

平成 19 年度 修士論文

マイクロバブル気泡噴流の流動解析と  
その気泡塔への応用

**Flow analysis of micro bubble jet flow and  
application to bubble column**

平成 20 年 2 月 6 日提出

主査 社河内 敏彦 教授  
副査 前田 太佳夫 教授  
副査 辻本 公一 准教授



三重大学大学院 工学研究科  
博士前期課程 機械工学専攻  
流動現象学研究室

内山 道之

学 位 論 文 要 旨						
学位論文提出者	氏名	内山 道之	専攻	機械工学	講座	流動現象学
学位論文題目	マイクロバブル気泡噴流の流動解析とその気泡塔への応用					
論文審査委員	主査	社河内 敏彦	副査	前田 太佳夫	副査	辻本 公一
<p>気泡塔は、液を連続相、ガスを分散相（気泡として分散）とする気液接触装置の代表であり、装置構造が単純で操作が簡単であるため、気液反応装置、排水・排ガスの処理装置、発酵槽・培養槽などに広く活用されている。多く用いられてきた気液接触反応装置として通気攪拌槽あるいは気泡塔があるが、装置の大型化に伴い通気に要する所要動力は非常に大きい。その所要動力を軽減することは省エネルギーの見地から望ましいことである。</p> <p>本研究では、実験装置(幅600mm,奥行き250mm,高さ2000mm)を排水処理における曝気槽の形状に多く見られる製作しやすい長方形型断面とし、液混合を促進するために主流となっているエアリフト式を採用した。気泡塔底面片側に2本の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細化させる〕を設置し、マイクロバブルを曝気することで循環流を生じさせる。本研究では、気泡塔内の流動状態を気泡の速度分布、気泡径分布の測定から、また、マイクロバブル噴流によるエアレーションの効果を溶存酸素量の経時変化の測定から明らかにし、溶存酸素量の変化を気泡流に起因して誘起される流れとの関係において明らかにする。</p> <p>得られた主な結果は、以下のようなものである。</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>(1) 気泡群は塔壁面に沿いながら上昇し、上昇する気泡内で微細な気泡は循環流により水平方向へと渦巻くようにしながら拡散し、下降流に乗って下降して行く。一方比較的大きい径を有する気泡は、循環流に乗らず壁に沿ったまま流れ、そのまま気泡塔液面から大気へ排出される。</li> <li>(2) 空気流量を増加させると、気泡の上昇速度・下降速度ともに幾分増加する。</li> <li>(3) 循環流量は<math>Q_a</math>の増加に伴い増加し、その増加量は<math>Q_a=0.6</math> l/minでは<math>Q_a=0.2</math> l/minに比べ仕切板なし、<math>L=1.0, 1.3, 1.5</math>mに対してそれぞれ、約25%、約23%、約20%、約19%増加する。</li> <li>(4) 仕切板を設置した場合、仕切板なしに比べ循環流量が大きく減少する。</li> <li>(5) 仕切板を設置すると、ほとんどの条件で仕切板なしに比べ溶存酸素が増加する。下流側において仕切板なしに比べ、<math>L=1.0</math>m, <math>t=30</math> minでの溶存酸素量の増加量は<math>Q_a=0.2, 0.4, 0.6</math> l/minでそれぞれ約19%、約15%、約14%である。</li> <li>(6) 約10倍の気泡発生器で曝気した場合より、全条件において溶存酸素量が増加する。</li> <li>(7) 気泡塔の分散相をマイクロバブルにする事で非常に効果が得られたといえる。</li> </ol>						
論 文 目 録						
<ol style="list-style-type: none"> <li>(1)社河内・西尾・辻本・安藤・内山, "マイクロバブル、キャビテーション噴流に関する研究", 日本機械学会東海支部第56期総会講演会講演論文集, No.073-1, (2007-3), pp.251-252.</li> <li>(2)社河内・内山・西尾・辻本・安藤, "マイクロバブル気泡噴流の流動特性", 可視化情報学会, 可視化情報全国講演会講演論文集, (2007-9), pp.61-62.</li> <li>(3)社河内・内山・行方・辻本・安藤, "マイクロバブル気泡塔に関する研究", 日本機械学会東海支部第57期総会講演会講演論文集, (2008-3).</li> </ol>						

# 目次

第1章 緒論	1
記号と座標系	3
第2章 マイクロバブル気泡噴流	5
2.1 実験装置	
2.1.2 マイクロバブル生成ノズルの詳細	6
2.1.2 実験装置の概略	6
2.2 実験方法	
2.2.1 実験条件	6
2.2.2 流れの可視化・観察	7
2.2.3 気泡の広がり幅	7
2.2.4 速度分布	7
2.2.5 気泡径分布	8
2.2.6 溶存酸素量	8
(1) 亜硫酸ソーダ法	8
(2) ガス交換係数	9
2.3 結果と考察	
2.3.1 マイクロバブルの生成メカニズム	17
2.3.2 流動特性	17
(1) 流動状態	18
(2) 速度分布	18
(3) マイクロバブル気泡噴流の拡散	20
(4) ノズル出口近傍の圧力分布	21
(5) 気泡径分布	21
(6) エアレーション特性	22

第3章	マイクロバブル気泡塔への応用	34
3.1	実験装置の概略	34
3.2	実験方法	
3.2.1	実験条件	35
3.2.2	流れの可視化・観察	35
3.2.3	速度分布・循環流量	35
3.2.4	気泡径分布	36
3.2.5	溶存酸素量	36
3.3	結果と考察	
3.3.1	流動状態	39
3.3.2	空気流量の影響	46
(1)	気泡径分布	46
(2)	速度分布	47
(3)	循環流量	48
(4)	エアレーション特性（溶存酸素量）	48
3.3.3	仕切り板長さの影響	64
(1)	気泡径分布	64
(2)	速度分布	64
(3)	循環流量	65
(4)	エアレーション特性（溶存酸素量）	65
3.3.4	多孔質セラミック製気泡発生器との比較	78
(1)	流動状態	78
(2)	エアレーション特性（溶存酸素量）	78
第4章	結論	87
	謝辞	89
	参考文献	90

## 第 1 章 緒 論

近年、河川・湖沼・内湾等の閉鎖性水域における水質汚染が深刻化し、底層での無酸素あるいは貧酸素水域の拡大や赤潮等の発生により水中生物の減少や養殖魚介類への被害などが問題となっている。これらの問題の改善策として、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。このことは気体を液体中に効率的に拡散・混合・吸収させること、あるいは気泡噴流を使った洗浄操作、などにも通じ、工学および工業上、非常に重要である。<sup>[1]-[2]</sup>

マイクロバブルは、水中で気泡同士の合体や吸収が起こりにくく単一気体のままで存在し、浮上速度が非常に遅いため水中での滞留時間が長く水平方向への拡散性に優れている。また、単位体積当たりの気泡の表面積すなわち周囲流体との接触面積が非常に大きいため水中に溶解しやすい、電気的な帯電により水中浮遊物に対する吸着性を有する、などの特徴がある。またエアレーションとしての応用の他に、船舶の抵抗軽減、二枚貝の成長促進、人体への温浴効果の促進などへの応用が進められている。

多様なマイクロバブル発生方式が存在するが、マイクロバブルを利用する場合、利用用途に応じて発生装置の選択が重要な課題となる。さらに、気泡の上昇速度、水中への溶解能など気泡単体に関する研究は多くなされているが、マイクロバブル気泡噴流の流動特性に関する報告は十分な段階であるとはいえない。

気泡塔は、液を連続相、ガスを分散相（気泡として分散）とする気液接触装置の代表であり、装置構造が単純で操作が簡単であるため、気液反応装置、排水・排ガスの処理装置、発酵槽・培養槽などに広く活用されている。又、気泡塔の性能は、気泡の挙動に強く支配される。多く用いられてきた気液接触反応装置として通気援幹檜あるいは気泡塔があるが、いずれも装置の大型化にともない、通気に要する所要動力は非常に大きい。その所要動力を軽減することは省エネルギーの見地から望ましいことであるがその実現は容易ではない。

本研究では、新たに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、それによって生じる微小気泡噴流（マイクロバブル気泡噴流）の流動特性を気泡径分布、気泡の速度分布の計測、ピトー管による測定から明らかにする。

また、マイクロバブル気泡噴流のエアレーション特性を水槽内の溶存酸素量の経時

変化を測定することから明らかにする。

次いで、マイクロバブルを気液反応装置の代表である気泡塔への応用を試みた。マイクロバブルの特徴に注目し、気泡塔における分散相をマイクロバブルにする事で、処理速度の向上を期待した。

本研究では、実験装置を排水処理における曝気槽の形状に多く見られる製作しやすい長方形型断面とし、液混合を促進するために主流となっているエアリフト式（塔内の一部に通気すると、気泡の上昇する部分では液も一緒に上昇し、気泡が比較的少ない部分で液が下降する。このように、ガスの体積割合の異なる部分を塔内に作り、この密度差を推進力とする液流れを発生させる現象をエアリフトと呼ぶ。）を採用した。

本研究では、気泡塔内の流動状態を気泡の速度分布、気泡径分布の測定から、また、マイクロバブル噴流によるエアレーションの効果を溶存酸素量の経時変化の測定から明らかにし、溶存酸素量の変化を気泡流に起因して誘起される流れとの関係において明らかにする。

## 記号と座標系

$A$	:	水ノズル出口断面積	[ $\text{mm}^2$ ]
$A_o$	:	オリフィスノズルのパイプ断面積	[ $\text{mm}^2$ ]
$C$	:	溶存酸素量	[ $\text{mg/l}$ ]
$C_s$	:	飽和酸素量	[ $\text{mg/l}$ ]
$D$	:	気泡塔奥行き	[ $\text{m}$ ]
$d$	:	水ノズル直径	[ $\text{mm}$ ]
$d_b$	:	気泡径	[ $\text{mm}$ ]
$d_m$	:	平均気泡径	[ $\text{mm}$ ]
$d_s$	:	空気ノズル直径	[ $\text{mm}$ ]
$g$	:	重力加速度	[ $\text{m/s}^2$ ]
$H$	:	気泡塔高さ	[ $\text{m}$ ]
$h$	:	水深	[ $\text{m}$ ]
$K_{La}$	:	ガス交換係数	
$L$	:	仕切板長さ	[ $\text{m}$ ]
$L_a$	:	水ノズル・空気ノズル中心間距離	[ $\text{mm}$ ]
$N$	:	気泡径分布（頻度）	[ $\%$ ]
$n$	:	ノズル数	[本]
$O$	:	水ノズル出口中心	
$P$	:	圧力	[ $\text{Pa}$ ]
$P_\infty$	:	大気圧	[ $\text{Pa}$ ]
$Q$	:	流量	[ $\text{l/min.}$ ]
$Q_c$	:	循環流量	[ $\text{m}^3/\text{s}$ ]
$Re$	:	レイノルズ数 (= $u_{w0}d/\nu$ )	
$A_b$	:	気泡の表面積	[ $\text{m}^2$ ]
$t$	:	時間	[ $\text{min.}$ ]
$u$	:	流体の速度	[ $\text{m/s}$ ]
$u_0$	:	ノズル出口平均流速	[ $\text{m/s}$ ]

$u_m$	:	最大流速	[m/s]
$u_c$	:	ノズル出口中心線流速	[m/s]
$W$	:	気泡塔幅	[m]
$w_b$	:	気泡噴流の広がり幅	[m]
$X$	:	水ノズル出口中心 $O$ から主流方向への距離	[m]
$Y$	:	水ノズル出口中心 $O$ からノズル半径方向への距離	[m]
$Z$	:	X-Y 平面に垂直な方向への距離	[m]

ギリシャ文字

$\nu$	:	動粘性係数	[m <sup>2</sup> /s]
$\rho$	:	密度	[kg/m <sup>3</sup> ]

下付添え字

<b>a</b>	:	空気
<b>Hg</b>	:	水銀
<b>w</b>	:	水
<b>b</b>	:	気泡



## 第 2 章 マイクロバブル気泡噴流

図 2.1 に本実験での流れの概略図と座標系を示す。ノズル（図の斜線部分）の中心に設置された直径  $d$  の水ノズルから噴出された水噴流は半径方向に  $L_a$  離れた直径  $d_s$  の空気ノズルから噴出された空気を巻き込み、水噴流と周囲流体あるいは水噴流内の速度勾配の大きなせん断層に生じるせん断力によって微細化し、マイクロバブル気泡噴流となって水中を上昇していく。

座標系  $x$ ,  $y$ ,  $z$  軸は、水ノズル出口中心を原点  $0$  とし、鉛直上方向に  $x$  軸を、ノズル半径方向に  $y$  軸を、 $x$ - $y$  平面に垂直な方向に  $z$  軸をとった。

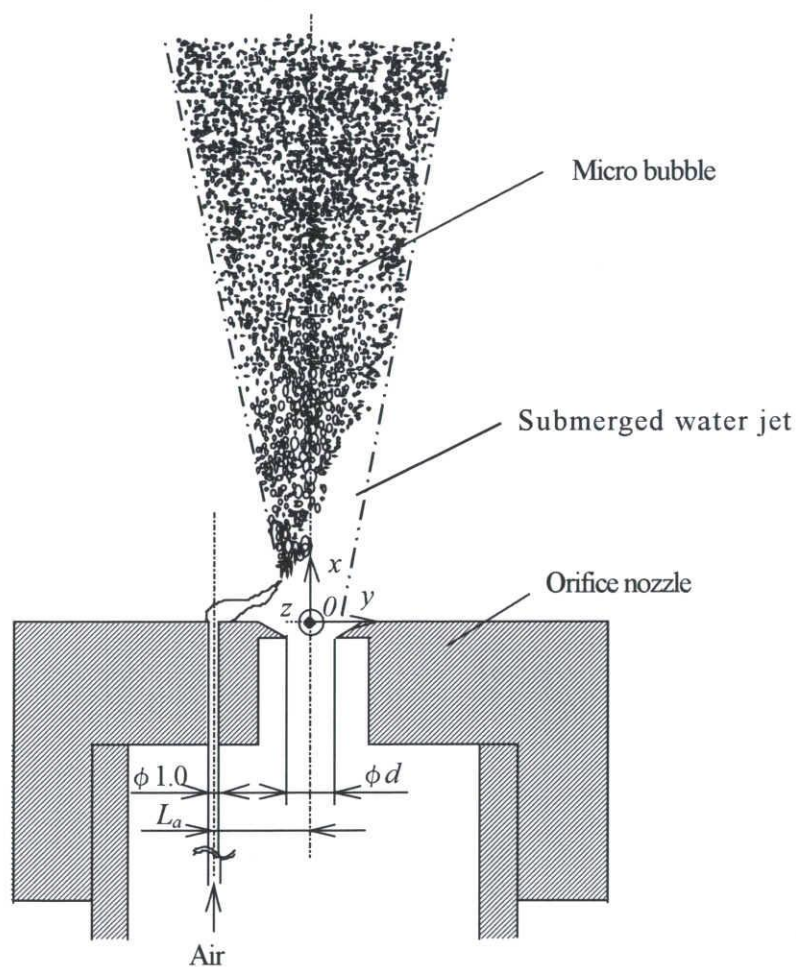


Fig.2.1 Flow model of micro bubble jet and coordinate system

## 2.1 実験装置

### 2.1.1 マイクロバブル生成ノズルの詳細

図 2.2 にノズルの詳細を示す。ノズルヘッド部中央に、出口直径  $d=4.0$  mm、オリフィス形状の水ノズル[図 2.2 を参照]が、そこから 6.0 mm 離れた十字方向 4 カ所に直径  $d_s=1.0$  mm の空気ノズルが、またそのうち 1 方向に 2 mm 間隔で 3 カ所に設けており、水ノズル中心から空気ノズル中心までの距離  $L_a = 6.0, 8.0, 10.0, 12.0$  mm ( $L_a/d = 1.5, 2.0, 2.5, 3.0$ )となっている。使用する空気ノズル数  $n$  は調節可能である。なお、ノズルヘッドはポンプに繋がる貯水チャンバに、空気ノズルはコンプレッサーに繋がる貯気槽に接続されている。

図 2.3 に、本実験で用いたノズル出口直径 4 mm オリフィス形状のノズルの詳細を示す。空気ノズルおよびノズル中心間距離  $L_a/d$  は上記に示した通りである。

### 2.1.2 実験装置の概略

図 2.4 に、実験装置全体の概略図を示す。貯水槽① [2500×1250×1070 mm, 水位=1000mm (一定)] からポンプ(川本ポンプ製)②によって加圧された水は、流量調節弁③、電磁流量計④を経た後、水槽側壁面の底から  $h_n=500$  mm (調節可能) の位置に水平に設置されたノズル⑥から貯水槽内に噴出される。空気はエアコンプレッサ (ANSEST IWATA RECIPRO COMPRESSOR MODEL : TFP55-10) ⑦から気体用浮遊式流量計⑤で流量調節を行い、水ノズル近傍に設置された空気ノズルから噴出される。水は循環しており、水ノズルから噴出される水噴流流量  $Q_w$  は 0~23 l/min の範囲で、噴出空気流量  $Q_a$  は 0~0.5 l/min/nozzle の範囲で調節が可能となっている。

## 2.2 実験方法

### 2.2.1 実験条件

本研究で用いたノズルの特性を明らかにした後、より大きな実験装置(図 2.4 参照)を用い、マイクロバブル気泡噴流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した。実験は、ノズル出口平均流速  $u_{w0} = 8.0, 19.9, 26.5$  m/s ( $Q_w = 6.0, 15.0, 20.0$  l/min),  $Q_a = 0.1$  l/min| $n=1$ ,  $L_a/d=1.5$ ,  $n=4$  として測定した。なお、 $u_{w0}=26.5$  m/s の場合、キャビテーション (液体の流れ中での圧力が飽和蒸気圧より低くなったとき、液体が蒸発・溶存気体の遊離で

気泡が生じる現象)が起こる。

### 2.2.2 流れの可視化・観察

空気が水噴流のせん断層に巻き込まれて微細化され、マイクロバブル気泡噴流となり気泡が上昇していく全体的な様子を、クセノンスリット光源 [(株)カトウ光研] を用いて  $x$ - $y$  平面で光切断し、気泡をトレーサとしてデジタルビデオカメラを用いて可視化を行った。(図 2.4 参照)

### 2.2.3 気泡の広がり幅

気泡広がり幅  $w_b$  の測定は、クセノンスリット光源によって光切断し、気泡をトレーサとして、諸条件に対し撮影した画像により、各  $x/d$  でそれぞれ 5 回測定しその平均値を用いた。(図 2.4 参照)

### 2.2.4 速度分布

速度分布の測定は作動流体を水として測定を行った。しかし、作動流体を水とした場合高速水噴流のため、測定が非常に困難である。そこで、LDA, PIV, ピトー管の 3 種類の測定方法を用い、測定を行った。測定断面は  $x$ - $y$  平面とする。

#### (1) LDA による測定

LDA [Laser Doppler Anemometry : DANTEC, FVA (Flow Velocity Analyzer)] を用い、気泡群の速度  $u_b$  を  $2 < x/d < 20$  の領域で測定を行った。装置の概略図を図 2.4 に示す。測定は  $x$ - $y$  平面に対し垂直にレーザー光を入射し、トラバース装置により噴流中心より  $x$  および  $y$  方向に移動させることによって測定を行った。このシステムは FLOWare (DANTEC) で制御され、測定条件をサンプル測定数 3000 個とした。

#### (2)ピトー管による測定

水単相噴流および気液二相噴流の液相の速度分布を測定するため、ピトー管を用い、それを U 字管マンメータおよびブルドン管に接続し、測定を行った。ピトー管は総圧管、静圧管それぞれ独立したものとなっており、ピトー管に接続されたチューブを高さ 2 m の U 字管水銀柱マンメータに取り付け、ヘッド差を読み取ることで圧力を算出

し、測定値を得た。また、U字管で測定できない場合ではブルドン管圧力計（第一計器）を用い測定した。

### 2.2.5 気泡径分布

マイクロバブルの気泡径  $d_b$  および気泡存在頻度  $N$  測定、A(600~630, -15~15, 0 mm) の範囲を一眼レフカメラによって撮影を行った。撮影した画像を拡大し、諸条件に対し目視できる範囲で測定した。なお、画像処理で測定可能な最小気泡径は約  $30 \mu\text{m}$  である。

水平方向マイクロバブル気泡噴流の場合、水噴流の速度が高速なため、気泡がより微細化される。よって  $30 \mu\text{m}$  以下の気泡径分布を測定するために  $2\sim 125 \mu\text{m}$  の気泡径が測定可能なパーティクルカウンタ [リキッドセンサ LIQUILAZ-20 (ソナック)] を用い、A' (600, -150, 0 mm) の位置で測定を行った。測定は、測定位置から測定センサまでポンプにより流量  $40 \text{ ml/min}$  で吸引し、気泡径をセンサで測定した後、パイプを経て再び貯水槽内へ戻る閉ループとなっている。また、1分毎に得られたデータを5回平均し測定値とした。(図 2.4 参照)

### 2.2.6 溶存酸素量

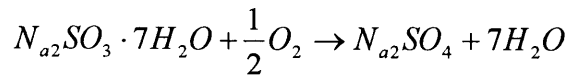
溶存酸素量の測定は、A' (-65, -425, 525 mm) の比較的噴流の影響のない位置に溶存酸素計（堀場製作所：MODEL OM-12）を設置し、測定を行った。

測定は、亜硫酸ソーダ法により水中の酸素を除去し、飽和酸素量の 10% となったところから 240 分間 60 秒毎に溶存酸素量の経時変化を測定した。

また、水中への酸素の溶解に対する指標であるガス交換係数  $K_{La}$  も用いて評価を行った。<sup>[4]</sup> (図 2.4 参照)

#### (1) 亜硫酸ソーダ法

溶存酸素量  $C$  の測定は、亜硫酸ソーダ法を用いて行った。亜硫酸ソーダ法は水槽内の水に亜硫酸ナトリウム七水和物 ( $\text{Na}_2\text{SO}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O} = 252.15$ ) を投入攪拌混合し、均一濃度にした後に反応を促進するため触媒として塩化コバルト (II) 六水和物 ( $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} = 273.93$ ) を必要量添加攪拌し、水槽内の溶液の溶存酸素量を除去する方法である。この反応の化学反応式は以下に示す。



この反応により水槽内の溶液の溶存酸素量をほぼ零にした後にマイクロバブル気泡噴流を発生させ測定を行った。

## (2)ガス交換係数

測定した溶存酸素量の時間変化から酸素のガス交換係数  $K_{La}$  を求めた。ガス交換係数については以下に示す。

水槽内に発生させたマイクロバブルはその成分移動を周囲流体との界面を通じて行う。その移動を説明するために、以下に示す二重境膜説を用いた。

### 1. 二重境膜説

図 2.5 に Lewis, Whitman による気体と液体からなる境膜モデルにより導いた速度式を説明するモデル（二重境膜説）の概略図を示す。まず、気体と液体との境界面でそれぞれの側に停滞膜があると考え、物質の移動は必ずこの停滞膜を通じて行われるとする。また、境膜内の濃度 ( $P, C$ ) は界面からの距離に対して直線的に変化する。さらに、以下に示す 3 つの仮定により定義がなされる。

- ・ 気液界面で流体は層流である。
- ・ 移動する物質の濃度分布は定常状態であり時間変化しない。
- ・ 気体が液体と接触したとき  $P_i$  と  $C_i$  の間には瞬間的に平衡が成立する。

定常状態で単位面積当たりのガスの一方向への物質移動速度  $N_A$  は、気相（ガス）がガス境膜を通過する速度と液境膜を通過する速度が等しくならなければならないことから以下のように示される。

$$N_A = k_G(P_G - P_i) = k_L(C_i - C_L) \quad (2.1)$$

ここで、 $k_G, k_L$  は、

$$k_G = \frac{D_G}{(RTZ_G)} : \text{ガス境膜を基準とした物質移動係数}$$

$$k_L = \frac{D_L}{Z_L} : \text{液境膜を基準とした物質移動係数}$$

$D$  : 拡散係数

である。

ここで、気液平衡がある濃度範囲では図 2.5 で示したように以下に示す直線関係が成り立つと仮定する。

$$P_i = HC_i + P_0 \quad (2.2)$$

$$P_G = HC' + P_0 \quad (2.3)$$

$$P' = HC_L + P_0 \quad (2.4)$$

ここで、 $H$ ,  $C'$ ,  $P'$  は、

$H$  : ヘンリー定数

$C'$  : 液相が気相の  $P$  と平衡状態にある場合の液相の酸素濃度

$P'$  : 液相における濃度  $C$  と平衡状態にある場合の気相中の酸素分圧

式(2.1)～(2.4)より Lewis らはガス側の分圧  $P$  または液側で溶解した濃度  $C$  を基準とした気液界面での濃度分布の関係を示し、総括物質移動係数  $K_G$ ,  $K_L$  を導出した。

$$N_A = K_G(P_G - P') = K_L(C' - C_L) \quad (2.5)$$

ここで、 $K_G$ ,  $K_L$  は、

$K_G$  : ガス境膜を基準とした総括物質移動係数

$K_L$  : 液境膜を基準とした総括物質移動係数

また、 $K_G$ ,  $K_L$ ,  $k_G$ ,  $k_L$  の間には以下のような関係がある。

$$\frac{1}{K_G} = \frac{1}{k_G} + \frac{H}{k_L} \quad , \quad \frac{1}{K_L} = \frac{1}{(Hk_G)} + \frac{1}{k_L} \quad (2.6)$$

## II. 拡散による気-液間の物質移動

気-液間の拡散による物質移動の推進力は、気相における分圧の勾配と液相における濃度勾配に依存する。ここで、まず液相での溶存気体の分子拡散速度を考えると、物質の移動量は Fick の法則から気体、液体の特性、温度、濃度勾配及び拡散が起こる断面積を使って以下のように示される。

$$N = -D_L A \left( \frac{dc}{dy} \right) \quad (2.7)$$

ここで、 $N$ ,  $D_L$ ,  $A$ ,  $dc/dy$  は、

$N$  : 単位時間当たりの物質移動量

$D_L$  : 液体境膜と通じての濃度拡散係数

$A$  : 拡散が起こる横断面積

$dc/dy$  : 横断面に水力方向の濃度勾配

いま、界面において平衡状態が成り立つと仮定すると、拡散の物質移動過程は以下の式で示される。

$$N = -D_G A \left( \frac{dp}{dy} \right) = -D_L A \left( \frac{dc}{dy} \right) \quad (2.8)$$

ここで、 $D_G$  は、

$D_G$  : 気体境膜を通じての分子拡散係数

上に示した二重境膜説より式(2.8)は、

$$N = K_G (P_G - P) = K_L (C_s - C) \quad (2.9)$$

次に、液境膜で支配される過程に対して濃度単位で書き換えると

$$\frac{1}{V}N = \frac{dc}{dt} = K_L \left( \frac{A}{V} \right) (C_s - C) \quad (2.10)$$

$$K_L \left( \frac{A}{V} \right) = K_{La}$$

ここで、 $K_{La}$ 、 $V$ は、

$K_{La}$  : ガス交換係数

$V$  : 液容量

一般に界面の面積を測定することは実際に不可能であるので、移動速度の計算にはガス交換係数  $K_{La}$  が用いられる。

式(2.10)より  $K_{La}$  の計算式を導き出すと

$$K_{La} = \frac{2.303}{(t_2 - t_1)} \log \left\{ \frac{(C_s - C_1)}{(C_s - C_2)} \right\} \quad (2.11)$$

