

## 单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

FUNDAMENTAL STUDIES ON THE AIR BUBBLES FROM A SINGLE  
ORIFICE—DISTRIBUTIONS OF THE SIZES OF THE AIR BUBBLES  
AND THE RATE OF OXYGEN TRANSFER—

松本順一郎\*・中村玄正\*\*  
By Junichiro Matsumoto and Michimasa Nakamura

## 1. はじめに

活性汚泥法におけるエアレーションと攪拌の目的は、

- i) 好気性微生物すなわち活性汚泥に酸素を供給する。
- ii) 基質となる有機性廃水と活性汚泥とをよく接触させる。

により、活性汚泥と有機物を均一に混合し、処理効率を高めることである。

散気式エアレーションタンクは、散気装置より発生する気泡によって、活性汚泥への酸素供給、廃水と活性汚泥の混合を行なおうとするものであり、エアレーションタンクの設計や管理を合理的に行なって処理効率を高めるためには、タンク内における酸素の供給および混合流体の流動という2つの大きな因子を支配する気泡の挙動や性状を知ることが必要である。エアレーションタンク内の混合流体の流動を把握しようとする試みは、これまでにも Grieves<sup>1)</sup>、King<sup>2)</sup>、松本・大沼<sup>3)</sup>、合田・宗宮<sup>4)</sup>、合田・中西<sup>5)</sup>らによって報告されている。

一方、気泡の動的挙動や性状に関する実験的研究については、液体を種々に変化させて、気泡の形状、上昇速度、レイノルズ数、抵抗係数等の相互の関係を実験的に示した Haberman & Morton<sup>6)</sup> の報告や、また、物性の影響を考慮した場合における静止液体中を上昇する単一気泡の形状や上昇速度、さらには單一オリフィスより生じる気泡群の形状や分布に関する只木・前田<sup>7), 8), 9)</sup> らの研究がある。

つぎに、エアレーションタンクにおける酸素移動について、Lewis & Whitman<sup>10)</sup>の二重境膜説に基づ

いて Pasveer<sup>11)</sup> はエアレーションタンクの酸素供給能 (Oxygenation Capacity) として

$$O.C. = 25.9 \tan \alpha \cdot \sqrt{\frac{k_{10}}{k_T}} \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$\text{ここで, } \tan \alpha = \frac{1}{t_1 - t_0} \log \frac{C_{LS} - C_0}{C_{LS} + C_0}$$

を与え、多孔性板散気装置より 20~80 ml/min の範囲の通気量で 0.6~1.8 mm の気泡を発生させて、気泡の性状と O.C. の関連性や経済性に検討を加えている。また、Eckenfelder<sup>12),13)</sup>は酸素吸収効率におよぼす影響因子として、通気量、水深、水温、攪拌の効果等をあげ、さらに物性による影響にまで言及している。彼はまた、相当径 0.05~0.2 cm、気泡のレイノルズ数 50~500 の気泡群による酸素移動の液膜係数は気泡の相対速度に比例し、動粘性に逆比例することを示している。旋回流式エアレーションタンクを対象として、King<sup>2)</sup>は多孔性板散気装置より発生する気泡と酸素吸収との関係をタンク内流体の流速と組み合わせて検討し、タンク内の酸素吸収という問題に一つの方向性を示した。液体の特性を変化させて、数種のドーム型散気装置、多孔性板散気装置、機械式散気装置等について実験を行ない、水深の変化をパラメーターとして気泡径と酸素移動係数の変動を検討しているのが Downing & Boon<sup>14)</sup>であるが、酸素移動係数は気泡径にはほとんど影響を受けず、散気係数 (Diffused Air Coefficient = 吸收酸素量 / 供給空気量・酸素不足量・液深) は気泡径に逆比例するという結果が彼らによって報告されている。Ippen & Carver<sup>15)</sup>はノズル径や深さが一定であれば、酸素吸収率は通気量が小さいほど良い値が得られ、水深は浅いほど吸収率が高いという結果を示している。散気装置に関する研究としては、Morgan & Bewtra<sup>16)</sup>がフルスケールの旋回流式実験水槽に多孔性サラン管、ディスクタイプ、スペジャーライプ、シアボックス、ベンチュリータイプ

\* 正会員 工博 東北大学教授 工学部土木工学科

\*\* 学生員 工修 東北大学大学院博士課程学生 同上

等の散気装置を取付けて実験を行ない、ことにシアボックス、ベンチュリー タイプの散気装置の場合には 散気部における液の強い流れによる水理的せん断力の働きによって液の搅拌と気液接触界面が増大し、この結果酸素吸收率は大きくなるという報告がある。

以上のように、気泡エアレーションによる酸素移動についてかなり広く実験、研究が行なわれているが、オリフィス径、気泡の性状、通気量および酸素移動等の相互の関連性についての考察はいずれの報告も部分的であるように思われる。そこで本研究では、一定のオリフィスより発生する気泡の性状と酸素移動について基礎的な実験を行ない、散気式エアレーションタンクにおける酸素移動の問題に気泡の分布という観点から考察を加えた。

## 2. 気泡の形状と上昇速度

エアレーションタンクにおける混合流体の流動が、散気装置より発生する気泡の噴出の頻度、上昇速度ならびに体積等の関数であるとすると、酸素の移動効率もまた、気泡の生成、噴出頻度、上昇、破裂ならびに接触界面面積等の関数であると考えるのが妥当であろう。実際の処理場で行なわれているエアレーションのはほとんどが多孔性板散気装置によるものであるが、ここでは個々の気泡についてさらに詳細に検討するために孔径の判明している單一オリフィス散気装置を使用した。

