

単一孔から発生する気泡の性状と分布特性について

EXPERIMENTAL STUDIES ON THE BEHAVIOR AND
CHARACTERISTICS OF AIR BUBBLES FROM A SINGLE ORIFICE

松本 順一郎*・中村 玄正**

By Junichiro MATSUMOTO and Michimasa NAKAMURA

1. はじめに

エアレーションタンク内に発生する気泡群は、タンク内の活性汚泥混合液に流動を与え、かつ、混合液中の好気性微生物群に酸素を供給するという重要な役割を果している。そのため、活性汚泥法におけるエアレーション操作に関しては、古くから酸素の収支という観点から、供給する側としての酸素移動特性^{1)~4)}と、消費する側からの活性汚泥の呼吸速度活性⁵⁾の両面からの研究が行われてきており、また一方では、エアレーションタンク内における流動や混合特性を究明^{6)~7)}することにより、活性汚泥法の浄化機構を解明しようとする研究が行われてきている。

しかしながら、これらの研究においては、気泡がエアレーション機構の中心的存在であるにもかかわらず、気液流動状態における気泡の特性が複雑であるため、個々の気泡の特性や気泡相互の干渉作用等には言及しないままに、総括的指標として空気流量やタンク体積当りの空気吹込量が用いられているに過ぎない。これは、柏谷ら⁸⁾や宗宮ら⁹⁾の研究にみられるように、気泡発生装置が多孔質性の焼結散気盤であるため、気泡発生孔径そのものに広い分布がみられ、これらの装置から発生する気泡径には広いばらつきがあり、個々の気泡の性状や挙動を定量的に説明することが困難なことによるものであろう。エアレーションタンクの気泡群の挙動を推定し、気泡群の性質を明らかにし、エアレーション機構を解明していくためには、気泡の運動特性や物質移動特性等の基礎的研究の蓄積が必要と考えられる。

水中における気泡の挙動や性状については、静止水中における単一気泡に関する研究がほとんどであり、エアレーション時の場合のように、Bubble Flow (気泡流動

層)として定義される範囲の気泡群の挙動・性状に関する研究報告はきわめて少ない^{10), 11)}。

本報告では、単一孔から水中に連続的に発生する気泡の物理的生成機構と、カラム内に生成された気泡が群上昇する場合の、気泡の性状・挙動を解明することを目的として実験を行い、気泡群の複雑分布にみられる気泡生成の機構や、群上昇する場合の気泡の上昇速度や形状等に関して、実験的にいくつかの基礎的知見を得たので、若干の考察を加えて報告するものである。

2. 実験装置と実験方法

図-1 に実験装置の概略を示している。観察に使用しているエアレーションカラムは、内径 140 mm、高さ 1200 mm のパイレックスガラス製円筒で、蒸留水を満たしている。Gは、カラムH内に発生する気泡を写真撮影するとき、ガラス円筒によるレンズ効果を防ぎ、また、カラム内の水温変化を防ぐための両面ガラス製角型水槽である。カラム底部には、孔径 $\phi=0.010\sim 0.120$ cm のガラス製単孔気泡発生装置Fを設置している。

ロータリーコンプレッサーAによって圧縮された空気

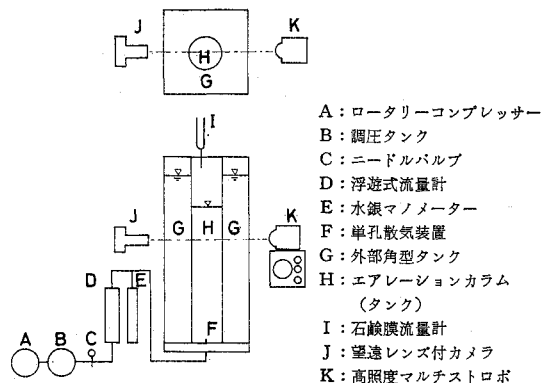


図-1 実験装置

* 正会員 工博 東北大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工修 日本大学講師 工学部土木工学科

表一 実験条件と蒸留水の物理的性質

1. 実験条件					
実験 No.	気泡発生孔径 δ (cm)	空気流量 G_s (cm ³ /sec)	孔での空気速度 u_c (cm/sec)	孔での空気のレイノルズ数 Re_c (-)	ガス(気泡)の空塔速度 u_{GT} (cm/sec)
A	0.010	0.158~1.657	2020~21100	148~789	0.00103~0.01076
B	0.020	0.423~4.802	1350~15280	197~2485	0.00275~0.03120
C	0.031	0.576~14.84	810~20990	178~3882	0.00374~0.09640
D	0.060	0.430~18.00	152~6370	67~2872	0.00279~0.1169
E	0.089	0.413~15.96	82~3170	54~2116	0.00268~0.1037
F	0.120	1.82~19.78	161~1750	141~1543	0.01180~0.1285

2. 蒸留水の物理的性質¹²⁾

水 温 t	18.0~23.5°C
密 度 ρ_L	0.999~0.998 g/cm ³
粘 性 係 数 μ_L	$1.06 \times 10^{-2} \sim 0.960 \times 10^{-2}$ g/cm ² ·sec
動粘性係数 ν_L	$1.06 \times 10^{-2} \sim 0.962 \times 10^{-2}$ cm ² /sec
表面張力 σ_L	73.1~72.4 dyn/cm
酸素の拡散係数 D_L	$1.90 \times 10^{-5} \sim 2.16 \times 10^{-5}$ cm ² /sec

は、圧力調整室Bで圧力調整され、ニードルバルブCで空気流量 G_s を調節されたのち、浮遊式流量計D、水銀圧力計Eを経て、気泡発生孔Fより気泡となって水中を上昇する。空気流量 G_s は石鹸膜流量測定法によって求めている。

気泡の形状や大きさ、上昇速度等は、高照度マルチストロボ(S社製 PS-240)を0.04秒間隔で発光させ、これと連動する150mm望遠レンズ付一眼レフカメラによって、カラム内の気泡を写真撮影し、得られたフィルムをスクリーン上に約2倍に拡大投影して、おのおのの気泡についての2個ないし4個の像の長径・短径、移動距離をノギスによって測定し、おのおのの気泡の平均長径、平均短径、上昇速度として求めている。この場合、気泡の挙動による液の流れが生じているため、気泡の上昇速度はみかけの上昇速度となっている。気泡撮影の位置は水深60cmの位置であり、単一気泡の場合には、ほぼ気泡の上昇速度は終速度に達していると考えられる位置である。

なお、気泡の挙動や性状を調べるとき、界面活性が大きな問題となる。本実験において用いた液体は、市販の蒸留水であり、装置的な問題から、汚染系での実験結果と考えられる。

また、本実験の範囲は、気泡流動層と定義される範囲であり、気泡上昇時における気泡の合体や分裂の現象はほとんどみられていない。

3. 実験結果と考察

(1) 気泡算定の近似式

写真-1はおのおの実験条件下における気泡の写真の一例である。これらの写真や観察から、孔径 $\delta = 0.010$ cm~0.120 cmの単一孔から連続発生し、カラム内の水

中を上昇する気泡の形状は、ほぼ球形もしくは回転楕円体の形状を示し、キノコの笠状を呈するものはきわめて少ないことが確認されている。

以上のことから、筆者らは、気泡の大きさを算定するにあたり、表-2に示すような算定式を近似式として用いている。なお、表中、気泡のレイノルズ数 Re_c に関する項目は、これまでの研究者^{13),14)}によって明らかにされている範囲を示すものである。

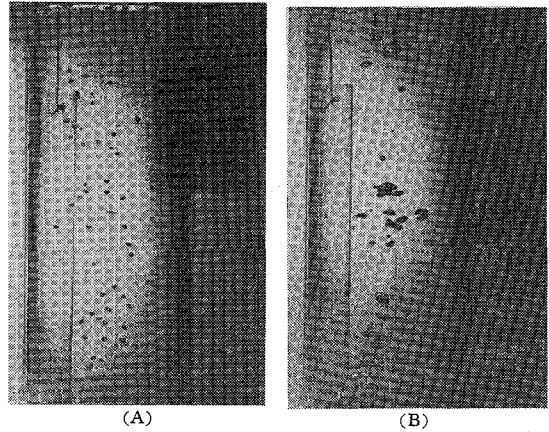


写真-1 気泡の形状

(2) 気泡の性状と挙動

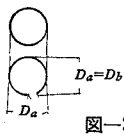
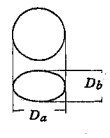
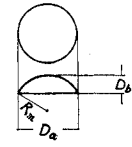
a) 気泡の上昇速度

静止液中における単一気泡については、Haberman¹³⁾ら、只木ら¹⁴⁾、久保田ら¹⁰⁾などにより研究が進められ、上昇速度や抵抗係数、レイノルズ数などを中心とした挙動の特性が明らかにされてきている。

本実験の場合、気泡はカラム内に連続的に発生されているため、カラム内の水は気泡群のエアリフト効果などにより複雑に運動するようになり、気泡の上昇経路や上昇速度は、これら水の運動や気泡相互の運動の影響を受けるため、いっそう複雑となり、気泡の挙動を定量的に示すには、数多くの実測値を得て、これらを平均的に処理することが必要となる。

