

大阪大学工学部環境工学科 正員 ○橋本 奨
大阪大学大学院 (現、明電社) 岩堀恵祐

活性汚泥法による下処理水の処理は、世界的に広く普及し、我が国でも水環境の汚濁制御に最も多く用いられている極めて有効な方法である。しかし、本法は、生物学的な方法であるため、流入下処理水の水量・水質水量の変動に対応する適切な操作管理はごまににくい面がある。ここには、流入下処理水の水量・水質水量変動にもかかわらず、絶えず一定濃度の処理水を得ることのできる所謂活性汚泥法の動力学的制御法と、実験結果の一部を報告する。

1. 活性汚泥微生物の増殖と浄化反応動力学

活性汚泥の増殖と基質除去の関係は、経験的・実験的に次式で示される。

$$\frac{1}{S} \frac{dS}{dt} = \mu = Y \frac{1}{S} \frac{dL}{dt} - b \quad (1)$$

ここで、 S ；活性汚泥微生物濃度(%)、 μ ；活性汚泥微生物の比増殖速度(1/日)、 Y ；収率係数(除去基質 k_g 当りの増殖微生物量 k_g)、 $\frac{dL}{dt}$ ；活性汚泥微生物の基質除去速度(%)、 b ；活性汚泥微生物の自己分解係数(1/日)

また、活性汚泥微生物による基質除去は、次の

Michaelis-Mentenの式に従う。

$$\frac{1}{S} \frac{dL}{dt} = \frac{k \cdot L}{[K_m] + L} \quad (2)$$

ここで、 k ；単位活性汚泥微生物当りの最大基質除去速度(%)、 L ；処理水の基質濃度(%)、 $[K_m]$ ；飽和恒数(%)

一方、橋本らは、曝気槽内の活性汚泥微生物濃度と基質濃度が、広範囲に変化する場合には、活性汚泥の基質除去は、次式に従うことを報告している。

$$\frac{1}{S} \frac{dL}{dt} = \frac{k \cdot L}{[K_m] + L} \quad (3)$$

$$[K_m] = K_m \cdot S^m \quad (4)$$

(3)式、(4)式から、次式が導かれる。

$$\frac{1}{S} \frac{dL}{dt} = \frac{k \cdot L}{K_m \cdot S^m + L} \quad (5)$$

すなわち、(2)式と(5)式より、活性汚泥微生物濃度 S と基質濃度 L が、広範囲に変動する場合、 $[K_m]$ は恒数ではなく、 S と L の関数として次式で示される。

$$[K_m] = K_m \cdot S^m \cdot L^n \quad (6)$$

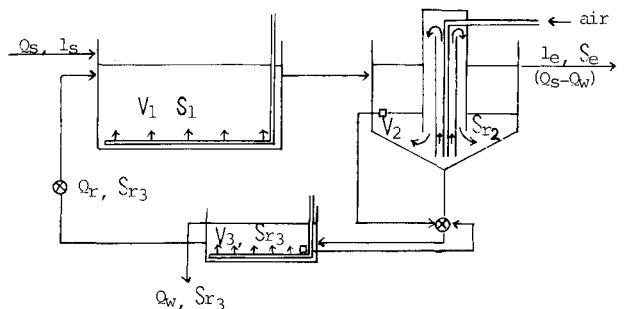
(5)式は、次のように書き換えられる。

$$\frac{1}{S} \frac{dL}{dt} = \frac{k \cdot L}{K_m + \frac{L^n}{S^m}} \quad (7)$$

