

単一孔から発生する気泡群による酸素移動特性

EXPERIMENTAL STUDIES ON THE OXYGEN TRANSFER 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における酸素の移動を考えると、実用的観点に基づいた研究としては、実際規模もしくはパイロットプラント規模の装置を用いて、形状、容積、水深、散気板面積、空気流量等と酸素吸収効率の関係を指指数式で表わそうとする King¹⁾ や柏谷ら²⁾の研究、また、散気装置の種類や位置等について酸素吸収効率との関係を示した Bewtra³⁾ や寺岡ら⁴⁾の研究、さらに、模型旋回流式エアレーションタンクのスケールアップを検討した宗宮ら⁵⁾の研究がある。これらの研究は、現象を支配する因子を装置特性の点から検討したもので、エアレーション操作や設計上、きわめて重要な方向であると考えられる。

一方、これら各種装置特性の間に内在する普遍性を追求し、エアレーションの問題を気泡の性状や挙動から明らかにし、酸素の移動や液（水）の攪拌に結びつけていく方向がある。このような考え方に基づいた研究としては、Pasveer⁶⁾、Banhart⁷⁾、Suschka⁸⁾のように、総括容量係数 K_{La} から液側物質移動係数（液膜係数） k_L を分離しようとする研究がある。これらの研究は、エアレーションの基本因子である液膜係数 k_L と気液接触界面面積 a_V をこれに関与する種々の因子との関連づけによって解明しようとするものである。

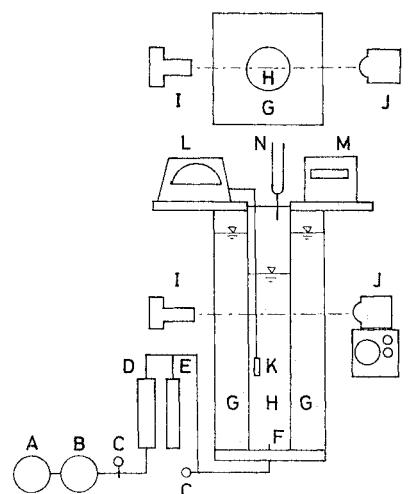
本報告は、すでに明らかになっている気泡発生孔径と空気流量、気泡径分布、気泡の形状や挙動等の知見⁹⁾を基礎とし、気泡群のガスホールドアップ、気液接触界面面積、総括容量係数、液膜係数、さらに、気泡生成時や破裂時等の端効果における酸素移動等の関連性を実験的に検討することによって、单一孔から発生する気泡からの酸素移動特性に関する基礎的知見を得ることを目的

とし、考察を進めているものである。

2. 実験装置および実験方法

図-1 に実験装置の概略を示している。実験に使用しているエアレーションカラムは、内径 140 mm、高さ 1 200 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。カラムの外側には内のり 300 × 300 × 1 300 mm の両面ガラス製角型水槽 G を設け、カラム内に存在する気泡を撮影する際のレンズ効果によるひずみを最小限に抑え、また、カラム内の水温を一定(18.0~23.5°C)に保つ恒温槽の役を果たしている。

所定の空気流量が得られるようにニードルバルブを調



A : ロータリーコンプレッサー	H : エアレーションカラム
B : 調圧タンク	I : 望遠レンズ付カメラ
C : ニードルバルブ	J : 高照度マルチストロボ
D : 浮遊式流量計	K : 酸素計センサー
E : 水銀マノメーター	L : 酸素計本体
F : 単孔散気装置	M : 記録計
G : 外部角型タンク	N : 石鹼膜流量計

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 工博 日本大学助教授 工学部土木工学科

整し、カラム内に蒸留水を注入する。その後、石鹼膜流量計とニードルバルブによって空気流量を微調整する。ついで、窒素ガスをカラム底の散気装置から送り込み、水中の溶存酸素を放散させ、溶存酸素が 1.0 mg/l 以下になったところで窒素ガスの送気を停止すると同時に、溶存酸素の連続記録を開始する。ロータリーコンプレッサーから送られる空気は、調圧室で整圧され、ニードルバルブを経て单一孔気泡発生装置に導かれ、気泡となってカラム内の水中に放出される。発生する気泡から水中に溶解する酸素の量注1)は、溶存酸素分析計注2)(B社 777型)と高感度記録計(T社 EPR-2 TD)によって

連続的に記録し、時間-濃度曲線から、総括容量係数 K_{La} を求めている。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 PS-240)を光源とし、これと連動する望遠レンズ付カメラによって、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拡大投影してノギスを用いて長径、短径、移動距離を測定して求めている。一方、気泡のホールドアップ h_e は、写真撮影によって得られたフィルムのカラムにおける単位容積中の気泡の個数 n_B と気泡体積 v_B 注3)の積の総和から

$$h_e = \frac{\sum n_B \cdot v_B}{V_T} \quad \dots \dots \dots (1)$$

として求めた。同様に気泡の気液接触界面面積 A_B は単位深さ z 中の気泡の個数 n_B と気泡表面積 s_B の積の総和から

$$A_B = \frac{\sum n_B \cdot s_B}{z} \cdot z_H \quad \dots \dots \dots (2)$$

として求めた。写真-1は測定フィルムの一例であり、

注 1) 溶存酸素に対する水深の影響

溶存酸素が水深によって影響されることについて、Oldshue¹⁰⁾は補正式として次式を与えており。

$$C_s = C_{ws} \left(\frac{\text{気泡中酸素濃度}(\%) + \text{タンク底圧力}(m\text{Aq.})}{42(\%)} + \frac{2 \times 10.34}{2 \times 10.34 (\text{m}\text{Aq.})} \right) \quad \dots \dots \dots (A.1)$$

筆者らは、溶存酸素計センサーをエアレーションカラムのほぼ中間位置(水面下約40cm)に設置し、ワインクラー法と対照しながらエアレーションし、大気圧下における飽和溶存酸素値 C_{ws} と比較する予備実験を行った。その結果、 C_{ws} に対する C_s の比 $\frac{C_s}{C_{ws}}$ =1.01~1.05となり、水深変化による溶存酸素濃度については、上記の補正式がほぼ適用できることを確認した。

注 2) 溶存酸素計の感度

ポーラログラフ式酸素分析計においては、センサー先端において、テフロン膜での酸素の拡散を行うため、流速付与が必要である。本研究に用いた分析計もまた、公称で最小流速30cm/secが必要とされていたが、15cm/sec程度の流速が与えられれば、再現性はきわめて良好であった。しかし、本研究において空気量がきわめて小さい場合($G_s=1.5 \text{ cm}^3/\text{sec}$ 以下)には液流速が15cm/sec以下であったため、空気量に応じて、ワインクラー法と対応させつつ、検量範囲を3段階に分けて溶存酸素計に対する補正を試みた。