図-2は、カラム断面積あたりの空気流量、すなわち空塔速度 u_{GT} が0.010~0.011 cm/secのときの気泡径 D_b と上昇速度 u_b の関係を例示しているものである。気泡発生孔径 δ が0.010 cmの場合、発生する気泡は、球相当気泡直径(気泡径)として0.1~0.3 cmであり、

表-2 気泡の算定

気泡の形状	球形気泡	回転楕円体気泡	キノコ笠状気泡
気泡の大きさ	0.2cm 以下	0.2~1.8 cm	1.8 cm 以上
気泡のレイノルズ数	¹³⁾⁻¹⁶⁾ $R_e \ll 1$	$1 < R_e < 5000$	$5000 < R_e$
模 式 図	 図-2	 図-3	 図-4
体 積 V_b	$V_b = \frac{\pi}{6} D_b^3 = \frac{\pi}{6} D_a^3$ (1)	$V_b = \frac{\pi}{6} D_a^2 \cdot D_b = \frac{\pi}{6} D_b^3$ (4)	$V_b = \frac{\pi D_b^2}{3} (3R - D_b)$ $= \frac{\pi D_b^3}{24} (3D_a^2 + 4D_b^2)$ (8)
表 面 積 s_b	$s_b = \pi D_a^2 = \pi D_b^2$ (2)	$s_b = \frac{\pi}{2} D_a^2 + \frac{\pi}{4} \cdot \frac{D_b^2}{e}$ $\cdot \ln \frac{1+e}{1-e}$ (5)	$s_b = \pi \left(2R D_b + \frac{D_b^2}{4} \right)$ $= \pi \left(D_b^2 + \frac{D_a^2}{2} \right)$ (9)
球体積相当直径 D_v	$D_v = D_a = D_b$ (3)	$D_v = (D_a^3 \cdot D_b)^{1/3}$ (6)	$D_v = \left(\frac{D_b}{4} (3D_a^2 + 4D_b^2) \right)^{1/3}$ (10)
注		$e = \left(\frac{D_a^2 - D_b^2}{D_a^2} \right)^{1/2}$ (7)	

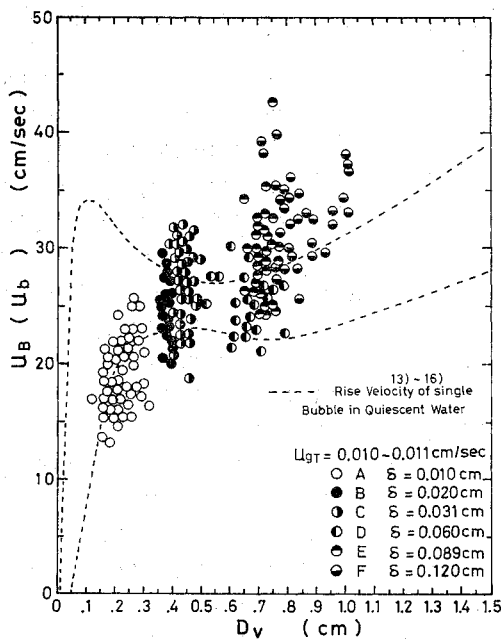


図-2 気泡径と気泡上昇速度

その上昇速度は 11~25 cm/sec であるが、気泡発生孔径 δ が 0.089 cm の場合、気泡径は 0.6~0.9 cm であり、上昇速度は 25~40 cm/sec の範囲であって、図中の破線で示される静止水中の単一気泡の上昇速度の実測値¹³⁾⁻¹⁶⁾と比較して、気泡径が小さい場合には、上昇速度はやや小さく、気泡径が大きい場合には、やや大きな値が示されている。これは、気泡径が小さい場合には、気泡相互の相対距離が大きく、また、後流の発達が少ないため、気泡の上昇速度はあまり大きくならないが、気泡径

が大きくなると、固有の上昇速度が大となるとともに、気泡相互の相対距離が小となり、後流の発達とともに、後流して上昇する気泡の上昇速度が大になることによるものと考えられる。すなわち、気泡径の大きい気泡が群上昇をする場合、前方(上方)を上昇する気泡によって生じる後流の乱流により、後流して上昇する気泡の表面での抵抗が減少するものと考えられる。

空塔速度すなわちカラム断面積当りの空気流量の大きさや、気泡発生孔径の大小等によって、カラム内に存在する気泡の個数や気泡径が異なり、また槽内の水の流速変化、気液混相流の発達の大きさ¹⁷⁾、気泡後流の大きさ¹⁸⁾が変化し、これらの影響を受けて、気泡群の平均上昇速度が変化することから、空塔速度 u_{gT} に対し、気泡発生孔径 δ をパラメーターとして気泡群の平均上昇速度 u_b の関係を図示したのが図-3 であり、実験の範囲内(空塔速度 $u_{gT} = 0.002 \sim 0.140$ cm/sec)では、

$$\bar{u}_b = 68.2 \delta^{0.15} \cdot u_{gT}^{0.10} \dots\dots\dots (11)$$

の関係式によって、空塔速度、気泡発生孔径と気泡群の平均上昇速度の関係が示されている。

b) 気泡のレイノルズ数と抵抗係数

静止液中を上昇する単一気泡の場合、気泡の挙動に関する因子としては、式(12)に示すものが考えられ、これを次元解析で整理すれば式(13)で示される。

$$f(u_b, D_v, \rho_L, \mu_L, \sigma_L, g) = 0 \dots\dots\dots (12)$$

$$f(C_D, R_e, M_L) = 0 \dots\dots\dots (13)$$

一方、静止液中を単一気泡が上昇する場合、上昇速度がほぼ定速度になったとすると、気泡を球と仮定すれば、浮力と抵抗のつり合いから、

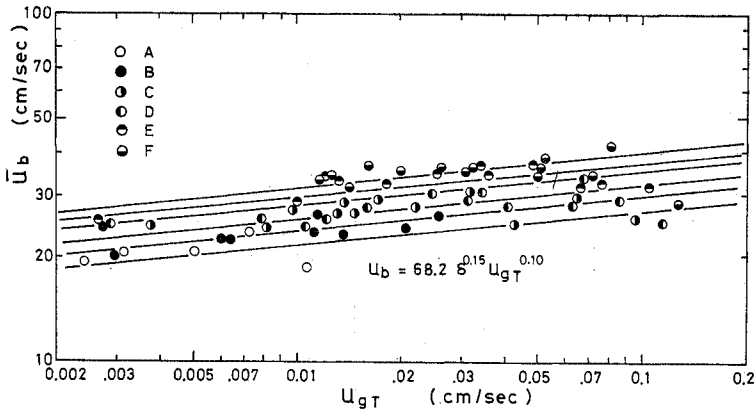


図-3 気泡群の平均上昇速度

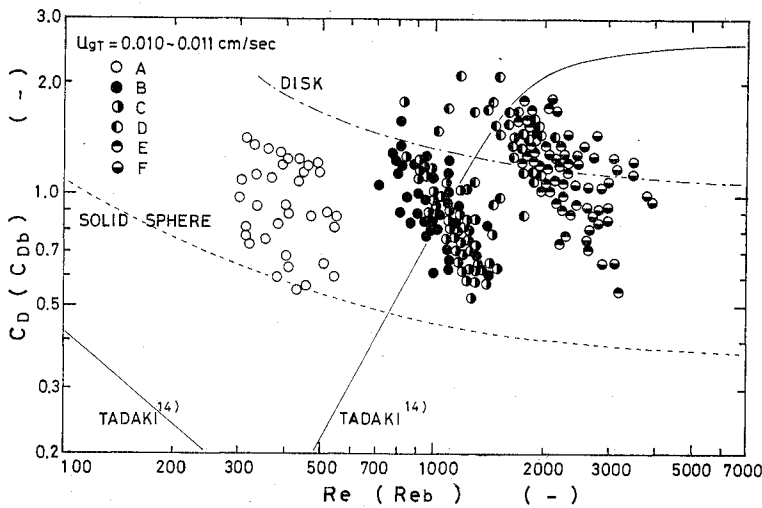


図-4 気泡群のレイノルズ数と抵抗係数

$$\frac{\pi}{6} D_v^3 \cdot \Delta \rho \cdot g = \frac{\pi}{8} \cdot C_D \cdot u_b^2 \cdot \rho_L \cdot D_v^2 \quad \dots\dots (14)$$

より,

$$C_D = \frac{4}{3} \cdot \frac{D_v \cdot \Delta \rho}{u_b^2 \cdot \rho_L} \cdot g \quad \dots\dots (15)$$

$$R_e = \frac{D_v \cdot u_b \cdot \rho_L}{\mu_L} = \frac{D_v \cdot u_b}{\nu_L} \quad \dots\dots (16)$$

が与えられる。

図-4は、空塔速度 $u_{gT} = 0.010 \sim 0.011$ cm/sec, 気泡発生孔径 $\delta = 0.010 \sim 0.120$ cm の条件下で、カラム内を連続上昇する気泡の抵抗係数 C_{Db} とレイノルズ数 R_{eb} の関係を、単一気泡の場合に準じて、例示しているものである。図中細線で示される静止水中の単一気泡の場合¹⁴⁾に比較すると、気泡径が小さく、レイノルズ数が小さい場合には、群気泡で上昇するときの方が抵抗係数は大きく示され、気泡径が大きく、レイノルズ数が大きい場合には、逆に群気泡で上昇するときの方が抵抗係数は小さくなっている。これは、気泡径が小さい場合には、気泡固有の上昇速度は小さく、また、カラム内に散在す

