気泡塔における大気泡の挙動について

—大気泡の上昇速度と長さ—

山下 福志*・井上 博愛

東京大学工学部 化学工学科†

ガス分散器として多孔板をもつ、液回分式の直径 2, 4, 8 cm の気泡塔における大気泡の上昇速度と長さについて研究し以下の事実を明らかにした。

大気泡の平均上昇速度 $\bar{V}_{CB}$ は塔の上部と下部とにおいてほぼ同じであり、次式によって表された。

$$\bar{V}_{CB} = 1.1 V_g + 100 D_T / (D_T^3 + 12^3)^{1/3}$$

個々の大気泡の上昇速度 $\bar{V}_{CB}$ はその長さには依存せず、平均値 $\bar{V}_{CB}$ のまわりに分散しており、 $\bar{V}_{CB}$ の分布は対数正規分布となった。速度の変動は塔径に依存し、塔径が大きいほど大きくなった。

大気泡の長さ L_{CB} の分布は正規分布となり、 L_{CB} の変動係数は塔径とガス流速に依存し、速度の変動係数の約 2 倍となった。

緒 言

大気泡は塔径一杯とならない場合は通常 spherical cap 型であるが、塔径一杯となっている場合は気体スラグとなる。本研究においては、別報²⁰⁾と同様に大気泡とは、気泡流動域 (bubble flow) で見られるような、球形または扁平な回転楕円体状の小気泡に対して大きな気泡の意味に使用し、気体スラグとは、大気泡のうち塔径一杯か、またはそれに近い気泡の意味に用いる。

連続的に上昇する大気泡の挙動についての研究の基礎として、単一の大気泡の研究が行われている。

垂直管内の単一大気泡の上昇速度については理論的、実験的に研究され、上昇速度に影響を及ぼす多くの因子が明らかにされている^{8~9, 11, 15, 19, 21, 23, 27)}。

Dumitrescu⁹⁾ は、単一気体スラグの上昇速度について研究し次式を示した。

$$U = 0.35 \sqrt{g D_T} \quad (1)$$

Nicklin ら¹⁸⁾ ははじめとする他の多くの研究者も気体スラグの上昇速度について研究し、Eq. (1) が適用できることを確かめている^{11, 15, 19, 21, 23)}。

液の物性の影響については、White ら²³⁾、Zukoski²⁷⁾、Brown ら^{8, 7)}の研究があり、液の界面張力、粘度などが上昇速度に影響することを示している。

連続系における大気泡の上昇速度についての研究は、主として2相流動の分野で行われている^{1~5, 10~14, 16~18, 22)}。その結果を Table 1 に示す。Table 1 から塔径、ガス流速、液流速、液の物性などが影響を与えることがわかる。

しかし、これらの研究は塔径が小さい場合が大部分であること、ガス流速の大きい範囲の研究が多いことなどのため、これらの結果を気泡塔に適用するには検討を要すると思われる。

このため著者らは、先の気泡塔における大気泡上昇域のガスホールドアップ^{24, 25)}、大気泡の長さ、頻度に関する研究²⁶⁾に引き続いて大気泡の上昇速度、速度の変動、大きさの変動などについて研究し、興味ある知見が得られたので報告する。

1. 実験装置と実験方法

本研究では、主に別報²⁰⁾の実験の際に得られたデータをさらに解析したもので、実験装置および実験方法の大部分は前報など^{19, 20)}に示した。

また、単一の後流のない大気泡の上昇速度の測定を行った。その方法は、垂直管内を水道水で満たし、塔の下端、下端ともに閉じた後、下端のゴム栓を急に引き抜くことにより塔底を大気に突然に開放して後流のない気体スラグを発生させ、その上昇速度を前報など^{19, 28)}と同じ電極法で測定した。その塔径などを Table 3 (後出) に示した。

データの整理方法はすべて前報など^{19, 28)}において示したので、ここでは省略する。

2. 実験結果

2・1 大気泡の平均上昇速度 $\bar{V}_{CB}$ について

Fig. 1 に $\bar{V}_{CB}$ 対ガス流速 V_g を示す。Fig. 1 には大木らが先に $D_T = 4, 8$ cm 塔において電極法により測定した $\bar{V}_{CB}$ の値も示す¹⁹⁾。