表-1 実験条件

実験条件					
実験No.	気泡発生孔 δ (cm)	空気流量 $G_s(\text{cm}^3/\text{sec})$	孔での空気速度 $u_G(\text{cm/sec})$	孔での空気のレイノルズ数 $R_{eG}(-)$	ガス(気泡)の空塔速度 $u_{gT}(\text{cm/sec})$
A	0.010	0.158~1.657	2 020~21 100	148~789	0.00103~0.01076
B	0.020	0.423~4.802	1 350~15 280	197~2 485	0.00275~0.03120
C	0.031	0.576~14.84	810~20 990	178~3 882	0.00374~0.09640
D	0.060	0.430~18.00	152~6 370	67~2 872	0.00279~0.1169
E	0.089	0.413~15.96	82~3 170	54~2 116	0.00268~0.1037
F	0.120	1.82~19.78	161~1 750	141~1 543	0.01180~0.1285

蒸留水の物理的性質¹⁰⁾

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·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)	



写真-1 撮影フィルムの一例

図-2は、長径 D_a 、短径 D_b 、上昇速度 u_b の測定法をモデル的に示したものである。ストロボ発光回数は、3 000 rpmである。実験条件¹¹⁾を表-1に示す。

注 3) 気泡径に及ぼす水深の影響

実験時における最大水深1.2mにおける圧力を P_1 、そのときの気泡体積を v_{B1} 、水面付近における圧力を P_2 、そのときの気泡体積を v_{B2} とすると、次式が成立する。

$$P_1 \cdot v_{B1} = P_2 \cdot v_{B2} \quad \dots \dots \dots (A.2)$$

$$P_1 = 11.54 \text{ m}\text{Aq}, P_2 = 10.34 \text{ m}\text{Aq} \text{ より}$$

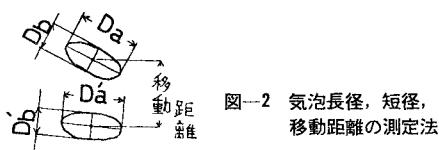
$$v_{B2} = \frac{P_1}{P_2} \cdot v_{B1} = \frac{11.54}{10.34} v_{B1} = 1.116 v_{B1} \quad \dots \dots \dots (A.3)$$

これを気泡径の変化とすると

$$\frac{\pi}{6} D_{v2}^3 = 1.116 \cdot \frac{\pi}{6} D_{v1}^3 \quad \dots \dots \dots (A.4)$$

$$\therefore D_{v2} = \sqrt[3]{1.116} \cdot D_{v1} = 1.037 \cdot D_{v1} = 1.04 \cdot D_{v1} \quad \dots \dots \dots (A.5)$$

したがって、カラム底より水面に至ると、気泡径で約4%の増加となる。一方、気泡上昇中における最大10%程度の酸素の水への溶解による気泡体積の減少による相殺、上昇中の形状変化等を考慮すると、気泡径に及ぼす水深の影響はほぼ無視可能であろう。

図-2 気泡長径、短径、
移動距離の測定法

3. 実験結果と考察

(1) 気泡のホールドアップ、空塔速度および気泡群の平均上昇速度

エアレーションタンク内に発生された気泡は、タンク内を上昇し、自由水面に到達したのち、破裂・消滅する。連続的に空気が散気装置よりタンク内に気泡として発生している場合には、気泡の水中における上昇速度がほぼ一定であるとすれば、タンク内には常に一定量の空気が気泡となって存在し、また、気泡からタンク内の水に供給される酸素は、気泡が水中を上昇する間に移動すると考えられ、タンク内に存在する気泡の量、すなわち、気泡のホールドアップによって大きく支配されよう。

気泡のホールドアップ h_e は、気泡の上昇速度 u_b 、水深（気液混相時） z_H 、気泡の全存在個数 N_B 、気泡の体積 v_B 、カラム断面積 A_T 、空気流量 G_s 等との間で、次のように考えることができる。

ある気泡が上昇速度 u_b で水深 z_H なる距離を上昇するのに要する時間 τ_b は、次式で与えられる。

$$\tau_b = \frac{z_H}{u_b} \quad \dots \dots \dots \quad (3)$$

また、カラム内に発生する単位時間当たりの気泡の個数 n_{Bt} は、

$$n_{Bt} = \frac{G_s}{\bar{v}_B} \quad \dots \dots \dots \quad (4)$$

であり、カラム内に滞留する気泡の総個数 N_B は、

$$N_B = n_{Bt} \cdot \frac{z_H}{u_b} = \frac{G_s}{\bar{v}_B} \cdot \frac{z_H}{u_b} \quad \dots \dots \dots \quad (5)$$

となり、カラム内に存在する気泡の総体積 V_B は、

$$V_B = \sum_{i=1}^N v_B = N_B \cdot \bar{v}_B = \frac{G_s \cdot z_H}{u_b} \quad \dots \dots \dots \quad (6)$$

となる。以上の関係から、気泡のホールドアップ h_e とガス空塔速度 u_{gT} 、気泡群の平均上昇速度 \bar{u}_b との間に、

$$\begin{aligned} h_e &= \frac{V_B}{V_T} = \frac{\sum n_B \cdot v_B}{V_T} = \frac{G_s \cdot z_H}{\bar{u}_b} \cdot \frac{1}{z_H \cdot A_T} \\ &= \frac{G_s}{A_T} \cdot \frac{1}{\bar{u}_b} = \frac{u_{gT}}{\bar{u}_b} \end{aligned} \quad \dots \dots \dots \quad (7)$$

が成立する。

気泡に関するホールドアップと空塔速度、気泡群の平均上昇速度についての研究は、化学工学の分野において

多くの研究がなされているが、その工学的必要性から、散気装置としては多孔板・多孔質板を用い、空気と液について、気液並流・向流について研究されたものが多い。吉田ら¹³⁾は、カラム径 7.7~60 cm の範囲の気泡塔で、空気-水系および空気-Na₂SO₄ 水溶液系において、0.22~4.0 cm 径の単孔ノズルを用いて実験を行い、気泡のホールドアップ h_e を空塔速度 u_{gT} との関係で示している。それによれば、 u_{gT} が 2.78 cm/sec 以下であれば、 h_e は u_{gT} の 0.875 乗に比例して大きくなり、 u_{gT} が 2.78 cm/sec 以上になると気泡相互の干渉や合体、液の乱れによって、 h_e の u_{gT} に対する増加率は小さくなるとしている。吉留¹⁴⁾、小出¹⁵⁾らが多孔質板、多孔板、単孔ノズル等を用いた気液向流・並流で行った実験でも、吉田らの結果と同様な報告がなされている。これらの研究は、気泡攪乱遷移領域 ($u_{gT}=2\sim5$ cm/sec 以上) と考えられる範囲を中心としたものであって、発生気泡の合体・分裂が激しくなり、不規則な形状の大小気泡が群上昇し、タンク頂部においては気泡累積層を生じている。そのため、上昇速度として個々の気泡について求めることはきわめて困難であり、式(7)に基づいて、測定した気泡のホールドアップと空塔速度から気泡群の平均上昇速度を算定し、気液接触界面面積を明らかにするための滞留時間を推定しようとするものである。

