気泡塔における大気泡の平均頻度と長さ

山下 福志*・井上 博 愛

東京大学工学部 化学工学科†

塔径 2, 4, 8 cm の多孔板の気泡塔で、発達途中にあるスラグ流れにおける大気泡の挙動を研究した。気泡塔は液回分式である。

大気泡は塔内を上昇するにつれて合一・成長し、平均頻度は分散板からの高さ h が大きくなるにつれて減少した。

$h/D_T < 100$ の範囲において、大気泡の塔軸方向の長さ $\bar{L}_{CB}$ の実験式を求め、解析的に導出した式とよく一致することを示した。

液体スラグの平均長さ $\bar{L}_l$ を求め、文献値と比較した。 $\bar{L}_l$ はガス流速、高さ、塔径に依存した。

緒 言

気泡塔において、大気泡上昇域では大気泡により気液界面積は低下し、滞留時間は小さくなるなどの欠点が生じられるが、近年公害規制などの面から大規模な排煙処理などの必要があり、多少塔の効率は低下しても、高ガス流量域で操作する必要があると思われる。

このような大気泡域の研究は、主として2相流動の分野で行われ、気体スラグ**の上昇速度、長さ、液体スラグの長さなどについて多くの研究^{1,2,4,5,7,9,14,15)}があるが、これらは十分に発達した流れについての研究が大部分であり、また塔径も小さいことなどのため、直接気泡塔に適用できるかどうかは、検討を要すると思われる。

気泡塔における大気泡域の研究としては、液の混合拡散¹¹⁾、ガスホールドアップ¹⁷⁾や液の循環速度に関する研究⁹⁾ などがあるが、直接に大気泡の挙動を調べた研究としては、著者らの研究¹¹⁾の他はあまり見当たらない。

著者らは、先に電極法を用いて大気泡の上昇速度、頻度、塔軸方向の長さを測定したが¹¹⁾、実験範囲が狭く、これだけでは大気泡の挙動を理解するには不十分である。

このため、前報¹¹⁾と同じ電極法を用い、広い実験範囲にわたって、発達途中にあるスラグ流れにおける大気泡の上昇速度、頻度、塔軸方向の長さを測定し興味ある知見が得られた。ここでは、これらのうち、主として大気泡の頻度、塔軸方向の長さについての結果を報告する。

1. 実 験

1・1 実験装置と操作

実験装置の概略を Fig. 1 に示す。気泡塔本体はアクリル樹脂製円筒で、塔の大きさなどの詳細は Table 1 に示す。塔径 $D_T = 2$ cm と 4 cm の塔については、塔の最上部 1 m は $D_T = 5$ cm の円筒となっている。ガスとして空気を、液として水道水を用いた。ガス分散器は厚さ 2 mm の真鍮板に孔を正三角配置にあげた多孔板で、孔径、孔数、ピッチなどは Table 1 に示す。

大気泡の測定方法は前報¹¹⁾とはほぼ同じで、塔軸方向の2点（その位置は Table 1 参照）に設置した上下二組の白金線電極によって行った。上下二組の電極間の距離は、 $D_T = 2$ cm では 20 cm、 $D_T = 4, 8$ cm では 30 cm とした。

一組の電極は2本の直径 0.5 mm ($D_T = 2$ cm のときは直径 0.2 mm) の白金線を約 5 mm の間隔で、塔の一断面において、直径をはさんで直径と平行に、塔径一杯に張ったもので、この二組の電極の位置を、塔の上部 ($h = 160 \sim 200$ cm) と、塔の下部 ($h = 60 \sim 100$ cm) に移動させて大気泡を測定した。

電極回路には 10 kc, 1V の交流を通じ、大気泡が電極を覆った時に電極間の抵抗が大きくなるために生ずる電流変化を増幅器を通して電磁オシログラフに記録させた。

操作はまず空気を、ほぼ所定の流量で塔内に送り、次に水を徐々に供給して気泡層の高さが所定の高さに達したところで止める（液回分式）。空気流量を正しく定め、定常状態に達した後、電磁オシログラフの記録を 30～40 秒間とった。

