

画像解析による微気泡径の計測システム

廣田 裕*・矢田貞美*・戸田勝善*

A System for Measuring Micro-bubble Diameter by Image Analysis

HIROTA Yutaka*, YADA Sadami* and TODA Masayoshi*

(Received August 30, 2002)

Abstract: To measure micro-bubble diameter below 200 μm , we developed a measuring system by an image analyzer. In this paper, we measured the standard corpuscles below 50 μm and micro-bubbles generated by an aerator to verify measurement precision. The results are summarized as follows.

1. In theory, the available measuring range of micro-bubble diameter with this system is 1.88 ~ 450 μm , the resolution per pixel is 0.94 μm .
2. When micro-bubbles generated by an aerator were measured with this system, the mean value of micro-bubble diameter was 23.3 μm , and the coefficient of variation was in 4.4 ~ 7.9% for micro-bubble diameter of 10 ~ 30 μm .
3. Micro-bubble diameters below 200 μm was able to be measured by arbitrary locating water-immersion object lens inside the water tank.
4. This system can be acquired at lower cost than the liquid born particle counters of laser light barrier type by 2 ~ 20%.

Key words: Bubble, Micro-bubble, Bubble diameter, Image analysis, Aeration

1. 緒 言

気泡は小さいと、水中の懸濁物質への吸着が容易で、気液の溶解効率が高い。また、気泡は大きいほど、水中における攪拌力が大きく、滞留時間は短い。

このような気泡の用途は、工業分野では洗浄における薬剤および洗剤の軽減、水処理分野では汚水および汚泥の生化学処理ならびに懸濁粒子(SS)の分離および除去¹⁾、医療分野では超音波診断における造影の鮮明化や菌体培養、農業分野では水耕およびハウス栽培、水産分野では溶存酸素量の維持・増加による水質浄化ならびに滞留水の流動など²⁾である。

水中の溶存酸素量を高める方法には、圧縮気体の散気や気泡を利用した曝気などがある³⁾。一般に、微気泡発生装置⁴⁾は大気泡を発生することは不可能であり、逆に大きい気泡を発生する装置⁵⁾では微気泡を発生することは困難である。溶存酸素量を高める上で、微気泡は気液の接触面積が増大し、水中における滞留時間が長くなるため⁶⁻⁸⁾、結果的に酸素の溶解効率の向上に寄与するので²⁾、微気泡の最小径ならびに分布の高尖度は、微気泡発生装置の性能を比較する上で重要

な指標となる。また、大きい気泡では供給気体量を多くしても、気液溶解における効率の改善は容易でない。

気泡径の大小の評価は目視、もしくはビデオカメラおよび顕微鏡による写真撮影によっても可能であったが、微気泡発生技術の向上に伴い、微気泡径を高精度で計測する必要が生じている。そこで、微気泡径を計測する方法として、レーザ光の透過または散乱による光屈折率の差異を検出する光遮断式、光散乱式^{9,10)}ならびに各種記録媒体による微気泡の撮影画像の解析法^{11,12)}などが開発された。

レーザ法は短時間に粒径分布を自動計測できるが、装置が高価で、微気泡の形状ならびにレーザ光透過時における計測対象の光屈折率が異なると計測誤差が生じ、また懸濁粒子および微気泡の識別は困難である。計測可能な最小径は、レーザ遮断式では2 μm 、レーザ散乱式では0.5 μm であるが、両レーザ法では、10 μm 以下の微気泡の場合、レーザの受光センサの較正電圧が変動するので計測値が不安定となり、安定した計測値は得られない¹³⁾。また、レーザ法は、キャリブレーションを真球(ポリスチレン球)でするので1.500 μm 径以上では楕円となる気泡¹⁴⁾は、光屈折率の影響を受けるため

* Laboratory of Ocean System Engineering, Tokyo University of Fisheries, 5-7, Konan 4-chome, Minato-ku, Tokyo 108-8477, Japan(東京水産大学海洋システム工学講座)

計測精度が低下する。さらに、レーザ法は、気泡径 $10 \sim 1,500 \mu\text{m}$ では高精度に計測可能であるが、除去が不可能な微粒子や塵芥などの懸濁粒子と微気泡とを識別できないので、無差別に計測される。このため、酸素の溶解効率の上で有用な微小径のデータの計測誤差が大きくなる短所がある。