### (1) 実験装置および方法

図-1 に気泡の形状、大きさ、気泡径の分布状態、上昇速度等の測定に用いた実験装置の概略を示した。エアレーションタンクは片面にすりガラス、片面に透明ガラスを張ったものであり、容量は約 324 l である。タンク内に生じる気泡を撮影する際の焦点深度の誤差を小さくするため 150 mm 望遠レンズ付カメラをタンク前面約 4 m の位置に固定し、約 1/3000 秒で発光するストロボフラッシュと連動して写真撮影を行なった。撮影した気泡をスクリーン上に約 2 倍に拡大投影し、長半径

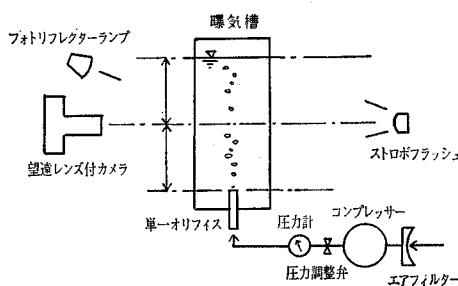
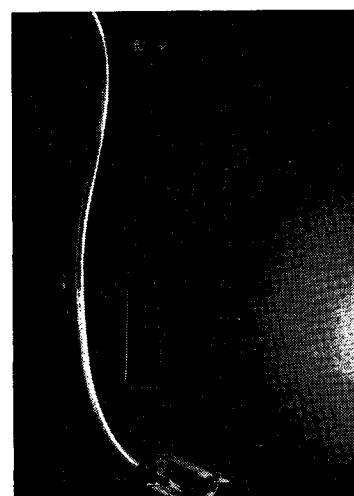


図-1 実験装置の概略図



$\phi=0.3 \text{ mm}$   $V_g=39 \text{ cm}^3/\text{min}$   
シャッター速度 0.465 秒 絞り 2.8

写真-1



$\phi=0.3 \text{ mm}$   $V_g=200 \text{ cm}^3/\text{sec}$   
シャッター速度 0.465 秒 絞り 2.8

写真-2

a, 短半径  $b$  をノギスで 0.1 mm まで測定し、後述の方法で各気泡の体積  $v$ 、球相当半径  $r$  を求めた。また、上昇速度はあらかじめカメラのシャッター速度を測定し、フォトリフレクター ランプからの光を気泡に反射させて気泡流跡の長さを測定することによって求めた。なお、通気量は正確を期するため、水上置換法によって測定し、水温もほぼ 15°C に保った。気泡流跡の例を写真-1 および写真-2 に示した。

### (2) 実験結果と考察

従来の報告によれば<sup>6), 7), 8), 9)</sup>、気泡はその大きさに応じて、形状が球形、回転だ円体およびキノコの笠状に変

表-1 オリフィス径と各測定値

オリフィス径 $\phi$ [mm]	通気量 $V_g$ [cm <sup>3</sup> /min]	平均気泡体積 $\bar{v}_b$ [mm <sup>3</sup> ]	球相当半径 $r$ [mm]	球相当径 $2\bar{r}$ [mm]	偏平比 $b/a$ [-]	平均上昇速度 $\bar{u}$ [cm/sec]	レイノルズ数 $R_e$ [-]	抵抗係数 $C_D$ [-]
0.3	8	29.5	1.85	3.70	0.57	26.0	738	0.71
0.5	10	55.0	2.36	4.72	0.48	26.6	967	0.87
0.8	18	170.4	3.44	6.88	0.43	27.9	1 467	1.16
1.2	32	344.5	4.35	8.70	0.44	28.2	1 887	1.43
1.6	60	535.9	5.04	10.08	0.44	30.5	2 362	1.42
2.0	108	448.6	4.75	9.50	0.50	28.5	2 085	1.53

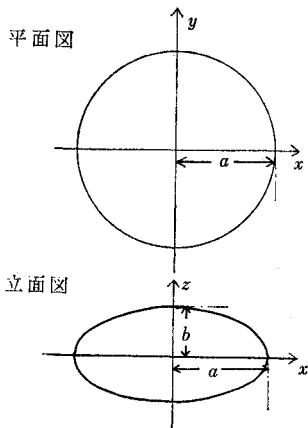


図-2 気泡の形状

化すると述べられている。筆者らの撮影した写真的観察によっても、オリフィス径  $\phi=0.3 \sim 1.2 \text{ mm}$  より発生する気泡はほぼ回転だ円体とみなしてよく、 $\phi=1.6 \text{ mm}$  および  $2.0 \text{ mm}$  より発生する気泡も近似的に回転だ円体とみなすことができた。

気泡を回転だ円体と仮定したときの算定は次式によった。これを図-2 に示した。

$$\text{体積 } v = 4/3 \cdot \pi a^2 b = 4/3 \cdot \pi r^3 \dots \dots \dots (2)$$

$$\text{表面積 } s = 2 \pi a^2 + \frac{\pi ab^2}{\sqrt{a^2 - b^2}} \ln \frac{a + \sqrt{a^2 - b^2}}{a - \sqrt{a^2 - b^2}} \dots \dots \dots (3)$$