る気泡間の相対距離が大きいことや、レイノルズ数が小さいことから気泡後流の発達が小さいことなどにより連続上昇する気泡の相互干渉の影響は小さく、みかけの抵抗係数は大きくなること、一方、気泡径が大きい場合には、気泡固有の上昇速度が大になるとともに、気泡相互の相対距離が小さくなり、また、レイノルズ数が大きくなって気泡の後流が発達し、後続して上昇する気泡のみかけの抵抗係数は、静止水中の単一気泡の場合に比較して小さくなることによるものであろう。

一般に、気泡が小さく、球形で液中を上昇する場合¹³⁾、粘性の影響が大きく、気泡の周囲の流れは剥離を生じない。気泡がこれより大きくなって回転楕円体状になると、流れに剥離が生じ、後方に液の同伴後流の発達一がみられるようになる。これを気泡のレイノルズ数で考えると、レイノルズ数が500より大になると、気泡背後の領域では周囲の流れとは異なった乱流の状態がみられるようになる。

後続して上昇する気泡がこの後流領域に入ると、みかけの抵抗係数は小さくになると考えられる。

本結果においては、気泡の相互干渉、ことに連続上昇する気泡群の後流の領域や、その影響範囲について定量的に説明できていない。気泡群の後流の影響を明らかにすることによって、散気装置の配列、粗粒(気泡)曝気や細粒(気泡)曝気の考え方に一つの方向性を提示できるものと考えられ、今後の研究の課題としたい。

c) 気泡の形状

回転楕円体状を呈する気泡は、水中を変形しながら上昇する。この変形の尺度として、しばしば偏平率 $E_e = D_b/D_a$, または $E_e' = D_v/D_a$ が使われている。

気泡の運動状態と偏平率との関係を考察するために、気泡上昇時のレイノルズ数 R_{eb} と偏平率 E_e の関係を示したのが図-5である。この場合の偏平率 E_e は、1個の気泡の連続像4個または2個の平均値を代表 E_e としている。また、気泡の上昇速度 u_b は、気泡群によって誘起された水の流速を含むみかけの上昇速度であるた

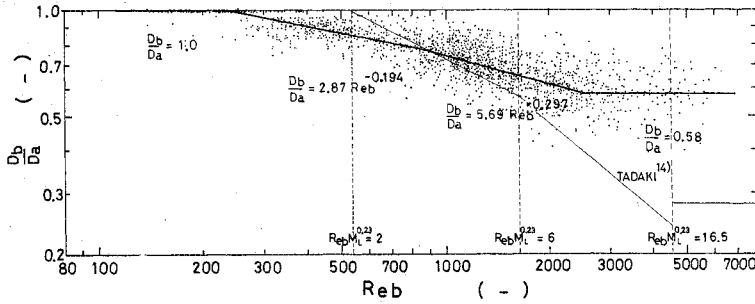


図-5 気泡のレイノルズ数と偏平率

め、静止水中の上昇速度よりもいくらか大きな値となっている。図-5より、気泡のレイノルズ数 R_{eb} が小さい場合には、偏平率 E_e はほぼ1に近く球に近い形状が示されるが、レイノルズ数 R_{eb} が大きくなるにつれて、偏平率 E_e は徐々に小さくなり、球形から次第に楕円体状を呈するようになることがわかる。すなわち、

$$R_{eb} < 250 \quad E_e = \frac{D_b}{D_a} \approx 1.0 \dots (17)$$

$$250 < R_{eb} < 900 \quad E_e = 2.87 R_{eb}^{-0.194} \dots (18)$$

$$900 < R_{eb} < 2500 \quad E_e = 5.69 R_{eb}^{-0.297} \dots (19)$$

$$2500 < R_{eb} \quad E_e \approx 0.58 \dots (20)$$

で示される。レイノルズ数がさらに大きくなった場合については、実験の範囲外であるため推察の域を出ないが、いわゆるキノコの笠状気泡となって、偏平率 E_e は一定値に近いものと思われる。この形状の変化について、只木ら¹⁴⁾は、液の物性の影響を考慮して、静止液中を上昇する単一気泡に対し、

球形気泡

$$R_e \cdot M_L^{0.23} < 2 \quad E_e \approx 1.0 \dots (21)$$

楕円体状気泡

$$2 < R_e \cdot M_L^{0.23} < 6 \quad E_e = 1.48 (R_e \cdot M_L^{0.23})^{-0.528} \dots (22)$$

$$6 < R_e \cdot M_L^{0.23} < 16.5 \quad E_e = 2.52 (R_e \cdot M_L^{0.23})^{-0.84} \dots (23)$$

キノコ笠状気泡

$$16.5 < R_e \cdot M_L^{0.23} \quad E_e = 0.287 \dots (24)$$

を提案している。

本研究の場合、使用している液体は、約 20°C の蒸留水のみであり、 M_L 値 ($=g \cdot \mu_L^4 / \rho_L \cdot \sigma_L^3$) は 2.62×10^{-11} であり、 $M_L^{0.23}$ は 0.00368 となる。これより、 $R_e \cdot M_L^{0.23}$ が 2, 6, 16.5 に対応するレイノルズ数はそれぞれ、540, 1630, 4470 となり、只木らの物性因子を考慮した結果を図-5中の破線で比較している。これより、本研究のように気泡が群をなして上昇する場合の方が、静止液中の単一気泡の場合よりも偏平率が大きく、

より球に近い状態で上昇していることがわかる。

このように、只木らの結果との間に相違が生じている理由としては、前項で述べた気泡後流の影響が考えられる。すなわち、只木らの結果がレイノルズ数の大きいところで偏平率が小さくなっているのは、静止液中における単一気泡の上昇現象であるため、気泡が上

昇するにあたり流体抵抗が大きく、気泡の前部と後部の圧力差が大きく気泡後部で剥離を生じ、気泡の形状変化が大きくなっていることによるものであろう。一方、筆者らの実験では、気泡は気泡発生孔より連続発生している。この場合、前方を上昇する気泡背後には周囲の流体よりも速度の大きい渦流領域(後流領域)が形成され、後続する気泡がこの領域を連続上昇することにより後続気泡の前部と後部の圧力差は単一気泡の場合に比し小さくなり、気泡の偏平率はやや大きくなっているものと思われる。また、装置的な問題から、筆者らの実験は汚染系と考えられ、気泡が変形しにくくなっていることも一つの理由であろう¹⁵⁾。

このように、気泡が群上昇する場合には、気泡径 D_b が 1.5 cm 程度までは、偏平率が 1~0.6 程度であることがわかった。エアレーションタンクにおいても、気泡はかなりの密度でタンク内を群上昇しているものと考えられる。本研究では物性の影響を明らかにできなかったが、今後、物性値や気泡の相互干渉が偏平率に及ぼす影響を明らかにする必要がある。

d) 気泡の体積と表面積

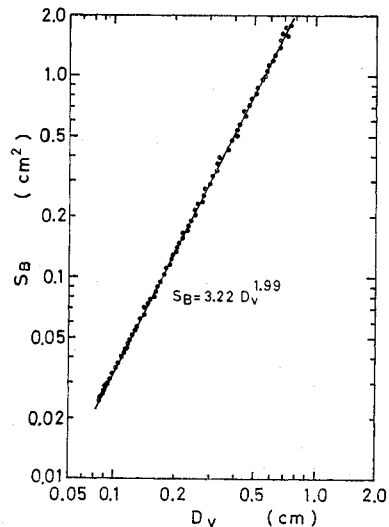


図-6 気泡径と気泡表面積の関係

前項までに考察しているように、本実験において観察された気泡は、球形ないし回転楕円体とみなすことができる。そこで、写真測定によって得られた気泡の長径 D_a および短径 D_b から、気泡の体積 v_B を求め、

$$v_B = 0.524 D_p^{3.00} \dots\dots\dots (25)$$

とし、式(1)~(10)に基づいて気泡の球体積相当径 D_b に対し、気泡の表面積 s_B の関係を示したのが図-6であり、実験式として、

$$s_B = 3.22 D_b^{1.99} \dots\dots\dots (26)$$

が得られている。したがって、気泡の気液接触界面積を求めようとする場合、気泡を単に球形とみなすと、 $D_b = 0.5 \sim 1.0$ cm 程度の回転楕円体気泡では、表面積で 3~10% 程度過小評価するようになる。

(3) 単一孔より発生する気泡の分布

a) 単一孔における空気流速と発生気泡径

図-7 は気泡発生孔を通過する空気流速と水中に発生する気泡の平均径との関係を示したものである。この図からわかるように、気泡の生成機構は、発生孔における空気流速により、

