回転多孔板による微細気泡水生成装置における気泡の特性向上に関する研究*
 A Study on the Improvement of Bubble Properties in Microbubble Generation Device
 with a Rotating Porous Plate

張 蓉 生**
 ZHANG RongSheng

葉 山 眞 治†
 HAYAMA Shinji

藤 川 重 雄††
 FUJIKAWA Shigeo

彭 国 義†
 PENG Guoyi

Abstract In order to get improved bubbly water containing greater number of bubbles with smaller diameters than conventional ones, a new microbubble generation device has been developed, where a rotating porous plate is applied to the air intake unit of the device and compressed air is taken into the device through the rotating porous plate. The theoretical analysis shows that the bubble diameter detaching from the rotating porous plate decreases with the increase of the rotational speed, which results in the increase of air dissolution into working water in the mixing box. The experimental results obtained by the new device with a rotating porous plate show that the smallest mean diameter of bubbles is $11\mu\text{m}$, the highest number density is $6.5 \times 10^2 / \text{mm}^3$ and the bubble generation rate reaches 1.5×10^7 number/s. It is also proved that the mean diameter is smaller and the number density is higher than those of bubbly waters generated by conventional devices, and that the bubble diameter and the number density could be effectively controlled by the rotational speed of the porous plate.

Keywords : Bubbly Water, Rotating Porous Plate, Air Dissolution, Isolated Microbubble, Mean Diameter, Number Density

1. 緒 言

微細な気泡を数多く含む水すなわち微細気泡水は、水質の浄化、水の殺菌・脱色・脱臭、食品化工など様々な産業分野で用いられている[1-5]。これまでに知られている気泡水の生成法には、大別して、単純にノズルあるいは多孔質板から空気を吹き出して生成する方式[6]、気泡の離脱・分散を促進するための攪拌混合方式[7,8]、加圧溶解析出方式[9]、溶解析出連続加圧管路方式[3]等がある。

溶解析出連続加圧管路方式は、ベンチュリ型ノズルにより喉部の低圧を利用して大気から空気を吸引し、空気を水とともに加圧溶解部に流して、ここで空気を水中に溶解させ、その後、減圧して溶解空気を気泡の形で水中に析出させる方式である。生成される気泡の平均直径は $20\mu\text{m}$ 、数密度は $200\text{個}/\text{mm}^3$ 、気泡生成率は $3.57\text{個}/\text{s}$ 程度であり、他の方式と比べて気泡が微細で、数密度が高いことが明らかにされている[3]。このように、この方

* 2000.10.23 受付

** 富山県立大学大学院 〒939-0398 富山県射水郡小杉町黒河5180

TEL(0766)56-7500(内線 389) FAX(0766)56-6131 E-mail:rongsz@st.pu-toyama.ac.jp

† 富山県立大学工学部 †† 北海道大学工学部

式で生成される気泡の直径が小さいため、気泡の浮上速度が小さく水中での浮遊時間が長くなる。このため、水中のゴミに付着する割合が高まり、水質浄化効率を高めることができる。現在、気泡直径をさらに小さく、数密度をさらに高くするとともに、使用目的に応じてこれらの量を自由に制御することが望まれている。

本研究では、気泡水中の微細気泡をさらに微細化し、数密度の増大を図り、これらの量を制御可能とするために、溶解析出連続加圧管路方式の空気取入部に回転多孔板を取付け、空気を可能な限り小さな気泡の形で取り入れ、溶解を容易にする方法を開発した。まず、回転多孔板から離脱する気泡生成の理論的な考察を行い、実験により理論解析が妥当であることを明らかにした。次に、多孔板から離脱する気泡直径が溶解部内での空気の溶解に及ぼす影響の物理的機構を調べた。実験結果から微細気泡水生成装置の空気取入部に回転多孔板を用いることにより、従来のものに比べて析出気泡が格段に微細になり、気泡数密度が高くなること、さらに、析出気泡の平均直径と気泡数密度をある程度制御できることを明らかにした。