オリフィス径  $\phi$  を  $0.3 \text{ mm}$  から  $2.0 \text{ mm}$  まで変化させて各気泡を算定し、約 100 個の気泡について平均体積  $\bar{v}$ 、平均球相当半径  $\bar{r}_a$ 、短半径  $b$  と長半径  $a$  の比  $b/a$ 、平均気泡上昇速度  $\bar{u}_a$ 、気泡のレイノルズ数  $R_e$  および抵抗係数  $C_D$  を求めたのが表-1 であり、これをさらに文献値と比較したのが図-3、図-4 である。これより、オリフィス径  $\phi$  に比例して発生する気泡の球相当半径  $r$  は大きくなり、上昇速度  $u$  も大きくなっている。球相当半径  $r$  が  $1.8 \text{ mm}$  から  $5.0 \text{ mm}$  まで変化するとき、気泡の上昇速度  $u$  は  $26 \text{ cm/sec}$  から  $31 \text{ cm/sec}$  であった。これは只木<sup>7)</sup>、Haberman<sup>8)</sup> らの値より  $5 \text{ cm/sec}$  程度大きくなっていた。一方、気泡のレイノルズ数  $R_e$  は球相当半径  $r$  が  $1.8 \text{ mm}$  から  $5.0 \text{ mm}$  まで変化するとき、700 から 2 400 まで変化していた。また、球形固体の場合、抵抗係数  $C_D$  はレイノルズ数  $R_e$  が大きくなるにした

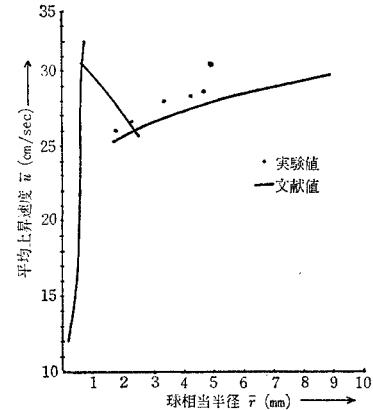
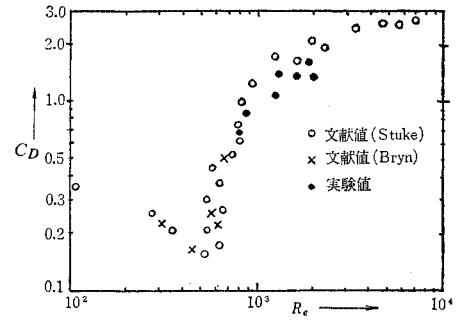


図-3 球相当半径と平均上昇速度

図-4 レイノルズ数  $R_e$  と抵抗係数  $C_D$ 

がって小さくなるが、気泡の場合には、レイノルズ数が大きくなると抵抗係数も大きくなって、実験では 0.71 から 1.53 の値が得られた。気泡の上昇方向に対して直角な断面は円形と見られるので、上昇抵抗と浮力の関係から、等速運動と仮定して、

$$\frac{4}{3} \pi \cdot \bar{r}_a^3 \cdot g (\rho - \rho') = \frac{\rho}{2} \cdot C_D \cdot \bar{u}_a^2 \cdot \pi \cdot \bar{r}_a^2 \dots \dots \dots (4)$$

よって抵抗係数  $C_D$  は

$$C_D = \frac{4}{3} \cdot \frac{2 \bar{r}_a \cdot g}{\bar{u}_a^2} \dots \dots \dots (5)$$

ただし、 $\rho - \rho' \approx \rho$

つぎに、オリフィス径を  $\phi=0.3 \text{ mm}$  と一定とし、通気量  $V_g$  と平均上昇速度  $\bar{u}_a$  との関係を示したのが図-5 である。通気量  $V_g$  が大きくなるにしたがって上昇速度  $\bar{u}_a$  は大きくなっている。これは気泡が少ないと、静止水中を個々の気泡が、浮力と抵抗によってきま

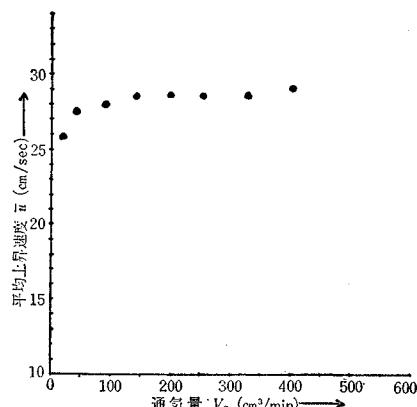


図-5 通気量  $V_a$  と気泡平均上昇速度  $\bar{u}$

る終速度で上昇すると考えられるが、多数の気泡が群をなして上昇するときには、気泡同士の相互干渉や水の粘性のために気泡の周囲に水の上昇流が生じることによって気泡の上昇速度も大きくなると考えられる。

流跡写真による上昇速度測定法は、気泡が少ないときには、流跡が重複して測定困難となる。今後、この気泡群の平均上昇速度を求めるには、タンク内の垂直方向の圧力勾配を測定して気泡のホールドアップを知り、これから求める方法も検討すべきであろう。さらに、気泡群上昇時の相互干渉、粘性等を考慮した境界層の理論的解明も今後の問題である。

### (3) 小插

単一オリフィスより生じる気泡の性状について実験を行ない、つぎのような結果が得られた。

① 通気量  $V_g$  の小さい範囲では、オリフィス径  $\phi$  に比例して発生する気泡の球相当半径  $r$  は大きくなり、上昇速度  $u$  も大きくなっている。球相当半径  $r$  が 1.8 mm から 5.0 mm までの範囲では、気泡の上昇速度  $u$  は 26 cm/sec から 31 cm/sec に変化していた。

② 気泡の球相当半径  $r$  が 1.8 mm から 5.0 mm まで変化するとき、気泡のレイノルズ数  $R_e$  は 700 から 2,400 の値が得られた。

