微細気泡生成装置の気泡計測に関する研究^{*}

A Study of the Measurement of Bubbles in Microbubble Generation Device

張 蓉 生^{**}
ZHANG Rongsheng

葉 山 眞 治[†]
HAYAMA Shinji

藤 川 重 雄^{††}
FUJIKAWA Shigeo

高 杉 信 秀[†]
TAKASUGI Nobuhide

Abstract This paper deals with a method of discriminating microbubbles from images of bubbly water taken by one CCD camera and of determining their diameter and number density. The diameters of nearly spherical microbubbles and the ratio of the shortest semi-axis to the longest one are determined from bubble images, and the ratio is used to separate the defocused bubbles far from the measuring domain. The ratio of the minimum and the maximum gray level of microbubble in the focal field of the CCD camera is used to discriminate bubbles inside an observation field. It is shown that the effective depth of the observation field is 200 μm in the present experimental set-up. It is concluded that the method can be applied to determine diameter and number density of microbubbles.

Keywords : Microbubble, Image Processing, Discrimination, Measurement, Diameter and Number Density

1. 緒 言

気泡水は直径数十 μm の微細気泡を数多く含んだ水を言い、例えば、水中のアオコを浮上分離したり、オゾンを含ませて水の殺菌、脱色、脱臭をするなど、様々な産業分野で広く利用されている[1-3]。近年、気泡水の用途はさらに多様化しており、気泡の直径や数密度を用途に応じて変化させることのできる新しい装置の開発等、更なる性能の向上が求められている。気泡水生成装置の性能を評価するには、生成される微細気泡の直径や数密度等の定量的な計測を行わねばならない。このような要求に従って最近、精度の良い、かつ低

コストの気泡などの画像計測法と画像処理法が開発されている[4-11]。

本研究で対象としている気泡水生成装置では、気泡の移動速度が速いため(0.4~1.5m/s)、撮影にCCDカメラを用いる場合、シャッターの露出時間を1/10,000秒程度に設定しなければならず、極端な光量不足の問題が生ずる。また、気泡の数密度が非常に高いため撮影光の透過率が低くなり、撮影が困難となる。著者らの知る限り、このような状況にある微細気泡の大きさと数密度を比較的容易に同時計測できる既存の方法はないように思われる。

* 1999.10.22 受付

** 富山県立大学大学院流体力学研究室 〒939-0389 富山県小杉町黒河
TEL(0776)56-7500(内389) FAX(0766)56-6131 E-mail: rongsz@st.pu-toyama.ac.jp

† 富山県立大学工学部 †† 北海道大学工学部

本論文では、著者らが開発した気泡水生成装置による微細気泡の直径と数密度を、1台のCCDカメラで撮影された気泡画像の濃度情報から計測する手法を扱う。

2. 実験装置および計測方法

Fig. 1 は本研究で使用した気泡水生成装置で、従来の溶解析出連続加圧管路方式[3]による気泡水生成装置を、生成される微細気泡の直径および数密度が制御可能なように改良したものである。本装置は大別して、空気取入部(①-④)、空気溶解部(⑤-⑨)および微細気泡析出部⑩から成っている。空気取入部は直径70mmの多孔板であり、孔径0.14mm、孔数126の多孔板が使用されている。空気は内径10mmの多孔板の中空回転軸を通して多孔板裏側の貯気室に供給される。また、多孔板は可変速モータによって最高回転数500rpmまで回転できるようになっている。空気溶解部は高さ20mm、幅25mmの5段の流路から成っており、その全長は1mである。気泡析出部の減圧弁⑩は流量の制御が容易なコントローラ弁が使用されている。

空気取入部では、数多くの微小な孔を有する多孔板から高圧空気を水中に噴出させる。これらの孔から発生する気泡を小さくするため、多孔板を回転させて適当なサイズになった時に気泡がせん

断力によって切断されて水中に流れていくようにした。このような多数の微小気泡を含む水は空気溶解部に流れていき、ここで気泡内の空気が水中に溶解していく。水中に溶解した空気は減圧弁⑩で減圧されて、水中で微細な気泡として析出する。また、空気溶解部で水に溶解しきれなかった空気泡は弁⑪から排出される。なお、本気泡水生成装置の詳細および性能については別報で述べる。