第1表 活性汚泥の基質除去反応のモデル式

n	K_m, m, n の条件	除去反応の速度式	備 考
1	m, n (基礎式)	$\frac{1}{S} \frac{dL}{dt} = \frac{k \cdot L^n / S^m}{K_m + L^n / S^m}$	橋本
2	$n=1, m=0$	$\frac{1}{S} \frac{dL}{dt} = \frac{k \cdot L}{K_m + L}$	橋本、藤田
3	$n=1, m=1$	$\frac{1}{S} \frac{dL}{dt} = \frac{k \cdot L \cdot S}{K_m + L \cdot S}$	Contois, Fujimoto
4	$n=m (\neq 0)$	$\frac{1}{S} \frac{dL}{dt} = \frac{k \cdot (L/S)^n}{K_m + (L/S)^n}$	橋本、藤田、鈴木
5	$m=0$	$\frac{1}{S} \frac{dL}{dt} = \frac{k \cdot L^n}{K_m + L^n}$	橋本、藤田
6	$n=0$	$\frac{1}{S} \frac{dL}{dt} = \frac{k}{K_m \cdot S^{m+1} + 1}$	moser
7	$n=1, m=0, K_m \ll L$	$\frac{1}{S} \frac{dL}{dt} = k$	ゼロ次反応式
8	$n=1, m=0, K_m \gg L$	$\frac{1}{S} \frac{dL}{dt} = \frac{k}{K_m} \cdot L$	一次反応式 Eckenfelder, Sawyer 式
9	$m=0, n \neq 0, K_m \gg L^n$	$\frac{1}{S} \frac{dL}{dt} = \frac{k}{K_m} \cdot L^n$	Freundlich の式
10	$n=m=1, K_m \gg \frac{L}{S}$	$\frac{1}{S} \frac{dL}{dt} = \frac{k}{K_m} \cdot \frac{L}{S}$	修正一次反応式
11	$n=m (\neq 0), K_m \gg (\frac{L}{S})^n$	$\frac{1}{S} \frac{dL}{dt} = \frac{k}{K_m} \cdot (\frac{L}{S})^n$	高濃度活性汚泥法の脱窒とC/D除去

第1図 汚泥返送完全混合式曝気槽の模式図



Q_s ；流入下処理水量(%)
 Q_r ；引き返す汚泥量(%)
 V_1 ；汚泥ホッパー容積(L)
 L_1 ；流入下処理水の有機物濃度(%)
 S_1 ；曝気槽の活性汚泥微生物濃度(%)
 S_2 ；沈殿槽ホッパーの活性汚泥微生物濃度(%)
 Q_r ；引き返す汚泥量(%)
 V_2 ；汚泥調整槽容積(L)
 L_2 ；処理水の有機物濃度(%)
 S_2 ；処理水の活性汚泥微生物濃度(%)
 S_{r3} ；汚泥調整槽の活性汚泥微生物濃度(%)

ここで、 m, n ；恒数

いま、(7)式の基礎式をもとに、基質除去反応の各種モデル式の関係をまとめて一括表示すると第1表になる。
(7)式と(1)式より、活性汚泥微生物の増殖と基質除去の関係は、次の一般式で示される。また、(8)式を le についで解くと(9)式が得られる。

$$\frac{1}{S} \frac{dS}{dt} = \frac{Y \cdot le}{K_m + \frac{S}{S_m}} - b \quad (8) \quad , \quad le = S^{\frac{1}{n}} \left[\frac{K_m (u+b)}{Y le - (u+b)} \right]^{\frac{1}{n}} \quad (9)$$

(8)式と同様に、第1表の各基質除去反応のモデル式をそれぞれ(1)式に代入すると、活性汚泥微生物の増殖と基質除去に関する各種動力学式が導かれる。実際には、これらの中で実験的にも理論的にも最もよく適合し、かつ実用化できる動力学モデル式を選択すればよい。

