

II-388 活性汚泥による有機物除去の動力学—仮説および考察—

都立大学 正員 生方 悠

1. はじめに

活性汚泥による複合有機物の除去が一次反応式及びその近似式になることに対してTischler ら(1969)やGrau ら(1975)は単一有機物の零次反応式の総和と説明している。しかしこの考え方には活性汚泥の順致の問題が複雑にからんでおり、また単一有機物でも一次反応式になることが多数報告されているので、一次反応式による有機物の除去機構は未だ明らかにされていないものと考えられる。

活性汚泥は細菌が凝集しフロックを形成しているものであることは誰しも認めるところであろう。ところがフロックを形成している細菌の増殖速度や生理・代謝に関する情報は非常に少ない。基質濃度が低い場合、フロック内部での基質の拡散速度と細菌による消費速度との関係から、基質は主にフロック周辺部の細菌により利用され、フロック内部では基質が供給されないため細菌の増殖は休止していることが推定される。したがって単位細菌当りの増殖速度は、single cell の場合に適用されるMonod式より著しく低下していることになろう。このような状態の細菌の増殖速度を表示する式としてはシグモイド式およびMoser式がある。

細菌がフロックを形成している場合の微生物の比増殖速度をシグモイド式(Moser式の $\alpha=2.0$)で表示し、連続混合培養における各微生物の挙動を数値計算したところ実験結果との一致を得ている(生方,1986)。活性汚泥は種々のフロック径を持つので、活性汚泥の比増殖速度はその総和としてMoser式($\alpha=1.5$ 前後)で表示できると仮定し、回分式活性汚泥法における有機物除去の過程を数値計算したところ実験結果との一致を得たのでここに報告する。また生物学的廃水処理プロセスへのMoser式の応用性についても考察する。

2. フロックを形成している細菌の比増殖速度式と連続混合培養への応用

シグモイド式の妥当性について簡単に説明しておく。有機物(S)を基質とした場合、フロックを形成している細菌および原生動物の連続混合培養における各微生物の挙動について次のような仮定を設けて数値計算したところ須藤らの実験結果(B. B., Vol 117, p167~)との一致を得ている。(1)各微生物の比増殖速度は系の安定性および細菌がフロックを形成していることを考慮してシグモイド式で表示する。(2)フロックを形成している細菌(TB)は原生動物(P)に捕食可能な小さなフロック径を持つ細菌(B)と捕食不可能な巨大なフロック径を持つ細菌(F)とに分ける。したがって、 $TB=B+F$ となる。

連続混合培養における各々の微生物の挙動は次式で示される。

$$\left. \begin{aligned} dS/dt &= (S_r - S) \cdot D - \mu_1 \cdot B/Y_1 - \mu_3 \cdot F/Y_1 \\ dB/dt &= -B \cdot D + \mu_1 \cdot B - \mu_2 \cdot P/Y_2 \\ dP/dt &= -P \cdot D + \mu_2 \cdot P, \quad dF/dt = -F \cdot D + \mu_3 \cdot F \end{aligned} \right\} \dots\dots(1) \quad F \leftarrow S \rightarrow B \rightarrow P$$

$$\mu_1 = \mu_{1m} \cdot S^2 / (K_s^2 + S^2) \dots(2) \quad \mu_2 = \mu_{2m} \cdot B^2 / (K_b^2 + B^2) \dots(3) \quad \mu_3 = \mu_{3m} \cdot S^2 / (K_f^2 + S^2) \dots(4)$$

ここでS、B(F)、P: 基質、細菌および原生動物の濃度。S_r (500mg/ℓ): 流入有機物濃度。D (0.065h⁻¹): 希釈率。Y₁ (0.15)、Y₂ (0.53): BおよびPの収量係数。μ₁、μ₂、μ₃: B、PおよびFの比増殖速度。μ_{1m} (0.114h⁻¹)、μ_{2m} (0.121h⁻¹): μ₁(μ₃)およびμ₂の最大値。K_s、K_f、K_b: B、FおよびPの1/2速度定数。なおS以下()内の数字は実験条件ないし実測値である。

(2)~(4)式の微生物の比増殖速度をMonod式で表示してはK_s、K_bなどをどう操作しても系の周期が長くなりすぎて各微生物の挙動を記述できなかった。実験結果に合うように各微生物の挙動を数値計算したところ、K_s=12、K_b=22、K_f=100 (単位は各々mg/ℓ)を得た(図-1)。ただし細菌がフロックを形成していない場合の微生物の増殖速度はMonod式で表示できK_s=K_b=11である。

