

傾斜オリフィスで形成される気泡の体積

赤木 靖 春, 岸 本 民 也

岡山理科大学応用化学科

高橋 照 男, 宮 原 敏 郎

岡山大学工学部工業化学科

(昭和54年9月21日受理)

緒 言

単一気泡の形成機構、体積あるいは上昇速度などに関する研究は多く、気泡内部の圧力変化がオリフィス下部のガス（蓄気室）におよぶ場合（constant pressure system）とおよばない場合（constant flow system）とで気泡の形成機構が異なることが知られている¹⁾。さらに constant pressure system では、気泡の体積はオリフィスの形状、ガス流量、系の物性のほかに蓄気室体積に影響されることが報告されている^{2,4,8)}。

液中にガスを分散させる形式の気液接触装置では、たとえば泡鐘板、ジェットトレイ、気泡攪拌槽などのように傾斜したオリフィスからガスを気泡として分散させる装置が少なくない。しかし傾斜オリフィスで形成される気泡に関する研究は少なく、Sullivan ら⁷⁾ および Kumar ら⁵⁾ の研究があるにすぎない。彼らは主に高ガス流量域でしかも蓄気室体積の大きな条件で実験し、気泡体積におよぼすオリフィスの傾斜角度の規則的影響は認められないと報告している。しかしながら低ガス流量域および小さな蓄気室体積における研究は見当たらない。

本研究では段塔の操作における棚段でのガス分散のさいに見られる constant pressure system において、傾斜オリフィスで形成される気泡体積に対する種々の因子のうち、主に低ガス流量域でのオリフィス傾斜角、蓄気室体積、液粘度および表面張力の影響について実験的に検討し、オリフィス傾斜角の影響の現われる条件を明らかにした。さらに単一孔で成長し離脱する直前の気泡に関する Hayes, Hardy および Holland のモデル³⁾を傾斜孔の場合に適用することによって、気泡体積を理論的に解析し、傾斜オリフィスで形成される気泡の体積を相関する関係をえた。

1. 理論的考察

Hayes ら³⁾ は水平に置かれたプレートのオリフィスで形成される気泡に作用する力としてオリフィスを通るガスによって気泡へ加えられる力、浮力、気泡内外の圧力差による力、表面張力によるオリフィスへの附着力、粘性抗力および気泡周囲の液の慣性力を考え、

これらの和が気泡のもつ力に等しいと置いて式表示した。そしてこの式を離脱直前の気泡に適用し, 気泡体積を相関している。

いま Fig. 1 に示すように気泡がオリフィスと等しい角度で, 球形で成長すると仮定し

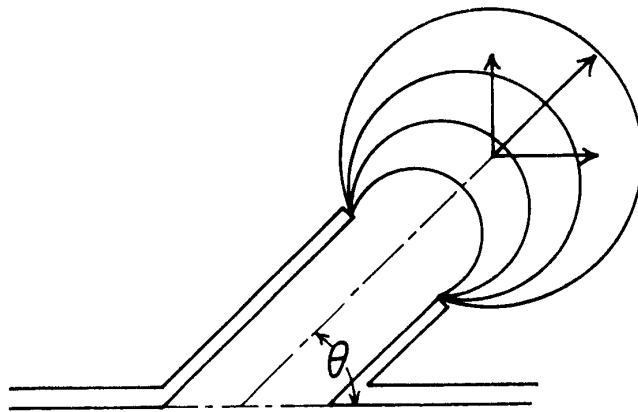


Fig. 1 Formation of a spherical bubble at an inclined orifice

て, 傾斜オリフィスに対して上述のモデルを適用する。本研究で用いたオリフィスには特殊な形状をもつものがあること, またオリフィスが傾斜している場合の接触角を一般的な形で表現することが難しいことなどのため, 表面張力の効果をHayesらのモデルと同様に扱おうことは困難である。これらのことを考慮して傾斜オリフィスで形成される気泡に対して次式のように表現する。

$$v_0 \sin \theta \frac{dm}{dt} + gV_B \Delta \rho - l\sigma - \frac{1}{2} C_D \rho_L (v \cdot \sin \theta)^2 A_f - m' \frac{d}{dt} (v \cdot \sin \theta) = \frac{d}{dt} (m \cdot v \cdot \sin \theta) \quad (1)$$

Eq. (1)の m' として Davidson ら¹⁾が使用した $(11/16)\rho_L V_B$ を用い, また $dm/dt = V_G \rho_G$, $v_0 = 4V_G/\pi d_o^2$, $A_f = \pi d_B^2/4$ である。さらに気泡の速度は $v = dr/dt$ であり, $dV_B/dt = (dV_B/dd_B)(dd_B/dt) = \pi d_B^2 (dr/dt) = V_G$ より $v = V_G/\pi d_B^2$ となる。したがって Eq. (1) は次のように変形できる。

$$V_B = (l\sigma - \phi) / g \Delta \rho (1 - \psi) \quad (2)$$

ここで

$$\phi = \frac{4V_G^2 \rho_G \sin \theta}{\pi d_o^2} \left\{ 1 - \left(\frac{1}{12} \right) \left(\frac{d_o}{d_B} \right)^2 \right\} \quad (3)$$

$$\psi = \frac{\rho_L V_G^2 \sin \theta}{12.7 g \Delta \rho d_B^5} \left(C_D \sin \theta - \frac{11}{3} \right) \quad (4)$$