画像解析法は、微気泡を個別に計測するため、懸濁物および微気泡の識別・除外することは可能であるが、気泡径の分布を獲得するには多数の微気泡を計測する必要があり、多労を要する¹⁵⁾。従来の画像解析法^{11), 12)}は、透明な水槽またはパイプの外側からCCDカメラで撮影した気泡画像を解析する方法であり、計測可能な微気泡径の最小値は $200 \mu\text{m}$ である。また、水槽内に撮影媒体を配置する気泡の撮影技術は未開発である。 $200 \mu\text{m}$ の微気泡径の計測例¹²⁾では、画素あたりの分解能 $2.5 \mu\text{m}$ により画像解析しているが、基準微粒子と比較した計測データはない。

以上の問題に着目し、画像解析による $200 \mu\text{m}$ 以下の微気泡径の計測システム(以降、本システムと称する)を開発することを目的とした。

2. 装置および方法

2.1 基準微粒子

本システムの計測精度の指標には、プラスチック微粒子「マイクロパールSP」(積水ファインケミカル社製、以降、基準微粒子と称する)を使用した。供試した粒径は、 $5, 10, 30$ および $50 \mu\text{m}$ である。気泡は微細であるほど、水中における滞留性が高く、酸素の溶解効率が向上する²⁾。ゆえに、気泡は小さいほど有用であること、また、 $50 \mu\text{m}$ 以上の基準微粒子の入手が困難であることから、 $5 \sim 50 \mu\text{m}$ の基準微粒子を使用した。

Table 1に基準微粒子の基本物性を示す。同微粒子は、

Density	1.19 kg/m^3
Coefficient of thermal expansion	$9.8 \times 10^{-3} / ^\circ\text{C}$
Thermal decomposition temperature	327°C
Transparency	86.0%
Index of Refraction	1.57
Average diameter	
5 μm	$5.00 \pm 0.05 \mu\text{m}$
10 μm	$10.00 \pm 0.05 \mu\text{m}$
30 μm	$30.00 \pm 0.05 \mu\text{m}$
50 μm	$50.00 \pm 0.05 \mu\text{m}$

Table 1. Characteristics of standard corpuscles

ジビニルベンゼンを主成分とする架橋共重合体で、均一な粒径分布をしており、耐水、耐熱および耐薬品性を備えている。なお、この基準微粒子は、液晶の厚さ制御や接着剤層間の制御のスペーサとして使用されている。

2.2 実験方法

本システムでは既知粒径の基準微粒子を基準値とした。密度 1.19 kg/m^3 の基準微粒子を水面に散布すると、それぞれの粒径に比例した速度で沈降する。この沈降中の微粒子を本システムにより計測し、基準値と比較・検証した。なお、両実験では各粒径を200個供試した。次に、レーザ光遮断式微粒子計測装置(以降、レーザ遮断式と称する)および本システムを供試して、気液攪拌式の曝気装置(富士電気^株, VKF031A)により発生した微気泡径を計測した。同曝気装置は攪拌管および攪拌槽で気液を混合し、羽根車の高速回転により微気泡を発生する。アクリル製水槽(縦 29 cm × 横 59 cm × 高さ 41 cm)内において同装置により水深 20 cm で発生させた微気泡300個を水深 10 cm で計測した。予備実験では同位置における気泡径分布が安定するのに5分間を要したので、本実験では同装置の運転開始5分後から10分間の微気泡を計測対象とした。なお、同水槽の水量は 62.4 l 、水深は 36 cm 、水温は 15 にそれぞれ設定して実験を行った。

レーザ遮断式は光遮断式粒子検出器(KS-61)、液中粒子計数器(KL-11)および吸引ポンプ(KZ-28M1)より構成され、同方式の計測可能な最小径は $2 \mu\text{m}$ である¹³⁾。同方式を用いた微気泡の計測方法は以下のとおりである。まず、微気泡を包含した気液を、吸引ポンプにより水槽隣接の光遮断式粒子検出器のサンプルセル内に一定流量 25 ml/min を通水する。次に、同セル内の光照射域を微気泡が通過すると、照射光の散乱や吸収が発生する。この光量変動を液中粒子計測器により光電変換して微気泡径を計測する。なお、吸引ポンプ