† 〒113 文京区本郷 7-3-1

* 幾徳工業大学 工業化学工学科

Fig. 1 $\bar{V}_{CB}$ vs. V_g

Table 1 Rising Velocities of gas slug through water in vertical tubes

Authors	D_T [cm]	$\bar{V}_{CB}$ [cm/sec]
Nicklin ¹⁷⁾ and Nicklin <i>et al.</i> ¹⁸⁾	2.54	$\bar{V}_{CB} = 1.2(V_g + V_i) + 0.35\sqrt{gD_T}$
Akagawa <i>et al.</i> ⁴⁾	2.76	$\bar{V}_{CB} = k(V_g + V_i)$, $k = 1.25 \sim 1.35$ $V_g + V_i < 320$ cm/sec
Iida <i>et al.</i> ¹³⁾	0.6	$\bar{V}_{CB} = (1.0 + 0.4e^{-0.55 \times 10^{-4} Re_{10}})(V_g + V_i)$ $V_g + V_i < 800$ cm/sec
Griffith <i>et al.</i> ¹¹⁾	2.54	$\bar{V}_{CB} = V_g + V_i + C_1' C_2' \sqrt{gD_T}$ $C_1' = 0 \sim 0.35$, $C_2' \geq 1$
Street <i>et al.</i> ²²⁾	2.86	$\bar{V}_{CB} = 1.20(V_g + V_i) + 0.35\sqrt{gD_T}$
	5.72	$\bar{V}_{CB} = 1.35(V_g + V_i) + 0.35\sqrt{gD_T}$ $V_g + V_i < 150$ cm/sec

大木ら¹⁹⁾は、 $D_T = 8$ cm 塔において、分散板の孔径が 0.4 mm と小さい場合には、気泡流動域から大気泡上昇域への遷移領域においては $\bar{V}_{CB}$ が特異な挙動を示すことを報告しているが、本研究ではそのような $\bar{V}_{CB}$ の特異な挙動は見られなかった。これは、本研究において使用した分散板の孔径が 1.3 mm ($D_T = 8$ cm 塔) と大きいと考えられる。大木ら¹⁹⁾も、 $D_T = 8$ cm、孔径 2 mm の時には、 $\bar{V}_{CB}$ は V_g とともに単調に増加することを示している。

Fig. 1 より、大木ら¹⁹⁾の値は本実験の結果とほぼ一致すること、 $\bar{V}_{CB}$ はガス流速 V_g が大きくなるにつれて増加すること、塔径 D_T に依存することなどがわかる。

1) ガス分散板からの高さ h の影響について Fig. 1 からわかるように、 $h = 65 \sim 200$ cm の範囲においては、 $\bar{V}_{CB}$ は塔の上部 ($h = 160 \sim 200$ cm) と塔の下部 ($h = 65 \sim 100$ cm) とでは、塔の下部の方が上部より少し大きい傾向を示す場合もあるが、その差は比較的小さいので、ほぼ同じとみてよい。これより、大気泡の上昇速度

Fig. 2 $C_2\sqrt{gD_T}$ vs. D_T

Table 2 Values of C_1 and C_2

D_T [cm]	C_1 [—]	$\bar{C}_1$ [—]	C_2 [—]
2	1.070	1.092	0.402
4	1.030		0.555
8	1.175		0.738

$\bar{V}_{CB}$ は分散板からの高さにあまり依存しないことがわかる。

2) 塔径 D_T の影響について Fig. 1 より、 $\bar{V}_{CB}$ はガス流速 V_g が一定なら塔径が大きいほど大きくなることわかる。

気体スラグの上昇速度に関する既往の研究によれば、上昇速度 $\bar{V}_{CB}$ は一般に次式によって与えられている^{11,13,14,16~18,22)}。

$$\bar{V}_{CB} = C_1(V_g + V_i) + C_2\sqrt{gD_T} \quad (2)$$

ここで C_1 , C_2 は定数である。本研究では液は回分式なので $V_i = 0$ となる。

Eq. (2) に従い最小 2 乗法により C_1 と C_2 を求めると Table 2 のようになる。 C_1 は塔径によって少し異なるが、平均はほぼ 1.1 となり、Nicklin ら¹³⁾、Griffith ら¹¹⁾の値に近い。 C_2 は塔径の関数となり、塔径が大きいほど大きくなることわかる。

