水平摺動するノズルからの微細気泡生成*

Smaller Bubble Formation from a Horizontally Oscillating Nozzle

村 上 大地郎**
MURAKAMI Daijiro

寺 坂 宏 一***
TERASAKA Koichi

藤 岡 沙都子***
FUJIOKA Satoko

Abstract Fine bubbles are used for cleaning system, separating process, food industry and so on. However, commercially available devices for fine bubble generation cannot be applied for particle dispersion liquid because they need liquid pumps and particles are accumulated on their systems. Moreover, the bubble diameter cannot be controlled in those devices. The uniformed and controlled bubble diameter is important for a reasonable industrial device design. Therefore, in this study, a novel method for fine bubble generation without liquid circulation was developed. A horizontally oscillating micro-nozzle was used to make bubbles small. The effect of the gas flow rate, the oscillating frequency, and the oscillation amplitude on the average bubble diameter was investigated experimentally. Moreover, visualization and quantification of liquid motion around the oscillating nozzle was carried out in this study. It was clarified that the liquid viscous force due to the relative velocity of the nozzle motion to the liquid motion enhances the bubble detachment from the nozzle in this method.

Keywords: Fine bubble, Oscillating Micro-nozzle, Bubble formation, Bubble dispersion

1. 結 言

気液接触装置はガス吸収器、気泡塔、バイオリアクターなど多くの工業装置に利用されており、気液接触面積はプロセス性能に大きく影響する。気液間の物質移動の向上には気泡の微細化や合体防止、工業装置設計には気泡直径の均一化や制御が重要である。既存の発生装置では外部液循環ラインなど複雑な構造や、気泡径が自由に制御できないなどの欠点がある[1-3]。そこで、外部への液の取り出しが不要かつ生成気泡径の制御が可能な気泡の微細化技術の開発が期待されている。

気泡径を制御可能な気泡発生法として、単一孔において成長過程の気泡に対して、気泡成長方向に垂直な水流（十字流）を加えて気泡のせん断を行い、単一孔からの早期離脱を促す方法が挙げら

れる[4]。Tan *et al.* (2000) は十字流条件下における非球形気泡成長モデルを提案し、実験結果と計算結果の良好な一致を得た[5]。Tokanai *et al.* (2000) は、十字流条件において気泡の微細化の様子を観察し、十字流中条件で生成する気泡の容積を、静止液中で単一孔から離脱する際のフォースバランスに粘性力および気泡形状を考慮に入れたモデルで表現した[6]。Terasaka *et al.* (2003) は二重円管を用いて発生させた螺旋液流を用いて、高粘性液体中でノズルから生成する気泡の微細化およびサイズ制御に成功し、ガス流量およびせん断速度から気泡容積が決定する相関式を導出した[7]。

さらに、液の運動ではなく、ノズル自身の振動により気泡離脱を促進する方法が検討されてい

* 2016.11.14 受付

** 慶應義塾大学大学院理工学研究科開放環境科学専攻 〒223-8522 神奈川県横浜市港北区日吉 3-14-1
TEL: (045)566-1575 FAX: (045)566-1575 E-mail: terasaka@apple.keio.ac.jp

*** 慶應義塾大学理工学部応用化学科

る。ノズル振動条件下での気泡生成についてはこれまでも、MacIntyre (1967) による水平振動下での気泡の微細化や、Vejrazka *et al.* (2008) による鉛直方向の振動による気泡径制御が報告されている。前者は最小気泡径 268 μm 、後者は最小気泡径 220 μm を達成したが、水平方向の周波数や振幅といった振動条件が生成気泡径に及ぼす影響に関してはまだ明らかにされていない[8,9]。

また、従来の工業的微小気泡発生法においては、強制液循環のための外部ラインや液駆動ポンプが必要となるため、廃水処理分野や洗浄分野への応用など、循環液流に固体や異物等の分散物が存在する場合、発生装置内での閉塞や装置自体の能力低下が問題となる。Tamura & Uehara (2013) は従来のマイクロバブル発生器を用いて汚染水中にマイクロバブルを懸濁させた際に、マイクロバブル発生装置内に汚染物質が詰まり、装置の使用ができなくなった事例を指摘した[10]。

