

# 曝気槽の流体の混合現象について

## EXPERIMENTAL STUDIES ON THE MIXING CONDITIONS IN THE AERATION TANK

松本 順一郎\*・大沼 正郎\*\*

By Junichiro Matsumoto and Masao Onuma

### 1. 緒 言

一般に曝気槽内の流体の流れ方向の混合は曝気槽の処理効率すなわち、BOD 除去率などに大きな影響をおよぼすといわれている。従来、曝気槽内の流体の混合現象に関していくつかの報告があるが<sup>1),2),3),4),5),6)</sup>、実際に曝気槽の形式を選択したり、設計をする場合には、曝気槽内の流体の混合現象についてあまり考慮がはられていないといえない。とくに近年大都市の下水処理にはハイレート活性汚泥法、また団地などの小規模な下水処理には長時間曝気法が使われる傾向がある。これらの曝気槽の運転を合理的に行なうためには曝気槽内の動特性すなわち、流体の混合現象と下水と活性汚泥とのあいだでの反応が同時に行なわれている場合についての研究が必要であろう。しかし曝気槽内での動特性の機構についてはまだ完全にはわかっていない。曝気槽内の流体の混合現象を定量的にあらわすことは、曝気槽内の動特性解明の基礎となると考えられるので、本研究では曝気槽内の流体の混合現象について論じてみた。曝気槽内の流体の混合現象は非常に複雑なので、混合現象を完全に定量的手段をもちいて表現することは不可能である。そこで複雑な曝気槽内の流体の混合現象をできるだけ単純なモデルを使って近似的に表現する必要がある。この混合現象のモデルには、拡散モデル、セルモデル、並列組合せモデル、および直列組合せモデルなどがある。各モデルにはそれぞれ特徴があり、一概にはどのモデルが最も曝気槽内の流体の混合現象を適切に表現しているとはいえないだろう。

本研究では実験室的規模の曝気槽および実際の曝気槽について、代表的なモデルのうちセルモデルと拡散モデルを使って流体の混合現象を検討した。また曝気槽内の動特性については機会をあらためて論じたいと思う。混合現象の測定方法としてはいろんな方法があるが、一般的には研究の対象とする系すなわち曝気槽の入口に流入すなわちトレーサーを与え、これに対する系すなわち曝気槽の出口における応答を調べる方法がつかわれてい

る。トレーサー濃度をデルタ関数状に変化させるとデルタ応答法、正弦波状に変化させると周波数応答法、その他階段状に変化させると過渡応答法および残余濃度法となる。本研究では曝気槽内の流体の混合現象の測定にはデルタ応答法を使った。デルタ応答法は実験的に正確なデルタ関数を系に与えないという短所はあるが、比較的手軽に流体の混合現象を知ることができるという長所をもっている。

本研究では最初実験室的規模の曝気槽について、曝気時間および OC が流体の混合現象におよぼす影響を調べた。つぎにこれらを基礎とし、曝気槽を多段化した場合の流体の混合現象の変化を調べた。最後に実際に運転している曝気槽内の流体の混合現象を調べた。曝気を行なうことにより、曝気槽内では酸素供給と同時に攪拌が行なわれるので、OC を攪拌の程度を示すパラメータとも考えた。

### 2. デルタ応答法

衛生工学の分野における処理装置のうち管型すなわち散水ろ床法のようなものには拡散モデル、また槽型すなわち曝気槽のようなものにはセルモデルを使って流体の混合現象を検討すれば便利であるといわれている<sup>18),19)</sup>。

#### (1) 拡散モデル<sup>17)</sup>

拡散モデルは図-1のように、流体が一樣な流速  $\bar{u}$  で流れ、断面方向に濃度分布がなく、系内の混合現象に均一な混合拡散係数  $\bar{E}$  が適用できるとし、この  $\bar{E}$  を使って混合の程度を示そうとするものである。平均流方向に一次元流を考え、 $x \sim x + dx$  の区間で単位断面積当りの物質収支をとる。ここで  $t$  は時間、 $C$  は濃度とし Fick の法則が成立すると考えると、式(1)のように基礎式がもとまる。

$$\bar{E} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \bar{u} \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial C}{\partial t} \dots\dots\dots (1)$$

つぎに式(1)に対する初期条件および境界条件については、数多くの報告がある。曝気槽のように曝気槽内の流体の混合現象が非常に複雑な場合には、曝気槽の長さ  $L$ 、および給液濃度を  $C_f$  とし、式(2)のように示される場合が多い。

\* 正会員 工博 東北大学教授 工学部

\*\* 正会員 工修 東北工業大学助教授 工学部

$$\left. \begin{aligned} t=0, C=0, \\ x=0, -\bar{E}\left(\frac{\partial C}{\partial x}\right)_{x=0}=\bar{u}(C_f-C_{x=0}) \\ x=L, -\bar{E}\left(\frac{\partial C}{\partial x}\right)_{x=L}=0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(2)$$

ここで曝気槽の容積を  $V$ , また流量を  $v$  とし,  $C_0$  を式(3)のように定め, 曝気時間を  $T$  として,  $C/C_0=z$ ,  $x/L=X$ ,  $\bar{E}t/L^2=\theta$ ,  $U=\bar{u}L/2\bar{E}$  および  $\phi=t/T$  として, 基礎式, 初期条件および境界条件を無次元化し, ラプラス変換を行なうと, 式(4)および式(5)がもとまる。