Fig. 2 に実測値から最小 2 乗法によって求めた $C_2\sqrt{gD_T}$ と D_T との関係を示す。Fig. 2 には参考のため Nicklin らの値¹³⁾も示した。

著者らの前報²⁴⁾におけるモデルによれば、 $D_T = 19$ cm 以上では大気泡の上昇速度は次式によって与えられる。

$$\bar{V}_{CB} = V_g + 100 \quad (3)$$

Eq. (3) を含めて $C_2\sqrt{gD_T}$ の塔径依存性を表す式を求めると次式となる(Fig. 2 参照)。

$$C_2\sqrt{gD_T} = 100D_T/(D_T^3 + 12^3)^{1/3} \quad (4)$$

以上より、大気泡の平均上昇速度は次式で与えられる。

$$\bar{V}_{CB} = 1.1V_g + 100D_T/(D_T^3 + 12^3)^{1/3} \quad (5)$$

Eq. (5) は実測値とよく一致することがわかる (Fig. 1 参照)。Eq. (5) は前報²⁴⁾のモデルから考えて、 $D_T = 2 \sim 40$

Fig. 3 R_0 vs. V_{CB} for $D_T=8$ cm column

Fig. 4 S_v vs. V_g

cm の範囲に適用できると考えられる。

2・2 大気泡の上昇速度 V_{CB} の分布について

個々の大気泡の上昇速度 V_{CB} は、先行する気泡の wake 内での加速や、塔内の流動、変形などの影響を受け、平均値のまわりに分散するものと考えられる。

V_{CB} の累積分布の例を Fig. 3 に示す。Fig. 3 より V_{CB} の分布は対数正規分布でよく表されることがわかる。 $D_T=2$ cm 塔の場合は正規分布でもよく表されたが、 $D_T=4$ cm と 8 cm 塔の場合は、正規分布より対数正規分布の方がデータによく適合した。

2・3 大気泡の上昇速度 V_{CB} の標準偏差 S_v と変動係数 $S_v/\bar{V}_{CB}$ について

上昇速度 V_{CB} の標準偏差 S_v を Fig. 4 に示す。ただし S_v は次式から求めた。

$$S_v = \left[\sum_{i=1}^n (\bar{V}_{CB} - V_{CBi})^2 / n \right]^{1/2} \quad (6)$$

Fig. 4 より S_v は V_g と共に増加すること、塔径 D_T が大きいほど大きいこと、 $D_T=2$ cm と 4 cm 塔については塔の上部 ($h=165\sim195$ cm) と下部 ($h=65\sim95$ cm) とにおいて差はあまりないことがわかる。 $D_T=8$ cm 塔については、塔下部における S_v の方が上部における S_v より大きい傾向を示す。

Fig. 5 に変動係数 $S_v/\bar{V}_{CB}$ を示す。変動係数は D_T が大きいほど大きいこと、 V_g , h にはあまり依存しないこ

Fig. 5 $S_v/\bar{V}_{CB}$ vs. V_g
solid line: calculated value by Eq. (10). Keys are shown in Fig. 4

Fig. 6 R_0 vs. L_{CB} for $D_T=2$ cm column

とがわかる。

変動係数が塔径に依存し、塔径が大きいほど大きくなることは、塔径が大きいほど塔内の流動が激しくなるためと考えられる。

深野ら¹⁰⁾は、 $D_T=2.6$ cm の気液並流の塔における気体スラグの上昇速度の変動係数を求め、変動係数は液の空塔基準速度 V_i にも依存するが、 $V_g=0\sim100$ cm/sec, $V_i=4$ cm/sec で $S_v/\bar{V}_{CB}=0.08\sim0.12$ となることを示している。深野ら¹⁰⁾のこの値と本研究の $D_T=2$ cm 塔における値とはかなり近いことがわかる。

2・4 大気泡の塔軸方向の長さ L_{CB} の分布について

Fig. 6 に L_{CB} の累積分布の例を示す。Fig. 6 は正規確率紙にプロットしたものであり、この図より L_{CB} の分布は正規分布でよく表されることがわかる。 $D_T=4, 8$ cm 塔についても同様であった。