Fig. 2 は微細気泡析出部⑩で析出した微細気泡の計測装置の概略を示したものである。微細気泡を含んだ気泡水は計測部②に導びかれ、CCDカメラ③で撮影される。CCDカメラは有効画素数768(水平)×493(垂直)個、走査線数525本、470TV本の水平解像度を有し、シャッタの露出時間を1/250～1/10,000秒に設定することができる。カメラには倍率0.75～4.5のズームレンズと倍率3の補助レンズが取り付けられており、本研究で対象とする気泡は極めて小さいため、ズームレンズの倍率を4.5、補助レンズの倍率を3とした。照明用の光源には二つのハロゲンランプの光を光ファイバー束により集めて直径7mm程度にしたものを用いた。焦点面における気泡を撮影するために、CCDカメラは三次元移動台④上に取付けられている。

微細気泡の主要なパラメーターである気泡の平均直径と数密度を以下のように定義する。奥行き方向の被写界深度と撮影された気泡の平面画像から構成される計測領域(本研究では、縦 $258\mu\text{m}$ ×横 $344\mu\text{m}$ ×奥行き $200\mu\text{m}$)で計測された個々の気泡の直径を d_i 、この領域内の気泡の総数を n とすると、全気泡の平均直径(数平均直径) d_n と体積の平均値から求めた平均直径(体積平均直径)

① Compressor	⑦ Pressure sensor
② Motor	⑧ Pressure gauge
③ Bubble	⑨ Mixing box
④ Rotating porous plate	⑩ Reduction valve
⑤ Pressure adjuster	⑪ Insoluble air exit
⑥ Pressure switch	⑫ Water pump

Fig. 1 Schematic diagram of microbubble generation device

Fig. 2 Measuring system of microbubbles

d_v は次のように表される。

$$d_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i \quad (1)$$

$$d_v = \sqrt[3]{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i^3} \quad (2)$$

また、計測領域の体積を V_c とすると気泡の数密度 B_p は次のように表される。

$$B_p = \frac{n}{V_c} \quad (3)$$

気泡直径と数密度の計測は以下のように行う。まず、微細気泡析出部の出口でCCDカメラにより気泡水流を連続的に撮影して、動画ファイルとして保存する。次に、動画ファイルから同じ気泡を含まない数多くの静止画像をランダムにビットマップファイルで抜き取り、次章で詳しく述べる処理を施すことによって気泡直径と数密度を求める。静止画像数が多いほど気泡直径と数密度の計測精度は高くなるが、本装置で生成される気泡水内の気泡の分布はかなり均一であり、60枚の静止画像からこれらの量の平均を求めることで十分な精度が得られることを確かめた。なお、

気泡水の撮影、画像処理および気泡計測はすべて同一条件下で行った。

3. 画像処理法と気泡計測

3. 1 背景濃度およびノイズの除去

静止画像はTV式ラスタ走査により640(水平)×480(垂直)個の画素点に分割され、各画素点の濃度が0～255の間で8 bitの階調で記録される。Fig. 3 (a)およびFig. 3 (b)は、それぞれ、任意に取得した1枚の静止画像とこの静止画像上の $y=178$ pixelsの走査線上の濃度分布を示したものである。原静止画像の背景濃度は均一でなく、背景濃度を取り除く必要があることがわかる[10]。Fig. 3 (c)はScion社のソフトウェア[12]を用いてFig. 3 (a)の背景濃度を除いた気泡画像であり、Fig. 3 (d)はこの画像の $y=178$ pixelsの走査線上の濃度分布である。背景濃度の除去により気泡の存在による濃度変化がより明確になっている。

さらに、静止画像には多くの種類のノイズが含まれており、画像から必要な情報を抽出する前にこれらのノイズを除去する必要がある。本実験におけるようにノイズ発生のメカニズムが未知の場合には、ノイズの持つ一般的な性質に基づいてノイズを除去する局所平滑化の手法が用いられてお