- ① 静力学的気泡の生成——空気流速に関係なく一定の径の大きさの気泡の生成
- ② 連続的に緩やかな気泡の生成——空気流速がやや大になると、発生個数はあまり変化せず、気泡径が大となる範囲
- ③ 連続的に速やかな気泡の生成——空気流速が大であり、生成気泡は空気流速に無関係となって、大小種々な気泡が生成される範囲

の3つの範囲に分けることができる^{20)~23)}。

図-7 は、このような考え方にしたがって、筆者らの測定した気泡の生成状況を概略的に示したものであり、気泡発生孔径 $\delta = 0.089$ cm の場合、空気流速が 250 cm/sec までは、空気流速に関係せず気泡径 \bar{D}_b が 0.62 cm の気泡が発生し、空気流速が大になるとともに \bar{D}_b はやや大きくなって 0.65~0.75 cm となる。さらに、空気流速が 1200 cm/sec 以上では \bar{D}_b は逆に小さくなり

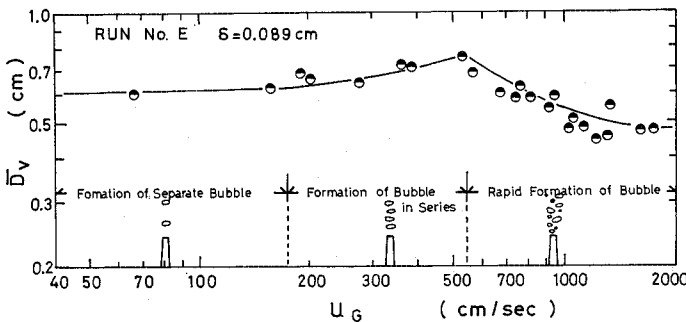


図-7 空気流速と発生気泡平均径

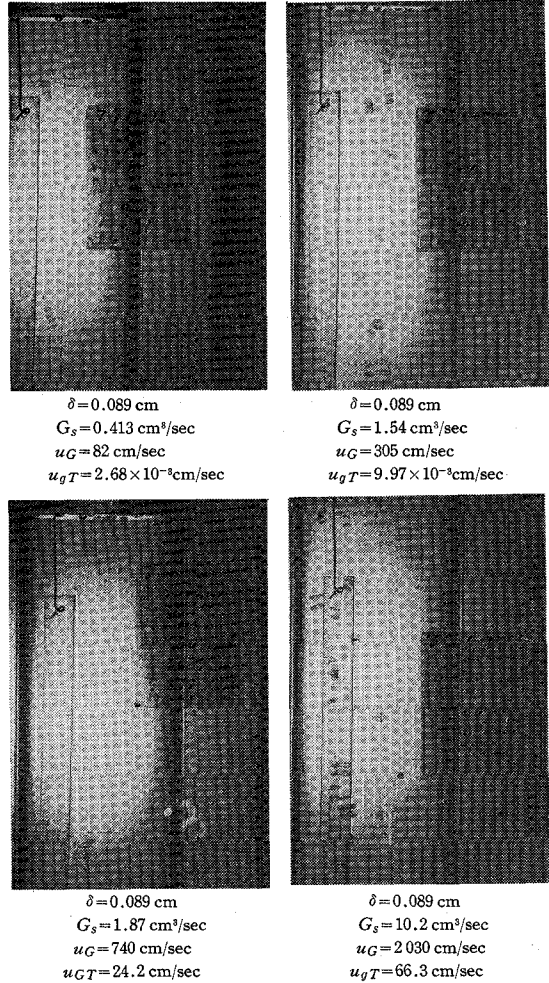


写真-2 気泡の分布例

0.45~0.55 cm となっている。

写真-2 は気泡の写真の例であり、図-8 は、気泡径 D_b と発生気泡個数の度数頻度 $n/\Sigma n$ の関係を、発生孔径 $\delta = 0.089$ cm の場合について柱状図で示したものである。空気流速が比較的小さい場合には、 $\bar{D}_b = 0.66$ cm を中心とした気泡が発生し、その分布範囲は狭い。空気流速が徐々に大きくなるにしたがって、 \bar{D}_b は徐々に大きくなり、分布範囲もやや広がってくる。さらに空気流速が大きくなると ($u_G > 1200$ cm/sec)、空気流速が小さい場合の平均径を中心とした気泡群(孔径相応気泡群)と付随的に発生する小気泡群の2つのグループが同時に混在し、空気流速の増大とともに、小細気泡群の発生頻度がきわめて大きくなっていく。

b) 空気流速の小さい場合の気泡径分

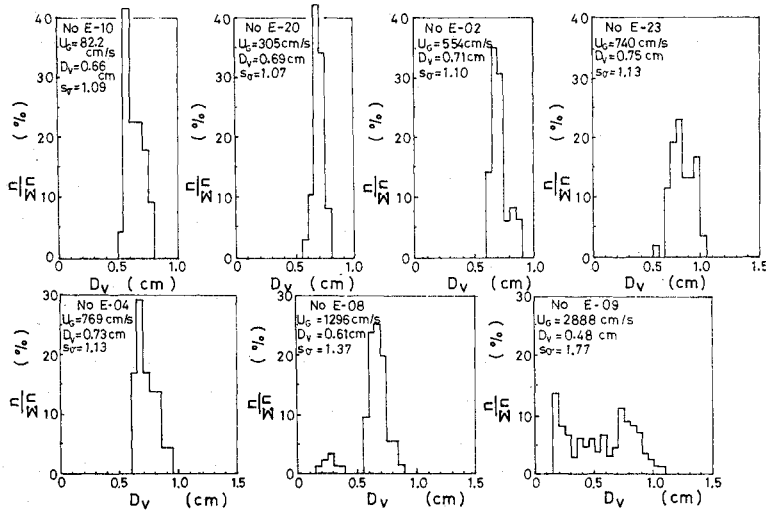


図-8 気泡径分布の変化

布

図-9 は、空気流速が比較的小さい場合の各孔径から発生する気泡の球相当体積径（気泡径） D_v と個数頻度の関係を柱状図で示しているものであり、発生孔径 δ が 0.010, 0.020, 0.031, 0.060, 0.089, 0.120 cm の場合、それぞれ 0.28, 0.36, 0.41, 0.67, 0.68, 0.76 cm の気泡が中心となって発生し、その分布範囲も狭い。図-10 は、これらの分布を対数確率紙上に点綴したものであり、ほぼ直線とみなすことが可能である。

したがって、空気流速の小さい場合、発生する気泡はほぼ対数正規分布にしたがうと言えよう^{23), 24)}。すなわち、

$$\frac{n}{\sum n} = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \log S_g} \exp \left[\frac{-(\log D_v - \log \bar{D}_v)^2}{2(\log S_g)^2} \right] \dots \dots \dots (27)$$

で示される。

なお、図-9 中の実線は、幾何平均径 \bar{D}_v と幾何標準偏差 S_g を式 (27) に代入して求めた値を点綴したもので、柱状図を曲線で近似したものとなる。

c) 空気流速の大きい場合の気泡径分布

空気流速が小さい場合には、

単一孔から発生する気泡の分布は対数正規分布にしたがっている。

しかし、空気流速がある限界以上になると、図-8 中の E-08, E-09 にみられるように、付随的な小細気泡の発生がみられるようになる。このような分布状態を対数確率紙上に点綴してみると（図-11）、気泡径 D_v の小さいところでもかなりの偏奇が生じ、あたかも 2本の直線が交わるような性状が示される。これを図-8に戻って考察してみると、小細気泡群の分布状態にも一つの形が存在し、これは前項で述べた対数正規分布にしたがう分布を呈している。すなわち、

$$f_i(n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \log S_{g1}} \exp \left[\frac{-(\log D_{v1} - \log \bar{D}_{v1})^2}{2(\log S_{g1})^2} \right] \dots \dots \dots (28)$$