赤川ら⁸⁾も、 $D_T=2.76$ cm 塔 (気液並流) において、気体スラグの長さの分布は正規分布であることを報告している。

2・5 L_{CB} の標準偏差 S_L と変動係数について

S_L 対 V_g の例を Fig. 7 に示す。この図より S_L は V_g と共に増加すること、 D_T , h に依存することがわかる。

変動係数 $S_L/\bar{L}_{CB}$ を Fig. 8 に示す。 $S_L/\bar{L}_{CB}$ は多少バラつくが、 V_g と共に増加すること、 h にはあまり依存しないこと、 D_T に依存することがわかる。

深野ら¹⁰⁾は、 $D_T=2.6$ cm の気液並流の塔において気体スラグの長さの変動係数 $S_L/\bar{L}_{CB}$ を求め、 $V_g=0\sim100$ cm/sec, $V_i=3.9$ cm/sec で、 $S_L/\bar{L}_{CB}$ は V_g が大きくなる

Fig. 7 S_L vs. V_g

Fig. 8 $S_L / \bar{L}_{CB}$ vs. V_g

Table 3 Rising Velocities of single wakeless bubbles

D_T [cm]	H_T [cm]	h_0 [cm]	V_{CB} [cm/sec]	C [—]	Average of C [—]
2	100	70~90	15.11	0.341	0.341
			14.93	0.337	
			15.27	0.345	
4	160	55~75	21.98	0.351	0.349
			21.74	0.349	
			31.85	0.360	
8	150	60~70	31.65	0.357	0.359
			44.25	0.353	
			47.62	0.380	
16	70	30~50	50.0	0.400	0.372
			45.45	0.400	
			45.45	0.363	

Note: $C = V_{CB} / \sqrt{g D_T}$

につれて増加する傾向を示し、 $S_L / \bar{L}_{CB} = 0.35 \sim 0.62$ を示している。彼らの値は本研究の $S_L / \bar{L}_{CB}$ の値より大きい、これは気水混合法の相異に基づく流動の差によるものと思われる。

Figs. 5 と 8 との比較より、 $S_L / \bar{L}_{CB}$ は $S_v / \bar{V}_{CB}$ の 2 倍位であり、 L_{CB} の変動はかなり大きいことがわかる。

2.6 大気泡の長さ L_{CB} と上昇速度 V_{CB} との関係について

単一気体スラグの上昇速度について、Laird ら¹⁵⁾、Nicklin ら¹⁸⁾は、上昇速度は大気泡の長さ L_{CB} に依存することを示している。この理由として、Nicklin ら¹⁸⁾は上端を開放した塔においては、気泡は上昇するにつれて膨張し、気泡の上部の液が加速され、その結果として長

Fig. 9 V_{CB} vs. L_{CB} for $D_T = 2$ cm column

い気体スラグほど上昇速度が大きくなることを示している。

これに対して、Griffith ら¹¹⁾は、 $D_T = 1.27 \sim 2.54$ cm の塔で、 $L_{CB} = 2D_T \sim 10D_T$ の単一気体スラグの上昇速度 V_{CB} はその長さ L_{CB} に無関係であり、気泡の前岐点 (nose) における流動が V_{CB} の決定因子であることを示した。

Fig. 9 に V_{CB} 対 L_{CB} の例を示す。この図より、 V_{CB} は L_{CB} によらないことがわかる。これから、Griffith ら¹¹⁾と同様に、連続系においても気泡の前岐点における流動が V_{CB} の決定因子であり、 V_{CB} が変動しているのは、塔内の流動の変動を示しているものと考えられる。

2.7 後流 (wake) のない気泡の上昇速度

単一気体スラグの上昇速度式 Eq. (1) が D_T の大きい場合にも適用できるかどうかを確認するため、後流のない気体スラグの上昇速度を $D_T = 2 \sim 16$ cm の塔で測定した。その結果を Table 3 に示す。この表から $V_{CB} / \sqrt{g D_T} = C$ の値は D_T が小さいほど小さくなる傾向があるが、 $\bar{C} = 0.34 \sim 0.37$ の範囲にあり、Eq. (1) とほぼ一致することがわかる。

