

エアレーションタンクにおける気泡の挙動と流動

FLOW CHARACTERISTICS AND OXYGEN ABSORPTION RATE IN ACTIVATED SLUDGE AERATION TANK

—Bubble Behaviors and Flow Characteristics—

合 田 健*・宗 宮 功**
By Takeshi Goda and Isao Somiya

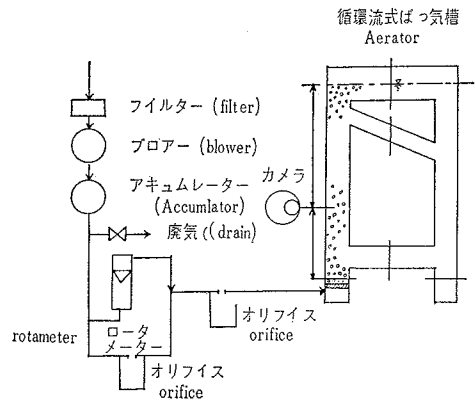
1. 緒 言

下水を好気性微生物によって有効に処理するためには、十分な酸素を供給し、有効な攪拌を行なうことが必要である。多量の空気を分散するには多くのエネルギーが消費されるが、この動力費を軽減し、全体として処理コストを低下させるためには、エアレーションタンクにおける酸素吸収機構と旋回流動との間の因果関係に関する十分な理解が要求される。通常のエアレーションタンクにおいては旋回流型がしばしば用いられている。しかしこの方式が他の方式に比しより有効であるかどうかについてはまだ十分なくとくさせるだけの説明がみあたらない。エアレーションタンク内の旋回流の流速は当然気泡の滞留時間と関係をもち、タンク内で起こる物質代謝を都合よくし、助けるものでなければならぬ。そこで、まずこうした旋回流方式ではいかなる水流状態にあるかを知るために、たとえばタンク内の速度分布を実測し理解せねばならない。この流動機構は溶存酸素の伝達とも関係がある。有効な酸素供給が行なわれるためには、気体と液体との接触時間、界面面積の増加が当然望まれる。その媒体となる散気装置について、独立した問題が多くあるが、ここではとりあえず、わが国でもっとも多用されている多孔平板式ディフューザー、すなわち散気板をそのまま供試して実験検討を行なうことにした。

2. 散気板から供給される気泡の性質

ばっ気効率を一応酸素伝達率と考えれば、その増進のためには、散気気泡の細分化による気泡接触面積の増加が不可欠の条件であり、まず各地の処理場で用いられている散気板について、発生する気泡径の平均値あるいはその分散の特性を知る必要がある。つぎに気泡の運動ないしは挙動に関する問題であるが、これに言及した論文は少ないし、また、対象となる散気板の品種、性質によりかなり異なるデータを得ることに注意せねばならない。われわれはこの散気気泡の形態を調べるにあたり、数多くのストロボ写真をとることにした。

図-1 実験装置略図



(1) 実験装置および方法

図-1 は気泡挙動の実測に用いた塩化ビニール製循環式エアレーションコラムの概要を示す。この装置は酸素収支機構を調べるのには種々問題があるが、分散気泡の性質を写真撮影によって調べるには好都合であった。使用散気板は藤田組製であり、透過率 (Permeability) は約 1000~1200 (l/min) である。気泡の追跡のためカメラを水面下 115 cm のところに固定し、約 1/2000 秒でフラッシュするストロボ装置により連続撮影を行なった。空気量は U 字管に連結されたオリフィスマーターあるいはロータメーターで測定した。なおこの空気量はすべて 20°C、1 気圧の値に換算補正した。実験コラム内の水流は常に定常状態には保てず、隅角部における気泡のたまりなどの撮影で気泡をふくむ割合はかなり変化する。そこで同一空気速度で数枚の写真を撮り、それらにみられる気泡を対象に解析することにした。測定された気泡数は約 1400 個である。

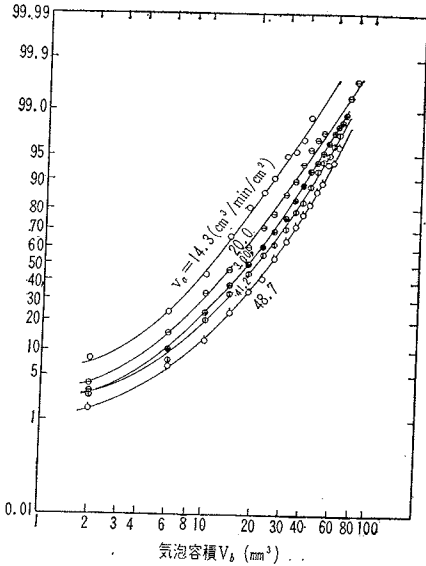
(2) 実験データとその解析

a) 気泡量と気泡径の相関 撮影した写真はすべて同じ 1 方向からとられたものであり、このため奥行方向の形状を見定められないので、写真からみてその形状を球もしくは回転だ円体と仮定して容量と径との相関性を調べてみた。気泡の長径 (a)、短径 (b) はノギスで測定され、気泡容積 V_b をつぎの式から計算した。

$$V_b = (\pi/6) \cdot a^2 \cdot b \dots\dots\dots(1)$$

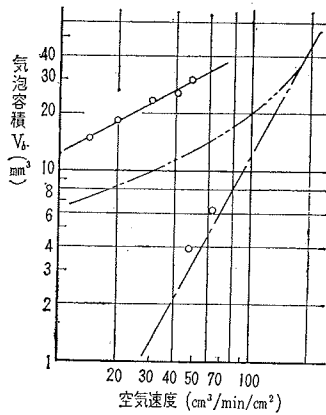
* 正 会 員 工 博 京都大学教授 工学部衛生工学科
** 学 生 会 員 工 修 京都大学大学院学生 同上

図-2 気泡容積-頻度 (%)



V_b の値を対数確率紙上にプロットしてみると 図-2 が得られる。だいたい 8 mm^3 以上の気泡は対数正規分布に近い分散を示し、空気速度の増加とともに気泡の容積が大きくなっている。図示の各空気速度に於ける V_b のモード値は 10.5, 14.2, 18.0, 20.3, 24.3 (mm^3) であり、加重平均容積値は 14.6, 18.3, 23.5, 25.1, 29.9 (mm^3) である。なおこの加重平均容積値に相当する球の直径 (d) はそれぞれ 3.02, 3.27, 3.55, 3.63, 3.85 (mm) である。これらの気泡は King¹⁾ が示した気泡径 0.1~0.2 (in) にかなり近い。図-3 は気泡容積と空気速度 v_a ($\text{cm}^2/\text{min}/\text{cm}^2$) との関係を示す。ここに最小自乗法を適用すると次式を得る。