そこで本研究では強制液循環を用いずに、かつ気泡径制御可能な微小気泡発生法として、微細孔を有した円筒型ノズルを水平方向に高速度振動(以下、撓動)させる方法を提案し、生成気泡径に及ぼすガス流量、撓動周波数および撓動振幅の影響を調べた。また、粒子追跡法を用いて撓動ノズル周りに発生する液流動の観察および定量化を行い、本発生法における気泡微細化のメカニズムを検討した。

2. 実験装置及び方法

2.1 気泡径測定

Fig. 1 に実験装置概略図を示した。長さ 20 mm × 外径 1.5 mm × 内径 20 μm のセラミック製微細単孔ノズルを撓動装置に取り付け、撓動装置を高さ 20 cm × 横幅 30 cm × 奥行き 10 cm のアクリル樹脂製の水槽中に設置した。液相には温度 23 ± 1℃ の水道水を使用し、リニアコンプレッサ (AC0207、日東工器) で圧縮した空気を微細孔ノズルに流量 Q_G [mL/min] で圧入し、気泡を連続的に発生させた。撓動装置はモータと駆動部と接続されており、モータの回転数により撓動周波数を $f = 0\sim60$ Hz の範囲で制御した。撓動幅は $W = 3.0$ mm および 6.0 mm の 2 種類で実験を行った。高速度カメラ (FASTCAM-SA5、フォトロン) に 50 倍ズームレンズ (VH-Z00R、キーエンス) を接続し、微細孔ノズルから気泡が生成する様子を 125

～ 6000 fps で撮影した。撮影された画像から、画像解析ソフト (ImageJ1.6.0、NIH) を用いて楕円近似により気泡の面積を測定した。近似された楕円の面積と等しくなる円相当径を気泡径 d とした。各条件について 50～60 個の気泡について解析を行い、平均生成気泡径 d_{ave} [μm] を算出した。本実験で撮影された画像の解像度は 21.1 μm であり、画像解析により測定された気泡径は最大 25% の誤差を含む。

気泡がノズル先端から離脱した瞬間のノズルの撓動中心からの変位を画像より求め、変位を撓動振幅で除して無次元撓動変位 $\hat{x}$ とした。本研究では気泡がノズル中心から離脱し、気泡周囲の界面が全て液相で囲まれた瞬間を気泡離脱とみなした。

さらに、 i 番目の気泡がノズル先端から離脱してから、 $i+1$ 番目の気泡がノズル先端から離脱するまでの気泡発生間隔 Δt_i [s] を測定し、50～60 個の測定データから平均気泡発生間隔 $\overline{\Delta t}$ [s] を求めた。撓動周期 T [s] を $\overline{\Delta t}$ [s] で除し、式 (1) より撓動 1 往復あたりの気泡生成数 n [個] を求めた。

$$n = \frac{T}{\overline{\Delta t}} \quad (1)$$

Fig. 1 Experimental apparatus.

2.2 液流動の可視化

Fig. 1 で示した水槽中にトレーサーとして粒径 63~150 μm 、比重 1.02 のダイヤモンド粒子 (HP20SS、三菱化学) を分散させた。気体は供給せずにノズルを撓動させ、 $f = 0\sim60$ Hz、 $W = 3.0, 6.0$ mm の各条件において、撓動に伴うトレーサー粒子の運動を高速度カメラにより 125 ~ 6000 fps で撮影した。撮影された動画から、流体計測ソフトウェア (Flow-vec、株式会社ライブラリー) を用いて、液流動の解析を行った。撓動ノズル上部の領域を一边 3.0 mm の正方形セルに区切り、各セル内の粒子の平均速度を求めた。ノズルが各セルを通過するときに発生しているセル内の粒子平均速度の水平方向の成分を液速度 U_L [mm/s] とした。

3. 実験結果および考察

3.1 気泡径

Photo 1 に各周波数における生成気泡の状態を示した。ノズル静止条件においては、気泡は約 950 μm まで成長したが、撓動条件下においては気泡が微細化された。

Photo 1 Comparison of bubble formation behavior ($Q_G = 0.115$ mL/min).