2. 実験装置

Fig. 1 は回転多孔板を用いて空気を取入れる溶解析出連続加圧管路方式による微細気泡水生成装置の概略を示したものである。本装置は、大別して、回転多孔板による空気取入部(①-⑥)、給水部(⑦、⑧)、空気溶解部⑪、余剰空気分離部(⑫、⑬)および減圧弁⑭による気泡析出部から成っている。空気取入部の多孔板は直径70mm、厚さ0.8mmのステンレス板に、直径0.14mmの孔126個を開けたものおよび直径0.13mmの孔648個を開けたものの2種類を使用した。空気は内径10mmの中空回転軸を通して、多孔板が取り付けられている多孔板裏側の貯気室に供給される。この中空軸は可変速モータにより最高回転数500rpmまで回転できるようになっている。空気溶解部は高さ20mm、幅25mmの矩形断面を有する流路5段から成っており、流路全長は1mである。また、溶解部の高さは上段から5段目まで185mmである。余剰空気分離部は鉛直方向の余剰空気流路⑫と弁⑬から成っており、弁⑬の開度を調整して空気溶解部内の圧力を調節できる。気泡析出部の減圧弁⑭には流量の制御が容易なコントロール弁が使用されており、減圧弁から析出

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

気泡観測部の中心までの距離は160mmである。

空気は空気取入部に取付けられた多数の微小孔を有する多孔板から気泡流入室⑥内の水中に噴出させて取入れる。これらの孔から発生する空気泡をなるべく小さくするため、多孔板を回転させて、適当なサイズになったときに空気泡が切断されて、水中に流れて行くようにした。このようにして取入れた多数の微小な空気泡を含む水は内径6mm、長さ30mmの管路を通り、溶解部⑪に流れて行き、ここで気泡内の空気が水中に溶解して行く。水に溶解しきれなかった空気は余剰空気分離部の弁⑬から排出され、水中に溶解した空気は減圧弁⑭で減圧されて、水中で微細気泡として析出する。

3. 回転多孔板から離脱する気泡径の解析

本研究では、析出気泡をさらに微細化し、数密度を高めるために、従来の溶解析出連続加圧管路方式の空気吸引法に代わって、圧縮機で加圧した空気を回転多孔板から水中に噴出させる方式を採用した。そこで本章では、回転多孔板の回転数が多孔板から離脱する気泡直径に及ぼす影響を理論的に考察する。解析を簡単にするため、次の仮定をおく：①多孔板の周りの液体は静止している、②多孔板上に付着する気泡は無限液体中の運動とみなす、③空気の密度は、液体の密度より十分小さいため、無視する、④気泡は小さいため、その形状は球形である、⑤多孔板上の一つの気泡の成長には他の気泡が影響しない、⑥気泡に供給する空気流量は一定である。

また、多孔板の孔数が多いので、多孔板の孔から生成される気泡の直径に及ぼす貯気室容積(圧縮機の貯気室を含む)の影響はほとんど無いと考えられる[8,10]。

3. 1 回転多孔板上の気泡に働く力

Fig. 2 は、回転している多孔板上で、回転軸中心から r の距離にある球形気泡を離脱させ力 $\vec{F}_r$ を示したものである。その力の座標成分としては多孔板の回転に伴う気泡の等速円運動による付加質量力 F_A [11]、浮力 F_B および球形気泡に基づく液体の粘性抵抗力 F_C [12]を考える。これらはそれぞれ次のように表わされる。

$$\vec{F}_r = F_A \vec{e}_r + F_B \vec{e}_z + F_C \vec{e}_\theta$$

$$F_A = \frac{2}{3} \pi \rho R_b^3 \omega^2 r$$

$$F_B = \frac{4}{3} \pi \rho g R_b^3 \quad (1)$$

$$F_C = 12 \pi \mu \omega r R_b$$

ここで、 $\vec{e}_r, \vec{e}_z, \vec{e}_\theta$ は、座標の原点を回転多孔板の中心に固定した円柱座標の基本ベクトル、 R_b は気泡の半径、 μ は液体の粘性係数、 ρ は液体の密度、 ω は多孔板の回転角速度である。