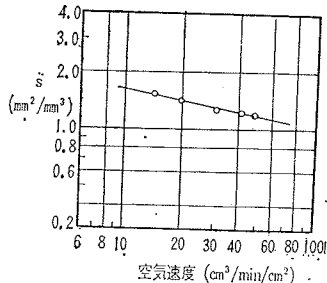
図-3 加重平均気泡容積 (mm^3)



$V_b = 3.46 v_a^{0.550}$ (2)
 $d = 1.88 v_a^{0.183}$ (3)

ただし、 V_b : (mm^3), d : 気泡容積同容積の球に換算した気泡 (mm) 径である。

図-5 単位空気量 (mm^3) あたりの接触面積 (mm^2)



式 (3) のごとく気泡径が空気速度の関数として表示されることは、Eckenfelder²⁾ や King によって示されているが、King が米国シカゴにおいて散気板に対して求めた空気速度に関する指数は 0.2 であり、今回の結果にかなり近い。

b) 形状係数について 多くの研究者は、散気気泡の形状は半球状もしくはだ円体であると指摘してきたが、しかるに気泡の接触面積を算定するとき、気泡を球として計算している。そのように見なす場合は形状係数はつぎのように書ける。

$$(A/V_b) = (6/d) \dots\dots\dots (4)$$

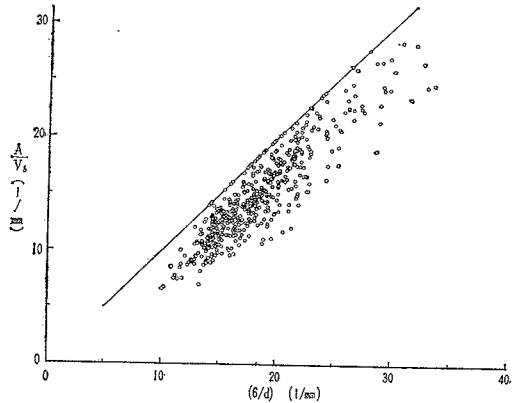
実際は気泡は球でないので、球として計算すれば相違が生ずる。この差を計算するため、散気気泡を回転だ円体としたときの形状係数 $(A/V_b)_E$ を計算した。気泡の表面積算定には次式を用いた。

$$A = 2\pi b^2 + 2\pi a \cdot b \cdot \frac{\sin^{-1}e}{e} \dots\dots\dots (5)$$

ただし e は離心率で、 $e = \sqrt{(a^2 - b^2)/a}$, ($a > b$)

$(A/V_b)_E$ の計算に関して 3 種類の検討を行なってみた。図-4 は $(A/V_b)_E$ に対する $(6/d)$ のプロットを示す。 $(A/V_b)_E$ と $(6/d)$ との間には強い相関性があり、

図-4 $(A/V_b)_E - (6/d)$ 相関図



回帰直線を

$$(A/V_b)_E = a(6/d) + b$$

と仮定すれば、つぎのような関係が求まる。

$$\left. \begin{aligned} v_a = 14.3 \quad (A/V_b)_E &= 0.900(6/d) - 0.182 \\ v_a = 30.0 \quad (A/V_b)_E &= 0.920(6/d) - 0.229 \\ v_a = 41.2 \quad (A/V_b)_E &= 0.884(6/d) - 0.129 \end{aligned} \right\} (6)$$

これをさらに簡単に、 $(A/V_b)_E = k(6/d)$ の形で表わそうとすると、 k はそれぞれ 0.821, 0.813, 0.808 となる。いま式 (6) から計算した $(A/V_b)_E$ と k から求めた $(A/V_b)_E$ とを比較しても、多くて 3% の誤差程度である。結局散気気泡を球として接触面積を計算した場合、回転だ円体として求めた場合に比し、 k から推定して、15~20% の誤差が生ずるといことが知られた。

c) 気泡の単位 ホールドアップあたりの接触界面

積 ある容積の気泡があらわれる頻度を量的に表わすために、気泡容積に関する分布関数 $f(V_b)$ を導入すれば、単位ホールドアップ中で、ある容積の気泡 (V_b) がしめる割合 $g(V_b)$ は求める。いま容積 V_i の気泡が単位ホールドアップのうちで $g(V_i)\%$ をしめるとすれば、それに該当する気泡数は

$$n_i = g(V_i) / V_i$$

となる。一方 V_i の接触面積 A_i は回帰直線の式より推定し、

$$A_i = V_i \{ a(6 - d_i) - (A/V_0) \}$$

だから n_i 個で

$$n_i A_i = g(V_i) \{ a(6/d_i) - (A/V_0) \}$$

となる。したがって単位ホールドアップ中にふくまれる全気泡の表面積 s (mm^2/mm^3) は

$$s = \sum_{i=1}^n n_i A_i = 6a \sum_{i=1}^n \frac{g(V_i)}{d_i} - (A/V_0) \dots \dots \dots (7)$$

$$(\because \sum_{i=1}^n g(V_i) = 1)$$

実験データからこの式 (7) を計算して s の値を求めることができる。図-5 はこうして求めた s と v_a との関係を示す。この関係に最小自乗法を適用すれば、 s と v_a との間はつぎのような指数関数関係があることがわかる。

$$s = 2.50 v_a^{-0.189} \dots \dots \dots (8)$$

ここにおいて、空気速度 v_a と、それに応ずる気泡ホールドアップが求められておれば、式 (8) を用いて、タンク内の全気泡による接触面積を求めることができ、酸素移動率の実測なり計算に貢献するところが大きい。

(3) 要 約

本節の実験研究とその解析によって、散気板より噴出した気泡の特性に関し、いくつかの重要な事実を知りえたが、それらを要約するとつぎのようになる。

- ① 気泡容積の分布はほぼ対数正規分布にしたがう。
- ② 気泡の容積 V_b と球相当径 d とは式 (2), (3) で示される。
- ③ 形状係数 $(A/V_b)_E$ を検討した結果、気泡を球と仮定すれば接触面積を 15~20% 大きく見積ることになる。
- ④ 単位のホールドアップあたりにふくまれる気泡の全接触面積は式 (8) で表わされる。

3. エアレーション タンク中の気泡のホールドアップ

噴出後の気泡の通路、拡散、ホールドアップについて検討してみる。ホールドアップに影響する因子としては空気速度 v_a ($\text{cm}^3/\text{min}/\text{cm}^2$) あるいは v_a' ($l/\text{min}/l$)、散気板面積とタンク表面積との比 r 、散気板設置位置、バッフルの有無などが考えられるので、これらをいちいち取り上げて検討した。