③ 気泡の抵抗係数  $C_D$  は気泡の球相当半径 1.8 mm のとき 0.71, 4.8 mm のとき 1.53 と大きくなっている。

④ オリフィス径を  $\phi=0.3\text{ mm}$  と一定にしたとき、通気量  $V_g$  が  $10\text{ cm}^3/\text{min}$  から  $430\text{ cm}^3/\text{min}$  に変わると、気泡の平均上昇速度  $\bar{u}_a$  は  $25.5\text{ cm/sec}$  から  $29.5\text{ cm/sec}$  に変化した。これは、気泡自体の上昇速度に、さらに気泡群の上昇にしたがって周囲の水に上昇流が生じ、この水の上昇流速が加わったためと考えられる。また、通気量が大きいときには、噴出時の初速度も大きくなり、この影響も考えられる。

### 3. 単一オリフィスから生じる気泡径の分布

実際のエアレーションタンクにおいては、二酸化ケイ素や酸化アルミニウムの粒子からなる多孔質の板または管を用いた散気装置から気泡を発生させている。しかし、この種の散気装置から発生する気泡の性状は、オリフィス径が一定ではなく、また撮影方向に対して気泡が重複するため解析が困難である。Morgan & Bewtra<sup>13</sup>、Downing & Boon<sup>14)</sup> らも散気装置あたりの通気量、透過率に対して酸素吸収を求めている。本実験では、單一オリフィスより発生する気泡の大きさやその分布について、通気量  $V_g$  を変えて検討した。オリフィス径は  $\phi = 0.3 \text{ mm}$  である。

### (1) 実験装置および方法

実験装置は図-1と同じであり、実験方法も気泡の形状を求めるものと同じである。写真-3および写真-4は撮影した気泡の例である。

## (2) 実験結果と考察

a) 気泡の体積と表面積

個々の気泡の体積  $v$  と表面積  $s$  を式(2)および式(3)にしたがって算定し、これらをプロットしたのが 図-6 である。これから、單一オリフィスより発生する気泡の体積と表面積の間には、ほぼ一定の関係があることがわかる。最小自乗法により両者の関係を示す実験式を求める

となつた。これを図-6に実線で示した。

### b) 気泡径の分布

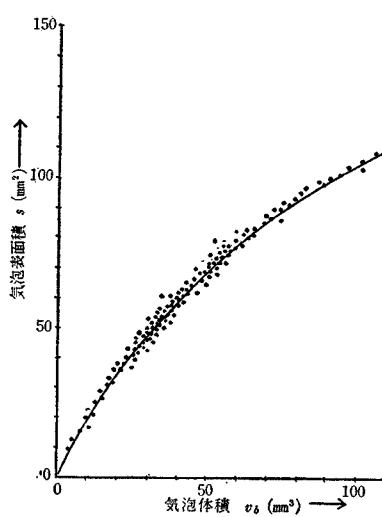


図-6 気泡体積と気泡表面積

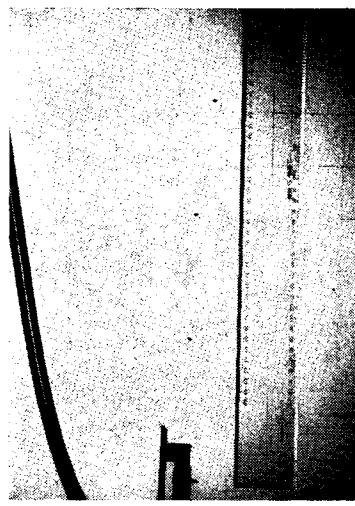
 $\phi = 0.3 \text{ mm} \quad V_g = 6 \text{ cm}^3/\text{min}$ 

写真-3

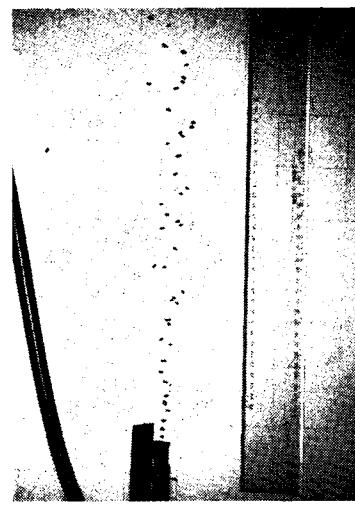
 $\phi = 0.3 \text{ mm} \quad V_g = 39 \text{ cm}^3/\text{min}$ 