ここで、 $t_1$ 、 $t_2$ 、 $C_1$ 、 $C_2$ は、

$t_1$ 、 $t_2$  : 時間

$C_1$ 、 $C_2$  :  $t_1$ 、 $t_2$ における溶存酸素量

一般に、水中への酸素の溶解はこのガス交換係数  $K_{La}$  により評価される。



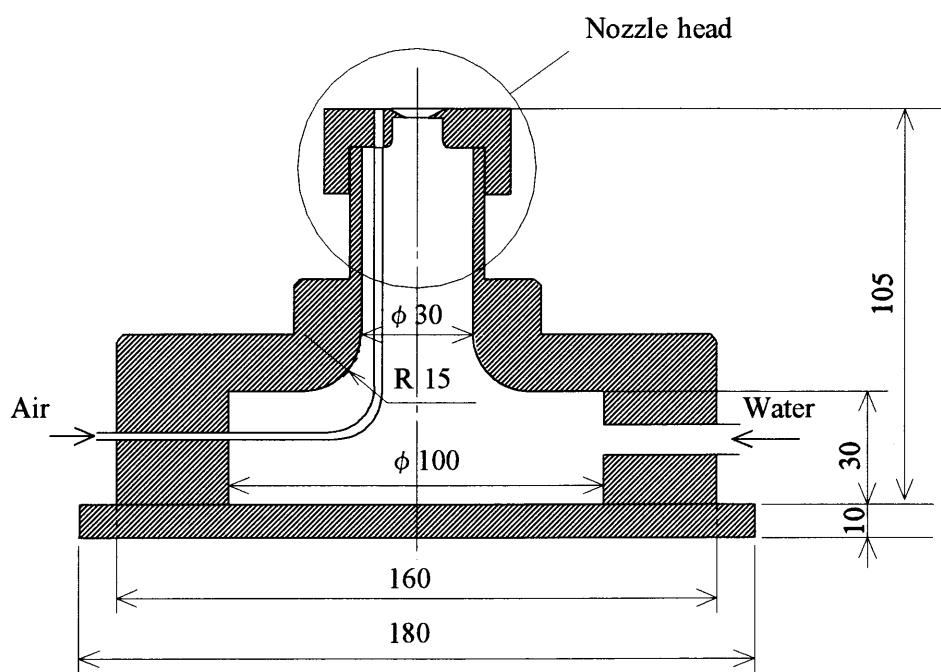


Fig.2.2 Details of nozzle

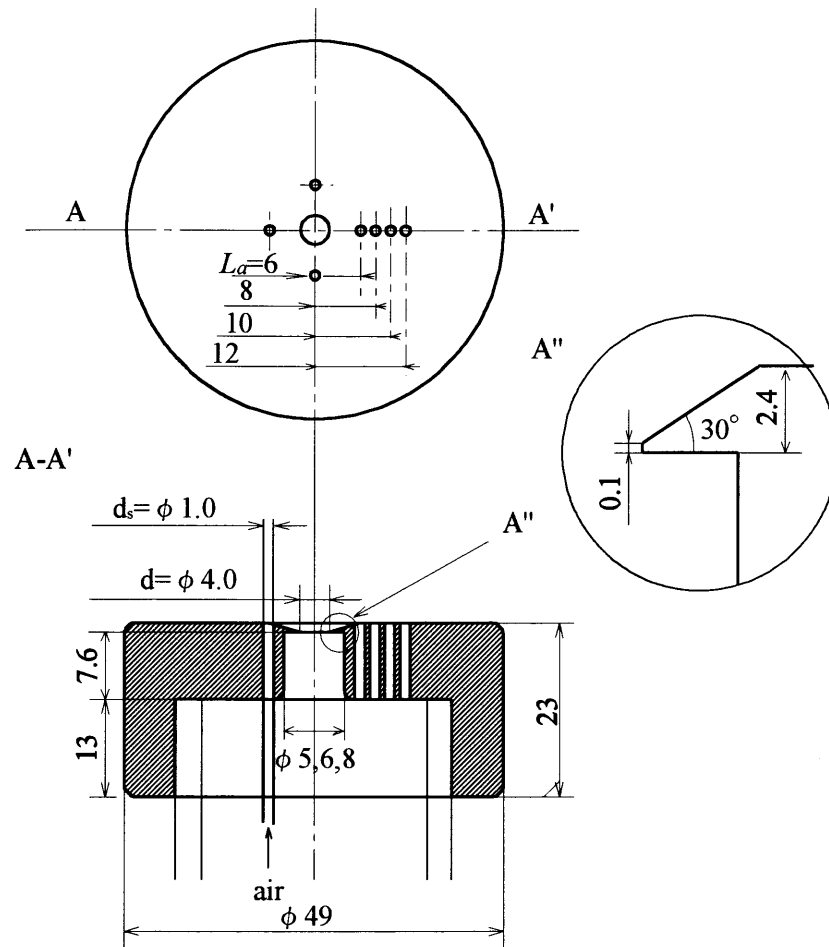


Fig.2.3 Detail of nozzle head

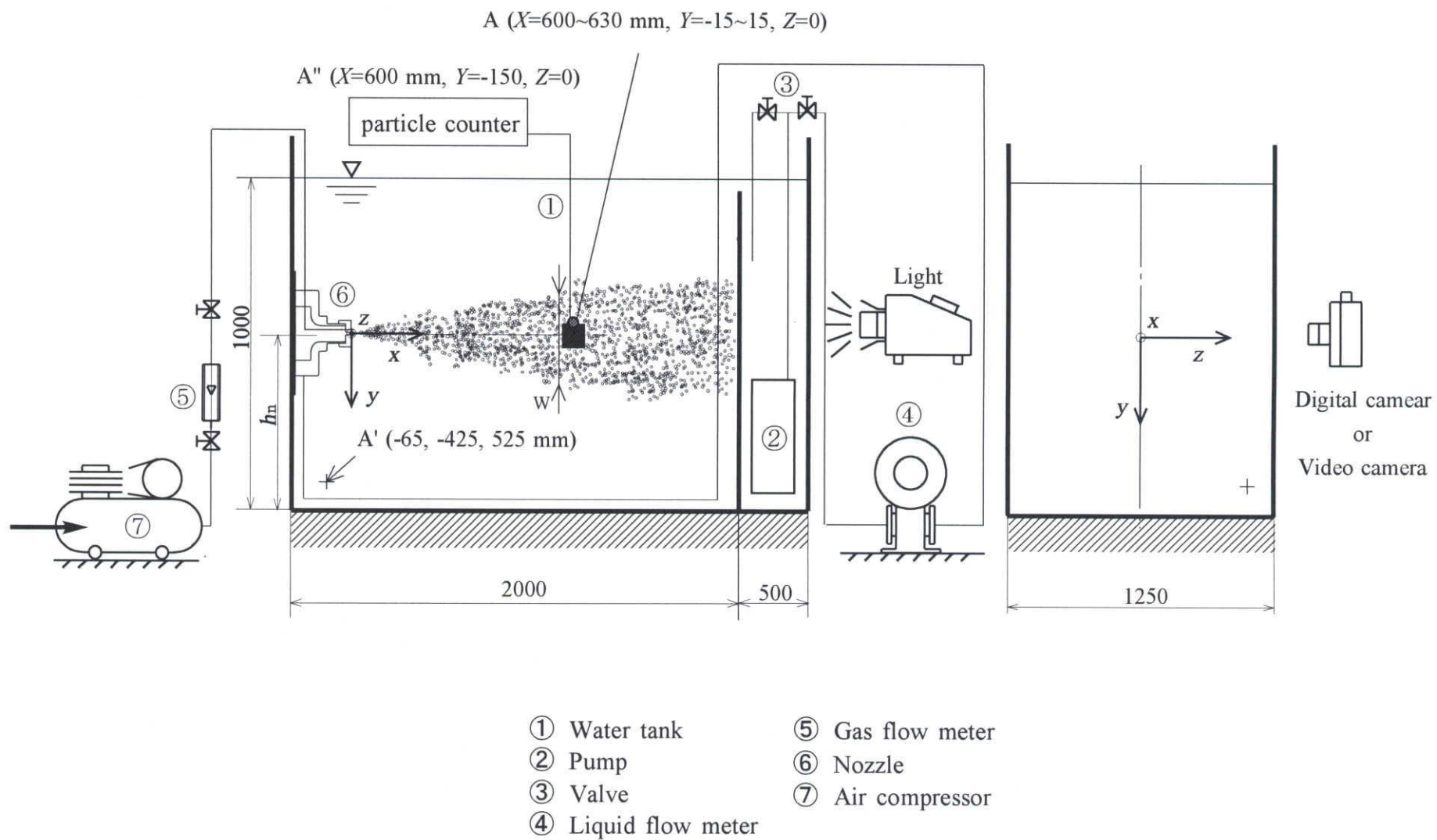


Fig.2.4 Experimental set-up

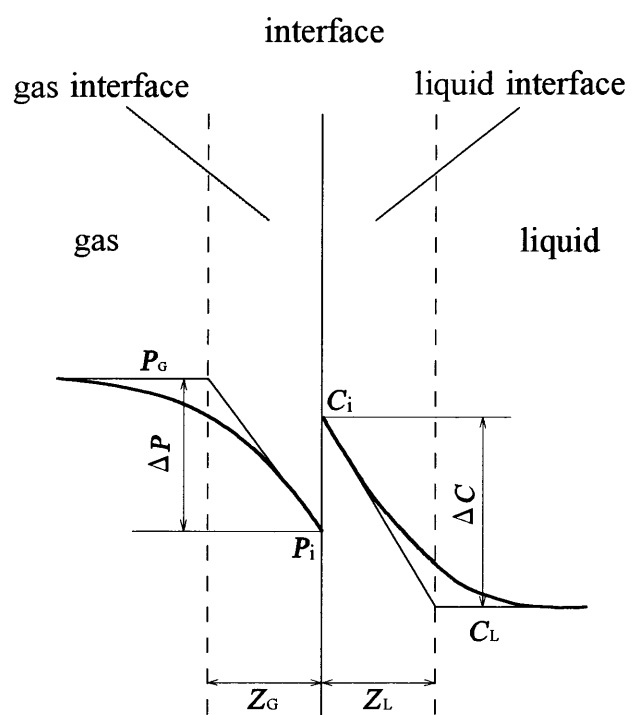


Fig.2.5 Gas diffusion model

## 2.3 結果と考察

### 2.3.1 マイクロバブルの生成メカニズム

本節では、本実験でのマイクロバブルの生成メカニズムを示す。

図 2.6 に、微小気泡生成の概略図および可視化画像を示す。概略図は噴流が軸対称より片側のみが示してある。水中で比較的高速の水噴流を噴出させ、その近傍に空気ノズルを設置すると、水噴流は周囲の水とともに空気泡を速度勾配の大きなせん断層に誘引する。周囲流体と水噴流の境界（噴流の外縁）で空気泡は速度差（速度勾配）によって生じるせん断力を受け、せん断され微細化される。さらに水噴流内に誘引された気泡は、水噴流内のせん断力によっても微細化される。生成されたマイクロバブルの大きさは、せん断力の大きさに依存する。このように、本マイクロバブル生成ノズルは極めて簡単な構造を有する。

図 2.6(a), (b)のそれぞれに、噴出空気流量  $Q_a = 0.4 \text{ l/min} |_{n=1}$ 、噴出空気位置  $L/d = 1.5$ 、空気ノズル数  $n = 1$  とし、水噴流流量  $Q_w = 2.0, 6.0 \text{ l/min}$  ( $u_{w0} = 2.7, 8.0 \text{ m/s}$ 、それぞれ  $Re = 10570, 31700$ ) とした場合のノズル出口近傍における気泡噴流の可視化画像を示す。画像内の白く写っている部分が気泡噴流である。

$Q_w = 2.0 \text{ l/min}$  の場合、水噴流の流速が比較的低いため周囲流体の巻き込みも弱く、噴流外縁でのせん断力、噴流内のせん断力ともに小さくなっている。そのため巻き込まれた気泡はあまり微細化されずに上昇している。一方  $Q_w = 6.0 \text{ l/min}$  の場合は、 $Q_w = 2.0 \text{ l/min}$  の場合に比べ噴流のノズル出口平均流速  $u_{w0}$  が大きく空気ノズルから噴出された空気がすぐに巻き込まれ、噴流外縁、噴流内でのせん断力により気泡が微細化されて微小気泡となって上昇している。

### 2.3.2 流動特性

この節では、マイクロバブル気泡噴流の流動特性を気泡径分布、速度分布から明らかにし、また、エアレーション特性を水槽内の溶存酸素量の経時変化を測定することから明らかにする。なお、 $Q_a = 0.1 \text{ l/min} |_{n=1}$ 、 $L_a/d = 1.5$ 、 $n = 4$ 、 $A/A_o = 0.25$  としノズル出口平均流速  $u_{w0} = 8.0, 19.9, 26.5 \text{ m/s}$  ( $Q_w = 6.0, 15.0, 20.0 \text{ l/min}$ 、それぞれ  $Re = 31700, 79280, 105580$ ) と変化させることによる影響も考察する。 $u_{w0} = 26.5 \text{ m/s}$  の場合、キャビテーションが起こっている。

## (1) 流動状態

図 2.7, 2.8 に  $h_n=500$  mm (水槽底面からの距離) の位置に設置されたマイクロバブル生成ノズルからの各ノズル出口平均流速に対する MBI の流動状態およびノズル出口近傍の様子を示す。

図中、白く見えるのがマイクロバブルの気泡群であり気泡が微細なため、それらが水噴流の流れに乗って下流 ( $x$ ) 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取れる。

各ノズル出口平均流速に対し、水噴流が高速 ( $u_{w0}=19.9, 26.5$  m/s) の場合、気泡がより微細化されるため、気泡噴流が噴霧状に見られるが、低速 ( $u_{w0}=8.0$  m/s) になると気泡が高速の場合よりも微細化されないため、浮力の影響によりやや水面側に湾曲したように見て取れる。

また、ノズル出口近傍において噴出した空気は水噴流に瞬時に巻き込まれている様子が見て取れる。 $u_{w0}=8.0$  m/s の場合ノズル出口近傍においても比較的大きな径の気泡が見られるが、 $u_{w0}=19.9, 26.5$  m/s の場合、かなり径の小さい気泡が生成されていることがわかる。

## (2) 速度分布

作動流体を水とし、水単相噴流および MBI の気泡群の速度分布の測定を行った。なお、気泡群の速度は LDA を用いて得られた結果を示す。

### I. 高速水噴流 $u_{w0}=19.9$ m/s の場合

図 2.9(a)に  $A/A_0=0.25$  のオリフィスノズルから  $u_{w0}=19.9$  m/s で水噴流を噴出する場合の  $x$  方向に対するマイクロバブル気泡噴流の気泡群の速度分布  $u_b/u_{w0}$ 、水単相噴流のそれ  $u_w/u_{w0}$  および気液二相噴流の液相のそれ  $u_L/u_{w0}$  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。

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泡が直ちに微細化され水噴流内に取り込まれるのがわかる。また、 $x/d=2$  において  $u_w/u_{w0}$  は噴流幅がノズル幅よりも小さく縮流が生じていることがわかりその後下流に行くにつれ減衰する。

ノズル出口近傍  $x/d=2$  において  $u_L/u_{w0}$  と  $u_w/u_{w0}$  を比較すると若干差が見られるが誤

差範囲内であり、各段面においてほぼ等しい値となる。 $u_b/u_{w0}$  は  $u_w/u_{w0}$  に比べ中心軸近傍において速度差(slip velocity)  $\Delta u$  が存在する。これは、本マイクロバブル生成ノズルは高速で水噴流を噴出させるため速度差が生じると考えられる。しかし、下流に行くにつれ、マイクロバブルは水単相噴流の速度に追従し  $\Delta u$  がかなり小さくなる。

図 2.10(a)に  $x/d=5, 10, 20$  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  $x/d=10, 20$  での  $u_b/u_{bm}$  は図中実線で示す円形水噴流に対する Tollmien の計算結果<sup>[6]</sup>と良く一致するが、 $x/d=5$  では中心軸近傍においてやや大きくなるため、まだこの付近の領域は遷移領域であることがわかる。

図 2.11(a)に、中心線流速を示す。円形水噴流の場合、コア領域は  $x/d \approx 5$  まで存在し下流では  $u_w/u_{wc}$  ( $u_{wc}$ : 水のノズル出口中心線流速) 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  $x/d \approx 4$  までと短かいが、下流 ( $8 < x/d$ ) での  $u_w/u_{wc}$  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  $\Delta u$  は、下流に行くほど小さくなる。

## II. キャピテーション噴流 $u_{w0}=26.5$ m/s の場合

図 2.9(b)に  $u_{w0}=26.5$  m/s で水噴流を噴出する場合の  $u_b/u_{w0}$ 、 $u_w/u_{w0}$  および  $u_L/u_{w0}$  を示す。

$u_{w0}=19.9$  m/s と同様に  $u_L/u_{w0}$  と  $u_w/u_{w0}$  を比較すると若干差が見られるが誤差範囲内であり、各段面においてほぼ等しい値となる。また、 $u_w/u_{w0}$  はノズル出口近傍  $x/d \approx 2$  においては縮流が生じ、中心軸近傍において  $u_b/u_{w0}$  との速度差  $\Delta u$  が存在する。また、下流に行くにつれ  $\Delta u$  は小さくなる。なお、LDA の測定の限界値が  $-30 \sim 30$  m/s であり、 $x/d \approx 2$  の領域における中心軸近傍の速度はそれ以上となり測定できなかったため、測定できた領域のみ示してある。

次に、図 2.10(b)に  $x/d=5, 10, 20$  での速度分布  $u_b/u_{bm}$  を示す。 $u_{w0}=19.9$  m/s と同様に  $x/d=10, 20$  での  $u_b/u_{bm}$  は Tollmien の計算結果と良く一致するが、 $x/d=5$  では全く一致しない。 $x/d=5$  の領域はまだ発達領域ではないとわかる。

また、図 2.11(b)に、中心線流速を示す。 $u_{w0}=19.9$  m/s に比べ巻き込み量が増加し拡散が大きくなるため、コア領域は  $x/d \approx 3$  までと短くなるが、 $8 < x/d$  になると同様に  $(x/d)^{-1.0}$  に比例して減衰する。また、速度差  $\Delta u$  は、下流に行くほど小さくなるが、 $u_b/u_{wc}$

は  $u_{w0}=19.9$  m/s の場合、 $u_w/u_{w0}$  とほぼコア領域が同じ位置であるが、若干それより下流側に位置する。

(3) マイクロバブル気泡噴流の拡散

I. 高速水噴流  $u_{w0}=19.9$  m/s の場合

速度分布の測定結果 [図 2.9(a)] からマイクロバブル気泡噴流の噴流幅  $y_\delta$  (最大流速  $u_{bm}$  の 10%となる速度の位置) と半値幅  $y_{0.5}$  を求め以下の関係を得た。

$$\frac{y_\delta}{d} = 0.14\left(\frac{x}{d}\right) + 0.27 \quad (2 < x/d < 10) \quad (2.12)$$

$$\frac{y_{0.5}}{d} = 0.07\left(\frac{x}{d}\right) + 0.23$$

$$\frac{y_\delta}{d} = 0.18\left(\frac{x}{d}\right) + 0.02 \quad (10 < x/d < 20) \quad (2.13)$$

$$\frac{y_{0.5}}{d} = 0.086\left(\frac{x}{d}\right) + 0.15$$

$y_\delta$  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  $2 < x/d < 10$  では縮流が起きているためその広がり小さい。しかし、 $10 < x/d < 20$  においてはそれとほぼ等しくなる。また、測定結果の差異(精度)は約±10%である。

II. キャビテーション噴流  $u_{w0}=26.5$  m/s の場合

速度分布の測定結果 (図 2.9(b)) から噴流幅  $y_\delta$  と半値幅  $y_{0.5}$  を求め以下の関係を得た。

$$\frac{y_\delta}{d} = 0.11\left(\frac{x}{d}\right) + 0.61 \quad (5 < x/d < 10) \quad (2.14)$$

$$\frac{y_{0.5}}{d} = 0.085\left(\frac{x}{d}\right) + 0.23$$



$$\frac{y_{\delta}}{d} = 0.18 \left( \frac{x}{d} \right) - 0.15$$

$$\frac{y_{0.5}}{d} = 0.07 \left( \frac{x}{d} \right) + 0.42$$

(10 < x/d < 20) (2.15)

$y_{\delta}$  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  $5 < x/d < 10$  ではその広がりほぼ等しくなる。しかし、 $10 < x/d < 20$  においてはやや小さくなる。

#### (4) ノズル出口近傍の圧力分布

図 2.13 にノズル出口近傍  $x/d=1$  の半径方向  $y/d=0 \sim 0.5$  における  $u_{w0}=19.9, 26.5 \text{ m/s}$  の圧力分布を示す。両者とも噴流内およびノズル出口近傍は負圧となっており、 $u_{w0}=19.9 \text{ m/s}$  の場合、中心軸から外縁にいくに従って圧力が上昇していくが、 $u_{w0}=26.5 \text{ m/s}$  の場合、 $y/d=0.25$  付近まで圧力上昇がなく、それより外縁に進むにつれて圧力が上昇していく。またこれにより、 $0 < y/d < 0.4$  付近に空気ノズルを設置することで大気中から空気を自給することが可能であることがわかる。

次に、図 2.14 にその圧力分布から空気が自給可能な水深  $h \text{ m}$  との関係を示す。実験は  $h_n=750 \text{ mm}$  で行ったため水面から  $250 \text{ mm}$  を基準にし  $h$  を算出している。

これにより、噴流中心に空気ノズルの設置することは噴流に影響を与えるため、 $y/d=0.3$  付近に設置したと仮定した場合、 $u_{w0}=19.9 \text{ m/s}$  で水深約  $3 \text{ m}$ 、 $u_{w0}=26.5 \text{ m/s}$  で約  $7 \text{ m}$  まで空気が自給できる。

#### (5) 気泡径分布

##### I. 画像処理による気泡径分布の測定

図 2.15 に画像処理によって測定した MBJ 内での気泡径分布を示す。気泡は  $u_{w0}$  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細化され  $d_b < 0.05 \text{ mm}$  の微小気泡の頻度  $N$  が大きくなる。

次に、図 2.16 に平均気泡径  $d_m$  と速度の関係を示す。 $u_{w0}=8.0, 19.9, 26.5 \text{ m/s}$  の場合それぞれ  $d_m=218, 116, 74 \mu\text{m}$  であった。これにより以下の式を得た。

$$d_m = -0.008(u_{w0}) + 0.28 \quad (2.16)$$

また、図 2.17 に接触面積  $A_b$  を示す。気泡径分布に従い、速度を増加させていくと気泡がより微細化されるため、接触面積も増加する。これにより以下の式を得た。

$$A_b = 0.19(u_{w0}) + 1.9 \quad (2.17)$$

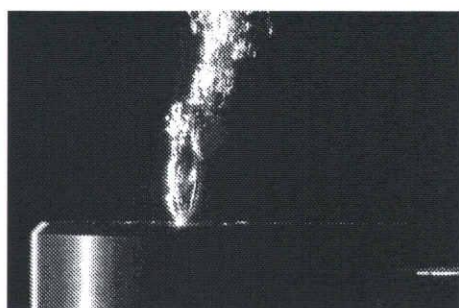
## II. パーティクルカウンタによる気泡径分布の測定

図 2.18 にパーティクルカウンタによって測定した気泡径分布を示す。より細かい気泡が  $u_{w0}=19.9, 26.5$  m/s の条件においてみられたのでその条件のみ測定した。分布形はほぼ同様な形となり、両条件において最小気泡径は約  $10 \mu\text{m}$  であり、 $15 \sim 20 \mu\text{m}$  の頻度が最も大きくなる。また、 $u_{w0}$  が増加すると水噴流外縁での速度勾配が大きくなり気泡はより大きなせん断力を受けるため、 $u_{w0}=26.5$  m/s の場合、よりその頻度が高くなる。

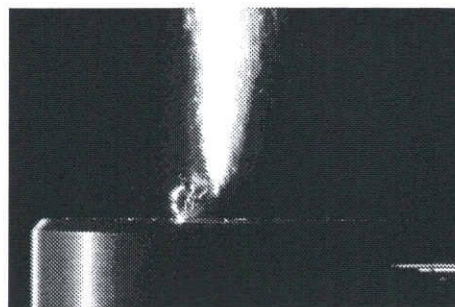
### (6) エアレーション特性（溶存酸素量）

図 2.19 に各速度  $u_{w0}$  に対する溶存酸素量  $C$  の時間変化を示す。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。 $u_{w0}$  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。図 2.20 にガス交換係数  $K_{La}$  を示す。 $u_{w0}=19.9$  m/s までは直線的に増加するが、それ以降流速を増加させても大きな変化は見られなかった。

$$K_{La} = -4 \times 10^{-5}(u_{w0})^2 + 0.0017(u_{w0}) - 0.01 \quad (2.18)$$



(a)  $Q_w = 2.0$  l/min  
( $u_{w0} = 2.7$  m/s ,  $Re = 10570$ )



(b)  $Q_w = 6.0$  l/min  
( $u_{w0} = 8.0$  m/s ,  $Re = 31700$ )

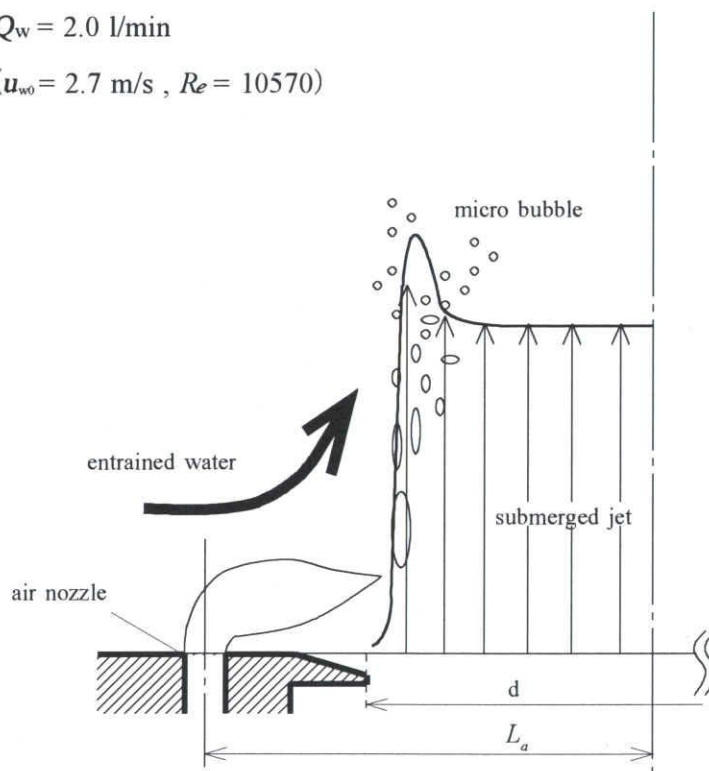
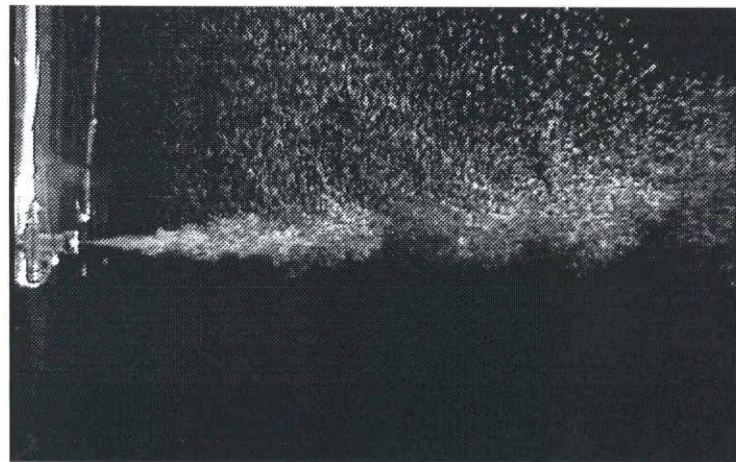
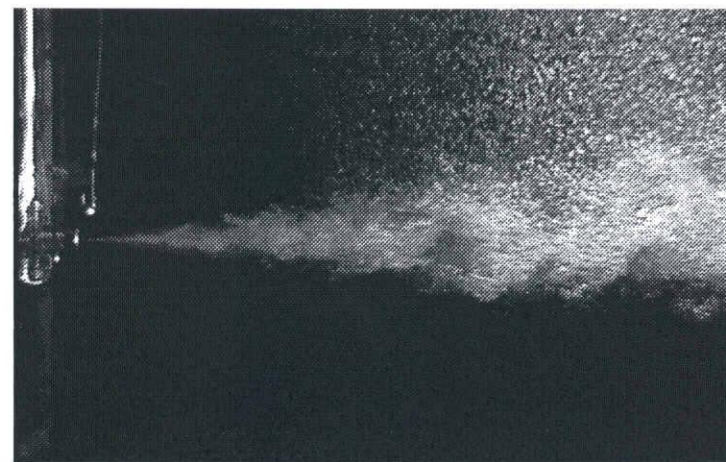


Fig.2.6 Microbubble generation



( i )  $u_{w0}=8.0$  m/s



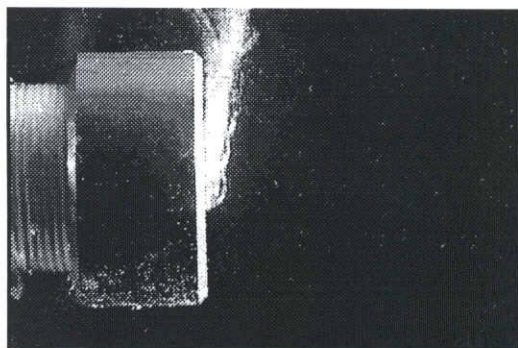
( ii )  $u_{w0}=19.9$  m/s



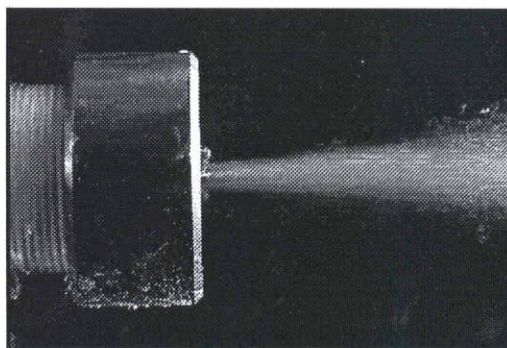
( ii )  $u_{w0}=26.5$  m/s

Fig.2.7 Visualized flow pattern

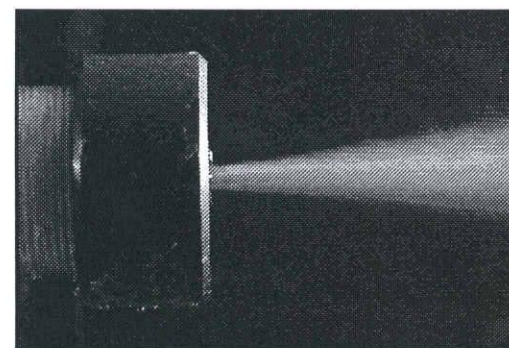
$$(Q_a=0.4 \text{ l/min}|_{n=1}, L_a/d=1.5, n=1)$$



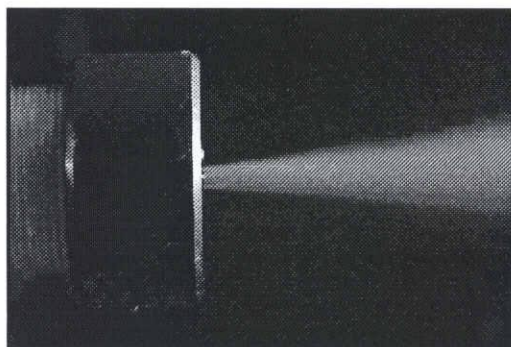
( i )  $u_{w0}=0.0$  m/s



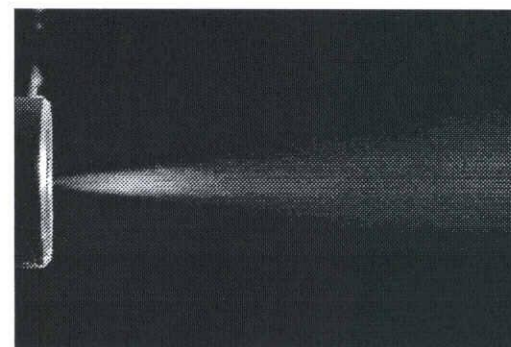
( ii )  $u_{w0}=8.0$  m/s



( iii )  $u_{w0}=19.9$  m/s



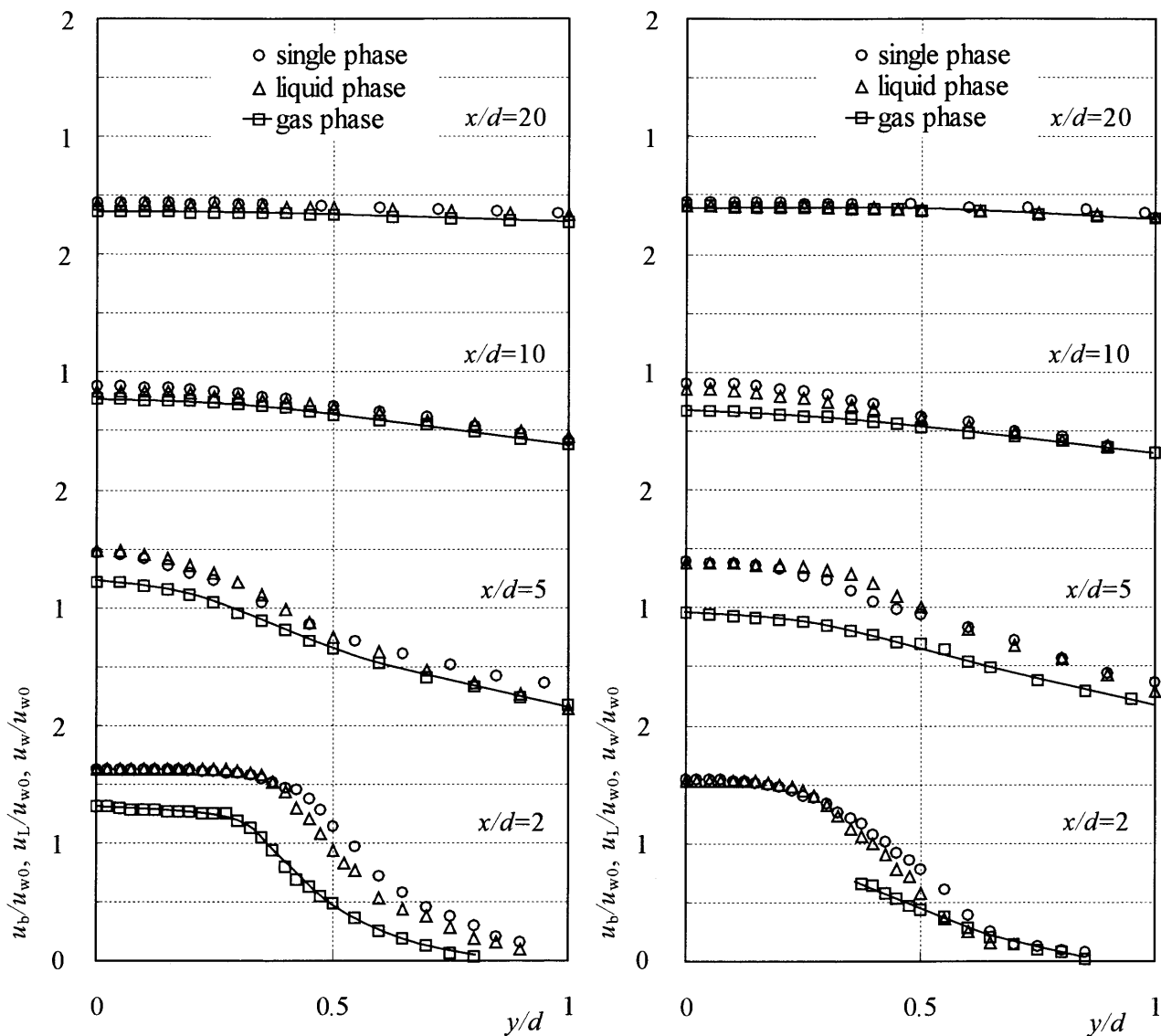
( iv )  $u_{w0}=26.5$  m/s



( v )  $u_{w0}=26.5$  m/s (cavitation flow)