Fig. 3 Bubble images and distributions of gray level before and after processing

り、本論文では、それぞれの画素の濃度値をその周囲(3×3近隣)の画素の重みつき平均値に置きかえる手法を採用した[13-16]。すなわち、背景濃度を除去した画像配列の(i,j)要素の画素濃度を $f_{i,j}$ とすると、ノイズ除去の処理を行った後の画素濃度 $g_{i,j}$ は次式で与えられる[14]。

$$g_{i,j} = \sum_{k=1}^3 \sum_{l=1}^3 w_{k,l} f_{i-2+k, j-2+l} \quad (4)$$

ここでは $W_{k,l}$ は重み係数で、次の行列 W の(k,l)要素で与えられる。

$$W = \frac{1}{12} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 4 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

3. 2 微細気泡の検出

本研究で対象としている微細気泡の直径は、10～60 μmであり、大部分は10～40 μmの範囲にある。これらの気泡は球形に近い形状をしている。したがって、撮影された気泡の平面画像により気泡直径を確定可能と判断した。静止画像における気泡の面積を A とすると、これに対応する気泡の等価直径 $d_{b,jm}$ は次式で与えられる。

$$d_{b,jm} = \sqrt{4A/\pi} \quad (6)$$

静止画像には計測領域外の気泡像が含まれており、この場合、計測領域から遠く離れた気泡は気泡像がぼけて球形から著しくずれており、中心部が明るくならない。また、気泡像の平均濃度は計測領域内の気泡の平均濃度と比べてかなり低い。そこで、以下のようにして静止画像からこれらの気泡を除去する。

静止画像上の個々の気泡像の重心を次式で求める。

$$\begin{aligned} x_c &= \frac{1}{A} \sum_{i=1}^m A_i x_i \\ y_c &= \frac{1}{A} \sum_{i=1}^m A_i y_i \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、 A_i は気泡像の各微小面積、 A は気泡像の全面積、 x_i および y_i はそれぞれ各微小面積の重心の x および y 座標、 m は気泡像の各微小面積の総数である。次に、気泡像の重心(x_c, y_c)からそのエッジまでの距離の最小値と最大値(それぞれ気泡像の最短径と最長径という)の比 r を求める。

気泡像が真円からずれるほど r は1よりも小さくなるので、 r を用いて計測領域から遠く離れた気泡を除去することができる。

本研究で計測される微細気泡の直径は10～60 μmの範囲にあり、この範囲では個々の気泡の形状は球形である。しかし、気泡像のデジタル化に際してカメラの解像度の影響があらわれる。同一解像度のもとでは、小さい気泡ほど画素で表わしたとき像のエッジのぎざぎざが大きくなり、気泡像の最短径と最長径の比 r は小さくなる。Fig. 4は、 $r=0.87$ の場合、同一解像度のもとでカメラの倍率を1/4.5に縮小して撮影したときの画像である。同一被写体でも小さい被写体像では画素数が少なくなるので、 $r=0.61$ となり、この値が小さくなる。

そこで、解像度の影響を補正して計測領域から遠く離れた気泡を除去するために、輪郭が明確に見える数多くの気泡像から r の値を求めた。その結果をFig. 5に示す。横軸は微細気泡の等価直径 d_b であり、縦軸は r である。等価直径が小さいほど r が小さく、40～60 μm内の気泡の直径に対しては解像度の r に及ぼす影響は小さい。

Fig. 5における下限のデータに対して近似曲線を求めると次のようになる。

$$r = 4 \times 10^{-6} d_b^3 - 5 \times 10^{-4} d_b^2 + 0.023 d_b + 0.409,$$

$$10 \mu\text{m} \leq d_b \leq 60 \mu\text{m} \quad (8)$$

Fig. 4 Effect of camera resolution on ration r of the shorter semi-axis to the longest one

Fig. 5 Effect of equivalent bubble diameter d_b on ratio r

ここで d_b の単位は μm である。この曲線は球形気泡の平面画像から最短径と最長径の比を求めるとき、本計測法における解像度の影響を補正する校正曲線と見なすことができる。そこで、式(8)を基準として、気泡像の最短径と最長径の比が式(8)の r より小さいとき計測領域から遠く離れた気泡と判定して除去することとした。