一方、実際のエアレーションタンクにおける空塔速度は、エアレーションの目的が活性汚泥フロックへの酸素供給のバランスや混合攪拌さらに沈降防止を目的としていることから、同じ気泡群による流動ではあっても、非生物系を扱う前述の化学工学の分野における空塔速度の研究範囲よりもかなり小さく、気泡運動層としての性状に大きな相違がある。このような、エアレーションタンク内における空塔速度の小さい範囲におけるガスホールドアップ h_e と空塔速度 u_{gT} について、

$$h_e = 0.014 u_{gT}^{0.80} \quad \dots \dots \dots \quad (8)$$

を得た（図-3）。

一方、既報⁹⁾において、筆者らは気泡群の平均上昇速度 \bar{u}_b と空塔速度 u_{gT} について、気泡発生孔径 δ をパラメーターとした実験式を示した。

$$\bar{u}_b = 68.2 \delta^{0.15} u_{gT}^{0.10} \quad \dots \dots \dots \quad (9)$$

本式を、大型エアレーションタンクを用いて気泡や液の挙動・酸素移動等を実測した柏谷ら²⁾の実験結果に適用して、表-2 のような結果を得た。なお、柏谷らの空塔速度を求める場合の基準断面積は、散気板面積 0.9 m² (散気板面積比 10%), 1.2 m² (同 15%) を用い、また、気泡発生孔径 δ は、使用したのがセラミック散気板であることや発生気泡の分布から推測して、0.01~0.1 cm の範囲であるとした。もちろん、筆者らの装置と柏谷らの装置はまったく異なるものであるが、エアレーション時

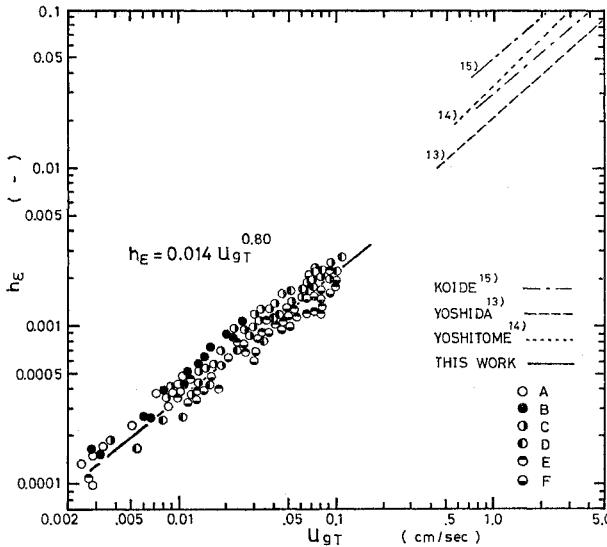


図-3 空塔速度と気泡のホールドアップ

表-2 空塔速度による気泡上昇速度の推定
(柏谷ら¹²⁾の結果との比較)

	空気流量 G_s (l/m ² ·min)	空塔速度 U_gT (cm/sec)	気泡上昇速度	
			\bar{u}_b (実測) (cm/sec)	$\bar{u}_b = 42.0 U_gT^{0.10}$ (cm/sec)
散気板面積比 10%	9	0.672	42~44	40.7
	18	1.34	42~45	43.7
	27	2.01	45~50	45.5
	35	2.61	—	46.7
散気板面積比 15%	9	0.504	28~34	39.6
	18	1.01	34~38	42.4
	27	1.51	33~36	44.2
	35	1.96	39~46	45.4

における気泡群の平均上昇速度を空塔速度から推定することができよう。

次に、式(9)を発生孔径 $\delta = 0.01 \sim 0.12$ cm の範囲のものについてまとめると、気泡群の平均上昇速度 \bar{u}_b は空塔速度 U_gT の関数として、

$$\bar{u}_b = 42.4 U_gT^{0.10} \quad (10)$$

を得る。

なお、式(7)に基づいて、ホールドアップと空塔速度から気泡群の平均上昇速度を求める場合と、写真撮影によって直接、気泡群の平均上昇速度を求めた場合とでは、測定の際の誤差の結果、多少の相違があり、後者の方が、気泡群の平均上昇速度はやや小さめの評価となっている。本研究においては、直接空塔速度から平均上昇速度を推定する式(9)または式(10)を用いて、結果の整理を行った。

(2) カラム内における気液接触界面面積

気泡の存在しているカラム内の気液接触界面面積 a_V

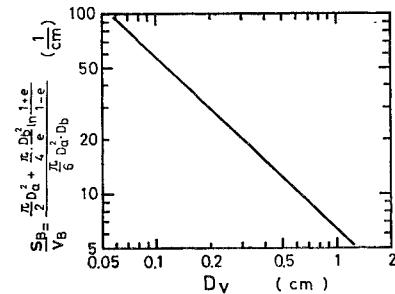


図-4 気泡径と気泡表面積の体積に対する比

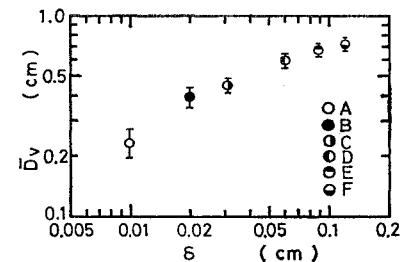


図-5 気泡発生孔径と発生気泡径

は、気液混相単位容積当たりの気泡の占める全表面積として、

$$a_V = \frac{A_B}{V_T} = \frac{\sum n_B \cdot s_B}{V_T} \quad (11)$$

で示される。

前項で考察しているように、一般に空気の空塔速度に比例して、気泡のホールドアップは増加する。また、図-4 に示されるように、気泡径 D_v が小さくなればなるほど、気泡の体積当たりの表面積 s_B/v_B は増加する。さらに実験の範囲内では、平均発生気泡径 \bar{D}_v は、既報のように流速因子数 $N_W (= W_s \cdot F_r^{-1/2})$ の関数⁹⁾として示されるが、これを概略の傾向として示すと、図-5 に見られるように、ほぼ気泡発生孔径 δ に対応した大きさである。したがって、一般に空塔速度 U_gT が大きくなるとガスホールドアップ h_e が増加し、接触界面面積は増加し、また、気泡発生孔径 δ が小さくなるほど、発生気泡径 D_v は小さくなり、接触界面面積は増加する。これらの関係を次のように示すことができる。

$$\begin{aligned} a_V &= \frac{A_B}{V_T} = \frac{1}{V_T} \cdot \frac{V_B}{\frac{\pi}{6} \cdot k_v \cdot \bar{D}_v^3} \cdot \pi \cdot k_s \cdot \bar{D}_v^2 \\ &= \frac{h_e \cdot V_T}{V_T} \cdot \frac{6 \cdot k_s}{k_v} \cdot \frac{1}{\bar{D}_v} = h_e \cdot \frac{6 \phi_s}{\bar{D}_v} = f(U_gT, \delta) \end{aligned} \quad (12)$$