また、大気泡の形状を調べるため、気泡塔に写真撮影のための歪み補正用の箱を設置して写真撮影を行った。

1・2 データの整理方法

† 〒113 文京区本郷 7-3-1

* 幾徳工業大学 工業化学工学科

** 本研究では、大気泡とは、ガス流速の小さい気泡流動域でみられるような、直径 1～2 cm 以下の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。

- 1: Blower
- 2: Oil stripper
- 3: Bubble column
- 4: Gas distributor
- 5: Electrode
- 6: Buffer tank
- 7: Orifice manometer

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

電磁オシログラフの記録から、大気泡の平均頻度 $\bar{f}_{CB}$ 、平均上昇速度 $\bar{V}_{CB}$ 、平均の塔軸方向の長さ $\bar{L}_{CB}$ の求め方は前報¹¹⁾とまったく同じである。データの整理方法を以下に示す。

1) 大気泡の平均上昇頻度 $\bar{f}_{CB}$ ある時間 t の間に検知された気泡数 m_b を数え、次式によって算出した。

$$\bar{f}_{CB} = m_b / t \quad (1)$$

2) 大気泡の上昇速度 V_{CB} と平均上昇速度 $\bar{V}_{CB}$

気泡が電極間を通過するのに要した時間 Δt_v とその平均値 $\Delta \bar{t}_v$ と、電極間距離 h_e ($=20 \sim 30$ cm) とから、次式によって算出した。

$$V_{CB} = h_e / \Delta t_v \quad (2)$$

$$\bar{V}_{CB} = h_e / \Delta \bar{t}_v \quad (2')$$

3) 大気泡の塔軸方向の長さ L_{CB} と平均長さ $\bar{L}_{CB}$

大気泡の塔軸方向の長さ L_{CB} と平均長さ $\bar{L}_{CB}$ は、大気泡が一つの電極に接触している時間 Δt_g 、その平均値 $\Delta \bar{t}_g$ と V_{CB} 、 $\bar{V}_{CB}$ により、次式によって算出した。

$$L_{CB} = V_{CB} \cdot \Delta t_g \quad (3)$$

$$\bar{L}_{CB} = \bar{V}_{CB} \cdot \Delta \bar{t}_g \quad (3')$$

4) 液体スラグの平均長さ $\bar{L}_l$ 上昇している大気泡と、その下から上昇する大気泡との間の距離を液体スラグとみなし、液体スラグの塔軸方向の平均長さ $\bar{L}_l$ を、大気泡の $\bar{f}_{CB}$ 、 $\bar{V}_{CB}$ 、 $\bar{L}_{CB}$ より次式によって求めた。

$$\bar{L}_l = \bar{V}_{CB} / \bar{f}_{CB} - \bar{L}_{CB} \quad (4)$$

2. 実験結果

2・1 大気泡の形状について

$D_T=2, 4$ cm の塔における大気泡の写真の例を Fig. 2 に示す。Fig. 2(a) は $D_T=2$ cm の場合で、Fig. 2(b) は $D_T=4$ cm の場合である。これらの写真より大気泡はほぼ塔径一杯となり、気体スラグとなっていること、気体スラグと小気泡の2種類に分かれ、中間の大きさの気泡がないことがわかる。

(a) $D_T=2$ cm, $h=100 \sim 140$ cm
 $V_g=21.3$ cm/sec, $d=2$ mm

(b) $D_T=4$ cm, $h=110 \sim 140$ cm
 $V_g=7.53$ cm/sec, $d=2$ mm

Fig. 2 Shapes of large bubbles

Table 1 Details of bubble columns

D_T [cm]	h_T [cm]	d [mm]	n_H [—]	p [cm]	h_d [cm]
2	400	2.0	2	1.0	70,90 170,190
4	350	2.0	13	1.0	65,95 165,195
8	300	1.3	211	0.5	70,100 170,200

Holes are arranged in triangle pitch.