3. 3 気泡直径の確定および誤差の考察

微細気泡の直径は直径 $66.7\mu\text{m}$ の銅線を基準にして決定した。微細気泡を撮影するときと同一の倍率に設定したカメラでこの銅線を撮影して、画像における銅線の直径 $d_{c,jm}$ を計測する。銅線の実際の直径 d_c と画像における銅線の直径 $d_{c,jm}$ との対応関係によって、画像における等価直径 $d_{b,jm}$ の気泡の等価直径 d_b は次式で求められる。

$$d_b = \frac{d_c}{d_{c,jm}} \cdot d_{b,jm} \quad (9)$$

カメラの焦点面上での銅線画像は銅線の直径を正確に表すが、カメラの焦点面に正確に合せて銅線画像を撮影することは実際には困難である。したがって、気泡の等価直径を換算するとき誤差が生じるので、その誤差について検討しておく必要がある。Fig. 6 は、この銅線を標識を有するガラスに固定し、CCDカメラで異なる距離から撮影したときの銅線像の直径を示したものである。画像が最もはっきりしている銅線的位置を見かけの焦点面位置 $z = 0$ として、銅線がカメラに近づく場合を正の向きとしている。銅線像の直径は焦点領域内における z の一次関数で、次のように表わされる。

$$d_{c,im} = az + b \quad (10)$$

ここで、 a, b は定数で、図から $a = 0.047\text{pixels}/\mu\text{m}$ 、

$b = 124\text{pixels}$ と決定される。また、 $d_{c,jm}$ と z はそれぞれ pixels 、 μm の単位で表されている。この分布は Bongiovanni[17]らの結果とはほぼ一致している。

実際の焦点面位置が見かけの焦点面 $z = 0$ より最大位置誤差 $\Delta(z)$ だけずれているとすると、実際の焦点面の銅線像の直径 $d_{c,0}$ は

$$b - a\Delta(z) \leq d_{c,0} \leq b + a\Delta(z) \quad (11)$$

の範囲にある。見かけの焦点面で計測された銅線直径の絶対誤差は $\Delta(d_{c,jm}) = |b - d_{c,0}| = a\Delta(z)$ となり、最大相対誤差 $\overline{\Delta}d_{c,jm}$ は次式で表される。

$$\overline{\Delta}d_{c,jm} = \left[\frac{\Delta(d_{c,jm})}{d_{c,0}} \right]_{\max} = \frac{a\Delta(z)}{b - a\Delta(z)} \quad (12)$$

計測された気泡の等価直径 d_b は

$$\frac{d_c d_{b,jm}}{d_{c,0} + \Delta(d_{c,im})} \leq d_b \leq \frac{d_c d_{b,jm}}{d_{c,0} - \Delta(d_{c,im})} \quad (13)$$

の範囲にある。実際の焦点面の気泡の等価直径を $d_{b,0} = d_c d_{b,jm} / d_{c,0}$ とおくと、気泡の等価直径の最大誤差 $\Delta(d_b)$ は次式で表される。

$$\Delta(d_b) = \frac{d_c d_{b,jm}}{d_{c,0} - \Delta(d_{c,im})} - d_{b,0} = \frac{d_{b,0} \Delta(d_{c,im})}{d_{c,0} - \Delta(d_{c,im})} \quad (14)$$

よって、その相対誤差 $\overline{\Delta}d_b$ は、 $d_{c,0}$ に対応する気泡の等価直径 $d_{b,0}$ との比より、

$$\overline{\Delta}d_b = \frac{\Delta(d_b)}{d_{b,0}} = \frac{\overline{\Delta}d_{c,im}}{1 - \overline{\Delta}d_{c,im}} = \frac{\Delta a(z)}{b - 2a\Delta(z)} \quad (15)$$

となる。Fig. 6 から、目視で最もはっきり見える銅線像の位置を焦点面とみなすとき実際の焦点面

Fig. 6 Image diameter of copper wire

との誤差 $\Delta(z)$ は銅線の撮影間隔の $50\ \mu\text{m}$ 以内と推定される。したがって、Fig. 6 の銅線を用いて気泡の直径を換算すると、気泡の直径の最大相対換算誤差は 2% と評価される。