図-6 は、空塔速度 U_gT に対し、発生孔径 δ をパラメーターとして、写真撮影法で求めた気泡の長径 D_a 、短径 D_b より、回転橍円体として表面積 s_B と個数から、カラム内における気泡の接触界面面積 a_V を点綴し

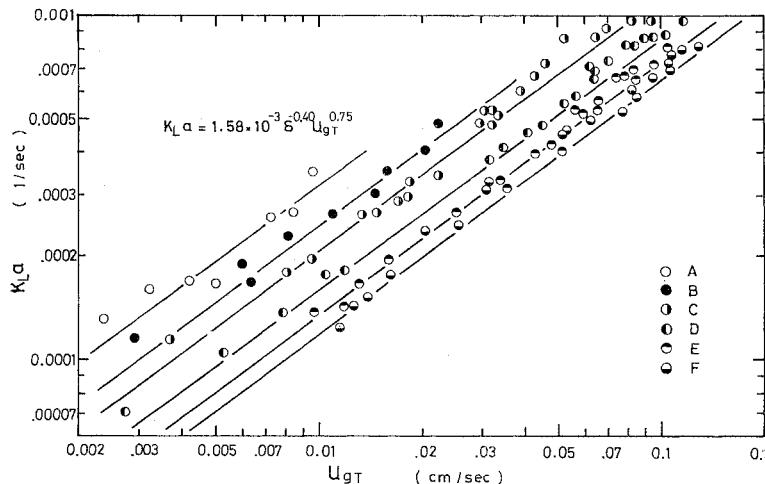


図-6 空塔速度と気液接触界面面積の関係

たものであり、空塔速度 u_{gT} の増加や気泡発生孔径 δ の減少に伴って、界面面積 a_V の増大が顕著であり、実験結果に適合するように整理して

$$a_V = 0.0248 u_{gT}^{-0.72} \cdot \delta^{-0.50} \quad \dots \dots \dots (13)$$

を得た。

只木ら¹⁶⁾は、空塔速度 u_{gT} が 1~10 cm/sec の範囲で気泡の接触界面面積 a_V を求め、 u_{gT} が 5 cm/sec 付近までは、 a_V は u_{gT} とともに直線的に増加し、 u_{gT} がこれより大となると、気泡の合体現象等の相互干渉によって、気泡のホールドアップが空塔速度に比例しなくなり、界面面積の増加率が幾分減少することを指摘している。筆者らの実験の場合、空塔速度 u_{gT} は 0.002~0.1 cm/sec の気泡流動層としての範囲であり、気泡の合体現象等はあまりみられていない。

(3) 総括容量係数 K_{La}

エアレーション系内全体について、気泡の界面を通して液中に移動する酸素の吸収速度 N_{O_2} は、気泡の界面面積 A_B と濃度推進力 $\Delta c = c_s - c$ に比例し、次式で示される。

$$N_{O_2} = \frac{dW_{O_2}}{dt} = K_L \cdot A_B (c_s - c) \quad \dots \dots \dots (14)$$

さらに、カラム容積 V_T 当りの気液接触界面面積を $a_V (= A_B / V_T)$ であらわせば、

$$\frac{1}{V_T} \cdot \frac{dW_{O_2}}{dt} = \frac{dc}{dt} = K_{La} (c_s - c) \quad \dots \dots \dots (15)$$

より、 $t=0$ で $c=0$ の初期条件を考慮して、総括容量係数 K_{La} は、

$$K_{La} = \frac{1}{\tau} \ln \frac{c_s}{c_s - c} \quad \dots \dots \dots (16)$$

により求められる。また、水温の影響については、基準温度を 20°C として¹⁷⁾、

$$K_{La(20)} = K_{La(t)} \cdot 1.024^{20-t} \quad \dots \dots \dots (17)$$

により補正している。

図-7 は、空気流量 G_s に対し、溶存酸素の時間-濃度曲線(式(16))から求めた総括容量係数 K_{La} を点綴したものであり、気泡発生孔径 δ や空気流量 G_s によって K_{La} が変化していることがわかる。

そこで、カラム断面積当りの空気流量、すなわち、空塔速度 u_{gT} に対し総括容量係数 K_{La} を整理したものが図-8 であり、 u_{gT} の増加とともに K_{La} が増加していることがわかる。

また、気泡発生孔から発生する気泡の大きさは、気泡発生孔径と空気流量に関係し、発生孔径 δ が小さいほど気泡径 \bar{D}_v は小さくなり、気泡体積当りの接触界面面積が大きくなることから、同一空塔速度であっても、発生孔径 δ が小さいほど、総括容量係数 K_{La} は大きくなっている。

以上の結果から、実験結果を整理して、総括容量係数 K_{La} と空塔速度 u_{gT} および発生孔径 δ の間について、

$$K_{La} = 1.58 \times 10^{-3} \cdot \delta^{-0.40} \cdot u_{gT}^{0.75} \quad \dots \dots \dots (18)$$

なる実験式を得た。

(4) 端効果について

気泡エアレーションにおいては、発生孔における気泡の生成時、水面到達後の破裂時、ならびに、自由水面を通じての酸素の移動が端効果として酸素の移動に関係してくる。

Johnson¹⁸⁾ らは、気泡塔の高さを変化させて端効果の大きさを求め、気泡塔での端効果は塔高相当に換算して 6 cm 程度であってそれほど大きいものではない、と述べ