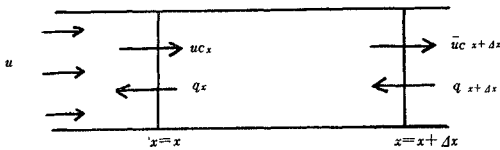
$$\int_{-\infty}^{\infty} vC_f dt = VC_0 \dots\dots\dots(3)$$

$$\frac{d^2 \bar{z}}{dX^2} - 2U \frac{d\bar{z}}{dX} - s\bar{z} = 0 \dots\dots\dots(4)$$

$$\left. \begin{aligned} X=0, -\frac{d\bar{z}}{dX} = 1 - 2U\bar{z} \\ X=1, \frac{d\bar{z}}{dX} = 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(5)$$

したがって式(4)を式(5)の条件のもとで解き, 逆変換を行ない曝気槽出口でのデルタ応答をもとめると式(6)のようになる。

図-1 拡散モデル



$$z = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1} \mu_n^2 \exp \left\{ U - \left( \frac{U^2 + \mu_n^2}{2U} \right) \phi \right\}}{(U^2 + 2U + \mu_n^2)} \dots\dots\dots(6)$$

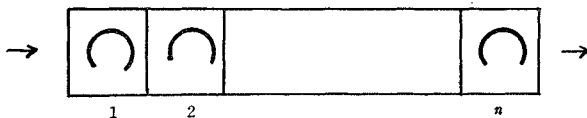
ただし,  $\mu_n$  は  $\cot \mu = \frac{1}{2} \left( \frac{\mu}{U} - \frac{U}{\mu} \right)$  の  $n$  番目の正根である。

以上のように曝気槽内の流体の混合現象に拡散モデルを使用する場合には,  $\bar{E}$  すなわち  $U$  がきまれば曝気槽出口の応答がもとまる。

(2) セルモデル

セルモデルは図-2のように, 曝気槽を  $n$  個の小さな完全混合槽からできていると考え, 曝気槽内の流体の混合の程度をこの  $n$  で示そうとするものである。セルモデルは拡散モデルと比較すると, 数学的取り扱いが簡単である。第  $i$  段目の曝気槽の濃度を  $C_i$  とし, 第  $i$  段目における物質収支を考えると式(7)のような基礎式

図-2 セルモデル



がもとまる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{V}{n} \frac{dC_1}{dt} = v(C_f - C_1) \quad (1 \text{ 段目}) \\ \frac{V}{n} \frac{dC_i}{dt} = v(C_{i-1} - C_i) \quad (i \text{ 段目}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(7)$$

初期条件および境界条件は式(8)のようになる。

$$\left. \begin{aligned} t=0 \quad C_i=0, C_f=\infty \\ t \geq 0 \quad C_f=0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(8)$$

ここで,  $\frac{v_i}{V} = \phi$ ,  $\frac{C_i}{C_0} = z_i$  として無次元化し, ラプラス変換を行ない, 式(7)をもとめると,

$$z_n = \frac{n^n (\phi)^{n-1}}{(n-1)!} \exp(-n\phi) \dots\dots\dots(9)$$

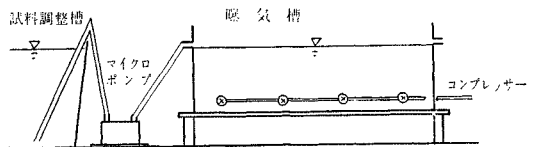
以上のように曝気槽内の流体の混合現象をセルモデルをもちいて表現するには,  $n$  をきめることにより曝気槽の出口での  $\delta$  応答がもとまる。

3. 曝気槽および電気伝導度測定装置

(1) 実験用曝気槽

曝気槽内の流体の混合現象の測定には, 2種類の曝気槽を使った。これらを曝気槽Aおよび曝気槽Bとした。曝気槽Aはアクリル樹脂製であり, 流れに対して直角な断面で  $10 \times 20$  cm, 長さが 50 cm あり, 曝気槽内の流体の全容積は 10 l であった。散気装置としては真鍮製内径 1 cm, 長さ 5 cm の円管を使い径 0.1 cm の穴を 10 個あけたものを 4 個, 水面から 15 cm 下のところにおいた。曝気槽Aでは仕切板をつけて多段曝気の実験を行なえるようにした。曝気槽Aの概略図を図-3に示した。曝気槽Aの写真写真-1に示した。曝気槽内の流体の混合現象を測定した曝気槽は写真-1のうち向って右側のものであった。曝気槽Bはこれまで筆者らが報告したものであり<sup>8),9)</sup>, 写真-2に示した。曝気槽Bはガラス製であり, 曝気槽部分は 1 l であった。散気装置には市販の曝気球を使った。

図-3 曝気槽 A の概略図



(2) 処理場曝気槽

a) S下水処理場曝気槽

S下水処理場ではし尿消化槽脱離液の処理に図-4に示すフローシートのステップエアレーション方式を採用し, 曝気方式は水面下 80 cm のところに曝気格子をおくインカ方式であった。曝気槽内の流体の混合現象の測定には図-4で示す曝気槽1を使った。曝気槽全体は幅 10 m, 長さ 20 m, 水深 4.20 m であり, 容積は 840 m<sup>3</sup> であった。