次に、カメラの焦点面上での気泡像は気泡の大きさを正確に表すが、本研究では、奥行き方向 $200\ \mu\text{m}$ の計測領域内の気泡の平面画像から気泡の直径を決定するので、焦点面からずれた気泡の直径には誤差が含まれる。この誤差は銅線画像の奥行き方向誤差と同じである。すなわち、Fig. 6 および式(10)から、焦点面上での銅線画像は銅線直径を正確に表わすが、奥行き $200\ \mu\text{m}$ の領域にある銅線直径に対する最大相対誤差は $0.047 \times 100/124 = 4\%$ である。本研究で扱う微細気泡の直径は $10 \sim 60\ \mu\text{m}$ で、銅線直径と比べて大きくない。また、カメラの焦点深度に比べて十分に小さいため、焦点面からずれた気泡における最大相対誤差は銅線の最大相対誤差と同様に 4% と考えられる。したがって、気泡の直径を決定するときの全誤差は両者の合計より 6% 以内と推定され、小さいことがわかる[4,13,14]。

3. 4 奥行き方向の気泡検出

気泡の数密度を計測するには前述の計測領域内にある気泡を検出する必要がある。背景濃度より大きい濃度を持つ 1 個の気泡の平均濃度 G (以下、気泡濃度と略記する) は次式で与えられる。

$$G = \frac{1}{n_0} \sum_i^n g_i \quad (16)$$

ここで、 g_i は気泡像の画素の濃度、 n_0 は画素数である。気泡濃度は気泡がカメラの焦点面から奥行き方向に離れるほど低くなるので、逆に気泡濃度から気泡の奥行き方向の情報を得ることができる。

3. 4. 1 奥行き方向における最小濃度と最大濃度の比

画像における気泡の濃度は撮影装置と入力処理ソフトウェアなどによって変化するので、画像それぞれの画素点の濃度は外界要素の影響を受ければ増加または減少する。しかし、焦点面における気泡の濃度は必ず最大であり、これから離れるほど減少する。

Fig. 7 は奥行き方向の移動距離に対する気泡濃度の変化を示したものである。横座標の $z = 0$ は最もはっきり見えるカメラの位置で、近似の焦点面に対応している。通常、焦点面から奥行き方向に

Fig. 7 Gray level of bubble image in measuring domain

ずれるとき、気泡の平均濃度の分布は光源方向とカメラ方向とで対称にならず、図のように、焦点面から同じ距離にある気泡では光源に近い方の平均濃度が遠い方の平均濃度より高くなる。これは Schaub[18]らの実験結果とも一致している。そこで、焦点面を挟んで奥行き方向に $200\ \mu\text{m}$ の間隔 AB をとり、その両端の気泡の平均濃度が等しくなるようにして、その両端の濃度を求めた。この濃度を奥行き方向 $200\ \mu\text{m}$ 範囲内における気泡の最小濃度と呼ぶことにする。 AB 間の中心位置を求めると、焦点面から光源方向に向かって $17\ \mu\text{m}$ 離れた位置となっている。同様に他の多数の気泡像について求めると、 AB 間の中心位置は焦点面から光源方向に向かって $17 \sim 23\ \mu\text{m}$ 離れた位置であった。 Fig. 7 より奥行き方向 $200\ \mu\text{m}$ の範囲で気泡の最小濃度と最大濃度の比 r_g を求めると、 $r_g = 106/155 = 0.68$ を得る。同様に、他の 18 個の静止気泡に対して濃度比 r_g を求めて、それを番号順に図示すると Fig. 8 を得る。この場合、標本の平

Fig. 8 Ratio of minimum gray level to maximum one in measuring domain for bubble image