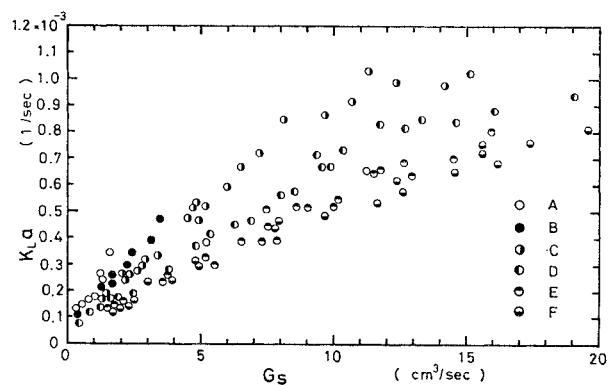


図-7 空気流量と総括容量係数

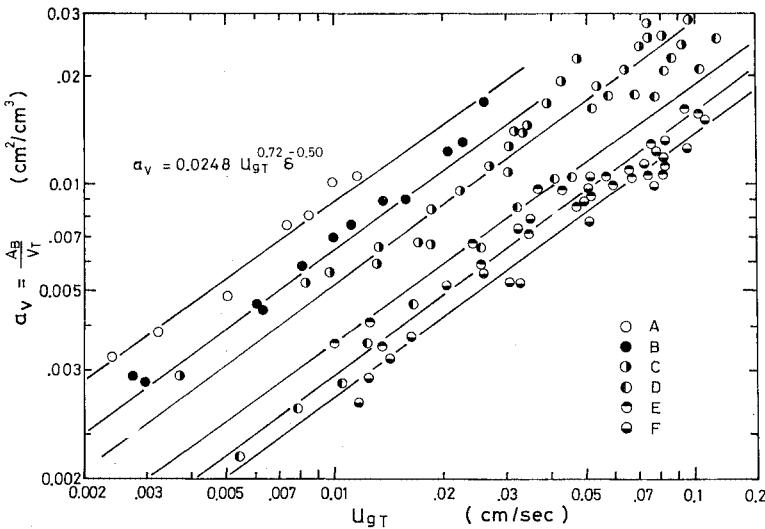


図-8 空塔速度と総括容量係数

べている。また、Beek ら¹⁹⁾や、Calderbank ら²⁰⁾は、気泡の発生時には特に大きな物質移動は起こらない、と報告している。

このように、端効果の影響についての評価は一般に小さいが、河川や湖沼等における自由水面からの酸素の移動現象、すなわち再曝気現象は大きな意味をもっていることから、エアレーション時における自由水面からの酸素の移動、さらに、気泡の生成・破裂時における酸素の移動等を端効果として考えるとき、衛生工学的にこれを無視することはできないであろう。

カラム内が乱流状態で、位置による酸素の濃度分布はなく、槽内全体にわたって均一な濃度であり、酸素の全移動が、気泡の上昇時および端効果の2つの移動からなっていると考えると、

$$\frac{dc}{dt} = K_L a(c_s - c) \\ = k_L \cdot \frac{A_B}{V_T} (c_s - c) + k_{Le} \cdot \frac{A_e}{V_T} \cdot (c_s - c) \quad (19)$$

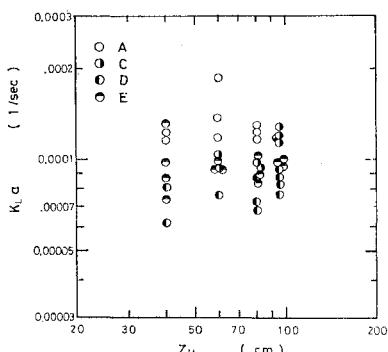


図-9 水深変化と総括容量係数

となり、

$$K_L a \cdot V_T = k_L \cdot A_B + k_{Le} \cdot A_e \quad \dots \dots \dots (20)$$

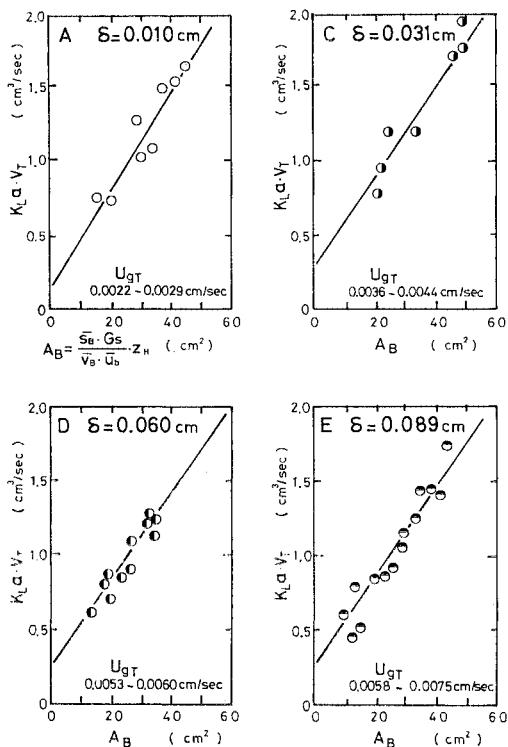
を得る。ここに、 A_B は槽内を上昇している気泡の気液接触界面面積、 A_e は端効果の代表界面面積、 k_L は気泡の液膜係数、 k_{Le} は端効果による酸素移動の液膜係数である。気泡の気液接触界面面積 A_B は、カラム内に存在する気泡の平均表面積 \bar{s}_B 、平均体積 \bar{v}_B 、平均上昇速度 \bar{u}_b と空気流量 G_s および水深 z_H の関係から、

$$A_B = \frac{\bar{s}_B \cdot G_s \cdot z_H}{\bar{v}_B \cdot \bar{u}_b} \quad \dots \dots \dots (21)$$

として求めることができるが、

表-3 端効果実験条件

	A	C	D	E
気泡発生孔径 δ (cm)	0.010	0.031	0.060	0.089
水深 z_H (cm)	80~40	95~60	95~40	95~40
空気流量 G_s (cm ³ /sec)	0.34~0.45	0.56~0.67	0.82~0.92	0.90~1.15
$W_e \cdot F_r^{-1/2}$ (--)	1.86~2.48	1.75~2.09	1.84~2.06	1.67~2.13
発生気泡径 D_b (cm)	0.22~0.26	0.38~0.42	0.60~0.64	0.65~0.70
気泡上昇速度 u_b (sm/sec)	15.3~19.3	17.0~28.2	20.2~26.7	22.1~32.9

図-10 水深変化による気泡の気液接触界面面積と $K_L a \cdot V_T$

3.(2) で示しているように、直接写真撮影によって、長径 D_a 、短径 D_b より回転楕円体としての表面積 s_B と個数から、

$$A_B = \sum n_B \cdot s_B \quad \dots \dots \dots \quad (22)$$

としても求めることができ、ここでは後者の直接法によって A_B を求めた。

表-3に、端効果を求めるために行った実験条件を示している。

図-9 は、端効果を求めるために、水深 z_H を変化させた場合の総括容量係数 K_{La} を示したものであるが、 K_{La} 自体の変化は顕著ではない。

図-10 は、端効果としての酸素移動を求めるために水深 z_H を変化させ、式(20)と式(21)または式(22)の考え方従って、気泡の界面面積が水深によって変化することを利用し、気液接触界面面積 A_B に対して総括移動係数容量積 $K_{La} \cdot V_T$ を点綴したものである注4). 空気流量一定のもと、すなわち、気泡生成速度および気泡の破裂・消滅速度を一定に保った状態において、気泡の自由上昇距離 z_H を変化させた場合の $K_{La} \cdot V_T$ の実測値と式(21)から、水深 z_H を0の極限とした場合、すなわち、気泡は生成されると同時に自由水面にただちに到達して破裂・消滅し、気泡上昇時の界面面積がない $A_B = 0$ に外挿して、端効果の大きさ $k_{Le} \cdot A_e$ として $0.172 \sim 0.275 \text{ cm}^3/\text{sec}$ を得た。