写真-4

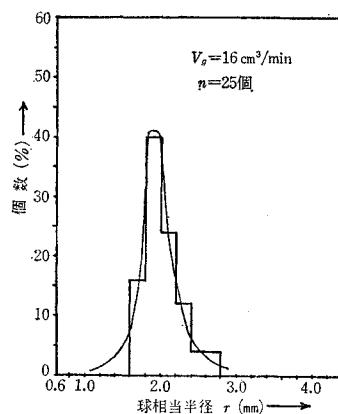


図-7 気泡分布の例-a

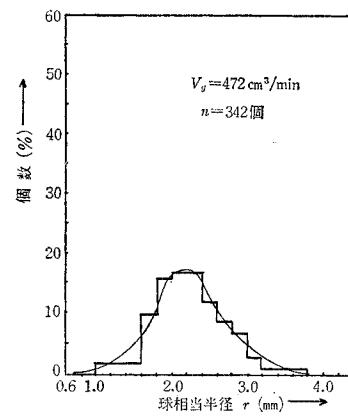


図-8 気泡分布の例-b

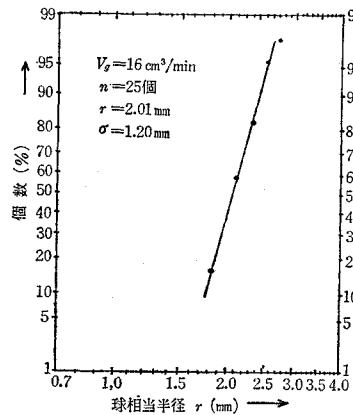


図-9 対数確率紙上の気泡分布-a

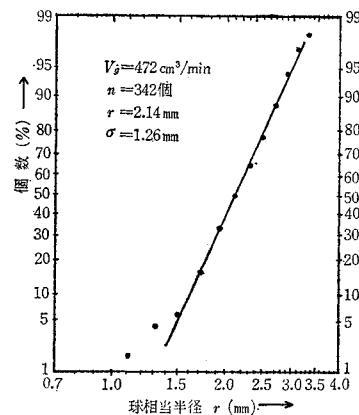
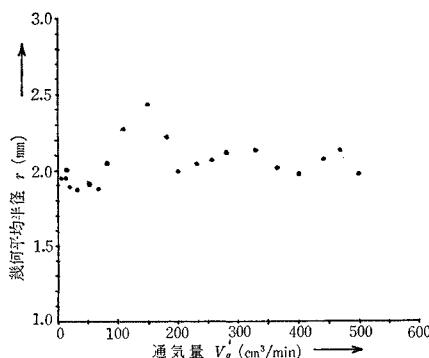
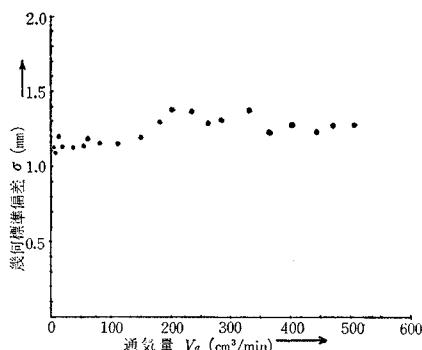


図-10 対数確率紙上の気泡分布-b

上記の方法で測定、算出した気泡の球相当半径  $r$  と、百分率で表わした個数分布との関係を図-7 および図-8 に例示した。これをさらに対数確率紙にプロットした

ものが図-9、図-10 であり、通気量  $V_g$  が大きい場合には両端ではずれるが、いずれもほぼ直線関係を満足するところみなすことができる。すなわち、

図-11 通気量  $V_g$  と幾何平均球相当半径  $\bar{r}$ 図-12 通気量  $V_g$  と幾何標準偏差  $\sigma$ 

$$f\left(\frac{n}{\Sigma n}\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \log \sigma} \exp\left[-\frac{-(\log r - \log \bar{r})^2}{2(\log \sigma)^2}\right] \quad \dots \dots \dots (7)$$

ここで  $f(n/\Sigma n)$  は対数確率密度関数で<sup>17)</sup>,  $\bar{r}$  は幾何平均気泡半径（対数確率紙上で 50% の値を示す気泡半径）であり,  $\sigma$  は幾何標準偏差（対数確率紙上で 84.1% を示す  $r$  と  $\bar{r}$  の比）である。また,  $\sigma$  はつぎのようにも定義される。

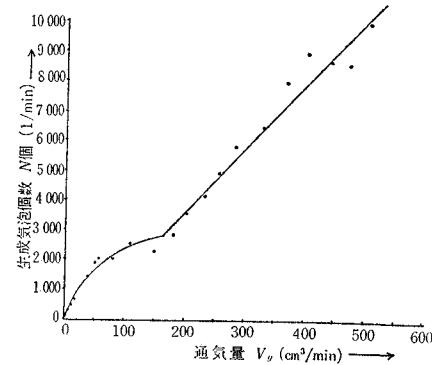
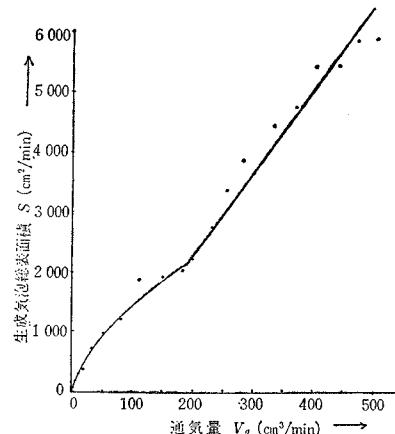
$$\log \sigma = \sqrt{\frac{\sum [n(\log r - \log \bar{r})^2]}{\Sigma n}} \quad \dots \dots \dots (8)$$

なお、図-7 および図-8 の実線は式(7)に  $\bar{r}$  と  $\sigma$  の値を代入して密度関数のグラフを描いたもので、柱状図を近似したものとなる。

つぎに、幾何平均半径  $\bar{r}$  および幾何標準偏差  $\sigma$  について検討してみる。通気量  $V_g$  に対して  $\bar{r}$  と  $\sigma$  の値をプロットしたのが図-11 および図-12 である。 $\bar{r}$  は  $V_g$  が小さいときにはほぼ一定であり、 $\sigma$  も 1 に近い。 $V_g$  が大きくなるにしたがって  $\bar{r}$  は次第に大きくなり、やがて極大に達し、 $\sigma$  も徐々に大きくなってくる。さらに  $V_g$  を大きくすると気泡の大きさはまちまちとなり、 $\sigma$  は大きくなり、 $\bar{r}$  は小さくなってくる。