一方、多孔板に付着する気泡は孔からの空気供給により成長し、気泡中心が離脱方向($\vec{F}_r$ の方向)に移動する。成長している気泡に対する液体の抵抗力の大きさ F_g は、成長しながら移動する球に作用する付加質量力より、次の式で与えられる[13-15]。

$$F_g = \frac{2}{3} \pi \rho R_b^2 (\dot{V} R_b + 3 \dot{V} R_b) \quad (2)$$

ここで、 V は成長気泡の中心の多孔板に対する相対移動速度である。多孔板に付着して成長する気泡中心の移動速度 V は気泡の成長速度 $\dot{R}_b$ に等しいと見てよいので、 $V = \dot{R}_b = q / 4\pi R_b^2$ と表せる。よって、式(2)から

$$F_g = \frac{\rho q^2}{24 \pi R_b^2} \quad (3)$$

を得る。ここで、 q は多孔板の孔当りの空気流量

Fig. 2 Forces acting on a bubble due to rotation of porous plate

Fig. 3 Bubble detaching from rotating porous plate

である。

気泡が多孔板の孔に付着する力の大きさ F_σ は次式となる。

$$F_\sigma = \pi d_0 \sigma \quad (4)$$

ここで、 σ は表面張力、水に対する常温 20°C の場合 $\sigma = 0.0731 \text{ N/m}$ 、 d_0 は多孔板の孔の直径である。

3. 2 回転多孔板から離脱する気泡半径

Fig. 3 は多孔板から離脱する直前の気泡の様子を示したものである。Fig. 3 (a) は多孔板から離脱する気泡の写真であり、上の気泡は離脱した気泡であり、下の気泡は付着している気泡である。この図に示すように、気泡の離脱直前に付着している気泡の下部に収縮した喉部が現れる。他の多数の研究でも同様の結果が示されている [8, 21, 27, 28]。

Fig. 3 (b) と Fig. 3 (c) は、それぞれ、気泡の離脱直前の力の釣り合いとその気泡を示したものである。回転多孔板から離脱する直前の力の釣り合い条件は、Fig. 3 (b) に示すように、 $|\vec{F}_r| = F_g + F_\sigma$ となると考えられる。よって、そのときの気泡の半径を R_b とすると、 R_b は次の式で求められる。

$$\begin{aligned} & 2\pi R_b \sqrt{\frac{\rho^2 R_b^4}{9} (\omega^4 \gamma^2 + 4g^2) + (6\mu\omega\gamma)^2} \\ &= \frac{\rho q^2}{24\pi R_b^2} + \pi d_0 \sigma \end{aligned} \quad (5)$$

Fig. 4 は、多孔板の孔当りの空気流量 $q = 500 \text{ mm}^3/\text{s}$ のとき、多孔板の回転軸から多孔板上の気泡中心までの距離をパラメータとして、式 (5) より多孔板の回転数 n (rpm) と多孔板から離脱する気泡の半径 R_b との関係を示したものである。Fig. 5 は、 $r = 25 \text{ mm}$ のとき、多孔板の孔当りの空気流量 q をパラメータとして、式 (5) より回転数と離脱気泡半径との関係を示したものである。Fig. 4 および Fig. 5 から、多孔板から離脱する気泡の半径は回転数の増加に伴って減少し、多孔板の孔当りの空気流量の増加に伴って増加することがわかる。ただし、

Fig. 4 Relation between bubble radius detaching from porous plate and rotational speed for different r

Fig. 5 Relation between bubble radius detaching from porous plate and rotational speed for different air flow rate

Fig. 6 Comparison between calculation and experiments for bubble radius detaching from porous plate

回転数が500rpmより大きくなると、離脱気泡の半径に及ぼす回転数の影響は小さくなる。一方、空気流量が離脱気泡の半径に及ぼす影響は大きくなる。そこで、回転多孔板の最大回転数は500rpmとする。

Fig. 6は、 $r=25\text{mm}$ 、 $q=463\text{mm}^3/\text{s}$ の場合に対して、回転数と離脱気泡半径の関係を示したものである。図中▲と●の記号は、透明な気泡流入室への給水流量 Q_w が0と $87.5\text{cm}^3/\text{s}$ のとき、回転数を変えて高速ビデオカメラにより離脱する気泡を測定した結果である。気泡流入室への水流量が零のとき、実験結果は式(5)で計算した結果とほぼ一致している。気泡流入室へ水を流すと、式(5)で

は考慮していない水流の影響が加わり、多孔板からの気泡の離脱を速めるので、離脱する気泡の半径は式(5)から求めた気泡半径 R_b より小さくなっている。

多孔板から離脱する孔当りの気泡体積は、孔当りの空気流量 q と気泡の生成から離脱までの時間 T との積より、次のように表わされる。

$$\frac{4}{3}\pi R_b^3 = qT \quad (6)$$

孔当りの空気流量が一定のとき離脱までの時間 T は、多孔板から離脱する気泡の半径 R_b の減少とともに減少する。したがって、Fig. 5からわかるように、 T は回転数の増加とともに減少する。そこで、多孔板から気泡流入室内に流入される気泡の数密度は回転数の増加とともに増加することになる。