Fig.2.8 Visualized flow pattern near orifice nozzle

$$(Q_a=0.4 \text{ l/min}|_{n=1}, L_a/d=1.5, n=1)$$

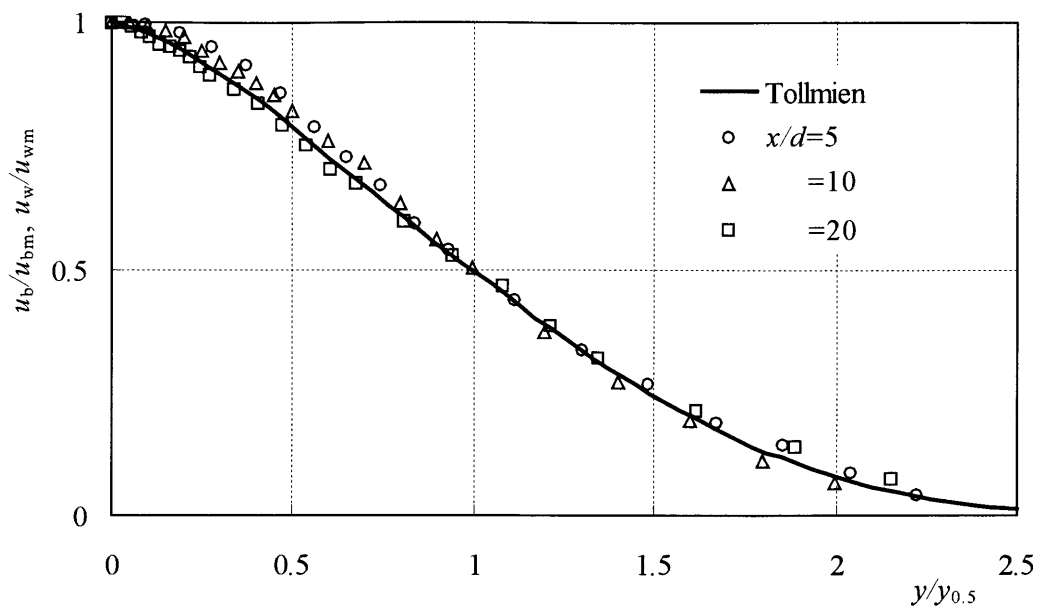


(a)  $u_{w0} = 19.9$  m/s

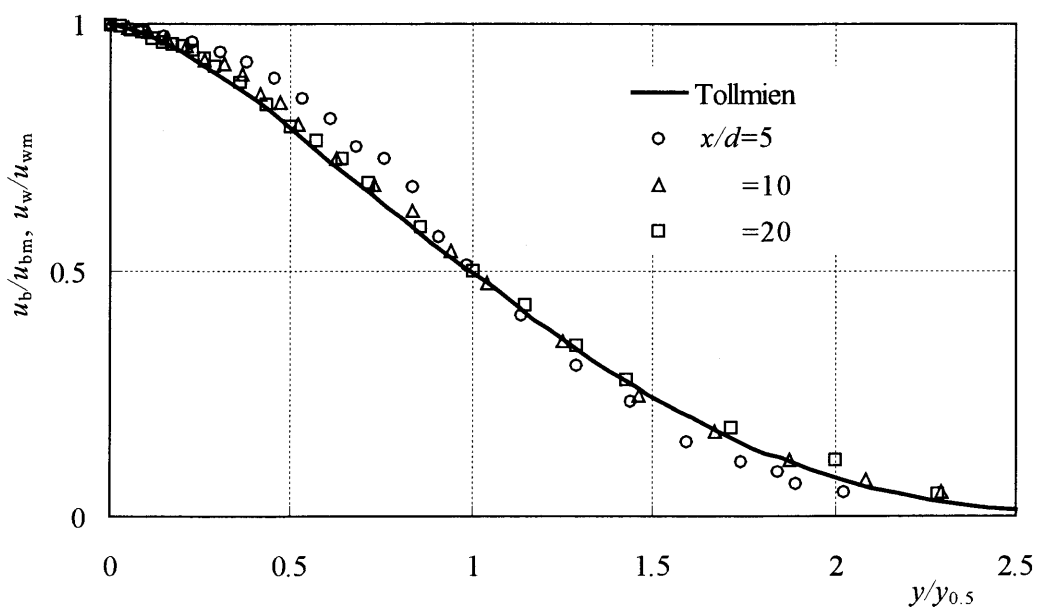
(b)  $u_{w0} = 26.5$  m/s

Fig.2.9 Velocity distribution

$$(Q_a = 0.4 \text{ l/min}|_{n=1}, L_a/d = 1.5, n=1)$$



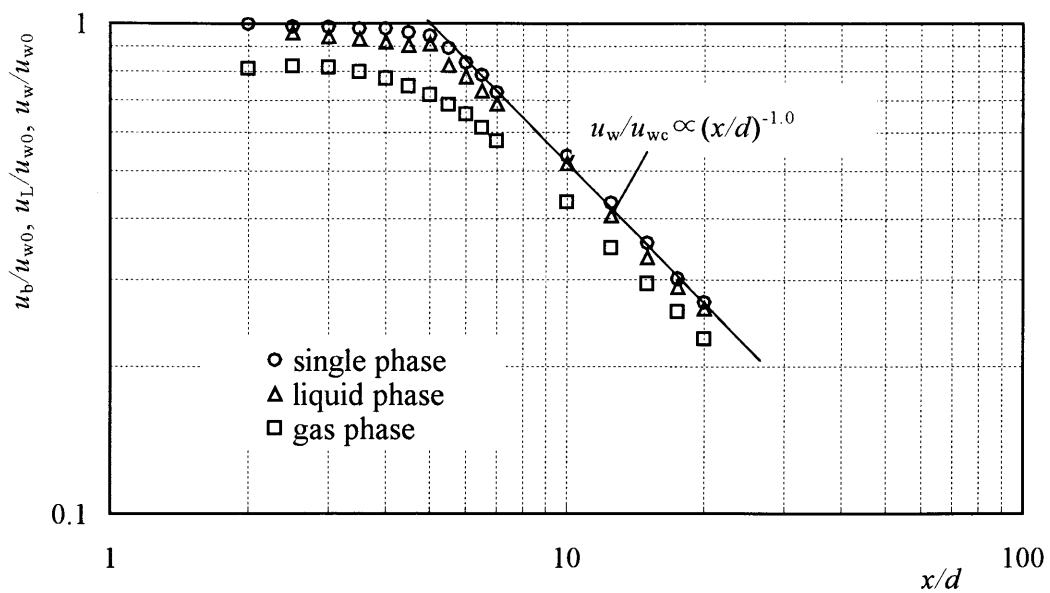
(a)  $u_{w0} = 19.9$  m/s



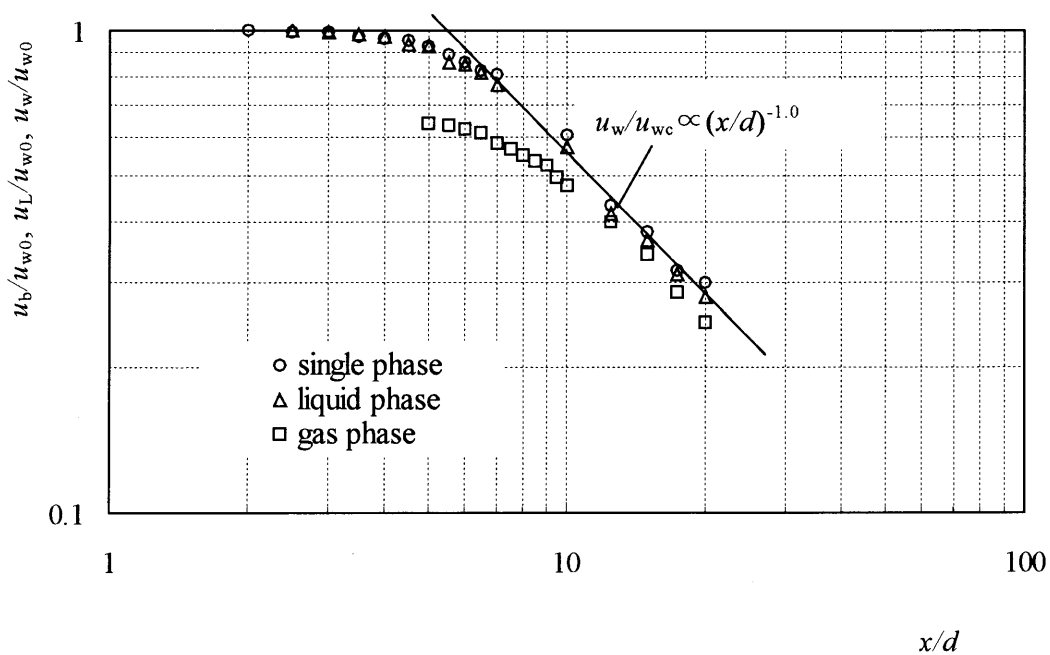
(b)  $u_{w0} = 26.5$  m/s

Fig.2.10 Velocity distribution of bubble swarm

$(Q_a = 0.4 \text{ l/min}|_{n=1}, L_a/d = 1.5, n=1)$



(a)  $u_{w0}=19.9$  m/s

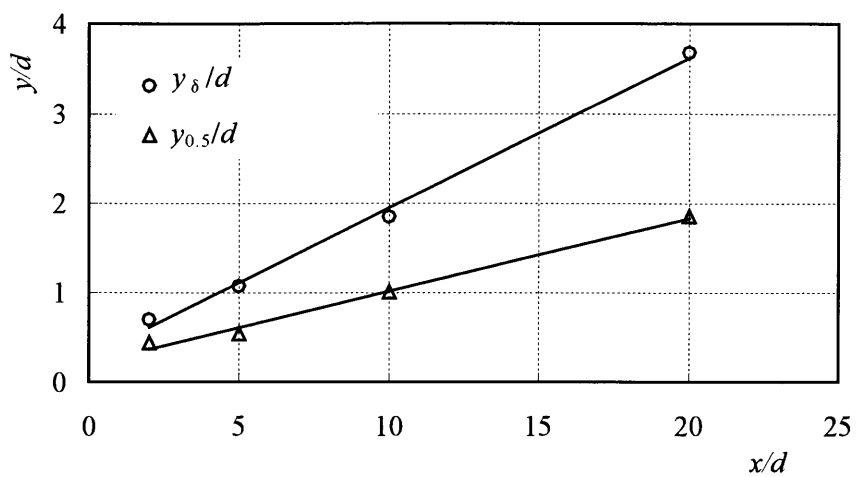


(b)  $u_{w0}=26.5$  m/s

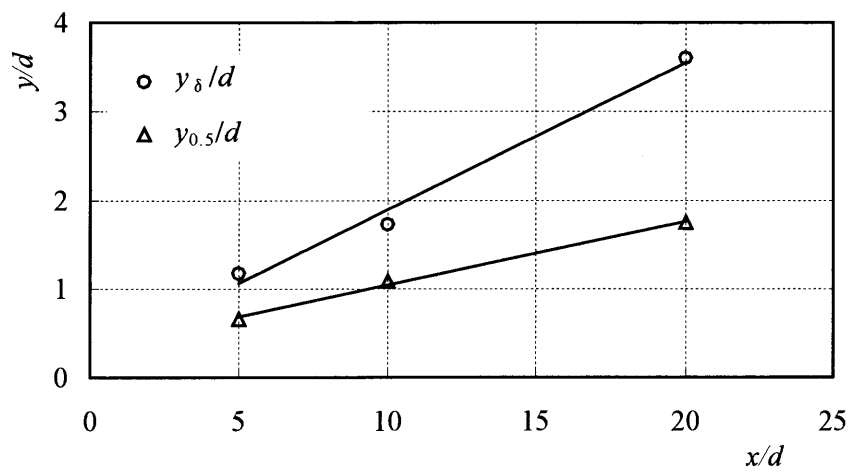
Fig.2.11 Centerline velocity

$(Q_a=0.4 \text{ l/min}|_{n=1}, L_a/d=1.5, n=1)$





(a)  $u_{w0}=19.9$  m/s



(b)  $u_{w0}=26.5$  m/s

Fig.2.12 Diffusion of micro bubble jet

$(Q_a=0.4$  l/min $_{|n=1}$ ,  $L_a/d=1.5$ ,  $n=1)$

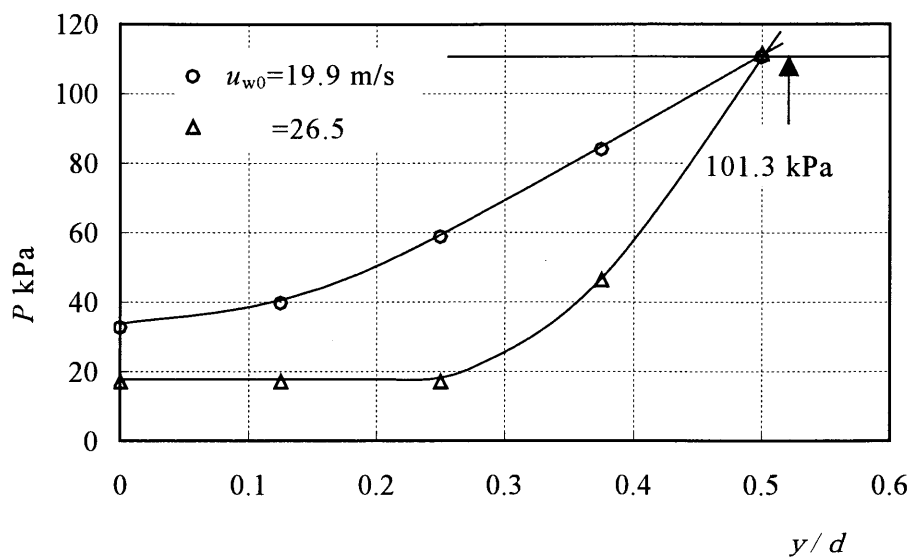


Fig.2.13 Pressure distribution

$(Q_a = 0.4 \text{ l/min}|_{n=1}, L_a/d = 1.5, n=1)$

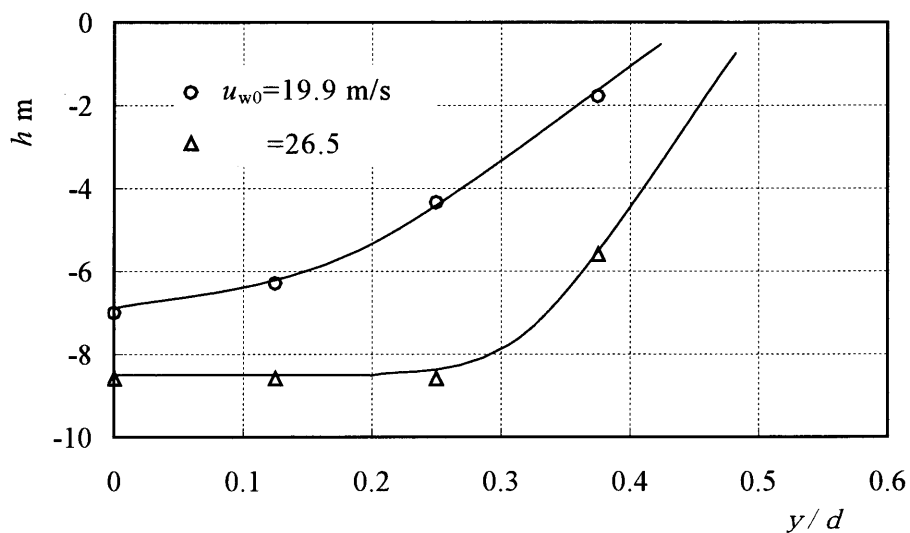


Fig.2.14 Depth of water

$(Q_a = 0.4 \text{ l/min}|_{n=1}, L_a/d = 1.5, n=1)$

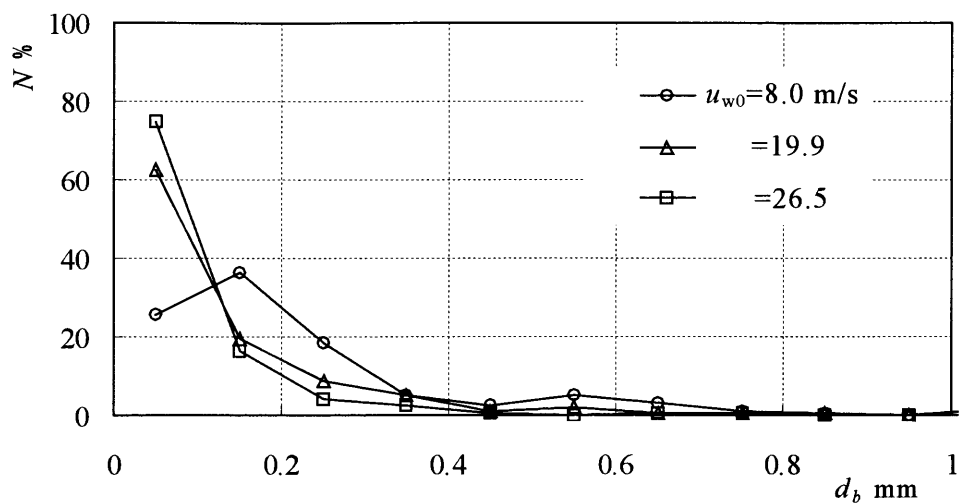


Fig.2.15 Bubble size distribution

( $Q_a=0.4$  l/min<sub>|<sub>n=1</sub></sub>,  $L_a/d=1.5$ ,  $n=1$ )

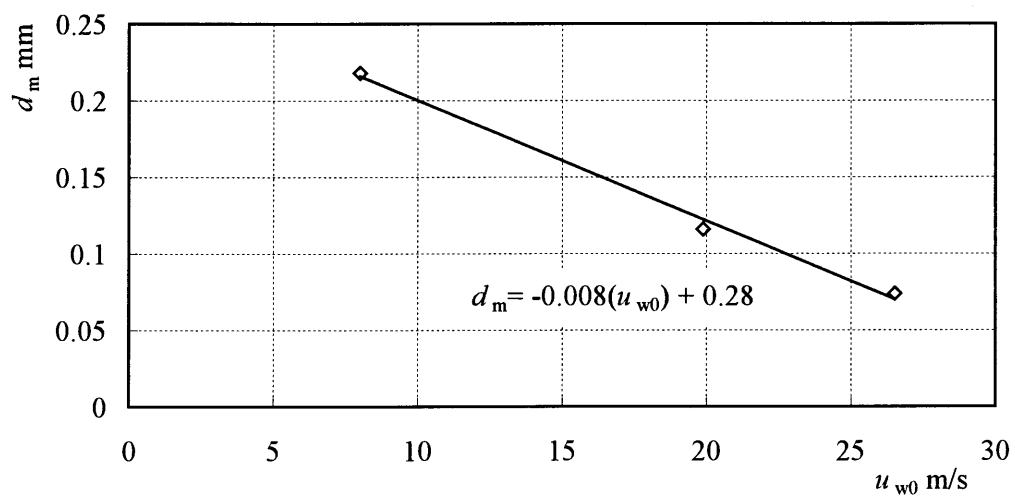


Fig.2.16 Mean bubble diameter

( $Q_a=0.4$  l/min<sub>|<sub>n=1</sub></sub>,  $L_a/d=1.5$ ,  $n=1$ )

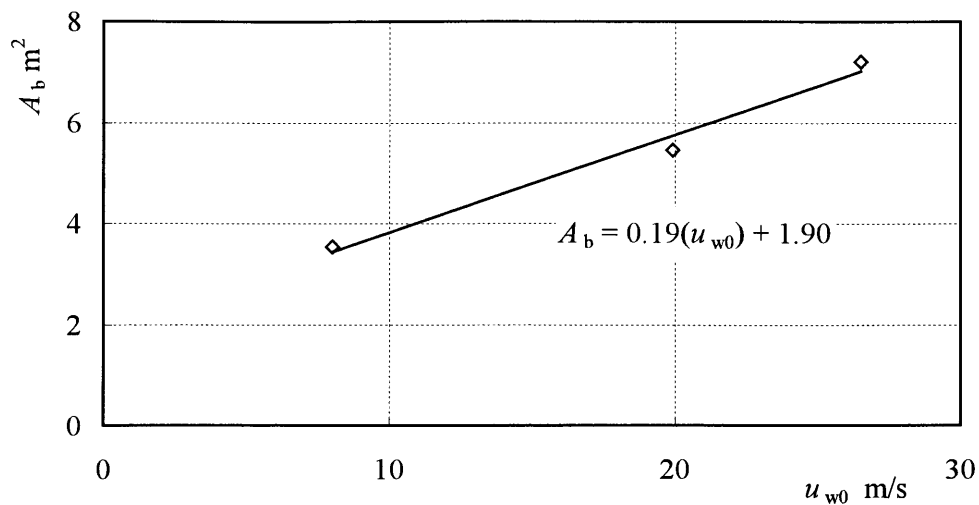


Fig.2.17 Interfacial area

( $Q_a=0.4$  l/min $_{n=1}$ ,  $L_a/d=1.5$ ,  $n=1$ )

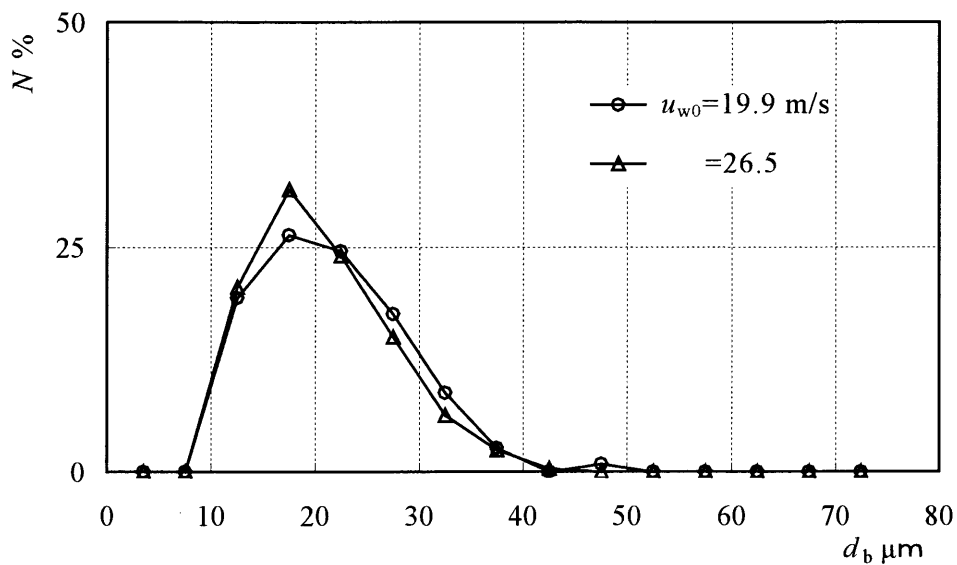


Fig.2.18 Bubble size distribution (particle counter)

( $Q_a=0.4$  l/min $_{n=1}$ ,  $L_a/d=1.5$ ,  $n=1$ )

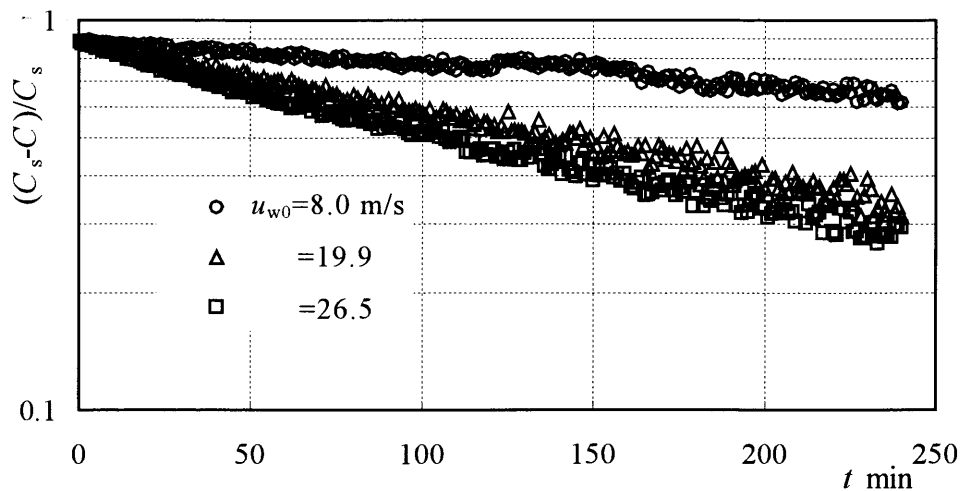


Fig.2.19 Dissolved oxygen

$$(Q_a = 0.4 \text{ l/min}|_{n=1}, L_a/d = 1.5, n=1)$$

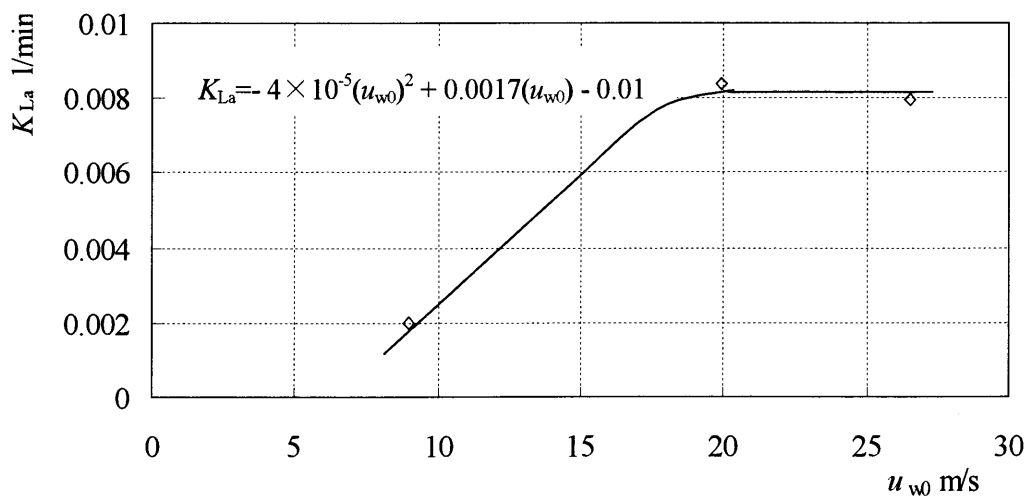


Fig.2.20 Gas exchange factor

$$(Q_a = 0.4 \text{ l/min}|_{n=1}, L_a/d = 1.5, n=1)$$

## 第 3 章 マイクロバブル気泡塔への応用

### 3.1 実験装置の概略

図 3.1 に、マイクロバブル気泡塔の実験装置の概略と座標系を示す。ポンプ（イワヤポンプ、電圧 200V、揚水量 9m、吸い上げ高さ 6m）⑤によって加圧されたタンク③からの水は、流量調節バルブ④、液体用浮遊式流量計⑥を経た後、水槽①の底面から鉛直上向き方向に設置された 2 本の直径 2.0 mm のマイクロバブル生成ノズル⑨(図 3.2 参照)の水用ノズルから、貯水槽[幅  $W=600$  mm, 奥行き  $D=250$  mm, 高さ  $H=2000$  mm, 水位=1970 mm (一定)]内に噴出される。空気は空気圧縮機⑦から気体用浮遊式流量計⑧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。この際、高速の水噴流に巻き込まれた空気泡は、噴流外縁の速度勾配の大きなせん断層で微細化されマイクロバブルとなる。水ノズルから噴出される水噴流流量  $Q_w$  は  $0 \sim 5$  l/min<sub>n=1</sub> の範囲で、噴出空気流量  $Q_a$  は  $0 \sim 1.0$  l/min<sub>n=1</sub> の範囲で調節が可能となっている。

座標系は、水槽底面の中心を原点とし、鉛直方向を  $y$  軸、水平方向を  $x$  軸、 $x$ - $y$  平面に垂直な方向を  $z$  軸とした。ノズル(図 3.2 参照)は、出口直径  $d=2.0$  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と、水用ノズルの近傍に設けられた  $d_s=1.0$  mm の空気用ノズルからなる。

水槽からオーバーフローした水は水槽上部片側が低くなっており、そこから流れ出て、その下に置かれたタンク③に戻る閉ループ構造となっている。一方空気は、一部は水槽内を滞留し、一部は開放された水面から大気に放出される。

また、比較のために一般で用いられている多孔質セラミック気泡発生器を用いて、同様な実験を行った。その場合の噴出空気流量の調節範囲は  $0 \sim 2.0$  l/min である。

## 3.2 実験方法

### 3.2.1 実験条件

気泡塔にマイクロバブルを用いた場合の流動特性を気泡径分布、速度分布などの測定から、ま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した。本実験では、水噴流流量を  $Q_w=3.5$  l/min ( $u_{w0}=18.6$  m/s) とし、空気流量を  $Q_a=0.2, 0.4, 0.6$  l/min と変化させ、マイクロバブル生成ノズル本数  $n=2$  で行った。また、流れを制御するために仕切板を設置し、仕切板はその下端を  $y=200$  mm=一定とし、長さを  $L=1.0, 1.3, 1.5$  m と変化させた。

比較に用いた多孔質セラミック製気泡発生器で実験する場合、流れに対する水噴流の影響を同じにするためにマイクロバブル生成ノズルの水ノズルからのみ同様に  $Q_w=3.5$  l/min ( $u_{w0}=18.6$  m/s) を噴出させ、気泡発生器の空気流量を全流量が同じにするために、 $Q_a=0.4, 0.8, 1.2$  l/min と変化させ実験を行った。

### 3.2.2 流れの可視化・観察

マイクロバブル気泡噴流が気泡塔内を循環していく全体的な様子や特徴的な部分の様子を、クセノンスリット光源または、アルゴンレーザー (Spectra-Physics) を用いて  $x$ - $y$  平面で光切断し、気泡をトレーサとしてデジタルビデオカメラを用いて可視化を行った。

### 3.2.3 速度分布・循環流量

LDA [Laser Doppler Anemometry : DANTEC, FVA (Flow Velocity Analyzer)] を用い、気泡群の速度  $u_b$  の測定を行った。測定は、測定断面を  $x$ - $y$  平面で、測定箇所を  $y/H=0.25, 0.5, 0.75$  ( $H$ :気泡塔高さ) とし、 $x$ - $y$  平面に対し垂直にレーザー光を入射し、トラバース装置により  $x$  方向に移動させ、各断面を  $x$  方向 60 mm おきに 8~9 点測定を行った。このシステムは FLOWare (DANTEC) で制御され、測定条件をサンプル測定数 1000 個とした。

また、各条件とも断面  $y/H=0.5$  での下流側の速度分布を面積積分する事で循環流量を算出した。

### 3.2.4 気泡径分布

マイクロバブルの気泡径  $d_b$  および気泡存在頻度  $N$  の測定は、B (-150, 1700, 0 mm) と B' (150, 300, 0 mm) を中心とした周辺の気泡を一眼レフカメラによって撮影を行った。撮影した画像を拡大し、画像処理することで気泡径を求めた。なお、画像処理で測定可能な最小気泡径は約  $30 \mu\text{m}$ 、気泡サンプル数は 300 個である。(図 3.1 参照)

### 3.2.5 溶存酸素量

溶存酸素量の測定は、気泡径の測定の場合と同様の B, B' の位置に溶存酸素計（堀場製作所：MODEL OM-12、OM-51）を設置し、測定を行った。

測定は、亜硫酸ソーダ法により水中の酸素を除去し、飽和酸素量の 10% となった時刻から開始し、50 分間 60 秒毎に溶存酸素量の経時変化を測定した。

また、水中への酸素の溶解に対する指標であるガス交換係数  $K_{La}$  も用いて評価を行った。(図 3.1 参照)