(1) 実験装置および方法

実験装置は図-6に示す。空気は図-1の装置、方法により測定し、測定値を 20°C、1 気圧に補正した。この模型槽には散気板を3列にならべたので、これを壁側から数えて、No. 1, No. 2, No. 3 と呼ぶ。散気板の

図-6 旋回流式模型ばっ気槽

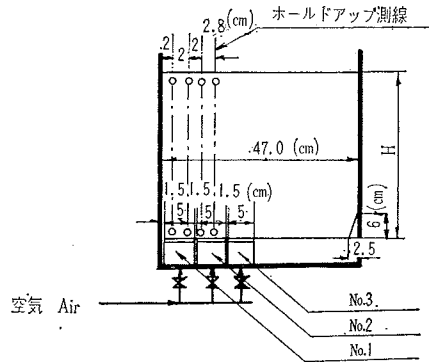
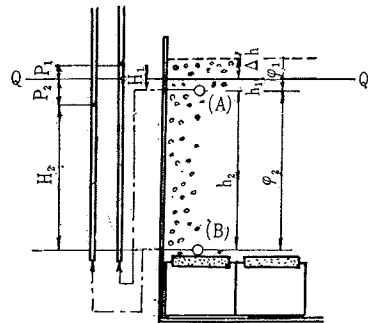


図-7 ホールドアップ説明図



透過率は 1460 ($l/\text{min}/794 \text{ cm}^2$) であり、これは日本碍子製である。実験タンクの有効水深は散気板上 50 cm である。気泡の通路は写真により追跡判定した。ここでホールドアップの計算はつぎのように行なった。図-7 は測定法を示す説明図であるが、測点 A-B 間のホールドアップ (φ_2) は一定と仮定する。空気が吹込まれない場合、二点の静水圧は一定で Q 点水位にある。空気が吹込まれた場合水面は dh だけ上昇すると仮定し、この時のマンメーターがそれぞれ H_1, H_2 を示すとすれば、この場合の平均ホールドアップは次式から求められる。

$$H_1 = (h_1 + dh)(1 - \varphi_1)$$

$$H_2 = (h_1 + h_2 + dh) - (h_1 + dh) \varphi_1 - h_2 \varphi_2$$

図-7 から、 $P_1 = H_1 - h_1$, $P_2 = H_2 - (h_1 + h_2)$ であるから、これらの式より φ_2 がつぎのように求まる。

$$\varphi_2 = (P_1 - P_2) / h_2 \dots \dots \dots (9)$$

水深および反射板、散気板を変化し、実験条件として 14 のケースをとったが、それは表-1 のとおりである。

(2) 実験結果と考察

a) タンク中における気泡の挙動と傾向 写真一

表-1 ホールドアップ測定使用散気板

水深 H (cm)	バブル水深 h (cm)	使用散気板 No.
42.5	0	No. 1, No. 2, No. 1+No. 2, No. 1+No. 2+No. 3
32.5	0	No. 1, No. 2, No. 1+No. 2, No. 1+No. 2+No. 3
42.3	6.2	No. 1, No. 2, No. 1+No. 2
42.3	12.2	No. 1, No. 2, No. 1+No. 2

1, 2 は反射板がない場合で散気板 No. 1 を用いたときの気泡分布を示したもので、散気板から出た気泡はまっ

写真-1

空気速度 $v_a=38.1(\text{cm}^3/\text{min}/\text{cm}^2)$

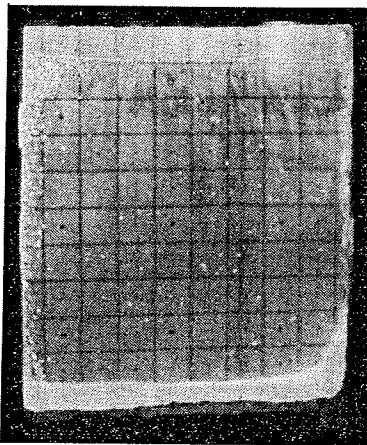


写真-2

空気速度 $v_a=85.5(\text{cm}^3/\text{min}/\text{cm}^2)$

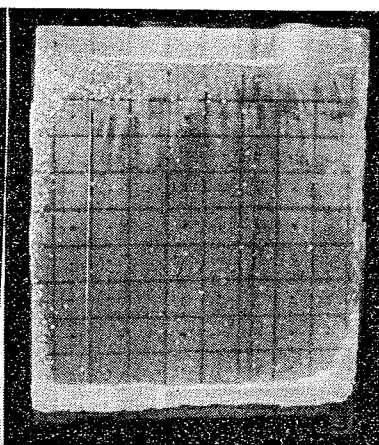


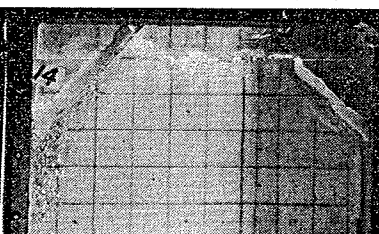
写真-3

空気速度 $v_a=56.0(\text{cm}^3/\text{min}/\text{cm}^2)$



写真-4

空気速度 $v_a=109.0(\text{cm}^3/\text{min}/\text{cm}^2)$

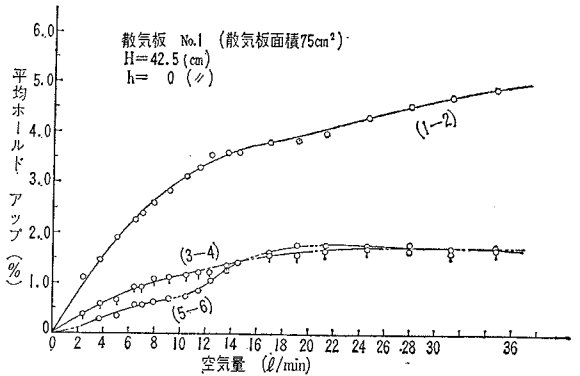


すぐ上方へ、散気板幅より狭い幅をもって上昇し、水面近く水流が転向する部分にいくぶんホールドされる傾向がみられる。写真-3, 4 は反射板を設置した場合のもので、空気速度が増せば気泡は反射板に沿って上昇する状態がみられる。また同写真より下降流への気泡巻き込みは少ないことが認められる。

b) 気泡ホールドアップおよび気泡の滞留時間

図-8 は No. 1 散気板を使用したときの ϕ の変化を描いたもので、図-9 は No. 2 散気板を用いたときの变化を示している。このときの散気板面積対タンク表面積の比 r は $1/10.16$ で、水深は 42.5 cm である。それぞれの散気板面積は 75 cm^2 である。図-8 から測線 (1-2) についていえば、 ϕ は空気量 (l/min) の増加とともに急