で示される。

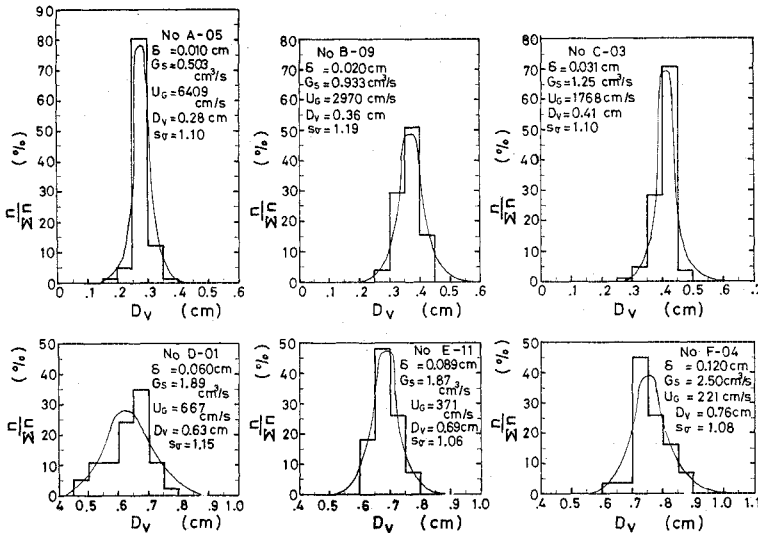


図-9 気泡径分布図（空気流速の小さい場合）

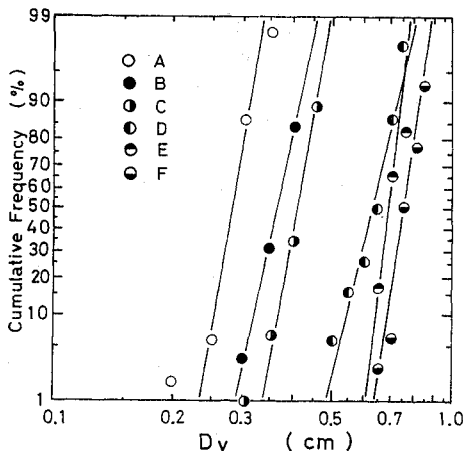
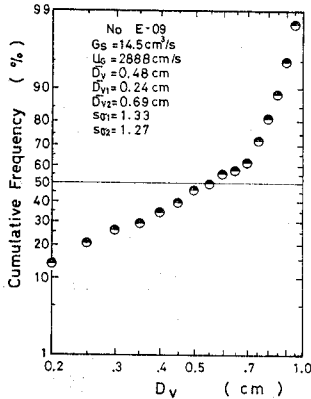
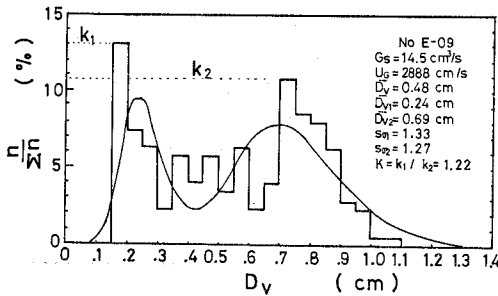


図-10 対数確率紙上の気泡径分布



図—11 対数正規確率紙上の気泡 (空気流速の大きい場合)



図—12 小細気泡群と大気泡群の分布例

一方、小細気泡群に対し、もう一つの山を形成している気泡群は、空気流速が小さい場合のそれぞれの気泡発生孔径に大略対応した気泡径を中心として分布していることがわかる。

以上のことから、空気流速がある限界以上となった場合には、気泡群の分布状態をより正確に表わす関数として、小細気泡群の分布関数と発生孔対応気泡群の分布関数の和が考えられる。すなわち、

$$f(n) = f_1(\bar{D}_{v1}, S_{01}) + f_2(\bar{D}_{v2}, S_{02})$$

$$= \alpha \cdot \exp\left[\frac{-(\log \bar{D}_{v1} - \log D_{v1})^2}{2(\log S_{01})^2} \right]$$

$$- \beta \cdot \exp\left[\frac{-(\log \bar{D}_{v2} - \log D_{v2})^2}{2(\log S_{02})^2} \right] \dots (29)$$

である。ここに、 α, β は小細気泡群と大気泡群の頻度分布におけるそれぞれの最頻値の高さの比から計算される定数であり、次のように決定される。

$$\alpha = \frac{K}{\sqrt{2\pi} (K \log S_{01} + \log S_{02})} \dots (30)$$

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{2\pi} (K \log S_{01} + \log S_{02})} \dots (31)$$

$$K = \frac{k_1}{k_2} = \frac{\alpha}{\beta} \dots (32)$$

図—12 は、実測の気泡径の度数分布が複峰分布 (気泡径二重分布) を示す場合のものを柱状図で示した例で

あり、図中の実線は、式 (29) に式 (30)~(32) および幾何平均径 $\bar{D}_{v1}, \bar{D}_{v2}$ 、幾何標準偏差 S_{01}, S_{02} を代入して求めた値を点綴したものであり、小細気泡群と大気泡群の示す複峰分布状態の柱状図を近似した曲線となっている。

なお、大気泡群と小細気泡群は、それぞれ異なる生成因子によるものと考えられる。したがって母集団としては異なるものであるが、空気流量や気泡発生孔の条件によっては、気泡径分布のスソが重畳する場合がある。しかしながら、本文 e) で考察しているように、大気泡群の分布範囲が気泡発生孔径によってほぼ一定であることを考え、気泡群を大気泡群の任意標本と小細気泡群の任意標本に分け、それぞれの幾何平均径 $\bar{D}_{v1}, \bar{D}_{v2}$ および幾何標準偏差 S_{01}, S_{02} を求めている。すなわち、小細気泡群と大気泡群の考え方の手順としては、全標本に関して柱状図を作成し、これをもとに累積度数表の作成と対数正規確率紙上の点綴作業を行う。次に、前述の理由によって、大気泡群として取扱可能な標本を分離し、残余の部分の小細気泡群として取扱っている。

なお、ここで得た気泡の分布関数は、単一孔を基準とした空気流速因子によって支配されているものである。一般の散気装置で考えるときには、多孔質板等の発生孔径の分布と、気泡の粒径分布とを関連づける必要がある。また、発生孔の材質、円滑性、孔の濡れなどにより、発生気泡径に変化があると思われる。

d) 気泡の生成に及ぼす物理的諸因子の整理

空気流速がきわめて小さい場合には、気泡は気泡発生孔において浮力と付着力 (表面張力) とのつり合いのもとに形成される^{19), 20)}。

$$v_B(\rho_L - \rho_G) \cdot g = \frac{\pi}{6} \cdot D_v^3 \cdot \Delta \rho \cdot g = \pi \delta \sigma_L \dots (33)$$

Van Krevelene ら²²⁾ は、これを無次元グループで整理し

$$\frac{D_v}{\delta} = 1.83 \left(\frac{\sigma_L}{g \cdot \delta^2 \cdot \Delta \rho} \right)^{1/3} \dots (34)$$

を得、一方、Benzing ら¹⁹⁾ は実験結果から

$$\frac{D_v}{\delta} = 1.82 \left(\frac{\sigma_L}{g \cdot \delta^2 \cdot \Delta \rho} \right)^{0.25} \dots (35)$$

で示している。

一方、空気流速が大きくなって、発生する気泡の大きさが空気流速に関係するようになった場合について、Leibson ら²³⁾ は、気泡径が気泡発生孔における空気のレイノルズ数 Re_G と発生孔径 δ によって決定されるとして、

$$\bar{D}_v = 0.29 \delta^{1/2} Re_G^{1/3} \dots (36)$$

で示されると報告している。

また、只木ら²⁴⁾ は、気泡径 D_v に及ぼす諸因子として、孔径 δ 、空気流速 u_G 、液密度 ρ_L 、表面張力 σ_L 、重

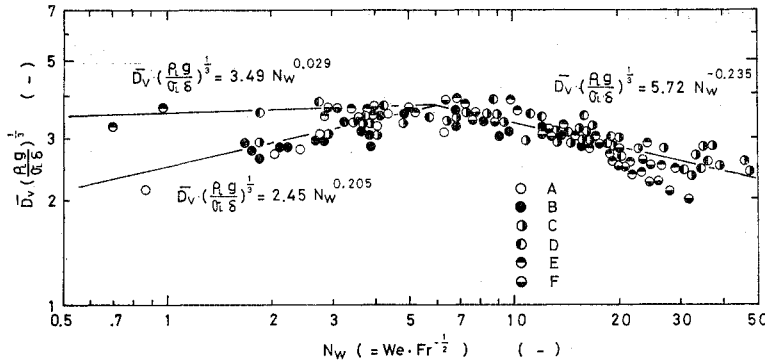


図-13 N_W と $\bar{D}_v \left(\frac{\rho_L g}{\sigma_L \delta} \right)^{1/3}$ の関係

力加速度 g が影響するとして、

$$\bar{D}_v = f(\delta, u_G, \rho_L, \sigma_L, g) \dots\dots\dots(37)$$

とにおいて次元解析を行い、

$$\frac{D_v^3 \rho_L g}{\sigma_L \delta} = \alpha \left(\frac{\delta \cdot u_G^2 \cdot \rho_L}{\sigma_L} \right) \cdot \left(\frac{u_G^2}{g \delta} \right)^{-1/2} \\ = \alpha \cdot W_e \cdot F_r^{-1/2} = \alpha \cdot N_W \dots\dots\dots(38)$$

により整理でき、さらに、ニードルバルブから発生孔までの間の蓄気室の大きさの影響を考慮し、蓄気室の大きさにより、生成中の気泡内部の圧力が変化し、気泡径に関係するとし、気泡生成時の内部圧力による力に対する蓄気室内の力の比として、蓄気室数 N_C を提案している。すなわち、次式で示される。

$$N_C = \frac{4 \cdot V_C \cdot g \cdot \rho_L}{\pi \delta^2 (p_0 + p_{hs})} \dots\dots\dots(39)$$

只木らの考え方にしたがって、筆者らの実験結果を整理して点綴したのが 図-13 である。筆者らの実験の場合、蓄気室の大きさは一定 ($V_C = 25.1 \text{ cm}^3$) であるが、蓄気室数 N_C は 表-3 に示すように変化している。只木らの報告や本実験の結果から、蓄気室数 N_C が 10 前後で発生条件が異なると考えられ、