4. 空気の溶解

回転多孔板から離脱した気泡は周囲の水とともに溶解部に流れて行き、ここで気泡内の空気が水中に溶解していく。本章では、溶解の物理的機構について考察する。

4.1 溶解部流路内の流れ

回転多孔板から離脱した多数の気泡を含む水は内径6mmの管路を通り、溶解部に流入する。Fig. 7は、回転多孔板によって取入れた空気泡を含む水が溶解部内を流れいくときの様子を撮影した写真である。溶解部は高さ20mm、幅25mmの矩形断面を有する5段の流路から成り、最上の1段目の流路入口で気泡を含んだ水は噴流となるため、流れは激しく混合する乱流状態となる。このような流れの状態、次の式で定義されるWeber数

$$We = 2\mu C d_b / \sigma \quad (7)$$

がある限界値を越えると、気泡は分裂を起こす[16,22]。ここで、 μ は液体の粘性係数、 C は気泡壁における液体の速度勾配である。式(7)から激しく混合する噴流場に対して気泡壁における速度勾配は大きいため、大きい気泡は容易に分裂することがわかる。また、気泡水が噴流となると、気泡が分裂することを宮原ら[22]が示している。

いま、直径 d_b の1個の気泡が n_b 個の小さな気泡群に分裂したとすると、分裂前後の空気の密度変化を無視するなら、次の関係が成立する。

Fig. 7 Bubbly water flow in mixing box of microbubble generation device with a rotating porous plate

$$d_b^3 = \sum_{i=1}^{n_b} d_i^3 \quad (8)$$

ここで、 d_i は気泡群の個々の気泡の直径である。一方、分裂後の気泡群の全表面積と分裂前の気泡表面積の差は

$$\pi \left(\sum_{i=1}^{n_b} d_i^2 - d_b^2 \right) = \frac{\pi}{d_b} \left(d_b \sum_{i=1}^{n_b} d_i^2 - d_b^3 \right) \quad (9)$$

である。式(8)を式(9)に代入すると

$$\pi \left(\sum_{i=1}^{n_b} d_i^2 - d_b^2 \right) = \frac{\pi}{d_b} [d_i^2(d_b - d_i) + d_i^2(d_b - d_i) + \dots + d_{n_b}^2(d_b - d_{n_b})] \quad (10)$$

となる。 $d_b > d_i$ であるから、式(10)は正の値となるので、分裂後の気泡群の全表面積は分裂前より大きくなる。これより、空気を分裂させて、直径の小さい気泡群にすることは気液界面の総面積を増加させることになる。

4. 2 分裂気泡群の溶解速度

多数の気泡を含んだ水の流動状態が同じである場合、気泡内の空気が周囲の水中に溶解する速度は気液界面の面積と次の物質移動係数 k_l に比例する[17, 20, 23]。

$$k_l \propto \frac{D_f^{c_1} v^{c_2}}{d_b^{c_3}} \quad (11)$$

ここで、 d_b は気泡の直径、 D_f は水中での空気の拡

散係数、 v は気泡の水に対する相対移動速度、 c_1, c_2, c_3 は正の定数である。したがって、気泡直径の減少に伴って、気液界面の総面積の増加とともに、物質移動係数も増加するため、気泡内空気の溶解速度は増加することがわかる。*Timson*ら[18]は気液系の通気攪拌により気泡径が1/4に減少すると、物質移動係数は約40倍に増加すること、*Hammerton*ら[19]も水中を上昇するエチレンを含む単一気泡の溶解速度の測定結果から、気泡径が小さくなればなるほど気泡の溶解速度が大きくなることを示している。