Fig. 2 に $W = 3.0, 6.0$ mm とした際の撓動周波数が平均生成気泡径に及ぼす影響を示した。いずれの撓動幅においても撓動周波数の増加に伴い平均生成気泡径は減少した。また、撓動幅の増大に伴って平均生成気泡径は減少したが、撓動周波数の増大に伴って振幅の違いによる平均生成気泡径の差は減少した。本研究で得られた最小平均気泡径は $W = 6.0$ mm、 $f = 60$ Hz、 $Q_G = 0.0647$ mL/min、において $d_{\text{ave}} = 105$ μm であった (図省略)。

以上より、気泡生成ノズルの撓動により気泡離脱が促進され、撓動条件すなわち撓動周波数および振幅の調整により平均生成気泡径の制御が可能となった。

Fig. 2 Comparison of the average bubble diameter between oscillation amplitude ($Q_G = 0.115$ mL/min).

3.2 気泡径分布

Fig. 3 には平均生成気泡径が最小となる $W = 6.0$ mm、 $f = 60$ Hz、 $Q_G = 0.0647$ mL/min の条件から Q_G を増加させていった場合における気泡径分布依存性を示した。ガス流量の増大に伴って気泡径分布は増大方向にシフトした。低ガス流量において気泡径分布は単一ピークとなったが、 Q_G の増大に伴って気泡径分布はブロードとなり、高ガス流量 ($Q_G = 0.115, 0.171$ mL/min) において 220 μm 付近にもピークが存在した。このピークは、撓動端付近ではノズルの速度が低下するため、高ガス流量域においては撓動による微細化の影響を受けず、気泡成長が促進されたためであると考えられる。一方、低ガス流量域では撓動端付近であっても気泡に対するガスの供給速度が遅く、気泡が十分に成長しなかったため単一ピークとなったと考えられる。以上より、気泡径の単分散化においては、低ガス流量が有効である。

Fig. 3 Comparison of the bubble distribution among gas flow rate ($f = 60$ Hz、 $W = 6.0$ mm).

3.3 気泡離脱の位置依存性

Fig. 4 に $Q_G = 0.115 \text{ mL/min}$ における、 $W = 3.0 \text{ mm}$ とした際の各撓動周波数における気泡径の撓動位置依存性を示した。なお、図が煩雑になるので $f = 30, 40, 50 \text{ Hz}$ のデータは省略した。「低周波数帯 ($f = 5 \sim 10 \text{ Hz}$) においては撓動端撓動中心 ($\hat{x} = 0$) と比較して、($\hat{x} = -1.0, 1.0$) 付近での気泡離脱が支配的であったが、中周波数 ($f = 20 \text{ Hz}$) においては撓動端付近に加えて撓動中心 ($\hat{x} = 0$) 付近での離脱が見られ、 $f = 5 \sim 20 \text{ Hz}$ の範囲では気泡離脱が周期的同一点で行われた。高周波数 ($f = 60 \text{ Hz}$) では撓動全体で気泡が離脱した。

また、撓動中心で離脱する気泡は撓動端で離脱する気泡よりも気泡径が減少した。これは、撓動中心においてノズルの撓動速度が最大となり気泡離脱が促進されたためである。低周波数帯において撓動端での離脱が支配的となるのは撓動速度が小さく、ガスの供給による気泡成長が支配的となり比較的大きな気泡が生成するためである。

Fig. 5 に撓動 1 往復あたりの気泡生成数 n におよぼす撓動周波数の影響を示した。気泡生成数は撓動周波数の増大および撓動幅の増大に伴って増加した。

Fig. 4 Oscillation position dependency of bubble diameter
($W = 3.0 \text{ mm}$, $Q_G = 0.115 \text{ mL/min}$).

Fig. 5 Comparison of the number of bubble detachment points.