図-8 平均ホールドアップ (%)



速に上昇する。(3-4), (5-6) 上の ϕ も同様な傾向がみられるが、それほどいちじるしくない。一方測線 (7-8) 上には ϕ は表示できなかった。図-10 は散気板位置と ϕ との関係を示している。この場合は気泡の大部分は側壁近くを狭い幅をもって通過することが知られる。さらに 図-10 の (a), (b) を比較すれば、 r が同一であっても散気板の設置位置により ϕ の値はかなり異なることがわかる。図-11 は No. 1+No. 2+No. 3, No. 1+No. 2 を使用したときの ϕ を示している。それぞれの r は $1/3.39, 1/5.09$ である。全体的にいって、散気板1枚のときにくらべると ϕ が大きくなっていることがわかるが、それ以外は特記すべきことがない。

水深を 32.5 cm とした場合の ϕ は 図-12 (a), (b) に示したが、

図-9 平均ホールドアップ (%)

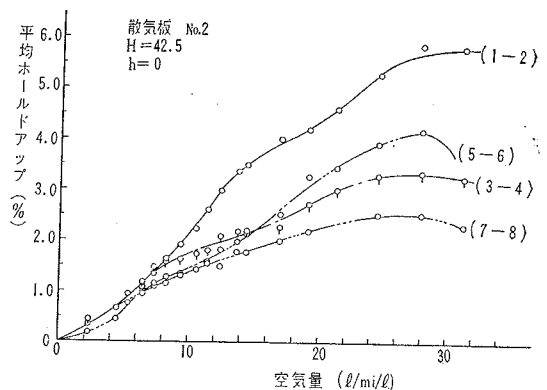


図-10 平均ホールドアップ散気板位置図

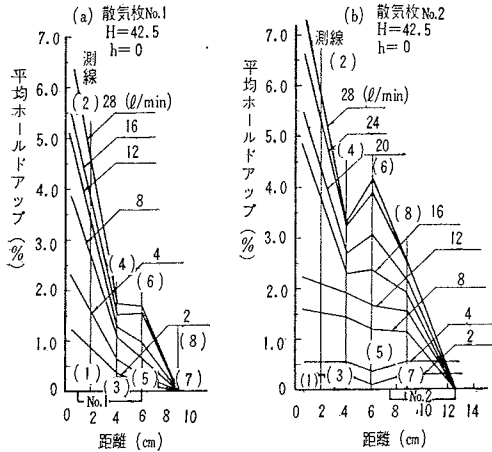


図-11 平均ホールドアップ散気板位置図

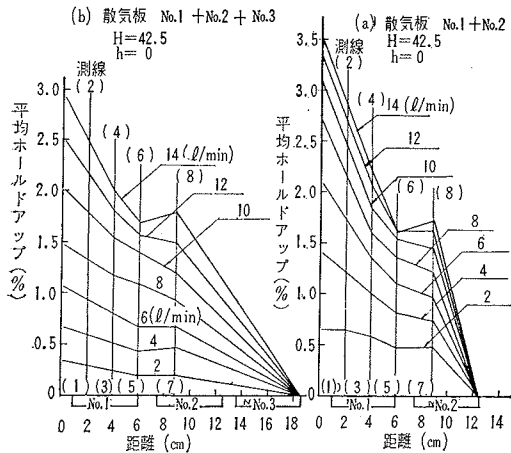
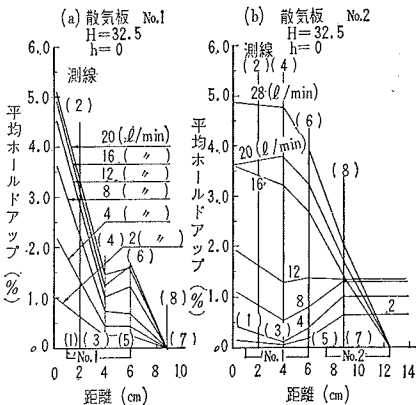


図-12 平均ホールドアップ散気板位置図



それぞれ No. 1, No. 2 散気板を使用している。ゆえに τ は 1/10.18 である。図-12 (a) の傾向は 図-10 とくらべてほとんど変化がない。図-12 (b) では空気量が 12 (l/min) 近くで φ の傾向がかわっている。このことは低空気速度で No. 2 散気板を用いると、槽内に 2 つの

旋回流が発生することを示し、空気量が 12 (l/min) 以上になるとこの旋回流は一つに統一されることがわかる。

代表ホールドアップ $\bar{\varphi}$ は槽容積に対する気泡滞留容積で表わし、気泡滞留時間は滞留気泡容積を空気速度で除して求めた。図-13, 14 は水深が 42.5 と 32.5 (cm), 反射板深さ (h) が 0 の条件下での $\bar{\varphi}$ を示している。同図より $\bar{\varphi}$ は空気速度の増加とともに増加する傾向がみ

図-13 代表ホールドアップ $\bar{\varphi}$ (%)

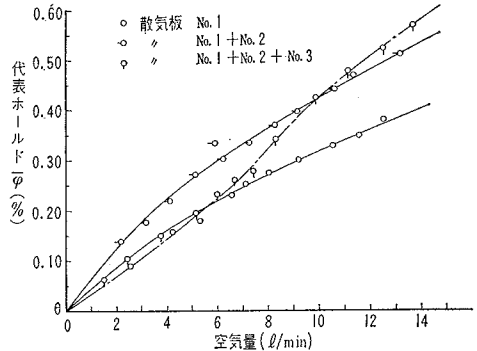
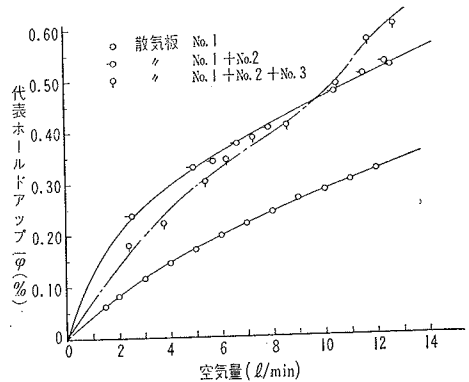


図-14 代表ホールドアップ $\bar{\varphi}$ (%)



