

© 1991 ISIJ

//////////
論 文
 //////////

底吹き円筒容器内水-空気系気泡噴流の 浮力領域における気泡特性

井口 学*・野沢健太郎*²・富田祐志*³・森田善一郎*

Bubble Characteristics in the Buoyancy Region of Air-Water Vertical Bubbling Jet

Manabu IGUCHI, Kentarou NOZAWA, Hiroshi TOMIDA and Zen-ichiro MORITA

Synopsis :

The flow field in vertical bubbling jet in a cylindrical vessel with bottom blowing can be divided into four regions. They are named the momentum, transition, buoyancy and surface region from the nozzle exit. In a previous paper, bubble behavior characterized by gas holdup, bubble frequency, bubble rise velocity and so on was clarified for the momentum region in which inertia force of injected gas played an important role. In the present study, bubble behavior in the buoyancy region in which buoyancy force of bubbles governed the flow was investigated by means of two kinds of electro-resistivity probes, a high speed video camera, and a laser Doppler velocimeter. The bubble behavior was not affected by nozzle diameter and bath diameter. Therefore, correlations for gas holdup, bubble frequency and bubble rise velocity were proposed as functions of gas flow rate.

Key words : steelmaking; injection; bubbling jet; buoyancy region; gas holdup; bubble frequency; bubble rise velocity.

1. 緒 言

著者らは前に¹⁾, 電気探針法ならびにレーザードップラー流速計による気泡と液体の運動に関する実験結果に基づき, 底吹き円筒容器内気泡噴流中の流れ場を四つの領域に分類するのが合理的であることを示し, それらをノズル出口から浴表面に向かって順次, 運動量支配領域, 遷移領域, 浮力領域, 表面流領域と名付けた. しかしながら, その時点では各領域における気泡特性 (ガスホールドアップ α , 気泡頻度 f_B , 気泡上昇速度 u_B , 気泡径 d_B など) と液体の流動特性 (平均速度 $\bar{u}$, 乱れの rms 値 u'_{rms} , レイノルズ応力など) を系統的に評価するにはいたらなかった. そこで前報²⁾では, まず水-空気系気泡噴流の運動量支配領域の α と f_B に着目した. 従来の水-空気系気泡噴流の気泡特性に関する実験結果のほとんどが運動量支配領域で得られたものであることが判明したので, それらの結果と著者らの結果を基にして α と f_B の半径方向ならびに軸方向の分布形状を明らかにした.

本研究では, 主に浮力領域における気泡特性の解明を目的として, 電気探針法と画像解析装置を用いてガスホールドアップ, 気泡頻度, 気泡直径, 気泡上昇速度などを測定するとともに, 補足的にレーザードップラー流速計による液体の上昇速度の測定も行った.

2. 実験装置と測定方法

2.1 実験装置

実験装置の概要を Fig. 1 に示す. 実験に用いた透明アクリル製の円筒容器は内径 D と浴深 H_w がそれぞれ 126×180 mm, 200×385 mm, 390×385 mm の 3 種類である. 最も小さい容器についてはノズル径 d_n が 1, 2, 4 mm の 3 種類, 残りの二つの容器については 1, 2, 5 mm の 3 種類の単孔ノズルを用いた.

吹込み空気流量 Q_a は浮力領域の観察の容易な低流量側の $10 \sim 100$ cm³/s に着目した. 空気はコンプレッサーで容器の底の中央部に設置したノズルから吹きこんだ.

2.2 電気探針法によるガスホールドアップと気泡頻度の測定

平成 2 年 9 月本会講演大会にて発表 平成 2 年 12 月 28 日受付 (Received Dec. 28, 1990)

* 大阪大学工学部 工博 (Faculty of Engineering, Osaka University, 2-1 Yamadaoka Suita 565)

*² 大阪大学大学院 (現: (株)神戸製鋼所) (Graduate School, Osaka University, Now Kobe Steel, Ltd.)

*³ 大阪大学大学院 (現: 日新製鋼(株)) (Graduate School, Osaka University, Now Nisshin Steel Co., Ltd.)

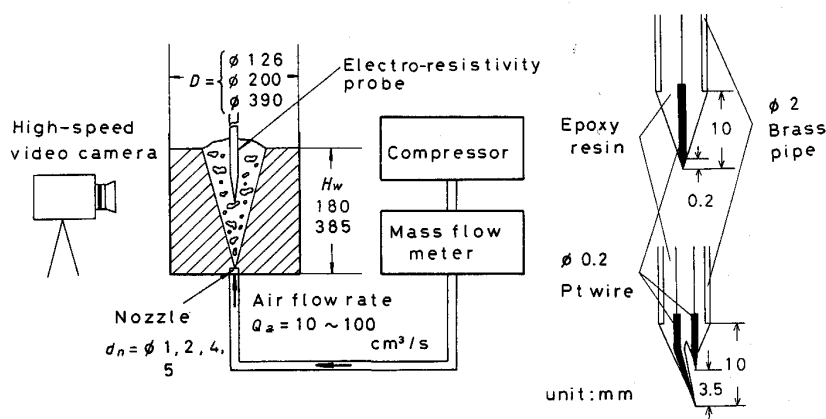


Fig. 1. Experimental apparatus.

