算モデルとしてVOF圧縮流体気液二相流モデルを使用し, 内部の流れ状態の解析を行った。現時点では, 気泡の析出の過程の計算は難しいため, ボイド率を与え, 一定の気泡が生成された後の, 気泡の微細化について計算で調べる。シミュレーションの条件をTable 2に, 代表的な計算格子をFig.3に示す。

3. 結果と考察

3. 1 実験結果と考察

マイクロスコープを用いて撮影した, 気泡の撮影画像をFig.4に示す。マイクロスコープによる撮影のため, 水槽の限られた領域での撮影結果であるが, 一定量のファインバブルを観察することができる。よって, 本研究で目的とする, スロート部の直径が1[mm] の小型のベンチュリ管でもファインバブルの生成が可能であることが示された。

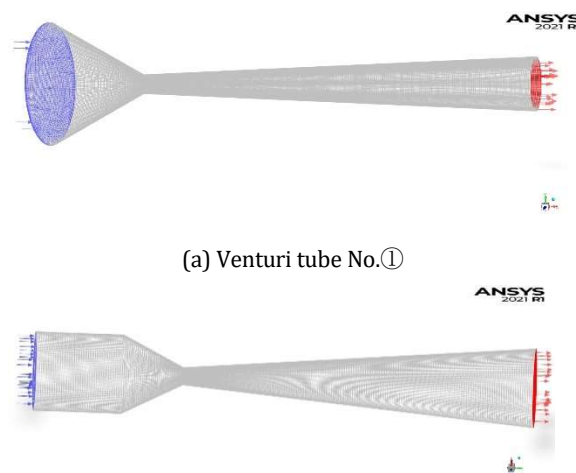


Fig.3 Samples of the simulation mesh

本研究では, Fig.4の撮影画像から, 観察できる気泡の最小径を計測した。Fig.5は実験で使した6種類のベンチ

ユリ管で計測された気泡の最小径を示している。図より、ベンチュリ管の形状で差があるものの、マイクロスコープで目視可能な測定で $30[\mu\text{m}]$ 程度の気泡が確認され、本研究で製作したベンチュリ管でファインバブルが生成されていることがわかる。

Fig.6は供給流量 Q と水槽内に生成された気泡の面積比 A^* との関係を示しており、Fig.6は実験結果で、Table 1に示す6種類のベンチュリ管に対して、供給流量を $Q=2$, $3[\text{L/min}]$ と変化させて行った結果である。

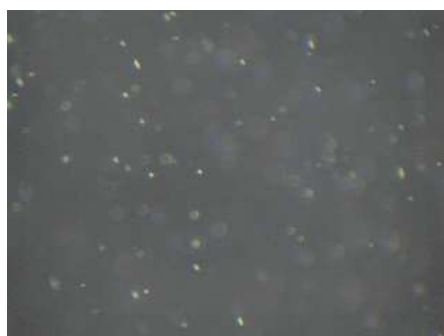


Fig.4 Sample picture of fine bubbles

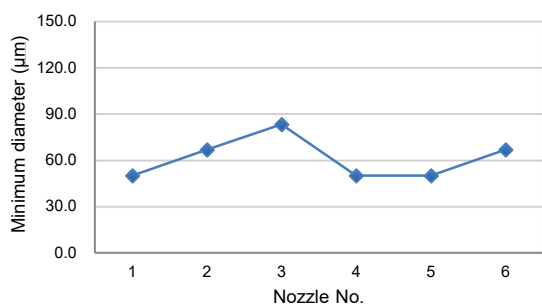


Fig. 5 Relationship between minimum diameter of bubble and nozzle type

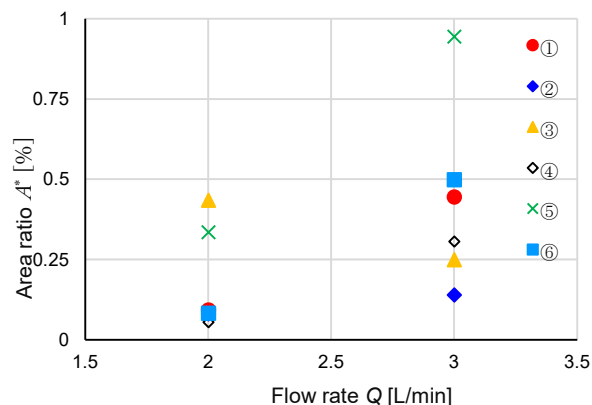


Fig. 6 Relationship between area ratios of nozzles different with the nozzle inlet flow rate