図-4 S下水処理場曝気槽

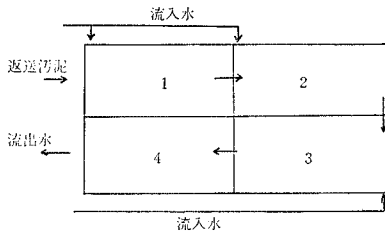


写真-1 曝気槽 A

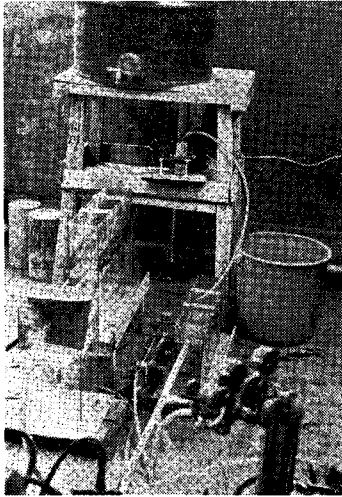
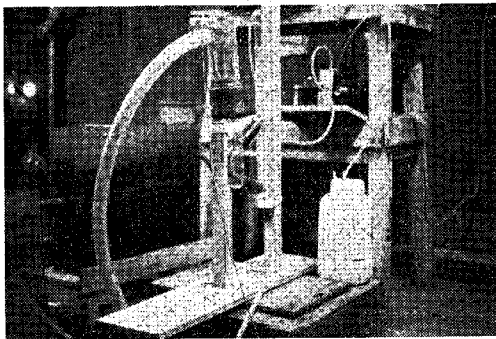


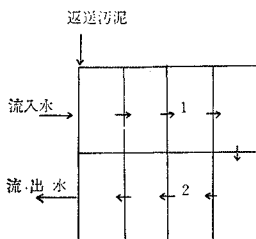
写真-2 曝気槽 B



b) Fし尿処理場曝気槽

F処理場ではし尿消化槽脱離液の処理に図-5に示すフローシートの多段曝気方式を採用し、曝気方式は水面下80cmのところ

図-5 Fし尿処理場曝気槽

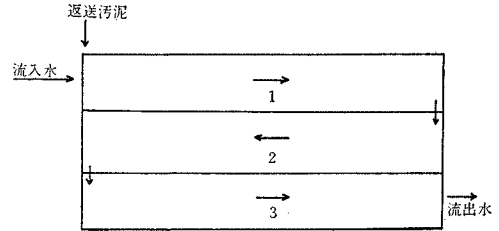


に曝気格子をおくインカ方式であった。曝気槽内の流体の混合現象の測定には図-5に示す曝気槽1を使った。曝気槽全体は幅8.00m、長さ8.40m、水深3.50mであり、容積は235.2m<sup>3</sup>であった。

c) Iし尿処理場曝気槽

I処理場ではし尿消化槽脱離液の処理に図-6に示すフローシートの多段曝気方式を採用し、曝気方式は水面下3.00mのところ

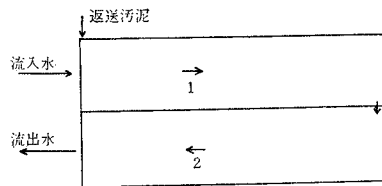
図-6 Iし尿処理場曝気槽



d) Wし尿処理場

W処理場ではし尿消化槽脱離液の処理に図-7に示すフローシートの多段曝気方式を採用し、曝気方式は水底に散気管をおく旋回流方式であった。曝気槽の流体の混合現象の測定には図-7に示す曝気槽1を使った。曝気槽全体は幅7.00m、長さ13.50m、水深3.50mであり、容積は331m<sup>3</sup>であった。

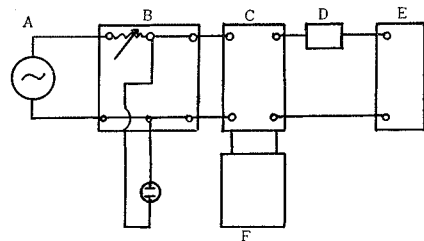
図-7 Wし尿処理場曝気槽



(3) 電気伝導度測定装置

電気伝導度の測定には図-8に示す装置を使った。オシレーターは周波数1kc、電圧を6V以下とした。記録装置にはペン書きオシロを使った。カソード、フォロワー、AC増幅器、整流器、直流電源、バイアス電圧器は手製のものを使った。バイアス電圧器の電圧は45Vであった。白金電極は曝気槽出口におきトレーサーの濃度を検出した。

図-8 電気伝導度測定装置



- A オシレーター
- B 電極および抵抗
- C カソード、フォロワー
- D バイアス電圧器
- E DCアンプ付記録計
- F ACアンプ、整流器

#### 4. 実験方法および測定条件

##### (1) 実験用曝気槽

実験用曝気槽では、曝気槽流入水をメスシリンダーで水量を測り、マイクロポンプで調整した。トレーサーとして使った KCl 溶液の初濃度を 0.5 N、容量を 500 ml とし、トレーサーの注入時間を曝気時間の 5% 以下とした。コンプレッサーから曝気槽へ送り込む空気量を石けん膜流量計で測定しておいた。またそれぞれの空気量の時について硫酸第一鉄と苛性ソーダで OC を測定した。この結果から OC と空気量の検定曲線をもとめた。白金電極についてはあらかじめ水温 10°C~28°C の範囲で 2°C ごとに、KCl 溶液の濃度が 0.001 N~0.03 N の範囲で、KCl 溶液の濃度と抵抗値の関係をもとめて検定曲線をつくり、抵抗値を知ることによって KCl 溶液の濃度がわかるようにした。抵抗値は水温により、非常に敏感な影響を受けるので、実験中は曝気槽および流入水の水温をできるだけ一定にする必要があると考えた。実験用曝気槽における実験はつぎの 4 つのグループに分類した。