3.4 気泡微細化メカニズムの検討

Photo 2 に粒子追跡法 (PTV) によって観察された撓動ノズル上端の液流動の様子を示した。撓動ノズル上部には撓動方向とは逆方向の液流 (相対流) の存在が確認された。

Photo 2 Photograph of the liquid motion
($W = 6.0 \text{ mm}$, $f = 5 \text{ Hz}$)

Fig. 6 には、撓動ノズル速度 $U_0 [\text{mm/s}]$ と PTV で解析されたノズル上端の液速度 U_L の時間変化を示した。撓動ノズル速度と液速度は逆位相で時間変化し、 $U_0 = U_L = 0$ となる点において、両者の正負が入れ替わった。 U_0 および U_L が共に最大となる位置は撓動中心であり、その相対速度 $|U_L - U_0|$ は撓動中心において最大となった。単一孔より生成する気泡に対して浮力以外の気泡離脱を促す力 F を加えると体積の小さいうちに気泡を離脱できる[1]。本研究の場合、 F はノズル上端付近で発生する相対流に由来する液粘性抵抗力であると考えられる。

Fig. 6 Oscillation of liquid velocity with nozzle motion ($f = 60$ Hz, $W = 6.0$ mm).

Fig. 7 には本研究で観察された気泡微細化メカニズムを示した。気泡の微細化はノズルの運動速度とそれによって引き起こされた液流動速度の差である相対速度に起因する液粘性抵抗力によって促進される。

Fig. 7 Mechanism of bubble formation.

4. 結 言

撓動する微細孔ノズルを用いた微細気泡製造法を開発した。低ガス流量条件において単一ピークの気泡径分布が得られ、また気泡サイズは撓動周波数および振幅により容易に調整できた。ガス流量および撓動条件が気泡径に及ぼす影響を明らかにし、ノズル周りに発生する液流動の観察から撓動による気泡微細化のメカニズムについて検討した。本微細気泡製造法は外部液循環ラインやポンプなどが不要であり、閉塞などのトラブルに強いシステムである。液流動については、今後数値流体力学によるシミュレーションや、他の計測手法を用いて測定妥当性について検証を行う必要がある。

Nomenclature

d	: bubble diameter	[μm]
d_{ave}	: average bubble diameter	[μm]
F	: bubble detachment force	
f	: oscillation frequency	[Hz]
n	: number of bubble	[-]
Q_G	: gas flow rate	[mL/min]
T	: oscillation period	[s]
t	: time	[s]
Δt	: bubble growth time	[s]
U_L	: liquid velocity	[mm/s]
U_0	: nozzle velocity	[mm/s]
W	: width of oscillation	[mm]
$\hat{x}$	: dimensionless oscillation position	[-]

参考文献

- [1] Terasaka, K., Himuro, S., Ando, K. and Hata, T., Introduction to Fine Bubble Science and Technology (in Japanese), 167-189, Nikkan Kogyo Shimbunsha, Tokyo (2016).
- [2] Toray Research Center ed., Fine Bubble (in Japanese), 19-66, Reimeisya, Tokyo (2015).
- [3] Bookers ed., New Technology of Fine Bubble (in Japanese), 3-13, NTS Publishing, Tokyo (2006).
- [4] Ghosh, A. K. and Ulbrecht, J. J., Bubble Formation from a Sparger in Polymer Solutions — II. Moving Liquid, Chem. Eng. Sci., Vol. 44(4) 969-977 (1989).
- [5] Tan, R. B. H., Chen, W. B. and Tan, K. H., A Non-spherical Model for Bubble Formation with Liquid Cross-flow, Chem. Eng. Sci., Vol. 55(24), 6259-6267 (2000).
- [6] Tokanai H., Harada E. and Kuriyama M., Size of Bubble Formed from Single Nozzle in Shear Flow, ASCON2000, 319-324 (2000).
- [7] Terasaka, K., Murata, S. and Tsutsumino, K., Bubble Distribution in Shear Flow of Highly Viscous Liquids, Can. J. Chem. Eng., Vol. 81(3-4), 470-475 (2003).
- [8] MacIntyre, F., Vibrating Capillary Production of Uniform Small Bubbles, Rev. Sci. Instrum. Vol. 38, 969 (1967).
- [9] Vejrazka, J., Fijasová, M., Stanovsky, P., Ruzicka, P. C. and Drahoš, J., Bubbling Controlled by Needle Movement, Fluid. Dyn. Res., Vol. 40(7-8), 521-533 (2008).
- [10] Tamura, I. and Uehara I., Development of a Microbubble Generator and Practical Use of a Contaminated Water Purification System, Stud. Sci. Tech., Vol. 2, 151-154 (2013).