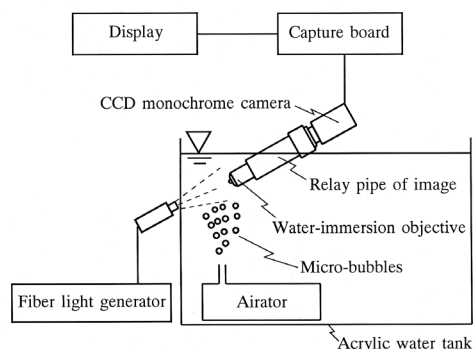


Figure 1. A system for measuring micro-bubble diameter by image analysis

による水槽内の水量減少を防止するため、一定流量25 ml/minの水を供給した。

2.3 画像解析による微気泡径の計測システム

Fig.1に画像解析による微気泡径の計測システムを示す。本システムは、光源、水浸対物レンズ、撮像管、CCD白黒カメラ(以降CCDと称する)、画像入力ボードおよびパソコンなどより構成される。光源には、微気泡および水槽内の水に熱影響を与えない高輝度冷光装置(林時計^株, 150W)を使用した。同装置は微気泡撮影領域の照度を最大650klxまで無段階に調整可能であり、同冷光装置および発光部を接続するためのファイバプローブの先端径は5mmである。水浸対物レンズの倍率は10倍で、同レンズの作動距離、すなわちレンズの対物面からの焦点距離は30mmである。CCD(東京電子工業^株, CS8320B)は、気泡密度および径の大小により入射光量が変化しても常に最適な画像を得られるAutomatic Gain Control回路⁶⁾、ならびに動体撮影に対応可能な最高1/10,000秒の速度可変電子シャッター機能を具備している。

2.4 画像解析による微気泡径の計測方法

アクリル製水槽内の水深10cmにおいて、水槽外から高輝度冷光装置のファイバ光を水浸対物レンズの対物面に対して90°の角度で照射し、この光軸上の微気泡をCCDで撮影した。CCD、撮像管および水浸対物レンズの傾斜角度は水槽底面に対して30°、同対物レンズの対物面と光源発光部の距離は11.5cm、計測位置の照度は8,000lxである。

Fig.2に約76μmの微気泡の撮影画像を示す。同画像は、画像処理ソフト(プラネトロン^株, Image-Pro Plus Ver.3.0)で閾値が最適化された後、球形微気泡の中心0を5度間隔で通る72本の微気泡径の平均値が自動的に計測される。実験では、曝気装置による微気泡の撮影

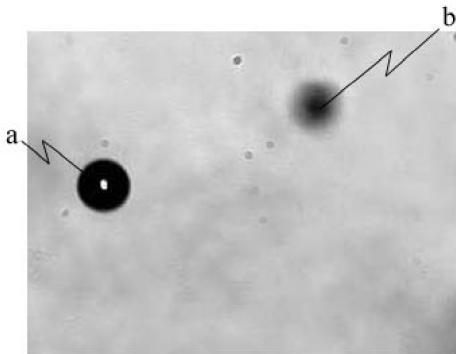


Figure 2. Picture of micro-bubble
a : Focused bubble. b : Non focus

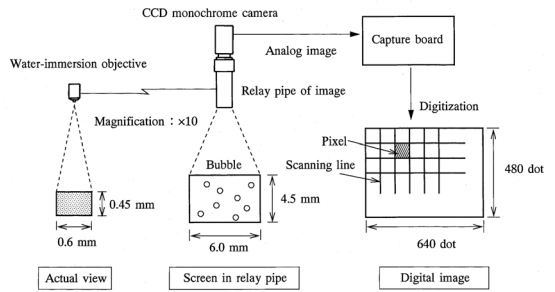


Figure 3. Process of digitization in picture

画像2,000個から無作為に300個を抽出して、微気泡径を計測した。なお、画像には焦点深度内、すなわち焦点の上下の厚さ¹⁷⁾には、除去しきれなかった懸濁物および微気泡が混在して撮影される。それゆえに、画像上で識別可能な懸濁物は手動により計測対象から除外し、焦点の適合した全ての微気泡径を上記方法により計測した。

2.5 アナログ撮影画像のデジタル化

Fig.3に撮影画像のデジタル化の過程を示す。水平0.6mm×垂直0.45mmの実視野内に存在する受光した微気泡は、水浸対物レンズにより10倍に拡大されて、水平6mm×垂直4.5mmの撮像管の内蔵ディスプレイ上に表示される。これを38万(水平768×垂直494)画素のCCDで撮影したアナログ微気泡画像は、画像入力ボードを経由する段階において階調¹⁸⁾16bit整数および32bit浮動小数点処理され、30万(水平640×垂直480)画素のデジタル画像に変換後、パソコンのディスプレイ上に表示される。

デジタル化の過程では、連続的な値を示すアナログデータを強制的に離散的なデータに丸め込むため、計測対象が小さいほど、すなわち、微気泡径が本システムの画素あたりの分解能に近づくほど計測精度が低下するものと推定される。