ガスホールドアップ α と気泡頻度 f_B の測定用電気探針には単針プローブを、気泡の上昇速度と貫通距離の測定には2針プローブを用いた (Fig. 1). サンプルング周波数 f_s が α と f_B に及ぼす影響を調べるために、 f_s を 10 Hz ~ 10 kHz の間で変化させた。この実験結果に基づいて、単針プローブによる測定の場合は $f_s = 1$ kHz, サンプルング数 15 万個として α と f_B を求めた。2針プローブの場合は、出力信号を $f_s = 10$ kHz で AD 変換し、2本の針の間の気泡通過時間を求め、これで両針間の距離 3.5 mm を除すことにより気泡上昇速度 $u_{B,i}$ を計算した。ただしデータの採用にあたっては、CASTILLEJOS-BRIMACOMBE³⁾⁴⁾ のように複雑な統計的処理は施さず、次の二つの条件を課した。

$$|(t_L - t_U)/t_L| < 0.2 \quad (1)$$

$$10 \text{ cm/s} < u_{B,i} < 250 \text{ cm/s} \quad (2)$$

ここで t_L と t_U はそれぞれ下側および上側のプローブ出力信号における気泡滞在時間である。式(1)の右辺の 0.2 は短時間で信頼できる結果が得られる値として試行錯誤的に決定した。また、式(2)の境界値は高速ビデオカメラによる気泡観察結果に基づいて設定した。

平均上昇速度 $\bar{u}_B$ は、CASTILLEJOS-BRIMACOMBE³⁾⁴⁾ を参考にして、800 個のデータを算術平均して求めた。この場合、1 測定位置での測定に要する時間は最大 20 min である。

$$\bar{u}_B = \sum_{i=1}^N u_{B,i} / N, N = 800 \quad (3)$$

2.3 レーザードップラー流速計 (LDV) による測定

気泡に誘起される液体の上昇速度の浮力領域における特性を調べるために、LDV を用いて水の平均速度 $\bar{u}$ と乱れの自乗平均の平方根値 u'_{rms} を求めた。サンプルング周波数 f_s を 100 Hz に設定して、ホールド信号を除き、20 000 個のデータを集めた。測定方法の詳細は前報¹⁾ を参照されたい。

2.4 高速ビデオカメラによる測定

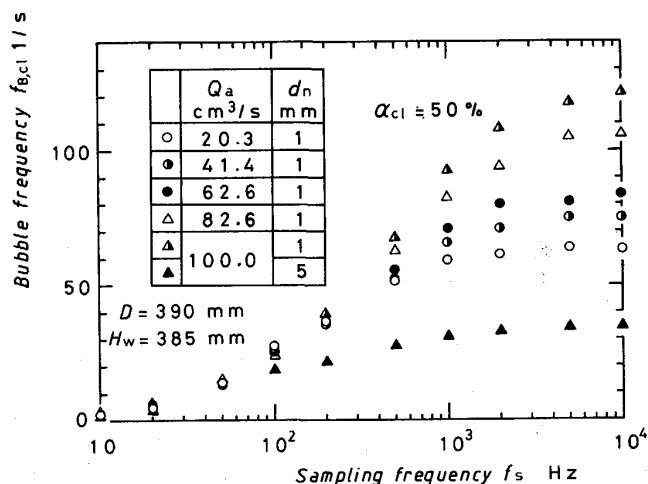
1 min に 200 コマの分解能で上昇気泡の撮影ならびに画像処理を行い、気泡の面積等価直径 d_{Be} と平均気泡上昇速度 $\bar{u}_B$ を求めた。

3. 実験結果と考察

3.1 ガスホールドアップと気泡頻度に及ぼすサンプルング周波数の影響

ガスホールドアップ α と気泡頻度 f_B の半径方向分布は修正フルード数 $Fr_m (= \rho_a Q_a^2 / g d_n^5 \rho_w)$ (ρ_a : 空気密度, g : 重力加速度, ρ_w : 水の密度) が約 1 より大きいとき、 α の中心軸上値 α_{cl} が約 50% より小さい軸位置ではほぼ正規分布に従うことが分かっている¹⁾²⁾⁵⁾。したがって、この場合の α と f_B の分布を記述するには、中心軸上値 α_{cl} , $f_{B,cl}$ と半値半幅 b_α , b_f が分かれば十分である。

ガスホールドアップ α の中心軸上値 α_{cl} が 50%, 25%, 5% の軸位置に着目し、サンプルング周波数 f_s

Fig. 2. Relation between bubble frequency and sampling frequency for $\alpha_{cl} = 50\%$.

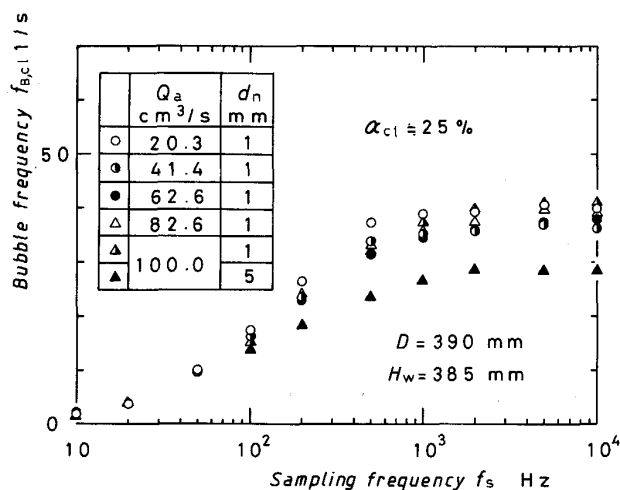


Fig. 3. Relation between bubble frequency and sampling frequency for $\alpha_{cl} = 25\%$.

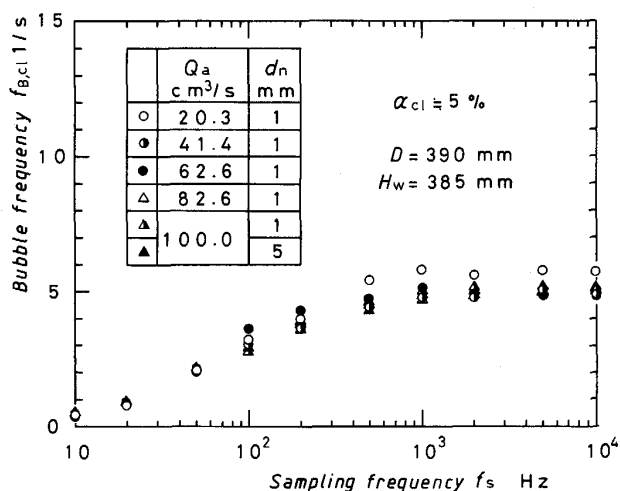


Fig. 4. Relation between bubble frequency and sampling frequency for $\alpha_{cl} = 5\%$.