##### 実験 I

曝気槽 A で、曝気時間 1 時間の場合について、OC が混合の程度を示すパラメーターにおよぼす影響を検討した。実験 I の実験番号は No. 1~No. 17 であった。

##### 実験 II

実験-I で曝気槽内の流体がほぼ完全混合している OC について、曝気時間が混合の程度を示すパラメーターにおよぼす影響を検討した。実験 II の実験番号は No. 21~No. 34 であった。この場合の OC は 44.5 g/m<sup>3</sup> 時であった。

##### 実験 III

曝気槽 A で、実験 I および実験 II の結果から、曝気槽では OC や曝気時間に関係なく流体の混合現象はほぼ完全混合なので、曝気槽を 2, 3 および 4 個の小さな容積が等しい完全混合槽に分割した場合、流体の混合現象がどのようになるかということを検討した。2 つの完全混合槽に分割した場合を III-1, 3 つの完全混合槽に分割した場合を III-2, 4 つの完全混合槽に分割した場合を III-3 とした。実験 III-1 の実験番号は No. 41~No. 50, 実験 III-2 の実験番号は No. 51~No. 60, および実験 III-3 の実験番号は No. 61~No. 70 であっ

た。実験 III の曝気時間は一定ではなく一時間以内とし、OC は 35 g/m<sup>3</sup> 時であった。

##### 実験 N

曝気槽 B で、最少空気量すなわち活性汚泥が曝気槽内で沈殿しないで自由に動く場合について、曝気槽内の流体の混合現象を検討した。なおこの場合の OC を測定したところ 128 g/m<sup>3</sup> 時であった。実験 N ではトレーサーとしての KCl 溶液は 0.5 N であり、KCl 溶液の容量は 50 ml であった。実験 N の実験番号は No. 81~No. 90 であった。

##### (2) 処理場曝気槽

###### a) S 下水処理場曝気槽

S 下水処理場の曝気槽の流体の混合現象の測定は 2 回行なった。これらの測定番号を No. 101 および No. 102 とし、No. 101 および No. 102 の測定条件を表-1 に示した。トレーサーには市販の塩を No. 101 では 30 kg, No. 102 では 60 kg を水道水に溶かし 0.2 m<sup>3</sup> とし、曝気槽 1 の入口に NaCl 溶液をほぼ 3 分間で注入した。その後に曝気槽 1 の出口で等間隔の時間で試料を採取し、活性汚泥を沈殿させてから塩素イオン濃度を測定した。測定を行なうにあたり、あらかじめ曝気槽内の塩素イオン濃度を測定し、その値を空試験塩素イオン濃度とした。そしてそれぞれ着目時刻の試料の塩素イオン濃度から空試験塩素イオン濃度を減じた。この測定を行なうにあたり、塩素イオンは活性汚泥にあまり吸着されないと考えた。また塩素イオン濃度を高くしすぎて、活性汚泥の活性度に影響を与えないように考慮した。測定時の曝気時間は希釈水 (S 下水処理場では沈殿下水) とし尿消化槽脱離液を加えたものを流入水と考え、S 下水処理場ではステップ エアレーション方式なので、流入水は曝気槽 1, 2 および 3 に等量ずつ流入すると考え、つぎのようにしてもとめた。

$$\text{曝気槽 1 の曝気時間} = \frac{\text{曝気槽 1 の容量}}{\text{流入水} + \text{返送汚泥}}$$

###### b) F し尿処理場

F し尿処理場の曝気槽の流体の混合現象の測定は 1 回行なった。この測定番号を No. 106 とし、測定条件を表-1 に示した。トレーサーとしては市販の塩 60 kg を水道水に溶かして 0.2 m<sup>3</sup> とした。測定時のその他の条件は S 下水処理場のものとまったく同じとした。

###### c) I し尿処理場

I し尿処理場の曝気槽の流体の混合現象の測定は 1 回行なった。この測定番号は No. 111 とし、測定条件を表-1 に示した。その他の条件は F し尿処理場のものとまったく同じとした。

表-1 処理場の測定条件

測定番号	No. 101	No. 102	No. 106	No. 111	No. 116
空気量	39 600 m <sup>3</sup> /日	43 200 m <sup>3</sup> /日	38 556 m <sup>3</sup> /日	18 576 m <sup>3</sup> /日	14 400 m <sup>3</sup> /日
希釈水	1 800 m <sup>3</sup> /日	1 800 m <sup>3</sup> /日	1 080 m <sup>3</sup> /日	1 430 m <sup>3</sup> /日	300 m <sup>3</sup> /日
し尿消化槽脱離液	116 m <sup>3</sup> /日	77 m <sup>3</sup> /日	54 m <sup>3</sup> /日	50 m <sup>3</sup> /日	24 m <sup>3</sup> /日
返送汚泥	3 507 m <sup>3</sup> /日	3 507 m <sup>3</sup> /日	1 134 m <sup>3</sup> /日	804 m <sup>3</sup> /日	1 300 m <sup>3</sup> /日
トレーサー塩素イオン濃度	92 648 ppm	140 027 ppm	130 760 ppm	120 122 ppm	157 585 ppm
空試験塩素イオン濃度	368 ppm	362 ppm	320 ppm	706 ppm	144 ppm

d) Wし尿処理場

Wし尿処理場の曝気槽の流体の混合現象の測定は1回行なった。この測定番号は No. 116 とし、測定条件を表一に示した。その他の条件は F および I し尿処理場の場合とまったく同じとした。