### c) 気泡の個数

通気量  $V_g$  と単位時間当たりに発生する気泡の個数と

図-13 通気量  $V_g$  と生成気泡個数  $n$ 図-14 通気量  $V_g$  と生成気泡表面積  $S$ 

の関係を示したのが図-13 である。この図において、 $V_g$  が 180 cm³/min 付近をこえるとほぼ直線的に増える。図-13 のプロットから実験式を求めるよ

$$N=138 V_g^{0.60} \quad V_g \leq 180 \text{ cm}^3/\text{min} \dots \dots \dots (9)$$

$$N=173+19 V_g \quad V_g > 180 \text{ cm}^3/\text{min} \dots \dots \dots (10)$$

が得られた。

### d) 気泡の総表面積

図-14 は通気量  $V_g$  に対して単位時間内に発生する気泡の総表面  $S$  を算出してこれを図示したものである。 $V_g$  と  $S$  については

$$S=24.9 V_g^{0.88} \quad V_g \leq 180 \text{ cm}^3/\text{min} \dots \dots \dots (11)$$

$$S=-440+14.6 V_g \quad V_g > 180 \text{ cm}^3/\text{min} \dots \dots \dots (12)$$

なる実験式が得られた。以後、酸素吸収等について発生気泡総表面積はこの式を用いて検討した。

## (3) 小括

$\phi=0.3 \text{ mm}$  の單一オリフィスより発生する気泡についてつぎのようなことがわかった。

① 個々の気泡の体積  $v$  と表面積  $s$  の間には、式(6)で近似される関係が得られた。

② 単一オリフィスより生じる気泡の球相当半径はほぼ対数確率分布にしたがう。

③ 通気量  $V_g$  が小さいときには、ほぼ均一な気泡が生成され、幾何標準偏差  $\sigma$  は 1 に近いが、 $V_g$  が大きいときには気泡の大きさはまちまちで  $\sigma$  も大きい値を示す。 $\sigma$  は  $V_g=180 \text{ cm}^3/\text{min}$  付近で変化する。

④ 幾何平均半径  $\bar{r}$  は通気量  $V_g$  が小さいときには、ほぼ一定であるが、 $V_g$  が大きくなるにしたがって  $\bar{r}$  も大きくなり、 $V_g=180 \text{ cm}^3/\text{min}$  付近で最大となる。さらに  $V_g$  を大きくすると  $\bar{r}$  は小さくなっている。

⑤ 通気量  $V_g$  と生成気泡個数  $N$  については式(9)および式(10)が実験式として得られた。

⑥ 通気量  $V_g$  と生成気泡表面積  $S$  については式(11)および式(12)が実験式として得られた。

⑦ オリフィス径  $\phi=0.3 \text{ mm}$  より生成される気泡の分布状態は通気量  $V_g=180 \text{ cm}^3/\text{min}$  付近を境として大きく変化していることがわかった。

#### 4. 単一オリフィスより生じる気泡による酸素移動

エアレーションタンクにおける気泡群からの overall な酸素の移動が定量的にどのように進行なわれているかについては、King<sup>2)</sup>, Pasveer<sup>11)</sup>, Eckenfelder<sup>13)</sup>, Downing<sup>14)</sup> らの報告がある。ここでは  $\phi=0.3 \text{ mm}$  の単一オリフィスより生じる気泡による酸素移動についての実験を行ない、気泡の分布との関連を求めた。

溶存酸素を測定する方法には、各種のウインクラー変法、柴田・ミラー法等の滴定法と、酸素をイオン化させてその量を求める電極法<sup>18), 19)</sup> とがある。滴定法では連続測定に限度があり、また水中各点における測定を自由に行なうということも困難であるが、電極法による溶存酸素分析計を使用することによってこれらの技術的問題も解決される。

##### (1) 実験装置および方法

実験装置の概略を図-15 に示した。亜硫酸ナトリウムにより脱酸素した水道水を小型エアレーションタンク

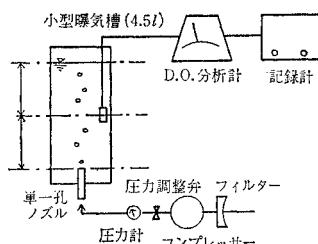


図-15 実験装置の概略図

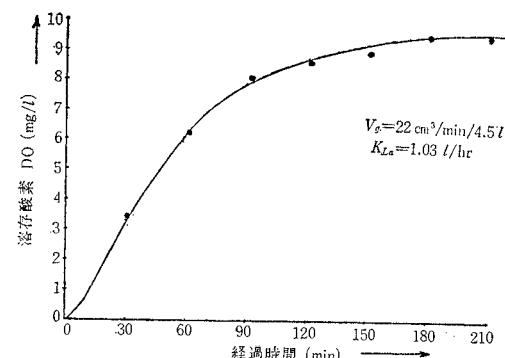


図-16 時間-酸素吸収曲線

に入れ、 $\phi=0.3 \text{ mm}$  の単一オリフィス散気装置により散気し、電位差式自動記録計を連結した溶存酸素分析計によって酸素吸収曲線を描かせる。酸素の移動は二重境膜説に基づいて次式で表わされる。

$$\frac{dc}{dt} = K_{La}(C_S - C_L) \quad \dots \dots \dots (13)$$

また、総括酸素移動係数  $K_{La}$  は式(13)より

$$K_{La} = \frac{1}{t_2 - t_1} \ln \frac{C_S - C_1}{C_S - C_2} \quad \dots \dots \dots (14)$$