従来の画像解析法^{11,12)}と本システムとの違いは、対物レンズの有無である。従来法では、CCDカメラの撮影画像をソフト上で拡大して気泡径を計測していたが、本システムでは、微気泡を対物レンズで拡大し、その像をCCDカメラで撮影するため、従来の画像解析法よりも分解能が向上した。したがって、微気泡を計測することが可能になった。

2.6 レンズケース

Fig.4にレンズケース非装着時における微気泡の撮影画像を示す。本システムにより、微気泡を計測すると、微気泡が水浸対物レンズの、1)作動距離内に流入し、また、2)対物面に付着して撮影上の障害となる。

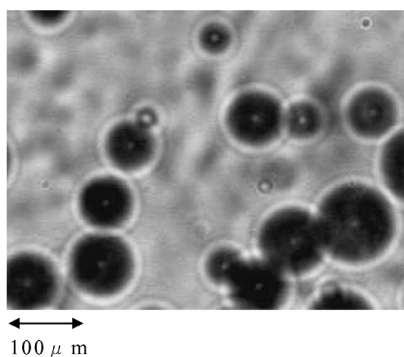


Figure 3. Picture of micro-bubble when a lens case isn't attached

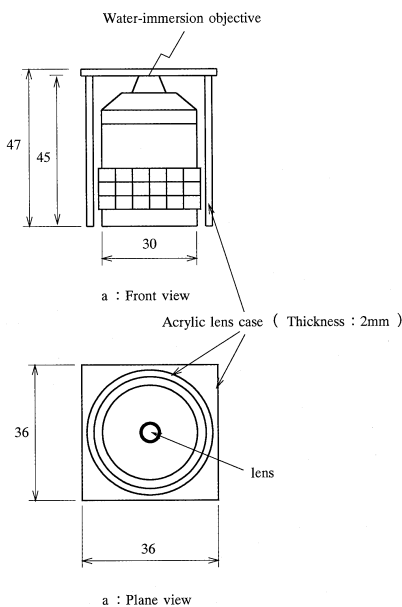


Figure 5. Lens case of water-immersion objective

そこで、前記の障害1)および2)を解決するため、厚さ2.0mmのアクリルでレンズケース(縦36mm×横36mm×高さ47mm)を作成し、水浸対物レンズの対物面上に装着した。Fig.5にレンズケースを示す。同ケースの装着により、前記の障害1)を防止し、同2)を軽減することができた。さらに、同2)を防止するため、画像撮影時における水浸対物レンズ、撮像管およびCCDの設置角度を微気泡の上昇方向に対して傾斜(実験では約30°)させ、レンズケースの対物面に撥水剤を塗布した。以上のような対策により、微気泡の画像が撮影可能になった(Fig.2)。

従来の画像解析法は透明な水槽またはパイプの外側から気泡を撮影していたため、CCDの焦点距離外の気泡計測は困難で、計測範囲に限界があり、微気泡の拡散の程度を議論できなかった。これに対して本システムでは水浸対物レンズおよび同レンズケースを水槽内の任意の位置に配置して、微気泡を計測することができる。ゆえに、本システムによる計測点を移動させることにより、微気泡の存在位置の範囲、すなわち微気泡の拡散距離を計測できる。

なお、アクリルの屈折率および厚さを考慮したレンズケース装着時における水浸対物レンズの作動距離は3.21mm、焦点深度は4.37μm程度である¹⁷⁾。

2.7 画像解析可能な微気泡径

本システムによる画像解析可能な微気泡径は、撮影画像の流れ順に水浸対物レンズの解像限界、CCDおよび画像入力ボードの各分解能により決定される。解像限界とは識別可能な二つの点光源の距離を、分解能とは認識可能な数値の最小単位をそれぞれ意味する¹⁷⁾。水浸対物レンズの解像限界 X (nm)は次式(1)で示される¹⁷⁾。

$$X = K \frac{\lambda}{N_A} \quad (1)$$

ただし K : 定数(0.5 ~ 1.0), λ : 光源の波長(nm), N_A : 水浸対物レンズの開口数である。 K は水浸対物レンズの対物面に対する光照射の角度により変動する定数で、同レンズ対物面に対して斜め照射する場合は0.5、垂直方向に照射する場合は1.0である。

ここで K は1.0、 λ は550nm、 N_A は0.30なので、水浸対物レンズの解像限界 X は1.83μm程度と計算される。これは、1.83μm以下の画像が水浸対物レンズ面を通過する段階では撮影不可能であることを示す。次に、水浸対物レンズにより結像した1.83μm以上の画像は、CCDおよび画像入力ボード上では画素という画像を構成する最小単位により構成される。