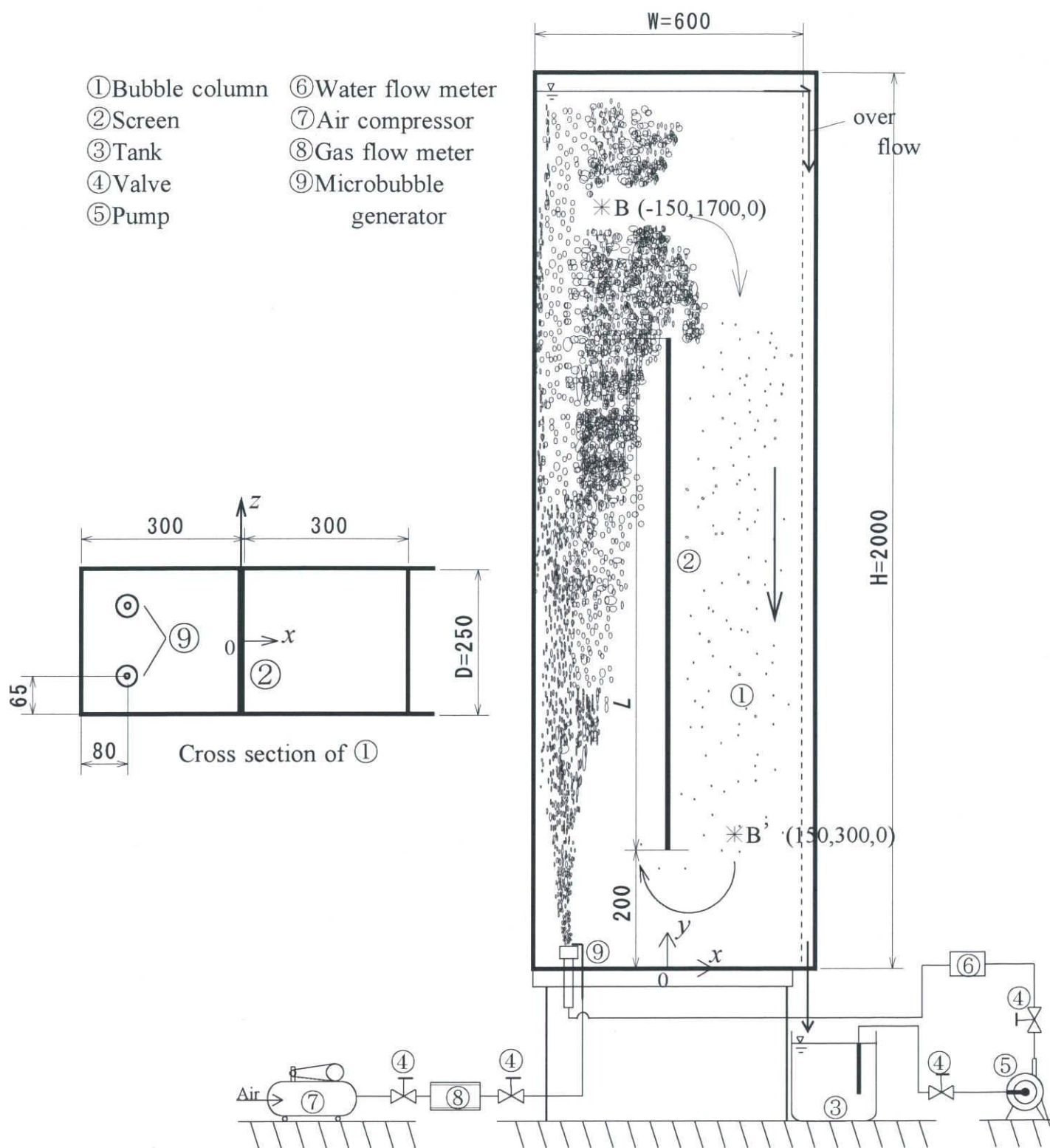


Fig.3.1 Experimental set-up (bubble column)

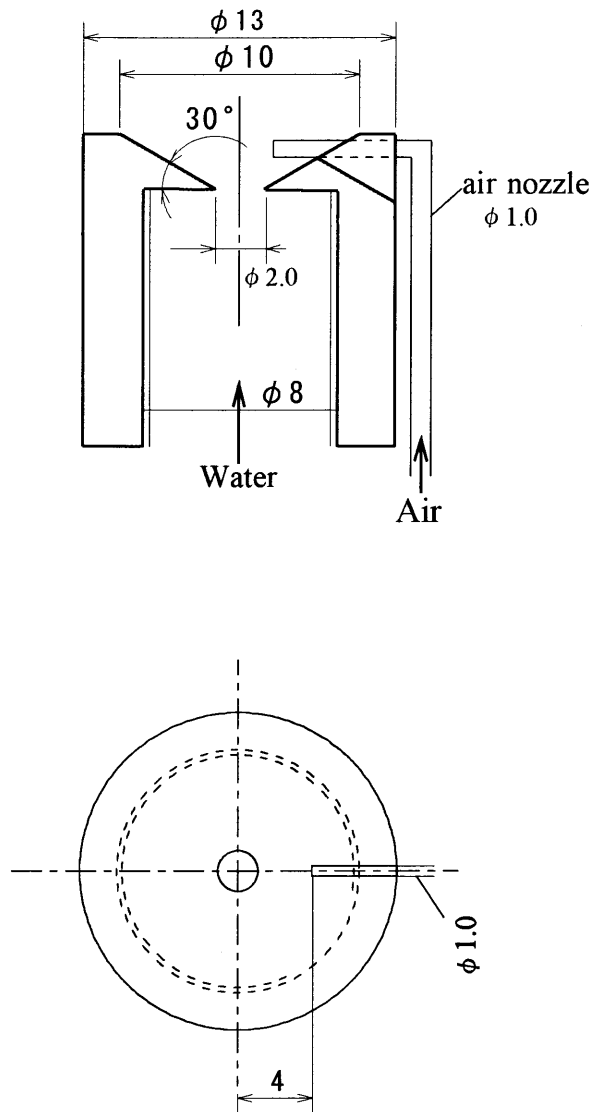


Fig.3.2 Micro bubble generator, ⑨

### 3.3 結果と考察

#### 3.3.1 流動状態

##### (a)仕切板なしの場合

図 3.3(a)～(c)に、仕切板を設置していない状態で、 $Q_a$ を変化させた場合でのマイクロバブル気泡塔全体の流動状態を示す。図中、黒い部分が水、白く見えるのがマイクロバブルの気泡群である。また、図中の 6 本の横棒は気泡塔の支持棒であり、流れに影響を与えないものである。

ノズル出口近傍で生成させた気泡群がまず、水噴流に乗って上向き ( $y$ ) 及び水平方向 ( $x$ ) に拡散していく様子がわかる。片側通気のため、水槽内で流れの密度差が生じる事で、塔全体で緩やかな循環流が生じる。上昇した気泡の中で微細な気泡はこの循環流によりおよそ  $y/H=0.5$  の付近から  $x$  方向へと渦巻きながら拡散し、下降流に乗って下降して行く様子がみてとれる。新たに生成させる気泡は、次第に生じた循環流に影響され上流側の壁面方向に向いて流れ、その壁面に沿って流れるようになる。一方で、比較的大きい径を有する気泡は、循環流には乗らずに壁に沿ったまま流れ、そのまま気泡塔液面から大気へ排出される。下流側の壁面まで到達した気泡は、その壁面に沿い下降するが、一部の気泡は下流部に入り込んだ後、それほど下降せずに上昇流の方に戻っていくことが確認された。ほとんどの気泡は下降後、 $y/H=0.25$  の位置で上流部へと戻って循環することが確認された。残り一部の下降した気泡は、底部まで達し噴流逆側の角部において渦領域が形成されるのが確認された。

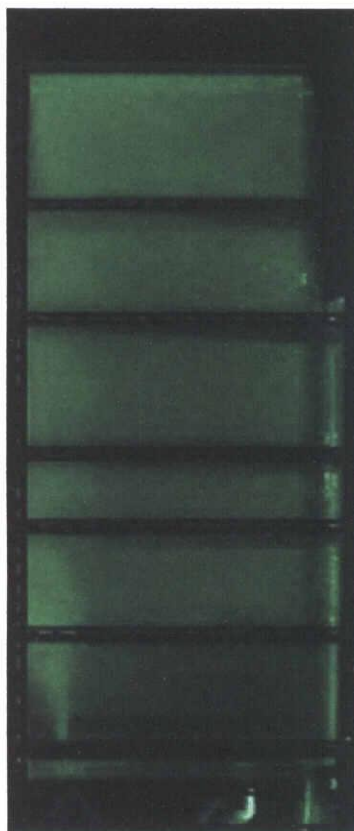
$Q_a$ が小さいほど径の大きい気泡が少なく、微細な気泡が多く存在し、水平方向に広がっていく位置が低い位置で観測された。 $Q_a=0.6$  l/min では、水面近くまでほとんどの気泡が上昇し、そこで小さい気泡は水平方向に移動し、下流側に向かい下流側壁面に沿って下降する。

図 3.4(a),(b)にそれぞれ  $Q_a=0.2$  l/min での底面近傍、液面近傍の画像を示す。底面において、噴流直後には生成された微細気泡が壁面のほうに傾き、塔壁面に沿うように流れている様子が分かる。一方下降してきた気泡は、噴流方向に再び循環するが、噴流反対側の底面角部では前述した通り水平方向への移動がみられない渦領域が観察された。液面付近においては、前述した通り大きい気泡は壁面に沿ったまま流れ、そのまま気泡塔液面から排出され、微細な気泡は水平方向に移動し、下降流に乗って下降していく様子が分かる。

### (b)仕切板を設置した場合

図 3.5~3.7 に、仕切板を設置した場合の流れの様子を示す。仕切板を設置すると、生成された気泡が循環流によって塔壁面に沿って流れているために、上流側だけみても流れの密度差が存在し、上流側のみで循環流が発生し、上流側の仕切板に沿って下降する気泡が存在する。

$L=1.0\text{m}$  の場合、循環流に乗って下流方向に移動し始める気泡は、ほぼ仕切板と同じ位置か幾分高い位置であり、下流部には広がりながら下降していくのが分かる。これは  $Q_a$  が小さいほど顕著であり  $Q_a=0.2\text{ l/min}$  では、上流部仕切板の間で発生した循環流と全体の循環により、水槽全体が白い気泡群で満たされていくのが確認できた。 $L\geq 1.3\text{m}$  の場合、気泡が循環流に乗って下流方向に移動し始めるのが仕切板より高い位置であるため、水平方向に移動する小さい気泡は、一度仕切板に当たり上流部内で循環する気泡と仕切板に沿って上昇する気泡とに分かれる。仕切板に沿って上昇した気泡は、仕切板上端に達した後、下流方向へと移動し始める。しかし、下流に移動する直前に上向きの速度しか持っていないため、 $L=1.0\text{m}$  の場合に比べると、大きく弧を描くように下流部に入り込んでいくのが分かる。そのため、下流側では気泡は大きく広がらず下流側の塔壁面に沿うようにして下降する。下流部を下降した気泡群は仕切板の存在により、全ての気泡が底部まで達し上流部へと循環する。このとき仕切板がない時にみられた渦領域はあまりみられない。



(a)  $Q_a=0.2$  l/min



(b)  $Q_a=0.4$  l/min

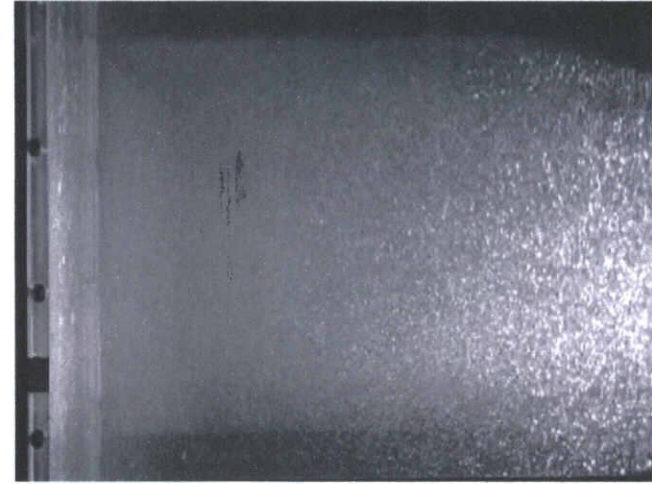


(c)  $Q_a=0.6$  l/min

Fig.3.3 Visualized flow pattern (without screen,  $u_{w0}=19.6$  m/s)

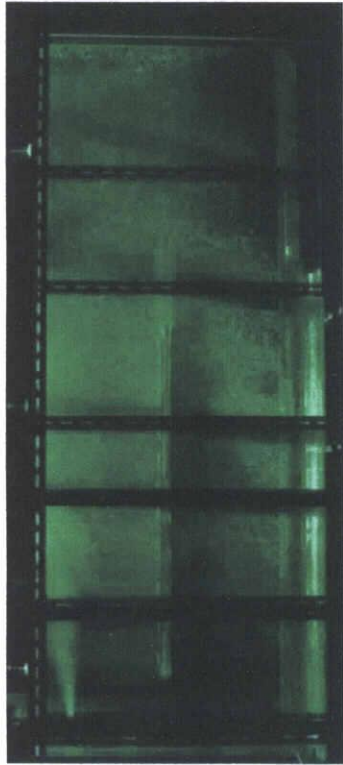


(a) Near column's bottom



(b) Near water surface

Fig.3.4 Visualized flow pattern (without screen,  $u_{w0}=19.6$  m/s)



(a)  $Q_a=0.2$  l/min



(b)  $Q_a=0.4$  l/min



(c)  $Q_a=0.6$  l/min

Fig.3.5 Visualized flow pattern ( $L=1.0$  m,  $u_{w0}=19.6$  m/s)



(a)  $Q_a=0.2$  l/min



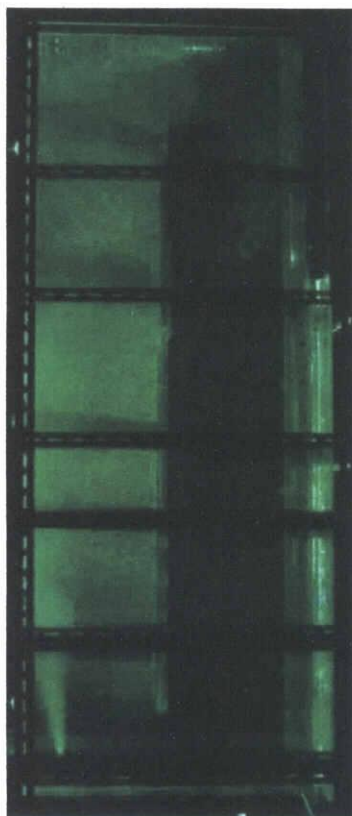
(b)  $Q_a=0.4$  l/min



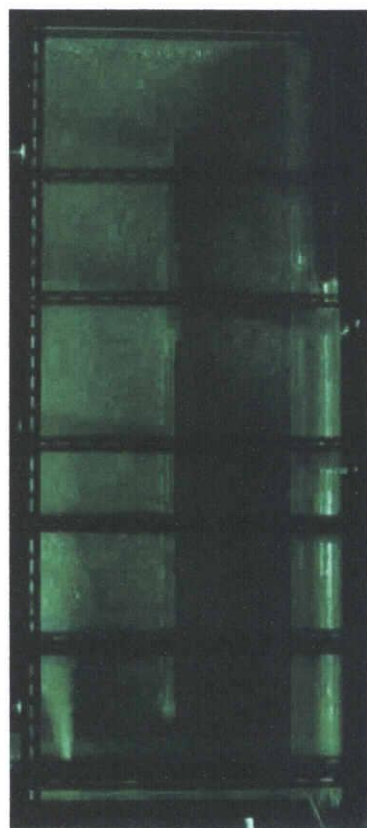
(c)  $Q_a=0.6$  l/min

Fig.3.6 Visualized flow pattern ( $L=1.3$  m,  $u_{w0}=19.6$  m/s)





(a)  $Q_a=0.2$  l/min



(b)  $Q_a=0.4$  l/min



(c)  $Q_a=0.6$  l/min

Fig.3.7 Visualized flow pattern ( $L=1.5$  m,  $u_{w0}=19.6$  m/s)

### 3.3.2 空気流量の影響

本節では、気泡塔に気泡をマイクロバブルとして塔内に流入させた時、噴出空気流量が流れやエアレーションに及ぼす影響を示す。

#### (1) 気泡径分布

図 3.8, 3.9 に上流側 B の、図 3.10, 3.11 に下流側 B' の各仕切板長さでのそれぞれの  $Q_a$  に対する気泡径分布図を示す。図は縦軸にその気泡径が存在する頻度  $N$ 、横軸に気泡径  $d_b$  とする。また、図 3.12 に  $Q_a$  に対する平均気泡径  $d_m$  を示す。分布図は各条件ともに、それぞれ上流側・下流側で同一の分布形をとり、上流側では、 $d_b = 0.1 \sim 0.2 \mu\text{m}$  の、下流側では  $d_b < 0.1 \mu\text{m}$  の頻度  $N$  が最も高くなっている。また、上流側では  $Q_a$  を増加させると  $d_m$  は大きくなる。これは、ノズル出口近傍で生成される際の気泡径の差によるもので、上流側において  $Q_a$  の減少とともに  $d_b < 0.2 \mu\text{m}$  の気泡の頻度  $N$  が増加しており、その結果  $d_m$  が小さくなっている。これは、 $Q_a$  が大きくなると速度勾配の大きなせん断層によって微細化される気泡が、せん断力が分散することで少し大きめに引きちぎられるためであると考えられる。一番気泡径の大きい  $Q_a = 0.6 \text{ l/min}$  は小さい  $Q_a = 0.2 \text{ l/min}$  に比べ、仕切板なしでは約 13%、 $L = 1.0, 1.3, 1.5 \text{ m}$  ではそれぞれ約 12%、約 18%、約 20% 増加する。上流側においてはどの条件においても  $Q_a$  の増加に対して比例の形となり、その傾きは  $L$  が長くなるほど大きく、仕切板なしからそれぞれ 70, 75, 103, 103 である。これは、 $L$  が長くなるほどほとんど全ての気泡が測定部まで運ばれるため、その差が顕著に出たからと考えられる。

一方下流側では、 $L = 1.5 \text{ m}$  においては同様なことがいえるが、 $L \leq 1.3 \text{ m}$  では  $Q_a = 0.4 \text{ l/min}$  の場合の平均気泡径が大きい結果となった。これは循環してきた気泡であるため、生成された気泡の気泡径の差だけでなく、仕切板の影響が出たものと考え、後に考察することにする。

## (2) 速度分布

図 3.13～3.16 に、各仕切板長さにおけるそれぞれの  $Q_a$  に対する気泡塔断面  $y/H=0.25$ ,  $0.5$ ,  $0.75$  での気泡群の  $y$  方向の速度分布を示す。縦軸に速度  $u_b$ 、横軸に断面の水平方向位置  $x$  を示す。

### (a) 仕切板なしの場合

噴流によって速度を得た気泡は、上昇に伴い徐々に速度を減衰しながら上昇していくのが分かる。気泡群は塔壁面に沿いながら上昇しており、壁面近傍の速度が速くなっている。下流側へ移動した気泡群も塔壁面に沿い流れるため、 $y/H=0.5$  の付近までは壁面近傍の速度が速くなっている。そこから、仕切板が存在しないため上流側に移動する気泡群が広がり、 $y/H=0.25$  の位置では、随分広がった形となっている。そしてその速度分布は、各条件ともにほぼ同一の分布形となるが、全ての断面において  $Q_a$  が増加すると気泡の上昇速度・下降速度ともに幾分増加する。上昇速度は、前述したように空気流量の増加により気泡径が増加し、浮力の増大により増加すると考えられる。また下降速度は、上流側の気泡径が増加し、下流部に入り込む流体との間で流れの密度差が大きくなるためエアリフトが強くなり増加すると考えられる。

### (b) 仕切板を設置した場合

仕切板がないときと同様に、噴流によって速度を得た気泡群が上流側の塔壁面に沿って速い速度領域を持ち、その速度を減衰しながら上昇していくのがわかる。上昇・下降速度の傾向は仕切板がない時と同一であり、全ての条件・断面において  $Q_a$  が増加すると気泡の上昇速度・下降速度ともに幾分増加する。また、 $y/H=0.25\sim 0.5$  をみると、可視化映像にもみられた通り上流側にも循環流が生じており、下向きの速度成分を持つ領域が存在する。同様に、この上流側の循環流だけにおいても  $Q_a$  が増加すると気泡の速度が幾分増加している。一方下流側では、 $y/H=0.75$  の位置では下流側の壁側と中央部との間に速度差が存在するが、 $y/H=0.5$  の位置ではその速度差がほぼなくなり、全体に流れが広がっていることがわかる。それは、 $Q_a$  が小さいほど顕著に現れており、 $Q_a$  が小さいほど下流側で広がりながら下降して行くことが分かる。 $y/H=0.25$  の位置では、十分に広がり下降速度は一様となる。

### (3) 循環流量

図 3.17 に、気泡塔断面  $y/H=0.5$  での下流側の速度分布をもとに算出した循環流量  $Q_c$  (m<sup>3</sup>/s) を示す。上記で示した通り、 $Q_a$  が増加すると流れの下降速度が増加する。そのため、 $Q_a$  が増加するにつれて循環流量も一次関数的に増加する。その増加量は  $L$  が短いほど大きく、 $Q_a=0.6$  l/min は  $Q_a=0.2$  l/min に比べ仕切板なしからそれぞれ、約 25%、約 23%、約 20%、約 19% である。またその傾きは、仕切板なしからそれぞれ 0.0071, 0.0048, 0.0041, 0.0037 である。

### (4) エアレーション特性 (溶存酸素量)

図 3.18, 3.19 に上流側 B の、図 3.20, 3.21 に下流側 B' の位置における各仕切板長さでのそれぞれの  $Q_a$  に対する溶存酸素量  $C$  の時間変化を示す。図は縦軸に溶存酸素量  $(C_s - C)/C_s$  ( $C_s$ : 測定時の水温における飽和酸素量)、横軸に時間  $t$  とする。グラフは下にいくほど溶存酸素量が増加することを意味しており、各条件ともに時間経過とともに溶存酸素が指数関数的に増加していることが分かる。

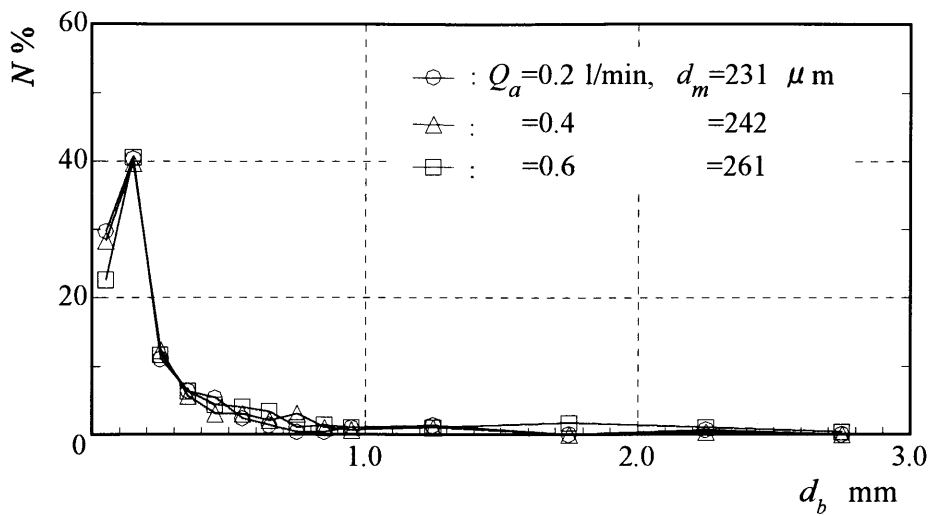
仕切板を設置しない場合、 $Q_a$  の増加に伴い溶存酸素量も増加する。 $t=30$  min において、一番増加した  $Q_a=0.6$  l/min では  $Q_a=0.2$  l/min に比べ、溶存酸素量  $C$  が上流側では約 6%、下流側では約 11% 増加する。しかし、一番小さい  $Q_a=0.2$  l/min で  $d_m$  は一番小さい結果であった。これは、それぞれの  $Q_a$  において積算空気流量が異なっていることによるものと考えられる。仕切板を設置するとその傾向はなくなり、各仕切板長さにおいて  $Q_a$  の増加に対する関係性を失う。

また、図 3.22(a) に上流側の、(b) に下流側の各流量に対するガス交換係数  $K_{La}$  を示す。仕切板を設置しない場合、上流側・下流側共に、 $Q_a$  の増加に伴い  $K_{La}$  は直線的に増加し、次式で表される。

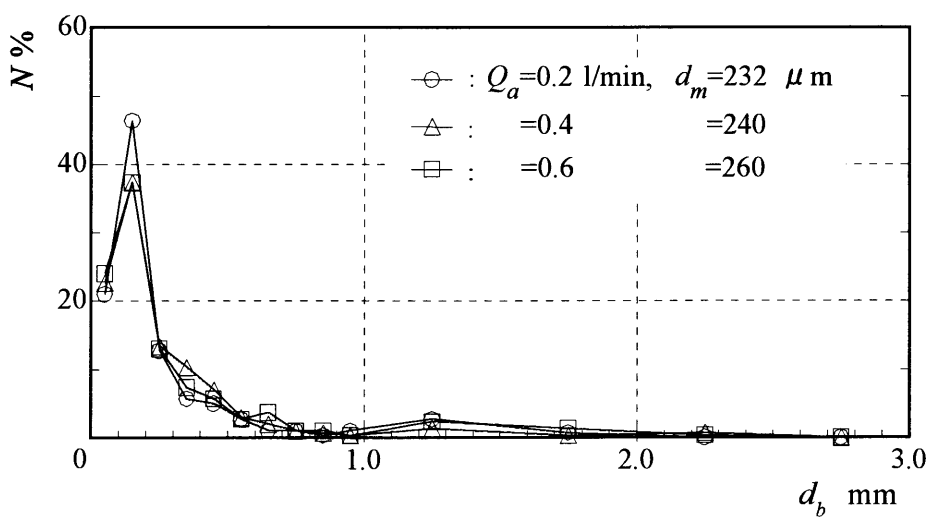
$$K_{La} = 0.025 Q_a + 0.049 \quad (\text{up side B}) \quad (3.1)$$

$$K_{La} = 0.021 Q_a + 0.043 \quad (\text{down side B'}) \quad (3.2)$$

仕切板を設置するとその傾向はなくなり、様々な変化がみられた。

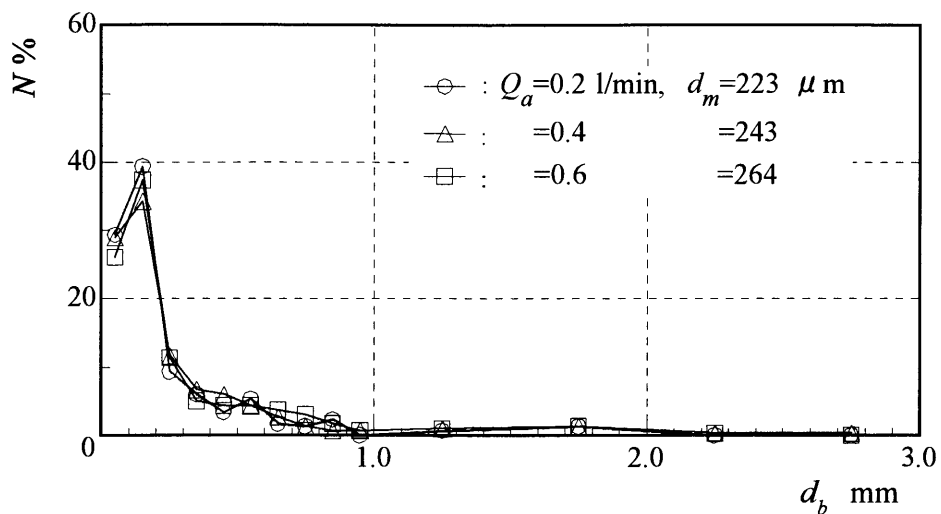


(a) Without screen

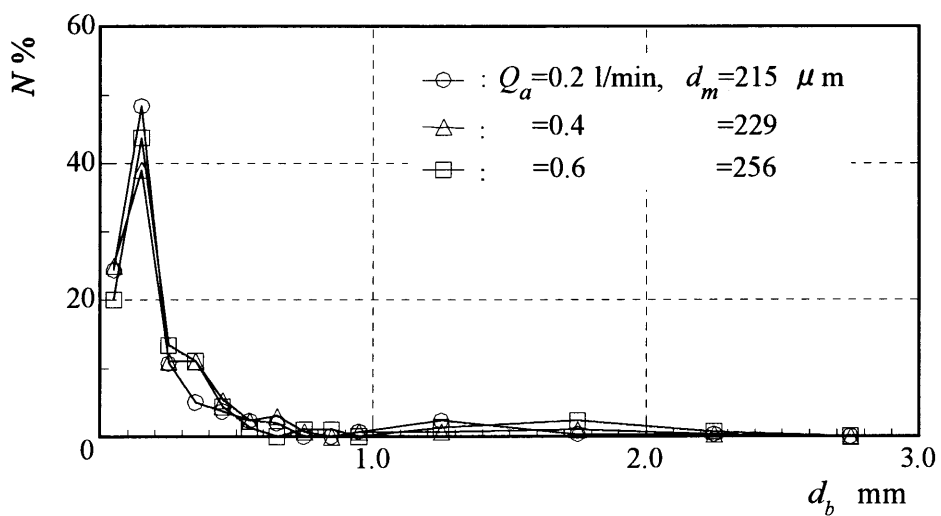


(b)  $L=1.0$  m

Fig.3.8 Bubble size distribution, up side B  
(Influence of flow rate of air)

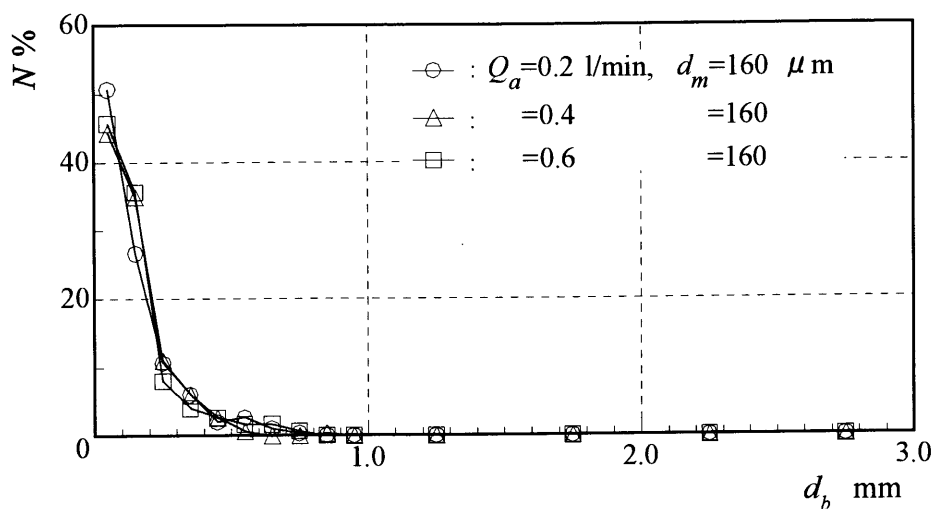


(a)  $L=1.3$  m

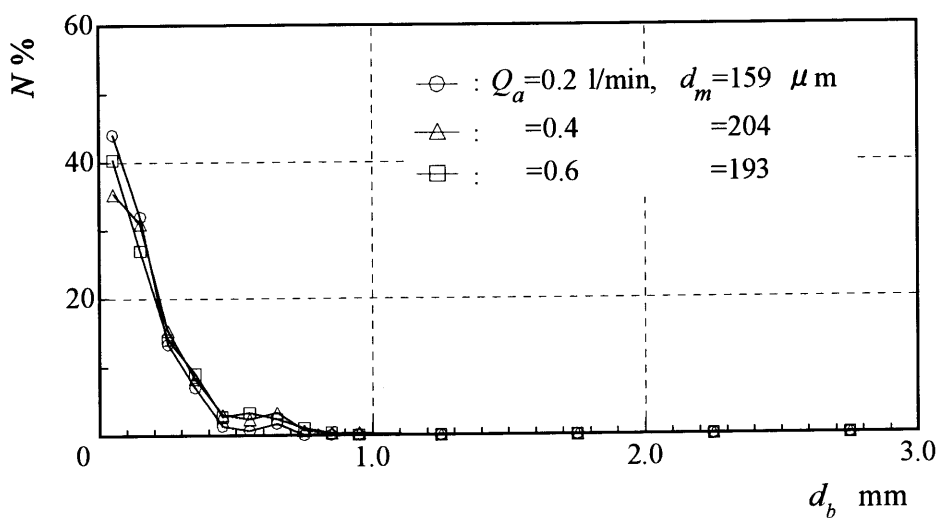


(b)  $L=1.5$  m

Fig.3.9 Bubble size distribution, up side B  
(Influence of flow rate of air)