3. 考 察

3.1 大気泡の平均上昇速度 $\bar{V}_{CB}$ の塔径依存性について

本研究の結果、大気泡の上昇速度 $\bar{V}_{CB}$ は Eq. (5) によって表されることがわかった。また、単一気体スラグの上昇速度は $D_T = 2 \sim 16$ cm 塔において、Eq. (1) となった。このことから、単一系と連続系では、上昇速度の塔径依存性が異なっていることがわかる。

Table 1 からわかるように、 $\bar{V}_{CB}$ の式は研究者により異なっている。

Street ら²²⁾は、 $D_T = 2.86$ cm の塔については Nicklin ら^{17,18)}の式が適用できること、 $D_T = 5.72$ cm 塔については Eq. (2) の第 1 項の係数 C_1 が 1.35 となることを示している。

Nicklin ら^{17,18)}は、気体スラグの上昇速度 $\bar{V}_{CB}$ は気体スラグの前岐点 (nose) における液流速と単一気体スラグの上昇速度との和として、次式のように表されることを示している。

$$\bar{V}_{CB} = 1.2(V_g + V_l) + 0.35\sqrt{g D_T} \quad (7)$$

Eq. (7) の右辺第1項については、本研究においてもほぼ同じ値 ($1.1V_g$) となったが、第2項の係数については、Nicklin らは0.35と一定であるのに対して本研究においては、Table 2 に示したように塔径の関数となった。

塔径が大きくなるにつれて Eq. (2) の右辺第2項の係数 C_2 が大きくなる理由は、2・3 に示した変動係数や別報²⁸⁾ に示した気泡の形状の変化などからわかるように、塔径が大きくなると塔内の流動が激しくなり、気泡の nose の変形や偏心が大きくなること、大気泡間の合一の際の後流による加速効果も大きいこと^{18,20,21)} などによると考えられる。これらの効果が重なり合って、Eq. (2) の係数 C_2 が塔径に依存するものと考えられる。

Griffith ら¹¹⁾ も C_2 は一定でなく、気泡レイノルズ数や液レイノルズ数の複雑な関数となることを示している (Table 1 参照)。このことも、 C_2 には多くの因子が影響することを示していると考えられる。

3・2 前報²⁴⁾ のモデルから導出された大気泡の上昇速度式との比較

著者らは、先に大気泡上昇域のガスホールドアップについてモデルを提出して大気泡の上昇速度式を求め、 $40\text{ cm} \geq D_T \geq 19\text{ cm}$ では Eq. (3) を、 $19\text{ cm} > D_T \geq 4\text{ cm}$ では次式を示した²⁴⁾。

$19\text{ cm} > D_T \geq 4\text{ cm}$ の時

$$\bar{V}_{CB} = V_g + 0.711\sqrt{gD_T} \quad (8)$$

Eq. (8) の値を Fig. 1 中に点線で示す。この図より、Eq. (8) は $D_T = 4\text{ cm}$ と 8 cm 塔については実測値とほぼ一致するが、 $D_T = 2\text{ cm}$ 塔については V_g の小さい範囲において実測値との一致が悪いことがわかる。このことは、 $D_T = 2\text{ cm}$ 塔で、 V_g が小さい場合には、モデルの適用が困難なことを示しているものと考えられる。

3・3 変動係数 $S_v/\bar{V}_{CB}$ と液の混合拡散係数 E_{L20} との関係について

著者らは先に気泡塔の液の混合について研究し、大気泡上昇域の液の混合拡散係数は次式で表されることを示した¹⁹⁾。

$$E_{L20} = 14D_T \quad (9)$$

ここで E_{L20} は液の真の混合拡散係数である。真の混合拡散係数というのは、大気泡上昇域では塔内は液部と気泡部とにわかれるので、液部だけの混合拡散係数という意味である。