られ、およそその大きさは 10^{-1} である。散気板幅の増加によっても増加する傾向があるとともに、空気量が大きくなれば散気板面積の増加による $\bar{\varphi}$ の差も増大することがわかる。散気板 No. 1 を用いたときのデータに最小自乗法を適用すれば、

$$H=42.5, \bar{\varphi}=0.791 v_a^{0.77} \dots \dots \dots (10)$$

$$H=32.5, \bar{\varphi}=0.571 v_a^{0.77} \dots \dots \dots (11)$$

となる。式 (10), (11) によって水深が深いほうが浅い場合より $\bar{\varphi}$ が大きいことが明らかとなった。この結論はすべてのケースをつくしているとはいえないが、他のデータは測定の不備のための誤差があったようで、解析して結論に寄与するに至らなかった。平均滞留時間は 図-15 に示され、水深はそれぞれ 42.5 cm, 32.5 cm である。散気板 No. 1, 水深 42.5 cm の場合、気泡は約 0.55 ~ 0.8 秒で通過し、水深 32.5 cm の場合には、0.38 ~ 0.56 秒で通過する。したがってこのデータを通じて上

図-15 気泡平均滞留時間(秒)

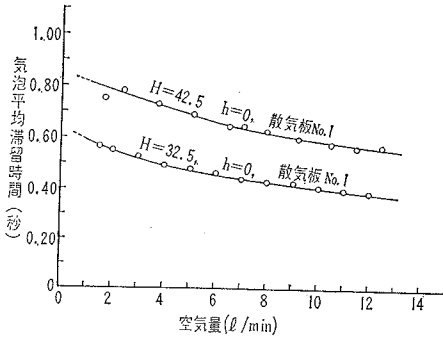
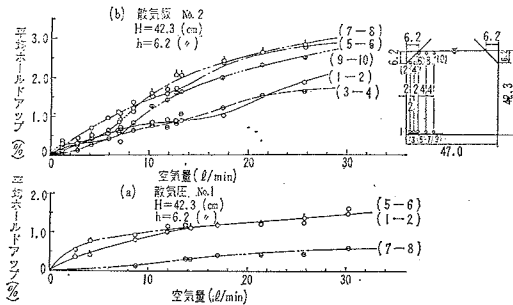


図-16 平均ホールドアップ(%)

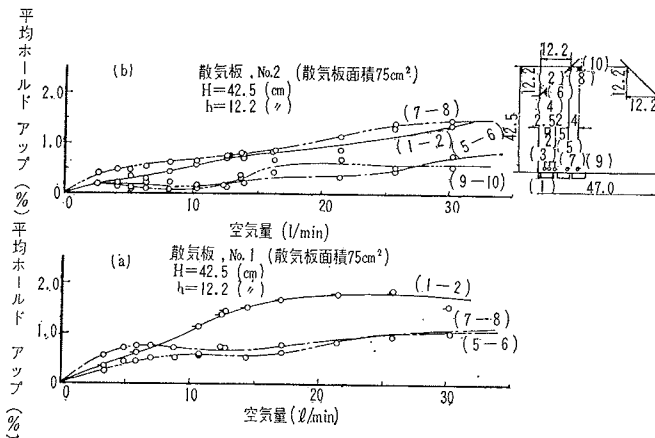


昇速度は 50~85 (cm/sec) 程度であり、空気速度の増加につれ速くなる傾向がみられる。

反射板深さを 6.2 cm とした場合、散気板 No. 1 を使用すると 図-16 (a) から、測線 (3-4) 上には ϕ は存在しない。したがってほとんどすべての気泡は反射板面と測点 4 との間を通過する。図-16 (b) は散気板 No. 2 を利用したときを示す。

一方散気板深さを 122 cm とした場合の ϕ の変化は 図-17 (a), (b) に示すが、図-16 に比し大差ない。これらの結果からすれば、反射板を設置したためかえて ϕ が減少することを示し、結局直線反射板の設置は気泡の吹ぬけ現象をかえて助長するということが明らかに

図-17 平均ホールドアップ(%)



なった。

(3) 要 約

本項の研究で得られた結果を要約してみる。気泡の通路は散気板幅、散気板設置位置によりかなり異なるが、散気板幅より狭く、 $r=0.1$ のとき槽幅の数%をしめる。

代表ホールドアップの大きさは 10^{-1} であり、化学工業方面で利用されている気泡塔にくらべるとオーダーが 1 次以上低い。代表ホールドアップは No. 1 散気板を用いたとき式 (10), (11) で示される。反射板の設置はその板面に沿って気泡が上昇し、吹きぬけ効果をかえて助長する。

4. エアレーションタンク中における流速分布

散気式エアレーションタンク中の流動は液およびガスの二相流であり、流体力学の基礎式から出発して未知の物理因子の局所的な変化を理論的に解析することは非常にむずかしい。したがって、旋回流の流動機構はまだ明らかにされていない。実際槽についてこれを調べることも技術上きわめて困難であり、事実実際槽中の流速分布を通常の流速測定法で測定しても多くのトラブルがあり、信頼度は結局低く報告例も少ない。がらみ旋回流の目的は活性汚泥の沈降防止、基質と汚泥との接触向上さらに酸素供給能の増加などであると考えられる。マニュアル No. 36³⁾ によれば、従来の経験からして沈降防止のためには槽底部における水平流速を 1 fps に保つことが必要で、1.5 fps 以上が望ましいとしている。またこれに関する研究は King¹⁾, Eckenfelder²⁾, Tapleshay⁴⁾ の報告などがみられる。Tapleshay はタンク全断面において 2 fps の速度を維持することが望ましいと述べているが、むしろ活性スラッジに働くせん断力の大きさが問題とされるべく、スラッジを微細化しない限界条件に応ずる水理条件を提示することのほうが重要ではあるまいか。事実、King, Eckenfelder の提示したデータによれば、流速の絶対値は断面内でかなりの変動がみられるのである。

本項では模型槽中において圧入空気による旋回流を発生せしめ、それに対する流速分布が空気速度、水深、反射板深さなどといかなる関係にあるかを実測検討した。ただし諸因子のうちタンクの幅、散気板幅は一定とした。

(1) 流速測定装置および方法

散気泡の上昇により生じた旋回流流速の測定は 図-6 に示すエアレーションタンクを用いた。流速測定はピトー管法とそれを逆滴下させる方式⁵⁾ によった。この場合測定流速はそれぞれ式 (12), (13) により計算した。

逆滴下の場合:

$$u = \sqrt{2g(H_2 10^{KT} - H_1) / (10^{KT} - 1)} \quad (12)$$

表-2 流速測定一覧表 (散気板は No. 1 のみ使用)