Eq. (2)を用いると傾斜オリフィスで形成される気泡体積が試算法によって求められる。しかし l は表面張力の影響を表す代表長さであり, 実測値を用いて相関しなければならない。

2. 実験装置および方法

2.1 オリフィス

使用したオリフィスの形状を Fig. 2 に, 寸法を Table 1 に示している。Type A の

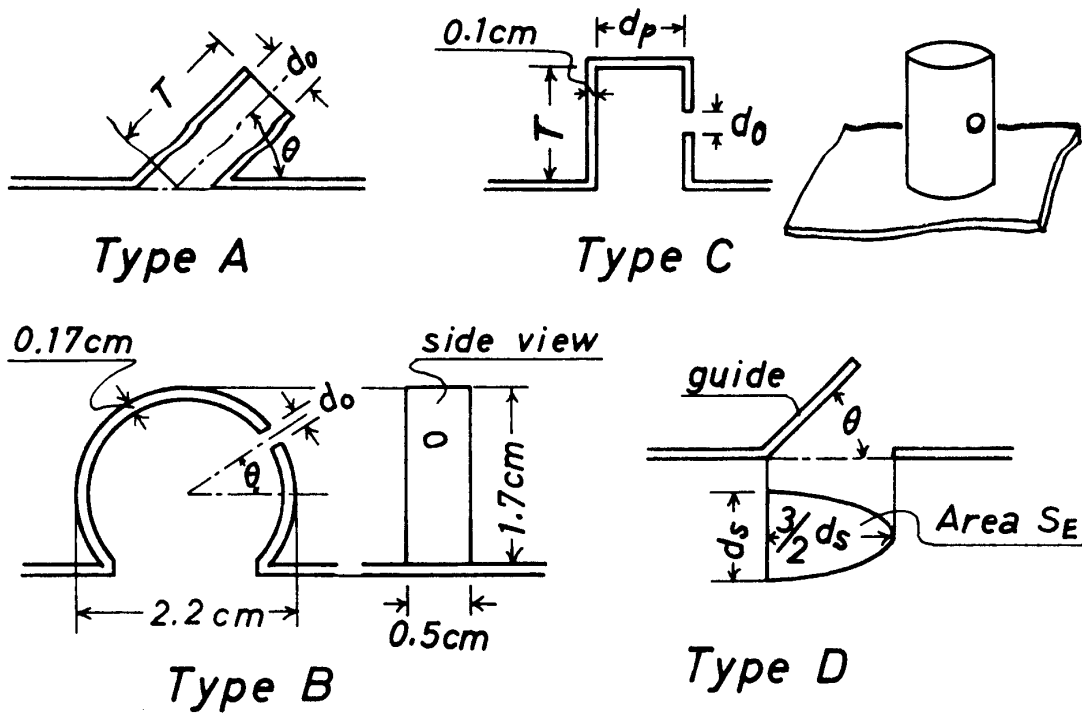


Fig. 2 Structure of orifices used

Table 1. Dimensions of orifices

Type A			Type C			
Orifice No.	d_o [cm]	T/d_o [—]	Orifice No.	d_o [cm]	d_p [cm]	T [cm]
1	0.10	8.0	1	0.20	2.0	3.0
2	0.17	1.5	2	0.30	"	"
3	"	4.1	3	"	"	10.0
4	"	8.8	4	"	3.2	3.0
5	"	17.6	5	0.40	2.0	"
6	"	35.0	6	0.60	"	"
7	0.22	9.1				
8	0.31	3.2				
9	"	9.7				
10	0.40	9.0				
11	0.60	"				

Type B			Type D		
Orifice No.	d_o [cm]		Orifice No.	d_o [cm]	d_s [cm]
1	0.10		1	0.56	0.60
2	0.16		2	0.81	0.80
3	0.21		3	0.91	0.90
4	0.27				

オリフィスはステンレスの管を真鍮板に接着したものである。傾斜角 (θ) は 0.26 rad. (15°), 0.524(30), 0.785(45), 1.047(60) および 1.571(90) に変化させ, $T/d_o=1.5\sim$

35.0である。Type B は内径 2.2 cm の真鍮管の壁に孔をあけ、図に示すように板に接着したもので $\theta=0, 0.524, 0.785, 1.047$ および 1.571 rad. で実験した。Type C は B と同じく真鍮管の壁に孔をあけたものであるが、板への接着法が異なり、図に示すように泡鐘板に似た形状をもっている。すべて $\theta=0$ である。Table 1 に示すように No. 3 および No. 4 のオリフィスで管の内径 (d_p) および長さ (T) を変えたが、この範囲ではこれらの影響が認められないことを実験によって確かめている。Type D は旋回流トレイ⁹⁾の単一孔であり、ガイドの角度を Tyde A と同じに変えた。全オリフィスを通して θ は Fig. 1 に示すように水平からの角度であり、 $d_o=0.10\sim 0.91$ cm である。