Fig. 10 に $S_v/\bar{V}_{CB}$ と D_T の関係を示す。図より塔径 $2 \sim 8\text{ cm}$ について次式が成立し、塔径が大きいほど変動係数 $S_v/\bar{V}_{CB}$ は大きくなることわかる。

$$S_v/\bar{V}_{CB} = 0.034D_T \quad (10)$$

Eqs. (9) と (10) より $S_v/\bar{V}_{CB}$ と E_{L20} との間には次式が成り立つ。

Fig. 10 S_v/V_{CB} vs. D_T

$$S_v/\bar{V}_{CB} = 0.0024E_{L20} \quad (11)$$

$S_v/\bar{V}_{CB}$ は定義から考えると一種の乱流の強度に相当する項になるから、Eq. (11) は乱流強度が大きいほど液の混合拡散が大きくなることを示しているものと解釈される。

結 言

ガス分散器として多孔板をもつ、液回分式の気泡塔において電極法により測定した大気泡の上昇速度と長さのデータを解析して以下の事実を明らかにした。

- 1) 大気泡の平均上昇速度 $\bar{V}_{CB}$ は、本研究の結果と前報のモデルより、塔径 $2 \sim 40\text{ cm}$ の範囲において Eq. (5) によって表されることを示した。
- 2) $\bar{V}_{CB}$ は塔の上部と下部とにおいてほぼ同じであった ($h = 65 \sim 200\text{ cm}$)。
- 3) 個々の大気泡の上昇速度 V_{CB} はその長さには依存せず、平均値のまわりに分散していた。
- 4) V_{CB} の分布は対数正規分布によってよく表された。
- 5) 上昇速度 V_{CB} の変動係数 $S_v/\bar{V}_{CB}$ は D_T に依存し、 D_T が大きくなると大きくなった。
- 6) 大気泡の長さ L_{CB} の分布は正規分布によってよく表された。 L_{CB} の変動係数 $S_L/\bar{L}_{CB}$ は D_T 、 V_g に依存した。また、 L_{CB} の変動は V_{CB} の変動の2倍位であった。

Nomenclature

C	$= V_{CB}/\sqrt{gD_T}$	[—]
C_1	$= \text{constant}$	[—]
C_1'	$= f_1(Re_b)$	[—]
C_2'	$= f_2(Re_f)$	[—]
C_2	$= \text{constant}$	[—]
D_T	$= \text{diameter of bubble column}$	[cm]
E_{L20}	$= \text{actual dispersion coefficient in liquid phase}$	[cm ² /sec]
$f_1(Re_b)$	$= \text{function of } Re_b$	[—]
$f_2(Re_f)$	$= \text{function of } Re_f$	[—]
g	$= \text{gravitational acceleration}$	[cm/sec ²]
H_T	$= \text{height of bubble column}$	[cm]
h	$= \text{height above gas distributor}$	[cm]

h_0	= height of electrode above gas distributor	[cm]
i	= variable	[—]
k	= constant	[—]
L_{CB}	= longitudinal length of large bubble	[cm]
n	= number	[—]
Re_b	= $\rho_l V_b D_T / \mu_l$ (= bubble Reynolds number)	[—]
Re_{i0}	= $D_T V_{i0} \rho_l / \mu_l$	[—]
Re_f	= $\rho_l D_T (V_g + V_l) / \mu_l$	[—]
R_0	= cumulative number per cent	[%]
S_L	= standard deviation of L_{CB}	[cm]
S_v	= standard deviation of V_{CB}	[cm/sec]
U	= rising velocity of single gas slug	[cm/sec]
V_b	= $C_1' C_2' \sqrt{g D_T}$ ($= V_{CB} - (V_g + V_l)$)	[cm/sec]
V_{CB}	= rising velocity of large bubble	[cm/sec]
V_g	= superficial gas velocity	[cm/sec]
V_l	= superficial liquid velocity	[cm/sec]
ρ_l	= density of liquid	[g/cm ³]
μ_l	= viscosity of liquid	[g/cm·sec]
<Superscript>		
—	= mean average value	