図より、供給流量 $Q=2$ [L/min]における気泡の面積比 A^* はベンチュリ管③と⑤が比較的大きいが、供給流量が $Q=3$

[L/min]の場合の面積比 A^* はベンチュリ管⑤が最も大きく、ベンチュリ管⑥と①も比較的大きいことがわかる。また、ベンチュリ管③に着目すると、供給流量が $Q=3$ [L/min]の場合の面積比 A^* に比べて $Q=2$ [L/min]における面積比 A^* の方が大きい。この傾向は他のベンチュリ管の結果と相違するが、これは流量 $Q=2$ [L/min]で生成されたバブルの気泡径が大きいことが原因だと考えられる。

以上の実験結果より、ファインバブルの生成が可能な、スロート部の直径が $1[\text{mm}]$ の小型のベンチュリ管の開発に成功し、引き続き、安定してファインバブルを生成できる最適なベンチュリ管の形状を検討する必要がある。

3. 2 数値シミュレーション結果と考察

数値シミュレーションより得られた、広がり角 α の異なるベンチュリ管内のボイド率分布をFig.7に示す。図は6種類のベンチュリ管のうち、No.①, No.②, No.⑤, No.⑥の結果を示す。また、ボイド率の変化を色で示しており、青色はボイド率が0、すなわち水を示し、青以外の濃い色はボイド率が0から1の気液二相流を示す。いずれの結果もスロート部直後からベンチュリ管出口までの領域で気泡が発生していることがわかる。また、気泡はベンチュリ管中心、すなわち主流部より壁面付近に分布しており、さらにベンチュリ管①と②では、スロートの直後、もしくはスロート下流の壁面付近に大量の気泡が生成されていることがわかる。これに対して、ベンチュリ管⑤のボイド率の変化は少なく、他の結果に比べて気泡の微細化などの変化が少ないと考えられる。また、ベンチュリ管⑤とベンチュリ管⑥は広がり角 α 、スロート径 d が同一で、スロート下流の長さ L 、すなわちスロート比 d/D の影響を示す結果であり、図(c)より図(d)の方がスロートの直後、もしくはスロート下流の壁面付近に大量の気泡が生成されており、広がり角 α に加え、スロート比 d/D の影響も大きいことを顕著に示している。

数値シミュレーションより得られた、広がり角 α の異なるベンチュリ管の中央断面における拡大部の直径分布をFig.8に示す。直径の変化を色の变化で示しており、青から赤に変化するにつれて、気泡の直径は増加する。図(d)のベンチュリ管⑥では、スロート付近で気泡が結合し、図(a)のベンチュリ管①では、気泡径が大きくなる領域が最も広くなることがわかる。このことから、ベンチュリ管スロート下流の広がり角 α と、スロート部下流の長さ L 、すなわちスロート比 d/D はスロート下流の気泡の微細化に強く影響し、壁面と主流部で現象が異なることから、流体の粘性、壁面摩擦の影響を大きいと考えられ、特に本研究の目的である小型のベンチュリ管の設計においては、スロート下流の広がり角 α 、スロート部下流の長さ L もしくはスロート比 d/D の適切な選定が重要であることがわかる。