CCDの画素あたりの水平分解能 F_X (μm)および垂直分解能 F_Y (μm)は次式(2)で示される。

$$F_X = J_X / H_X, F_Y = J_Y / H_Y \quad (2)$$

ただし J_X : 撮像管の内蔵画面の水平距離(μm) J_Y : 撮像管の内蔵画面の垂直距離(μm) H_X : CCDの水平画素数(pixel) H_Y : CCDの垂直画素数(pixel)である。

ここで、 J_X は600μm、 H_X は768pixel、 J_Y は450μm、 H_Y は494pixelなので、CCDの画素あたりの水平分解能 F_X は0.78μm、垂直分解能 F_Y は0.91μmと計算される。

画像入力ボードの画素あたりの水平分解能 B_X (μm)および垂直分解能 B_Y (μm)は、CCDの場合と同様に、

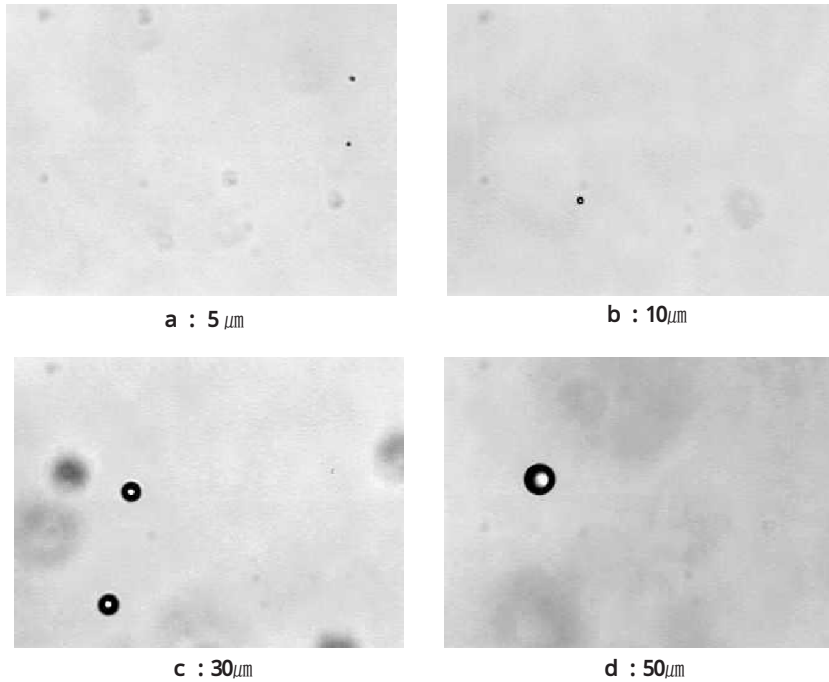


Figure 6. Picture of standard corpuscles
a : 5 μm. b : 10 μm. c : 30 μm. d : 50 μm.

次式 (3) で示される。

$$B_x = J_x / I_x, B_y = J_y / I_y \quad (3)$$

ただし J_x : 撮像管の内蔵画面の水平距離 (μm), J_y : 撮像管の内蔵画面の垂直距離 (μm), I_x : 画像入力ボードの水平画素数 (pixel), I_y : 画像入力ボードの垂直画素数 (pixel) である。

ここで, J_x は $600\mu\text{m}$, I_x は 640pixel , J_y は $450\mu\text{m}$, I_y は 480pixel なので, 画像入力ボードの画素あたりの水平分解能 B_x および垂直分解能 B_y は, それぞれ $0.94\mu\text{m}$ と計算される。

撮影画像は, より低い分解能 (水平 $0.94\mu\text{m} > 0.78\mu\text{m}$, 垂直 $0.94\mu\text{m} > 0.91\mu\text{m}$) により表示される。すなわち, 水浸対物レンズにより結像した $1.83\mu\text{m}$ 以上の画像は, 画像入力ボードの分解能 (水平・垂直 $0.94\mu\text{m}$) \times 画素数により構成される。

ゆえに, 本システムにおける画素あたりの分解能は $0.94\mu\text{m}$, 識別可能な最小径は分解能 0.94×2 画素分の $1.88\mu\text{m}$ ($> 1.83\mu\text{m}$: レンズの解像限界) である。一方, 本システムにより計測可能な最大気泡径は, 水浸対物レンズの実視野 (水平 $600\mu\text{m} \times$ 垂直 $450\mu\text{m}$) に相当する。したがって, 理論上, 本システムにより計測可能な微気泡径の大きさは $1.88 \sim 450\mu\text{m}$ で, 画素あたりの分解能