2. 2 装置および実験方法

実験装置のフローシートを Fig. 3 に示す。コンプレッサーからの空気は緩衝タンク⑧,

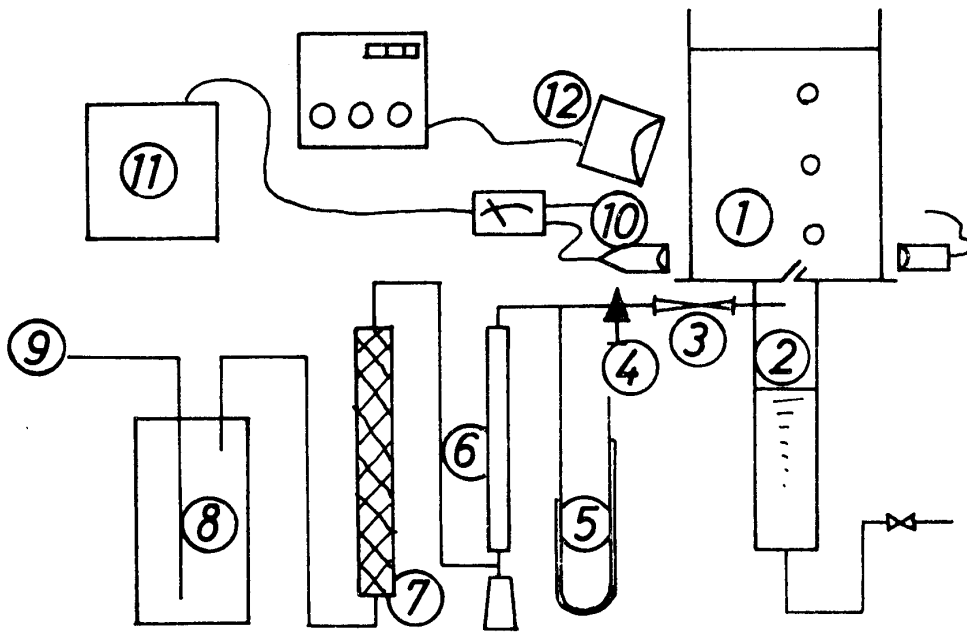


Fig. 3 Experimental apparatus

- | | | | |
|----------------|----------------|--------------------|-------------------------|
| 1. orifice | 2. gas chamber | 3. capillary | 4. needle valve |
| 5. manometer | 6. flow meter | 7. gas distributor | |
| 8. buffer tank | 9. gas supply | 10. pick up | 11. recorder |
| | | | 12. digital stroboscope |

充填層⑦を通り、脈動および空気中の油分などが除去されたのち、石ケン膜流量計⑥で流量が測定される。同時に水銀を封液としたマンメータ⑤を用いて空気の圧力が測定される。そののちニードルバルブ④およびキャピラリー③を通過して蓄気室②へ流入する。キャピラリー以後を蓄気室とみなした。蓄気室は円筒状のもので径の異なる数本を用意し、蓄気室内の水面の高さを変えることによって、その体積を $1.5\sim 700\text{cm}^3$ の範囲で変化させた。蓄気室定数 ($N_c=4V_{cpl}g/\pi d_o^2 P_c$) では $0.08\sim 30$ の範囲である。

塔は $10\times 15\times 20$ cm の大きさを持ち、オリフィス①先端からの液深は 15 cm 一定とした。

この程度の液深では気泡体積に液深の影響は現われないことが明らかになっているが³⁾、本研究でも実験によって確かめている。気泡体積はガス流量を気泡発生頻度で除して平均値を求め、すべて1気圧、25°Cにおける値として表している。発生頻度はフォトランジスター⑩を用い、気泡通過による透過光量の変化をペンレコーダー①に記録して求めた。この方法で測定できないような高ガス流量ではデジタルストロボ⑫によって測定した。これらの測定はオリフィスの先端で行っており、離脱直後の気泡を数えている。ほとんどの場合はほぼ同体積の気泡が等間隔で形成されている。

使用した液は水、グリセリン水溶液およびメタノール水溶液であり、 $\rho_L=0.781\sim 1.220$ g/cm³, $\mu_L=0.008\sim 1.04$ poise, $\sigma=22.1\sim 72.8$ dyn/cm の範囲である。