本研究においても以上のことを確認するため、気泡水生成装置出口の析出気泡水における溶存酸素濃度を測定した。Fig. 8は、溶存酸素計(メトラード社製MO128)を用いて、多孔板の回転数を変えて測定した結果の1例である。実験条件は以下の通りである：給水タンクから装置に取り入れる水の溶存酸素濃度 $DO_i = 4.7 \text{ mg/l}$ 、析出気泡水の水温 28.5°C 、大気圧 0.102 MPa 、気温 31°C 、多孔板の孔数 $N = 648$ 個、孔の直径 $d_o = 0.13 \text{ mm}$ 、多孔板から水中に噴出される空気流量 $Q_g = 96.7 \text{ cm}^3/\text{s}$ 、水流量 $Q_w = 91.7 \text{ cm}^3/\text{s}$ 、減圧弁の相対開度 $a = 53.5\%$ 、回転数 $n = 0 \sim 500 \text{ rpm}$ 、空気溶解部の圧力 0.35 MPa (ゲージ圧)である。この図から、析出気泡水中の溶存酸素濃度 DO は多孔板の回転数の増加とともに増加し、同じ実験条件の下で従来の溶解析出連続加圧管路方式において測定した溶存酸素濃度 $DO = 7.7 \text{ mg/l}$ に比べて、高くなっていることがわかった。析出気泡水における溶存酸素濃度の増加は溶解空気量の増加を示しているの、多孔板の回転数の増加とともに溶解空気量が増加することがわかる。

Fig. 8 Dissolved oxygen in bubbly water against rotational speed

以上の考察から、析出気泡の微細化のために空気取入部に回転多孔板を採用し、空気を回転多孔板から水中に噴出させる方式を用いることにより、多孔板から離脱する気泡直径が小さくなり、気泡内の空気が水中に溶解し易くなり、溶解量が増加することがわかる。

5. 析出気泡の計測

Fig. 9 は、Fig. 1 に示した減圧弁④で減圧されて析出した微細気泡の計測装置の概略を示したものである。CCDカメラ④は有効画素数768(H)×493(V)、走査線数525本、水平解像度470TV本を持ち、シャッタの露光時間を1/250～1/10,000秒に設定することができる。照明には、二つのハロゲンランプ①の光を光ファイバーにより導いた直径7.0mmのファイバ束光源②が用いられている。

光ファイバ束光源②で気泡析出部出口の気泡水流③を照らし、倍率4.5のズームレンズと倍率3の補助レンズを付けたCCDカメラで、シャッタ速度を1/10,000秒として、気泡水流を連続的に撮影する。撮影した動画は画像入力ボード(カノーブス社製Pcapro)を用いてパソコンに1フレーム640×480pixelsの動画ファイルとして収録した。気泡水の動画ファイルから同じ気泡を含まない静止画像をランダムに抜き取り、ビットマップファイルで保存する。以下、計測方法の詳細については著者らの論文[26]を参照されたい。

微細気泡の主要なパラメータである気泡の平均直径と数密度を以下のように定義する。縦258μm×

横344μm×奥行き200μmの計測領域内で計測された個々の気泡直径 d_i を、その領域内の気泡総数を n_b とすると、気泡の数平均直径 d_n (以下、平均直径)は次式で与えられる。

$$d_n = \frac{1}{n_b} \sum_{i=1}^{n_b} d_i \quad (12)$$

また、計測領域の体積を V_c として気泡の数密度 B を次のように定義する。

$$B = \frac{n_b}{V_c} \quad (13)$$

気泡水生成装置出口の気泡水流量 Q_b と気泡数密度 B より、装置の気泡生成率 G を次式のように定義する。

$$G = Q_b B \quad (14)$$

6. 実験結果および考察

6. 1 回転数と析出気泡の平均直径及び数密度の関係

多孔板の回転数 n を変えて、析出気泡の平均直径 d_n と数密度 B の計測を行った。Fig. 10はその結果の1例を示したもので、実験条件は以下の通りである：多孔板の孔数 $N=126$ 個、孔の直径 $d_0=0.14$ mm、多孔板から水中に噴出される空気流量 $Q_g=76.5$ cm³/s、水流量 $Q_w=66.7$ cm³/s、減圧弁の相対開度 $a=27\%$ 、回転数 $n=0\sim500$ rpm、空気溶解

Fig. 9 Measuring system of microbubbles

Fig. 10 Effect of rotational speed on bubble mean diameter and number density

部の圧力0.35MPa(ゲージ圧)。この図から、多孔板の回転数の増加とともに、析出気泡の平均直径が小さくなり、数密度が増加していることがわかる。これは、多孔板から離脱する空気泡の直径が小さくなるだけでなく、その空気泡数も多くなり、溶解部で気液界面の総面積と物質移動係数が共に増加し、空気の水中への溶解量が増加したためと考えられる。また、回転数の調節で析出気泡の平均直径を制御できることがわかる。

