高粘度液中での単一孔よりの気泡生成†

柘植秀樹・寺坂宏一・戸沢一宏・日比野真一

慶応義塾大学理工学部 応用化学科††

近年バイオテクノロジーの発展と共に、効率の良い醗酵槽あるいは培養槽の開発が進められている。好気性醗酵の際には、培養液中への酸素の供給のため気泡の吹き込みが行われるが、生成気泡容積は培養液粘度の増加と共に増大する。例えば、カナマイシンのような糸状菌の培養においては培養液の粘度は2Pa・sまで増大することが報告されている³⁾。しかしながら、このような高粘度液中での生成気泡容積に及ぼす因子の影響は明らかにされていない。

本研究では、高粘度液中への気泡吹き込み操作の基礎として、粘度が0.4~5Pa・sの高粘度ニュートン流体中におかれた単一孔より、蓄気室内の圧力変動を伴いながら生成する気泡の大きさについて実験的に調べ、無次元群による相関を行った。

実験装置および方法

実験装置の概略図をFig. 1に示す。気泡塔本体は断面0.15×0.15m、高さ0.40mのアクリル樹脂製角槽で、その外側に恒温水循環用の角槽を有する二重構造になっている。N₂ガスは流量、圧力を測定後、蓄気室を経て単一孔より、液中に気泡として連続的に生成させる。気泡生成に伴う光量変化をフォトトランジスターによって検出し、気泡発生頻度を測定した。気泡容積は等大の気泡が生成するとして、ガス流量を発生頻度で除すことにより求めた。使用液ならびに、その実測した物性の代表値をTable 1に示した。実験はガス流量1.0×10⁻⁸~2.0×10⁻⁵ m³/s、単一孔孔径0.8~2.0mm、蓄気室容積3.4×10⁻⁵~1.7×10⁻³ m³および液高0.30mで行った。

実験結果

気泡容積に及ぼす各因子の影響を実験的に検討した。

Fig. 2は気泡容積 V_b とガス流量 Q_g の関係に及ぼす液粘度の影響をみたもので、一般に低ガス流量域では気泡容積はほとんど変化しなかったが、ガス流量の増大と共に気泡容積は増大した。また、同一ガス流量で比較すると、液粘度の増大と共に気泡容積は増加した。

Fig. 3はオリフィス径 D_o の影響を示したものである。低ガス流量域では D_o の小さい方が大きい気泡を生成したが、ガス流量が大きいと D_o の影響は小さくなった。

Fig. 4は蓄気室容積 V_c の影響を示した一例で、低ガス流量域では V_c の大きい方が気泡容積は大きかったが、 Q_g の増大と共に V_c の影響は小さくなる傾向を示した。

実験結果の整理

定ガス流量条件下の生成気泡容積 V_b に關与する因子としてはガス通孔速度 u_o 、オリフィス径 D_o 、液密度 ρ_l 、液粘度 μ_l 、表面張力 σ および重力加速度 g が考えられる。次元解析により、無次元化気泡容積 $\bar{V}_b$ は次式で表される。

$$\bar{V}_b = \phi(Fr, Mo, Bo) \quad (1)$$

また、従来蓄気室容積の影響は蓄気室容積を含む無次元群である蓄気室定数 $N_c (=4V_c g \rho_l / \pi D_o^2 P_h)$ により検討されている⁷⁾ので本解析においても N_c を用い、 $\bar{V}_b$ は

$$\bar{V}_b = \phi(Fr, Mo, Bo, N_c) \quad (2)$$

で表されるとする。本解析では既往の研究を参照して、無次元化気泡容積として $\bar{V}_b B_o$ を用いる⁷⁾。

低ガス流量域で蓄気室の圧力変化を伴いながら気泡が低粘度液中で生成する場合($1 < N_c < 9$)の気泡容積 $\bar{V}_b B_{o1}$ については只木ら⁵⁾によりEq.(3)が提出されている。

$$\bar{V}_b B_{o1} = \pi N_c \quad (3)$$

Figs. 2~4に見られるように高粘度液中の低ガス流量域では気泡容積はガス流量に依らず一定値をとる。この一定値は物性のみの無次元群であるモルトン数 Mo の順になっているので、これらの実験結果を整理し、Eq.(4)を得た。本式はEq.(3)を高粘度液用に拡張した式と言える。

$$\bar{V}_b B_{o1} = 0.88 \pi N_c Mo^{0.11} \quad (4)$$

次に、生成気泡容積がガス流量の影響を受ける高ガス流量域での気泡容積について検討する。実験で得られた気泡容積からEq.(4)で計算された低ガス流量域に対応する気泡容積 $\bar{V}_b B_{o1}$ を差し引いた値 $\bar{V}_b B_{o2}$ は、気泡容積のうちガス流量の影響を受ける部分に対応する。したがって、この $\bar{V}_b B_{o2}$ はEq.(2)の次元解析で得られた因子の関数になっているとして整理すると、 $N_c = 9$ を境にしてEqs.(5), (6)が得られた。