グループNo.	実験No.	H	h	h/H	H/B	空気量 (L/min) 20°C, 1気圧	空気速度 (l/min/l)	槽容量 (L)	水温 °C
1	1	45.0	0	0	0.956	4.18	0.1228	34.09	27.2
	2	"	"	"	"	6.37	0.1870	"	27.3
	3	"	"	"	"	10.60	0.3110	"	27.2
	4	"	"	"	"	14.91	0.4370	"	27.0
2	5	45.0	11.0	0.244	"	4.27	0.1330	32.12	27.2
	6	"	"	"	"	6.48	0.2020	"	26.9
	7	"	"	"	"	10.68	0.3310	"	26.5
	8	"	"	"	"	14.90	0.4640	"	26.8
3	9	37.5	0	0	0.798	3.94	0.1387	28.40	26.5
	10	"	"	"	"	6.45	0.2270	"	26.2
	11	"	"	"	"	10.47	0.3700	"	26.2
	12	"	"	"	"	14.83	0.5220	"	26.2
4	13	37.5	9	0.240	"	3.92	0.1447	27.07	26.5
	14	"	"	"	"	6.49	0.2400	"	26.8
	15	"	"	"	"	10.49	0.3870	"	26.5
	16	"	"	"	"	14.82	0.5470	"	27.2
5	17	30.0	0	0	0.639	4.14	0.1827	22.67	26.0
	18	"	"	"	"	6.48	0.2860	"	26.0
	19	"	"	"	"	10.41	0.4590	"	25.8
	20	"	"	"	"	14.82	0.6540	"	25.7
6	21	30.0	7.5	0.250	"	4.04	0.1860	21.73	27.1
	22	"	"	"	"	6.42	0.2960	"	27.6
	23	"	"	"	"	10.56	0.4830	"	26.2
	24	"	"	"	"	14.90	0.6850	"	25.5

定常とみなして差しつかえないと判断された。空気量の測定法、および補正は 図-1 と同様である。

(2) 実験結果に関する検討

a) 流動状態の全体的傾向

24 回の実験を行ない、この結果を水深別に 6 つのグループに分類した。ローカルな流速の測定点は各実験により異なったが、各実験の実験条件は表-2 に示した。図-18, 19 はこれら実験データの 2 例で、反射板なしと反射板つきのデータを示す。図-18 から、気泡が存在する部分の上昇流速は気泡が上昇するにつれて速くなっている。水面近くの上昇流速は 40~50 (cm/sec) を示している。一方水面近くの水平流速は反射板を設置しなくても 40 (cm/sec) を示し、気泡発露部における流向の転換はかなりスムーズに行なわれているようである。しかし下降流へうつるときは、流速が低くなり大きくて 30 cm/sec 程度である。また、底面における水平流速は 30 cm/sec 程度を示す。結局、下降流と底面水平流とを比較して、流速の差では両者に大きな相違はないように思われる。また中心部と外周の流動状態にはかなり差がみられ、予想したとおり中央部に静澄なコアが存在することが認められた。図-19 において、反射板は水

図-18 ばっ気槽流速分布図

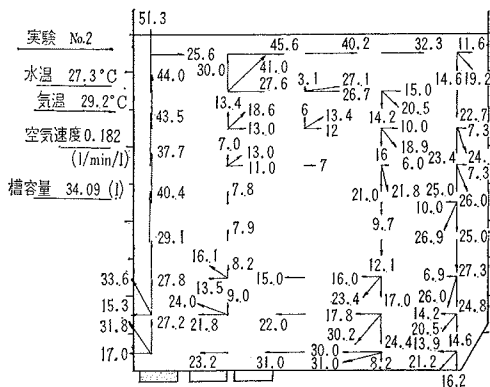
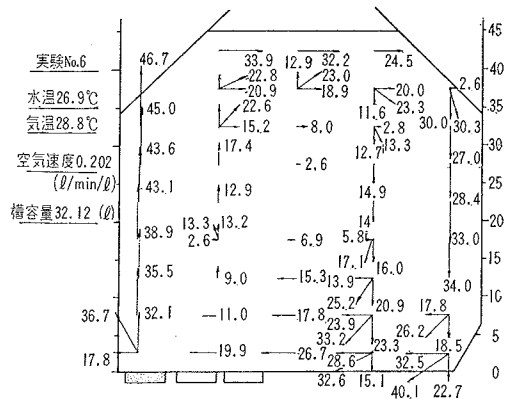


図-19 ばっ気槽流速分布図



通常の方式: $u = \sqrt{2g \Delta h}$ (13)

ここで, H_1 : マノメーターの最初の読み

H_2 : マノメーターの最後の読み

T : その間の経過時間, g : 重力加速度,

K : 装置定数, Δh : 静圧と動圧の差

なお、エアレーションタンクの流動状況は必ずしも常に定常ではないのであるが、巨視的にみればだいたい

深 (H) と反射板深さ (h) とが 1/4 で、かつ水面に 45° の角度になるように設置されている。下降流は 図-18 に比しいくぶん流速が改良されているが、中央部にはやはり静澄部があり、反射板の効果が流速分布に特別強く表示されているとは思われない。

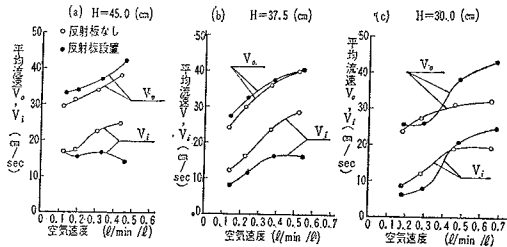
b) 旋回流の代表流速

旋回流の範囲は一般に明瞭でないため代表流速をどのように表示すればよく表

示しうるかむずかしい問題である。

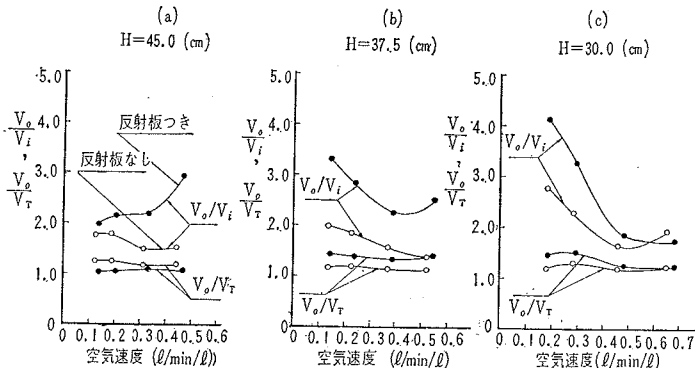
観測結果からみて、この場合旋回流は外部旋回流 (V_o) と内部旋回流 (V_i) とからなっているように見える。ただ、その境界を明瞭にすることがむずかしいので測点数を適宜変えて測定探索するほかない。このようにある程度のあいまいさは避けられなかったが、一応外部旋回流の代表流速は槽中測点のうち最外周部分の測点におけるデータを平均することより求めた。一方、内部旋回流は最外周部以外の測点に関するデータの平均をもって代表値としている。両旋回流を一体とみなしたときの平均流速もあわせ求めてみた。この旋回流流速と空気速度との関係は図-20 に示した。(a), (b), (c) それぞれのデー