で与えられ、さらに酸素移動速度  $W_o$  は

$$W_o = K_{La} \cdot C_S \quad \dots \dots \dots (15)$$

によって求めることができる。なお、 $K_{La}$  は温度等によっても変化するので Eckenfelder<sup>20)</sup> らの温度補正式より

$$K_{La(15)} = \frac{K_{LaT}}{1.02^{T-15}} \quad \dots \dots \dots (16)$$

を用いて  $15^\circ\text{C}$  の値に補正した。

##### (2) 実験結果と考察

通気量  $V_g$  と総括酸素移動係数  $K_{La}$  との関係をプロットしたのが図-17 である。さらに、実験式(11)および(12)を利用して気泡総表面積  $S$  と総括酸素移動係数  $K_{La}$  との関係を求めたところ図-18 のような結果が得られた。これより明らかのように、通気量  $V_g$  が大きくなると  $K_{La}$  は急に大きくなってくる。図-19 はエアレーションタンク内の酸素移動速度  $W_o$  を通気量  $V_g$  に

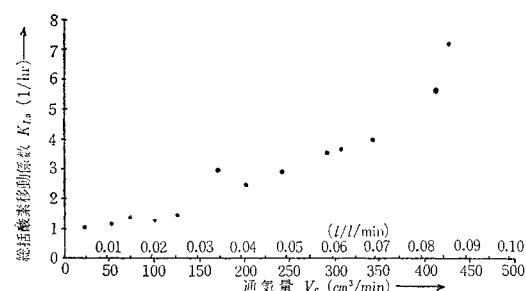
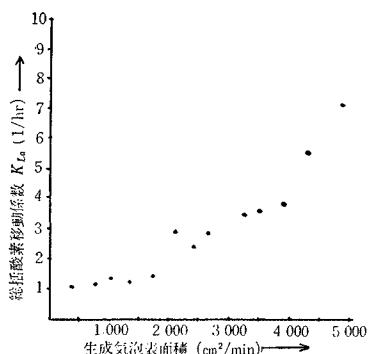
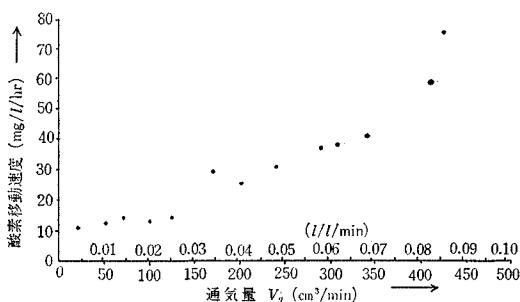


図-17 通気量  $V_g$  と総括酸素移動係数  $K_{La}$

図-18 気泡表面積  $S$  と総括酸素移動係数  $K_{La}$ 図-19 通気量  $V_g$  と酸素移動速度  $w$ 

対してプロットしたものである。

以上の結果より、酸素の移動速度は通気量、すなわち生成される気泡の個数や接触面積等の増加とともに大きくなるが、その大きくなる割合は通気量  $V_g$  が  $180 \text{ cm}^3/\text{min}$  付近までは小さく、 $V_g = 180 \text{ cm}^3/\text{min}$  より大きくなると急に増大する。これは気泡の分布の項で述べたように、通気量  $V_g = 180 \text{ cm}^3/\text{min}$  付近を境として、気泡の生成状態が全く異なることによると推察される。すなわち、 $V_g$  が小さいときには気泡はオリフィスで静的均衡のもとに一個、一個生成されるが、 $V_g$  が  $180 \text{ cm}^3/\text{min}$  より大きくなると、空気がオリフィスより柱となって噴出し、この先端で気泡は、液の乱れやオリフィスの振動等によって生成され、この現象に伴って小細気泡も多く発生し、気泡の分布は均一でなくなる。したがって数値的に考えられる以上に、移動速度も非常に大きくなるものと考えられる。

### (3) 小括

① 酸素移動速度は通気量の増加とともに大きくなる。

②  $\phi=0.3 \text{ mm}$  の単一オリフィスより発生する気泡による酸素移動速度は通気量  $V_g = 180 \text{ cm}^3/\text{min}$  付近を境として大きく変化する。この通気量は、幾何平均径や幾何標準偏差が変化する通気量とほぼ同量である。したがって、気泡よりの酸素移動と、気泡の分布状態とは大

きな関係があると考えられる。

## 5. 総括および結論

単一オリフィスより生じる気泡について、その性状や酸素移動に関する実験を行ない、検討を加えてつぎのような結論が得られた。

(1) 気泡の球相当半径が大きくなるにしたがって、上昇速度も大きくなる。球相当半径が  $1.8 \text{ mm}$  から  $5.0 \text{ mm}$  の範囲の気泡では、通気量が小さいときには気泡のレイノルズ数  $R_e$  は  $700 \sim 2400$ 、抵抗係数は  $0.7 \sim 1.53$  が求められた。

(2) オリフィス径を  $\phi=0.3 \text{ mm}$  と一定としたとき、通気量とともに気泡群の平均上昇速度は大きくなっている。

(3) 一定のオリフィスから発生する気泡はほぼ対数確率的に分布する。

(4) オリフィス径  $\phi=0.3 \text{ mm}$  より発生する気泡の体積  $v$  と表面積  $s$  の間には近似的に

$$s = 4.54 v^{0.70}$$

なる関係式が求められた。

(5) オリフィス径  $\phi=0.3 \text{ mm}$  としたとき、通気量が  $180 \text{ cm}^3/\text{min}$  付近で気泡生成の条件が異なり、したがって気泡の分布状態や酸素移動速度は大きく異なる。