また、 $D_T=2$ cm 塔においては、nose が変形した気体スラグは比較的少数であったが、 $D_T=4$ cm 塔ではガス流速 V_g が小さくても変形した気体スラグの方が圧倒的に多かった。

$D_T=8$ cm 塔においては、 V_g の小さい時には大気泡は弾丸型の nose をもっていることがときどき肉眼で観察されたが、 V_g が大きくなると外からは大きなガスの塊らしきものが中心部を上昇し、壁際を小気泡を含んだ液が下降していることがわかるのみで、形状は観察できなかった。ただ、層上部の液面が上下に大きく振動しており、塔径一杯に近く、気体スラグになっているものと思われる。

2・2 大気泡の塔軸方向の長さ L_{CB} の分布

本研究の電極法により測定された L_{CB} の累積分布の例を Fig. 3 に示す。このような図より検出された気泡の大きさ L_{CB} の下限は、いずれの塔においてもほぼ 2 cm であること、および、ガス流速が大きくなると L_{CB} の小さい気泡の割合が著しく減少していくことがわかった。

これらの結果と、2・1 に示したような写真観測による結果から、 $D_T=2, 4$ cm 塔においては V_g が少し大きくなると塔内の気泡は気体スラグと小気泡の2種類に分かれていることがわかる。これは塔径が小さいので合一しやすく、容易に気体スラグになるためと考えられる。

$D_T=8$ cm 塔については、塔内部がはっきり観察できなかったが、 L_{CB} の分布からみれば、大気泡と小気泡の2種類に分かれていると考えられる。

以上の結果から、本研究の電極法によって測定された

Fig. 3 R_0 vs. L_{CB} for $D_T=2$ cm column

Fig. 4 $\bar{f}_{CB}$ vs. V_g for $D_T=4$ cm column

気泡を大気泡とみなして以下の取り扱いを進める。対象とする大気泡のうちの大部分は気体スラグと考えられるが、気体スラグになっていない気泡も含めて大気泡と呼ぶことにする。

2・3 大気泡の平均頻度 $\bar{f}_{CB}$ について

$\bar{f}_{CB}$ 対 V_g の例を Fig. 4 に示す。Fig. 4 は $D_T=4$ cm の場合である。この図より $\bar{f}_{CB}$ は V_g および分散板からの距離 h に依存することがわかる。

V_g が少し大きくなると、 $\bar{f}_{CB}$ は h が大きくなるにつれて減少する。これは大気泡同士の合一のため、 $\bar{f}_{CB}$ が h の増加につれて減るためと考えられる（後に示すように、 $\bar{L}_{CB}$ は h が大きくなるにつれて増加しているからである）。

1) 頻度 $\bar{f}_{CB}$ の塔軸方向の変化 Fig. 5 に $\bar{f}_{CB}$ 対 $1/h$ の例を示す。この図より $\bar{f}_{CB}$ の変化について次式が適用できる。

$$\bar{f}_{CB} = a + 1/bh \quad (5)$$

ここで a, b は定数で、 a, b の値は塔径 D_T とガス流速 V_g に依存して、 $a=0.34 \sim 1.05 \text{ sec}^{-1}$ 、 $b=0.46 \times 10^{-2} \sim 1.65 \times 10^{-2} \text{ sec/cm}$ の範囲にあった。

Fig. 5 $\bar{f}_{CB}$ vs. $1/h$ for $D_T=2$ and 4 cm columns

Fig. 6 $\bar{L}_{CB}$ vs. V_g for $D_T=4$ and 8 cm columns

2・4 大気泡の塔軸方向の長さ $\bar{L}_{CB}$ について

$\bar{L}_{CB}$ と V_g の関係を Fig. 6 に示す。この図より $\bar{L}_{CB}$ は V_g に比例して増加すること、 V_g が一定なら h が大きいほど大きくなることわかる。Fig. 6 より次式が適用できる。

$$\bar{L}_{CB} = \alpha V_g + \beta \quad (6)$$

ここで α, β は定数である。

α と h/D_T の関係を Fig. 7 に示す。Fig. 7 より α は h/D_T だけに依存することがわかり、 $h/D_T < 100$ の範囲において次式によって表される。

$$\alpha = \frac{0.038(h/D_T)}{1 + 0.02(h/D_T)} \quad (7)$$

Eqs. (6) と (7) より、 $h/D_T < 100$ における $\bar{L}_{CB}$ の式が求まる。

$$\bar{L}_{CB} = \left[\frac{0.038(h/D_T)}{1 + 0.02(h/D_T)} \right] V_g + \beta \quad (8)$$