は $0.94\mu\text{m}$ である。

3. 結果および考察

3.1 本システムによる基準微粒子の計測結果

Table 2に本システムによる基準微粒子の計測結果を, Fig.6に基準微粒子の撮影画像をそれぞれ示す。粒径が $10\mu\text{m}$ より小さくなると, 同微粒子および懸濁物の識別は困難となった。本システムによる $5, 10, 30$ および $50\mu\text{m}$ 径の基準微粒子の計測平均径は, それぞれ $6.5, 10.9, 31.7$ および $51.1\mu\text{m}$ であり, 既知粒径の基準値の, それぞれ約 $30\%, 9\%, 5.7\%$ および 2.2% 大きく計測された。

また, 基準微粒子の変動係数は, 粒径 $30, 50\mu\text{m}$ ではそれぞれ $4.4, 1.8\%$ と高精度に計測できたが, 粒径 $5, 10\mu\text{m}$ ではそれぞれ $13.6, 7.9\%$ となり, 粒径が小さいほど計測値のばらつきは増大した。

3.2 微気泡径の計測結果

Fig.7に微気泡径の計測結果を示す。本来は, 従来の画像解析法^{[1], [2])}との精度の比較をするべきであるが, 従来法には $200\mu\text{m}$ 以下の微気泡径の計測データがないので, 本システムとのデータの比較ができない。そこで, 本システムの特性を明らかにするための指標の一つとして, 微気泡径の分布形状について, 本システム

Standard corpuscles (μm)	Measured value (μm)		Coefficient of variation (%)
	Mean	S.E.	
5	6.49 \pm 0.06		13.6
10	10.92 \pm 0.06		7.9
30	31.67 \pm 0.10		4.4
50	51.13 \pm 0.07		1.8

n = 200

Table 2. Measurement accuracy of standard corpuscles by image analysis

とレーザ遮断式とを比較した。微気泡の最小径は、本システムにより計測すると1.88 μm 、レーザ遮断式では2 μm であった。また、微気泡の平均径は、本システムでは23.3 μm 、レーザ遮断式では21.3 μm であった。本システムによる基準微粒子の変動係数は、粒径10、30 μm ではそれぞれ7.9、4.4%なので、平均径周辺の気泡についての精度は、変動係数4.4~7.9%程度と推定される。

30 μm 以下の微気泡径において、両方式による計測値の差は大きくなり、計測データは、本システムでは二項分布を示すが、レーザ遮断式では認められない。これは、本システムでは10~20 μm の懸濁物を手動操作により計測対象から除外したが、レーザ遮断式では自動計測なので除去が不可能な微粒子や塵芥などの懸濁粒子と微気泡とを識別できないため、これら全てを微気泡とみなして計測したものと推定される。また、微気泡は、周囲溶液の溶存酸素量、流速および圧力、なら

びに気液二相間の酸素移動などの影響により絶えず径の変動、分裂および合一を繰り返しているため¹⁴⁾、本システムでは発生もしくは消滅しかけている微気泡を計測対象として認識することは不可能であったが、レーザ遮断式では無差別で、かつ瞬時的計測のため可能であったことなども原因として考えられる。本システムでは、理論上、画素あたりの分解能は0.94 μm で、計測可能な微気泡径の大きさは1.88~450 μm である。しかし、本システムで基準微粒子を計測すると、粒径が小さいと精度が低下した。本システムの画素あたりの分解能は0.94 μm なので、5、10、30および50 μm 径の基準微粒子の計測所要画素数は、それぞれ約5、11、32および53である。本システムでは30 μm の基準微粒子を変動係数4.62%で計測できた。ゆえに、30 μm の円形気泡の画像を正方形の画素を利用して変動係数5%以内で計測するには、約32画素以上を必要とするものと考えられる。なお、基準微粒子および微気泡径の計測結果には、人為的な誤差などを考慮すると、本システムにおける画素あたりの分解能0.94 μm の誤差を含むと考えられる。

したがって、本システムにより、誤差1%程度で計測するには94 μm 以上の微気泡径、誤差5%程度で計測するには18.8 μm 以上の微気泡径が計測対象となる。

また、画像解析法では、構成画素数が多いほど、すなわち粒径が大きいほど計測精度は向上する。本システムでは50 μm の基準微粒子を変動係数1.8%で計測できたので、50~200 μm の基準微粒子および微気泡では、より高精度に計測できるものと推定される。