3. 実験結果および整理

3.1 実験結果とその考察

Fig. 4 は気泡体積 (V_B) におよぼすガス流量の影響に関する実験結果の一例を示した

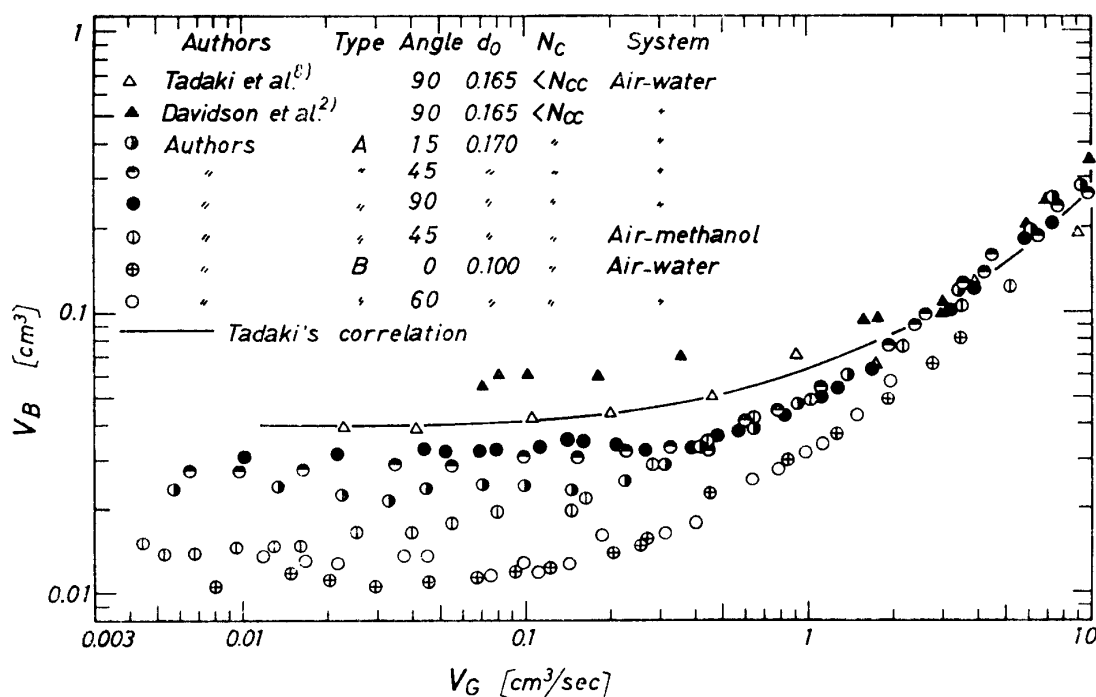


Fig. 4 Comparisons of results of present and previous works, and effects of orifice angles, type of orifice and surface tension for bubble volume

ものである。ガス流量が V_B に影響しない低ガス流量域では、Types A, B いずれのオリフィスでも傾斜角が大きくなると V_B が増大する。しかし高ガス流量域では傾斜角の影響が認められず、 V_B はガス流量に比例する。液として水およびメタノールを用いた場合の結果を比較すると低ガス流量では表面張力の値に比例して V_B が変化している。しかし高ガス流量になると表面張力の影響が認められない。また図には既往の結果との比較も示しているが、低ガス流量では Davidson ら²⁾ および只木ら⁸⁾ の $\theta=1.571(90^\circ)$ における結

果がやや大きくなるが、高ガス流量では本研究結果とよく一致する。低ガス流量では浮力と表面張力によるオリフィスへの附着力を考慮すればよいとされているが、これらを等しいと置いた式 $gV_B4\rho=C\pi d_o\sigma$ の係数 C として只木らは 1.0 を、また Siemes ら⁶⁾ は 0.8 を報告している。本研究の結果は孔径の小さい場合は Siemes らの結果にほぼ一致し、孔径の増大につれて C が大きくなって只木らの結果に一致するようになる。Fig. 4 には孔径の比較的小さい場合 ($d_o=0.17$) の結果を示しているので、低ガス流量における只木らおよび Davidson らの結果が本実験結果より大きくなっているのであろう。

Fig. 5 はガス流量が V_B に影響しない低ガス流量において、蓄気室体積 (V_C) を変化さ

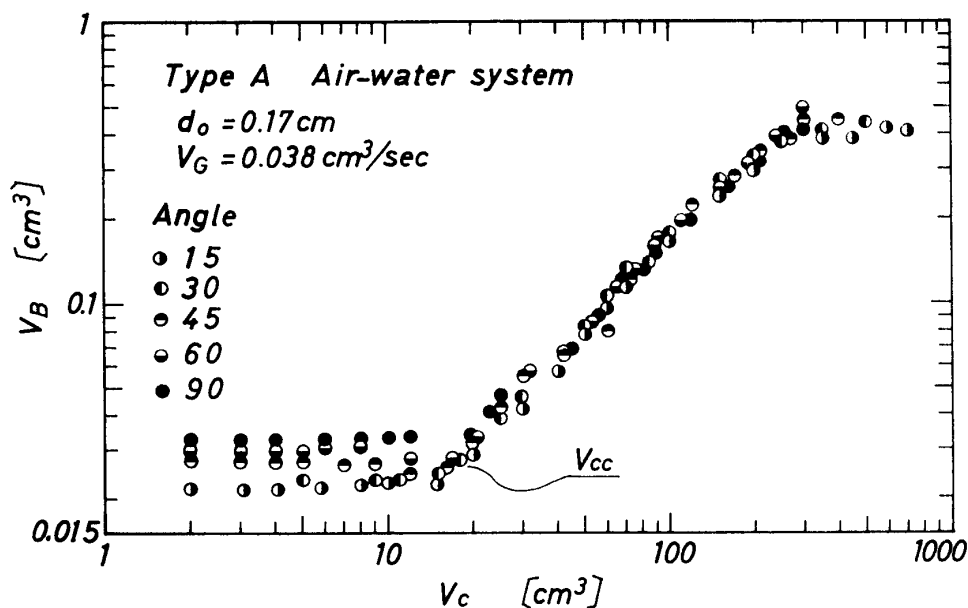


Fig. 5 Effects of V_C and θ for V_B in small gas flow rates

せたときの V_B の変化の一例を示している。 V_C の小さいときは V_B は V_C の影響を受けず、オリフィス傾斜角とともに増大する。 V_C が大きくなると、 V_B は V_C に比例するようになって傾斜角の影響が現われない。この境界を臨界蓄気室体積 (V_{Cc}) と呼ぶ。