Fig. 9 Dependency of gray level ratio on bubble diameter

均値 r_{gm} は0.68、母集団全体の標準偏差 σ は0.053である。また、母集団の平均値に対する信頼区間(信頼度95%)は0.025である。

Fig. 9は、Fig. 8中の19個の静止気泡の濃度比 r_g と対応する等価直径を示す。気泡の最小濃度と最大濃度の比は気泡の等価直径とは関係がないことがわかる。したがって、奥行き範囲における気泡の最小濃度と最大濃度の比は気泡を検出するための基準として用いることができる。本研究では、 $r_g \geq 0.68$ の気泡は奥行き方向200 μm の範囲内にある微細気泡と判定することとした。

3. 4. 2 気泡濃度と直径の関係

撮影された数多くの気泡画像を解析することにより、気泡の濃度と大きさ(pixels)の間に特定の関係があることが推察された。これを明確にするために気泡水を透明な容器に入れ、できるだけ短時間に密封する。密封した容器内の同一撮影画面にある大きさの異なる三つの気泡を選び、奥行き方向に50 μm 間隔でCCDカメラを移動して撮影を行った。各奥行き方向の画像より気泡濃度を求め、その濃度と奥行き方向距離との関係を図示するとFig. 10に示すようになった。横座標の $z = 0$ は最もはっきりしている画像位置で、近似の焦点面画像位置である。これより、奥行き方向の各位置において、気泡の直径が大きくなると濃度も高くなっていることがわかる。同様な結果は微細液滴の計測においても得られている[7]。

Fig. 11は、実験によって求めた焦点面($z = 0$)画像における気泡濃度 G_0 と気泡の等価直径 $d_{b,im}$ (pixels)の関係を示したものである。これらの関係は次式で近似できる。

Fig. 10 Dependency of gray level on out-of-focus distance for different image diameter

Fig. 11 Gray level to image diameter on focal plane($z = 0$)

$$G_0 = -0.004d_{b,im}^2 + 1.24d_{b,im} + 50.1 \quad (17)$$

なお、ここに示した気泡濃度はFig. 10に示した結果と比べて焦点面における同じ直径の気泡に対して異なった値となっているが、これは撮影条件が異なっているためである。気泡の等価直径の範囲は10~112pixelsであり、式(17)の適用範囲は28~172pixels($\approx 16 \sim 96 \mu\text{m}$)であるが、10pixelsあたりまでの気泡に対しても近似的に適用できると考えられる。

3. 4. 3 奥行き方向の気泡検出

実際の気泡水の場合には、気泡の数密度が高く、また、流動しているためにカメラのシャッター速度を速くしているので、気泡像の濃度が式(17)と比べて低くなる。Fig. 12は気泡水の画像から求めた微細気泡の濃度(○印)と式(17)を比較したものである。破線は気泡水中の気泡像で焦点面にあると考えられる気泡濃度を結んだ線である。気泡水の画像では、全体の濃度が低くなっているが、焦点

Fig.12 Gray level to image diameter in bubbly water and static bubbles

面にある気泡濃度が最大となることに変わりはない。したがって、気泡濃度を補正して静止気泡の濃度と同じ基準にすると、式(17)がこの場合にも成り立つと考えられる。そこで、一連の気泡像より個々の気泡濃度 G_i とその気泡の等価直径を用いて式(17)より静止気泡に対する気泡濃度 $G_{i,0}$ を求め、その比 $G_i/G_{i,0}$ を計算する。この比が最大となる気泡を焦点面にある気泡とみなして、各気泡の濃度を補正することにして、気泡濃度の補正係数 r_d を次のように求める。

$$r_d = \left(\frac{G_i}{G_{i,0}} \right)_{\max} \quad (18)$$

これによって個々の気泡濃度を静止気泡と同じ条件下の気泡濃度に変換すると、変換された気泡濃度 G'_i は次のようになる。

$$G'_i = \frac{G_i}{r_d} \quad (19)$$

式(19)より求めた気泡濃度 G'_i と静止気泡に対する気泡濃度 $G'_{i,0}$ との比

$$r_i = G'_i / G'_{i,0} = \left(\frac{G_i}{G_{i,0}} \right) / \left(\frac{G_i}{G_{i,0}} \right)_{\max} \quad (20)$$