図-20 平均流速図



タは水深を異にしたもので、黒点は反射板のある場合、白点は反射板のない場合を示している。この図からみられるように、外部旋回流流速は空気速度の増加とともに増大している。そして図-20 (c) の一部を除けば、反射板のある場合のほうがない場合に比しわずかながら速いことを示している。また内部旋回流流速は(c)図の一部を除けば、反射板をつけない場合のほうが速い。(a), (b) 図からいえることは、反射板のある場合はかえって断面中央部に流動に関係しないコアを生じやすくなっていることがわかる。つぎに、水深が浅くなるにつれ、外部旋回流、内部旋回流ともにその流速が低下する傾向が見られる。図-21 (a), (b), (c) は (V_o/V_i), (V_o/V_T) の比を示している。この (b), (c) 図に表われているとおり、空気速度の増加とともに全面的流動が一樣になる傾向があることを示している。この傾向は浅い水深において強

図-21 (V_o/V_i), (V_o/V_T) 空気速度図



くみられる。以上述べたことは、外部旋回流の範囲の規定のあいまいさが影響するおそれがあるので、同じ条件で測点数をさらにふやして測定、検討を行なったのであるが、定性的に上述のことを再確認したに終わった。

要するに反射板設置の効果については、外部旋回流流速は反射板の設置によりいくぶん速く、強い循環となるようであるが、さほどいちじるしい差を生ずるわけでもなく、活性汚泥の沈殿防止というような新しい定義はないように思われる。逆にこの設置により槽中央部における流動はより弱くなり、短絡、あるいは容積効率低下の1因子となりうる。

c) 旋回流の因子の定量化

b) に述べたように、旋回流を内外2つの部分に分割して解析することはあまりいわれていないし、旋回流に関する実験式自体があまりない。当研究室において、亀田が同種の水理実験を行ない、水理因子相互の関係を検討し、次元解析により次式を得たことがある。

$$(V_o H / \nu) = 0.889 \times 10^8 (H/b)^{1.3093} \times (\nu_a b / \nu_a)^{0.38516} \dots \dots \dots (14)$$

ここに、 V_o : 外部旋回流流速、 ν : 水の動粘性係数
 ν_a : 空気速度 (cm/sec)、 ν_a : 空気の動粘性係数、 H : 水深、 b : 散気板幅

今回の実験結果を整理して式示すにあたり、

$$(V_o H / \nu) \propto (H/b)^{\alpha} \cdot (\nu_a b / \nu_a)^{\beta}$$

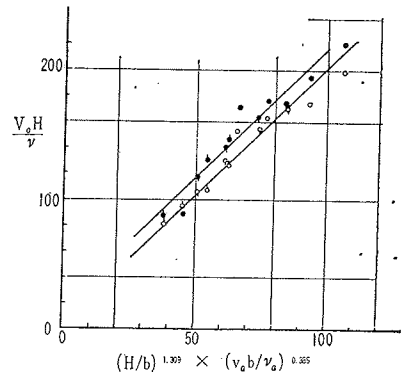
なる関係が成立しているかどうか検してみた。 $(V_o H / \nu)$, $(\nu_a b / \nu_a)$ を実験値から求め、整理の結果、結局つぎの実験式を得た。

$$\text{反射板有 } (V_o H / \nu) = 2.0 \times 10^8 (H/b)^{1.309} (\nu_a b / \nu_a)^{0.385} + 2.9 \times 10^8 \dots \dots \dots (15)$$

$$\text{反射板無 } (V_o H / \nu) = 2.0 \times 10^8 (H/b)^{1.309} (\nu_a b / \nu_a)^{0.385} + 16.9 \times 10^3 \dots \dots \dots (16)$$

両式のデータとの適合状態は図-22 に示すとおりである。無次元表示であるから旋回流 エアレーション タンクに一応適用可能と思われるが、各種設定条件下に得られたデータを解析したものであり、適用可能性につい

図-22 外部旋回流流速に関する R_e 数と空気速度に関する R_e 数の相関図



てはスケールアップに関する影響の定量的な問題をさらに考慮せねばならない。これについては次回の稿で改めて論じたい。

d) 旋回に要する時間 (T) 旋回流の流速が同じであっても、規模により酸素伝達効果は等しくないことは明らかである。そこで装置の規模を示す量とある基準距離を、ある流速で通過するに要する相対時間を求め、実際槽と実験槽との相違を検討してみる。また同時に、この1サイクルに要する時間と気泡滞留時間との比 (R) を計算し、気泡の完全ずい伴状態 (R=1) を比較してみることも意義がある。いま、基準距離として $2(B+H)$ (B: タンク幅) を用い、この距離を外部旋回流速で通過する時間を代表循環時間 T と表示すれば、

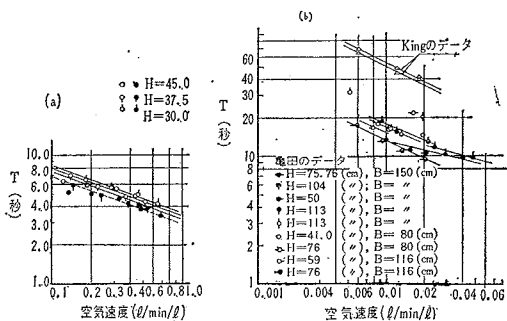
$$T = 2(B+H)/V_0 \dots\dots\dots(17)$$

となる。図-23 (a) はこの T と空気速度 v_a' (l/min/l) を示す。V₀ については式 (15) を簡素化して、第1項のみを用い、式 (17) に代入すれば、水深別につきのようになる。

$$\left. \begin{aligned} H=45.0 & \quad T=3.12 v_a'^{-0.385} \\ H=37.5 & \quad T=3.32 v_a'^{-0.385} \\ H=30.0 & \quad T=3.48 v_a'^{-0.385} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(18)$$

これを図示すれば、図-23 (a) 中の直線となる。実験槽で T は 4~8 秒を示す。同様な解析を亀田と King

図-23 ばっ気槽代表循環時間 (T)