が中心軸上の気泡頻度 $f_{B,cl}$ に及ぼす影響を調べた結果を Fig. 2, 3, 4 に示す。実験の手順としては $f_s = 1$ kHz のとき $\alpha_{cl} = 50\%, 25\%, 5\%$ となる軸位置を探し、これらの位置を固定して f_s を変化させたが、 f_s の変化は α_{cl} にはほとんど影響を及ぼさないことが判明した。

ここでは、あるサンプリング時刻に探針の出力信号が水の電圧レベルであったものが次のサンプリング時刻に気体の電圧レベルになったとき気泡が1個通過したと判断しているが、気泡が電気探針を通過する時間よりもサンプリング間隔 $1/f_s$ が非常に大きくなると、あるサンプリング時刻に水の電圧レベルであったとき、次の時刻に気体の電圧レベルになるかどうかは確率過程に従うようになる。すなわち、このときの気泡頻度 $f_{B,cl}$ は α_{cl} から決定される。例えば $\alpha_{cl} = 50\%$ ならば $f_{B,cl} = f_s/4$

となる。

Fig. 2 の $\alpha_{cl} = 50\%$ の場合をみると、 f_s の小さいところでは $f_{B,cl} = f_s/4$ となっている。しかし f_s の増加につれて、いずれの空気流量 Q_a についても $f_{B,cl}$ はそれぞれ一定値に漸近する傾向がうかがえる。本実験装置では AD 変換器の制約から $f_s = 10$ kHz までしかとることができないが、 $Q_a = 100$ cm³/s、 $d_n = 1$ mm のとき、 $f_s = 10$ kHz でも $f_{B,cl}$ は一定値におちついていないことが分かる。このことは吹込み空気流量が増加するにつれて大きな気泡から分裂した小さな気泡が数多く存在するようになることを示唆している。しかしながら Fig. 3 で明らかなように $\alpha_{cl} = 25\%$ の場合、 $f_s = 1$ kHz 以上では $f_{B,cl}$ はほぼ一定値をとり、しかもノズル径 $d_n = 1$ mm に限定するならば、 Q_a による $f_{B,cl}$ の差はほとんど見られなくなっている。さらに、興味深いことに Fig. 4 に示したように浮力領域の $\alpha_{cl} = 5\%$ の軸位置では Q_a だけでなく d_n の影響も見られなくなっている。

本実験では、主に $\alpha_{cl} \leq 10\%$ の浮力領域に着目しているので、上記結果に基づき、ガスホールドアップと気泡頻度の測定時には f_s を 1 kHz に設定した。これによってすべての気泡を検知できる。また気泡の上昇速度と貫通距離の測定時には、できるだけ測定精度を上げるため $f_s = 10$ kHz に設定した。

Q_a の増加につれてノズルからある程度離れた軸位置 z で多くの小さな気泡が存在するようになる現象は、Fig. 5 に示すように高速ビデオカメラで撮影した気泡の分散挙動からも明らかにみてとれる。この現象はコルモゴロフの最小渦スケールの式 $\eta = (\nu_w^3/\varepsilon)^{1/4}$ から推測されるように、エネルギーの投入量 ε が多くなると乱れの最小スケールがより小さくなることに起因するものと考えられる。 ν_w は水の動粘度である。ただし Fig. 5 において、 $Q_a \geq 41.4$ cm³/s のときに直径 3 cm にも達する大きな気泡が写っているが、2~4 個の気泡の重なった場合もあることに注意されたい。

3.2 浮力領域におけるガスホールドアップと気泡頻度の実験式

ガスホールドアップ α に着目すれば、底吹き円筒容器内の気泡噴流部の流れ場は模式的に Fig. 6 のように表される¹⁾。ここで着目している浮力領域は $\alpha_{cl} \leq 10\%$ となる領域である。 α_{cl} と b_a の測定結果の一例をノズル径 d_n をパラメーターとして Fig. 7, 8 に示した。Fig. 7 にみられるように、浮力領域 ($z \geq 120$ mm) の α_{cl} は片対数グラフ上でほぼ直線的な分布をとる。また Q_a が一定の場合、浮力領域の α_{cl} の分布は d_n の影響をほとんど受けないことが分かる。Fig. 8 の b_a も浮力領域に

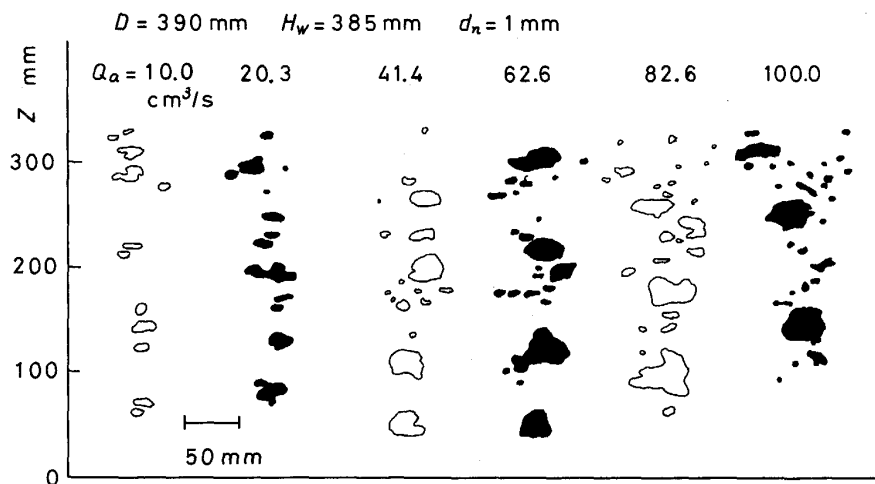


Fig. 5. Bubbles visualized with a high-speed video camera.

