マイクロバブル気泡噴流の流動特性

Flow characteristics of micro bubble jet flow

正 社河内敏彦 (三重大大学院) ○ 内山道之
正 辻本公一 正 安藤俊剛

西尾昌洋

Toshihiko SHAKOUCI, Mie University, Kurimamachiya-cho 1577, Tsu-shi, Mie
Michiyuki UCHIYAMA, Masahiro NISHIO, Koichi TSUJIMOTO, Toshitake ANDO

Key words : Micro bubble, Micro-bubble jet flow, Flow Visualization, Velocity distribution, LDA, PIV

1. まえがき

近年、河川・湖沼・内湾等の閉鎖性水域における水質汚染の改善策として、マイクロバブルを利用したエアレーションが注目されている。また、このことは気体を液体に効率的に混合、拡散、吸収させる（例えば、オゾン水の生成、など）ことにも通じ、工学的・工業上も重要である[1]-[3]。

本研究では、構造の簡単なマイクロバブル生成ノズル〔比較的高速の水噴流の近傍（低圧）に空気ノズルからの気泡を置くとそれは速度勾配の大きなせん断層でのせん断力によって微細化される〕を新たに提案し、それによって生じた微小気泡噴流（マイクロバブル気泡噴流、以後MBJとも呼ぶ）の流動特性をマイクロバブルによって可視化された流れの解析結果から、また、気泡径分布やLDA、PIVによる速度分布の測定結果などから明らかにする。

2. 実験装置と方法

ポンプによって加圧された貯水槽（2500×1250×1070 mm、水位：1000mm＝一定）からの清水は、流量調節バルブ、電磁流量計を経た後、水槽側壁面の底から $h_n=500$ mmの位置に水平に設置されたマイクロバブル生成ノズル（Fig. 1）の水用ノズルから貯水槽内に噴出される。空気は空気圧縮機から気体用浮遊式流量計を通り、水用ノズルの近傍に設けられた空気ノズルから噴出される。

座標系は、ノズル出口中心を原点とし下流方向を x 軸、半径方向を y 軸とした。

Fig. 1に、ノズルヘッド部の詳細を示す。ノズルヘッド部中央に、出口直径 $d=4.0$ mm、絞り面積比 $A/A_0=0.25$ のオリフィス形状の水用ノズルが、そこから6.0 mm離れた十字方向4カ所に $d_s=1.0$ mmの空気用ノズルが設けられている。使用する空気ノズル本数 n は、調節可能である。

実験は、ノズル出口平均流速 $u_{w0}=8.0, 19.9, 26.5$ m/s（水噴流流量はそれぞれ、 $Q_w=6.0, 15.0, 20.0$ l/min）、空気流量 $Q_a=0.1$ l/min $|_{n=1, n=4}$ で行った。

MBJの挙動（気泡の広がり幅など）は、マイクロバブルによって可視化された流れをデジタルビデオカメラにより撮影・記録した。マイクロバブルの気泡径 d_b は、 $x/d \approx 30$ のMBJの中心近傍で、ストロボライトにより流れを照射しカメラによって撮影された拡大画像中の気泡径を目視できる範囲で測定した。また、MBJ外縁での気泡をサンプリングしその直径をバブルカウンタにより測定した。

MBJの気泡群の流れ方向（ x 軸）への速度分布 u_b は、PIV（Particle Image Velocimetry.）、LDA（Laser Doppler Anemometry）を使って測定し、液相（清水）の速度分布はピト管を用いて測定した。

3. 実験結果と考察

3.1 流動状態

Fig. 2に一例として、水面下500 mmの位置に水平に設置されたマイクロバブル生成ノズルからのMBJの流動状態を示す。図中、白く見えるのがマイクロバブルの気泡群である。 u_{w0} が小さい場合 [Fig. 2(a), (b)], 噴流外縁でのせん断力が小

さいため比較的大きな気泡が生成され水面に向かって上昇するのが分かる。一方、 u_{w0} が大きい場合 [Fig. 2(c)] には微細な気泡が水噴流に乗って下流（ x ）および鉛直方向（ $\pm y$ ）方向に拡散していく。また、気泡の微細化は u_{w0} に依存するのが分かる。

Fig. 1 Details of nozzle head (Orifice nozzle)