5. 実験結果と考察

(1) 実験用曝気槽

実験 I では、曝気槽 A をつかって、曝気時間を1時間として、OC が混合の程度を示すパラメーターにおよぼす影響を調べた。この結果を表二に示した。この結果、ほぼ  $U=0$ 、および  $n=1$  となり、曝気槽内の流体は完全混合していることがわかった。実験 II では曝気槽 A をつかって、曝気槽内の流体が完全混合していると考えられる  $OC=45 \text{ g/m}^3$  時の時について、曝気時間が混合の程度を示すパラメーターにおよぼす影響を調べた。この結果を表三に示した。この結果、ほぼ  $U=0$ 、および  $n=1$  となり、曝気槽内の流体は完全混合していることがわかった。以上実験 I および実験 II の結果から、曝気槽に仕切板がない場合には、曝気槽内の流体は完全混合

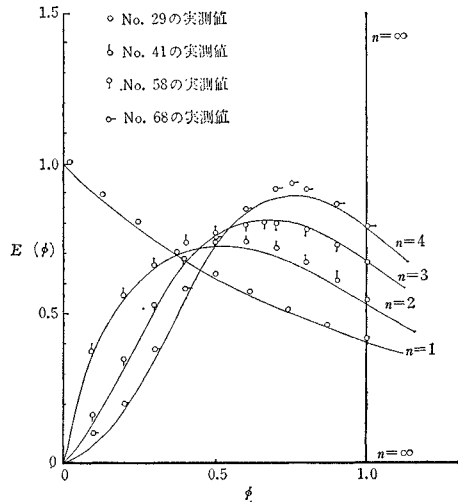
表二 実験 I の結果

No.	OC	曝気時間 時 間	$\phi_{\max}$	$E(\phi)_{\max}$	U	n
	g/m <sup>3</sup> 時					
1	44.5	1	0.017	1.04	0	1
2	34.0	1	0.055	0.90	0	1
3	31.5	1	0.100	0.94	0.073	1
4	28.0	1	0.111	0.95	0.089	1
5	26.0	1	0.050	0.96	0	1
6	23.5	1	0.100	1.02	0.065	1
7	21.5	1	0.133	0.95	0.120	1
8	20.5	1	0.133	0.90	0.120	1
9	19.2	1	0.167	0.98	0.180	1
10	17.5	1	0.100	0.93	0.080	1
11	16.0	1	0.111	0.91	0.090	1
12	15.5	1	0.200	0.97	0.238	1
13	14.5	1	0.167	0.89	0.177	1
14	13.5	1	0.367	0.74	0.690	2
15	39.0	1	0.044	1.05	0	1
16	32.5	1	0.067	1.07	0	1
17	28.0	1	0.087	0.98	0	1

表三 実験 II の結果

No.	OC	曝気時間 時 間	$\phi_{\max}$	$E(\phi)_{\max}$	U	n
	g/m <sup>3</sup> 時					
21	44.5	0.12	0.184	1.016	0.200	1
22	44.5	0.18	0.167	0.940	0.182	1
23	44.5	0.25	0.053	0.950	0	1
24	44.5	0.30	0.167	0.972	0.182	1
25	44.5	0.36	0.091	1.040	0	1
26	44.5	0.42	0.080	0.965	0	1
27	44.5	0.50	0.030	0.856	0	1
28	44.5	0.63	0.066	1.076	0	1
29	44.5	0.67	0.050	1.008	0	1
30	44.5	0.75	0.050	1.112	0	1
31	44.5	1.17	0.056	1.112	0	1
32	44.5	2.00	0.031	1.072	0	1
33	44.5	4.00	0.006	1.180	0	1

図九 実測値と理論値



していると考えられた。ここで曝気槽内の流体が完全混合している場合の典型的な例として、図九に No. 29 の実験値を示した。散水ろ床については、松本・長谷川<sup>10)</sup> は径 5~8 cm の碎石を使い、遠藤ら<sup>11)</sup> は径 3 cm の球を充填材とした実験で散水ろ床内の混合現象を測定した結果、連続散水を行なうと、流体は近似的に押し出し流れに近くなるという結果を得た。実験 III の結果から、本研究の範囲で仕切板をいれない場合には、曝気槽内の流体は完全混合していると考え、曝気槽 A にそれぞれ仕切板をいれ、曝気槽 A 内の流体をセルモデルで表現した。この仕切板の下部には小さな穴があり、流体は自由に動きまわられるようにした。実験 III-1 の結果を表四、実験 III-2 の結果を表五、実験 III-3 の結果を表六に示した。図九にはこれらの測定結果のうち、典型的なセルモデルの例を示した。すなわち 2 段、3 段および 4 段曝気の実測例として、No. 41, No. 58, No. 68 であった。実験 III の結果で、混合の程度を示すパラメーター n、すなわち、この場合には曝気槽の個数と  $E(\phi)$  が最大値、すなわち、 $E(\phi)_{\max}$  となる  $\phi$  の値  $\phi_{\max}$  との関係は、式(9)を微分することから求めた。したがって、 $\phi_{\max}=(n-1)/n$  となった。この理論値と実測値を比較してみると、実験 III-1 では  $\phi_{\max}=0.46$ 、実験 III-2 では  $\phi_{\max}=0.66$ 、また実験 III-3 では  $\phi_{\max}=0.72$  となり、実測値はほぼ理論値と一致していた。したがって、仕切板を多くいれれば、それだけ曝気槽内の流体の混合現象は押し出し流れに近づくと考えられた。Pasveer は Mckinney の理論に基づいて生物化学的観点から二段曝気の長所について述べた<sup>12)</sup>。このほか Benedek<sup>13)</sup>、von der Emde<sup>14)</sup>、Plürmer<sup>15)</sup> および Lindner<sup>16)</sup> も二段曝気の長所を報じていた。二段曝気をする場合について、返送汚泥を一段目曝気槽入口にのみ返送し、曝気槽内の活性汚泥の活性度が一段目と二段目で等しく、この系が

