

研究ノート

活性汚泥法の制御に関する 動力学的研究

橋本 奨*

活性汚泥法は、汚水や廃水を培養基として、細菌や原生動物その他の微生物の混合集団を、連続培養することにより、汚染性有機物を酸化分解する方法で、従来、微生物工学や醸酵工学で用いられて来た微生物の連続培養を応用したもので、図1に示したような標準活性汚泥法が基本になっている。この方法は、1913～1914年に、英国マンチェスター市で、ArdernとLockettの両氏により考案され、爾来、米国、英国その他の国で数多くの研究、改良が加えられ、今日に至っている。

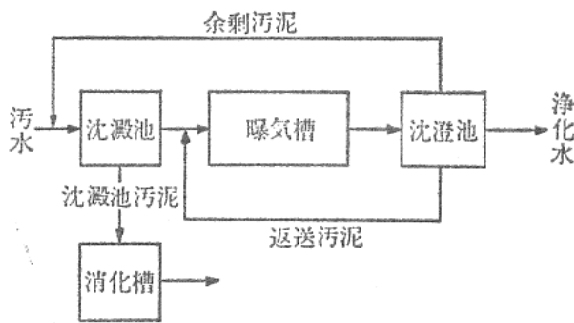


図1 標準活性汚泥法の処理工程

本法は微生物生態の立場からみると図2、図3に示したように、汚染性有機物、細菌、原生動物の食物連鎖の生物反応を利用したもので、極めて複雑である。

現在、本法が下水や廃水の処理法として、世界的に広く普及し、将来に大きな期待が寄せられているが、現実の本法による処理施設は、種々の性質の複雑な汚染性有機物や合成有機物を一つの反応槽で、しかも、異った性質の極めて多種類の細菌や原生動物を混用して、一定の滞留時間で、一律に反応を規定しているところに、未反応物質や食べ残しの残流物質が流出す

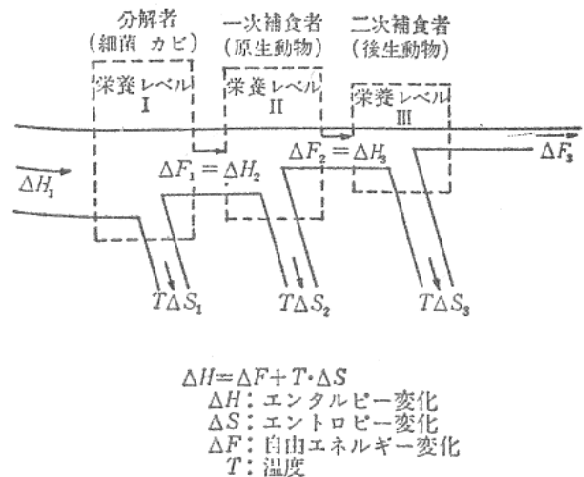


図2 活性汚泥微生物の食物連鎖とエネルギーの流れ

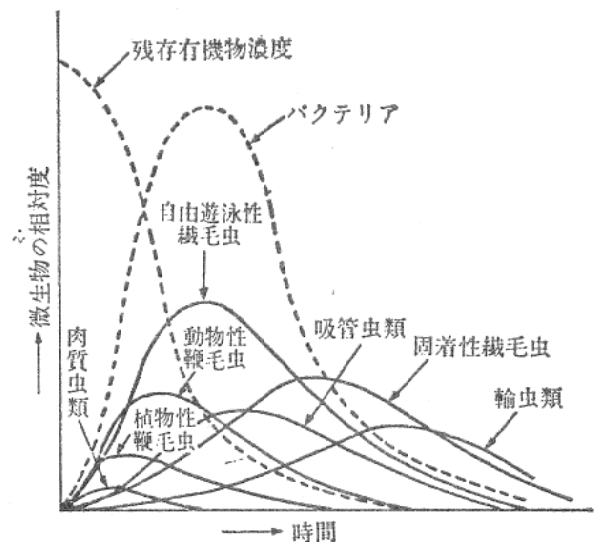


図3 汚水の安定化に伴う微生物の増殖と遷移の模式図

る危険性があり、流入廃水の水質、水量の変動に対する対応や装置の設計、管理の普遍化や自動化に困難性があるように思われる。そこで、筆者の研究室では、三年前より表題の研究テーマをとりあげて、現在もそれを続行している。まだ、完成の域に達していないが、いろいろの

* 橋本 奨 (Susumu HASHIMOTO), 工学部, 環境工学科, 教授, 医博, 工博

事がわかり、将来の完成を夢みている。

私共の研究からすると、活性汚泥法の処理施設を微生物増殖動力学に基づいて、設計管理すれば、水質、水量変動にかかわらず常に一定水質の処理水が得られることを理論と実験室の両面から確かめている。