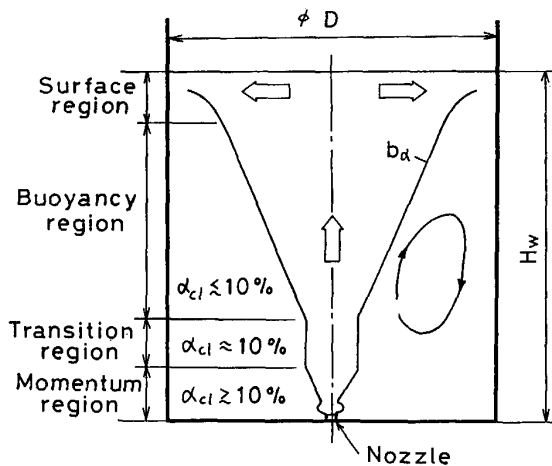


Fig. 6. Classification of the flow field in a bath.

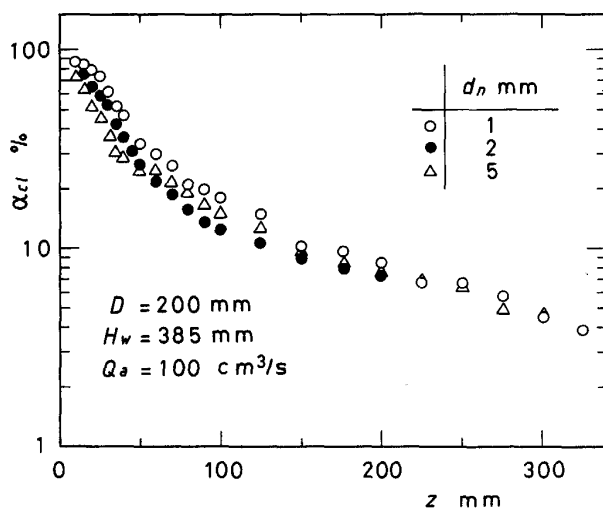


Fig. 7. Gas holdup distribution on the centerline.

おいては測定誤差の範囲内で互いに一致しているとみなしてよい。

いま便宜的に浮力領域内の $\alpha_{cl} = 5\%$ の軸位置 z_5 を基

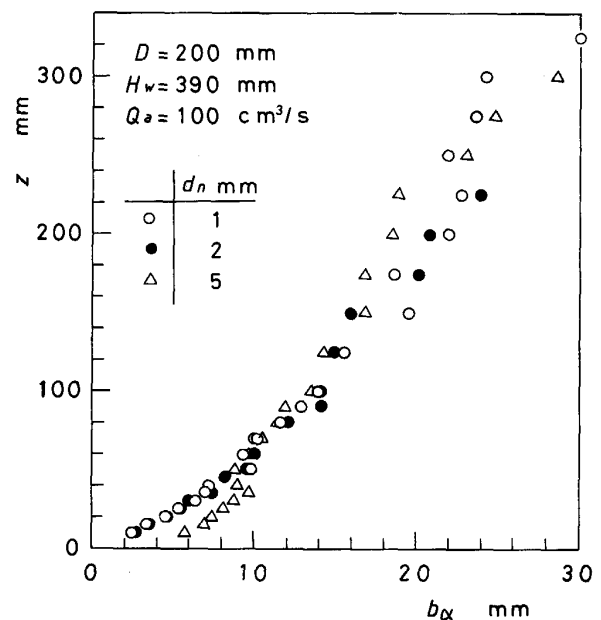


Fig. 8. Axial distribution of half-value radius of gas holdup.

準にとって α_{cl} と b_α の整理を試みる。容器径依存性をみるために z_5 を D で除した値を代表長さとして D をとったフルード数に対して Fig. 9 に示す。測定値のばらつきはいくぶんあるが、 z_5 は次式で近似される。

$$z_5 = 17(Q_a^2/g)^{1/5} \text{ (cm)} \quad (4)$$

すなわち本実験条件下の z_5 は容器径 D に依存せず、ガス流量 Q_a のみの関数となる。ただし、この式および以下に示す実験式は Q_a が約 $20 \text{ cm}^3/\text{s}$ より大きい場合に適用できる。

$z = z_5$ におけるガスホールドアップの半値半幅 $b_\alpha(z_5)$ を D で無次元化した値をフルード数に対して Fig. 10 に示す。実線は測定値を直線近似した式であり、次式で与えられる。

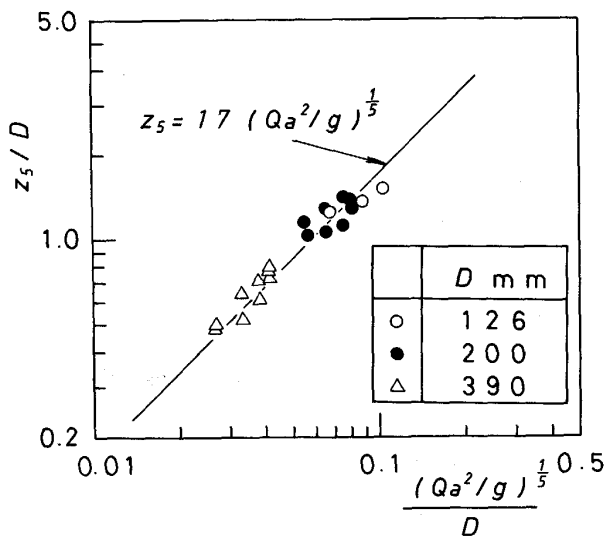


Fig. 9. Relation between z_5/D and Froude number.