2. 活性汚泥法の制御動力学式

汚泥返送完全混合式曝気槽の活性汚泥処理工程を模式的に図示すると、第1図のようになる。

ここで、 V_1 を曝気槽容積、 V_2 を汚泥ホッパー容積、 V_3 を汚泥調整槽容積とし、返送パイプの容積を無視して、そのパイプの曝気槽、汚泥ホッパー、汚泥調整槽内の活性汚泥微生物の物質収支をそれぞれ、次式が得られる。

$$V_1 \left(\frac{dS_1}{dt} \right) + V_2 \left(\frac{dS_2}{dt} \right) + V_3 \left(\frac{dS_3}{dt} \right) = V_1 (Y_1 \frac{dX_1}{dt} - b_1 S_1) + V_2 (Y_2 \frac{dX_2}{dt} - b_2 S_2) + V_3 (Y_3 \frac{dX_3}{dt} - b_3 S_3) - \{ Q_1 S_1 + (Q_2 - Q_1) S_2 \} \quad (10)$$

ただし、 $\left(\frac{dS_1}{dt} \right)$, $\left(\frac{dS_2}{dt} \right)$, $\left(\frac{dS_3}{dt} \right)$ ；それぞれ曝気槽、汚泥ホッパー、汚泥調整槽内の活性汚泥微生物濃度の時間変化(%) $\frac{dS}{dt}$ ； $\frac{dX_1}{dt}$, $\frac{dX_2}{dt}$, $\frac{dX_3}{dt}$ ；それぞれ曝気槽、汚泥ホッパー、汚泥調整槽内の基質除去速度(%) $\frac{dX}{dt}$ ； Y_1, Y_2, Y_3 ；曝気槽、汚泥ホッパーおよび汚泥調整槽内における活性汚泥微生物の収率係数、 b_1, b_2, b_3 ；曝気槽、汚泥ホッパーおよび汚泥調整槽内における活性汚泥微生物の自己分解係数(%)

ここで、最終沈殿池へ入るに活性汚泥微生物は、1に1に固着分離され、また、分離濃縮された汚泥ホッパー内の活性汚泥微生物は、第1図のようにエリプソイドが絶えず曝気運動され、好気状態に保持されている。(10)式を、曝気槽、汚泥ホッパーおよび汚泥調整槽内の活性汚泥微生物の収率係数と自己分解係数は、何れも同一とみなすと次のようになる。ここに、 $Y_1 = Y_2 = Y_3 = Y$ 、 $b_1 = b_2 = b_3 = b$ と置く、(10)式は次式のように書き換えられる。

$$V_1 \left(\frac{dS_1}{dt} \right) + V_2 \left(\frac{dS_2}{dt} \right) + V_3 \left(\frac{dS_3}{dt} \right) = V_1 (Y \frac{dX_1}{dt} - b S_1) + V_2 (Y \frac{dX_2}{dt} - b S_2) + V_3 (Y \frac{dX_3}{dt} - b S_3) - \{ Q_1 S_1 + (Q_2 - Q_1) S_2 \} \quad (11)$$

定常状態では、左辺は零となるから次式が得られる。

$$V_1 (Y \frac{dX_1}{dt} - b S_1) + V_2 (Y \frac{dX_2}{dt} - b S_2) + V_3 (Y \frac{dX_3}{dt} - b S_3) = Q_1 S_1 + (Q_2 - Q_1) S_2 \quad (12)$$

(12)式を变形し、 $Y(V_1 \frac{dX_1}{dt} + V_2 \frac{dX_2}{dt} + V_3 \frac{dX_3}{dt})$ を $Y(V_1 + V_2 + V_3) \frac{dX}{dt}$ と置くと、次式が導かれる。

3. 実験成績

周期的に Q_1 と Q_2 を変動させ、所定の処理水質が得られるよう(9)式を用いて、ベンチスケールの活性汚泥処理プラントを連続制御し、得られた結果を第2図にプロットした。第2図の実線は、(9)式($m=n$)を变形し、これに連続Fed-Batch法で求めた動力学パラメーター、 Y 、 b 、 K_m 、 n の値を入力して求めた理論曲線である。これより、本動力学制御法を用いれば、 Q_1 および Q_2 が、周期的に変動した場合でも、理論曲線と適合した処理水質が、安定して得られることが判る。

$$Y \left(\frac{V_1 + V_2 + V_3}{V_1 S_1 + V_2 S_2 + V_3 S_3} \right) \frac{dX}{dt} - b = \frac{Q_1 S_1 + (Q_2 - Q_1) S_2}{V_1 S_1 + V_2 S_2 + V_3 S_3} \quad (14)$$