(a) Without screen



(b)  $L=1.0$  m

Fig.3.10 Bubble size distribution, down side B'  
(Influence of flow rate of air)

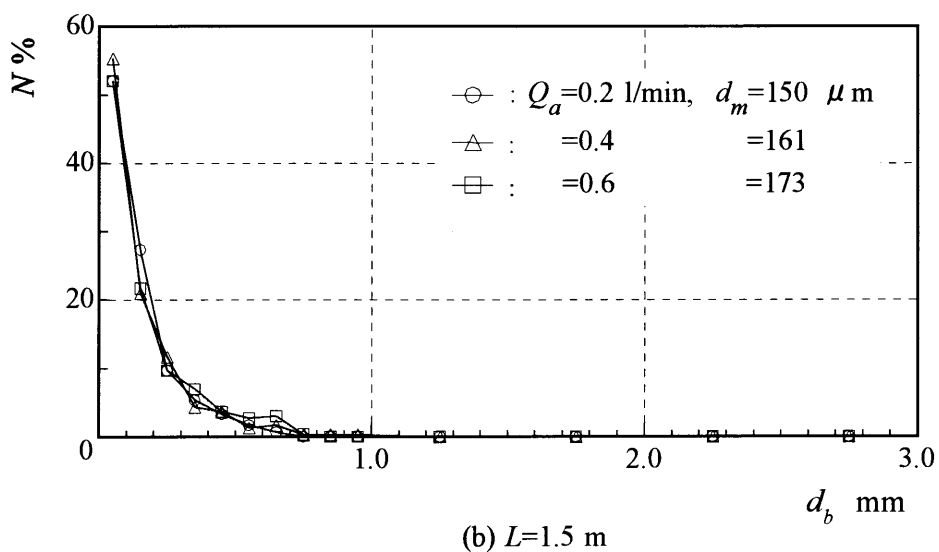
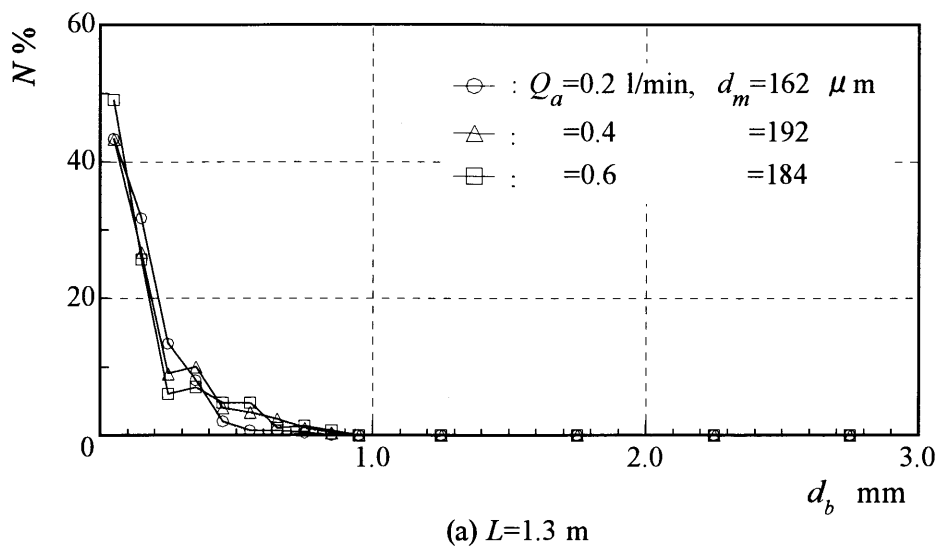


Fig.3.11 Bubble size distribution, down side B'  
(Influence of flow rate of air)



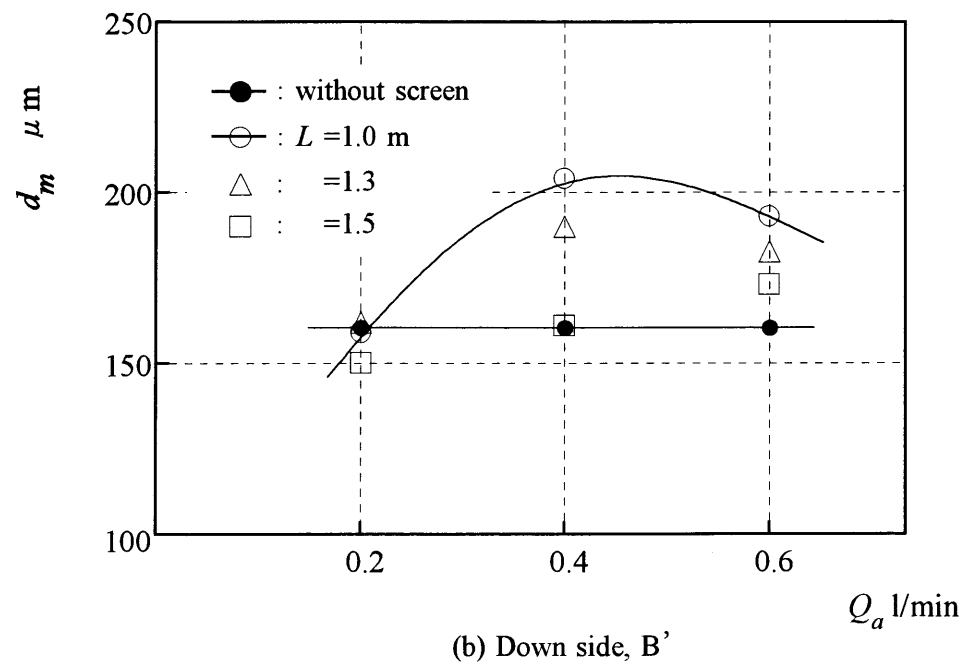
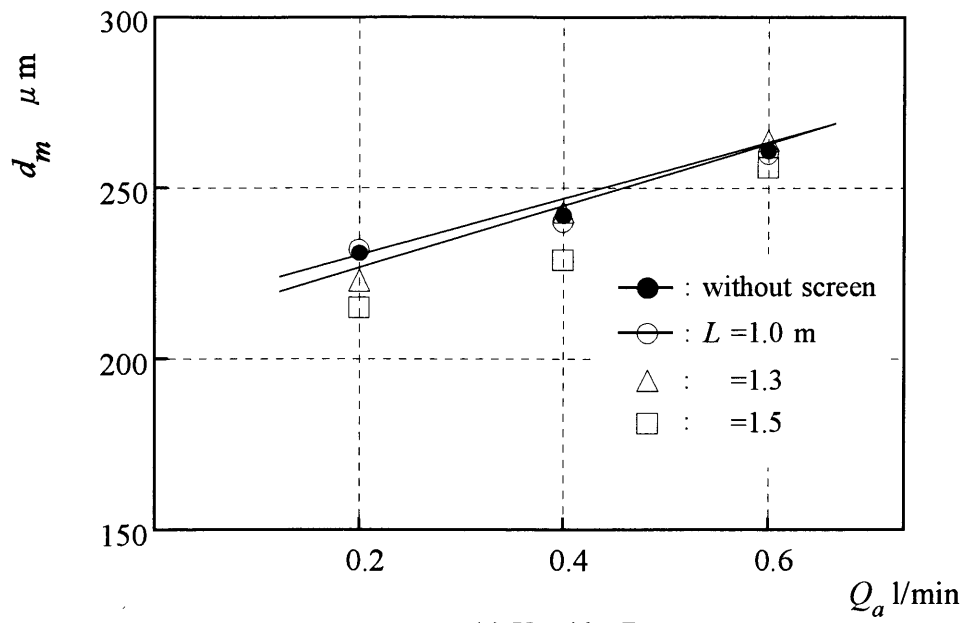
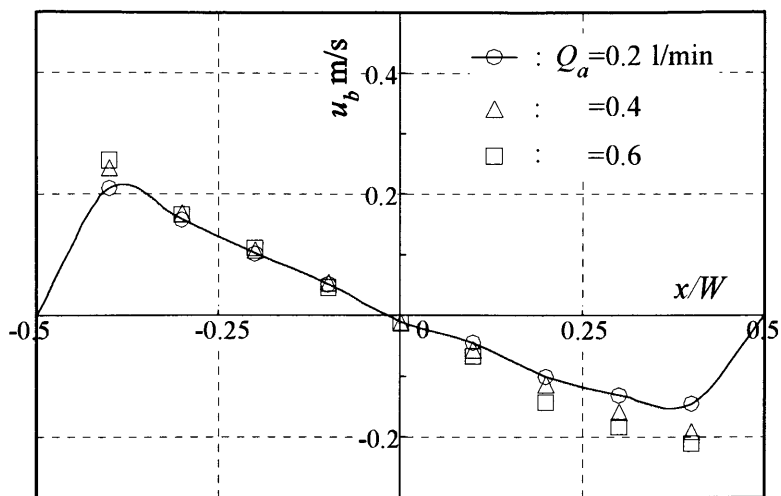
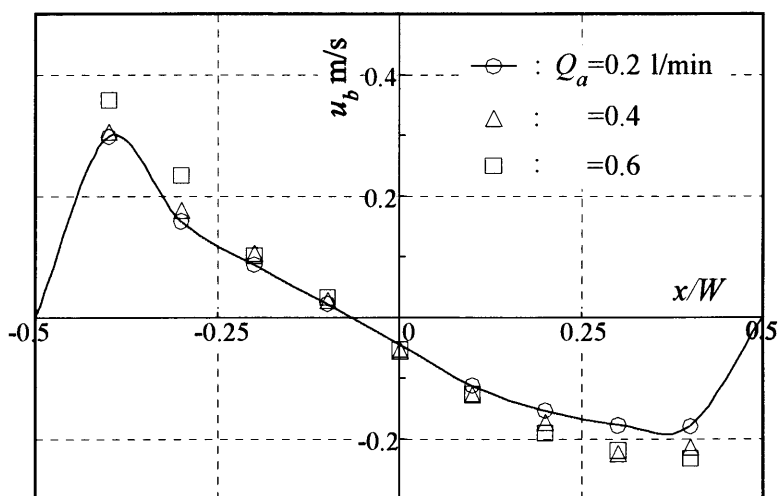


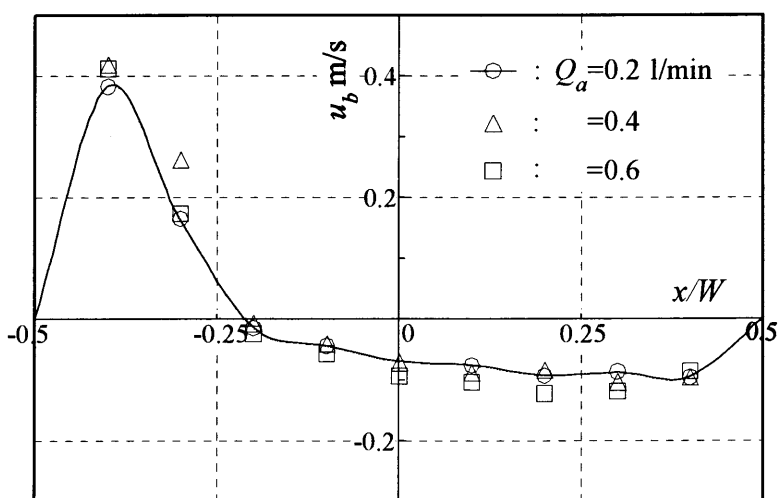
Fig.3.12 Mean bubble diameter  
(Influence of flow rate of air)



(a)  $y/H=0.75$

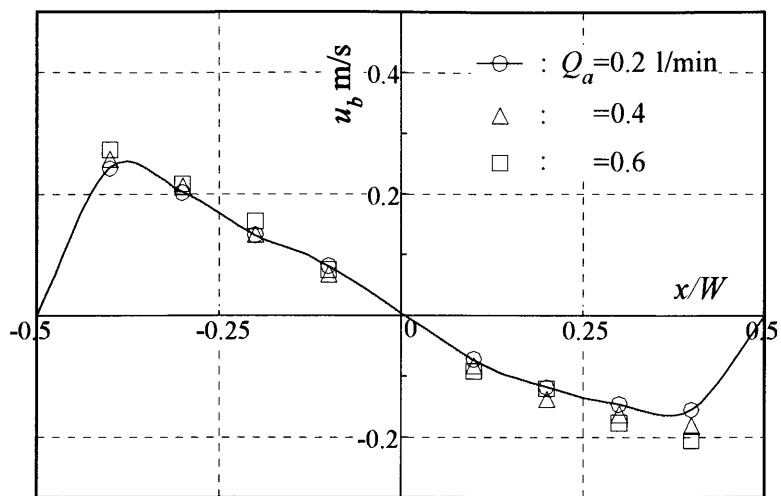


(b)  $y/H=0.5$

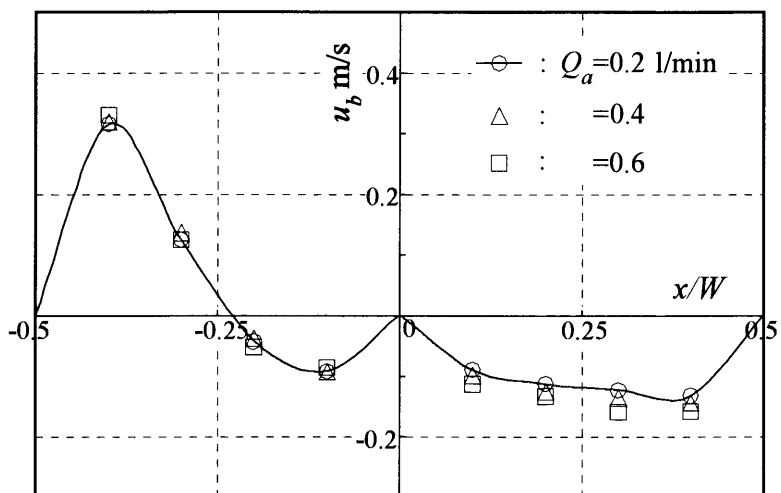


(c)  $y/H=0.25$

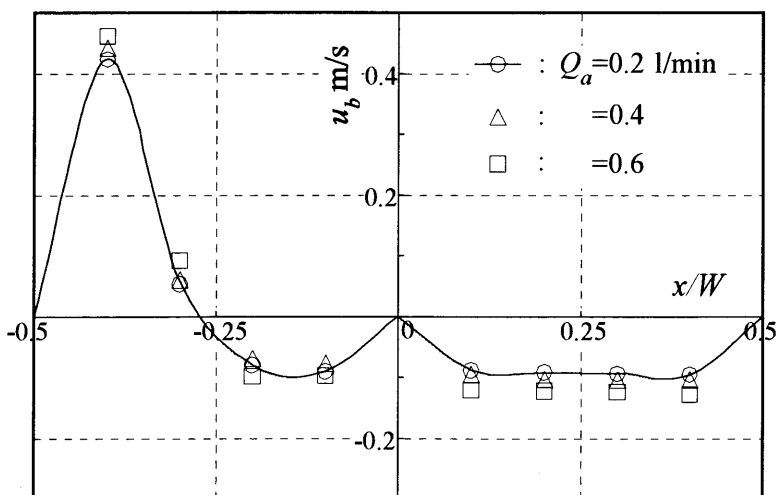
Fig.3.13 Velocity distribution (without screen)  
(Influence of flow rate of air)



(a)  $y/H=0.75$

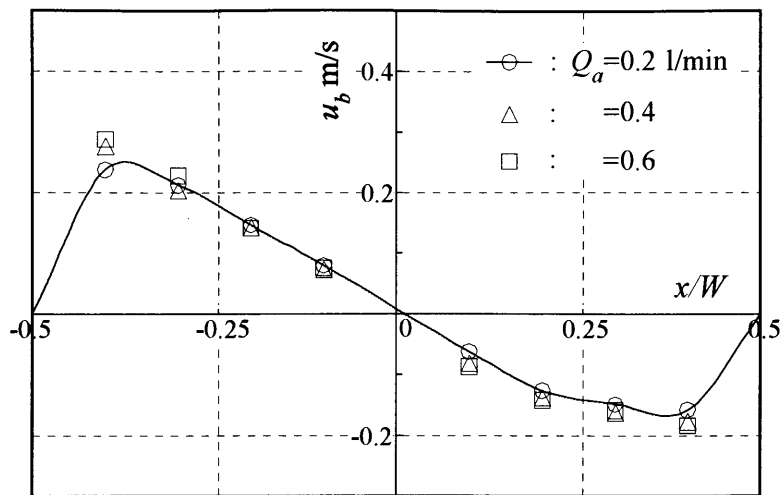


(b)  $y/H=0.5$

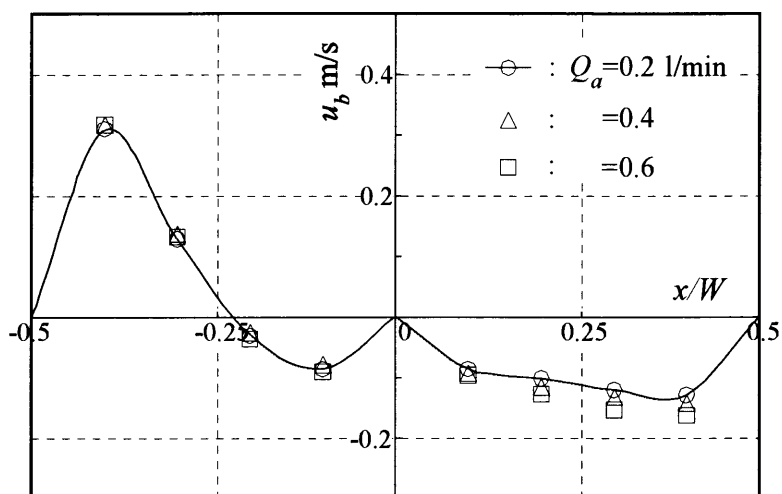


(c)  $y/H=0.25$

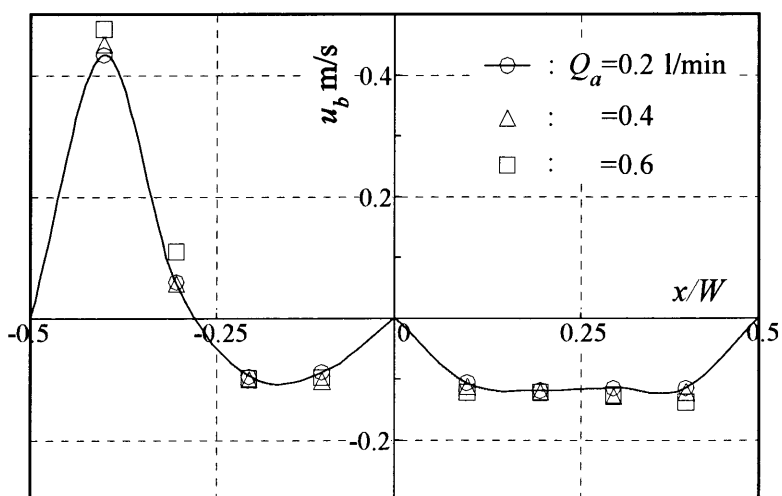
Fig.3.14 Velocity distribution ( $L=1.0\text{m}$ )  
(Influence of flow rate of air)



(a)  $y/H=0.75$

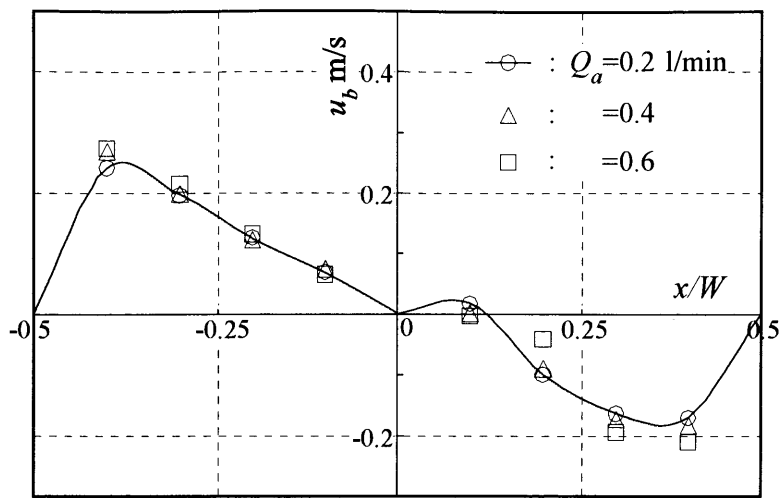


(b)  $y/H=0.5$

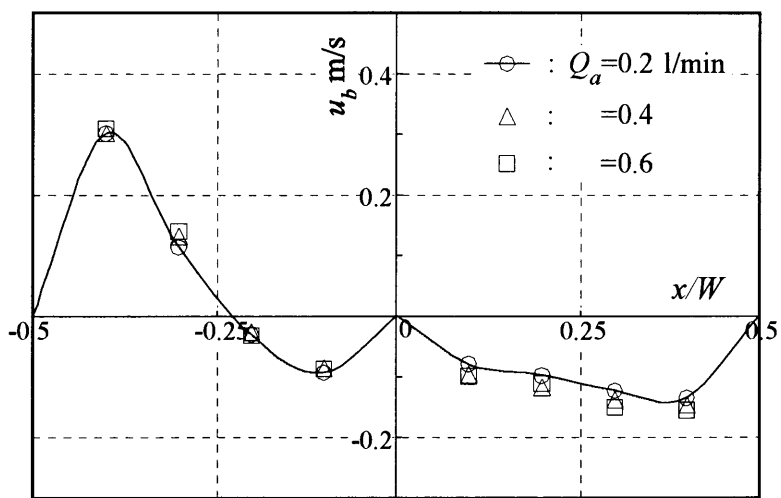


(c)  $y/H=0.25$

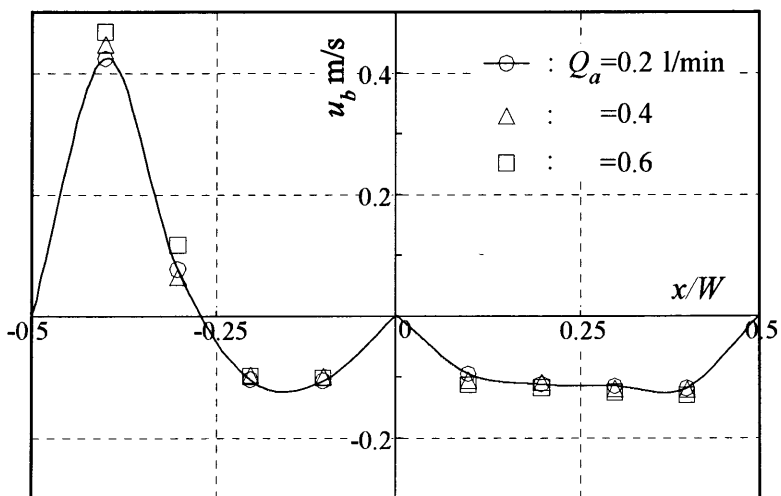
Fig.3.15 Velocity distribution ( $L=1.3\text{m}$ )  
(Influence of flow rate of air)



(a)  $y/H=0.75$



(b)  $y/H=0.5$



(c)  $y/H=0.25$

Fig.3.16 Velocity distribution ( $L=1.5m$ )  
(Influence of flow rate of air)

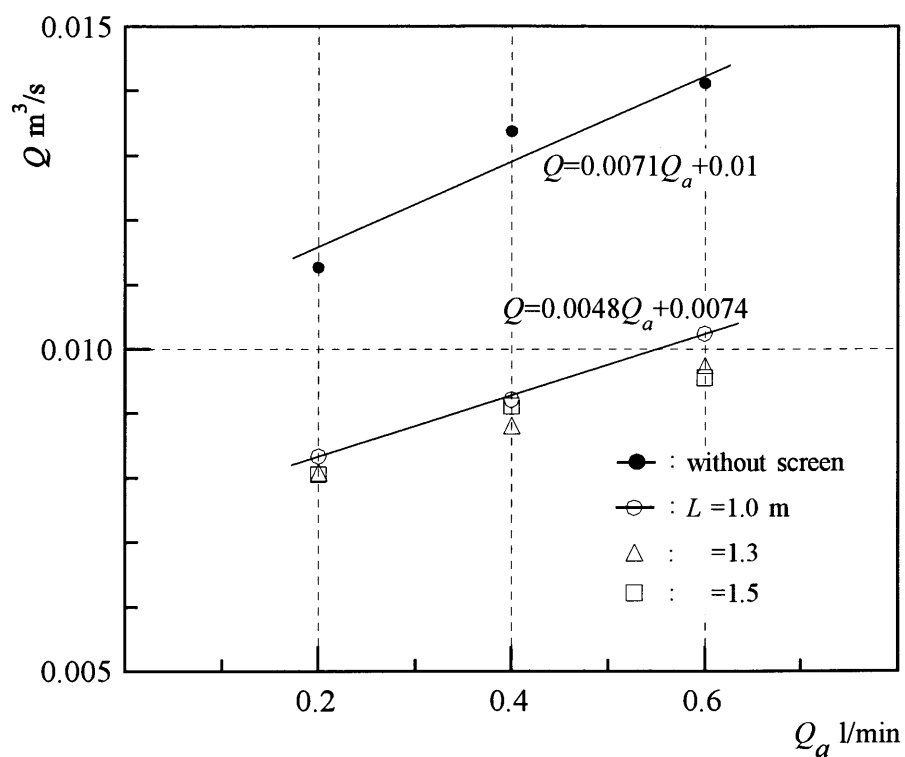


Fig.3.17 Circulation flow rate  
(Influence of flow rate of air)

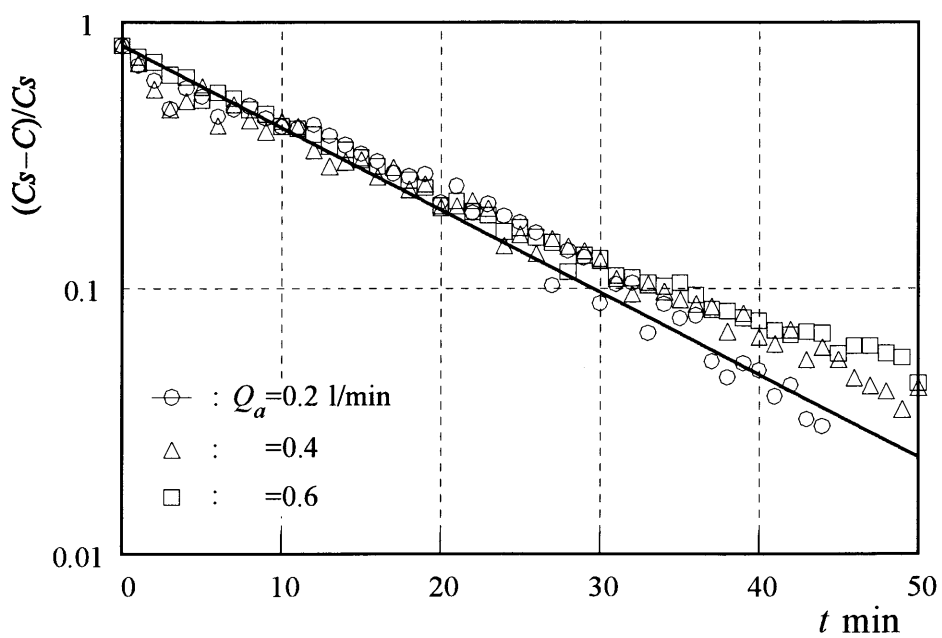
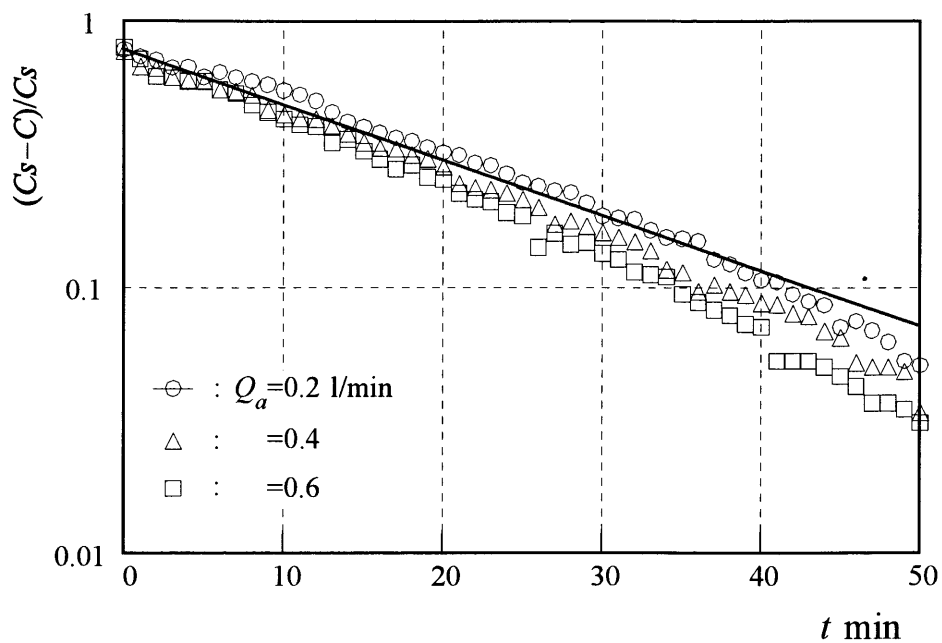
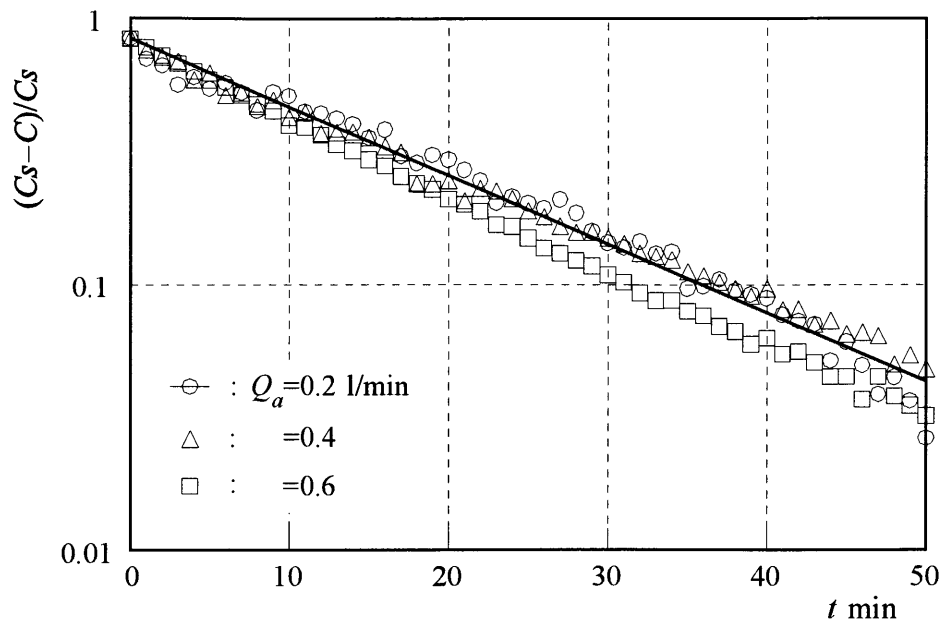
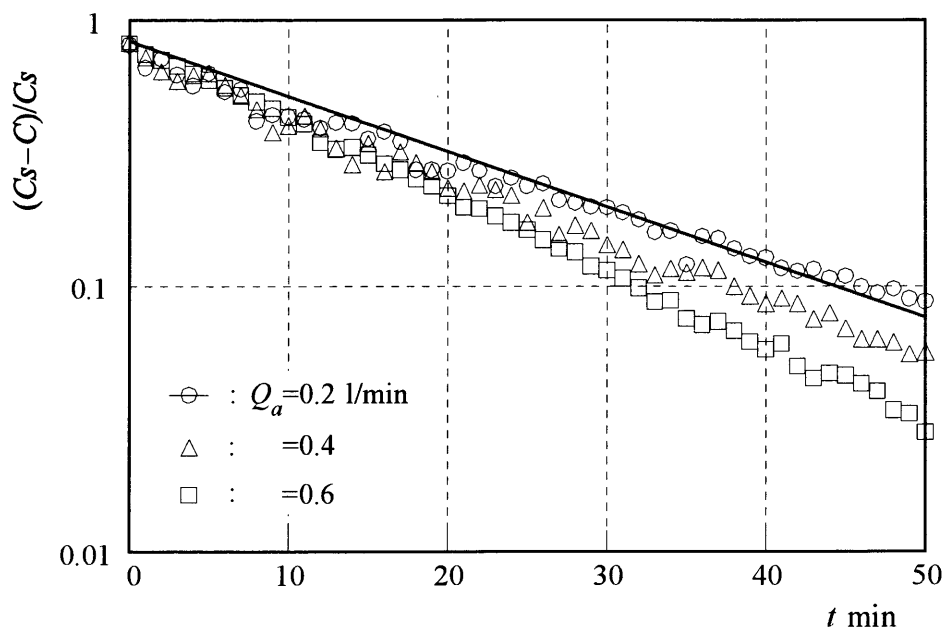