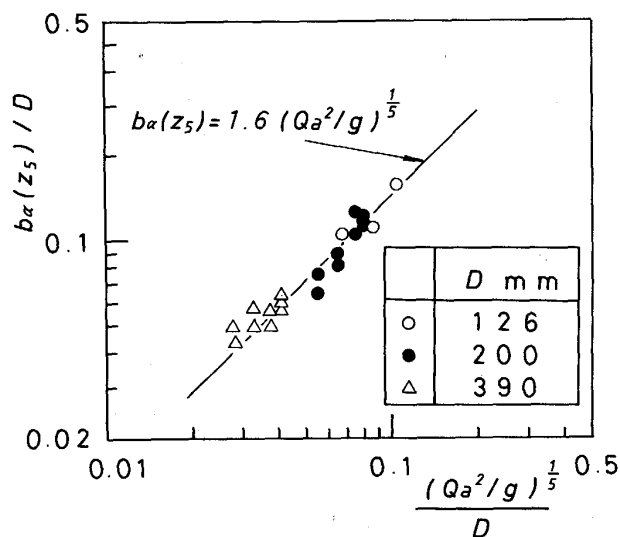


Fig. 10. Relation between half-value radius of gas holdup and Froude number at $z = z_5$.

$b_a(z_5) = 1.6(Q_a^2/g)^{1/5}$ (cm) (5)
これより $b_a(z_5)$ も容器径 D に依存しないことがわかる。

Fig. 11, 12 に $D=200$ mm の場合について、 α_{cl} と z/z_5 ならびに $b_a/b_a(z_5)$ と z/z_5 の関係を示した。 α_{cl} と $b_a/b_a(z_5)$ の測定値はそれぞれつぎの実験式で近似できる。

$$\alpha_{cl} = 23 \exp(-1.5 z/z_5) (\%) \dots\dots\dots (6)$$

$$b_a/b_a(z_5) = 0.47 \exp(0.75 z/z_5) \dots\dots\dots (7)$$

容器径 D が 126, 390 mm の場合についても $D=200$ mm の場合と同様に式(6), (7)の成立することがわかった。

3.3 気泡頻度

$z=z_5$ における気泡頻度の中心軸上値 $f_{B,cl}(z_5)$ は Fig.

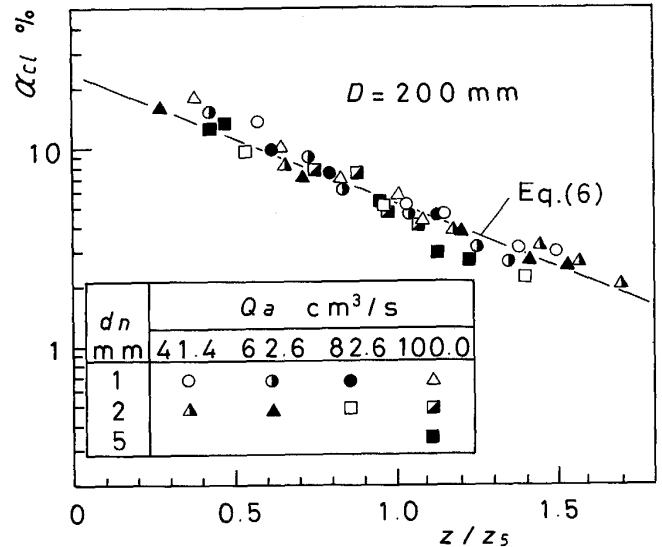


Fig. 11. Correlation of α_{cl} with z/z_5 for $D=200$ mm.

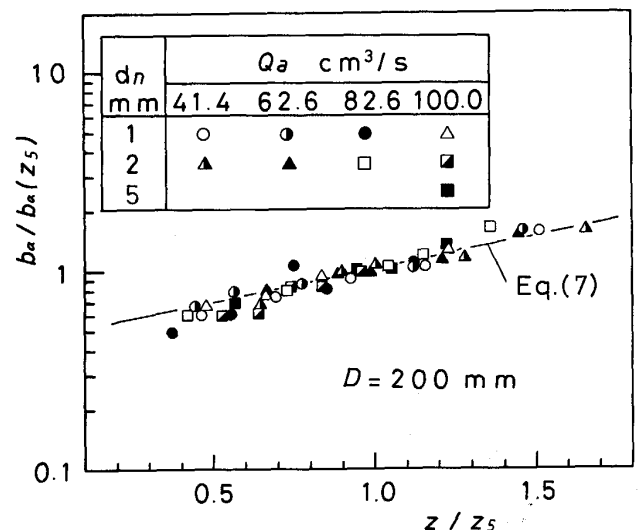


Fig. 12. Correlation of $b_a/b_a(z_5)$ with z/z_5 for $D=200$ mm.