ここで β の値は $D_T=2, 4$ cm 塔では 0 cm で、 $D_T=8$ cm 塔では 4 cm である。

1) 既往の文献値との比較 Fig. 7 には比較のため、既往の文献値^{1,4)}から求めた α の値も示した。その実験条件を Table 2 に示した。文献値の場合は、いずれも気水混合部から十分に離れた位置における測定で、十分に発達した流れであり、気体スラグの長さ $\bar{L}_{CB}$ は h に依存しないとされているので、 h としては測定区間

Fig. 7 α vs. h/D_T

の位置に等しいとした。 α の求め方は以下に示す。

[α の求め方]

赤川ら¹⁾は、 $D_T=2.76$ cm 長さ約 7 m の垂直管で 2 相流動の研究を行い、気体スラグの長さ $\bar{L}_{CB}$ について、 $V_i=0$ のとき次式を得ている。

$$\bar{L}_{CB}=0.912V_g^{1.1} \quad (9)$$

Eq. (9) によると $\bar{L}_{CB}$ は $V_g^{1.1}$ に比例しているが、比較のため $V_g=0 \sim 100$ cm/sec の範囲における近似式として次式を用いて α を求めた。

$$\bar{L}_{CB}=1.44V_g \quad (10)$$

深野ら⁴⁾は、 $D_T=2.6$ cm, $h=7.5$ m の垂直管を使用してスラグの長さを測定した。彼らの結果によると $\bar{L}_{CB}$ は V_g と共に増加するが、 V_g に比例していない。ここでは Table 3 に示すように、 $V_g=50$ と 100 cm/sec における $\bar{L}_{CB}$ の値から、各 V_g における $\alpha=\bar{L}_{CB}/V_g$ を求め、その 2 点の平均値 $\alpha=1.85$ を採用して Fig. 7 中に示した。

Fig. 7 においては、文献値の h/D_T が不明確のため、完全に発達した流れとして大気泡間の合一はなく、 $\bar{L}_{CB}$ は不変として表示しているが、深野ら⁴⁾の観察によると、 h/D_T が十分に大きくても気体スラグ間の合一が生じたとのことである。この点については、今後検討を要すると思われる。

Fig. 7 より文献値は実験条件が異なり結果も異なっているが、一応著者らの値の延長上にあると考えてもよいと思われる。

大木¹⁰⁾は、 $D_T=4, 8$ cm 塔の $\bar{L}_{CB}$ について、 $V_g=0 \sim 25$ cm/sec の範囲で次式を示している ($h=100 \sim 200$ cm)。

$$\bar{L}_{CB}=1.1V_g \quad (11)$$

Fig. 6 に Eq. (11) を示す。図より Eq. (11) は、 $V_g \leq 25$ cm/sec の範囲における本研究の実測値とかなり近いことがわかる。これより、Eq. (8) と Eq. (11) の相異は、実験した V_g の範囲の差によって生じたものと考えられる。

2・5 液体スラグの平均長さ $\bar{L}_i$ について

Eq. (4) より求めた液体スラグの長さ $\bar{L}_i$ の値を Fig. 8 に示す。Fig. 8 からわかるように、 V_g が大きい領域では V_g が大きくなると $\bar{L}_i$ はほぼ一定か、または少し減

Fig. 8 $\bar{L}_i$ vs. V_g (Experimental conditions of various authors are shown in Table 2)

Table 2 Experimental conditions of various authors

Authors	D_T [cm]	h_T [cm]	h_i [cm]	V_i [cm/sec]
Akagawa et al. ^{1,2)}	2.76	700	265-515	0
	2.76	380.5	187	20-80
Fukano et al. ⁴⁾	2.60	750	385-498	3.9
Street et al. ¹⁵⁾	2.86	>412	167.6-411.5	0-65

Note: h_T denotes rough values of height of bubble column above mixing section of air and water.

h_T of apparatus of Street et al. is not clear, though h_T is surely larger than 412 cm.

