マイクロバブルの生成と気泡噴流に関する研究

Studies on Generation of Micro-Bubble and Gas-Liquid, Bubbly Jet Flow

社河内 敏彦 (三重大),
Toshihiko SHAKOUCHI
辻本 公一,
Koichi TSUJIMOTO

○阿部 博聴
Hiroaki ABE
安藤 俊剛,
Toshitake ANDO

西尾 昌洋 (三重大),
Masahiro NISHIO

Key Words ; Micro-bubble, Micro-bubble jet flow, Nozzle, Aeration by micro-bubble

1. 緒言

近年、河川・湖沼・内湾などの閉鎖性水域における水質汚染が深刻化し、特に、底層での無酸素水塊の拡大、赤潮の発生、水質劣化などにより、水中生物の減少や養殖魚介類への被害の増大などが問題となっている⁽¹⁾。これらの問題の効率的な解決策として、気体を液体中に吸収、溶解させる際に微小気泡を使用する方法が考えられる。ところで、水中内で水噴流の近傍に空気、気泡を噴出させると、それは水噴流のせん断層に誘引され強いせん断力を受けて微小化される⁽²⁾。その結果、気液二相微小気泡噴流が生起する。

本研究では、気液二相微小気泡噴流の水噴流の噴出速度、空気量、およびノズル形状などを変化させ、それらが噴流幅、速度分布、気泡径分布、溶存酸素量、運転動力などの与える影響を実験的に検討し、微小気泡噴流の流動特性、エアレーション特性など明らかにした。

2. 実験装置と方法

透明なアクリル樹脂製の貯水槽（長さ1150、幅550、高さ800mm、水位：770mm＝一定）からの水は、ポンプ、流量調節バルブ、流量計を経て、水槽底面中央に設置された水噴流ノズルから貯水槽へ噴出される。また、エアコンプレッサからの空気は、流量計を経て水噴流ノズルの近傍に設置した空気ノズルから噴出される。座標軸は水噴流ノズル出口中心を原点とし、鉛直上方向をX軸、水平方向をY軸、X-Y平面に垂直な方向をZ軸とした。

図2に、ノズル部の詳細を示す。直径 $d = 4.0$ mm の円形水噴流ノズルを標準ノズルとし、そこから 6.0 mm 離れた十字方向4箇所に、その内1方向にはさらに 2.0 mm ずつ離れた3箇所に直径 $d_s = 1.0$ mm の空気ノズルが設置されている。空気ノズルの高さ h は、任意に調節可能である。また、水噴流ノズル出口で大きな速度勾配を得るため出口直径 $d = 4.0$ mm、絞り面積比 $A/A_0 = 0.64, 0.44, 0.25$ の3種類のオリフィスノズルを供試した。

3. 実験結果と考察

微小気泡噴流の、気泡の広がり幅、気泡径分布、溶存酸素量、運転動力などを、水噴流流量 $Q_w = 6.0$ L/min ($Re = 31700$)、噴出空気流量 $Q_a = 0.4$ L/min、水 - 空気噴流ノズル中心間距離 $L/d = 1.5$ 、空気ノズル本数 $n = 1$ 、

$A/A_0 = 1.0$ (標準ノズル)、0.64, 0.44, 0.25 の各場合について測定した。また、 $A/A_0 = 1.0, 0.25$ のノズルからの噴流の速度分布を、作動流体を空気としてノズル出口中心線流速 $U_c = 40.0$ m/s の場合について熱線流速計、I形プローブを使って測定した。噴流幅（気泡の広がり幅） m は、噴流をスリット光で光切断しデジタルビデオカメラで撮影した可視化画像から測定した。気泡径分布は、望遠レンズ付きカメラにより撮影した写真から位置 $(x, y, z) = (x = 625 \sim 655, y = 0 \sim 30, z = 0)$ の 30×30 mm の範囲の気泡を目視できる範囲で計測し気泡径 d_a とその頻度 N を求めた。溶存酸素量は、亜硫酸ソーダ法を用い、貯水

Fig.1 Details of new aeration nozzle

槽内の水の溶存酸素量 C をその温度における飽和酸素量 C_s の 10% にまで下げた状態から測定を開始し、開始から 120 分間、30 秒ごとに測定した。運転動力は、ノズル出口上流側 $10d$ の位置での静圧と大気圧との差 ΔP と運動エネルギーの和と流量 Q_w との積 $W_n = (\Delta P + \rho_w u^2 / 2) Q_w$ として算出した。