以上、単一オリフィスより生じる気泡の性状と酸素移動について基礎的な実験を行なって検討を加えたが、現在さらにオリフィス径を変化させて実験を進めており、その結果については後日報告する予定である。

なお、本研究を行なうにあたり、助言いただいた東北大学工学部化学工学科 只木楨力助教授に対して深甚の謝意を表します。また、当時学生として実験に協力された戸引 勲君（運輸省第二港湾建設局）に感謝します。

## 使用記号

$a$ : 気泡長半径	(mm)
$b$ : 気泡短半径	(mm)
$C_D$ : 抵抗係数	(—)
$C_L$ : 液体酸素濃度	(mg/l)
$C_S, C_{LS}$ : 液体飽和酸素濃度	(mg/l)
$g$ : 重力加速度	(cm/sec <sup>2</sup> )
$K_{La}$ : 総括酸素移動係数	(1/hr)
$N$ : 単位時間当たり生成気泡個数	(1/min)
$n$ : 気泡個数	(—)
$r$ : 球相当気泡半径	(mm)
$\bar{r}$ : 幾何平均球相当気泡半径	(mm)
$\bar{r}_a$ : 算術平均球相当気泡半径	(mm)

$S$ : 単位時間当たり生成気泡表面積	(cm <sup>2</sup> /min)
$s$ : 気泡表面積	(mm <sup>2</sup> )
$T$ : 溫度	(°C)
$t$ : 時間	(hr)
$u$ : 気泡上昇速度	(cm/sec)
$u_a$ : 算術平均気泡上昇速度	(cm/sec)
$V_g$ : 通気量	(cm <sup>3</sup> /min)
$v$ : 気泡体積	(mm <sup>3</sup> )
$W_o$ : 酸素移動速度	(mg/l/hr)
$\phi$ : オリフィス直徑	(mm)
$\sigma$ : 幾何標準偏差	(—)
$\rho$ : 液体の密度	(g/cm <sup>3</sup> )
$\rho'$ : 気体の密度	(g/cm <sup>3</sup> )
$R_e$ : 気泡のレイノルズ数	(—)

## 参考文献

- 1) Grieves, R. et al : "A Mixing Model for Activated Sludge", Jour. W.P.C.F., Vol. 36 pp. 619-635 (1964)
- 2) King H.R. : "Mechanics of Oxygen Absorption in Spiral Flow Aeration Tanks", Sew. and Ind. Wastes., Vol. 27, No. 8, 9, 10 (1955)
- 3) 松本順一郎・大沼正郎 : "曝気槽の流体の混合現象について", 土木学会論文集第154号 (1968)
- 4) 合田 健・宗宮 功 : "エアレーションタンクにおける気泡の挙動と運動", 土木学会論文集第113号 (1965)
- 5) 合田 健・中西 弘 : "活性汚泥曝気槽の機能に関する研究", 水道協会誌第353号 (昭39)
- 6) Haberman, W.L. & Morton, R.K. : "An Experimental Study of Bubbles Moving in Liquids", Jour. A.S.C.E. Transactions Vol. 121 (1956)
- 7) 只木慎力・前田四郎 : "種々の静止液体中を上昇する單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 (1961)
- 8) 只木慎力・前田四郎 : "单一オリフィスより生じる気泡の大きさについて", 化学工学 Vol. 27, No. 3 (1963)
- 9) 前田四郎 : "気泡の生成と運動", 化学工学, Vol. 31, No. 5 (1967)
- 10) Lewis, W.K. & Whitman, W.G. : "Principles of Gas Absorption", Ind and Eng. Chemistry Vol. 16, No. 12 (1924)
- 11) Pasveer, A. : "Research on Activated Sludge", Sew. and Ind. Wastes, Vol. 26, No. 11 (1954), Vol. 27 No. 10 (1955)
- 12) Eckenfelder, W.W. : "Factors Affecting the Aeration Efficiency of Sewage and Industrial Wastes", Sew. and Ind. Wastes Vol. 31, No. 1 (1959).
- 13) Eckenfelder, W.W. : "Absorption of Oxygen from Air Bubbles in Water", Proc. of A.S.C.E. SA Vol. 85 (1959)
- 14) Downing, A.L. & Boon, A.G. : "Oxygen Transfer in the Activated Sludge Process", Paper No. 14 presented at the Third Biological Wastes Treatment Conference, Manhattan College, New York, 1960
- 15) Ippen A.T. & Carver C.E. : "Basic Factors of Oxygen Transfer in Aeration Systems", Sew. and Ind. Wastes Vol. 26, No. 7 (1954)
- 16) Morgan, P.F. & Bewtra, J.K. : "Air Diffuser Efficiencies", Jour. W.P.C.F. Sewage Works, Vol. 32, No. 10 (1960)
- 17) 森 芳郎・吉田文武 : "評論化学工学I", 朝倉書店 (昭37)
- 18) McKeon, J.J., Brown, L.C. & Gove, G.W. : "Comparative Studies of Dissolved Oxygen Analysis Methods", Jour. W.P.C.F., Vol. 39, No. 8 (1967)
- 19) 奥野長晴 : "酸素測定電極の作り方", 下水道協会誌, Vol. 4, No. 35 (1967).
- 20) Eckenfelder, W.W. et al, 岩井重久訳 : "廃水の生物学的処理", コロナ社 (昭40)

(1969.1.10・受付)