Table 3 Calculation of α from data of Fukano et al.⁴⁾

V_g [cm/sec]	$\bar{L}_{CB}$ [cm]	α [sec]	$\bar{\alpha}$ [sec]
50	75	1.5	1.85
100	220	2.2	

note: $\alpha=\bar{L}_{CB}/V_g$

少する傾向を示す。 $D_T=2$ cm, $h=170$ cm の時は、 $V_g=40 \sim 50$ cm/sec 付近で、 $\bar{L}_i$ は極大値を示す。赤川ら¹⁾も実験条件などは異なるが、 $\bar{L}_i$ に極大値の生ずることを示している。

V_g の大きい領域において、 V_g が増加するにつれて $\bar{L}_i$ が減少する傾向を示すのは、 V_g が大きくなると環状流 ($\bar{L}_i=0$ の場合に相当する) に近づくことから考えて妥当なものと考えられる。

$\bar{L}_i$ は分散板からの距離 h と塔径 D_T に依存することがわかる。 h が小さいほど $\bar{L}_i$ は小さい。これは Fig. 4 において、塔の上方で $\bar{f}_{CB}$ が減少することと対応している。すなわち、著者らの実測¹⁸⁾によると、 $\bar{V}_{CB}$ は塔の上部においても、下部においてもほぼ同じであったから ($h=60 \sim 200$ cm), 分散板上 h_1 と h_2 の位置において次式が成り立つ。

$$\bar{V}_{CB}=\bar{f}_{CB1}\bar{L}_{s1}=\bar{f}_{CB2}\bar{L}_{s2} \quad (12)$$

ここで添字 1, 2 はおのおの h_1 と h_2 における値である

ことを示し、 L_s は 1 個のスラグ長さ (液体スラグ長さ + 気体スラグ長さ) を示す。

気体スラグ長さは十分に長いとすると次式が成り立つ。

$$\bar{L}_{CB2} \doteq \bar{f}_{CB1} \bar{L}_{CB1} / \bar{f}_{CB2} \quad (13)$$

Eqs. (12) と (13) より、

$$\bar{L}_{12} = \bar{L}_{s2} - \bar{L}_{CB2} \doteq (\bar{f}_{CB1} / \bar{f}_{CB2}) \bar{L}_{11} \quad (14)$$

$\bar{f}_{CB1} / \bar{f}_{CB2} \geq 1$ であるから (等号は大気泡間の合一がない時で、 $h_2 > h_1$ としている)。

$$\bar{L}_{12} \geq \bar{L}_{11} \quad (15)$$

すなわち、発達途中のスラグ流れにおいては、 h が大きいほど $\bar{L}_i$ は大きくなることわかる。

$D_T = 2$ cm と 4 cm とでは、 V_g , h が同じなら、 D_T が大きいほど $\bar{L}_i$ は大きくなる。この傾向は Griffith ら⁵⁾の結果とも一致している。

Griffith ら⁵⁾の研究によると、十分に発達した流れにおいては、 $\bar{L}_i$ は D_T だけの関数となり、 D_T が 2.54 cm 以下では D_T が大きいほど $\bar{L}_i$ は大きくなり、 $D_T = 1.9$ cm で $\bar{L}_i = 15 \sim 24$ cm 程度の値を示している。

著者らの $\bar{L}_i$ は、 $D_T = 2$ cm, $V_g \geq 10$ cm/sec, $h = 170$ cm において 10~20 cm で、Griffith らの値より少し低めである。これは、流れが完全に発達していないためと考えられる。

Fig. 8 に $\bar{L}_i$ の文献値^{1,2,4,15)}を示す。文献値の実験条件は Table 2 に示した。Fig. 8 からわかるように $\bar{L}_i$ の文献値は塔高 h_T に依存しており、 $h_T \doteq 7$ m の時の $\bar{L}_i$ は $h_T \doteq 4$ m の時の 2 倍となっており、 $h_T \doteq 4$ m の時の $\bar{L}_i$ の値は本研究の $\bar{L}_i$ の値とかなり近い。

本実験と文献値とでは、塔径 D_T , 塔高 h_T , ガス分散器からの高さ h , 気水混合法 (本実験では多孔板であるのに対し、Street ら¹⁵⁾は mixing tee, 深野ら⁴⁾は multi jet) などの実験条件が異なっているため直接の比較は困難に思われるが、本実験の $\bar{L}_i$ は発達中のスラグ流れにおける値で、 V_g が大きくなると減少する傾向を示し、文献における $\bar{L}_i$ は十分に発達したスラグ流れにおける値で、 V_g が大きくなっても $\bar{L}_i$ は減少してないことを考えると、 V_g を増大させていくと、まず塔下部において $\bar{L}_i$ が小さくなり、次第に環状流へと移行していくように考えられる。