13 から明らかなように本実験条件下では

$$f_{B,cl}(z_5) = 4.5 \text{ (1/s)} \dots\dots\dots (8)$$

とおける。この結果は乱れ強さが 45% にも達する激しい乱流混合に起因するものと思われる。ただし $f_{B,cl}(z_5)$ の値は、電気探針のプロブ先端の形状寸法にも依存するので、プロブによって値が多少変化する可能性があるが、いずれにしても一定値となる。

気泡頻度 f_B の半値半幅 b_f の $z=z_5$ における測定値は Fig. 14 のようになり、 $b_a(z_5)$ と同様に次式で近似できる。

$$b_f(z_5) = 1.6(Q_a^2/g)^{1/5} \text{ (cm)} \dots\dots\dots (9)$$

$f_{B,cl}$ の測定値は Fig. 15 に実線で示した次式

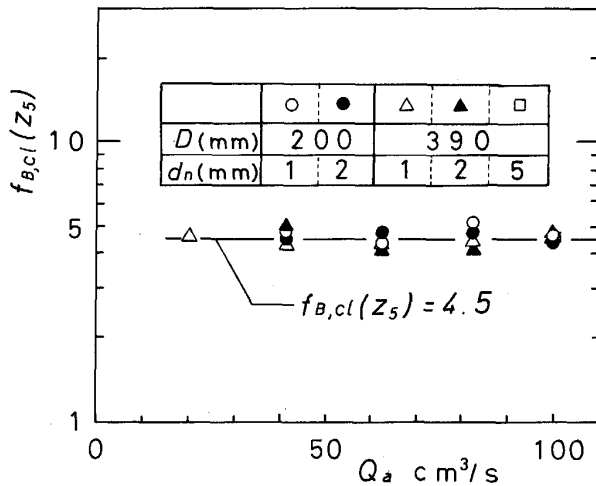


Fig. 13. Relation between bubble frequency on the centerline and air flow rate at $z = z_5$.

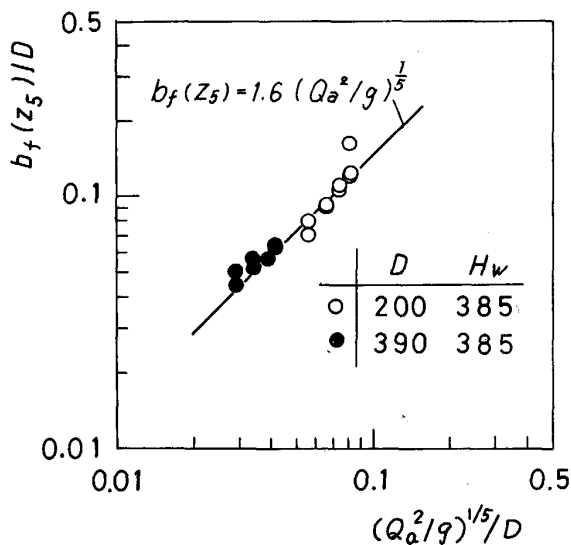


Fig. 14. Relation between half-value radius of bubble frequency and Froude number at $z = z_5$.

$$f_{B,cl}/f_{B,cl}(z_5) = 4.5 \exp(-1.5z/z_5) \quad (10)$$

で、また b_f は Fig. 16 にみられるように、式(7)と全く同じ次式でよく近似できる。

$$b_f/b_f(z_5) = 0.47 \exp(0.75z/z_5) \quad (11)$$

3.4 気泡直径

前掲の Fig. 5 から明らかなように、空気流量 Q_a が大きくなるにつれて気泡の分裂にともなう微小気泡の発生が顕著になる。すなわち浮力領域に特徴的なことはノズル近傍で形成された大きな気泡とこれの一部が分裂してできた小さな気泡とが混在した流れ場が形成される点にある。Fig. 5 の画像処理を行うと Fig. 17 に示すように気泡径 d_{Be} の頻度分布には Q_a の増加につれて、二

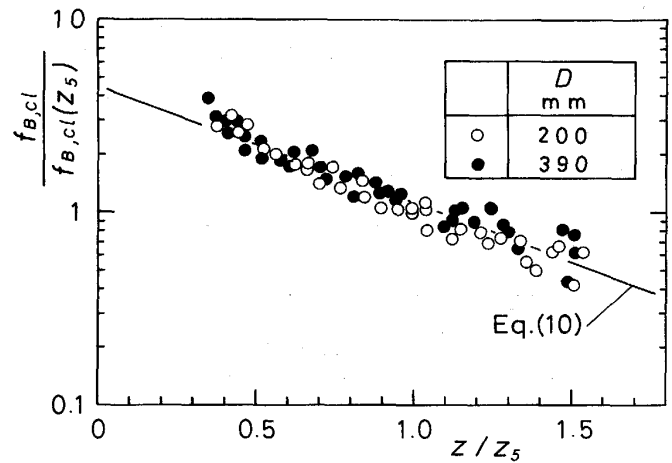


Fig. 15. Correlation of bubble frequency on the centerline as a function of z/z_5 .

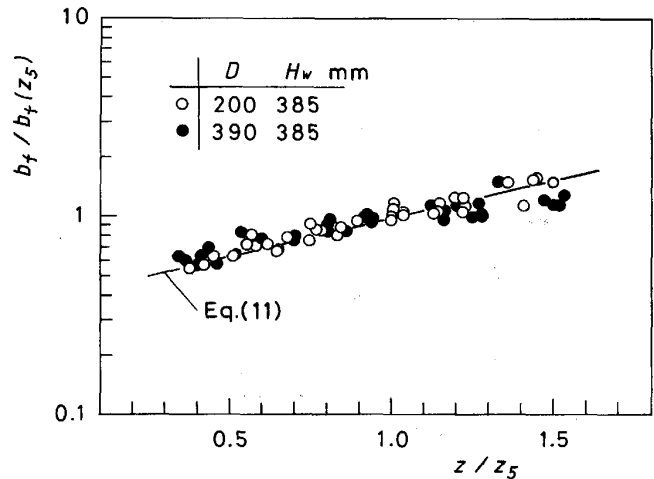


Fig. 16. Correlation of half-value radius of bubble frequency as a function of z/z_5 .