(a) $u_{w0}=8.0$ m/s, (b) 19.9 m/s, (c) 26.5 m/s

Fig. 2 Visualized flow pattern of micro-bubble jet flow ($Q_a=0.1$ l/min $|_{n=1, n=4}$)

Fig.3 Micro bubble distribution

Fig.4 Bubble size distribution

Fig.5 Velocity distribution of micro bubble jet ($u_{w0}=19.9$ m/s)

Fig.6 Velocity distribution of micro bubble jet ($u_{w0}=19.9$ m/s)

3.2 気泡径分布

Fig.3 に、 $x/d=30$ での MBJ の中心近傍の気泡分布の拡大写

Fig.7 Jet centerline velocity of micro bubble jet

真を、Fig.4 に、その気泡径分布を示す。気泡は u_{w0} が大きくなると前記したように水噴流外縁での速度勾配が大きくなりより大きなせん断力を受けるため一層微小化され $d_b < 0.05$ mm の微小気泡の頻度 N が大きくなる。なお、平均気泡径 d_m は $u_{w0}=8.0, 19.9, 26.5$ m/s の場合それぞれ $d_m=164, 110, 57$ μm であった。なお、MBJ の外縁で測定したそれは $u_{w0}=26.5$ m/s の場合、 $d_m=20$ μm であった。

3.3 速度分布

Fig.5 に、一例として、オリフィスノズル ($A/A_0=0.25$) からの $u_{w0}=19.9$ m/s, $Q_a=0.1$ l/min, $n=4$ の MBJ の気泡の速度分布 u_b/u_{w0} 、および水噴流のそれ u_w/u_{w0} を示す。分布形は軸対称であったので半径方向の半分の領域のみを示す。水噴流のノズル出口近傍で吸引された空気泡は直ちに微細化され水噴流内に取り込まれ、水噴流との速度差 (slip velocity) ΔU およびそれが存在する中心近傍の領域は下流に向かって減少する。

Fig.6 に、 $x/d=5, 10, 20$ での気泡の速度分布 u_b を最大速度 u_{bm} と半値幅 $y_{0.5}$ で無次元化して示す。 $x/d=5$ での分布形は、図中、実線で示す単相円形噴流に対する Tollmien の計算結果とよく一致するが、 $x/d=10$ では噴流の外側で、 $x/d=20$ では、噴流の中心近傍でそれより小さくなる。

Fig.7 に、中心線速度を示す。単相円形噴流では、コア領域は $x/d=5$ まで存在し下流では $u_w/u_{w0} \propto (x/d)^{-1.0}$ となるが、本マイクロバブル噴流の水噴流では、コア領域は $x/d=4$ までと短かいが、下流 ($x/d > 8$) では上記と同様 $u_w/u_{w0} \propto (x/d)^{-1.0}$ となる。なお、速度差 ΔU は下流に向って減少する。

3.4 マイクロバブル気泡噴流の拡散

速度分布の測定結果 (Fig.5) からマイクロバブル気泡噴流の噴流幅 y_δ と半値幅 $y_{0.5}$ を求め以下の関係を得た。 y_δ と $y_{0.5}$ は共に下流方向に直線的に増加するが単相円形噴流の場合、 $y_{0.5}/d \propto 0.086(x/d)$ 、に比べその広がり小さい。

- $2 < x/d < 10$: $y_\delta/d = 0.1(x/d) + 0.47$
 $y_{0.5}/d = 0.07(x/d) + 0.37$ (1)
- $10 < x/d < 20$: $y_\delta/d = 0.28(x/d) - 1.97$
 $y_{0.5}/d = 0.086(x/d) + 0.14$ (2)

4. まとめ

構造が極めて簡単なマイクロバブル発生ノズルを新たに示すとともに、マイクロバブルの生成メカニズム、マイクロバブル気泡噴流の流動特性などを気泡径分布、マイクロバブル気泡噴流の速度分布、噴流の広がりなどから明らかにした。

参考文献

- [1] 社河内敏彦, 噴流工学, 森北出版, (2004), pp.3-11, 167-176.
- [2] Serizawa, A., Flow Characteristics and Application of Micro Bubble Containing Bubbly Two-Phase Flow, *Proc. of 16th Int. Conf. on Chemical and Process Engineering*, (2004), pp.22-26.
- [3] 角川明・川島英幹・牧野雅彦, 高密度マイクロバブル流れの PIV による計測, 第 70 回船舶技術研究所発表会講演論文集, (1997-12) .