これまでの研究結果を要約すると次のようである。

1. 活性汚泥の増殖と BOB 除去反応のモデル式

活性汚泥の増殖と BOD 或は COD 除去の関係は、経験的、実験的に次式で示される。

$$\frac{1}{S} \frac{ds}{dt} = Y \frac{1}{S} \frac{dl_r}{dt} - b \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $\frac{ds}{dt}$ は活性汚泥の増殖速度（単位時間当りの増殖微生物濃度、ppm）Y は収率係数（除去 BOD 或は COD kg 当りの増殖微生物量 kg）、 $\frac{dl_r}{dt}$ は活性汚泥の BOD 或は COD 除去速度（単位時間当りの BOD 除去濃度 ppm）、

S は活性汚泥の濃度 ppm, b は活性汚泥の自己分解係数（1/時間）

また、BOD 或は COD 除去速度は次式で示される。

$$\frac{1}{S} \frac{dl_r}{dt} = \frac{k l_e}{[K_m]_1 + l_e} \quad \dots\dots\dots (2)$$

k は単位活性汚泥量当りの最大 BOD 或は COD 除去速度（恒数）、 l_e は処理水の BOD 或は COD 濃度 ppm, $[K_m]_1$ は $\frac{dl_r}{dt} = \frac{1}{2} k$ のときの BOD 濃度或は COD 濃度で一般に飽和恒数といわれている。

これまでの筆者等の研究では、(2)式は次のように改変する方がよりよく活性泥法に合致することを認めている。

$$\frac{1}{S} \frac{dl_r}{dt} = \frac{k l_e^n}{[K_m]_2 + l_e^n} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$[K_m]_2 = K_m S^m \quad \dots\dots\dots (4)$$

(3)式と(4)式を一つにまとめると

表1 活性汚泥の基質除去反応のモデル式¹⁾²⁾

	K_m, m, n の条件	除去反応の速度式	備 考
1	m, n (基礎式)	$\frac{1}{S} \frac{dl_r}{dt} = \frac{k \cdot l_e^n / S^m}{K_m + l_e^n / S^m}$	Hashimoto
2	$n=1, m=0$	$\frac{1}{S} \frac{dl_r}{dt} = \frac{k \cdot l_e}{K_m + l_e}$	Monod
3	$n=1, m=1$	$\frac{1}{S} \frac{dl_r}{dt} = \frac{k \cdot l_e / S}{K_m + l_e / S}$	Cotois, Fujimoto
4	$n=m (\neq 0)$	$\frac{1}{S} \frac{dl_r}{dt} = \frac{k \cdot (l_e/S)^n}{K_m + (l_e/S)^n}$	Hashimoto, Fujita, Suzuki
5	$m=0$	$\frac{1}{S} \frac{dl_r}{dt} = \frac{k \cdot l_e^n}{K_m + l_e^n}$	Modified Monod
6	$n=0$	$\frac{1}{S} \frac{dl_r}{dt} = \frac{k}{K_m \cdot S^{m+1}}$	
7	$n=1, m=0$ $K_m \gg l_e$	$\frac{1}{S} \frac{dl_r}{dt} = \frac{k}{K_m} \cdot l_e$	一次反応（従来の活性汚泥法） (Eckenfelder, Sawyer式)
8	$n=1, m=0$ $K_m \ll l_e$	$\frac{1}{S} \frac{dl_r}{dt} = k$	0次反応（硝化、脱窒）
9	$m=0, n \neq 0, n \neq 1$ $K_m \gg l_e^n$	$\frac{1}{S} \frac{dl_r}{dt} = \frac{k}{K_m} \cdot l_e^n$	Freundlich の式
10	$n=m (\neq 0)$ $K_m \gg \left(\frac{l_e}{S}\right)^n$	$\frac{1}{S} \frac{dl_r}{dt} = \frac{k}{K_m} \cdot \left(\frac{l_e}{S}\right)^n$	高濃度活性汚泥法の脱窒と COD 除去

$$\frac{1}{S} \frac{dl_r}{dt} = \frac{k I_e}{K_m S^m I_e^{1-n} + I_e} \dots\dots (5)$$

即ち $[K_m]_1$ は活性汚泥濃度の S と基質濃度 (BOD 或は COD) の I_e が広範囲に変動する場合には、恒数ではなく、 S と I_e の関数として次式で示されることが判った。

$$[K_m]_1 = K_m \cdot S^m \cdot I_e^{1-n} \dots\dots (6)$$

(5)式は次のようにかきかえられる。

$$\frac{1}{S} \frac{dl_r}{dt} = \frac{k I_e^n / S^m}{K_m + I_e^n / S^m} \dots\dots (7)$$