つのピークが現れるようになる。ここには示していないが、 $Q_a \geq 20.3 \text{ cm}^3/\text{s}$ の分布は $Q_a = 100 \text{ cm}^3/\text{s}$ の分布によく似ている。図中の $Q_a = 100 \text{ cm}^3/\text{s}$ の場合、Fig. 5 に関して既に述べたように、大きな気泡は2～4個の気泡が重なって写っている場合もあるため、 $d_{Be} \approx 30 \text{ mm}$ にある2番目のピークは実際は左側に移動するが、1番目のピークと重なり合うことはない。したがって、Fig. 17 で単純平均した気泡直径を用いて、代表的な気泡径とすることには問題がある。

液体運動の駆動力という点では、大きな気泡のみを考えれば十分であるが、気-液間の反応に関しては小さな気泡の寄与は無視し得ない場合が考えられる。状況に応じた気泡径の評価が必要である。

3.5 気泡の上昇速度

電気探針法で測定した中心軸上の平均気泡上昇速度

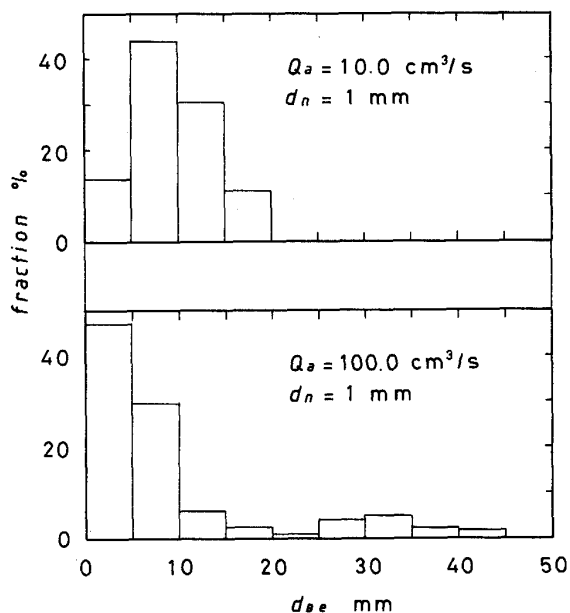


Fig. 17. Histogram of bubble diameter determined from image processing.

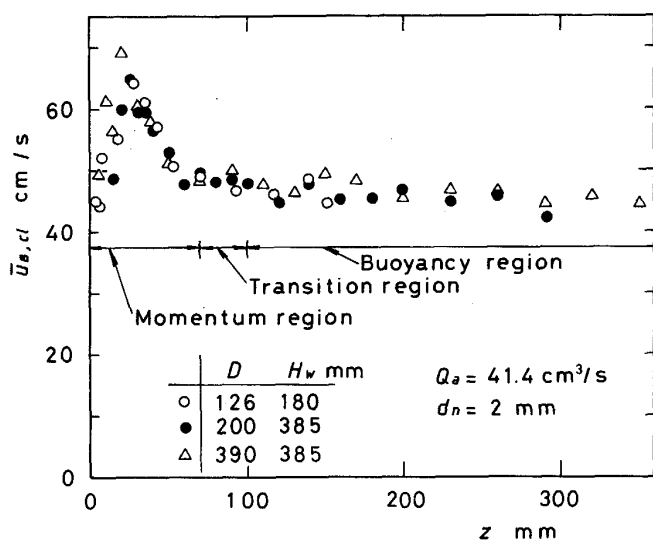


Fig. 18. Axial distribution of bubble rise velocity at $Q_a = 41.4 \text{ cm}^3/\text{s}$ obtained from an electro-resistivity probe.

$\bar{u}_{B,cl}$ を Fig. 18 に示す。浮力領域の $\bar{u}_{B,cl}$ は軸方向にはほぼ一定となり、容器径 D の影響を受けない。またここには示していないが半径方向にもほぼ一定となる。Fig. 19 には電気探針法による平均上昇速度を画像処理で求めた値と比較して示す。画像処理では気泡が浮力領域内を 0.1 s に移動した距離を測定することにより平均気泡上昇速度 $\bar{u}_B$ を求めた。画像処理の結果に基づけば浮力領域における気泡上昇速度はノズル径 d_n の影響をほとんど受けないことが明らかである。

Fig. 19 内の実線は、先に示したガスホールドアップ

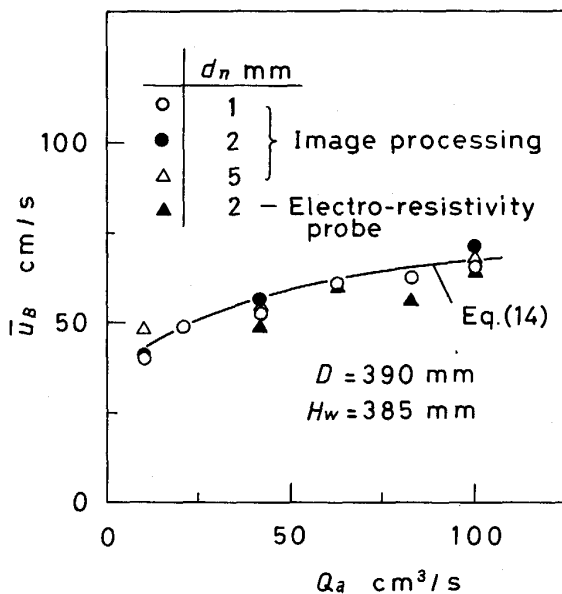


Fig. 19. Relation between bubble rise velocity and air flow rate.