3.1 噴流幅（気泡の広がり幅）、 m

図2に、噴流幅を示す。いずれの A/A_0 の場合も、水噴流ノズル出口からの距離 X の増加とともに噴流幅 m もほぼ直線的に増加するが、増加割合は A/A_0 の増加とともに増大する。これは、 A/A_0 が減少するとともにノズル出口での流路の縮小が急になり、その結果、出口近傍での縮流が強くなりその後の巻き込み量が大きくなることによると考えられる。

3.2 速度分布

噴流断面での速度分布は、 $X/d = 0.5 \sim 20.0$ の範囲の数段面で測定したが、ここでは $X/d = 0.5$ の場合についての結果を図3に示す。分布形は軸対称であったので、 y の正方向のみを示した。 $X/d = 0.5$ で、標準ノズルは、 $y/d = 0 \sim 0.35$ の範囲でほぼ様な分布形となりその外側で急激に減少する。一方、オリフィスノズルは、 $y/d = 0.1 \sim 0.4$ の範囲で中心線流速より大きくなり、 $y/d = 0.35$ で中心線流速の約 1.1 倍になる。これは、ノズル出口で流路が急縮小されるのでノズル壁からはく離れた流れが中心線方向への速度成分を有することによると考え

られる。また、オリフィスノズルではノズル幅よりも噴流幅が小さく、縮流が発生しているのがわかる。

また、上記したようにオリフィスノズルの噴流外縁での速度勾配は標準ノズルのそれに比べて大きいので巻き込み量が増加し、 $X/d > 2$ ではオリフィスノズルの方が噴流の広がり幅が大きくなった。

3.3 気泡径分布

図4に、気泡径分布を示す。いずれの A/A_o の場合も分布形はほぼ同様で、 $d_b < 0.1\text{mm}$ の頻度 N が最も高くなっているが、 A/A_o が小さくなると $d_b < 0.1\text{mm}$ の N が大きくなる。平均気泡径は $A/A_o = 0.25$ で最小値 0.14mm となった。これは、 A/A_o が小さくなるとノズル出口での水噴流の速度分布がより矩形に近づき噴出空気を巻き込む位置でのせん断力が大きくなることによると考えられる。

3.4 溶存酸素量

図5に、溶存酸素量 $(C_s - C)/C_s$ を示す。いずれの場合も溶存酸素量 C は時間 t の経過とともに増加し、その増加量は $A/A_o = 0.25$ で最も大きくなり、標準ノズルの場合に比べ約23%溶存酸素量が増加した。また、図5の結果からガス交換係数 K_L を次式により算出し図6に示す。

$$K_L = \frac{2.303}{t_2 - t_1} \log \frac{C_s - C_1}{C_s - C_2} \quad (1)$$

ここで、 C_1, C_2 : t_1, t_2 での C

K_L は、 $A/A_o = 0.25$ の場合に最も大きくなり 0.7 となった。これは、 $A/A_o = 0.25$ の場合に気泡径が最も微小化されるため、気液界面の接触面積が大きくなることによる。

3.5 運転動力

運転動力は、 A/A_o の減少とともに増加し $A/A_o = 0.25$ で最も大きく、標準ノズルより約2.4倍大きくなった。これは、 A/A_o が小さくなるとノズル出口での流動抵抗が増加することによる。

Fig.2 Width of bubble jet

Fig.3 Velocity distribution ($U_o = 40.0\text{m/sec}$, $x/d = 0.5$)

Fig.4 Bubble size distribution

Fig.5 Dissolved oxygen

Fig.6 Gas exchange factor

4. 結 論

マイクロバブルを簡単に発生させる新たなノズル形状を提案し、そのノズル特性、気泡噴流特性を実験的に明らかにした。主な結果は、以下のである。

- (1) 水噴流の速度勾配の大きな外縁に空気を噴出させると気泡が容易に微小化される。
- (2) 水噴流ノズルをオリフィス形状にすると、標準ノズルに比べノズル出口での速度分布がより矩形になり、噴流外縁での速度、速度勾配が大きくなる。その結果、供試ノズルでのマイクロバブル生成特性が改善・向上される。また、気泡が微小化されるとエアレーション特性も改善・向上される。
- (3) 絞り面積比 A/A_o が減少すると噴流の巻き込み量が増加し噴流幅が増大する。
- (4) オリフィスノズルの運転動力は、標準ノズルのそれより大きくなる。

参考文献

- (1) 佐野和生, 養殖工学概論, 緑書房(1993), 116-139.
- (2) 大池崇博, 気泡噴流の流動特性とその制御, 平成13年度三重大学大学院工学研究科修士論文.