以上より気泡体積がオリフィス傾斜角の影響を受けるのは、ガス流量の影響の現われない低ガス流量でしかも蓄気室体積の小さい領域であることが明らかとなった。高ガス流量では気泡発生頻度が大きいので気泡間で干渉が起ること、またまわりの液に循環流が起り、液の運動が気泡の形成に影響することなどによって傾斜角および表面張力の影響が認められないのであろう。この領域の気泡体積は只木らの相関式によって充分表現される。一方、蓄気室体積が大きくなると蓄気室内の圧力の変化によって放出されるガスの量 (この場合の V_B) が $gV_B4\rho=\pi d_o\sigma$ から求められる V_B より大きくなるなどのため、傾斜角の影響がやはり認められないのであろう。

3. 2 結果の整理

高ガス流量域の気泡体積は既往の研究結果⁶⁾ によって表現されるので、ここでは傾斜角

の影響の現われる低ガス流量域のみについて整理する。

オリフィス傾斜角が気泡体積に影響をおよぼさなくなるガス流量は孔径、液粘度および表面張力によって変化する。Fig. 6 はこれらの関係を示しており、次式がえられる。

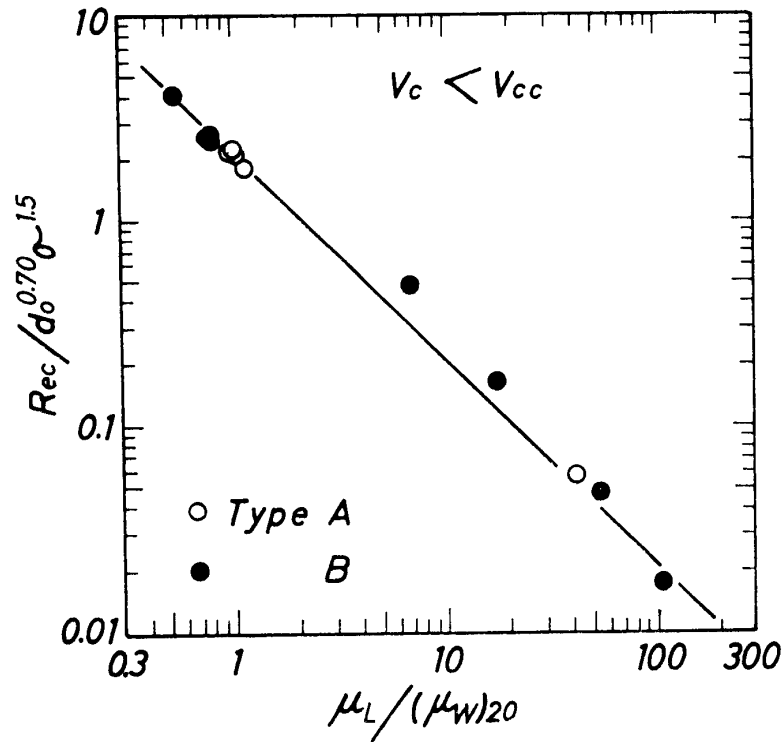


Fig. 6 Correlation of Re_c .

$$Re_c = 2.16 d_0^{0.70} \sigma^{1.5} / (\mu_L / (\mu_w)_{20}) \quad (5)$$

したがって Eq. (5) で表されるレイノルズ数以下の領域で傾斜角の影響が認められる。

蓄気室の存在する場合における気泡形成機構の観察によって、流入ガスが蓄気室に蓄積して圧力が上昇する期間（蓄積期間）と気泡が形成される期間（形成期間）のあることが明らかになっている。横山ら¹⁰⁾によれば $(d_0 \cdot v_0)$ の値が小さいほど、また V_c が大きいほど蓄積期間は長くなる傾向を持っている。したがってオリフィスを実際に通るガス流速は平均のガス流速より大きくなる。横山らの結果を用いて実際にオリフィスを通るガス流速を求め、これを使用して Re_c に近い条件 ($d_0 = 0.17$, $V_c = 0.445$ および空気-水系) において Eq. (2) の ϕ および ψ を計算すると $\phi = 0.163$, $\psi = -0.06$ となる。これより低ガス流量域においても浮力および表面張力による附着力以外の力を考慮する必要があることがわかる。

平均ガス流量を用いて実測値より Eq. (2) の l を求めたものの一例を Fig. 7 に示す。 $V_c < V_{cc}$ における結果である。ここで C_D として鋼体球に対するものを使用した。 Fig. 4 に示す V_B と同様に l は低ガス流量ではガス流量によって変化せず一定で傾斜角とともに大きくなる。そこで各傾斜角における l の平均値を求め、水平面に投影したオリフィスの周長