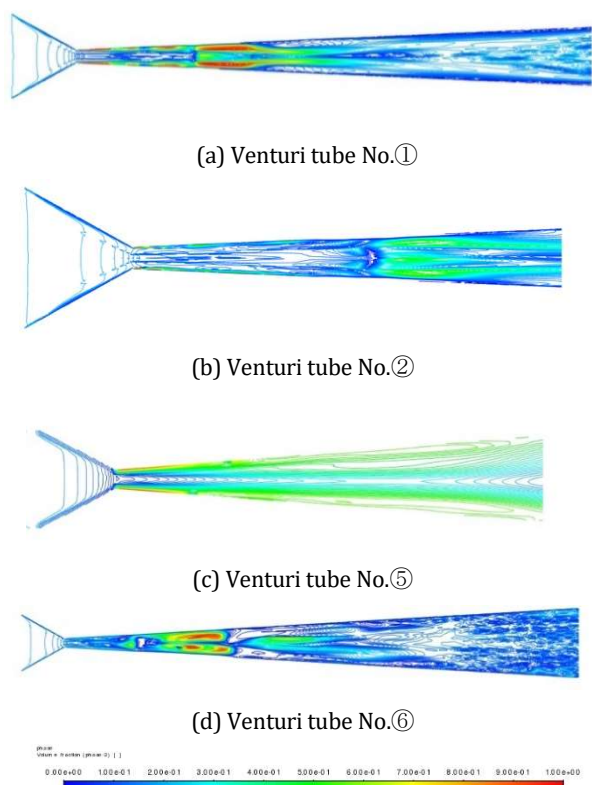


Fig. 7 Void fraction distributions inside the nozzles

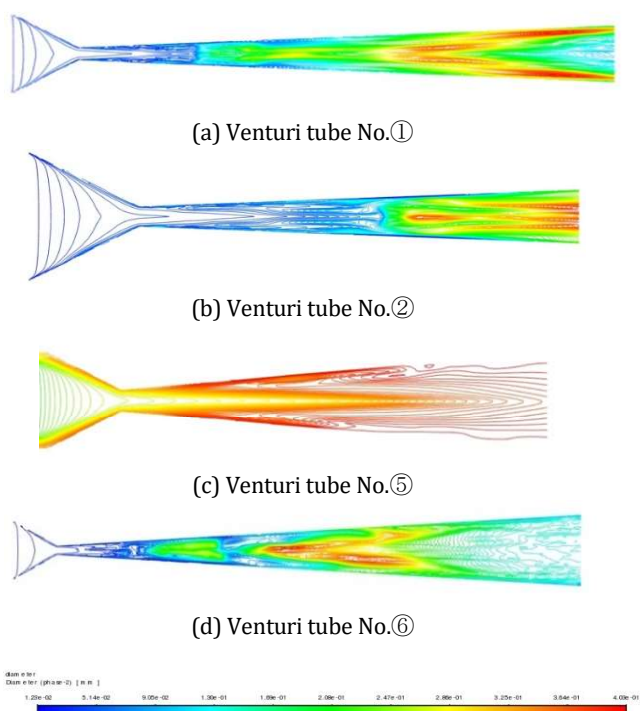


Fig. 8 Diameter distributions in the divergent part

4. 結 論

本研究では、ベンチュリ管の形状がファインバブルの発生に与える影響について、数値シミュレーションと実験により検討した。得られた結果を以下に要約する。

- (1) 最小で30 [μm] 程度の気泡が確認され、本研究の目的とするスロート径が1[mm]の小型のベンチュリ管でもファインバブルの生成が可能である。
- (2) 気泡の微細化はスロート下流の主流部と壁面との間の領域で観察され、粘性による速度差の影響が大きいと考えられる。
- (3) スロート下流の広がり角 α 、スロート部下流の長さ L もしくはスロート比 d/D がファインバブルの生成に強く影響する。

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」, (2018).
- (2) 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., and 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.
- (9) Feng, Y. et., Leveraging 3D Printing for the Design of High-Performance Venturi Microbubble Generators, Ind. Eng. Chem. Res., Vol. 59, (2020), pp. 8447-8455.
- (10) Lee, C. H. ed., Experimental investigation of microbubble generation in the Venturi nozzle, Int. J. of Heat Mass Tran, Vol. 136, (2019), pp. 1127-1138.

(2022年11月1日 受理)