定常状態になった場合には、二段曝気の方が一段曝気よりも処理効率が良いと考えられる。しかし、この系が非定常状態であれば、定常状態になるまで長く時間がかかるので、一段曝気の方が曝気槽の維持管理は容易となる<sup>17)</sup>。実験Ⅲでは  $\phi_{max}$  に関して実測値と理論値はほぼ一致したが、 $\phi$  の値に対応する  $E(\phi)$  の値は必ずしも、

表-4 実験 III-1 の結果

No.	OC		$\phi_{max}$	$E(\phi)_{max}$	$n$
	g/m <sup>3</sup>	時 間			
41	35	0.610	0.50	0.77	2
42	35	0.667	0.43	0.85	2
43	35	0.610	0.46	0.85	2
44	35	0.556	0.45	0.80	2
45	35	0.667	0.42	0.81	2
46	35	0.667	0.45	0.80	2
47	35	0.669	0.46	0.84	2
48	35	0.667	0.48	0.81	2
49	35	0.667	0.47	0.85	2
50	35	0.610	0.46	0.84	2

表-5 実験 III-2 の結果

No.	OC		$\phi_{max}$	$E(\phi)_{max}$	$n$
	g/m <sup>3</sup>	時 間			
51	35	0.383	0.70	1.140	3
52	35	0.481	0.66	0.924	3
53	35	0.500	0.68	0.936	3
54	35	0.500	0.63	0.843	3
55	35	0.500	0.66	0.915	3
56	35	0.500	0.67	0.915	3
57	35	0.633	0.61	0.717	3
58	35	0.550	0.67	0.801	3
59	35	0.511	0.61	0.849	3
60	35	0.511	0.68	0.828	3

表-6 実験 III-3 の結果

No.	OC		$\phi_{max}$	$E(\phi)_{max}$	$n$
	g/m <sup>3</sup>	時 間			
61	35	0.833	0.76	1.012	4
62	35	0.717	0.67	0.988	3
63	35	0.717	0.70	1.000	4
64	35	0.833	0.69	0.928	3
65	35	0.750	0.74	0.936	4
66	35	0.700	0.73	1.000	4
67	35	0.633	0.67	1.028	3
68	35	0.616	0.75	0.944	4
69	35	0.505	0.73	0.952	4
70	35	0.507	0.73	0.980	4

表-7 実験 N の結果

No.	OC		$\phi_{max}$	$E(\phi)_{max}$	$n$
	g/m <sup>3</sup>	時 間			
81	128	0.216	0.05	0.90	1
82	128	0.200	0.13	1.02	1
83	128	0.216	0.10	1.03	1
84	128	0.167	0.03	0.92	1
85	128	0.200	0.07	0.91	1
86	128	0.367	0.05	0.81	1
87	128	0.167	0.07	0.92	1
88	128	0.283	0.07	0.97	1
89	128	0.283	0.07	0.82	1
90	128	0.333	0.08	1.04	1

実測値と理論値は一致するとはいえなかった。この原因としては、入力すなわちトレーサーが必ずしも正しいデルタ関数ではなかったこと、それと曝気槽内の流体の混合現象は非常に複雑であり、近似的にはセルモデルを適用してもよいが厳密には必ずしも適当ではないことが認められた。したがって実際の処理場の曝気槽内の流体の混合状態を測定する場合には、細心の注意を払う必要があった。実験 N では、曝気槽 B について OC を 128 g/m<sup>3</sup> 時とし、曝気槽内の流体の混合現象を調べた。この結果を表-7 に示した。本曝気槽で測定した抵抗値と時間の関係を示すチャートの 1 例を図-10 に示した。この測定結果から、曝気槽 B では曝気槽 A の場合とちがって、流体の混合状態はわずかながら異種の混合が存在するが、ほぼ完全混合であると考えても良いという結果が得られた。

以上のように実験用曝気槽内の流体の混合現象を論ずるには、数学的取扱いが比較的簡単なセルモデルを使うことが適当であると考えた。

(2) 処理場曝気槽

実験用曝気槽内の流体の混合現象の測定を基礎として、実際の処理場曝気槽内の流体の混合現象について検

図-10 実験 N の測定チャートの一例

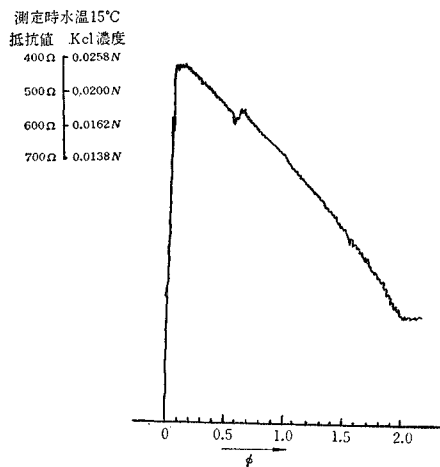
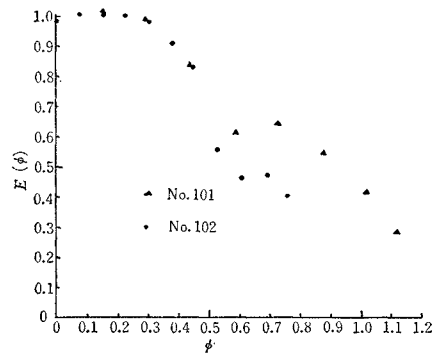