一方、宮内²³⁾らは、攪拌槽や気泡塔における自由表面での液側物質移動係数について、

$$k_{Le} = 0.5 \left(\frac{\epsilon}{\nu} \right)^{1/4} \cdot \mathcal{D}_L^{1/2} \quad \dots \dots \dots \quad (23)$$

を得、さらに気泡塔の平均エネルギー逸散 \bar{E} を空塔速度の関数として次式を示し、

また、自由表面近傍のエネルギー逸散 ε と平均エネルギー逸散 $\bar{\varepsilon}$ の関係について実測値より、

と表わすことができるこことを報告している。

式(23), (24)および(25)より、自由表面での液膜係数 k_{Le} は、

$$k_{Le} = 0.5 \left(\frac{\epsilon}{\nu} \right)^{1/4} \cdot \mathcal{D}_L^{1/2} = 0.247 \cdot \left(\frac{g \cdot u_{gT}}{\nu} \right)^{1/4} \cdot \mathcal{D}_L^{1/2} \quad \dots \dots \dots \quad (26)$$

で示され、空塔速度 u_{gT} の関数として求めることができる。

これより、本実験における端効果を含めた自由水面か

注 4) 気泡の気液接触界面面積と水深について

気泡は発生後数 cm で終端速度に到達し、かつ、空気流量が一定であることから、既報に示したように、 s_B , v_B , u_B はほぼ一定値となる。したがって、気泡の気液接触界面面積 A_B は水深 z_H のみの関数となる。

らの酸素移動に関する液境膜係数 k_{Le} は、0.00456～0.00596 cm/sec として求めることができ、前述の $k_{Le} \cdot A_e = 0.172 \sim 0.275 \text{ cm}^3/\text{sec}$ の結果と対応することによって、端効果代表界面面積 A_e は $38 \sim 53 \text{ cm}^2$ となる。この端効果代表界面面積は、観察時の自由水面における気泡の分散・消滅範囲とほぼ一致する。すなわち、宮内ら²³⁾の自由表面での物質移動を検討した場合の湧き出し面に対応するものと考えることができよう。このように、式(20)中における端効果代表界面面積 A_e は、気泡の生成時・破裂時および自由水面からの酸素の移動を含めた端効果による酸素移動時の界面面積の総和であるが、生成時・破裂時の界面面積を含めて、湧き出し面として上述の A_e の値の平均値 45 cm^2 程度の大きさであると推定される。

また、図-10に見られるごとく、端効果としての酸素移動は、空塔速度の大きさにもよるが、水深が小さくなつて、気泡上昇時の気液接触界面面積が小さくなるほど、全体の酸素移動に対して占める割合は大きくなり、これを無視できないことがわかる。柏谷ら²⁾は、水深3.6mの大型エアレーションタンクを用いて実験を行い、河川の再曝気の考え方を導入して結果を整理し、自由水面からの酸素の移動は、全体の移動の1.5~5%であると報告している。

(5) 気泡の液境膜係数 k_L について

3.(3) で、筆者らは気泡エアレーションカラムにおける総括容量係数 K_{La} を求めた。しかしながら、この総括容量係数 K_{La} の中には、式(19)に示されるように端効果による酸素移動が含まれている。端効果による酸素移動は、気泡生成時や気泡破裂時および自由水面からの移動であり、生成・破裂時の複雑な機構・水面での乱れ強さ等が影響すると考えられる。一方、3.(4) で考察したように、端効果として考えられる移動に関して、自由水面での酸素移動に代表させた液境膜係数 k_{Le} を、自由水面での乱れエネルギーを媒介として空塔速度 u_{gT} で示すことができること、また、その代表界面面積としては、湧き出し面と考えられる自由水面での気泡の分散・破裂範囲をほぼ用いることができるなどから、カラム内の総括容量係数 K_{La} より端効果を分離し、さらに、式(13)を用いることにより、気泡上昇時の液境膜係数 k_{Le} を分離し、考察してみる。

一般に、酸素ガスのような難溶解性ガスの場合、ガス境膜係数 k_g は無視可能であり、このようなときには、液境膜係数 k_L が支配的となって、

とみなすことができ、端効果による酸素移動を除いた総括容量係数 K_{La} と液境膜係数 k_L との間には次式が成

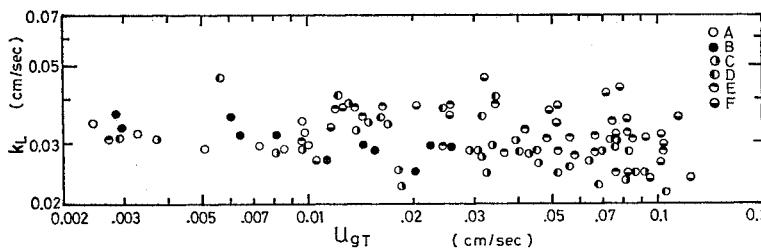


図-11 空塔速度と液境膜係数

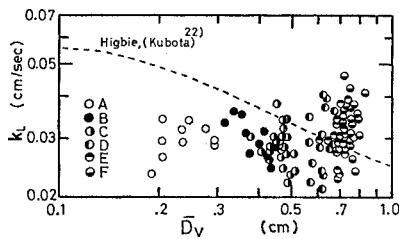


図-12 気泡径 D_v と液境膜係数

立する。

また、総括容量係数 K_{La} および気泡の気液接触界面面積 a_V はそれぞれ、3.(3), (2) のように得られていてことから端効果による酸素移動を考慮して、総括容量係数 K_{La} から気泡の液境膜係数 k_L を分離して点綴したのが図-11 であり、一方、気泡径 D_b に対して点綴したのが図-12 である。只木ら¹⁶⁾は、気泡発生孔径 $\delta = 0.04 \sim 0.08 \text{ cm}$ の多孔板を用いて炭酸ガスの放散実験から気泡塔の容量係数を求め、また写真撮影法によって気泡群の比接触面積を算定し、容量係数から物質移動係数 k_L を分離し、 k_L は発生孔径 δ にはあまり影響されないこと、空塔速度 u_{gT} が大きくなるにつれて K_{La} が大きくなるのは、主として界面面積 a の増加のためにあって、 k_L 自身はあまり変化しないことなどを指摘している。