を求めると、Fig. 8 に示した静止気泡に対する濃度比の関係と同じ結果が得られる。したがって、

Table 1 Effect of brightness on d_n , d_v and B_p

index	d_n (μm)	d_v (μm)	B_p (number/ cm^3)
1	17.6	20.0	2.50×10^5
2	16.7	19.1	2.48×10^5

Index : 1 ... higher brightness
2 ... lower brightness

r_i がFig. 8の r_g の平均値0.68に等しいか、大きいときその気泡は奥行方向200 μm の範囲内にあると判定される。

Table 1 は気泡水中の微細気泡の平均直径 d_n 、体積平均直径 d_v および数密度 B_p の測定に及ぼす画像の明るさの影響を調べたものである。平均直径の差異は5%、数密度の差異は0.8%である。両結果はほぼ同じである。したがって、上述の奥行方向範囲にある気泡の検出方法は適切であると考えられる。

本研究の気泡の計測手法は以下のようにまとめられる。

- ① ランダムに撮影された気泡動画像から数多くの静止画像を抜き取る。
- ② その静止画像における背景濃度とノイズを取り除く。
- ③ 式(8)により計測領域から遠く離れた気泡を除去する。
- ④ 式(19)により流れる気泡像の平均濃度を静止気泡の条件下での濃度へ換算する。
- ⑤ 式(20)により静止気泡との濃度比 r_i を求め、 $r_i \geq 0.68$ のとき気泡が奥行き200 μm の範囲内の気泡として検出する。
- ⑥ 式(1)～(3)により計測領域内の気泡の数平均直径、体積平均直径と数密度を求める。

4. 計測事例

Fig. 13およびFig. 14は回転多孔板の効果を検証するために行った実験計測結果の一例である。実験条件は次のとおりである。多孔板の孔数126、孔直径0.14mm、空気流量 $4.59 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{min}$ 、水流量 $4.0 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{min}$ 。多孔板の回転数の増加と共に、析出気泡の直径は小さくなり、気泡数密度は増加する。図から、回転数を変化させて析出気泡直径を制御できることがわかる。

Fig. 13 Dependency of diameter on rotational speed

Fig. 14 Dependency of number density on rotational speed

Fig. 15 Distribution of microbubble diameter for n=500rpm

Fig. 15は回転数500rpmのときの析出気泡の直径の分布であり、横軸 d_b は気泡の等価直径、縦軸 N は気泡直径の区切り間隔を $2\mu\text{m}$ としたときの気泡数分布である。以上のことから、本計測手法によって気泡水中の微細気泡の直径と数密度を効

果的に計測できることが明らかとなった。

5. 結 言

一台のCCDカメラによって撮影した画像より微細気泡を検出し、計測する手法を提示した。まず、画像処理によって背景濃度とノイズを除去した画像から、微細気泡の等価直径及び最短径と最長径の比を計測し、この比を基にして計測領域から遠く離れた気泡を除去する。さらに、CCDカメラの焦点領域内の気泡像の最小濃度と最大濃度の比より奥行き方向に存在する気泡を検出する手法を用いて、奥行き方向 $200\mu\text{m}$ の範囲内にある気泡を検出できることを示した。気泡直径の計測誤差は6%以内と推定された。

以上のことから、本計測手法によって気泡水中の微細気泡の直径と数密度を効果的に計測できることが明らかとなった。

Nomenclature

- a, b : constants, $a=0.047, b=124.3$
- A : area of bubble image [μm^2]
- A_i : infinitesimal area on one bubble image [pixels^2]
- B_p : bubble number density [numbers/ cm^3]
- $d_{b,im}$: diameter of bubble image [pixels]
- $d_{c,im}$: diameter of copper wire image [pixels]
- d_b, d_i : equivalent diameter of bubble [μm]
- d_n : numeral mean diameter of bubble [μm]
- d_v : volumetric mean diameter of bubble [μm]
- $d_{c,0}$: diameter of copper wire on focal plane [pixels]
- $d_{b,0}$: diameter of bubble on focal plane [μm]
- $f_{i,j}$: gray level of pixel at i, j coordinate before image processing
- g_{ij} : gray level of pixel at i, j coordinate after image processing
- g_i : gray level of bubble image
- G : mean gray level of one bubble image
- G_0 : static bubble gray level on focal plane
- G_i : gray level of bubble in bubbly water
- $G_{i,0}$: gray level of bubble on focal plane
- G'_i : adjusted gray level of bubble in bubbly water
- n : bubble number
- n_0 : pixel number of one bubble image
- r : ratio of the shortest semi-axis to the longest one on bubble image
- r_d : adjusting coefficient of bubble gray level