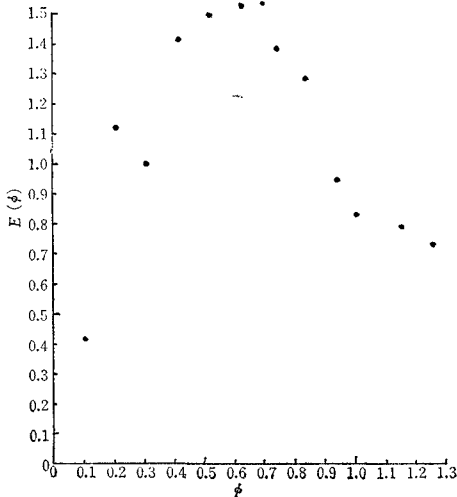
図-11 S 下水処理場の測定結果



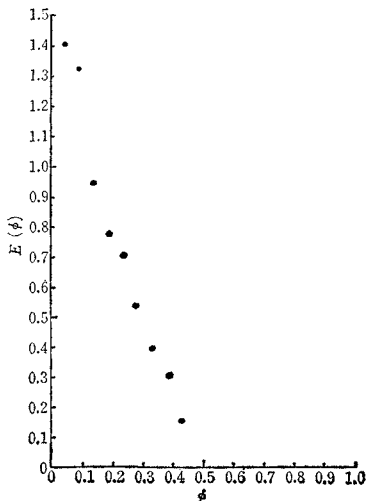
討を加えた。S処理場での $\phi$ と $E(\phi)$ の測定結果を図一11に示した。この結果から $\phi_{\max} \approx 0.15$ ,  $E(\phi)_{\max} \approx 1.0$ となり、近似的に流体は完全混合していることがわかった。S下水処理場の場合と同様にしてFし尿処理場での測定結果を図一12に示した。この結果から $\phi_{\max} \approx 0.65$ ,  $E(\phi)_{\max} = 1.50$ となった。I処理場での測定結果を図一13に示した。この結果から $\phi_{\max} \approx 0$ , および $E(\phi)_{\max} \approx 1.50$ となった。W処理場での測定結果を図一14に示した。この結果から $\phi_{\max} \leq 0.1$ および $E(\phi)_{\max} = 0.90$ となった。

以上述べたように、実際処理場の曝気槽について実験用曝気槽の場合と同じくデルタ応答法をもちいて流体の混合現象を測定したが、実験用曝気槽の場合とくらべてみると、実際の処理場の曝気槽内での流体の混合現象は、必ずしもセルモデルで表現できるとはいえなかった。とくに $\phi_{\max}$ の値は比較的理論値と近い値が得

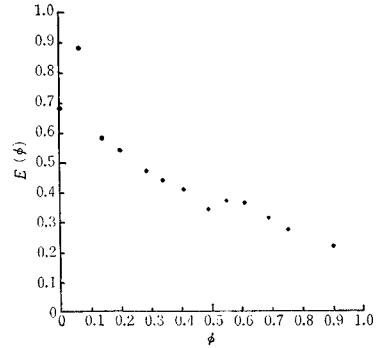
図一12 Fし尿処理場の測定結果



図一13 Iし尿処理場測定結果



図一14 Wし尿処理場の測定結果



られたが、 $\phi$ に対応する値 $E(\phi)$ は非常にバラツキが認められた。この原因としては、以下のことがあげられた。

(1) 実際の処理場の曝気槽内での流体の混合現象は非常に複雑なので、単純なモデルでは表現できなかった。

(2) 曝気槽への流入水の調整が困難であった。

(3) トレーサーとして食塩水が不適当であった。

(4) 曝気槽内への厳密なデルタ関数が送られなかった。

(5) 塩素イオン濃度測定の測定誤差。

実際の処理場の曝気槽内での流体の混合現象の測定を行なった時に、理論値と測定値にちがいがあらわれた原因が上記の(1)の場合でなければ、測定を何度かくりかえすことにより、この誤差はのぞけよう。実際の処理場の曝気槽の流体の混合現象は近似的にセルモデルで表現はできるが、非常に大きく複雑な系であるから現場測定を行なう場合には細心の注意が必要であった。

## 6. 総括および結論

曝気槽内の流体の混合現象にデルタ応答法をもちいて、拡散モデルとセルモデルを適用し、実験的に実際の曝気槽と実験用曝気槽内の流体の混合現象について検討したところ、つぎのことがいえた。