このように、空塔速度 u_{gT} や気泡径 D_v によらず、液膜係数 k_L がほぼ $0.02 \sim 0.04 \text{ cm/sec}$ と一定の値が示されるのは、空塔速度が小さいために、気泡のホールドアップが小さく、カラム内において気泡は、相互に干渉し合いながらも、分裂・合体現象はなく、個々独立して上昇運動していること、また、気泡径が $0.2 \sim 0.9 \text{ cm}$ の範囲であって、既報⁹⁾のように、気泡のレイノルズ数や抵抗係数で示される気泡の挙動が固体球に近い気泡とはかなりかけ離れたものであって、常に界面は乱れていて、界面を通しての酸素ガスの液への浸透が、ほぼ一定の大きさで行われていることなどの理由が考えられよう。また、装置的にも、市販の蒸留水では界面の汚染を防ぎ切れなかったことも一つの理由であろう。

次に、液膜係数 k_L に関する因子として、気泡径

\bar{D}_v , 上昇速度 \bar{u}_b , 酸素の水中での拡散係数 \mathcal{D}_L をとりあげ,

$$k_L = f(\bar{D}_v, \bar{u}_b, \mathcal{D}_L) \dots \dots \dots (29)$$

として次元解析を行うと

$$\frac{k_L}{\bar{u}_b} = \alpha \cdot \left(\frac{\bar{D}_v \cdot \bar{u}_b}{\mathcal{D}_L} \right)^\beta \dots \dots (30)$$

を得、液境膜係数の気泡上昇速度に対する比 k_L/\bar{u}_b がペクレ数の関数として示すことができる。

図-13 は、式(30)に基づいて実測値を整理して点綴したものであり、ペクレ数が大きくなるにつれて k_L/\bar{u}_b が小さくなっている。一方、図-12 中の破線は、Higbie の浸透説モデル²¹⁾に基づく液膜係数、

を久保田ら²²⁾の実験結果より求めて示したものであり、図-13 中の破線は、これをペクレ数の関数として示したものである。

本研究においては、粘性項の変化を扱っていないため、シャーウッド数やシュミット数およびレイノルズ数などの無次元群として整理し得なかったが、ペクレ数が流れの状態による乱流拡散および流体の性質を包括した形であることより、気泡群からの酸素移動を支配すると考えられる液境膜係数を整理した。

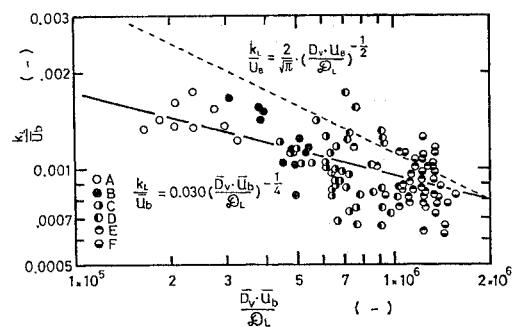


図-13 ペクレ数 $(\frac{D_v \cdot u_b}{\phi_s})$ と $\frac{k_L}{u_b}$

4. 表と線

单一孔を通して水中に発生する気泡群からの酸素移動について実験を行い、次のような諸点が明らかとなつた。

- (1) 槽の単位体積当りの気泡の個数や大きさを写真から測定し、この結果と空塔速度の関係から、気泡流動層の範囲における気泡のホールドアップを推定できる。
 - (2) 気泡群の平均上昇速度を空塔速度から推定することができる。
 - (3) 気泡の気液接触界面面積 a_V は空塔速度が大き

くなるほど、また、気泡発生孔径が小さくなつて気泡径が小さいほど、大きくなる。

(4) 総括容量係数 K_{La} は、空塔速度が大きくなるほど、また、気泡発生孔径が小さくなるほど、大きくなるが、これはガスホールドアップが大きくなつて気液接触界面面積が大きくなることによるものであろう。

(5) 端効果による酸素移動を自由水面からの酸素移動に代表させることによって、液境膜係数 k_{Le} を推定し、 $0.004 \sim 0.006 \text{ cm/sec}$ の値を得た。

(6) 端効果による酸素の移動は、空塔速度によっても異なるが、水深が小さくなるほど、全体の酸素移動に対する占める割合が大きくなる。

(7) 気泡からの酸素移動に関する液境膜係数 k_L は、平均気泡径が $0.2 \sim 0.9 \text{ cm}$ の範囲では、ほぼ $0.02 \sim 0.04 \text{ cm/sec}$ である。

(8) 気泡の液境膜係数を気泡上昇速度およびペクレ数によって整理した。

実際のエアレーションタンクにおいては、多孔盤や多孔管などの散気装置を用いて活性汚泥混合液に酸素の供給がなされている。現時点において本研究の結果を直接実処理に結びつけることはできないが、今後さらに物性条件や装置条件に対応する実験データの蓄積を行うことにより、実設計や実操作に演繹することが可能となる。ことに、気泡の液境膜係数や端効果による酸素移動の把握は、気泡群による酸素供給という観点から、多くの因子が複雑に作用するエアレーションの内部機構を解明していくうえで、一つの示唆となるものと考えられる。

終わりに、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 只木楨力教授、宝沢光紀助教授、ならびに実験にご協力いただいた仙台市大滝善嗣氏、菅田秀穂氏、木更津工業高等専門学校 高橋克夫講師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。

使用記号

A_T	: カラム(タンク)断面積	(cm ²)
A_B	: 気泡の気液接触界面面積	(cm ²)
a_V	: 単位容積当たりの気泡の気液接触 界面面積 ($= \frac{A_B}{V_T}$)	(cm ² /cm ³)
A_e	: 端効果における代表接触界面面積	(cm ²)
c	: 水中の酸素濃度	(mg/l)
c_s	: 水中の飽和酸素濃度	(mg/l)
c_{ws}	: 大気圧における水中の飽和酸素濃度	(mg/l)