$N_C < 10$

$$N_W < 6 \quad \bar{D}_v \left(\frac{\rho_L g}{\sigma_L \delta} \right)^{1/3} = 3.49 N_W^{0.029} \dots\dots\dots(40)$$

$$N_W > 6 \quad \bar{D}_v \left(\frac{\rho_L g}{\sigma_L \delta} \right)^{1/3} = 5.72 N_W^{-0.235} \dots\dots\dots(41)$$

表-3 蓄気室の影響

実験 No.	発生孔径 δ (cm)	室内圧力 p (mmHg)	室容量 V_c (cm ³)	蓄気室数 N_c (-)
A	0.010	75~230	25.1	281.5~237.5
B	0.020	65~130	25.1	71.6~66.0
C	0.031	60~100	25.1	31.5~30.4
D	0.060	60~80	25.1	8.0~7.8
E	0.089	55~70	25.1	3.6~3.5
F	0.120	55~70	25.1	2.0~1.9

$N_C > 10$

$$N_W < 6 \quad \bar{D}_v \left(\frac{\rho_L g}{\sigma_L \delta} \right)^{1/3} = 2.45 N_W^{0.205} \dots\dots\dots(42)$$

$$N_W > 6 \quad \bar{D}_v \left(\frac{\rho_L g}{\sigma_L \delta} \right)^{1/3} = 5.72 N_W^{-0.235} \dots\dots\dots(43)$$

が得られている。すなわち、蓄気室数 N_C が 10 より小さい場合、流速因子数 N_W が 6 より小さいとき、気泡径項 $\bar{D}_v (\rho_L g / \sigma_L \delta)^{1/3}$

は N_W に関係せずほぼ 3.5 であり、 N_W が 6 より大きくなると気泡径項は徐々に小さくなっている。また、蓄気室数 N_C が 10 より大きい場合には、 N_W が 1 から 6 の範囲で気泡径項は大きくなり、 N_W が 6 より大きくなると、逆に気泡径項は N_W の増加に伴って小さくなっている。これは、 N_W の増加に伴い、大小種々の気泡の生成がみられ、気泡群の平均気泡径が徐々に小さくなることを意味している。

e) 気泡径の複峰分布に及ぼす因子について

空気流速が大となったとき、単一孔より発生する気泡群は、発生孔径にほぼ対応した大気泡群と、空気流速の増加に伴って生じる小細気泡群との2つの気泡群分布すなわち、複峰分布を示し、このような分布の特性は、小細気泡群と大気泡群のそれぞれの幾何平均気泡径 \bar{D}_{v1} , \bar{D}_{v2} と幾何標準偏差 S_{v1} , S_{v2} および最頻値の高さの比

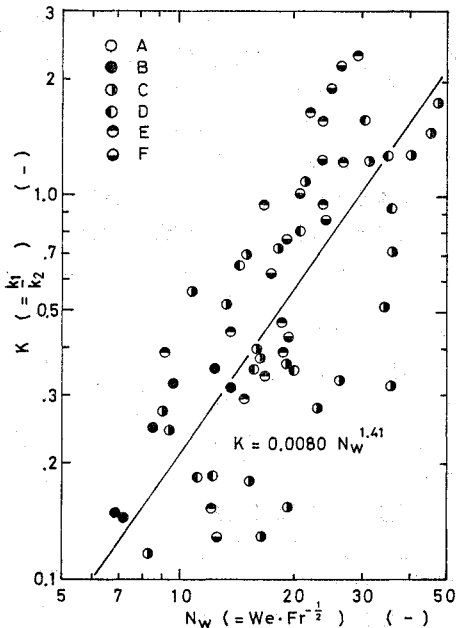


図-14 N_W と両気泡群の最頻値比 K

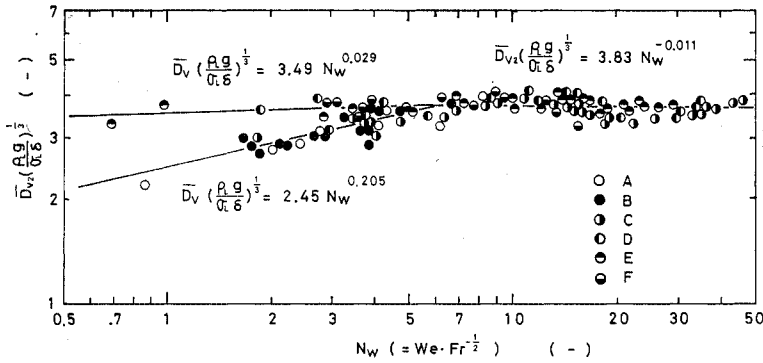


図-15 N_W と大気泡群の $D_{v2} \left(\frac{\rho L \cdot g}{\sigma L \cdot \delta} \right)^{1/3}$ の関係

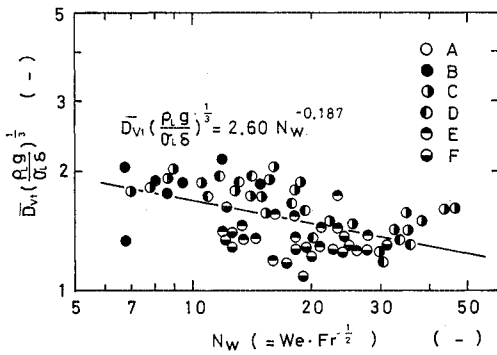


図-16 N_W と小気泡群の $D_{v1} \left(\frac{\rho L \cdot g}{\sigma L \cdot \delta} \right)^{1/3}$ の関係

K によって決定される。

このような気泡群の二重分布は、発生孔における空気流速が小さいときにはほとんどみられず、空気流速がかなり大きくなった所でみられるようになることから、二重分布（複峰分布）の物理的条件として、空気流速因子数 $N_W = W_e \cdot Fr^{-1/2}$ が考えられる。

そこで、空気流速因子数 N_W に対し、大小両気泡群の最頻値の高さの比 K を点綴したのが図-14である。これより、空気流速の増大に伴って、小気泡群の発生がみられることが、図中 N_W の増大にしたがい K 値が大きくなることから知られ、 N_W が 25 以上では、 K 値が 1 よりも大きくなっている。すなわち、小細気泡群が大気泡群に対し、その頻度において卓越するようになり、小細気泡群が至って多く発生していることがわかる。

次に、大気泡群の平均気泡径項 $\bar{D}_{v2} (\rho L \cdot g / \sigma L \cdot \delta)^{1/3}$ と、流速因子数 N_W を点綴したのが、図-15 であり、 N_W の増加に伴い、

$N_C > 10$

$$N_W < 6 \quad \bar{D}_{v2} \left(\frac{\rho L \cdot g}{\sigma L \cdot \delta} \right)^{1/3} = 2.45 N_W^{0.205} \dots \dots \dots (44)$$

$$N_W > 6 \quad \bar{D}_{v2} \left(\frac{\rho L \cdot g}{\sigma L \cdot \delta} \right)^{1/3} = 3.83 N_W^{-0.011} \dots \dots \dots (45)$$

$10 > N_C$

$$N_W < 6 \quad \bar{D}_{v2} \left(\frac{\rho L \cdot g}{\sigma L \cdot \delta} \right)^{1/3} = 3.49 N_W^{0.029} \dots \dots \dots (46)$$

$$N_W > 6 \quad \bar{D}_{v2} \left(\frac{\rho L \cdot g}{\sigma L \cdot \delta} \right)^{1/3} = 3.83 N_W^{-0.011} \dots \dots \dots (45)'$$

となっている。すなわち、小細気泡群を除いて考えると、大気泡群の平均径 \bar{D}_{v2} はそれぞれの気泡発生孔径 δ に対応した値となっていることがわかる。

一方、小細気泡群の平均気泡径項 $\bar{D}_{v1} (\rho L \cdot g / \sigma L \cdot \delta)^{1/3}$ と N_W を点綴したのが図-16 である。 N_W が 6 まででは、小細気泡群はほとんど発生しないが、 N_W が 6 より大きくなると小細気泡群の発生がみられるようになり、蓄気室数 N_C に関係なく、

$$N_W > 6 \quad \bar{D}_{v1} \left(\frac{\rho L \cdot g}{\sigma L \cdot \delta} \right)^{1/3} = 2.60 N_W^{-0.187} \dots \dots \dots (47)$$

であって、 N_W の増加に伴って、 $D_{v1} (\rho L \cdot g / \sigma L \cdot \delta)^{1/3}$ は小さくなっている。すなわち、空気流速が大となると、発生孔付近の水の乱れが強くなるものと推察され、発生時の気泡の一部がちぎれて小細気泡の生成がみられ、空気流速に対応する形で小細気泡群の平均径 \bar{D}_{v1} が小さくなるものと考えられる。