6. 2 析出気泡の直径の分布

Fig. 11は、Fig. 10と同じ実験条件の下で、回転数 $n=0, 241, 293, 500$ rpmのとき、析出気泡の実直径の分布を示したものである。横軸は析出気泡の実直径 d 、縦軸は対応する析出気泡直径の頻度割合 f_d であり、図を見やすくするためにデータ点を示していない。多孔板の回転数が増えるほど析出気泡の直径および分散は小さくなり、しかも、多分散性から単分散性に移行していることがわか

Fig. 11 Distribution of bubble diameter for different rotational speed

る。また、回転数の増加に伴い最大頻度の析出気泡直径は小さくなるが、最小直径付近の気泡直径はあまり減少していない。これは気泡画像の解像度の影響もあるが、“限界粒径効果”[16]、すなわち分散相の粒径をある値以下に微細化させることが困難であるということが、本研究の析出気泡の場合にも現れているものと考えられる。

6. 3 回転数と析出気泡の生成率の関係

Fig. 12は、Fig. 10と同じ実験条件の下で、式(14)から計算した析出気泡の生成率 G と回転数 n との関係を示したものである。減圧弁の開度 a と空気流量 Q_g および水流量 Q_w が一定のとき、気泡生成率 G と回転数 n の関係は気泡数密度 B と回転数 n の関係とほぼ同じであることがわかる。

6. 4 空気流量と析出気泡の平均直径および数密度の関係

空気流量は析出気泡の生成特性に影響を及ぼすもう一つの主要な因子である。そこで、析出気泡数密度をさらに向上させるため、多孔板の孔数 N を648個に増やして実験を行った。減圧弁の相対開度 $a=37\%$ 、水流量 $Q_w=87.5$ cm³/s、空気溶解部での圧力0.35MPaの下で、回転数 n をパラメータにして、空気流量 Q_g を変化させて実験を行った。

Fig. 13は、異なる回転数のときの空気流量 Q_g と析出気泡の平均直径 d_n との関係を示したものである。空気流量が一定の場合、回転数の増加とともに平均直径が小さくなることはFig. 10の場合と同じであるが、回転数が一定の場合、空気流量の増加とともに平均直径が増加している。

回転数が小さい場合には空気流量の増加とともに析出気泡の平均直径が急速に増大するが、回転

Fig. 12 Effect of rotational speed on bubble generation rate

数が大きくなると析出気泡の平均直径の増加はわずかとなる。したがって、空気流量を大きくして析出気泡の平均直径の増加を抑えて、数密度を向上させるためには、回転数を増加させることが必要である。

Fig. 14は、異なる回転数のときの析出気泡の数密度 B と空気流量 Q_g の関係を示したものである。空気流量が一定の場合、数密度が回転数の増加とともに増加することはFig. 10の場合と同じであるが、回転数一定の場合、空気流量の増加とともに数密度が増加している。

これは、空気流量の増加とともに多孔板から生成される気泡数が多くなるため、気液界面の総面積が増加し、水中での空気の溶解量が増加する。そのため、減圧弁で減圧したとき析出気泡数が増えたためであると考えられる。このことを確認する

Fig. 13 Relation between bubble mean diameter and air flow rate for different rotational speed

Fig. 14 Relation between bubble number density and air flow rate for different rotational speed

ため、Fig. 8と同じ条件の下で多孔板の回転数500 rpmの場合、空気流量を変えて析出気泡水における溶存酸素量を測定した。Fig. 15はその測定結果である。この図から、空気流量の増加とともに析出気泡水中の溶存酸素量が増加することが確認された。

空気流量と回転数を同時に増加させると、溶解部での気泡の直径は空気流量のみを増加させた場合の気泡直径より小さくなるので、気液界面の総面積が多くなるだけでなく、物質移動係数も増加する。そのため、水中での空気の溶解量が著しく増加して、析出気泡の数密度は非常に高くなる。

Fig. 16は、析出気泡の数密度 B と装置出口の気泡水流量 Q_b を用いて式(14)より求めた析出気泡の生成率 G と空気流量 Q_g との関係を、回転数 n をパラメータとして示したものである。減圧弁の開度 $a=37\%$ 一定であるため、装置出口の気泡水流量 Q_b はほとんど変わらない。したがって、析出気泡