Literature cited

- 1) Akagawa, K.: *Trans. JSME*, **29**, 924 (1963)
- 2) Akagawa, K., H. Hamaguchi, T. Sakaguchi and T. Ikari: *ibid.*, **36**, 1520, 1528 (1970)
- 3) Akagawa, K., H. Hamaguchi and T. Sakaguchi: *ibid.*, **36**, 1535 (1970)
- 4) Akagawa, K. and T. Sakaguchi: *ibid.*, **31**, 594, 601, 608 (1965)
- 5) Baeyens, J. and D. Geldart: *Chem. Eng. Sci.*, **29**, 255 (1974)
- 6) Brown, R. A. S.: *Can. J. Chem. Eng.*, **43**, 217 (1965)
- 7) Brown, R. A. S. and G. W. Govier: *ibid.*, **43**, 224 (1965)
- 8) Davies, R. M. and G. Taylor: *Proc. Roy. Soc. (London)*, **200A**, 375 (1950)
- 9) Dumitrescu, D. T.: *Z. Angew. Math. Mech.*, **23**, 139 (1943)
- 10) Fukano, T., K. Sekoguchi and K. Nishikawa: *Technology Reports of the Kyushu University*, **46**, 144 (1973)
- 11) Griffith, P. and G. B. Wallis: *J. Heat Transfer, ASME*, **C83**, 307 (1961)
- 12) Hovmand, S. and J. F. Davidson: *Trans. Instn. Chem. Eng. (London)*, **46**, T190 (1968)
- 13) Iida, Y. and A. Atsuura: *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **2**, 212 (1976)
- 14) Iida, Y., K. Kawabata and T. Sato: Preprints of the 41th Annual Meeting of The Soc. of Chem. Engrs. Japan, p. 112, Sendai (1976)
- 15) Laird, A. D. K. and D. Chisholm: *Ind. Eng. Chem.*, **48**, 1361 (1956)
- 16) Moissis, R. and P. Griffith: *J. Heat Transfer, ASME*, **C84**, 29 (1962)
- 17) Nicklin, D. J.: *Chem. Eng. Sci.*, **17**, 693 (1962)
- 18) Nicklin, D. J., J. O. Wilkes and J. F. Davidson: *Trans. Instn. Chem. Engrs.*, **40**, 61 (1962)
- 19) Ohki, Y. and H. Inoue: *Chem. Eng. Sci.*, **25**, 1 (1970)
- 20) Ormiston, R. M., F. R. G. Mitchell and J. F. Davison: *Trans. Instn. Chem. Eng. (London)*, **43**, T211 (1965)
- 21) Stewart, P. B. and J. F. Davidson: *Powder Tech.*, **1**, 61 (1967)
- 22) Street, J. R. and M. R. Tek: *AIChE J.*, **11**, 601, 644 (1965)
- 23) White, E. T. and R. H. Beardmore: *Chem. Eng. Sci.*, **17**, 351 (1962)
- 24) Yamashita, F. and H. Inoue: *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **2**, 250 (1976)
- 25) Yamashita, F. and H. Inoue: *J. Chem. Eng. Japan*, **8**, 334 (1975)
- 26) Yamashita, F. and H. Inoue: to be published
- 27) Zukoski, E. E.: *J. Fluid Mech.*, **25**, 821 (1966)

(1976 年 11 月 8 日受理; 化学工学協会第 10 回秋季大会 (1976 年 10 月) にて一部発表)

A Study of Behavior of Large Bubbles in Bubble Columns —Rising velocities and lengths of large bubbles—

Fukuji Yamashita* and Hakuai Inoue

Dept. of Chem. Eng., Univ. of Tokyo, Tokyo 113

Rising velocities and lengths of large bubbles were studied in the same batch-type bubble columns of 2, 4 and 8 cm diameter with perforated plates as in the previous paper.

Average rising velocity $\bar{V}_{CB}$ of large bubbles is independent of height above the gas distributor and is expressed by the following equation:

$$\bar{V}_{CB} = 1.1 V_g + 100 D_T / (D_T^3 + 12^3)^{1/3}$$

where V_g is the superficial gas velocity and D_T is the diameter of the column.

The rising velocity of an individual large bubble is independent of its length and scatters around its average value $\bar{V}_{CB}$. The distribution of V_{CB} is described by the logarithmic normal probability distribution. The variation of V_{CB} increases with D_T .

The distribution of L_{CB} is well expressed by the normal probability distribution. The variation of L_{CB} is about twice as large as that of V_{CB} and is dependent on D_T and V_g .

* Dept. of Ind. Chem. and Chem. Eng., Ikutoku Tech. Univ.