

マイクロバブル、キャビテーション気泡噴流に関する研究

A study on micro bubble, cavitation gas bubble swarm jet flow

正 社河内敏彦 (三重大院) ○ 西尾昌洋 内山道之
正 辻本公一 正 安藤俊剛

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

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

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、吸収させることにも通じ、工学上・工業上も重要である[1]-[3]。

本研究では、新たに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)に空気ノズルを設置し低圧の場に吸引された空気を水噴流の外側せん断層で微小化させる)を提案し、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)の流動特性を気泡径分布、速度分布などの測定から、またそれを用いたエアレーション特性を溶存酸素量の測定から明らかにする。

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。

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 $_{|n=1}$ 、空気ノズル本数 $n=4$ 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・観察した。マイクロバブルの気泡径 d_b は、 $x/d=30$ のMBJ内で、ストロボにより流れを照射しカメラによって撮影した拡大画像中の気泡径を目視できる範囲で測定した。

MBJの気泡群の流れ方向(x)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(水)の速度分布の測定にはピト管を用いた。

本MBJのエアレーション特性は、水槽内の溶存酸素量 C を測定し評価した。すなわち、まず初めに貯水槽内の水の溶存酸素を亜硫酸ソーダ法により除去し、その値が実験時における水温の飽和酸素量 C_s の10%となったところからエアレーションを開始し水槽角部(各側壁からそれぞれ100 mmの位置)での溶存酸素量の時間変化を測定した。

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の位置に設置されたマイクロバブル生成ノズルから $u_{w0}=26.5$ m/s, $Q_a=0.1$ l/min $_{|n=1}$, $n=4$ の場合のMBJの流動状態を示す。

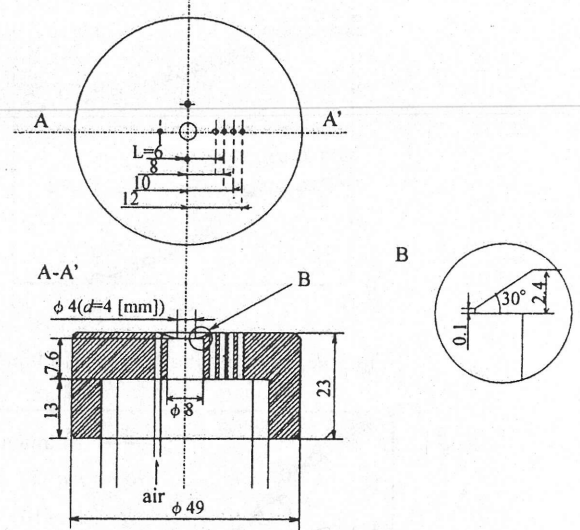


Fig. 1 Details of nozzle head (Orifice nozzle)

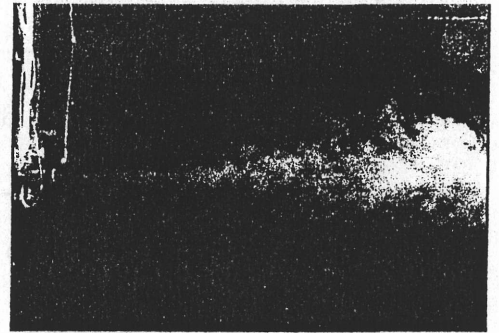


Fig. 2 Visualized flow pattern of micro-bubble jet flow
($u_{w0}=26.5$ m/s, $Q_a=0.1$ l/min $_{|n=1}$, $n=4$)

図中、白く見えるのがマイクロバブルの気泡群である。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様子がわかる。また、噴流外縁での大規模渦構造の変動する様子も見てとれる。

3.2 速度分布

Fig. 3に、 $A/A_0=0.25$ のオリフィスノズルからのMBJの気泡の速度分布 u_b/u_{w0} 、および水単相噴流のそれ 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みを示す。ノズル出口での速度分布 u_b/u_{w0} から、水噴流のノズル出口近傍で吸引された空気が直ちに微小化され水噴流内に取り込まれるのがわかる。また、下流にいくにつれ水噴流との速度差(slip velocity) ΔU が存在する中心近傍の領域が減少する。

Fig. 4に、 $u_{w0}=19.9$, $x/d=10$ での速度分布 u_b/u_{bm} (u_{bm} : 気泡群の最大流速)を示す。 y は半値幅 $y_{0.5}$ で無次元化されている。 u_w/u_{wm} (u_{wm} : 水の最大流速) および $x/d=5$ での u_b/u_{bm} は図中

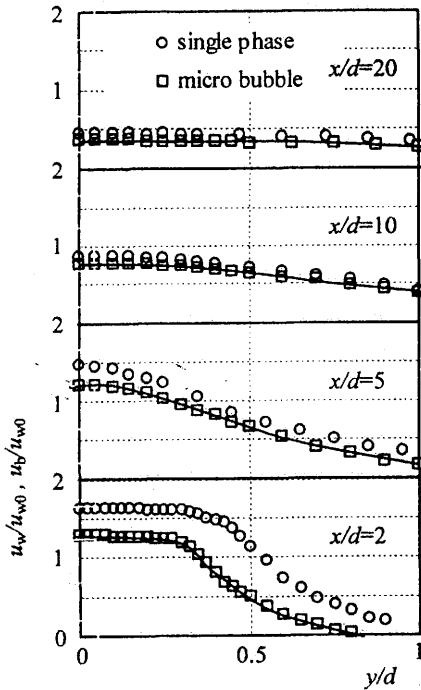


Fig.3 Velocity distribution ($u_{w0}=19.9$ m/s)