次に、気泡群の分布の特徴を幾何標準偏差 S_σ で考察してみる。流速因子数 N_W が 6 より小さい場合には、発生する気泡は、ほぼ発生孔径に対応した気泡が発生

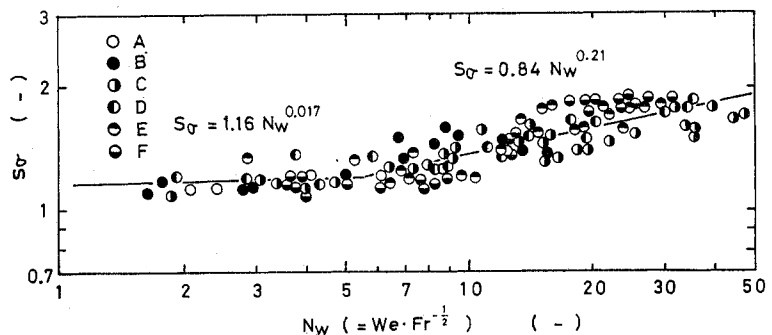
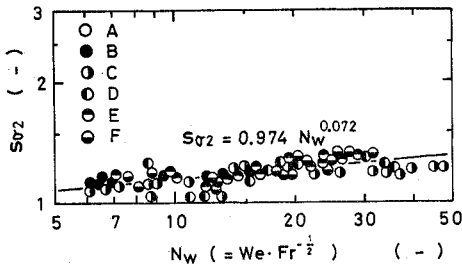
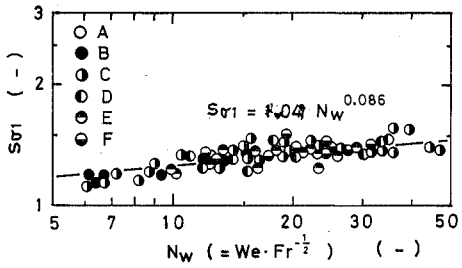


図-17 N_W と気泡群の幾何標準偏差



図一18 N_W と大気泡群の幾何標準偏差



図一19 N_W と小気泡群の幾何標準偏差

し、分布のばらつきは小さい。一方、 N_W が6より大きくなると小細気泡群の発生がみられてくるため、全気泡群の幾何標準偏差 S_g は大きくなり (図一17),

$$1 < N_W < 6 \quad S_g = 1.16 N_W^{0.017} \quad \dots\dots\dots (48)$$

$$6 < N_W \quad S_g = 0.84 N_W^{0.21} \quad \dots\dots\dots (49)$$

で表わすことができる。

さらに、 N_W が6より大きい場合、大気泡群の幾何標準偏差 S_{g2} と小細気泡群の幾何標準偏差 S_{g1} とに分けて考察すると (図一18~19),

$$6 < N_W \quad S_{g1} = 1.04 N_W^{0.086} \quad \dots\dots\dots (50)$$

$$S_{g2} = 0.97 N_W^{0.072} \quad \dots\dots\dots (51)$$

となり、孔径に応じて発生する大気泡群の幾何標準偏差 S_{g2} や小細気泡群の幾何標準偏差 S_{g1} は、ともに流速因子数 N_W が大になるにつれて大きくなる傾向がみられている。

以上のことから、単一孔から発生する気泡群は、空気流速が小さい場合には、気泡発生孔径 δ に相応した気泡群でほぼ占められ、空気流速が大きい場合には、気泡発生孔径 δ と空気流速因子数 N_W に関係し、発生孔付近における水の乱れによってちぎれて生成される小細気泡群の2つが混在しているものと考えることができよう。すなわち、単一孔より発生する気泡群の分布については、流速因子数

$N_W=6$ を境として、

$N_W < 6$ 単峰分布

$N_W > 6$ 複峰分布

と考えることができ、複峰分布をするときの山の高さの比は

$$K = 0.008 N_W^{1.41} \quad \dots\dots\dots (52)$$

であって、流速因子数 N_W が大になるにつれて、小細気泡群の粒子数は大きくなる。

f) 気泡群の表面積・体積に重点をおいた分布

前項までにおいては、気泡の球体積相当径 D_v の分布に関して考察を進め、気泡径の分布は $N_W = We \cdot Fr^{-1/2}$ によって代表される空気流速因子により、単一の分布や二重の分布 (複峰分布) を示すことがわかっている。

しかしながら、エアレーションタンク内に気泡を発生させる目的が、活性汚泥への酸素の供給、活性汚泥と基質の接触・吸着を促進する混合と攪拌にあることから、気泡の粒径そのものの分布と同時に酸素の供給^{1)~4)} に関与する気液接触界面積に関係する気泡の表面積の占める大きさや混合・攪拌²⁵⁾ に関係すると考えられる気泡の体積の占める割合などを知ることも重要であろう。

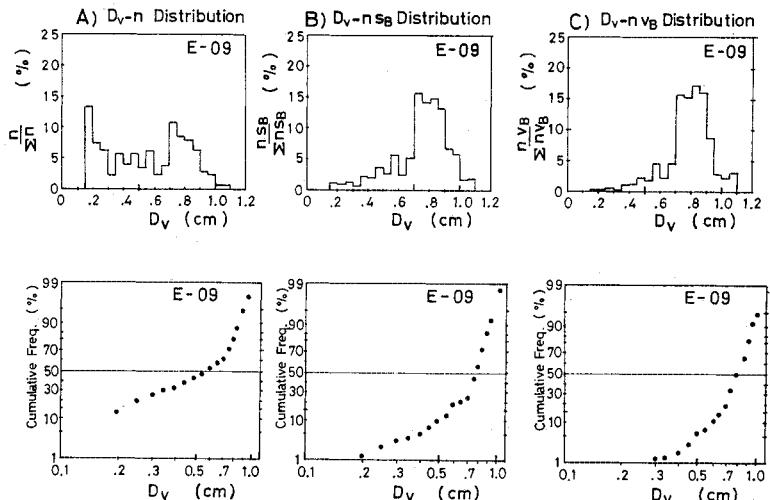
すでに考察しているように、形状がほぼ球形ないし回転楕円体とみなすことが可能であるような気泡の場合、その球体積相当径 D_v と体積 v_B 、表面積 s_B との間には、

$$v_B = 0.524 D_v^{3.00} \quad \dots\dots\dots (25)$$

$$s_B = 3.22 D_v^{1.99} \quad \dots\dots\dots (26)$$

の関係があることがわかっている。

図一20 は、流速因子数 $N_W = We \cdot Fr^{-1/2}$ がきわめて大きく、小細気泡群の個数頻度が孔径に相応した大気泡群の個数頻度に卓越しているような場合の粒径-個数分布、粒径-表面積分布、粒径-体積分布の例を示したもの



図一20 気泡群の粒径-個数分布、粒径-表面積分布、粒径-体積分布の比較

であり、粒径-個数分布に対し、それぞれの粒径の気泡の表面積や体積の全体に対する割合を考慮した場合には、図中(B)、(C)のように、小細気泡群の占める表面積や体積は至って小さく、最大でも10%未満である。

したがって、エアレーションが気泡の表面積や体積を媒介とした現象であると考え、小細気泡群の存在を無視し、気泡発生孔径に対応して発生する大気泡群を中心として考えることも可能であろう。

なお、気液接触界面積として滞留時間を考慮した接触界面積を考えると、小粒径の気泡の総表面積としての効果は幾分大きくなる。

4. ま と め

単一孔から水中に発生する気泡について実験を行い、気泡の形状・挙動・分布などについて考察を行った。その結果、次のようなことが明らかとなっている。

(1) 気泡発生孔径 $\delta = 0.010 \sim 0.120$ cm の単一孔から気泡を生成させたとき、気泡の形状はほぼ球形もしくは回転楕円体とみなすことができる。

(2) 気泡群の平均上昇速度 u_b を気泡発生孔径 δ および空気空塔速度 u_{gT} の関数として、

$$u_b = 68.2 \delta^{0.15} u_{gT}^{0.10}$$

で表わすことができる。

(3) 気泡が群をなして上昇する場合、気泡のレイノルズ数が 300~5000 の範囲の気泡の抵抗係数は 0.6~2.5 の間であり、気泡相互の干渉などによって、静止水中の単一気泡の場合とはかなり異なっている。

(4) 気泡の形状を示す指標である偏平率 E_e は気泡のレイノルズ数に関係する。また、気泡相互の干渉などにより、静止水中の単一気泡の場合よりも偏平の度は小さくより球に近い状態で上昇している。

(5) 気泡の生成機構は、発生孔における空気流速によって、

- i) 静力学的な気泡の生成
- ii) 連続的で緩やかな気泡の生成
- iii) 連続的で速やかな気泡の生成

の3つの範囲に大別できる。

(6) 空気流速が小さい場合、単一孔から発生する気泡の分布は対数正規分布にしがっている。

(7) 空気流速が大きい場合、単一孔から発生する気泡の分布は、発生孔径に対応した大気泡群と発生孔においてちぎれて生成される小細気泡群の生成因子の異なる二重の分布(複峰分布)を呈する。

(8) 単一孔から発生する気泡の大きさは流速因子数 $N_W (= W_e \cdot F_r^{-1/2})$ によってほぼ決定される。

(9) 気泡群の占める表面積や体積に重点をおいた場

合、小細気泡群の存在はほとんど無視することができ、発生孔径に対応して生成される大気泡群を中心と考えてよいであろう。

実際のエアレーション機構は、活性汚泥と基質を含んだ気液混合流動層中における酸素の供給・吸収効率と攪拌効果にあるものである。今後さらに、物性条件を中心とした実験範囲の拡張や実験データの蓄積、気泡と液の流動の相互関係、装置条件の明確化などを把握していくことが必要であるが、本実験研究により、多くの因子が複雑に作用し合うエアレーションの内部機構解明に一つの手がかりが得られたものとする。