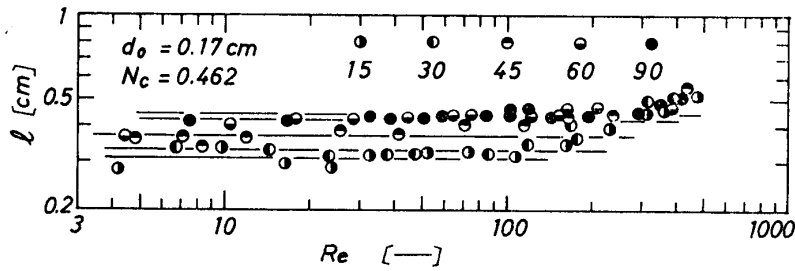


Fig. 7 Effects of Re and θ for l in type A orifice (air-water system)

R (ただし $\theta=0$ の場合は $R=2d_o$) との関係を見たのが Fig. 8 である。 $V_c < V_{cc}$ に対する結果である。各オリフィスとも多少バラついているが、直線で近似すると $l=C_1R$ とな

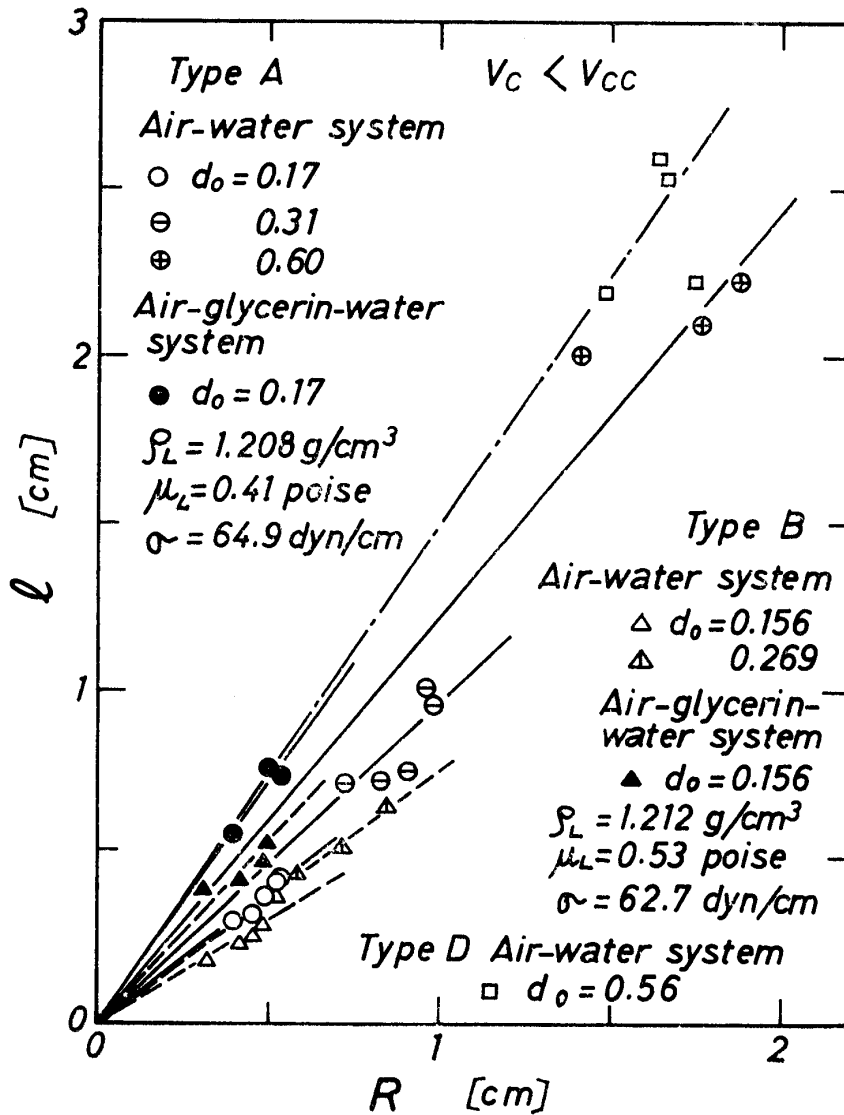


Fig. 8 Relation of l and R

り、 C_1 は傾斜角の関数とはならない。 C_1 は孔径および液粘度の関数となる。 Fig. 9 は $l/R (=C_1)$ と孔径の関係を示したものである。これらより $V_c < V_{cc}$ に対して l は