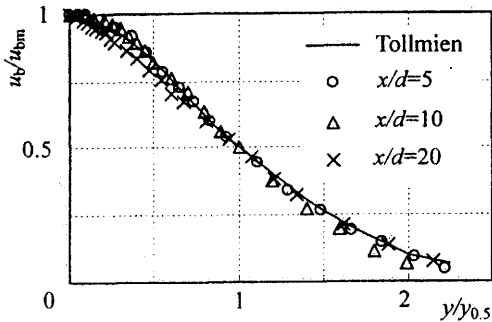


Fig.4 Velocity distribution of bubble swarm ($u_{w0}=19.9$ m/s)

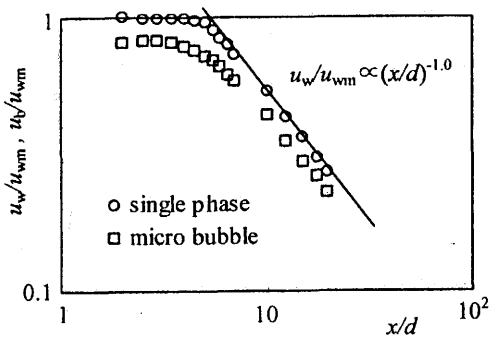


Fig.5 Jet centerline velocity

実線で示す円形水噴流に対する Tollmien の計算結果と良く一致するが、 $x/d=10$ では噴流の外側でそれより小さく、 $x/d=20$ では、中心軸付近でそれより小さくなる。

Fig.5 に、中心線流速を示す。円形水噴流の場合、コア領域は $x/d=5$ まで存在し下流では u_w/u_{wm} は $(x/d)^{-1.0}$ に比例して減衰するが、 $A/A_0=0.25$ のオリフィス噴流では、コア領域は $x/d=4$ までと短かいが、下流 ($x/d>8$) での u_w/u_{wm} は円形水噴流と同様に $(x/d)^{-1.0}$ に比例して減衰する。また、速度差 ΔU は、下流に行くほど小さくなる。

3.3 マイクロバブル気泡噴流の拡散

速度分布の測定結果 (Fig.3) 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。

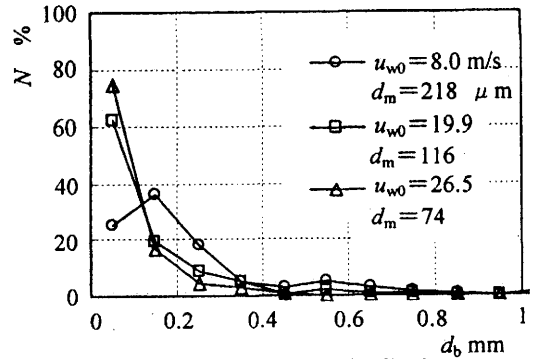


Fig.6 Bubble size distribution

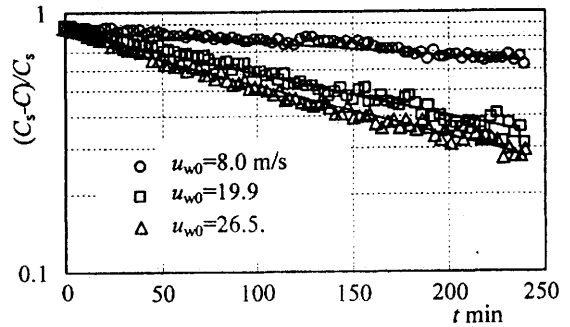


Fig.7 Dissolved oxygen

$$y_\delta/d = 0.1(x/d) + 0.47 \quad (2 < x/d < 10) \quad (1)$$

$$y_{0.5}/d = 0.07(x/d) + 0.37$$

$$y_\delta/d = 0.28(x/d) - 1.97 \quad (10 < x/d < 20) \quad (2)$$

$$y_{0.5}/d = 0.086(x/d) + 0.14$$

y_δ と $y_{0.5}$ は共に下流方向に直線的に増加するが円形水噴流の場合 [$y_{0.5}/d \propto 0.086(x/d)$] に比べその広がり小さい。また、測定結果の差異 (精度) は約 $\pm 10\%$ である。

3.4 気泡径分布

Fig.6 に、 $x/d=30$ の MJB 内での気泡径分布を示す。気泡は u_0 が増加すると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 $u_{w0}=8.0, 19.9, 26.5$ の場合それぞれ $d_m=164, 110, 57 \mu\text{m}$ であった。

3.5 エアレーション特性 (溶存酸素量)

Fig.7 に、各流速 u_{w0} における溶存酸素量 C の時間変化を示す。図中、 C_s は測定時の水温での飽和酸素量 mg/l である。いずれの場合も溶存酸素量は、時間の経過とともにほぼ指数関数的に増加するが u_{w0} が増加すると気泡が微細化され気液界面の接触面積が増加するためさらに増加する。

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群の中心線流速、噴流の広がりなどから、また、エアレーション特性を溶存酸素の測定結果から明らかにした。

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)