Fig. 15 Dissolved oxygen in bubbly water against air flow rate

Fig. 16 Relation between bubble generation rate and air flow rate for different rotational speed

の生成率 G と空気流量 Q_g の関係は析出気泡の数密度 B と空気流量 Q_g の関係とはほぼ同じである。これより微細気泡水生成装置の空気取入れ部に回転多孔板を用いることにより、析出気泡の生成率 G が、従来の微細気泡水生成装置による生成率 $G=3.57 \times 10^6$ 個/s [3]より、非常に高くなることがわかる。

7. 結 言

析出気泡の微細化と数密度の増大化を図るとともに、これらの量を制御するために、空気を回転多孔板から水中に噴出させる方式の微細気泡水生成装置を開発し、従来のものに比べて析出気泡が格段に微細になり、気泡数密度が高くなるだけでなく、析出気泡の平均直径や数密度をある程度制御できることを明らかにし、次のことがわかった。

- (1) 回転多孔板から離脱する空気泡の大きさは、溶解部で気泡内空気の水中への溶解及び析出気泡の大きさに著しい影響を及ぼす。離脱する気泡径の減少とともに溶解速度は大きくなり、析出気泡は著しく小さくなる。
- (2) 回転数の増加とともに析出気泡の平均直径が減少する程度は、空気流量が小さい場合より、空気流量の大きい範囲で顕著である。
- (3) 空気流量の増加によって、析出気泡の数密度を増加できるが、析出気泡の平均直径も同時に増大する。ただし、多孔板の回転数を増加させると、析出気泡の平均直径が空気流量の増加とともに増大することを抑制できる。
- (4) 加圧した空気を回転多孔板から水中に噴出させるので、取り入れる空気流量が従来の空気吸引式より多くなるが、多孔板の回転により、取り入れた空気泡の半径が小さくなるので、溶解量が増加し、析出気泡の数密度はかなり高く、空気吸引式の場合の約3倍になっている。
- (5) 多孔板の回転数が高いほど析出気泡の直径の分散が小さくなり、多分散性から単分散性に移行する。

謝辞 本装置の開発にご協力頂きました富山県立大学工学部機械システム工学科流体力学研究室の高杉信秀助手ならびに同大学大学院元博士課程学生寺崎尚嗣氏に感謝申し上げる。また、本研究のために、溶解析出連続加圧管路方式実験装置は和泉電気株式会社からご提供頂いたものである。いろいろとご指導頂いた町谷勝幸氏、中山正明氏、柏雅一氏に感謝申し上げる。

Nomenclature

a	: relative opening degree	[%]
B	: bubble number density	[number/mm ³]
C	: velocity gradient at bubble wall	[1/s]
d_0	: hole diameter of porous plate	[m]
d_b, d_i	: bubble diameter	[m]
d_n	: numeral mean diameter	[m]
D_f	: diffusion coefficient of gas in liquid phase	[m ² /s]
D_o	: dissolved oxygen in bubbly water	[mg/l]
f_d	: distributive frequency of bubble diameter	[%]
F_g	: force due to bubble growth on porous plate	[N]
$\vec{F}_r$	: force on bubble due to porous plate rotation	[N]
F_o	: adhesive force	[N]
g	: acceleration of gravity	[m/s ²]
G	: bubble generation rate	[number/s]
k_l	: mass-transfer coefficient in liquid-phase	[m/s]
n	: rotational speed	[rpm]
n_b	: number of bubbles	[—]
N	: number of porous plate holes	[—]
q	: gas flow rate through one hole of porous plate	[mm ³ /s]
Q_b	: flow rate of bubbly water	[cm ³ /s]
Q_g	: gas flow rate	[cm ³ /s]
Q_w	: water flow rate	[cm ³ /s]
r	: distance from rotational axis to bubble center	[m]
R_b	: bubble radius at detaching from porous plate	[m]
T	: times from bubble formation to detachment on porous plate	[s]
v	: relative velocity of bubble to water	[m/s]
V	: moving velocity of bubble due to bubble growth on porous plate	[m/s]
V_c	: volume of measuring domain of bubbly water	[mm ³]
We	: Weber number	[—]