$1 < N_c \leq 9$ では、

$$\bar{V}_b B_{o2} = 7.6 Fr^{0.37} Mo^{0.19} Bo^{0.70} N_c^{0.19} \quad (5)$$

$N_c > 9$ では、

$$\bar{V}_b B_{o2} = 11.5 Fr^{0.37} Mo^{0.19} Bo^{0.70} \quad (6)$$

さて、 $\bar{V}_b B_{o1}$ と $\bar{V}_b B_{o2}$ の和は無次元化気泡容積の推算値

† 1987年5月8日受理

†† 〒223 横浜市港北区日吉3-14-1

Table 1 Physical properties of liquids

Liquid	T_l [K]	ρ_l [kg/m ³]	μ_l [Pa·s]	σ [N/m]	Mo [—]
94wt% Glycerol	293	1.248×10^3	0.439	6.29×10^{-2}	1.18
Glycerol	298	1.257×10^3	0.820	6.24×10^{-2}	1.45×10^1
Glycerol	293	1.260×10^3	1.04	6.27×10^{-2}	3.72×10^1
Glycerol	288	1.263×10^3	1.54	6.26×10^{-2}	1.78×10^2
Corn syrup	299	1.394×10^3	5.05	6.86×10^{-2}	1.42×10^4

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

① Gas flow meter, ② Hg manometer, ③ Needle valve, ④ Gas chamber, ⑤ Single orifice, ⑥ Lamp, ⑦ Phototransistor, ⑧ Electronic counter, ⑨ Thermometer, ⑩ Bubble column, ⑪ Const. temp. bath

Fig. 2 Effect of Mo on the relation between bubble volume and gas flow rate

$\bar{V}_b Bo_{cal}$ と考えられるので, $\bar{V}_b Bo_{cal}$ を

$$\bar{V}_b Bo_{cal} = \bar{V}_b Bo_1 + \bar{V}_b Bo_2 \quad (7)$$

で定義する. Eq.(7)にEqs.(4)~(6)を代入すると

$1 < N_c \leq 9$ では,

$$\bar{V}_b Bo_{cal} = 0.88 \pi N_c Mo^{0.11} + 7.6 Fr^{0.37} Mo^{0.19} Bo^{0.70} N_c^{0.19} \quad (8)$$

$N_c > 9$ では,

$$\bar{V}_b Bo_{cal} = 0.88 \pi N_c Mo^{0.11} + 11.5 Fr^{0.37} Mo^{0.19} Bo^{0.70} \quad (9)$$

Fig. 3 Effect of orifice diameter on the relation between bubble volume and gas flow rate

Fig. 4 Effect of gas chamber volume on the relation between bubble volume and gas flow rate

となる. Figs. 2~4にはEqs. (8), (9)を用いて計算した結果を曲線で示した. Fig. 5はEqs. (8), (9)を用いて計算した $\bar{V}_b Bo_{cal}$ と実験より得られた $\bar{V}_b Bo_{exp}$ の関係を示したものでほぼ $\pm 30\%$ の範囲で相関できた.

既往の研究結果との比較

高粘度液中におかれた単一孔よりの気泡生成実験のうち蓄気室容積の影響の存在下での結果について検討する. 高橋ら⁶⁾は注射針状のノズルを使用し, $0.45 \sim 1.05 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ の液について検討している. Swope⁴⁾は本実験装置とはほぼ同様のノズルを用いているが, 液粘度が $25.0 \sim 96.0 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ と本実験よりはるかに大きい粘度範囲で実験している.