r_g : ratio of minimal gray level to maximal one
 r_{gm} : mean value of r_g
 r_i : adjusted ratio of bubble minimal gray level to maximal one in bubbly water
 x_c, y_c : gravitational center of one bubble image [pixel]
 x_i, y_i : gravitational center of infinitesimal area among one bubble image [pixel]
 z : working distance of CCD camera [μm]
 V_c : volume of measuring domain of bubbly water [cm³]
 $w_{k,j}$: normalized weight
 W : normalized weight matrix
 W : error signal
 $\Delta(z)$: error of focal plane for copper wire image [μm]
 $\bar{\Delta}$: maximal relative error signal

Subscript

i, j : ordinal

参考文献

- [1] 福士憲一・佐藤敦久・長谷川孝雄, Microcystis sp.の凝集-浮上分離特性、水道協会雑誌、Vol.64、2-12(1995).
- [2] 宗宮功編、オゾン利用水処理技術、公害対策技術同友会(1989).
- [3] 町谷勝幸ほか3名、気泡水の研究(GALF)論文集、和泉電気、1-9(1995).
- [4] 賞雅寛而・三好直巳、画像処理法による上昇気泡流の管内気泡径分布測定、機論(B)、Vol.59, No.564, 63-69(1993).
- [5] 北條勝彦・早水 慎、1台のカメラによる鏡を用いた粒子の三次元位置の計測法、可視化情報(Suppl.)、Vol.14 No.1, 27-30(1994).
- [6] 賞雅寛而ほか3名、画像処理による気泡界面挙動の測定限界、可視化情報(Suppl.)、Vol.14, No.1, 187-190(1994).
- [7] 劉 育民・石山拓二・三輪 恵、ディーゼル噴霧の液体画像解析法に関する研究、機論(B)、Vol.61, No.585, 360-366(1995).
- [8] 日引 俊・三島嘉一郎、プローブとして中性子を用いた金属内気液二相流の可視化と計測(第4報、画像定量化に及ぼす階調度および計測画素の影響)、機論(B)、Vol.62, No.597, 103-109(1996).
- [9] 加藤裕之ほか3名、ステレオ画像法による粒子径・速度の同時計測、機論(B)、Vol.62, No.602, 88-96(1996).
- [10] Bozin.Dほか3名、ディジタル画像処理の二相流への適用(第1報気泡画像の抽出)、可視化情報、Vol.17, No.64, 51-55(1997).
- [11] 中山正明・柏 雅一・町谷勝幸、画像処理による微細気泡の定量計測、日本機械学会北陸信越支部100周年記念講演会講演論文集、No.977-1, 26-27(1997).
- [12] Scion Corporation, Scion Image Bate2 for Windows95.
- [13] Rosenfeld.A et al., Digital Picture Processing(Second Edition), Harcourt Brace Jovanovich Publishers, San Diego, New York(1981).
- [14] テレビジョン学会編、テレビジョン画像情報工学ハンドブック、オーム社(1990).
- [15] 画像処理ハンドブック編集委員会、画像処理ハンドブック、昭晃堂(1987).
- [16] 画像解析ハンドブック編集委員会、画像解析ハンドブック、東京大学出版会、475-706(1991).
- [17] Bongiovanni.C et al, Sizing of Bubbles by Incoherent Imaging: Defocus Bias, Experiments in Fluids, Vol.23, 209-216(1997).
- [18] Schaub.S.A and Barton.J.P, Theoretical Model for the Image Formed by Spherical Particle in a coherent Imaging System: Comparison to Experiment, Optical Engineering, Vol.28, No.5, 565-571(1989).