Fig.3.18 Dissolved oxygen (up side B)



(a)  $L=1.3$  m



(b)  $L=1.5$  m

Fig.3.19 Dissolved oxygen (up side B)



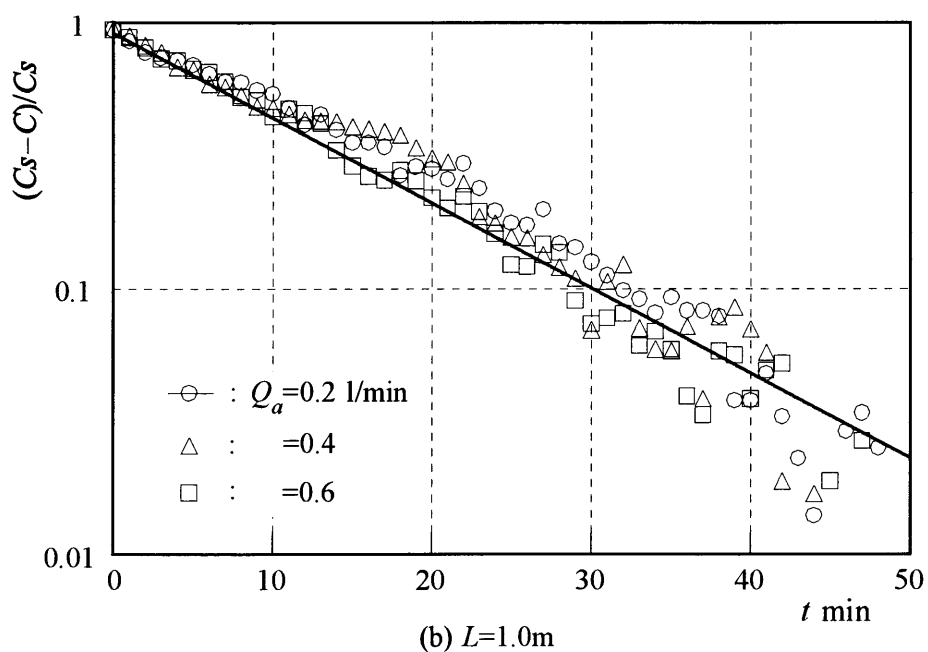
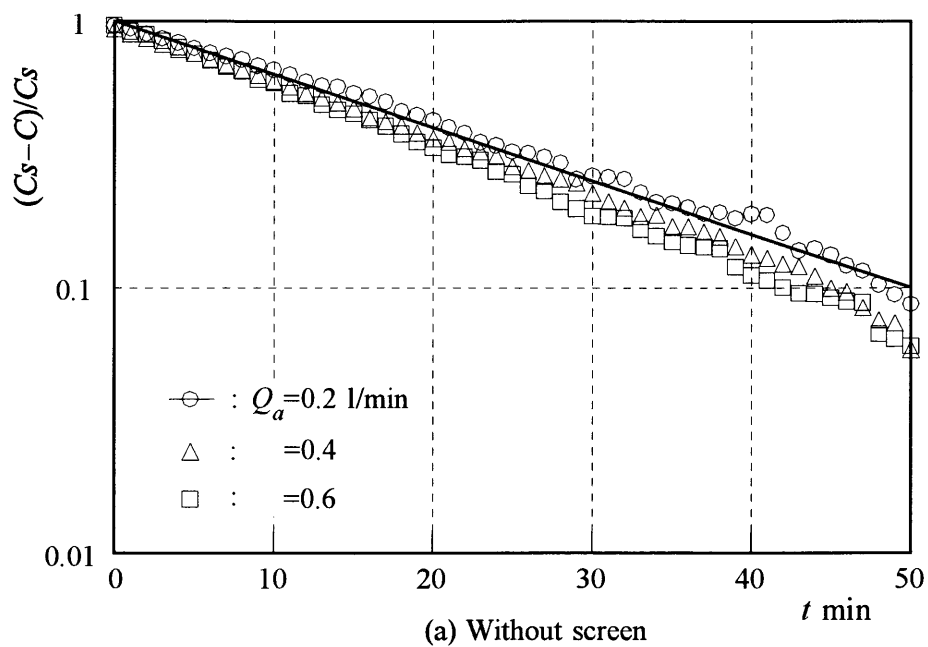
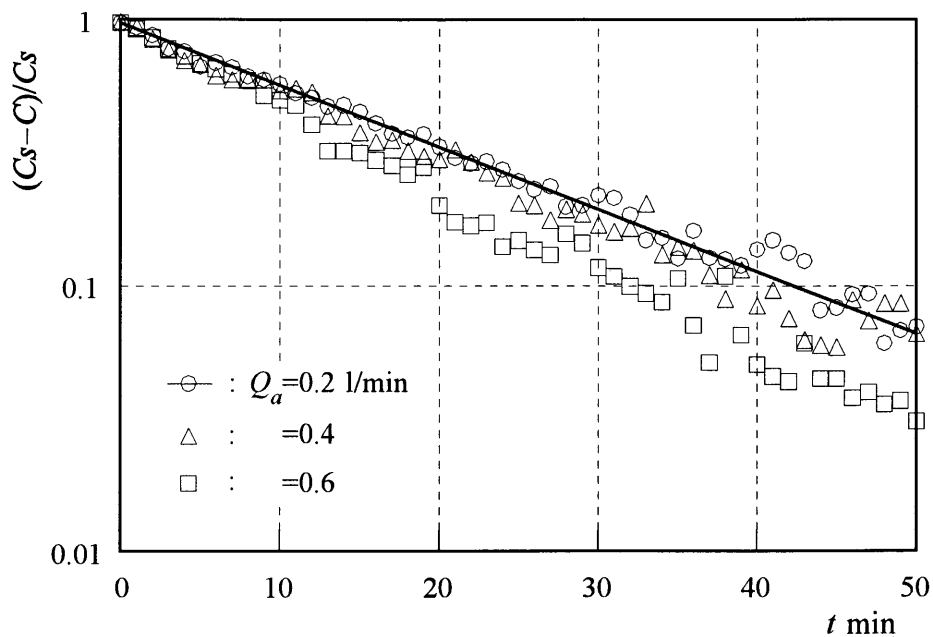
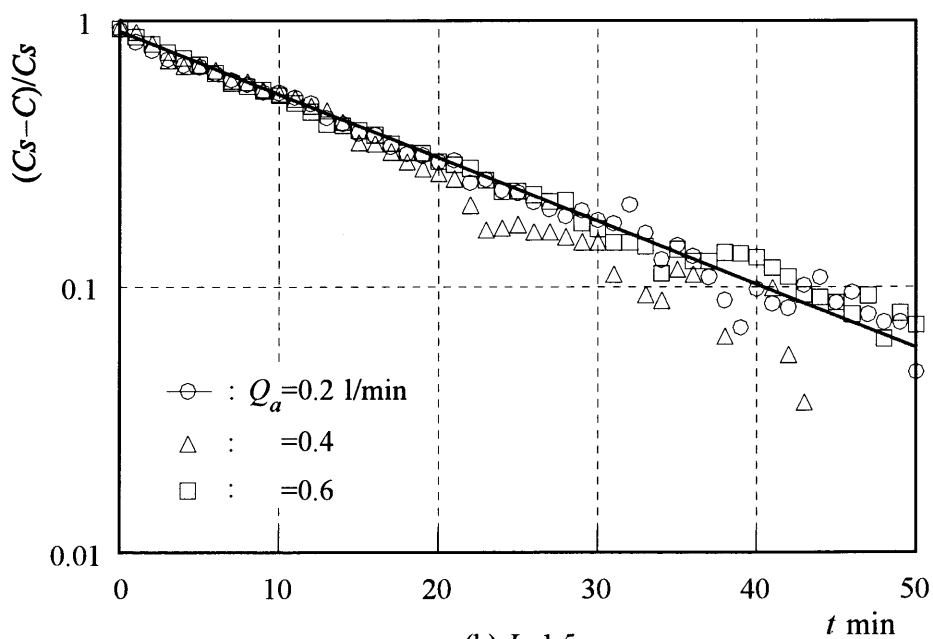


Fig.3.20 Dissolved oxygen (down side B' )



(a)  $L=1.3$  m



(b)  $L=1.5$  m

Fig.3.21 Dissolved oxygen (down side B' )

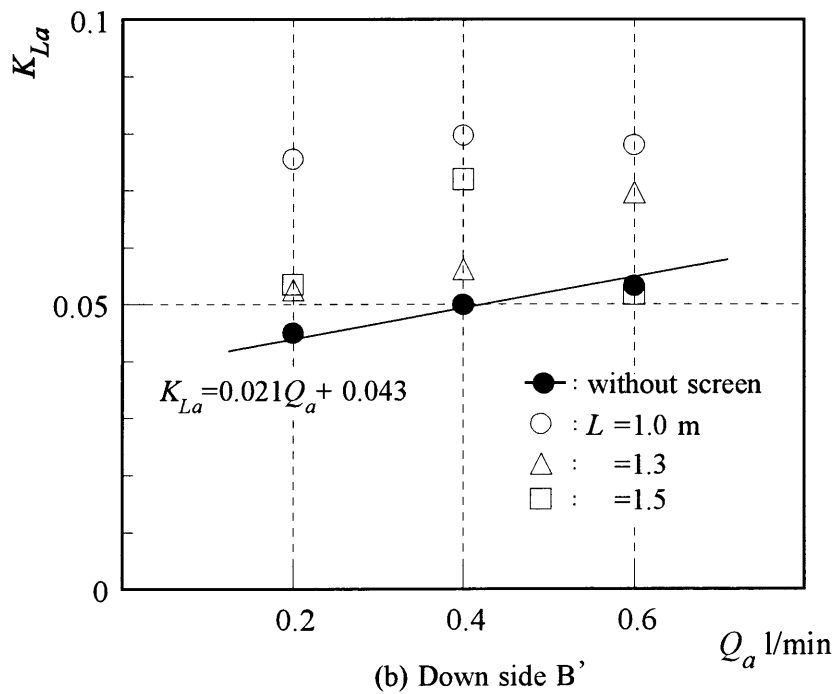
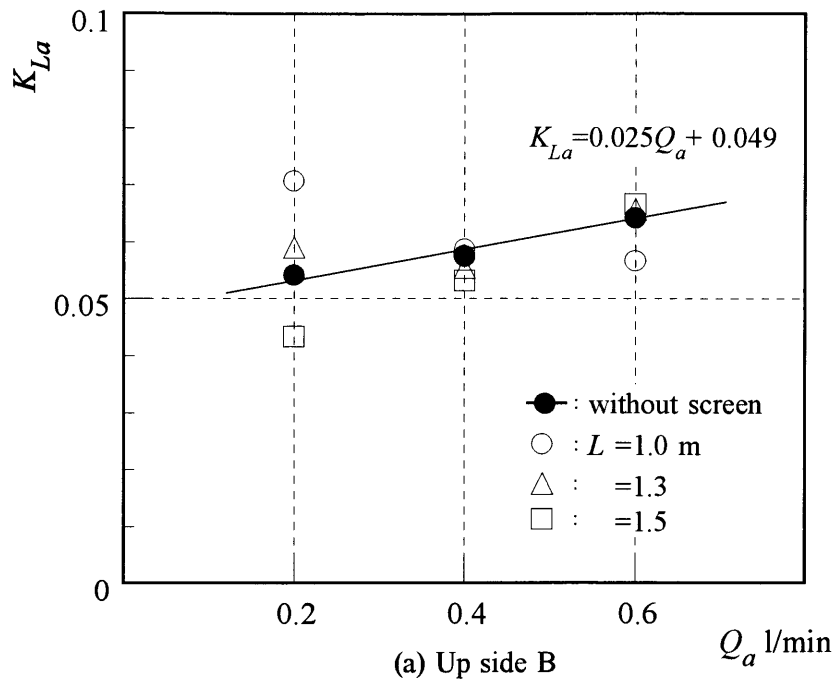


Fig.3.22 Gas exchange factor  
(Influence of flow rate of air)

### 3.3.2 仕切板長さの影響

次に、マイクロバブル気泡塔において仕切板の長さが流れやエアレーションに及ぼす影響を示す。

#### (1) 気泡径分布

図 3.23,3.24 に上流側 B の、図 3.25,3.26 に下流側 B' の各流量におけるそれぞれの仕切板長さに対する気泡径分布図を示す。また、図 3.27 に  $L$  に対する平均気泡径  $d_m$  を示す。

どの条件においても先ほど同様、同一な分布形となる。上流側において、いかなる  $Q_a$  に対しても  $L=1.5\text{m}$  の時、 $d_m$  が小さくなる。これは、仕切板がないか、もしくは短い場合は、測定部 B に小さい気泡が運ばれる前に下流側へ移動してしまうのに対して、 $L=1.5\text{m}$  では測定部 B まで小さい気泡が運ばれるためである。一方下流側では、仕切板なしと  $L=1.5\text{m}$  において  $d_m$  が小さくなる。仕切板なしでは、比較的大きい気泡 ( $d_b = 0.7 \sim 1.0 \mu\text{m}$ ) が測定部 B' に到達する前に上流部へと移動してしまうためであると考えられる。また仕切板が長いと、気泡が流路の上部まで運ばれ、比較的大きい気泡は下流側に入り込まず、そのまま水面へと上昇していく。すなわち小さな気泡のみが流れに従って下流側へと移動するためである。

#### (2) 速度分布

図 3.28~3.30 に各  $Q_a$  におけるそれぞれの  $L$  に対する気泡塔断面  $y/H=0.25, 0.5, 0.75$  での気泡群の  $y$  方向の速度分布を示す。

仕切板を設置すると上昇流の流速の速い領域は仕切板なしに比べ、速くなっている。これは、仕切板がないと水平方向に広がりやすいことと、仕切板を設置すると上流側だけでも循環流が生じており、塔全体の循環流とあわせると循環している流量が大きいためである。一方下流側では、 $y/H=0.5$  において仕切板なしの下降速度が速いのにに対し、 $y/H=0.25$  では仕切板を設置した方が若干速くなっている。これは仕切板がない場合では、上流側に流れが広がっているため下流側底部まで達する流れが少ないことを意味している。

### (3) 循環流量

図 3.31 に、気泡塔断面  $y/H=0.5$  での下流側の速度分布をもとに算出した循環流量  $Q_c$  (m<sup>3</sup>/s) を示す。

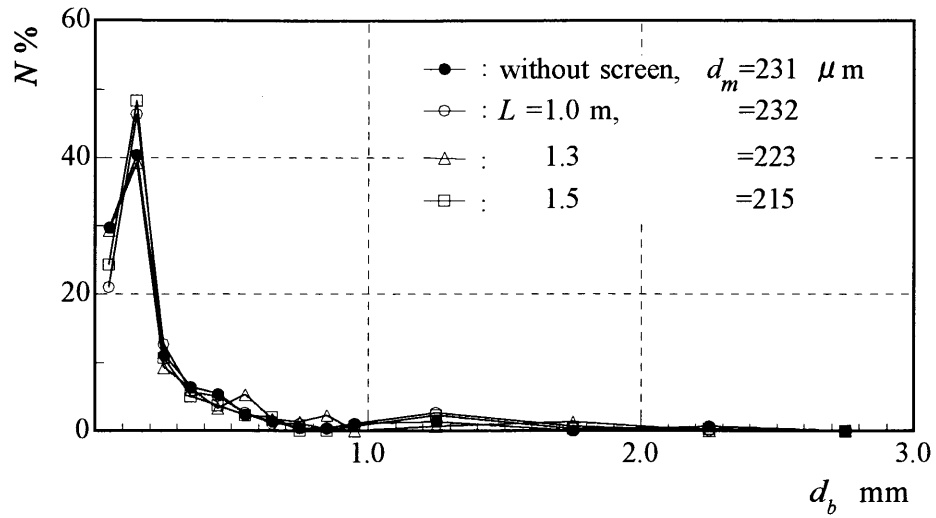
仕切板を設置した場合、仕切板なしに比べ循環量が大きく減少する。また、 $L$  が長くなると循環量が減少する。これは、仕切板より上部全体で下流側への移動が起きており、仕切板上端から水面までの距離が短いほど、下流部への流れが少なくなるものと考えられる。その値は、仕切板なしに比べ  $L=1.5\text{m}$  では  $Q_a=0.2, 0.4, 0.6\text{ l/min}$  に対して循環流量  $Q$  はそれぞれ約 29%, 約 32%, 約 32%減少する。

### (4) エアレーション特性(溶存酸素量)

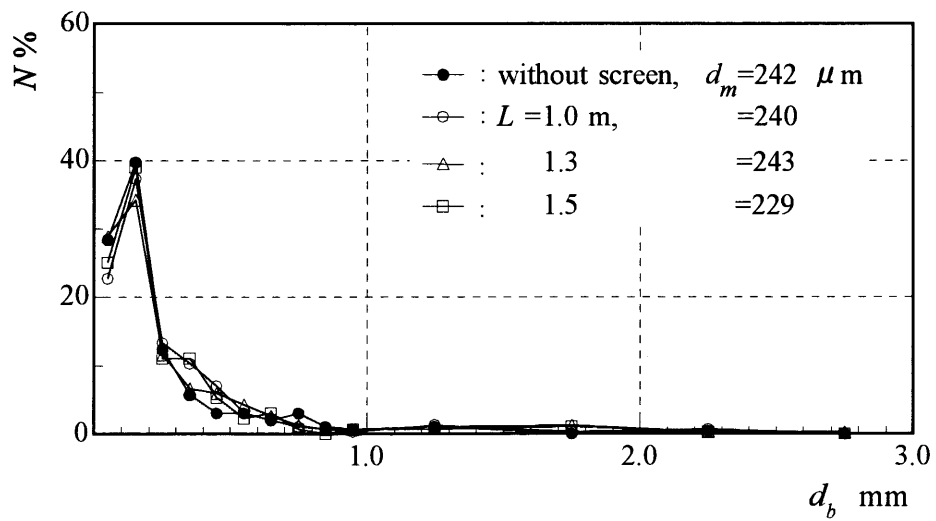
図 3.32,3.33 に上流側 B の、図 3.34,3.35 に下流側 B'の位置における  $Q_a$  でのそれぞれの仕切板長さ  $L$  に対する溶存酸素量  $C$  の時間変化を示す。

仕切板を設置すると、ほとんどの条件で仕切板なしに比べ溶存酸素が増加する。これは、下流側のほうが顕著に見られ、仕切板を設置することで気泡が下降流に乗って、下流側底部近くまで運ばれたことによる。  $t=30\text{ min}$  での下流側において、仕切板なしに比べ、 $L=1.0\text{m}$  の溶存酸素量の増加量は  $Q_a=0.2, 0.4, 0.6\text{ l/min}$  でそれぞれ約 19%, 約 15%, 約 14%である。

また図 3.36(a)に上流側 B の、(b)に下流側 B'の各仕切板長さに対するガス交換係数  $K_{La}$  を示す。仕切板を設置すると  $K_{La}$  も増加し、多少の違いがあるものの上流、下流側ともに  $L=1.0\text{m}$  において一番大きい値である。これは、前述した通り  $d_m$  は  $L=1.5\text{m}$  で一番小さいが、可視化画像や速度分布等から分かるよう、下流側に流れが入り込みにくく、 $L=1.0\text{m}$  では多くの気泡が下流側に運ばれたことによる。



(a)  $Q_a = 0.2$  l/min



(b)  $Q_a = 0.4$  l/min

Fig.3.23 Bubble size distribution, up side B  
(Influence of screen's length)

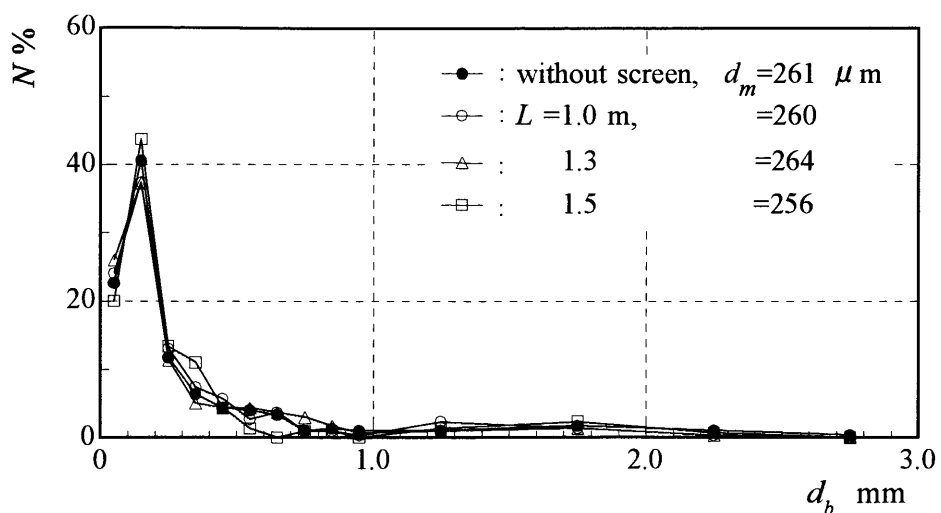


Fig.3.24 Bubble size distribution, up side B  
(Influence of screen's length,  $Q_a=0.6$  l/min)

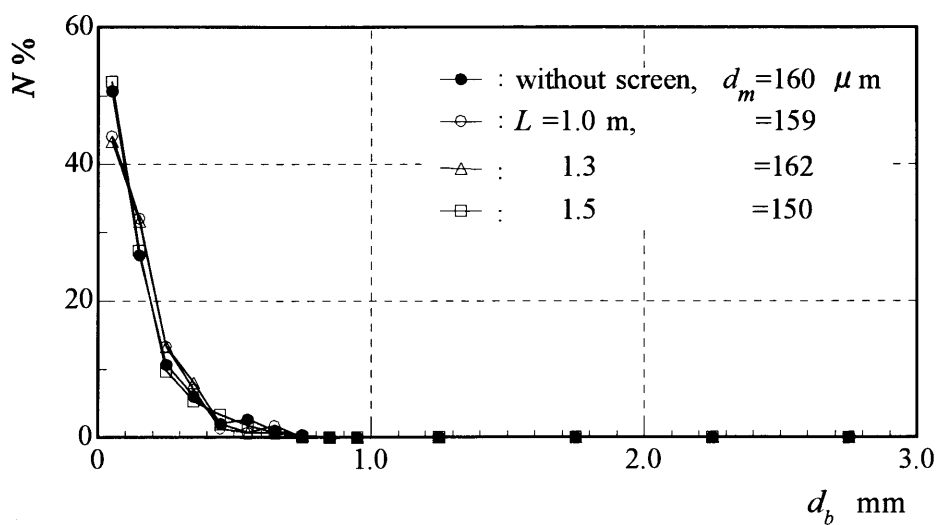


Fig.3.25 Bubble size distribution, down side B'  
(Influence of screen's length,  $Q_a=0.2$  l/min)

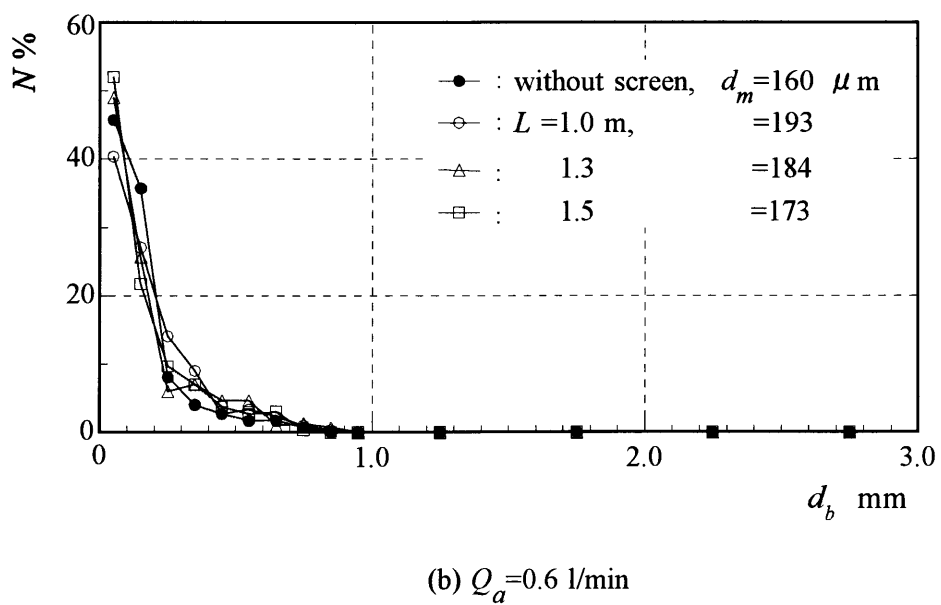
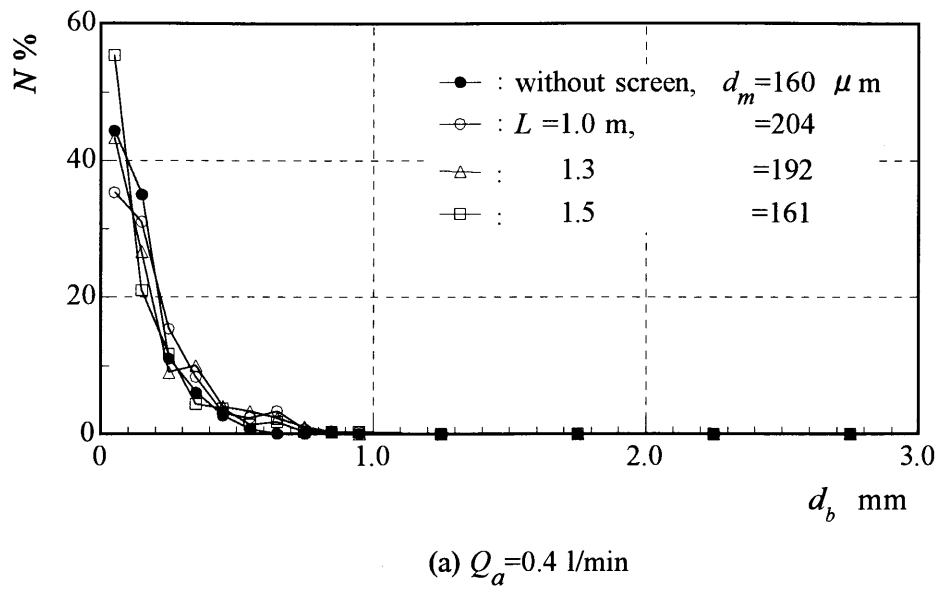
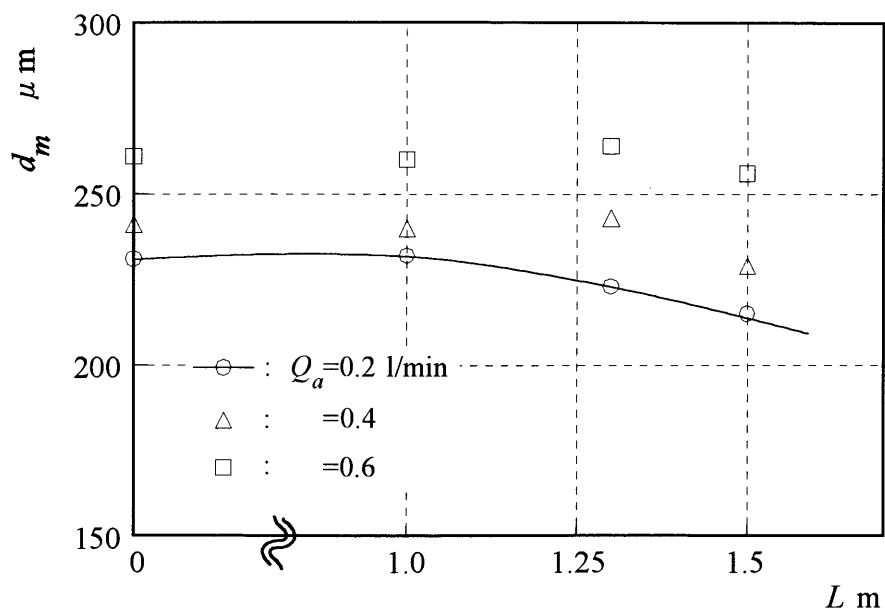
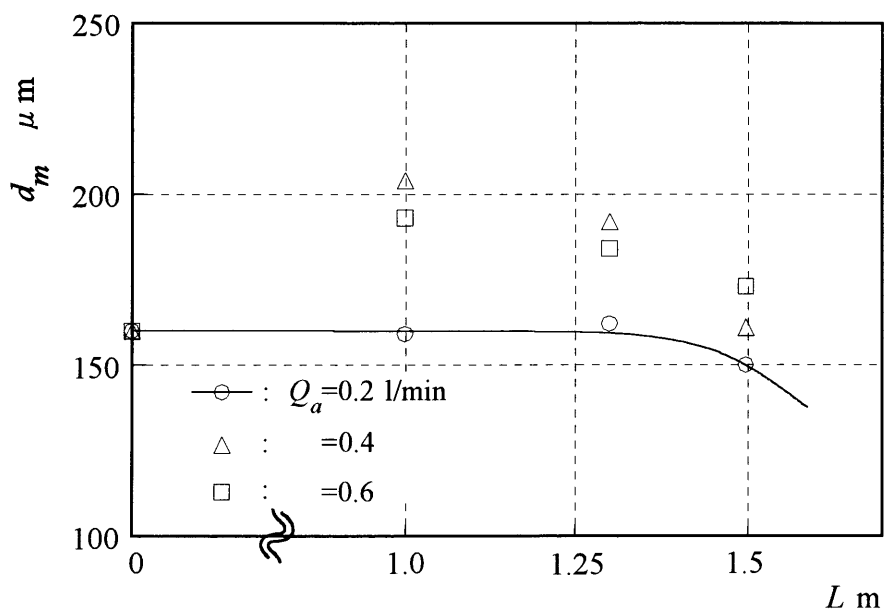