$$l = 1.50 d_o^{0.4} (\mu_L / \mu_W)_{20}^{0.13} R \tag{6}$$

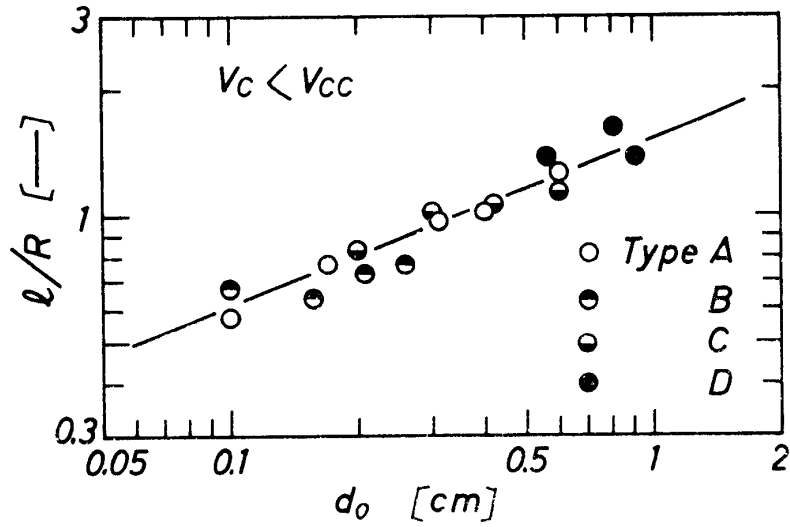


Fig. 9 Relation of (l/R) and d_o in various types of orifice

一方、気泡体積が蓄気室体積に比例し、傾斜角の影響の現われない高蓄気室体積 ($V_c < V_{cc}$) では l は次式で表される。

$$l = 2.80 d_o (\mu_L / (\mu_W)_{20})^{0.18} N_c \quad (7)$$

蓄気室体積が気泡体積に影響し始める臨界蓄気室定数 (N_{cc}) は Eqs. (6) および (7) から

$$N_{cc} = 0.536 d_o^{-0.6} (\mu_L / (\mu_W)_{20})^{-0.05} R \quad (8)$$

となり、孔径および液粘度によって変化する。

3.3 既往の結果との比較

Fig. 10 は傾斜角を変化させて実験した既往の結果を本研究の結果と比較したものであ

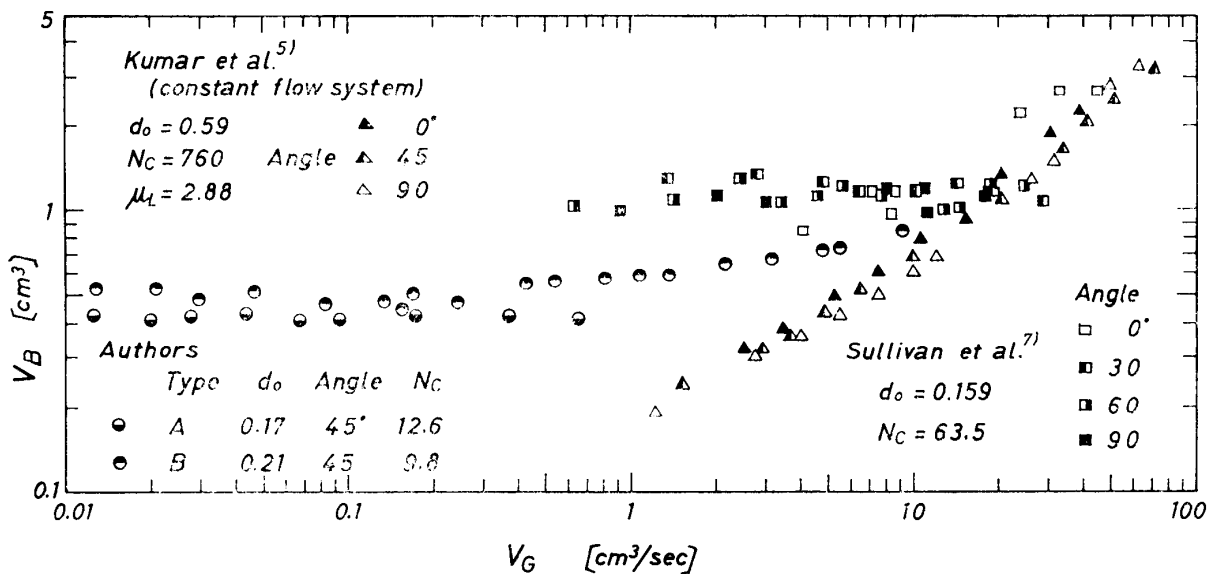


Fig. 10 Comparisons of measured bubble volume and that of previous works in air-water system (authors and Sullivan et al.) and air-aqueous glycerin system (Kumar et al.)

る。Sullivan ら⁷⁾の結果は $V_G > 10$ では一致すると思われるが, $V_G < 10$ では本研究結果より大きくなる。これは N_c が大きいためであろう。

Kumar ら⁵⁾の実験は constant flow system で, しかも液粘度の大きい条件でなされているため比較は困難であるが, 参考のため示した。また既往の研究では $V_G < 1.0$ および $N_c < 10$ における測定がなされていない。本研究の結果によれば, オリフィス傾斜角の影響が認められるのはガス流量および蓄気室体積の小さい場合である。このため高ガス流量および高蓄気室体積で実験した Sullivan らおよび Kumar らの研究では傾斜角の規則的影響は認められないという結論がえられたのであろう。

結 言

棚段上のガス分散のさいに見られる constant pressure system において, 種々の傾斜オリフィスで形成される気泡体積について主に低ガス流量域で検討し, 以下の結果をえた。