いま、この(7)式を用いて、活性汚泥の除去反応の各種モデル式を考えてみると表1のようになる。(7)式と(1)式から、活性汚泥の増殖と基質除去の関係を示すと次の一般式が得られる。

$$\frac{1}{S} \frac{ds}{dt} = \frac{YkI_e^n / S^m}{K_m + I_e^n / S^m} - b \dots\dots (8)$$

(8)式と同様に表1の各種除去反応モデル式を、それぞれ(1)式に代入すると、活性汚泥の増殖と BOD 或は COD 除去の関係を各種の条件下でモデル化できる。実際上は、これらの中で実験的にも実際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。

(8)式の Y, k, K_m, m, n, b の各動力学パラメーターは、連続 Fed-Batch 法による活性汚泥法の簡単な実験から、(8)式の非線形モデルの解析法の一つである Nelder と Mead のシンプレックス法で、非定常解析を用いて、簡易迅速に求められることがわかった。又、実際的には、(8)式で $n=m(\neq 0)$ の場合の次の式が最も実用的であることも判った。

$$\frac{1}{S} \frac{ds}{dt} = \frac{Yk(I_e/S)^n}{K_m + (I_e/S)^n} - b \dots\dots (9)$$

2. 活性汚泥法の動力的制御

活性汚泥の増殖は曝気槽内のみで起り、且つ池澱池汚泥ホッパー内と返送汚泥用パイプ内の活性汚泥濃度の時間変化が曝気槽内活性汚泥濃度の時間変化に比べて極めて小さく無視されるので、図4の活性汚泥法の模式図から、以下の制御動力学式が得られる。

即ち、曝気槽における活性汚泥の平均滞留時間 (t_s) を(10)式のように定義すると、制御動力

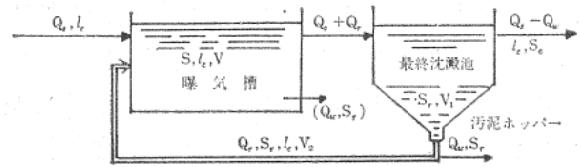


図4 汚泥返送完全混合式曝気槽の模式図

- 記号： Q_s =流入汚水量 (m^3 /日)
 I_s =流入汚水 BOD あるいは COD 濃度 (ppm)
 Q_r =返送汚泥量 (m^3 /日)
 I_e =浄化水 BOD あるいは COD 濃度 (ppm)
 Q_w =余剰汚泥量 (m^3 /日)
 S =曝気槽 MLSS 濃度 (ppm)
 V =曝気槽容量 (m^3)
 S_e =浄化水 S 濃度 (ppm)
 v_1 =汚泥ホッパー容量 (m^3)
 S_r =返送汚泥濃度 (ppm)
 v_2 =返送パイプ容量 (m^3)

学式は(11)式のようなになる。

$$t_s = \frac{\text{曝気槽内活性汚泥量}}{\text{曝気槽から流出・抜きとられる活性汚泥量}} = \frac{VS}{Q_w(S_r - S_e) + Q_s S_e} \dots\dots (10)$$

$$\frac{1}{S} \left(\frac{ds}{dt} \right)_n = \frac{1}{S} \frac{ds}{dt} - \frac{1}{t_s} \dots\dots (11)$$

ここで $\frac{1}{S} \left(\frac{ds}{dt} \right)_n$ は曝気槽内活性汚泥濃度の時間変化、 $\frac{1}{S} \frac{ds}{dt}$ は、活性汚泥の比増殖速度 (μ) である。

(11)式の $\frac{1}{S} \frac{ds}{dt}$ に(9)式を代入すると

$$\frac{1}{t_s} + \frac{1}{S} \left(\frac{ds}{dt} \right)_n = \frac{Yk(I_e/S)^n}{K_m + (I_e/S)^n} - b \dots\dots (12)$$

(12)式は非定常の実際活性汚泥プラントの制御動力学式である。(12)式は、定常状態では

$\frac{1}{S} \left(\frac{ds}{dt} \right)_n = 0$ となるから、次のようになる。

$$\frac{1}{t_s} = \frac{Yk(I_e/S)^n}{K_m + (I_e/S)^n} - b \dots\dots (13)$$

活性汚泥法の実験で求められた動力学パラメーター k, K_m, Y, b, n 値を、(13)式に入れて、 t_s と $\left(\frac{I_e}{S} \right)$ の関係を図示すると図5のように

なり、図上黒丸の点は、実際の活性汚泥処理実験の実測で得られたもので、動力学式に極めてよく一致することが判った。非定常の活性汚泥プラントでは、処理水の水質 (l_e) は曝気槽の活性汚泥濃度と $\frac{1}{t_s} + \frac{1}{S} \left(\frac{ds}{dt} \right)_n$ によってきまり、又、定常の活性汚泥プラントでは、処理水の水質 (l_e) は曝気槽の活性汚泥濃度と $\frac{1}{t_s}$ によってきまることが、(12)式、(13)式からよく判る。