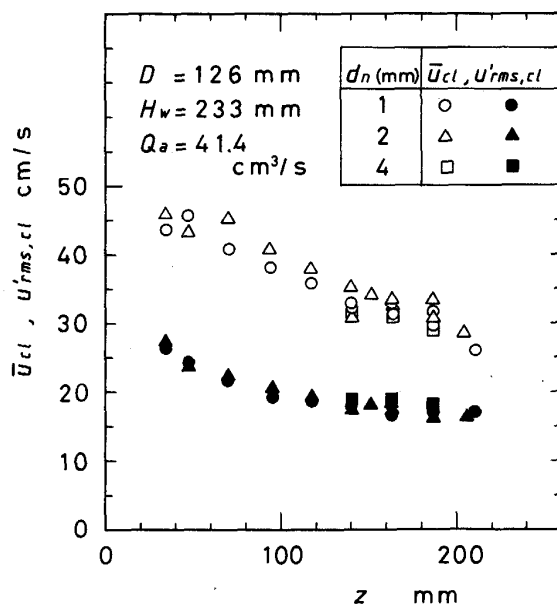


Fig. 20. Axial mean velocity and root mean square value of velocity fluctuation of water against axial distance z .

の実験式 (6), (7) を空気流量に対する次式

$$Q_a = \int_0^R 2\pi r \bar{u}_B (a/100) dr \text{ (cm}^3/\text{s)} \quad \text{.....(12)}$$

$$a = \alpha_{cl} \exp[-\ln 2 r^2 / b_a^2] \text{ (%) } \quad \text{.....(13)}$$

に代入し、さらに $\bar{u}_B$ が半径方向に一定であると仮定して求めた実験式である。

$$\bar{u}_B = 53 (Q_a^2 / g)^{1/10} \text{ (cm/s)} \quad \text{.....(14)}$$

本実験式と画像処理による測定値との一致は良好である。

上式より $\bar{u}_B$ は Q_a の 0.2 乗に比例することになるが、前報¹⁾によれば、水の平均速度の中心軸上値も Q_a の 0.2 乗と比例関係にあることが知られており興味深い。なお、電気探針法に基づく浮力領域での値は画像処理に基づく値よりもやや小さいが、これについては今後の検討課題としたい。

3・6 液体の平均速度と乱れの rms 値

Fig. 20 にノズル径を 3 種類変化させた場合の中心軸上における平均速度 $\bar{u}_{cl}$ と乱れの rms 値 $u'_{rms,cl}$ を示す。ただし $d_n=4$ mm の場合の測定値は浮力領域内の $z=140\sim 190$ mm の範囲に限られている。浮力領域内の $\bar{u}_{cl}$ と $u'_{rms,cl}$ は軸方向にほとんど変化せず、しかもノズル径 d_n の影響はほとんど受けない。この結果は気泡特性（ガスホールドアップ、気泡頻度、気泡上昇速度）の実験結果から推測される液体の挙動に合致している。またスリップ速度は約 20 cm/s となっている。

4. 結 言

底吹き円筒容器内水-空気系気泡噴流の浮力領域に着目し、気泡と液体の挙動を実験的に調べ以下の結果を得た。

(1) 吹込み空気流量 Q_a の増加につれて微小気泡の発生が顕著になる。すなわち浮力領域の気泡分散部はノズル近傍で形成された比較的大きな直径の気泡とこれが分裂して生じた微小な気泡とで構成される。

(2) 本実験で用いた 3 種類の容器については、浮力領域におけるガスホールドアップ α と気泡頻度 f_B の半径方向並びに軸方向分布は容器径 D とノズル径 d_n の影響を受けず、吹込み流量 Q_a と座標 r, z のみの関数となる。 α と f_B の半径方向分布は正規分布に従うので、 α の中心軸上値 α_{cl} と半値半幅 b_α 、 f_B の中心軸上値 $f_{B,cl}$ と半値半幅 b_f に対して実験式(6)、(7)、(10)、(11)を提案した。

(3) 平均気泡上昇速度 $\bar{u}_B$ も浮力領域においては容器

径 D とノズル径 d_n の影響を受けない。また $\bar{u}_B$ は半径方向にも軸方向にもほぼ一定値をとり、そのガス流量依存性は式(14)で近似できる。

(4) 気泡の挙動から予測されるように、気泡に誘起される水の平均速度 $\bar{u}_{cl}$ と乱れの rms 値 $u'_{rms,cl}$ は浮力領域では d_n の影響を受けず、軸方向にほとんど変化しなくなることが判明した。

記 号

- b_f : 気泡頻度の半値半幅
- b_α : ガスホールドアップの半値半幅
- D : 容器径
- d_B : 気泡径
- d_{Be} : 面積等価気泡径
- d_n : ノズル径
- Fr_m : 修正フルード数 ($=\rho_a Q_a^2 / g d_n^5 \rho_w$)
- H : 容器高さ
- H_w : 浴深
- f_B : 気泡頻度
- f_s : サンプリング周波数
- g : 重力加速度
- Q_a : 吹込み空気流量
- r, z : 半径方向および軸方向座標
- $\bar{u}_B$: 平均気泡上昇速度
- $\bar{u}$: 水の平均速度 (アンサンブル平均速度)
- u'_{rms} : 水の変動速度 (乱れ) の root mean square 値
- z_5 : $\alpha_{cl}=5\%$ となる軸位置
- α : ガスホールドアップ
- $\dot{\epsilon}$: 単位質量、単位時間当たりの消散エネルギー
- ν_w : 水の動粘度
- ρ_a : 空気密度
- ρ_w : 水の密度
- 添え字 cl : 容器の中心軸上値を表す

文 献

- 1) 井口 学, 竹内博明, 森田善一郎: 鉄と鋼, **76** (1990), p. 699
- 2) 井口 学, 川端弘俊, 岩崎敏勝, 野沢健太郎, 森田善一郎: 鉄と鋼, **76** (1990), p. 840
- 3) A. H. CASTILLEJOS and J. K. BRIMACOMBE: Metall. Trans. B, **18** (1987), p. 649
- 4) A. H. CASTILLEJOS and J. K. BRIMACOMBE: Metall. Trans. B, **18** (1987), p. 659
- 5) 川上正博: 昭和 63 年～平成元年度科学研究費補助金 (一般研究 C) 研究成果報告書 (1990)