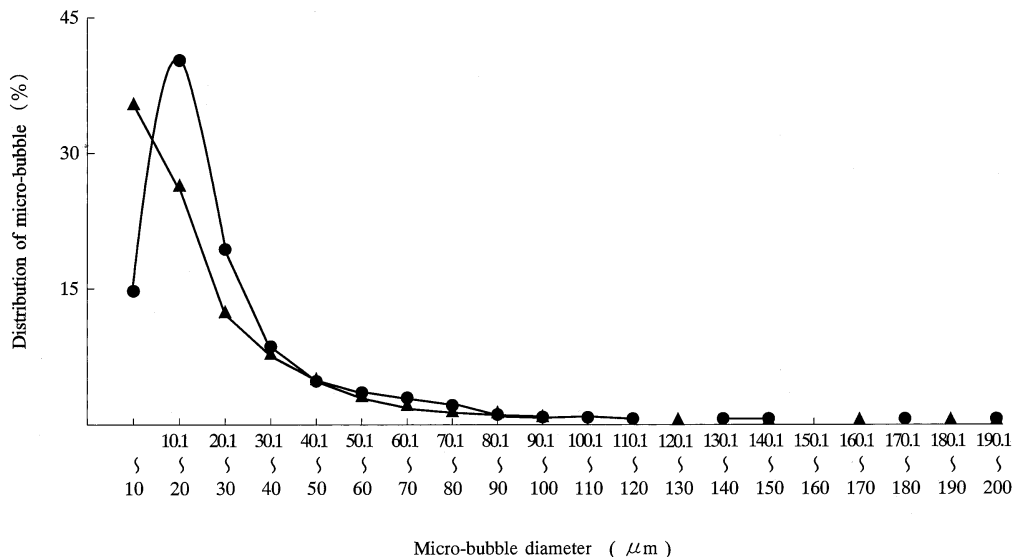


Figure 7. Distribution of micro-bubble measured by image analysis and laser barrier type

静止流体中における径1.5mm以下の微気泡の形状は、界面張力および微気泡内部の圧力バランスにより、球形とみなすことができる^{2,3,14)}。また、同流体中における微気泡の上昇速度は、径の大きさの2乗に比例して増加し¹⁹⁾、微気泡径が100 μm では5.4mm/s、微気泡径が10 μm では約54 $\mu\text{m}/\text{s}$ 程度と推定される。本システムでは、微気泡が球形であることを前提として、水中における緩やかな上昇速度を利用し、3次元の微気泡を2次元の撮影画像の解析により微気泡径を計測している。

3.3 総合考察

本システムの計測精度の向上を目的として、水浸対物レンズの市販品最大の倍率60（開口数：1.0）、192万（水平1,600×垂直1,200）画素数以上の画像入力ボードおよびCCDを組合わせた場合（以降、改良システムと称する）の画像解析範囲について検討する。

式(1)、(2)および(3)より、水浸対物レンズの倍率、CCDおよび画像入力ボードの画素数をそれぞれ増大すると、理論上の画素あたりの分解能は0.38 μm で、識別可能な最小径は分解能2画素分の0.76 μm （ $>0.55\mu\text{m}$ ：レンズの解像限界）となり、本システムより3倍程度の精度の向上が可能になるものと考えられる。

本システムでは30 μm の基準微粒子の計測値は、変動係数4.62%であったが、改良システムでは10 μm まで高精度に計測できるものと推定される。ただし、水浸対物レンズの倍率を増大すると、実視野が縮小する（水平100 μm ×垂直75 μm ）ため、理論上の画像解析可能な微気泡の大きさは0.55～75 μm になる。したがって、計測対象となる微気泡径の大小に応じた計測精度の向上対策が必要である。また、より大きい開口数の水浸対物レンズが開発されると、更なる精度向上が期待できる。水浸対物レンズは、理論上、最大1.26の開口数まで作成可能である¹⁷⁾。そこで、同開口数の値および(1)式より試算すると、同レンズの解像限界は0.44 μm と計算され、より小さな気泡径の計測が可能になるものと推定される。

次に、レーザ散乱式およびレーザ遮断式微粒子計測装置ならびに本システムの価格について、平成14年8月時点の市販価格に基づき試算検討する。装置の価格は、レーザ散乱式では2,700～4,200万円、レーザ遮断式では約500万円、これに対して本システムでは約100万円であり、従来のレーザ方式に比べ1/5～1/40の価格で装備できる。

本論文の独創性は、1)画像解析法による200 μm 以下の微気泡径の計測システムを開発したこと、2)水浸対物レンズおよび同レンズケースを水槽内の任意の位置に配置して、微気泡を計測することができ、しかも本システムが低廉なことである。低廉なシステムで微気泡径を計測することが可能になると、水産、食品加工