Fig. 5 Comparison of dimensionless bubble volumes obtained from experiments and correlations

Fig. 6 には高橋ら⁶⁾と Swope⁴⁾の実験結果の代表例を示したが、高橋らのデータはほぼ±30%で、Swopeのデータはほぼ±50%で相関できた。

定ガス流量条件下での実験は Davidson¹⁾, Ramakrishnan²⁾により行われている。 $N_c \leq 1$ が定ガス流量条件とされている^{5,6)}ので、Eq.(8)で $N_c=1$ として得られた Eq.(10) による計算結果と彼らの実験結果を比較すると Fig. 6 に示すごとく±30%で相関できた。

$$\bar{V}_b Bo_{cal} = 0.88 \pi Mo^{0.11} + 7.6 Fr^{0.37} Mo^{0.19} Bo^{0.70} \quad (10)$$

また、Davidson¹⁾は定ガス流量条件下で次の相関式を提出しているが、

$$\bar{V}_b Bo = 5.41 Fr^{0.375} Mo^{0.188} Bo^{0.438} \quad (11)$$

Eq.(11)の右辺の無次元群の Fr と Mo の指数をEq.(10)の右辺第2項の Fr , Mo の指数と比べるとよく一致していることがわかる。なお、本相関式、Eqs.(8), (9)の適用範囲は $1.2 < Mo < 1.4 \times 10^4$, $0.13 < Bo < 0.82$, $1 < N_c < 64$, $1.0 \times 10^{-3} < Fr < 1.8 \times 10^5$ である。

結言

高粘度ニュートン流体中におかれた単一孔より、蓄気室内の圧力変動を伴いながら連続的に気泡を生成させた場合の気泡容積を無次元群で相関し、Eqs.(8), (9)により実験結果を±30%で整理できた。また、本相関により既往の研究結果もほぼ±30%の範囲で整理できた。得られた相関式により広い粘度範囲にわたって単一孔よりの気泡生成容積を推定することができる。

Fig. 6 Comparison of dimensionless bubble volumes obtained from reference data and correlations

Nomenclature

Bo = Bond number, $D_o^2 g \rho_l / \sigma$	[-]
D_o = orifice diameter	[m]
Fr = Froude number, $u_o^2 / D_o g$	[-]
g = gravitational acceleration	[m/s ²]
Mo = dimensionless physical property of liquid, $g \mu_l^4 / \rho_l \sigma^3$	[-]
N_c = capacitance number, $4V_c g \rho_l / \pi D_o^2 P_h$	[-]
P_h = pressure at orifice plate	[Pa]
Q_g = average gas flow rate	[m ³ /s]
u_o = gas superficial velocity through orifice	[m/s]
V_b = bubble volume	[m ³]
$\bar{V}_b$ = dimensionless bubble volume, V_b / D_o^3	[-]
V_c = gas chamber volume	[m ³]

μ = viscosity	[Pa·s]
ρ = density	[kg/m ³]
σ = surface tension	[N/m]

<Subscripts>

cal	= calculated value from the correlation equations
exp	= experimental data
l	= liquid
ref	= reference data

Literature cited

- 1) Davidson, J.F. and B.O.G. Schüler : *Trans. Instn. Chem. Engrs.*, **38**, 144 (1960)
- 2) Ramakrishnan, S., R. Kumar and N.R. Kuloor : *ibid.*, **24**, 731 (1969)
- 3) Sato, K. : *J. Ferment. Technol.*, **39**, 347 (1961)
- 4) Swope, R.D. : *Can. J. Chem. Eng.*, **24**, 1711 (1969)
- 5) Tadaki, T. and S. Maeda : *Kagaku Kōgaku*, **27**, 147 (1963)
- 6) Takahashi, T. and T. Miyahara : *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **5**, 453 (1979)
- 7) Tsuge, H. : "Encyclopedia of Fluid mechanics", Vol. 3, p 193, Gulf Publishing Co. (1986)

Bubble Formation from an Orifice Submerged in Highly Viscous Liquids

Hideki Tsuge, Koichi Terasaka, Kazuhiro Tozawa
and Shin-ichi Hibino

Dept. of Applied Chem., Keio Univ., Yokohama 223

Key Words : Bubble, Bubble Formation, Bubble Column, Highly Viscous Liquid, Newtonian Liquid

The effects of various factors such as liquid viscosity, gas chamber volume, orifice diameter and gas flow rate on the volume of bubbles formed in highly viscous Newtonian liquids in the presence of pressure change in the gas chamber were investigated experimentally. Dimensionless equations were obtained by correlating these experimental results. The experimental results of previous works were also correlated by these dimensionless equations. It becomes possible to predict the bubble volume over a wide range of liquid viscosities by these correlation equations.