Fig.3.26 Bubble size distribution, down side B'  
(Influence of screen's length)



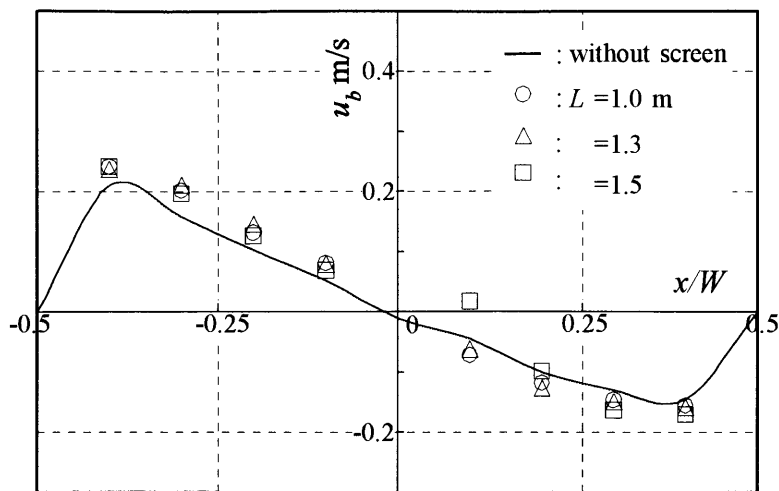


(a) Up side, B

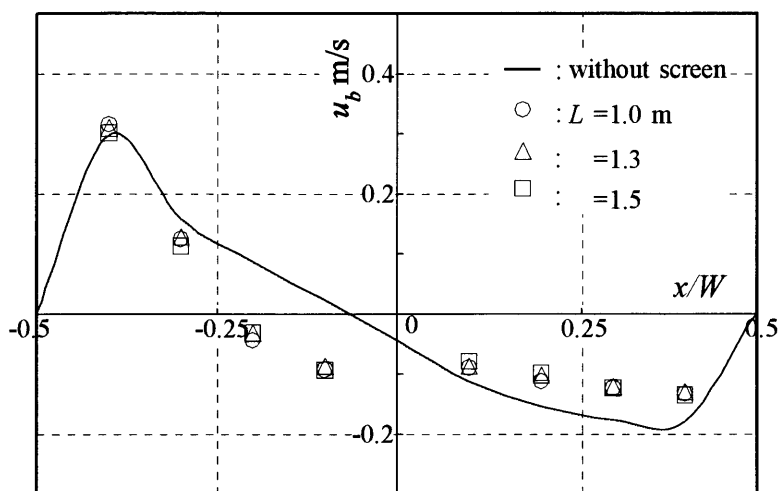


(b) Down side, B'

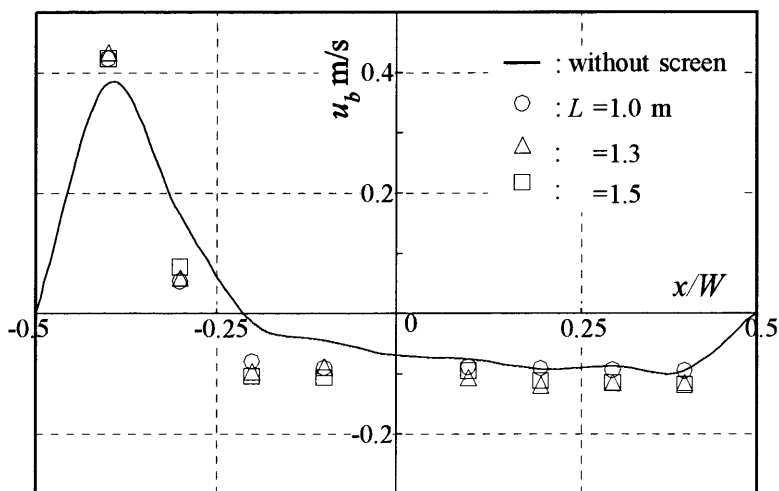
Fig.3.27 Mean bubble diameter  
(Influence of screen's length)



(a)  $y/H=0.75$

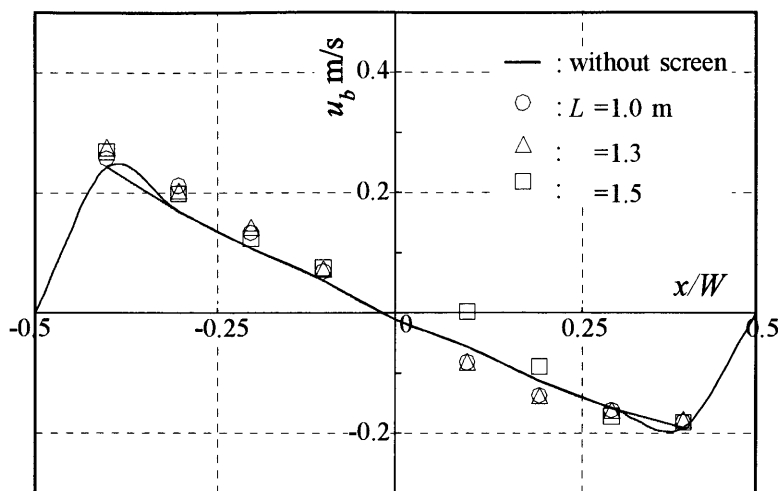


(b)  $y/H=0.5$

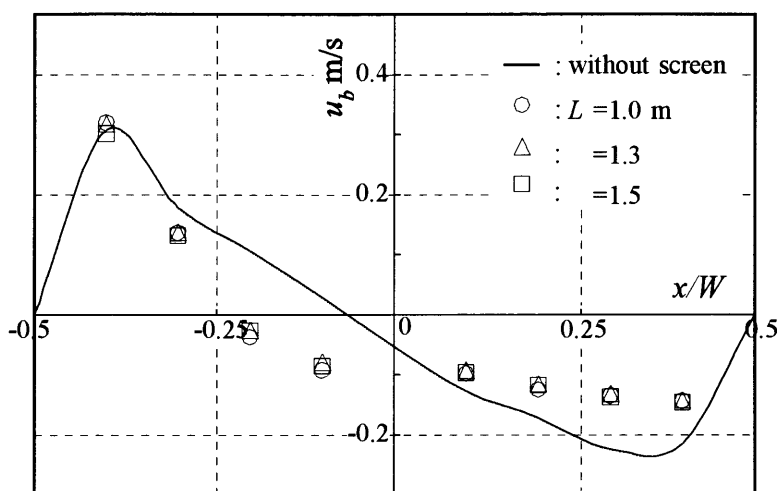


(c)  $y/H=0.25$

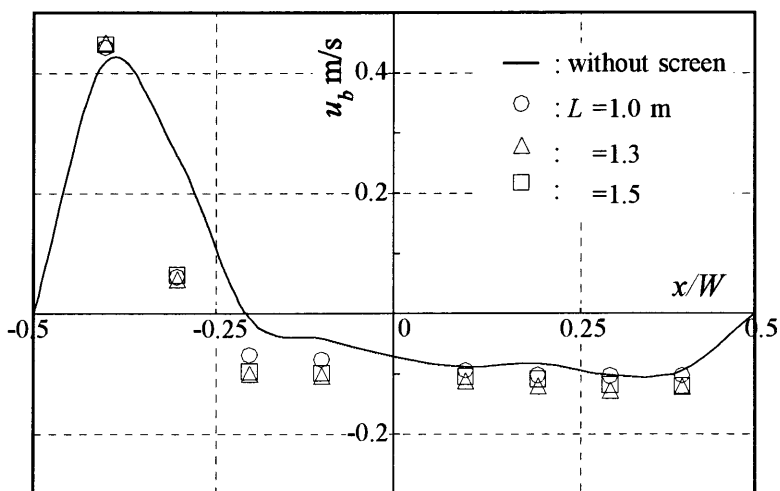
Fig.3.28 Velocity distribution ( $Q_a=0.2$  l/min)  
(Influence of screen's length)



(a)  $y/H=0.75$

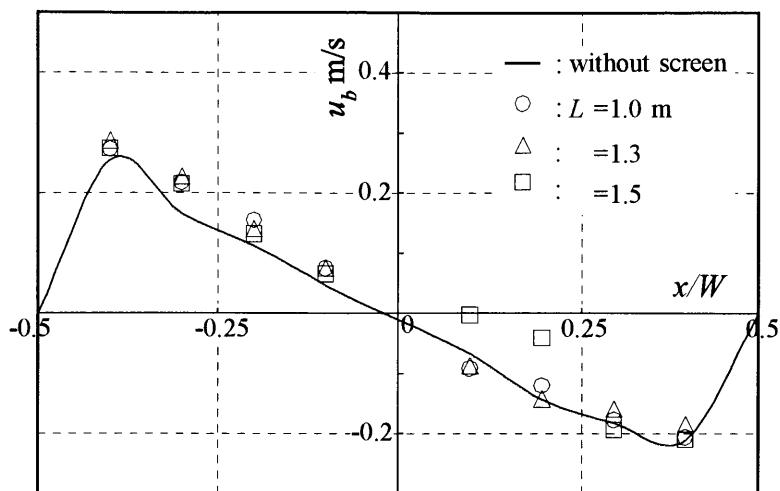


(b)  $y/H=0.5$

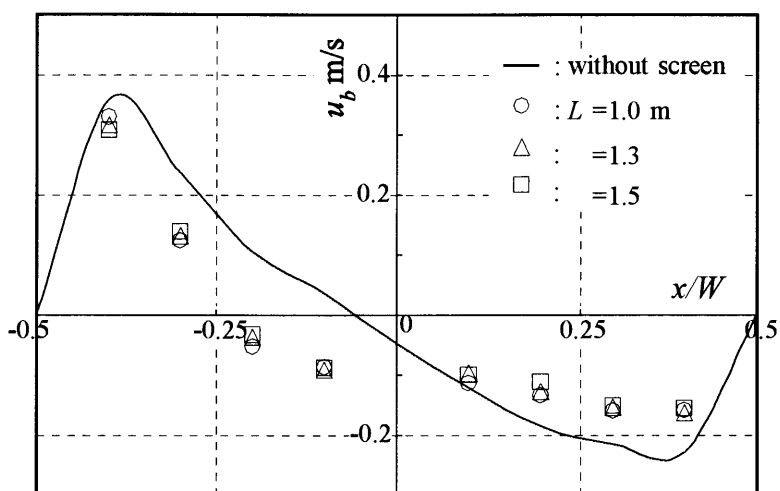


(c)  $y/H=0.25$

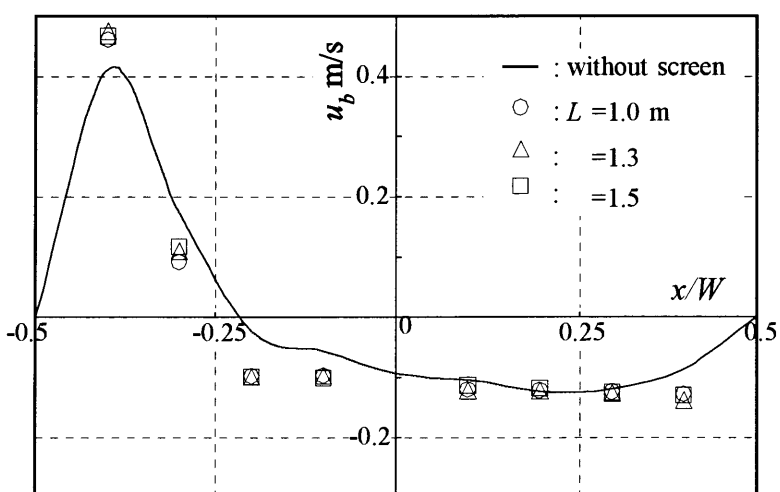
Fig.3.29 Velocity distribution ( $Q_a=0.4$  l/min)  
(Influence of screen's length)



(a)  $y/H=0.75$



(b)  $y/H=0.5$



(c)  $y/H=0.25$

Fig.3.30 Velocity distribution ( $Q_a=0.6$  l/min)  
(Influence of screen's length)

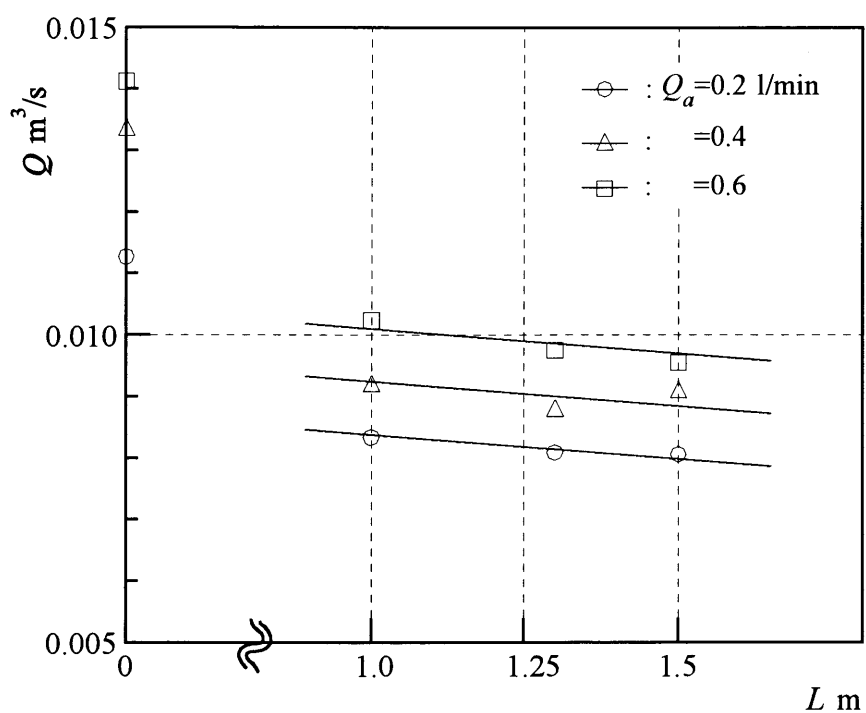
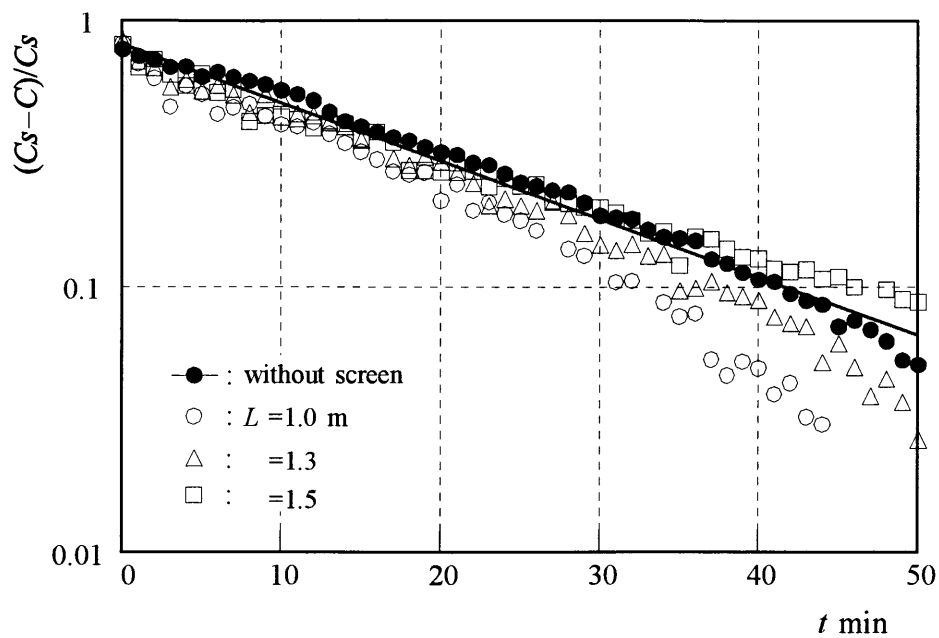
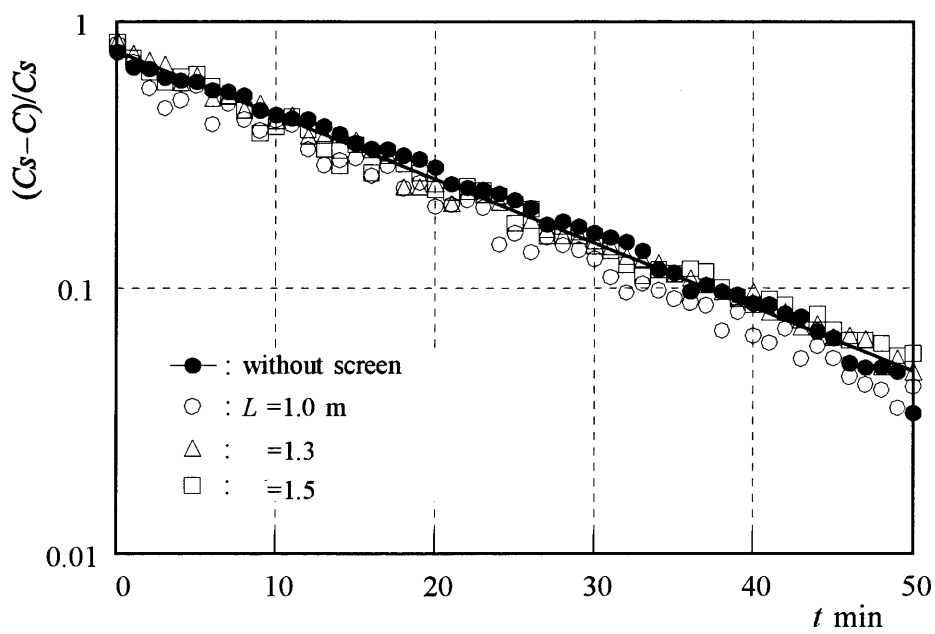


Fig.3.31 Circulation flow rate  
(Influence of flow rate of air)



(a)  $Q_a = 0.2$  l/min



(b)  $Q_a = 0.4$  l/min

Fig.3.32 Dissolved oxygen (up side B)

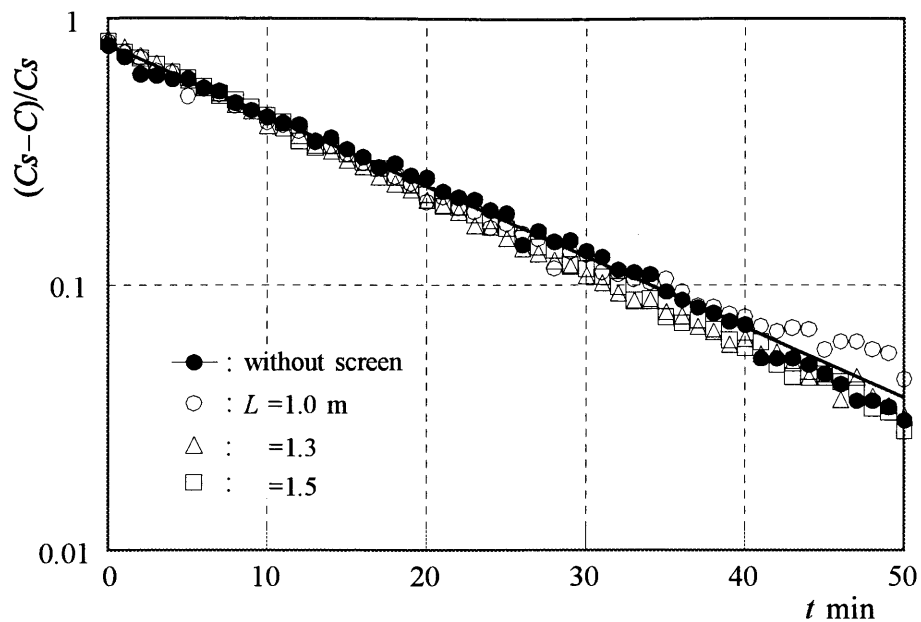


Fig.3.33 Dissolved oxygen  
(up side B,  $Q_a = 0.6$  l/min)

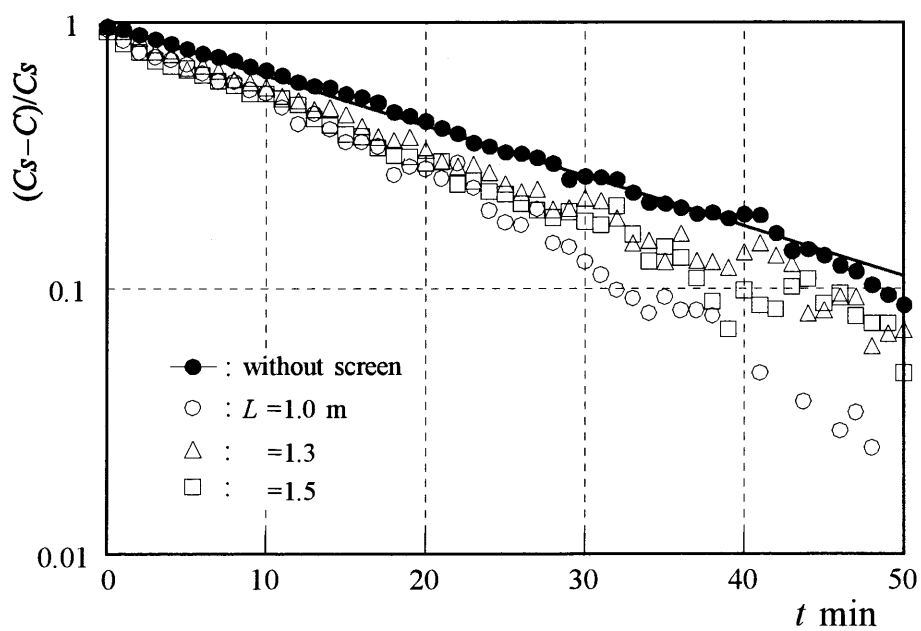


Fig.3.34 Dissolved oxygen  
(down side B',  $Q_a = 0.2$  l/min)

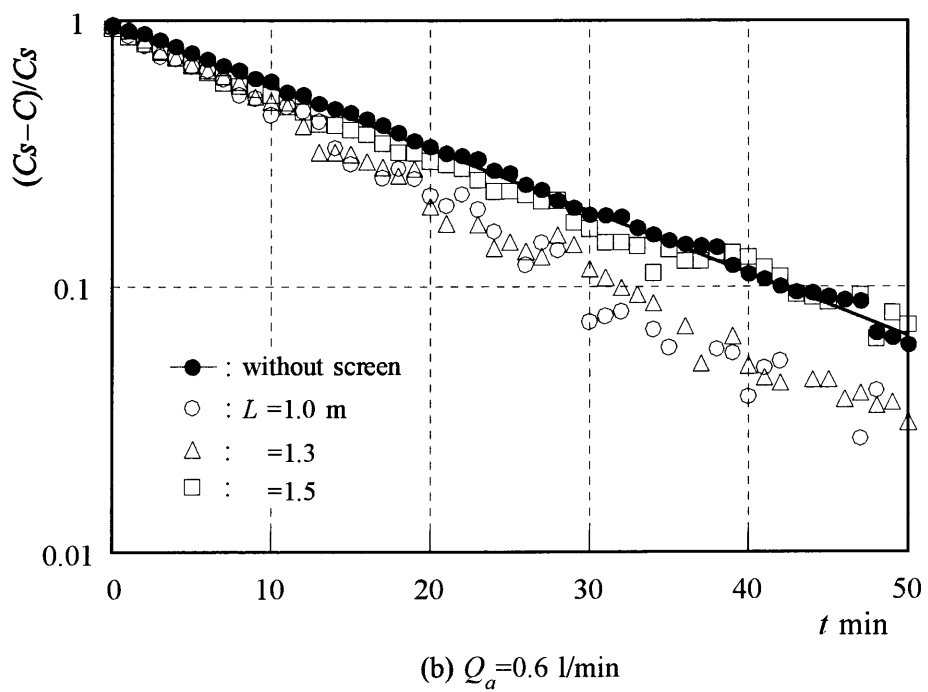
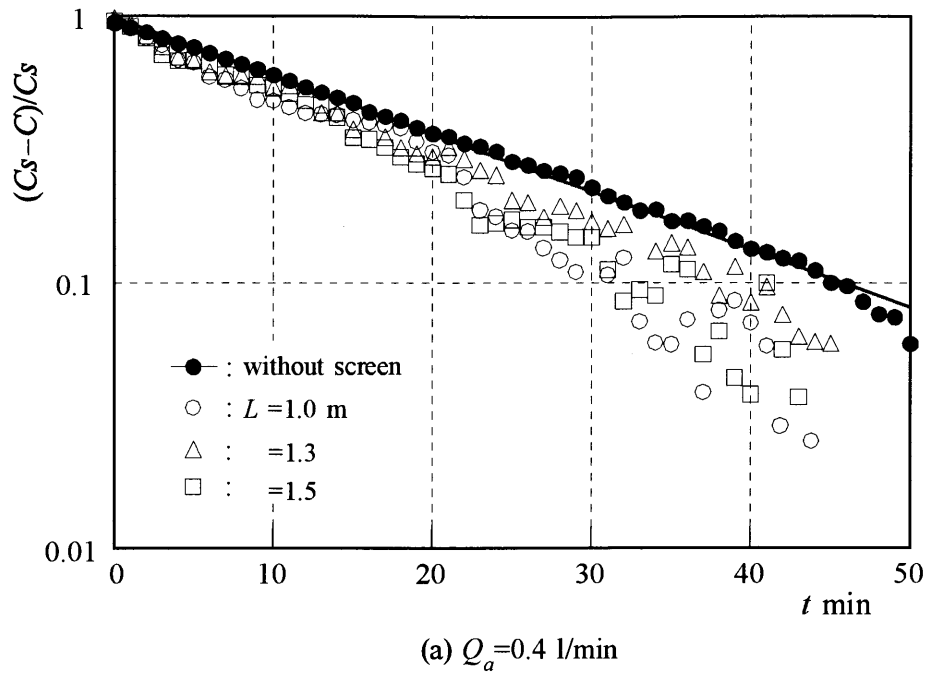
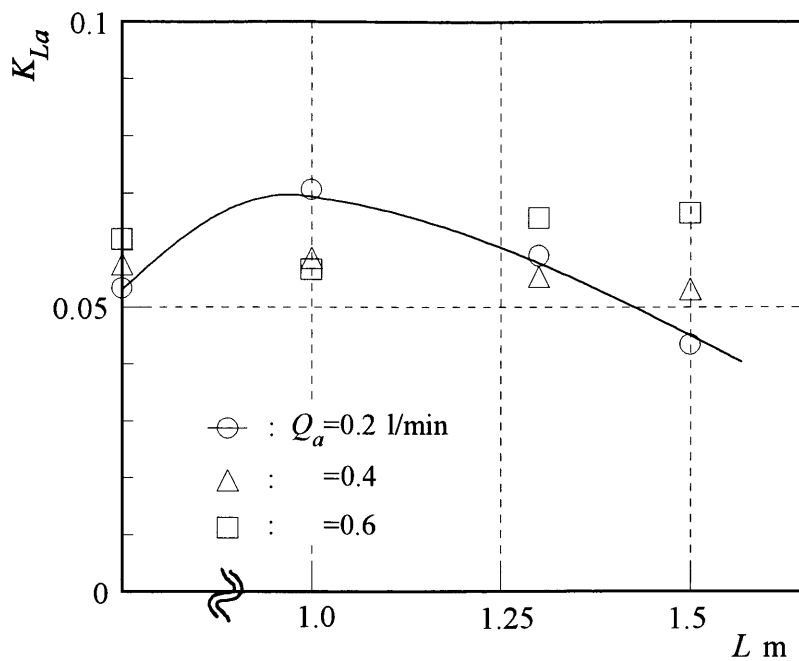
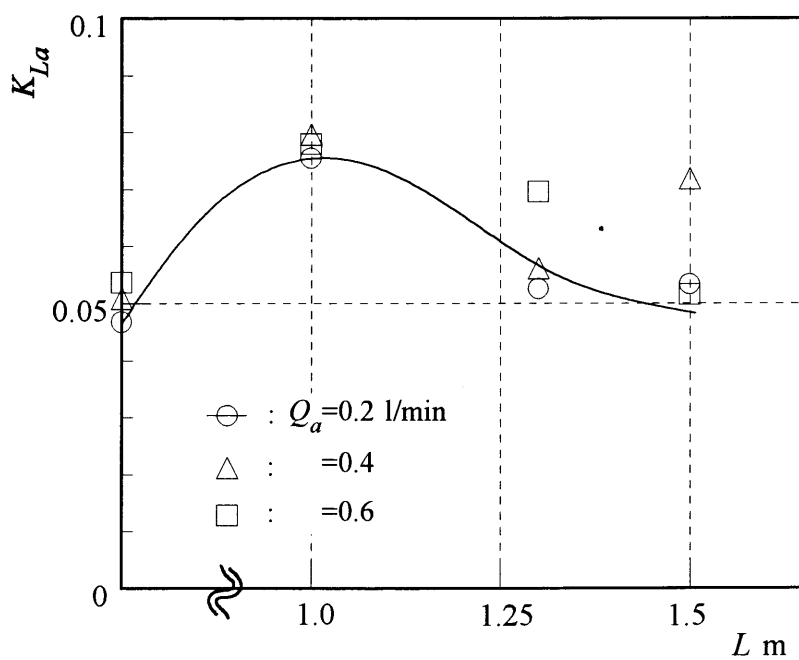


Fig.3.35 Dissolved oxygen (down side B' )





(a) Up side B



(b) Down side B'

Fig.3.36 Gas exchange factor  
(Influence of screen's length)

### 3.3.3 多孔質セラミック製気泡発生器との比較

気泡径に対する影響を検討するため、多孔質セラミック製気泡発生器(図 3.37 参照)を気泡塔に曝気した場合との比較を示す。なお、水噴流の影響を無視するためマイクロバブル生成ノズルからは水噴流( $u_{w0}=19.6$  m/s)のみ噴出させ、また、空気の流量は総流量を同じにするため  $Q_a=0.4, 0.8, 1.2$  l/min と変化させ、結果はそれぞれ  $Q_a=0.2, 0.4, 0.6$  l/min と表記する。

#### (1) 流動状態

図 3.38 に多孔質セラミック製気泡発生器を気泡塔に曝気したときの可視化画像を示す。(仕切板なし)

マイクロバブルを曝気した場合に比べ、下流方向に流れ込む気泡がほとんどないことが良く分かる。また、時間が進むにつれて流れに密度差ができ、循環流が生じ、発生させた気泡群は循環流により上流側壁面に沿って流れるようになる事が分かる。また  $Q_a$  が小さい場合、気泡の数が少ないため、ほとんどの気泡が壁面に沿って流れているのが分かる。

#### (2) エアレーション特性(溶存酸素量)

図 3.39,3.40 に上流側 B の、図 3.41,3.42 に下流側 B' の位置におけるそれぞれの仕切板長さでの各  $Q_a$  に対する溶存酸素量 C の時間変化を示す。図中、直線で示したものが多孔質セラミック製気泡発生器の結果である。また、その上流側 B 点付近における平均気泡径も共に記す。さらに、図 3.43(a)に上流側 B の(b)に下流側 B' の各流量に対するガス交換係数  $K_{La}$  を示す。