Greek letters

μ : liquid viscosity	[Pa · s]
ρ : liquid density	[kg / m ³]
σ : surface tension of liquid	[N/m]
ω : angular velocity of rotating porous plate	[rad/s]

参考文献

- [1] 福士憲一・佐藤敦久・長谷川孝雄, Microcystis sp.の凝集浮上分離特性, 水道協会雑誌, Vol.64, 2-12(1995).
- [2] 宗宮功編, オゾン利用水処理技術, 公害対策技術同友会(1989).
- [3] 町谷勝幸ほか3名, 気泡水の研究(GALF)論文集, 和泉電気, 1-9(1995).
- [4] 宮原敏郎, 水処理技術, Vol.32, No.4, 9-15(1991).
- [5] Stanbury, P.F., 発酵工学の基礎, 学会出版センター(1998).
- [6] 井口 学・千原知幸, ノズルおよびオリフォスからの気泡生成に関する実験的研究(第1報), 混相流, Vol.11, No.1, 46-55(1997).
- [7] 大成博文, マイクロバブル発生技術による広閉鎖水域の水質浄化, 混相流, Vol.11, No.3, 263-266(1997).
- [8] Cheremisinoff, N.P., (editor), Encyclopedia of Fluid Mechanics, Volume3, Gas-Liquid Flows, 351-359, Houston, London (1985).
- [9] Takahashi, T. et al., Fundamental Study of Bubble Formation in Dissolved Air Pressure Flotation J. Chem. Eng. of Japan, Vol.12, No.4, 275-280(1979).
- [10] 宮原敏郎・芳賀則行・高橋照男, 多孔板で形成される気泡の大きさ, 化学工学論文集, Vol.8, No.1, 13-17(1982).
- [11] Batchelor, G.K., Fluid Dynamics, 402-409, Cambridge University press (1990).
- [12] 日本流体力学会編, 流体力学ハンドブック(第2版), 丸善(1998).
- [13] Zuber, N., On the Dispersed Two-Phase Flow in the Laminar-Flow Regime, Chem. Engng Sci. Vol.19, 897-917(1964).
- [14] Sherwood, J.D., The Force on a Growing Bubble in Potential Flow, Int. J. Mul-tiphasic Flow, Vol.25, 705-709(1999).
- [15] Michel, J.M. and Belahadji, B., Fundamentals of Cavitation, 46-47, Brasilia University Press(1997).
- [16] 山口 巖, 新增補混合および攪拌, 47-49, 89-91, 化学工業出版社(1988).
- [17] 化学工学会編, 化学工学便覧(改訂五版), 丸善(1988).
- [18] Timson, W.J. and Dunn, C.G., Mechanism of Gas Absorption from Bubbles under Shear, Ind. Eng. Chem., Vol.52, No.9, 799-802(1960).
- [19] Hammerton, D. and Garner, F.H., Gas Absorption from Single Bubble, Trans. Instn. Chem. Engrs., Vol.32, S18-S21(1954).
- [20] 竹村文男・矢部 彰, 上昇する球形気泡の溶解過程に関する研究, 機論(B), Vol.64, 121-128(1997).
- [21] 赤津康昭・中村昭三, 単一気泡および気泡合体挙動の可視化, 可視化情報, Vol.16, No.63, 32-39(1996).
- [22] Miyahara, T. et al., Bubble Splitting by Turbulent Jet Emitted from Orifice, J. Chem. Eng. of Japan, Vol.32, No.1, 91-96(1999).
- [23] 化学工協会編, 化学工学の進歩16, 気泡・液滴・分散工学, 槇書店(1982).
- [24] Mori, Y. et al., Fundamental Study of Bubble Dissolution in Liquid, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.20, 41-50(1977).
- [25] Hinze, J.O., Fundamentals of the Hydrodynamic Mechanism of Splitting in Dispersion Processes, A.I.Ch.E. Journal, Vol.1, No.3, 289-295(1955).
- [26] 張 蓉生ほか3名, 微細気泡生成装置の気泡計測に関する研究, 混相流, Vol.14, No.3, 329-338(2000).
- [27] Chiba, N. and Takahashi, Y., Generation of Micro Air Bubbles of Uniform Size in Water, Third International Symposium on Cavitation, Grenoble, 91-94(1998).
- [28] 高橋照男ほか3名, 気液並流・向流・十字流における単一ノズルで気泡形成, 化学工学論文集, Vol.6, 563-569(1980).