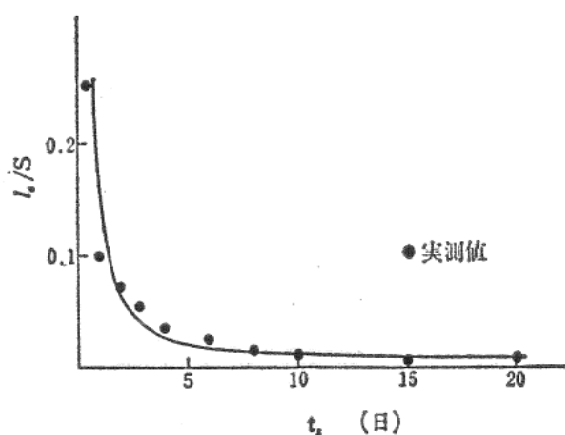


図5 t_s と $\frac{l_e}{S}$ の関係

次に、活性汚泥法の t_s を制御するには、処理工程の汚泥収支から、(10)式を変形して得られる次式を用いると極めて都合がよい。

$$\frac{1}{t_s} = \frac{Q_s}{V} \left(1 + \frac{Q_r}{Q_s} - \frac{Q_r}{Q_s} \frac{S_r}{S} \right) \dots\dots\dots (14)$$

(14)式を(12)式に代入して、 Q_r について解くと、適正な返送汚泥量の算定式が得られる。

$$Q_r = \frac{Q_s - V \left[\frac{Yk(l_e/S)^n}{K_m + (l_e/S)^n} - b - \frac{1}{S} \left(\frac{ds}{dt} \right)_n \right]}{\frac{S_r}{S} - 1} \dots\dots\dots (15)$$

(15)式で k , K_m , Y , b , n は下・廃水についての活性汚泥に関する恒数である。又 Q_r , S , S_r , V は容易に実測でき、又曝気槽内活性濃度の時間変動 $\frac{1}{S} \left(\frac{ds}{dt} \right)_n$ も実測できるから、(15)式から希望する処理水の水質 (l_e) が得られるように、上式の関係を保持しながら、返送汚泥量

Q_r を制御することによって、又(15)式は定常運転になれば $\frac{1}{S} \left(\frac{ds}{dt} \right)_n = 0$ となり、流入水の水質変動、曝気槽の活性汚泥濃度の変動にかかわらず一定水質の処理水が得られることになる。

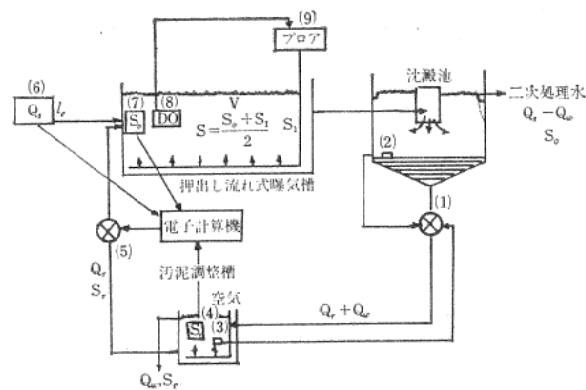


図6 押し出し流れ式曝気槽を用いる活性汚泥法の流系図と自動制御

- 記号：①自動バルブ ②汚泥液面制御 ③液面制御 ④ S_r 連続自動測定 ⑤返送汚泥ポンプ（汚泥返送量制御） ⑥ Q_s 連続測定 ⑦ S_o 連続自動測定 ⑧DO連続自動測定 ⑨ブローア（空気量制御）

図6は押し出し流れ式曝気槽を用いる活性汚泥法の流系図と自動制御の一例を示したものである。本法は、完成までには、まだまだ将来の研究にまたねばならないが、将来の完成を期して、研究室の一つの大きな研究テーマにかかげて、実際プラントと実験室プラントにより、種々試験研究を続行しているが、得られた結果は逐次、学会その他を通して公表して行きたいと思っている。

読者、諸賢の大方の御指導、御協力を心から念願するとともに、本法と下水道の早期完遂を切望して、以上研究ノートの雑文を擱筆することにする。

参考文献

- 1) 橋本 奨：活性汚泥法の新しい試み、環境技術 6(1)9~18 (1977)
- 2) 橋本奨：活性汚泥法の動力学と高濃度活性汚泥法の実用化、第5回水処理研究会—水システムの再編成とその戦略、大阪大学生産技術研究会、水処理研究会主催昭和51年11月17日於大阪科学技術センター、テキスト16~32頁