2・6 Eqs. (5) と (8) の解析的導出

2 相流動に関する既往の研究によれば、分散板からの距離 h が十分に大きくなると塔内の流動は十分に発達した流れとなって、大気泡間の合一はきわめて少なくなり、頻度 $\bar{f}_{CB}$ は h によらない一定値に近づく傾向を示すことが知られている^{1,2,4,5)}。

また、気泡や液滴の合一については、頻度あるいは個数の 1 次または 2 次反応として取り扱われることが多

い^{3,6,13,16)}。

気泡塔における大気泡の合一について定量的な関係は現在のところはっきりしていないので、上の事実を考慮に入れ次式を仮定する。

$$d\bar{f}_{CB}/dh = -k(\bar{f}_{CB} - \bar{f}_\infty)^n \quad (16)$$

B. C.

$$h = h_0 \text{ で } \bar{f}_{CB} = \bar{f}_{CB0} \quad (17)$$

ただし、 n, k は定数で、 $\bar{f}_\infty$ は $h = \infty$ における $\bar{f}_{CB}$ の値である。

Eq. (17) の境界条件の下で、Eq. (16) の解は次のようになる。

$n \neq 1$ のとき、

$$\bar{f}_{CB} = \bar{f}_\infty + [(1-n)(-kh + y_0)]^{1/(1-n)} \quad (18)$$

$$y_0 = kh_0 + \frac{1}{1-n} (\bar{f}_{CB0} - \bar{f}_\infty)^{1-n} \quad (19)$$

$n = 1$ のとき、

$$(\bar{f}_{CB} - \bar{f}_\infty) / (\bar{f}_{CB0} - \bar{f}_\infty) = e^{-k(h-h_0)} \quad (20)$$

塔内に入ったガスの大部は大気泡となって上昇すると仮定すると、大気泡の体積 $\bar{V}$ は次式となる。

$$\bar{V} = V_g A / \bar{f}_{CB} \quad (21)$$

Griffith ら⁵⁾によると、気体スラグの体積 $\bar{V}$ とその長さ $\bar{L}_{CB}$ との間には次式が成り立つ。

$$\bar{V} = A(m_1 \bar{L}_{CB} - m_2 D_T) \quad (22)$$

ここで m_1, m_2 は定数であり、ポテンシャル流れのとき $\bar{L}_{CB}/D_T < 20$ の範囲で、 $m_1 = 0.913$, $m_2 = 0.526$ となる。Eq. (22) は、定数 m_1 と m_2 を変えればポテンシャル流れ以外の系についても適用できることが知られている。

Eq. (22) が大気泡についても適用できるとすると、Eqs. (21) と (22) より、

$$\bar{L}_{CB} = (V_g / \bar{f}_{CB} + m_2 D_T) / m_1 \quad (23)$$

Eqs. (19), (20), (23) より、 $n \neq 1$ のとき、

$$\begin{aligned} \bar{L}_{CB} = & \frac{1}{m_1} [\bar{f}_\infty + \{(1-n)(-kh + y_0)\}^{1/(1-n)}]^{-1} V_g \\ & + \frac{m_2}{m_1} D_T \end{aligned} \quad (24)$$

$n = 1$ のとき、

$$\bar{L}_{CB} = \frac{1}{m_1} [\bar{f}_\infty + (\bar{f}_{CB0} - \bar{f}_\infty) e^{-k(h-h_0)}]^{-1} V_g + \frac{m_2}{m_1} D_T \quad (25)$$

Eqs. (24), (25) は $\bar{L}_{CB}$ と V_g, h, D_T との関係を示す一般式である。

$n = 2$ で、ガス流速の十分大きな高ガス流量域においては、大気泡の発生点はガス分散板直上であり¹⁷⁾、頻度は十分に大きいとすると Eqs. (18) と (24) は簡単化され、それぞれ以下のようになり、実験式 Eqs. (5), (8) と同じ形になる。

$$\bar{f}_{CB} = \bar{f}_\infty + 1/kh \quad (18)'$$

Table 4 Values of β

D_T [cm]	$\frac{m_2 D_T}{m_1}$ [cm]	β_{exp} [cm]
2	1.15	0
4	2.30	0
8	4.61	4

β_{exp} = value obtained experimentally

$$\bar{L}_{CB} = \frac{1}{m_1} \left(\frac{kh}{f_{\infty} kh + 1} \right) V_g + \frac{m_2}{m_1} D_T \quad (24)'$$