気泡径は、仕切板なし・ $Q_a=0.2$  l/min を除いて約 2.1~2.3 mm である。しかし仕切板なし・ $Q_a=0.2$  l/min では、可視化映像でも見られた通り循環流の影響により壁面沿いにほとんどの大きい気泡が流れており、測定部に大きい気泡が少なかったためと考えられる。特に、仕切板のない場合では、循環流の横方向の速度が大きいと考えられ、その影響によると考えられる。従って、多孔質セラミック製気泡発生器における実験での平均気泡径は約 2.15 mm 程度であり、マイクロバブル気泡噴流の約 10 倍の気泡径を有する。

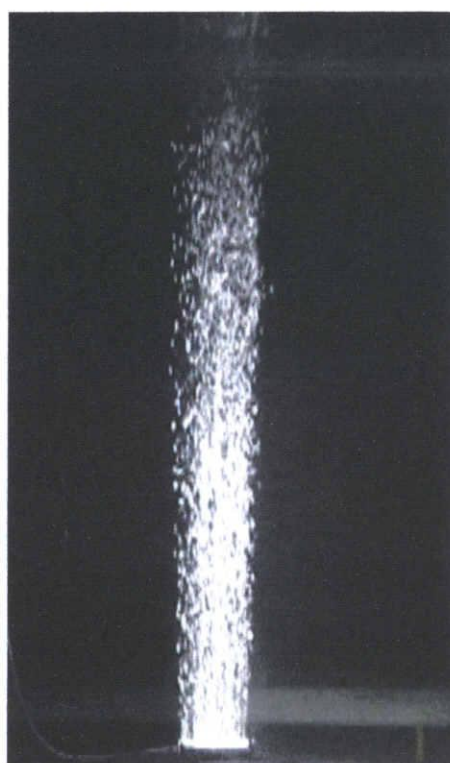
溶存酸素量は仕切板の長さに関わらず、上流側、下流側共に  $Q_a$  が増加すると溶存酸

素量も増加する。 $Q_a=0.2$  l/min に対して  $Q_a=0.6$  l/min のその増加量は最大で、上流側において約 12%( $L=1.0$  m)、上流側において約 28%(仕切板なし)である。これは、積算空気流量によるもので、マイクロバブルの場合に比べてその影響がより顕著に現れている。このことからマイクロバブルにした場合、空気の流量を小さくしてもエアレーションの効果が十分に得られるといえる。また、 $K_{La}$  のグラフを見て分かるように、仕切板の有無、長さには影響されずほとんど変化はない。

マイクロバブルを曝気したときと比較すると、全条件においてマイクロバブルを曝気した場合の方が溶存酸素量が増加している。その増加量は  $K_{La}$  で比較すると、マイクロバブルの場合、気泡発生器に比べ上流側で約 19~112%、下流側で約 39~141%である。したがって、気泡塔の分散相をマイクロバブルにする事で非常に効果が得られたといえる。

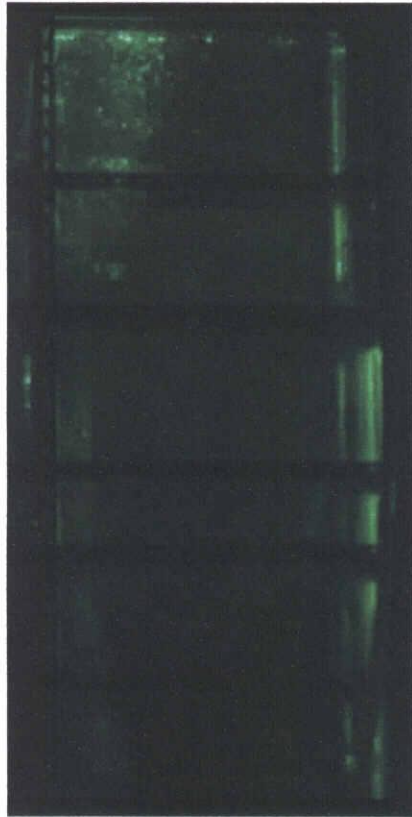


(a) Micro bubble jet



(b) Fine ceramics

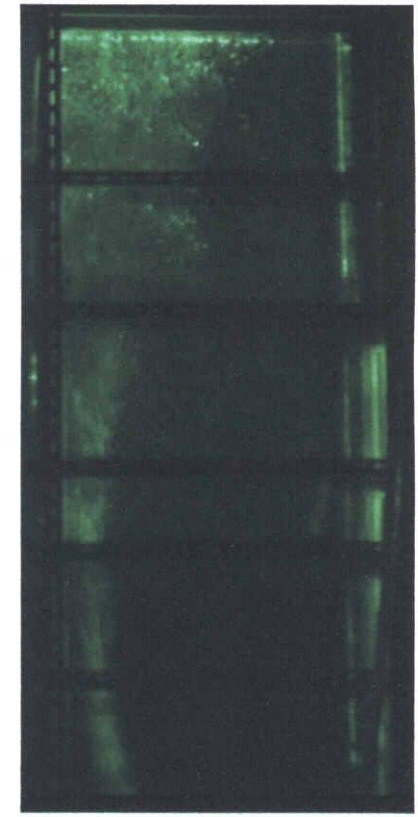
Fig.3.37 Bubble generator



(a)  $Q_a=0.2$  l/min

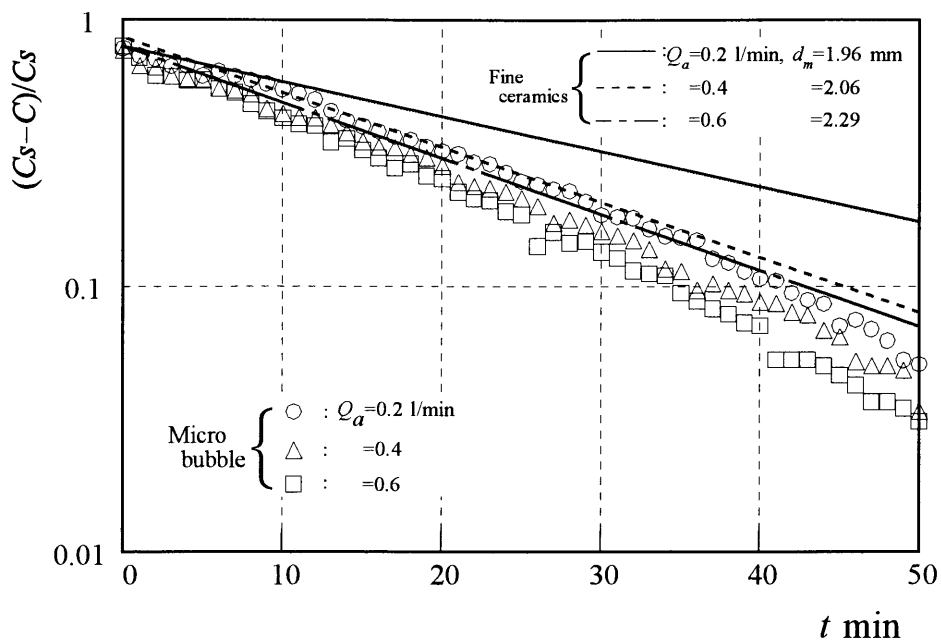


(b)  $Q_a=0.4$  l/min

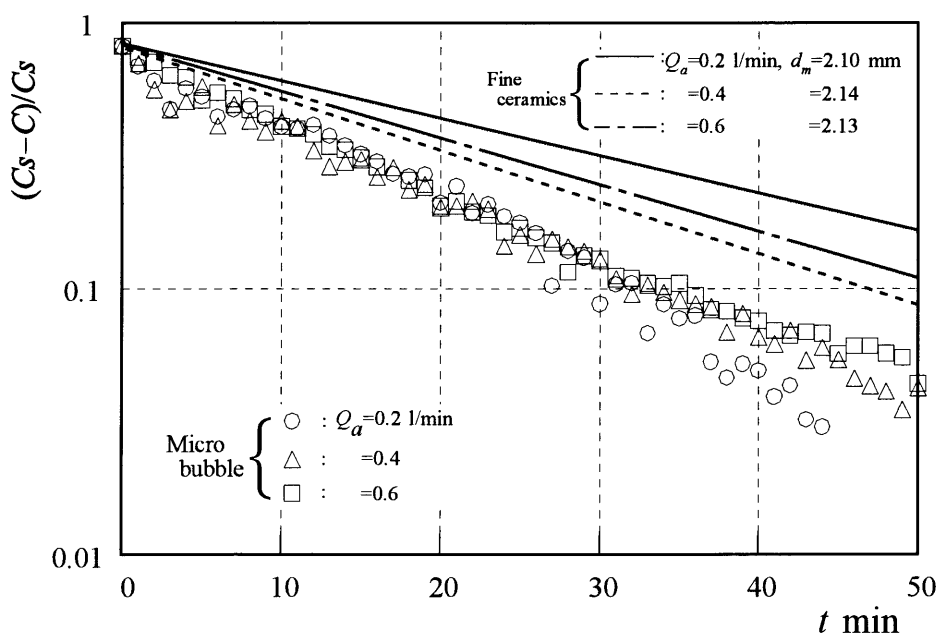


(c)  $Q_a=0.6$  l/min

Fig.3.38 Visualized flow pattern (without screen, fine ceramics)

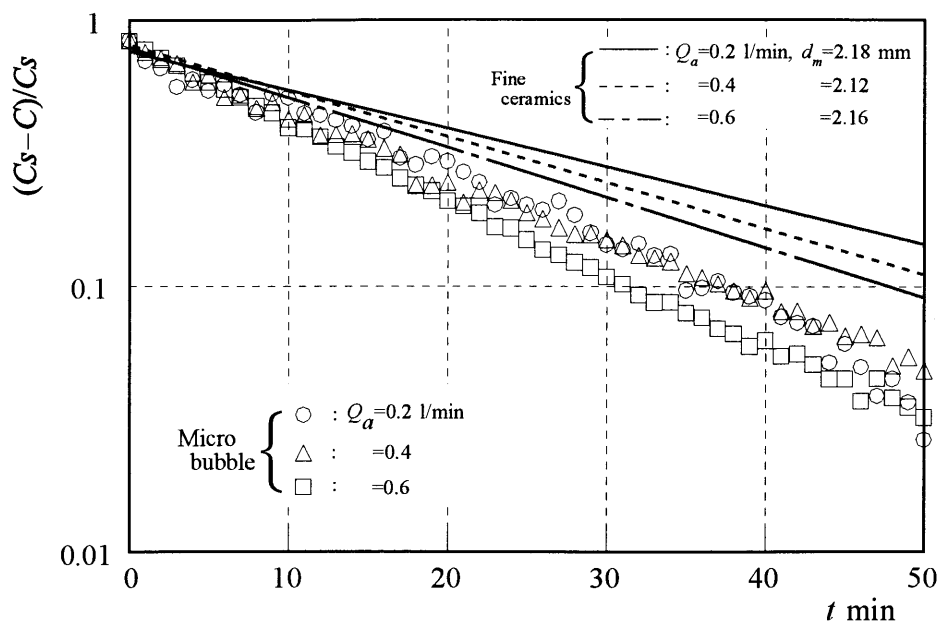


(a) Without screen

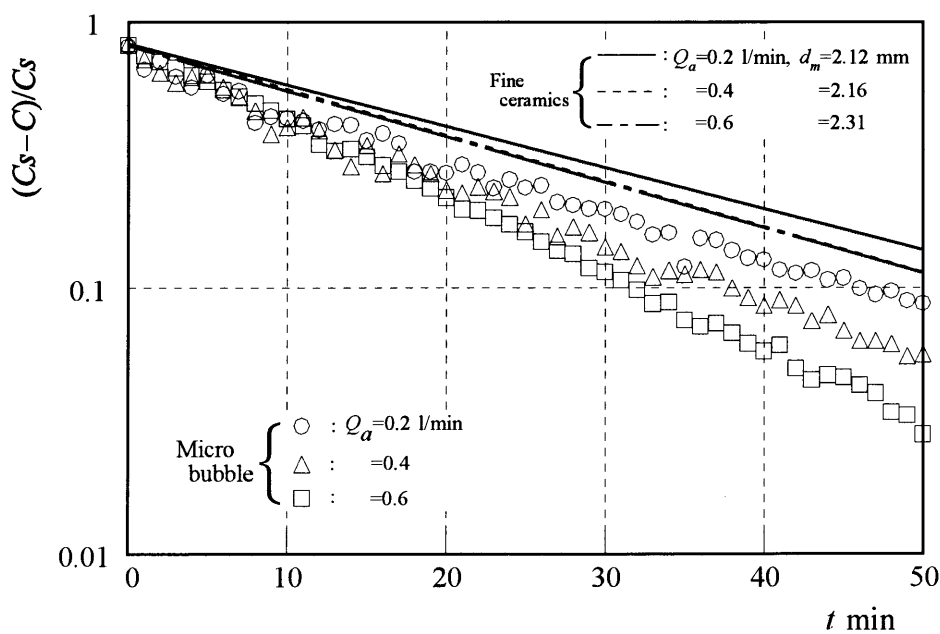


(b)  $L=1.0$  m

Fig.3.39 Dissolved oxygen (up side B)



(a)  $L=1.3$  m



(b)  $L=1.5$  m

Fig.3.40 Dissolved oxygen (up side B)

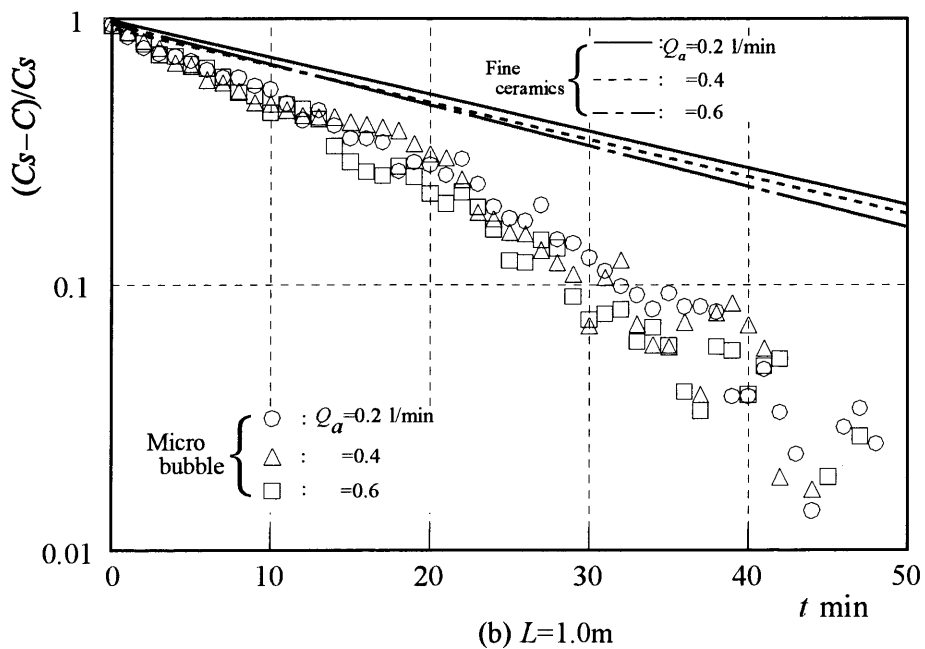
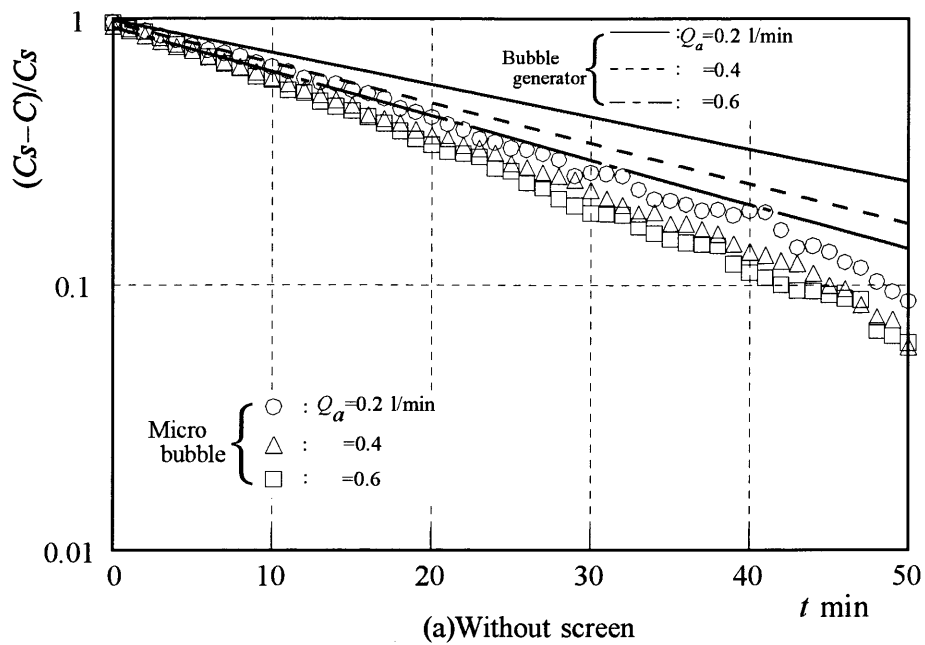
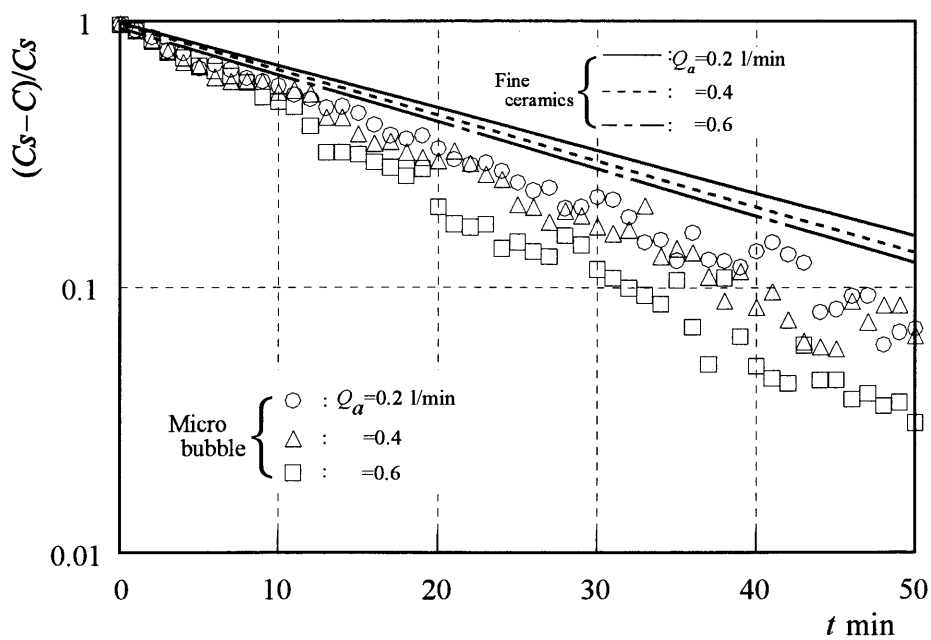
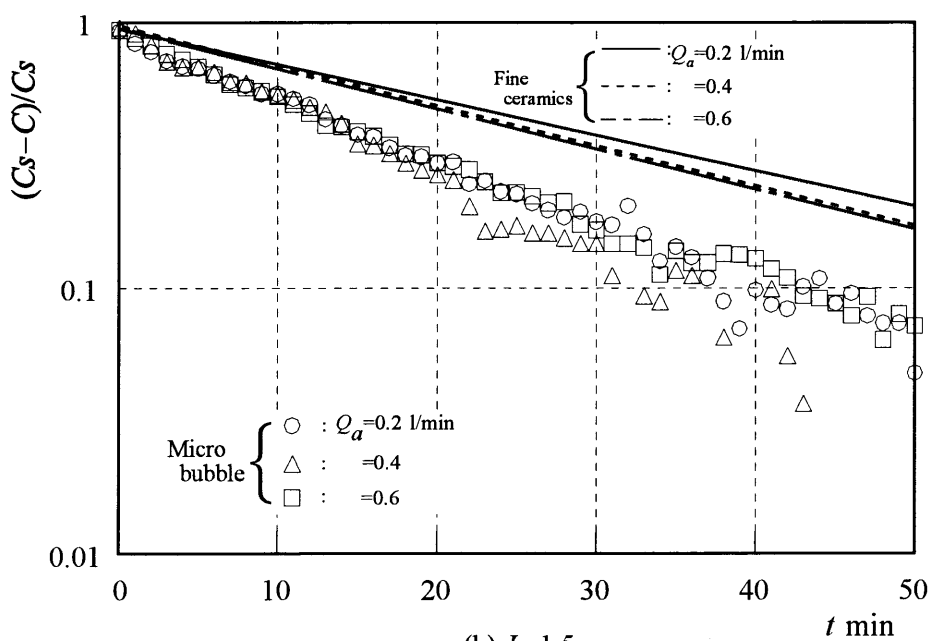


Fig.3.41 Dissolved oxygen (down side B' )





(a)  $L = 1.3$  m



(b)  $L = 1.5$  m

Fig.3.42 Dissolved oxygen (down side B<sup>7</sup>)

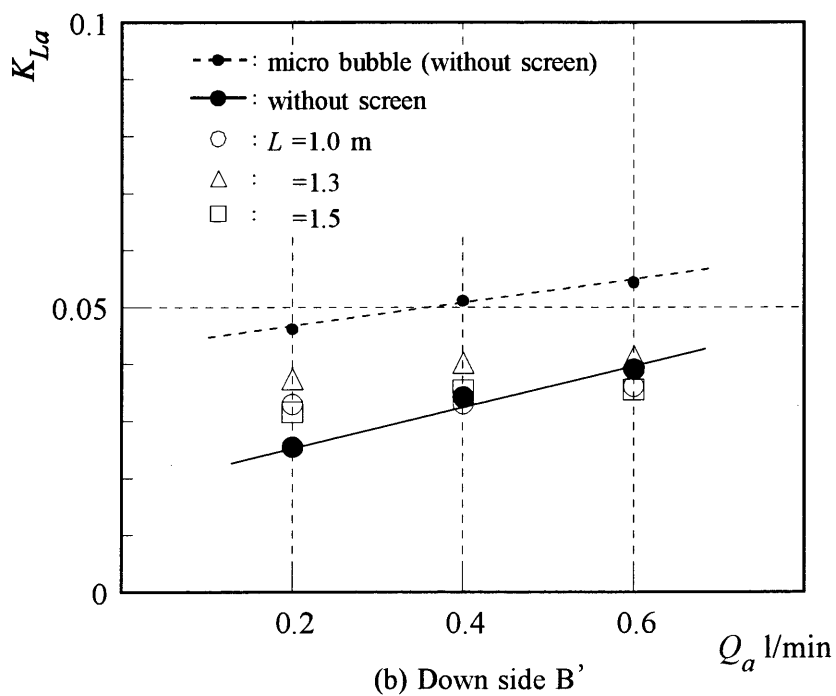
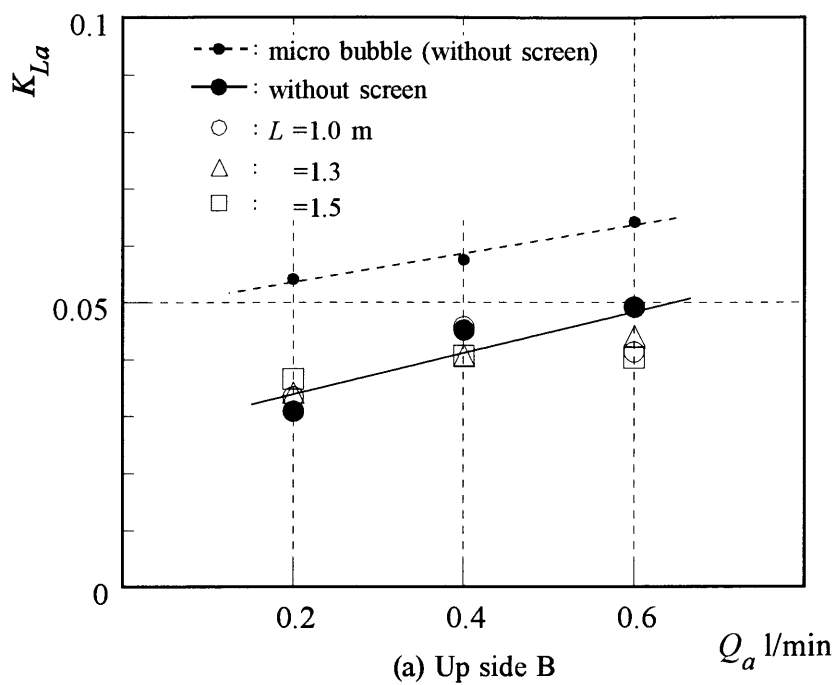


Fig.3.43 Gas exchange factor  
(In the case of fine ceramics)

## 第4章 結論

### I. マイクロバブル気泡噴流

本研究では構造が極めて簡単なマイクロバブル生成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群の速度分布、中心線流速、噴流の広がりなどの測定から、また、本ノズルによるエアレーション特性を溶存酸素量の時間変化の測定から明らかにした。

得られた主な結果は、以下のものである。

- (1) 静止流体中に噴出される水噴流外縁から空気（気泡）を誘引させると、気泡は大きなせん断力により容易に微細化される。
- (2) ノズル出口近傍での気泡群の速度は水噴流に比べて小さく、特に中心軸近傍において比較的大きな速度差が存在する。しかし、その速度差は下流に行くにつれ減少する。
- (3) マイクロバブル気泡噴流の拡散は水噴流に比べ下流側において高速水噴流の場合はほぼ等しくなるが、キャビテーション噴流の場合やや小さくなる。
- (4) ノズル出口近傍の圧力は負圧で、水面から 250 mm を基準とし、 $y/d=0.3$  付近に空気ノズルを設置したと仮定すると  $u_{w0}=19.9, 26.5$  m/s でそれぞれ水深約 3, 7 m まで空気を自給できる。

### II. マイクロバブル気泡塔への応用

次いで本研究では、マイクロバブルの気液反応装置である気泡塔への応用を試みた。気泡塔内の流動状態を気泡の速度分布、気泡径分布から、また、マイクロバブルによるエアレーションの効果を溶存酸素量の経時変化の測定から明らかにし、溶存酸素量の変化を気泡流に起因して誘起される流れとの関係において明らかにした。

#### a. 空気流量の影響

- (1) 気泡群は塔壁面に沿いながら上昇し、上昇した気泡の中で微細な気泡は循環流により  $x$  方向へと渦巻くようにしながら拡散し、下降流に乗って下降して行く。一方、比較的大きい

径を有する気泡は、循環流には乗らずに壁に沿ったまま流れ、そのまま気泡塔液面から大気へ排出される。

- (2) 上流側では、空気流量を増加させると平均気泡径が増加する。
- (3) 噴流によって速度を得た気泡は、上昇に伴い徐々に速度を減衰しながら上昇していく。
- (4) 空気流量を増加させると、気泡の上昇速度・下降速度ともに幾分増加する。
- (5) それゆえ、循環流量は  $Q_a$  の増加に伴い増加し、その増加量は  $Q_a=0.6$  l/min では  $Q_a=0.2$  l/min に比べ仕切板なし、 $L=1.0, 1.3, 1.5$  m に対してそれぞれ、約 25%、約 23%、約 20%、約 19%増加する。
- (6) 仕切板を設置しない場合では  $Q_a$  が増加するに従って溶存酸素量も増加する。その増加量は  $Q_a=0.6$  l/min では  $Q_a=0.2$  l/min に比べ、 $t=30$  min. において、溶存酸素量  $C$  が上流側では約 6%、下流側では約 11%である。

#### b. 仕切板長さの影響

- (1) 平均気泡径は上流側において、いかなる  $Q_a$  に対しても  $L=1.5$  m のときに最も小さくなる。一方下流側では、仕切板なしと  $L=1.5$  m において小さくなる。
- (2) 仕切板を設置すると上流側だけでも循環流が生じ、塔全体の循環流とあわせると循環している流量が大きくなり、上昇流の流速の速い領域は仕切板なしに比べ、速くなる。
- (3) 仕切板を設置した場合、仕切板なしに比べ循環流量が大きく減少する。
- (4) 仕切板を設置すると、ほとんどの条件で仕切板なしに比べ溶存酸素が増加する。
- (5) 下流側において仕切板なしに比べ、 $L=1.0$  m,  $t=30$  min. での溶存酸素量の増加量は  $Q_a=0.2, 0.4, 0.6$  l/min でそれぞれ約 19%、約 15%、約 14%である。

#### c. 多孔質セラミック製気泡発生器との比較

- (1) マイクロバブルを曝気した場合に比べ、下流方向に流れ込む気泡がほとんどない。
- (2) マイクロバブルを曝気したときと比較すると、全条件において溶存酸素量が増加している。その増加量は  $K_L a$  で比較すると、マイクロバブルの場合、気泡発生器に比べ上流側で約 19~112%、下流側で約 39~141%である。
- (3) 気泡塔の分散相をマイクロバブルにする事で非常に効果が得られたといえる。

## 謝 辞

本研究を遂行するにあたり、終始にあたって懇切丁寧な御指導、御助言を賜りました三重大学大学院工学研究科 社河内敏彦教授、前田太佳夫教授、辻本公一准教授ならびに安藤俊剛助教に深く感謝致します。

実験装置を制作するにあたり御尽力下さった実習工場の皆様に感謝致します。また、本研究を進めるにあたり御協力頂いた平成 18 年度博士前期課程卒業、西尾昌洋氏ならびに平成 19 年度学部 4 年生、行方宏君をはじめとする流動現象学研究室の院生、学部生の皆さんに厚く感謝致します。

最後に、修士論文を作成するにあたり多大なる御指導を頂きました 社河内敏彦教授に重ねて厚く御礼申し上げます。

## 参考文献

- [1] 佐野和生, "水産養殖と水", (1990), サイエンティスト社, pp.18-26, 103-131.
- [2] 佐野和生, "養殖工学概論", (1993), 緑書房, pp.116-138.
- [3] 石井淑男, "泡のエンジニアリング", (2005), テクノシステム, pp.303-305, 423-429.
- [4] 内田重男・須藤政夫・三輪泰久, "新版 化学工学 (化学工学会編)", (1996).
- [5] N. Rajaratnam, 野村安正, "噴流", (1982), 森北出版.
- [6] 社河内敏彦, "噴流工学", (2004), 森北出版, pp.3-11, 167-176.
- [7] 坂東芳行, "矩形気泡塔を用いた気泡と泡沫の応用", (2004), pp.7-15.
- [8] A.Serizawa, "Flow Characteristics and Application of Micro Bubble Containing Bubbly Two-Phase Flow", (2004), Proc. of 16<sup>th</sup> Int. Conf. on Chemical and Process Engineering, pp.22-26.
- [9] 社河内・阿部・西尾・辻本・安藤, "マイクロバブルの生成と気泡噴流に関する研究", 日本機械学会東海支部第 54 期総会講演会講演論文集, No.053-1(2005-3), pp.295-296.
- [10] 大池崇聰, "気泡噴流の流動特性とその制御", 三重大学大学院工学研究科平成 13 年度修士論文, (2001).
- [11] 八尋暉夫, "最新ウォータージェット工法", (1996), 鹿島出版会.
- [12] 日本ウォータージェット学会, "ウォータージェット技術事典", (1993), 丸善.
- [13] 日本機械学会編, "気液二相流技術ハンドブック", (1989), コロナ社.
- [14] 西尾昌洋, "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", 三重大学大学院工学研究科平成 18 年度修士論文, (2001).