(1) 曝気槽内の流体の混合現象に適用する流体混合のモデルの取扱いは慎重に行ない、特に実際の処理場の曝気槽については慎重に行なう必要が認められた。

(2) 実験用曝気槽の流体の混合現象に適用する流体混合のモデルにはセルモデルが適当であるといえた。

謝辞：本研究を行なうのにあたり、実験中、いろいろご助言をいただいた東北大学工学部化学工学科 前田研究室の方々に深甚の謝意を表します。また当時学生であり直接実験にたずさわっていただいた中村玄正（東北大学大学院学生）、平出勝敏（K.K. 日本鋼管工事）および実験を行なうのにあたり種々の便宜をはかってくださった、関係、市、町、村に感謝します。

## 使用記号

$C$ : 濃度	(g/m <sup>3</sup> )
$C_0$ : 平均濃度	(g/m <sup>3</sup> )
$C_f$ : 給液濃度	(g/m <sup>3</sup> )
$C_i$ : 曝気槽 $i$ 段目の濃度	(g/m <sup>3</sup> )
$\bar{E}$ : 混合拡散係数	(m <sup>2</sup> /時)
$E(\phi)$ : デルタ応答または滞留時間分布関数	(-)
$E(\phi)_{\max}$ : $E(\phi)$ の最大値	(-)
$L$ : 曝気槽の長さ	(m)
$n$ : セル モデルのパラメーター	(-)
$S$ : ラプラス変換のパラメーター	(-)
$T$ : 曝気時間	(時)
$t$ : 時間	(時)
$U$ : $\bar{u}L/2\bar{E}$	(-)
$\bar{u}$ : 平均流速	(m/時)
$V$ : 曝気槽容積	(m <sup>3</sup> )
$v$ : 流量	(m <sup>3</sup> /時)
$X$ : $x/L$	(-)
$x$ : 距離	(m)
$z$ : $C/C_0$	(-)
$z_i$ : $C_i/C_0$	(-)
$\theta$ : $\bar{E}t/L^2$	(-)
$\mu_n$ : $\cot \mu = \frac{1}{2} \left( \frac{\mu}{U} - \frac{U}{\mu} \right)$ の $n$ 番目の正根	(-)
$\phi$ : $t/T = vt/V$	(-)
$\phi_{\max}$ : $E(\phi)_{\max}$ を与える $\phi$	(-)

## 参考文献

- Grievies R. et al : "A Mixing Model for Activated Sludge", W.P.C.F., Vol. 36, pp. 619~635, (1964)
- Grievies R. et al : "The Effect of Short Circuting upon the Completely-mixed Activated Sludge Process", Int. J. Air Wat. Poll., Vol. 8, pp. 199~214, (1964)
- Milbury W. et al. : "Compartmentalization of Aeration Tanks", G. Proc. of the A. S. C. E., San. Eng. Div. pp. 45-61, (1965)
- Mckinney R. : "Mathematics of Complete-Mixing Activated Sludge", G. Proc. of the A.S.C.E., San. Eng. Div., pp. 87~113, (1962)
- 合田 健・中西 弘 : "活性汚泥曝気槽の機能に関する研究", 水道協会雑誌, 第 353 号, 40~47 ページ, (昭 39)
- 松本順一郎・大沼正郎 : "エアレーション・タンクの混合特性に関する一考察", 第 3 回下水道研究発表会講演集, 95~96 ページ, (昭 41)
- 矢木 栄・宮内照勝 : "流系反応器における 残余濃度曲線について", 化学工学, 382~386 ページ, (1953)
- 松本順一郎・大沼正郎 : "し尿消化槽脱離液の活性汚泥処理に関する実験的研究", 土木学会論文集第 116 号, 8~15 ページ, (昭 40)
- 松本順一郎・大沼正郎 : "し尿消化槽脱離液の活性汚泥処理について", 第 2 回下水道研究発表会講演集, 82~84 ページ, (昭 40)
- 松本順一郎・長谷川信夫 : "散水ろ床に関する 実験的研究", 土木学会論文集, 第 106 号, 7~14 ページ, (昭 39)
- 遠藤郁夫, 他 2 名 : "散水ろ床に関する 実験的研究", 第 21 回土木学会年次学術講演概要, II-145-1~145-2
- Pasver A : "New. Developments in the Application of Kessener Brushes (Aeration Rotors) in the Activated Sludge Treatment of Trade-Waste Waters", Wastes Treatment, Pergamon Press, pp. 126~155, (1960)
- Benedek P. : "Erfahrungen mit dem Belebungsuefahren in Ungarn", G.W.F. 105 Gahr S. 771~775, (1964)
- Non der Emde W., : "Beitrag zu Versuchen zur Abwasserreinigung mit belebtem Schlamm," Veröffentlichungen des Institutes für Siedlungswasserwirtschaft der. T.H. Schule Hannover, Hefil, T.H. Schule Hannover, (1957)
- Plümer C, : "Messungen über die Sauerstoffzufuhrleistungen der Belüftungsuferfahren," G.W.F. 99. gahr, S 1277~1282, (1958),
- Lindner W, : "Schlammproduktion und Schlammalter beim Belebungsuefahren in ein-und zwei stufiger Betriebsweise" G.I., 78. gahr, S 271~273, (1958)
- Mason D. et al : "Continuous Stirred Tank Reactor Systems", Ind. and Eng. Chemistry, Vol. 43, pp. 1210~1219, (1951)
- 中西宏幸, 他 2 名 : 流体流動層及び充填層の流体混合特性について, 化工協会, 第 29 号会要旨集, 247~248 ページ,
- 中西宏幸 : 反応装置における流体混合現象に関する化学工学的研究, 東北大学工学部学位論文, (昭 41.3)

(1967. 7. 17・受付)