D_a	: 気泡の長径	(cm)
D_b	: 気泡の短径	(cm)
D_v	: 球体積相当気泡直径	(cm)
\bar{D}_v	: 球体積相当平均気泡直径	(cm)
D_{vs}	: 体面積相当気泡直径	(cm)
\mathcal{D}_L	: 酸素ガスの水中拡散係数	(cm ² /sec)
F_r	: フルード数 ($= u_G^2/g \cdot \delta$)	(—)
G_s	: 空気流量	(cm ³ /sec)
g	: 重力加速度	(cm/sec ²)
h_s	: 気泡のホールドアップ	(—)
K_L	: 物質移動総括係数	(cm/sec)
K_{La}	: 総括容量係数	(1/sec)
k_g	: ガス境膜係数(ガス側物質移動係数)	(cm/sec)
k_L	: 液境膜係数(液側物質移動係数)	(cm/sec)
k_{Le}	: 端効果における液境膜係数	(cm/sec)
k_s	: 表面積形状係数	(—)
k_v	: 体積形状係数	(—)
N_B	: カラム内に存在する気泡総個数	(個)
N_{O_2}	: 酸素吸収速度	(mgO ₂ /sec)
N_W	: ガス流速因子数 ($= W_e \cdot F_r^{-1/2}$)	(—)
n_B	: カラム内における単位容積中の 気泡個数	(個/cm ³)
n_{B_e}	: 単位時間当たりの気泡発生個数	(個/sec)
P	: 圧力	(mAq)
R_e	: レイノルズ数 ($= D_b \cdot u_b / \nu$)	(—)
s_c	: シュミット数 ($= \nu / \mathcal{D}_L$)	(—)
s_h	: シャーウッド数 ($= k_L \cdot D_b / \mathcal{D}_L$)	(—)
s_B	: 気泡の表面積	(cm ²)
\bar{s}_B	: 気泡の平均表面積	(cm ²)
u_B	: 単一気泡の静止水中での上昇速度	(cm/sec)
u_b	: 気泡の水中みかけ上昇速度	(cm/sec)
\bar{u}_b	: 気泡の水中みかけ平均上昇速度	(cm/sec)
u_G	: 気泡発生孔における空気流速	(cm/sec)
u_{gT}	: 空塔速度	(cm/sec)
V_T	: カラム容積	(cm ³)
V_B	: カラム内の総気泡体積	(cm ³)
v_B	: 気泡の体積	(cm ³)
\bar{v}_B	: 気泡の平均体積	(cm ³)
W_e	: ウェバー数 ($= \rho_L \cdot u_G^2 \cdot \delta / \sigma$)	(—)
W_{O_2}	: 酸素吸収量	(mgO ₂)
z	: 測定(撮影)した水深	(cm)
z_H	: カラムの水深	(cm)
α	: 実験定数	(—)
β	: 実験定数	(—)
δ	: 気泡発生孔径	(cm)
ϵ	: エネルギー逸散	(cm ² /sec ³)

\bar{e}	平均エネルギー逸散	(cm ² /sec ³)
ν	水の動粘性係数	(cm ² /sec)
π	円周率	(—)
ρ_L	水の密度	(g/cm ³)
ρ_G	空気の密度	(g/cm ³)
σ	水の表面張力	(dyn/cm)
τ	時間	(sec)
τ_θ	気泡の滞留時間 ($=z_H/u_b$)	(sec)
ϕ_s	形状係数	(—)

参考文献

- 1) King, H.R. : Mechanics of oxygen absorption in spiral flow aeration tanks. I. Derivation of formulas, Sewage and Ind. Wastes., Vol. 27, No. 8, pp. 894~908, 1955.
- 2) 柏谷 衛・安中徳二・及川直也：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. 91~102, 1971.
- 3) Bewtra, J.K. and W.R. Nicholas : Oxygenation from diffused air in aeration tanks, Jour. W.P.C.F., Vol. 36, No. 10, pp. 1195~1224, 1964.
- 4) 寺岡 初・清水 治・浅野和彦・福永 念・久保田勝義：曝気装置の基礎的研究—各種散気管の曝気性能について、水道研究所報告、Vol. 5, No. 1, pp. 12~18, 1968.
- 5) 宗宮 功：活性汚泥法の操作因子に関する基礎的研究、京都大学学位論文、pp. 9~48, 1968.
- 6) Pasveer, A. : Research on activated sludge. VI. Oxygenation of water with air bubbles, Sewage and Ind. Wastes, Vol. 27, No. 10, pp. 1130~1146, 1955.
- 7) Banhart, E.W. : Transfer of oxygen in aqueous solutions, Proc. A.S.C.E., SA 3, Vol. 95, pp. 645~661, 1969.
- 8) Suschka, J. : Oxygenation in aeration tanks, Jour. W. P.C.F., Vol. 43, No. 1, pp. 81~92, 1971.
- 9) 松本順一郎・中村玄正：単一孔から発生する気泡の性状と分布特性について、土木学会論文報告集、第 260 号, pp. 75~87, 1977.
- 10) Oldshue, J.Y. : Aeration of Biological System Using Mixing Impellers, Biological Treatment of Sewage and Industrial Wastes, Reinhold, pp. 231~240, 1956.
- 11) 化学工学協会：化学工学便覧、丸善、pp. 1~90, 1970.
- 12) 化学工学協会編：気泡分散相によるガス吸収一気泡・液滴工学、日刊工業新聞社、pp. 83~108, 1969.
- 13) Yoshida, F. and Akita, K. : Performance of gas bubble columns, A.I.Ch. E. Jour., Vol. 11, pp. 9~13, 1965.
- 14) 吉留 浩：水中における気泡群の平均上昇速度について、化学工学, Vol. 27, No. 1, pp. 27~31, 1963.
- 15) 小出耕造・平原照晏・久保田 宏：気泡群の平均気泡径・上昇速度およびガスホールドアップ、化学工学, Vol. 30, No. 8, pp. 712~718, 1966.
- 16) 只木慎力・前田四郎：気泡塔における水よりの炭酸ガスの放散について、化学工学, Vol. 27, No. 11, pp. 808~814, 1963.
- 17) Eckenfelder, W.W. and D.J. O'Connor(岩井重久訳)：廃水の生物学的処理、コロナ社、pp. 88~89, 1970.
- 18) Johnson, A.I. and C.W. Bowman : Canad. Jour. Chem. Eng., Vol. 36, p. 253, 1958.
- 19) Beek, W.J. and H. Kramers : Mass transfer with a change in interfacial area, Chem. Eng. Sci., Vol. 16, pp. 909~921, 1962.
- 20) Calderbank, P.H. and A.C. Lochiel : Mass transfer coefficients, velocities and shapes of carbon dioxide bubbles in free rise through distilled water, Chem. Eng. Sci., Vol. 19, pp. 485~503, 1964.
- 21) たとえば、Danckwerts, P.V. : Significance of Liquid-Film Coefficients in Gas Absorption, Ind. Eng. Chem., Vol. 43, No. 6, pp. 1460~1465, 1951.
- 22) 久保田 誠・明畠高司・白井 隆：低粘度液中における單一気泡の挙動について、化学工学, Vol. 31, No. 11, pp. 1074~1080, 1967.
- 23) 片岡 広・宮内照勝：乱流域の攪拌槽自由表面における液側物質移動係数におよぼす物性および乱れの影響、化学工学, Vol. 36, No. 8, pp. 888~896, 1972.

(1976.8.2・受付)