Eq. (24)' の第1項と Eq. (8) の第1項との比較より次の関係が求まる.

$$(k/m_1)D_T = 0.038 \quad (26)$$

$$(f_{\infty} k)D_T = 0.02 \quad (27)$$

m_1 としてポテンシャル流れにおける値 0.913 を用い、 $\bar{f}_{\infty}$, k として頻度 $\bar{f}_{CB}$ の塔軸方向の変化から求めた Eq. (5) の a , b の値を入れて Eqs. (26) と (27) の左辺の値を求めると、 $(k/m_1)D_T = 0.031 \sim 0.052 \text{ sec}$, $(\bar{f}_{\infty} k)D_T = 0.012 \sim 0.039$ となり、Eq. (8) の第1項の係数の値はこれらの値の範囲内にあることがわかる. このことは、導出方法の妥当性を示すものと考えられる.

Eq. (24)' の右辺第2項と Eq. (8) の右辺第2項の比較より、 β は次式によって与えられる.

$$\beta = \frac{m_2}{m_1} D_T \quad (28)$$

m_1 , m_2 にポテンシャル流れにおける値を用いると、 β は Table 4 のようになる. この表より、 $D_T = 8 \text{ cm}$ の時は、計算値と実測値の一致はよいが、 $D_T = 2, 4 \text{ cm}$ 塔では一致しない. これは、 D_T が小さい時には β の値自体が小さくなる (Eq. (28) 参照) 上に、Eq. (8) の右辺第1項が大きくなるので事実上誤差範囲に入ってしまうためと考えられる.

$n \neq 2$ のときは Eqs. (18), (20) および Eq. (24) または Eq. (25) によって、実験式 Eqs. (5) と (8) を説明することはできない.

結 言

前報¹¹⁾と同じ電極法を用い、塔径 $D_T = 2, 4, 8 \text{ cm}$ の気泡における大気泡の頻度 $\bar{f}_{CB}$ 、塔軸方向の長さ $\bar{L}_{CB}$ 、上昇速度 $\bar{V}_{CB}$ を測定し、発達途中のスラグ流れについて以下の事実を明らかにした.

- 1) ガス流速 V_g の小さい範囲を除くと大気泡の合一が生じ、頻度は分散板からの距離 h が大きくなるにつれて減少し Eq. (5) で表された.
- 2) 大気泡の塔軸方向の長さ $\bar{L}_{CB}$ は $h/D_T < 100$ の範囲において、Eq. (8) で表された.
- 3) 液体スラグの長さ $\bar{L}_l$ を求め、 V_g が大きくなると $\bar{L}_l$ は減少する傾向を示すこと、 D_T , h に依存すること

を示した. また、既往の文献値との比較を行った.

- 4) $\bar{f}_{CB}$, $\bar{L}_{CB}$ について解析的な導出を行った.

Nomenclature

A	= cross sectional area of bubble column	[cm ²]
a	= constant defined by Eq. (5)	[1/sec]
b	= constant defined by Eq. (5)	[sec/cm]
d	= diameter of hole	[cm]
D_T	= diameter of bubble column	[cm]
$\bar{f}_{CB}$	= passage frequency of large bubble	[sec ⁻¹]
$\bar{f}_{\infty}$	= $\bar{f}_{CB}$ at $h = \infty$	[sec ⁻¹]
h	= height above gas distributor	[cm]
h_e	= distance between two pairs of electrodes	[cm]
h_T	= height of bubble column	[cm]
h_d	= height of measuring point above gas distributor	[cm]
k	= constant	[sec/cm]
$\bar{L}_{CB}$	= longitudinal length of large bubble	[cm]
L_l	= length of liquid slug	[cm]
L_s	= length of slug (= $\bar{L}_{CB} + L_l$)	[cm]
m_b	= number of bubbles	[—]
m_1	= constant	[—]
m_2	= constant	[—]
n_H	= number of holes	[—]
p	= pitch	[cm]
R_0	= cumulative number per cent	[%]
t	= time	[sec]
Δt_g	= contact time of large bubble with electrode	[sec]
Δt_v	= passage time of large bubble between electrodes	[sec]
V	= volume of large bubble	[cm ³]
$\bar{V}_{CB}$	= rising velocity of large bubble	[cm/sec]
V_g	= superficial gas velocity	[cm/sec]
V_l	= superficial liquid velocity	[cm/sec]
α	= constant	[sec]
β	= constant	[cm]