- 1) オリフィス傾斜角が気泡体積に影響をおよぼすのは低ガス流量域で, しかも蓄気室体積の小さい場合である。これらの限界の値はそれぞれ Eqs. (5)および(8)で与えられる。
- 2) 気泡体積は液粘度とともに大きくなり, 傾斜角の影響のなくなるガス流量は液粘度に比例して小さくなる。また臨界蓄気室体積は液粘度が大きくなるとわずかに小さくなる。
- 3) 液の表面張力の影響は Eq. (2)で表現でき, 傾斜角の影響のなくなるガス流量は表面張力に比例して大きくなる。
- 4) ニュートンの運動の法則を用いて気泡体積を表現する Eq. (2)を導き, 実測値を整理した。 l は蓄気室の大きさによって Eqs. (6)あるいは(7)で与えられる。
- 5) 使用した4種のオリフィスではオリフィス形状の影響は認められず, 同一の関係式で関連される。

Nomenclature

A_f : representative area of bubble	[cm ²]
C_D : drag coefficient	[—]
d_B : bubble diameter	[cm]
d_o : orifice diameter	[cm]
d_p : pipe diameter	[cm]
d_s : short diameter of type D orifice	[cm]
g : gravitational acceleration	[cm/sec ²]
l : length	[cm]
m : mass of bubble	[g]
m' : mass term for displaced fluid	[g]
N_c : chamber number ($4V_c \Delta \rho g / \pi d_o^2 p_c$)	[—]
N_{cc} : critical chamber number	[—]
P_c : static pressure in chamber	[dynes/cm ²]

R	: peripheral length of projected orifice in a plane	[cm]
Re	: Reynolds number based on orifice ($= d_o v_o \rho_L / \mu_L$)	[—]
Re_c	: critical Reynolds number	[—]
S_E	: orifice area of type D orifice	[cm ²]
T	: orifice length	[cm]
t	: time	[sec]
V_B	: bubble volume	[cm ³]
V_c	: chamber volume	[cm ³]
V_{cc}	: critical chamber volume	[cm ³]
V_G	: volumetric gas flow rate	[cm ³ /sec]
v	: bubble velocity	[cm/sec]
v_o	: gas velocity based on orifice	[cm/sec]
θ	: angle of orifice	[radian]
μ_L	: viscosity of liquid	[g/cm sec]
$(\mu_W)_{20}$: viscosity of water at 20°C	[g/cm sec]
ρ_G	: density of gas	[g/cm ³]
ρ_L	: density of liquid	[g/cm ³]
$\Delta\rho$: density difference ($\rho_L - \rho_G$)	[g/cm ³]
σ	: surface tension	[dynes/cm]

Literature cited

- 1 Davidson, J. F. and B. O. G. Schuler: Trans. Instn Chem. Engrs., **38**, 144(1960).
- 2 Davidson, L. and E. H. Amick: A. I. Ch. E. Journal, **2**, 337(1956).
- 3 Hayes, W. B., B. W. Hardy and C. D. Holland: ibid., **5**, 319(1959).
- 4 Hughes, R. R., A. E. Handlos, H. D. Evans and R. L. Maycock: Chem. Eng. Progr., **51**, 557(1955).
- 5 Kumar, R. and N. R. Kuloor: Advances in Chem. Eng., **8**, 325(1970).
- 6 Siemes, W. and J. F. Kauffmann: Chem. Eng. Sci., **5**, 127(1956).
- 7 Sullivan, S. L., B. W. Hardy and C. D. Holland: A. I. Ch. E. Journal, **10**, 848(1964).
- 8 Tadaki, T. and S. Maeda: Kagaku Kogaku (Chem. Eng., Japan), **27**, 147(1963).
- 9 Takahashi, T. and Y. Akagi: ibid., **31**, 600(1967).
- 10 Yokoyama, Y., N. Takahashi and H. Moori: Preprints for 6th Autumn Meeting of The Soc. of Chem. Eng., Japan, 93, Tokyo (1972).

Bubble Volumes Formed at Inclined Orifices

Yasuharu AKAGI, Tamiya KISHIMOTO

Department of Applied Chemistry,
Okayama University of Science
Ridai-cho, Okayama 700, Japan

Teruo TAKAHASHI and Toshiro MIYAHARA

Department of Industrial Chemistry,
Faculty of Engineering, Okayama University
Tsushimanaka, Okayama 700, Japan

(Received September 21, 1979)

The bubble formation at the inclined orifices is investigated at the constant pressure system (constant pressure supply). It is found that the gas flow rates, the orifice dimensions, the chamber volumes and the physical properties of liquid affect the bubble volume. In the regions of the low gas flow rates and the small chamber volumes, the bubble volume increases with the inclination of the orifice with respect to the horizontal. The values of critical chamber number, up to which the bubble volume do not depend upon the gas flow rates and the chamber volumes is a function of the orifice diameter and the physical properties of liquid.

By the application of Newton's second law of motion, the various forces acting on the surface of bubble are related. This model is examined by the experimental data, and the correlation with respect to the bubble volume is obtained.