おわりに、本研究をすすめるにあたり適切なご助言を賜った東北大学工学部化学工学科 只木慎力教授・宝沢光紀助教授、ならびに、実験に協力いただいた仙台市鎌倉次雄氏、東北大学工学部学生(当時)小松誠之助氏に感謝の意を表します。また、計算にあたっては、東北大学大型計算機 NEAC-2200 モデル 500 を使用したことを記す。

記 号

A_T : エアレーションカラム断面積	(cm^2)
C_D : 気泡の抵抗係数 $\{=(4/3) \cdot (D_b \cdot \Delta \rho \cdot g / u_B^2 \cdot \rho_L)\}$	(—)
C_{Db} : 気泡のみかけ抵抗係数 $\{=(4/3) \cdot (D_b \cdot \Delta \rho \cdot g / u_b^2 \cdot \rho_L)\}$	(—)
D_a : 気泡長径	(cm)
D_b : 気泡短径	(cm)
D_v : 球体積相当気泡直径(気泡径)	(cm)
\bar{D}_{v1} : 小細気泡群の幾何平均気泡径	(cm)
\bar{D}_{v2} : 大気泡群の幾何平均気泡径	(cm)
D_T : エアレーションカラム直径	(cm)
E_e : 気泡の偏平率 $(= D_b / D_a)$	(—)
E_e' : 気泡の偏平率 $(= D_v / D_a)$	(—)
e_e : 楕円体気泡の離心率 $\{=(D_a^2 - D_b^2 / D_a^2)^{1/2}\}$	(—)
F_r : 気泡発生孔におけるフルード数 $(= u_{gT}^2 / g \delta)$	(—)
G_s : 空気流動	(cm^3/sec)
g : 重力加速度	(cm/sec^2)
K : 大気泡群と小細気泡群の最頻値の高さの比 $(= k_1 / k_2)$	(—)
k_1 : 小細気泡群の最頻値の高さ	(%)
k_2 : 大気泡群の最頻値の高さ	(%)
M_L : 液物性を表わす無次元数 $(= g \cdot \mu_L^4 / \rho_L \cdot \sigma_L^3)$	(—)

- N_C : 蓄気室数 ($=4 V_C g \rho_L / \pi \delta^2 (\rho_0 + \rho_{hs})$) (—)
- N_W : 流速因子数 ($=W_e \cdot F_r^{-1/2}$) (—)
- n_B : カラム内に存在する気泡個数 (個)
- p_0 : 蓄気室内圧力 (dyn/cm²)
- p_a : 大気圧 (dyn/cm²)
- p_B : 気泡内圧力 (dyn/cm²)
- p_{hs} : 気泡発生孔における水圧 (dyn/cm²)
- R_e : 気泡上昇時のレイノルズ数 ($=D_v \cdot u_B / \nu_L$) (—)
- R_{eb} : 気泡上昇時のみかけのレイノルズ数 ($=D_v \cdot u_b / \nu_L$) (—)
- R_{eG} : 気泡発生孔での空気レイノルズ数 ($=\delta \cdot u_G / \nu_G$) (—)
- R_m : キノコ笠状気泡の曲率半径 (cm)
- s_B : 気泡の表面積 (cm²)
- S_o : 気泡群の気泡径幾何標準偏差 (—)
- S_{o1} : 小細気泡群の気泡径幾何標準偏差 (—)
- S_{o2} : 大気泡群の気泡径幾何標準偏差 (—)
- u_B : 静止水中の気泡上昇速度 (cm/sec)
- u_b : 気泡のみかけ上昇速度 (cm/sec)
- u_G : 気泡発生孔における空気流速 (cm/sec)
- u_{GT} : カラム断面積基準の空気空塔速度 ($=G_S / A_T$) (cm/sec)
- V_C : 蓄気室内容積 (cm³)
- v_B : 気泡体積 (cm³)
- W_e : ウェバー数 ($=\rho_L \cdot u_G^2 \cdot \delta / \sigma_L$) (—)
- Z_H : カラムの水深 (cm)
- α, β, τ : 定数
- δ : 気泡発生孔径 (cm)
- μ_G : 空気の粘性係数 (g/cm·sec)
- μ_L : 水の粘性係数 (g/cm·sec)
- ν_G : 空気の動粘性係数 (cm²/sec)
- ν_L : 水の動粘性係数 (cm²/sec)
- π : 円周率 (—)
- ρ_G : 空気の密度 (g/cm³)
- ρ_L : 水の密度 (g/cm³)
- $\Delta\rho$: 水と空気の密度差 ($=\rho_L - \rho_G$) (g/cm³)
- σ_L : 表面張力 (dyn/cm)

参 考 文 献

- 1) Ippen, A.T., Carver, C.E.: Basic Factors of Oxygen Transfer in Aeration Systems, S.I.W., Vol. 26, No. 7, pp. 813~829, (1954).
- 2) Pasveer, A.: Research on Activated Sludge, VI Oxygenation of Water with Air Bubbles, S.I.W., Vol. 27, No. 10, pp. 1130~1146, (1955).
- 3) King, H.R.: Mechanics of Oxygen Absorption in Spiral Flow Aeration Tanks, III. Application of Formulas, S.I.W., Vol. 27, No. 10, pp. 1123~1129

- (1955).
- 4) Morgan, P.F., Bewtra, J.K.: Air Diffuser Efficiencies, Jour. W.P.C.F., Vol. 32, No. 10, pp. 1047~1059, (1960).
- 5) 田中・宗像・本田: 活性汚泥の呼吸速度に及ぼす搅拌の影響, 下水道協会誌, Vol. 12, No. 132, pp. 44~53, (1975).
- 6) 松尾・太田・野間: 乱れの構造に関する研究, 第7回衛生工学研究討論会講演論文集, pp. 103~116, (1971).
- 7) 松本・大沼: 曝気槽の流体の混合現象について, 土木学会論文集, No. 154, pp. 15~22, (1968).
- 8) 柏谷・安中・及川: 散気式エアレーションタンクの酸素移動, 第7回衛生工学研究討論会講演論文集, pp. 91~100, (1971).
- 9) 宗宮・合田: エアレーションタンクにおける気泡の挙動と流動, 土木学会論文集, No. 113, pp. 1~10, (1965).
- 10) Banhart, E.W.: Transfer of Oxygen in Aqueous Solutions, Proc. A.S.C.E., Vol. 95, SA. 3, pp. 645~661, (1969).
- 11) 松本・中村: 単一オリフィスより生じる気泡の性状と酸素移動に関する一考察, 土木学会論文報告集, No. 175, pp. 48~58, (1970).
- 12) 化学工学協会: 化学工学便覧, pp. 1~90, 丸善(1970).
- 13) Haberman, W.L., Morton, R.K.: An Experimental Study of Bubbles in Liquids, Trans. of A.S.C.E., Vol. 121, Paper No. 2799, pp. 227~252 (1956).
- 14) 只木・前田: 種々の静止液体中を上昇する単一気泡の形状および上昇速度について, 化学工学, Vol. 25, No. 4, pp. 254~264, (1961).
- 15) Miyagi, O.: The Motion of Air Bubble Rising in Water, 機械学会誌, Vol. 28, No. 95, pp. 97~128, (1925).
- 16) 久保田・明昌・白井: 低粘度液中における単一気泡の挙動について, 化学工学, Vol. 31, No. 11, pp. 1074~1080, (1967).
- 17) Stenning, A.H., Martin, C.B.: An Analytical and Experimental Study of Air Lift Pump Performance, Trans. of A.S.M.E., Vol. 90, April, pp. 106~110, (1968).
- 18) 今井 功: 流体力学(前編), 葦華房, pp. 149~159, (1973).
- 19) Benzing, R.J., Myers, J.E.: Low Frequency Bubble Formation at Horizontal Circular Orifices, Ind. Chem., Vol. 47, No. 10, pp. 2087~2090 (1955).
- 20) Siemes, W., Kauffman, J.F.: Die periodische Entstehung von Gasblasen an Dusen, Chem. Eng. Sci., Vol. 5, pp. 127~140, (1956).
- 21) Eversole, W.G., Wagner, G.H., Stackhaus, E.: Rapid Formation of Gas Bubbles in Liquids, Ind. Eng. Sci., Vol. 33, No. 11, pp. 1459~1462, (1941).
- 22) Van Krevelene, D.W., Hoftijer, P.J.: Studies of Gas Bubble Formation-Calculation of Interfacial Area in Bubble Contactors, Chem. Eng. Progr., Vol. 46, No. 1, pp. 29~35, (1950).
- 23) Leibson, I., Holcomb, E.G., Casco, A.G., Jacmic, J.J.: Rate of Flow and Mechanics of Bubble Formation from Single Submerged Orifices., A.I.Ch.E. Jour. Vol. 2, No. 3, pp. 296~306, (1956).
- 24) 只木・前田: 単一オリフィスより生ずる気泡の大きさについて, 化学工学, Vol. 27, No. 3, pp. 147~155, (1963).
- 25) Nevers, N.D.: Bubble Driven Fluid Circulations, A.I.Ch.E. Jour., Vol. 14, No. 2, pp. 222~226, (1968).