<Subscripts>

0 = at $h = h_0$

1 = at $h = h_1$

2 = at $h = h_2$

<Superscript>

— = mean value

Literature cited

- 1) Akagawa, K., H. Hamaguchi, T. Sakaguchi and T. Ikari: *Trans. JSME*, **36**, 1520, 1528, 1535 (1970)
- 2) Akagawa, K. and T. Sakaguchi: *ibid.*, **31**, 594, 601, 608 (1965)
- 3) Calderbank, P. H., M. B. Moo-Young and R. Bibby: 3rd Europ. Symp. Chem. Reaction Eng. Pergamon Press, 91 (1964)
- 4) Fukano, T., K. Sekoguchi and K. Nishikawa: *Technology Reports of the Kyushu University*, **46**, 144 (1973)
- 5) Griffith, P. and G. B. Wallis: *Trans. ASME*, **C83**, 307 (1961)

- 6) Hayakawa, T. and M. Shigeta: *Kagaku Kōgaku*, **38**, 60 (1974)
 - 7) Iida, Y. and H. Atsuura: *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **2**, 212 (1976)
 - 8) Miyauchi, T. and Chian-Nan Shyu: *Kagaku Kōgaku*, **34**, 958 (1970)
 - 9) Nicklin, D. J., J. C. Wilkes and J. F. Davidson: *Trans. Instn. Chem. Engrs.* (London), **40**, 61 (1962)
 - 10) Ohki, Y.: Dr. Eng. Thesis, Univ. of Tokyo (1969)
 - 11) Ohki, Y. and H. Inoue: *Chem. Eng. Sci.*, **25**, 1 (1970)
 - 12) Ormiston, R. M., E. R. G. Mitchell and J. F. Davidson: *Trans. Instn. Chem. Eng.* (London), **43**, T211 (1965)
 - 13) Otake, T., M. Ikura and E. Kushida: Preprint of 36th Annual Meeting of The Soc. of Chem. Engrs., Japan, p. 137 (1969)
 - 14) Stewart, P. B. and J. F. Davidson: *Powder Technology*, **1**, 61 (1967)
 - 15) Street, J. R. and M. R. Tek: *AIChE J.*, **11**, 601, 604 (1965)
 - 16) Toei, R., R. Matsuno, M. Oichi, K. Kubota and T. Yanagida: *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **1**, 571 (1975)
 - 17) Yamashita, F. and H. Inoue: *ibid.*, **2**, 250 (1976)
 - 18) Yamashita, F. and H. Inoue: *ibid.*, **4**, 63 (1978)
- (1976 年 10 月 2 日受理; 化学工学協会第 10 回秋季大会 (名古屋, 1976 年 10 月) にて一部発表)

Mean Passage Frequency and Length of Large Bubbles in Bubble Columns

Fukuji Yamashita* and Hakuai Inoue

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

Behavior of large bubbles in developing slug flow was studied in batch-type bubble columns of 2, 4 and 8 cm diameter with a perforated plate as the gas distributor.

Mean passage frequency of large bubbles $\bar{f}_{CB}$ decreases with height above the gas distributor h because they coalesce with each other into much larger bubbles as they rise.

The empirical equation of mean longitudinal length of large bubble $\bar{L}_{CB}$ was obtained for $h/D_T < 100$, where D_T is diameter of the column.

The dependence of $\bar{L}_{CB}$ upon h and superficial gas velocity V_g was well explained analytically.

Mean length of liquid slug $\bar{L}_l$ was obtained and compared with experimental values of various authors. $\bar{L}_l$ is found to depend upon V_g , h and D_T within experimental conditions.

* Dept. of Chem. Process Eng., Ikutoku Tech. Univ.