の実験値に適用し、T を求めると 図-23 (b) のようになる。これからみて、空気速度に関する T の傾向は 図-23 (a) のそれとほとんど同じである。ここに King のデータは水深 15 ft の実際規模の槽で得られた数値であることに注意したい。しかし T の値そのものは槽の規模によりかなり相違がある。したがってさらにこの T と気泡接触時間との比を求め検討する。模型槽における気泡の滞留時間は式 (10), (11) から計算することができる。これらの式では φ と水深との定量的な関係を直接知ることはできぬが、φ の一般的な傾向からみて、水深に直線的に比例すると考えられるから、次式が推定された。

$$\phi = 1.034 \{(H/B) - 0.138\} v_a'^{0.77} \dots\dots\dots(19)$$

平均滞留時間 T_c は、G を空気量、V を槽容量とすれば、

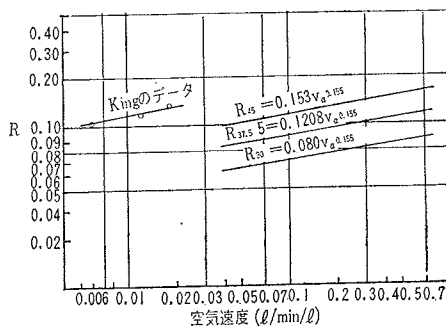
$$T_c = (\phi \cdot V/100)/(G/60) \dots\dots\dots(20)$$

より算出できる。式 (17), (20) から R はつぎのようになる。

$$(1/R) = (T/T_c) = (10/3)(B+H) G/(\phi \cdot V_0 \cdot V) \dots\dots\dots(21)$$

実験値を式 (21) に代入し、R を求め、これを v_a' に対して図示したものが 図-24 である。水深 45.0, 37.5, 30.0 (cm) に対し R_{45.0}, R_{37.5}, R_{30.0} と示すが、 v_a' の指数は 0.155 と示された。King のデータより計算した R も 図-24 に示したが、空気速度に関する傾向はほぼ

図-24 R-空気速度



一致している。King の実験値より求めた R は v_a' が 0.01 (l/min/l) で 0.12 を示し、模型槽の R で 0.12 となるのは H=45.0 のとき $v_a'=0.1$ を示している。したがって H=45.0 (cm) のとき、実験槽において実際槽と同じ値を得るには約 10 倍の空気量が必要であることが知られた。また King の値から R はほぼ 0.1 前後であり、完全気泡ずい伴流時に比し気泡の接触度は 1/10 程度であることが知られた。

(3) 成果の要約

本項ではエアレーションタンクの流動特性を模型槽断面内の流速分布を中心として検討し、全体的な流動形態をつかめたわけではないが、興味あるいろいろな傾向を知ることができた。これらを要約するとつぎのとおりである。

- ① タンク断面中央部に外部流動より動きの緩やかなコアの部分が存在する。
- ② 外側と内側との旋回流流速比 V_0/V_i はほぼ一定であり、水深、空気速度にはあまり関係ない。またこの V_i , V_0 は水深の減少とともに小さくなる傾向がある。
- ③ 反射板設置により中心部の停滞傾向が増し、この意味では改良にならない。また旋回流流速は若干増すが、これもそれほど意義をもったものでないと考えられる。
- ④ 気泡の接触時間と代表循環時間の比 R は $r \div 0.1$ のとき 0.1 前後であり、したがって気泡の完全循環状態を標準にしたときに比し、酸素伝達の有効時間は 1 オーダー低い。

5. 結 論

本論文では、ばっ気槽における酸素吸収特性を明らかにするため、これに関連する主要因子であるばっ気槽内気泡の特性と挙動ならびに流動形態を、模型槽を利用して検討した。ばっ気槽内に誘導される旋回流の意義に関する研究が不十分なため、ばっ気槽の断面形決定に際して、経験的なあるいは在来からの形状を模倣しているにすぎない。昨今、旋回流の強さ、なかんづく攪拌の度合と生化学反応との関係を明らかにしようとする研究が注目されてきており、この研究の発展によって旋回流の意義、最良断面形式や混合形式が示唆されることと思われる。本論文においても断面形の検討のために、旋回流におよぼす直線反射板設置効果を検討した。以下本論文の主要な結論を記す。

- ① 散気板より分散された気泡の径は空気速度の関数として表示され、実験例では式(10)によって表わされた。
- ② 気泡の上昇通路は散気板幅より狭く、 $r \neq 0.1$ のとき槽幅の数%にすぎない。
- ③ 代表ホールドアップは実験では 10^{-1} のオーダーである。
- ④ 反射板の設置はその面に沿った気泡の吹きぬけ効果を増進する。したがって酸素供給能は反射板設置により低下するであろうと予想された。
- ⑤ 下降流での気泡巻き込みは多く望まれない。
- ⑥ 槽中央部に外部の流れより動きの緩慢なコアの部分が存在する。

⑦ 反射板の設置は中央部での静澄域を形成しやすくする傾向があり、この点では流状の改良を期待することは疑問である。

⑧ 気泡の接触時間と代表循環時間の比 R は $r \neq 0.1$ のとき 0.1 前後であり、したがって気泡の完全循環状態を標準にしたときに比し、酸素伝達有効時間は 1 オーダー低い。

以上、ばっ気槽における気泡の挙動と流動状態について、まだ十分全体をつかめたわけではないが、上記のようにいくつかの興味ある傾向を知ることができた。さらに同じ実験槽を用いて酸素吸収特性をしらべ、総括容量係数 (k_{1a}) あるいは吸収率などについて実験結果をまとめたので、その結果については改めて論じたい。

なお、本研究は文部省科学研究費の補助を受けたものであることを付記する。

参 考 文 献

- 1) King, H.R.: "Mechanics of Oxygen Trans, for in Spiral Flow Aeration Tank", Sew. and Ind. Waste, Vol. 27, No. 8, No. 9, No. 10, (1955)
- 2) Manual No. 36: Sewage Treatment Plant Design, A.S.C.E., (1959)
- 3) Eckenfelder, W.W.: Biological Waste Treatment, Pergamon Press, (1961) "Absorption of Oxygen from air bubble in water", Proceeding A.S.C.E. San. Eng. Division, (1959)
- 4) Tapleshay, T.A.: "Practical Design Consideration in the Application of Aeration Equipment", Biological Treatment of Sewage and Industrial Wastes, Vol. I, 225, (1955)
- 5) 石原藤次郎・岩垣雄一・末石富太郎: "流砂のある場合の流速測定について", 京都大学工学研究所彙報, 第5輯, (1954) (1964. 5. 18・受付)