および化学工業などの曝気装置の性能向上に寄与できる。

本システムに関する残された研究上の問題は、撮影媒体の解像限界ならびに画素あたりの分解能を向上させ、レーザ法による正確な計測が困難な10 μm 以下の微気泡径の高精度なシステムを開発することである。また、気液攪拌式の曝気装置による300個の微気泡の計測には、本システムでは約20分間、レーザ遮断式では約1分間必要であったので、計測時間を更に短縮するためのソフトの開発などである。

謝 辞

本研究を行うにあたり、基準微粒子「マイクロパール」の御提供を頂いた積水ファインケミカル株式会社の関係各位に御礼を申し上げます。

文 献

- 1) 山本格：水質汚濁防止技術概論，培風館，東京，1991，pp. 82-84．
- 2) 佐野和生：養殖工学概論，緑書房，東京，1988，pp. 112-139．
- 3) 植松秀人：液体における気泡微細粒子化装置，特開平9-150044，1997．
- 4) 植松秀人：連続通水式ガス溶解装置の溶解度調節方法及びこの方法を実施する連続通水式ガス溶解装置，特開平10-66850，1998．
- 5) 山本格：生物学的水処理技術と装置，培風館，東京，1991，pp. 86-99．
- 6) Van Kreveren D W and Hofitjzer P J：Studies of gas-bubble formation, Calculation of interfacial area in bubble contactors, Chem. Eng. Progress., 46-1, 29-35 (1950)．
- 7) 藤田末治：水力機械工学便覧，コロナ社，東京，1968，pp. 167-168．
- 8) 井出哲夫：水処理工学，技報堂出版株式会社，東京，1990，pp. 243-248．
- 9) Bachalo W D and Houser P O：Phase/Doppler spray analyzer for simultaneous measurements of drop size and velocity distributions, Optical Eng., 23-5, 583-590 (1984)．
- 10) Brena A de la Rosa, Sankar S V, Weber B J, Wang G and Bachalo W D：A theoretical and experimental study of the characterization of bubbles using light scattering interferometry. The American Society of Mechanical Engineers, 89-H00558, 63-72 (1989)．
- 11) 石田宏司，上坂太一，岩部秀樹，北尾高嶺：Uチューブ型深層曝気槽の水理と酸素吸収特性に関する研究

- 水環境学会誌, 20-3, 155-165 (1997).
- 12) 竹村文男, 矢部彰: 低レイノルズ数領域における球形気泡の上昇速度. 機論B, 63-613, 2909-2914 (1997).
- 13) (株)リオン技術資料.
- 14) 海野肇, 白神直弘: 補訂「化学の原理を応用するための工学的アプローチ」入門, 信山社サイテック, 東京, 1999, pp.47-51.
- 15) 宝沢光紀, 都田昌之, 菊池賢一, 米本年邦, 塚田隆夫: 拡散と移動現象, 培風館, 東京, 1997, pp. 114-115.
- 16) 鈴木雅臣: 新低周波/高周波回路設計マニュアル, CQ出版社, 東京, 1989, pp.207-212.
- 17) 井上勤: 顕微鏡観察の基本, 地人書館, 東京, 1990, pp. 24-26 .
- 18) 安居院猛, 中嶋正之: コンピュータ画像処理, エレクトロニクス選書, 東京, 1989, pp. 11-14 .
- 19) 牛来辰巳: 気液二層流技術ハンドブック, コロナ社, 東京, 1995, pp.206-209.

画像解析による微気泡径の計測システム

廣田 裕・矢田貞美・戸田勝善

(東京水産大学海洋システム工学講座)

本研究の目的は、従来の画像解析法では計測できなかった $200 \mu\text{m}$ 以下の微気泡径の計測技術を開発することである。本開発システムにより、まず $50 \mu\text{m}$ 径以下の基準微粒子で計測精度を検証し、次に、曝気装置で発生させた微気泡径を計測した。

本システムでは、理論上の計測可能な微気泡径は、 $1.88 \sim 450 \mu\text{m}$ であり、画素あたりの分解能は $0.94 \mu\text{m}$ である。本開発システムによる微気泡の平均径は $23.3 \mu\text{m}$ であり、 $10 \sim 30 \mu\text{m}$ 径では変動係数 $4.4 \sim 7.9\%$ で計測可能である。

本システムでは、対物レンズおよび同レンズケースを水槽内の任意の位置に配置することにより、 $200 \mu\text{m}$ 以下の微気泡径を計測可能になった。

なお、本システムは、レーザ光散乱式の約 $2 \sim 4\%$ 、レーザ遮断式の約 20% の市販価格で購入できる。

キーワード：気泡，微気泡，気泡径，画像処理，曝気