3. 回分式活性汚泥法における有機物除去の動力学

上記の数値計算の結果からもわかるように、フロック径の小さい細菌の1/2速度定数は小さく、フロック径の大きい細菌のそれは大きいことが読みとれる。フロックを形成している細菌は種々のフロック径を持つであろう。したがって、フロックを形成している細菌(活性汚泥)の全体としての比増殖速度(μ)は各々

の径を持つ細菌の増殖速度の和として $\mu = \mu_m \cdot S^{\alpha} / (K_s^{\alpha} + S^{\alpha})$ と表わすことができるものとする。シグモイド式では $\alpha = 2.0$ であるが、このような条件では $1.0 < \alpha < 2.0$ の Moser 式となることが推定できる。

活性汚泥の比増殖速度を Moser 式で表示すると、回分式活性汚泥法における活性汚泥の増殖と有機物 (BOD) の減少は次式で示すことができる。ただし活性汚泥の自己分解の項は省略する。

$$dX/dt = \mu X \dots (5) \quad dS/dt = (-1/Y) dX/dt \dots (6) \quad \mu = \mu_m \cdot S^{\alpha} / (K_s^{\alpha} + S^{\alpha}) \dots (7)$$

ここで、X: 活性汚泥濃度 (mg/l)。S: スキムミルクの BOD 濃度 (mg/l)。Y: 収量係数。μ: X の比増殖速度 (d)。μ_m: μ の最大値 (d)。K_s: 1/2 速度定数 (mg/l)。α: Moser の係数。

上記の微分方程式は α 値が特別な場合は解析的に解けるが、(7) 式において α 値は未定であるので RKG 法により数値計算することとした。なお計算誤差は解析値の 3% 以内になるようにきざみ巾を定めた。

実験の初期条件その他を表-1 に、また実験結果および数値計算の結果を図-2 に示す。

実験初期における活性汚泥の増加から μ_m 値と、また実験後期における上澄水 BOD の減少から α 値の概略を各々定め、実験結果によく合うよう μ_m、K_s、α の値を試行錯誤で求めた。その結果を表-1 に示す。

K_s 値は水温の影響を受けているものと考えられるが、いずれの実験でも α=1.5 前後が得られた。α 値を 1.0 や 2.0 とするには上澄水 BOD の減少は実験結果に一致しなかった。

4. 生物学的廃水プロセスにおける Moser 式 (α=1.5) に対する考察

Vavilin (B. B., Vol.24, p1721~1982) は数多くの下水処理場のデータを解析して (7) 式における α 値、K_s 値を計算し α=1.43、K_s=168 mg/l (BOD) であることを報告している。また有機物除去の動力学に対して考察し、高濃度域では Monod 式が適用されるが、低濃度域では代謝産物の影響などで有機物除去の反応機構が変化し、二次反応式になるものとしている。

これに対し筆者は、細菌の増殖速度式である Monod 式と Moser 式の根本的な相違点は single cell である細菌が凝集しフロックを形成すること、すなわち細菌群全体における構造上の変化であると考えている。

図-4 に α=1.5 の Moser 式を規格化して示す。この図から次式の近似式が読みとれる。(イ) $0.2K_s \leq S \leq \infty$ で Monod 式、(ロ) $0.1K_s \leq S \leq K_s$ で一次反応式、(ハ) $0 \leq S \leq 0.2K_s$ で二次反応式。

活性汚泥の増加量が少ない場合には、図-4 における曲線の微係数が有機物 (BOD) 除去係数になる。生物学的廃水処理プロセスにおいて有機物の除去動力学が Monod 式であるとするならば、有機物濃度が低くなるほど有機物除去係数は大きくなり、また一次反応式に近似できる有機物濃度も非常に狭い範囲に限定されるはずである。ところが事実はこちらと異なっている。そこで有機物除去の動力学に対して Monod 式のかわりに Moser 式を用いると、一次反応式近似の有機物濃度の範囲も幅広くとれること、また有機物濃度が低下するのに伴い有機物除去係数が減少すること、更に BOD フランビン内での反応のように有機物濃度が非常に低い範囲では二次反応式近似であることも説明できる。

おわりに、仮説を検証するためフロック形成細菌の増殖動力学について、理論的・実験的に研究中である。

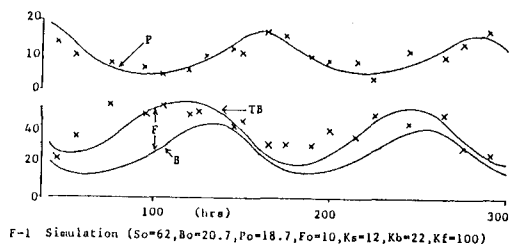


Table-1

run	So	Xo	°C	μ _m	K _s	Y	α
1	650	90	22	1.08	200	.45	1.55
2	1300	190	15	.72	650	.45	1.50