(14)の左辺は、曝気槽、汚泥ホッパー、汚泥調整槽内の活性汚泥微生物のnetの比増殖速度 μ である。また、(14)式の右辺は、曝気槽、汚泥ホッパー、汚泥調整槽における活性汚泥微生物のnetの平均滞留時間(θ)の逆数すなわち $1/\theta$ である。

$$\mu = \frac{Q_1 S_1 + (Q_2 - Q_1) S_2}{V_1 S_1 + V_2 S_2 + V_3 S_3} = \frac{1}{\theta} \quad (15)$$

また、(14)式で、 $V_1 + V_2 + V_3 = V$ 、 $V_1 S_1 + V_2 S_2 + V_3 S_3 = V \bar{S}$ とすると、 $\frac{V_1 S_1 + V_2 S_2 + V_3 S_3}{V_1 + V_2 + V_3} = \bar{S}$ は、曝気槽、汚泥ホッパー、汚泥調整槽の三者を含めた平均の活性汚泥濃度である。(14)式の左辺の比増殖速度の項に第1表の活性汚泥の基質除去反応モデル式を適用すると、種々の条件下の活性汚泥法について適用できる各種動力学制御式が導かれる。

一方、第1図に基づき沈殿池および汚泥調整槽内の活性汚泥微生物の物質収支をとると次式が得られる。

$$(Q_1 + Q_2) S_1 = Q_1 S_1 + Q_2 S_2 + (Q_2 - Q_1) S_2 - \left(\frac{dS_1}{dt} V_1 + \frac{dS_2}{dt} V_2 \right) \quad (16)$$

$\frac{dS_1}{dt} V_1$, $\frac{dS_2}{dt} V_2$ は、それぞれ沈殿池および汚泥調整槽内における活性汚泥微生物の増殖量で、実際には、曝気槽内と基質はほとんど除去され、処理水質 le が著しく低くなるので、 $\frac{dS_1}{dt} V_1 \approx 0$, $\frac{dS_2}{dt} V_2 \approx 0$ とみなすことが出来る。

$\frac{dS_1}{dt} V_1 \approx 0$, $\frac{dS_2}{dt} V_2 \approx 0$ および $S_1 = S_2 = S$ として(16)式を变形すると次式が得られる。

$$Q_2 S + (Q_2 - Q_1) S = (Q_1 + Q_2) S - Q_1 S \quad (17)$$

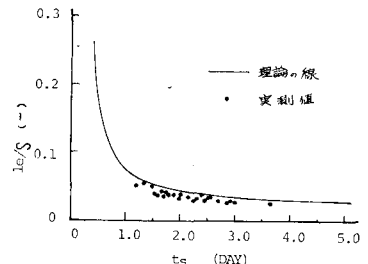
(17)式を(15)式に代入し、 Q_2 について解くと次式が得られる。

$$Q_2 = \frac{Q_1 (1 + \frac{V_1}{V_2} \frac{S_1}{S_2})}{\frac{S_1}{S_2} - 1} \quad (18)$$

(18)式に、(8)式($m=n$)を代入すると次式が得られる

$$Q_2 = \frac{Q_1 (1 + \frac{V_1}{V_2} \frac{S_1}{S_2})}{\frac{S_1}{S_2} - 1} \left[\frac{Y K_m (u+b)}{Y le - (u+b)} \right]^{\frac{1}{n}} - b \quad (19)$$

上式から希望する処理水質(le)が得られるように Q_2 を制御することにより、所定水質の処理水を得る事が出来る。



第2図 活性汚泥プラントの動的制御結果
(各プロットは実験値、実線は理論曲線)