

活性汚泥法における生物性活性汚泥の 滞留時間について

都立大(正)。生方 悠

I. 序 論

活性汚泥法により廃水処理が始められたのは20世紀の初めである。その後、廃水の質に応じて各種の改良が施され、いくつかのものは変法の名を持って現在に到っている。これらの変法に対する運転管理の示標(設計基準)としては、有機物負荷($BOD/MLSS$ 、 BOD/m^3)、汚泥日令、曝気槽 $MLSS$ 、曝気時間などがある。しかしこれらの示標は各変法により変化していて、すべての活性汚泥法について統一できる示標はまだ発見されていない。それゆえ、昨今のように有機物量が增大してくると、処理施設をどう運転したらよいか難問が生じる。今までの研究によると、有機物負荷や汚泥日令などの示標を操作しても、処理施設の運転に対する合理的な結論は未だに出てないようである。そこで、活性汚泥法において運転管理の新しい示標を見出すため、活性汚泥法を廃水処理装置とは考えず、有機物と利用した微生物の生産装置(微生物の連続培養法)と考え方を変えてみた。活性汚泥法が微生物の連続培養法と違う点は、(1)非生物性の浮遊物を含むこと、(2)汚泥を返送するので培養槽浮遊物濃度が高いこと、である。しかし、(1)については生物性の活性汚泥と考えること、また(2)については生物性活性汚泥の滞留時間(全微生物に対する増殖微生物)と考慮すると、活性汚泥法は、微生物の連続培養の一形態とみなすことができる。それゆえ、活性汚泥法と考える上で、生物性活性汚泥の滞留時間という新しい示標を考え出した。標準活性汚泥法や各種の活性汚泥変法について、この生物性活性汚泥の滞留時間を計算してみると、その値が4日以上施設においては、処理水の BOD 、 SS とも20 ppm以下と良好であった。したがって、この新しい示標・生物性活性汚泥の滞留時間が、活性汚泥法における運転管理の示標・なすべき設計基準となるものと考えられるので、ここに報告する。

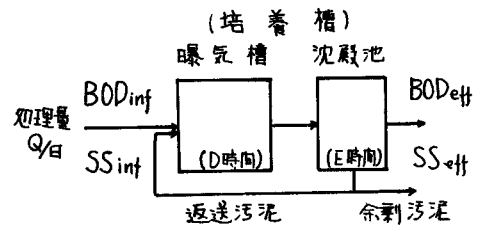


Fig-1 活性汚泥法の flow-sheet

II. 定 義

1. 生物性活性汚泥

活性汚泥法の flow-sheet を Fig-1 に示す。微生物の連続培養法と違う点は、オーに流入水に浮遊物(SS_{inf})が存在すること、オニに汚泥を返送することにより曝気槽の浮遊物濃度($MLSS$)を制御できることである。ここでは前者について考察を行ない、後者については他の場所で説明する。微生物の連続培養法において、流入有機物は微生物に基質として利用され、培養槽で微生物に変化する。一般的に微生物は SS として測定されるから、連続培養法における SS はすべて微生物である。ところが活性汚泥法においては、流入水に非生物性の SS を含むので、 $MLSS$ は全部が生物性の SS とはならない。そこで、生物活動に参与する生物性活性汚泥(biological sludge)の $MLSS$ に占める割合を求める。

まず、 BOD の活性汚泥に変換する量について、

Ramanathan⁵⁾の研究によると、糖類に対する活性汚泥の収量係数は約0.5である。筆者の実験によってもスキムミルク(ラクトース+カゼイン)に対する活性汚泥のそれは糖類と同じく約0.5である。

ところが、活性汚泥は種々の細菌や原生動物を含む微生物群であるから、捕食生物が増殖するのに十分な時間があるなら、その系の中で食物連鎖の作用が働いて、微生物の総量は減少するものと考えられる。さらに、除去有機物に対する活性汚泥の収量係数と滞留

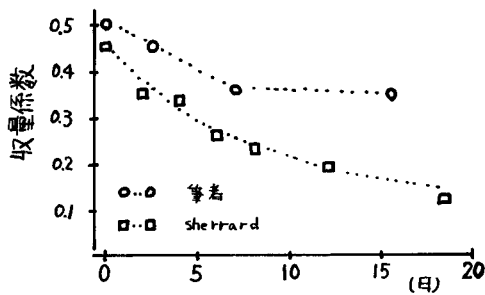


Fig-2 滞留時間と収量係数

時間について、筆者と Sherrard²⁾の研究結果を Fig-2 に示す。筆者はこの実験に連続培養法を用いているが、Sherrard は普通の活性汚泥法で実験している。どちらの実験においても、滞留時間が大きくなると収量係数は減少する。滞留時間が5~7日になると、活性汚泥の収量係数は回分法におけるそれに対して約2/3となる。したがって、滞留時間が5~7日の活性汚泥においては、糖類に対する活性汚泥の収量係数は約1/3となる。なお、スキムミルクはBODで0.65g⁶⁾(グルコース・グルタミン酸もほぼ同値)を示すから、BODに対する活性汚泥の収量係数は約1/2である。このように除去BODの約半分がMLSSに変換することは、他の研究者の報告にもあり、かなり一般的な事実である。

以上のことから、曝気槽におけるBODのSS変換量はわかった。ところが活性汚泥法においては、流入水に非生物性のSSを含むから、MLSSの全部が生物性の汚泥とはならない。そこで、MLSSに対する生物性活性汚泥(B.S)の割合を求める。この割合を計算するに当たり、BODに対して溶解性・非溶解性、またSSに対して生物性・非生物性の区別をすると、この問題は非常に解きにくい。そこで、BODは100%溶解性、SSは100%非生物性の物質と仮定した。以上の仮定を用いると、Fig-1の活性汚泥法における生物性活性汚泥の割合(PBS)は、培養槽におけるBODとSSの物質収支から、次のように表わすことができる。

$$PBS = \frac{0.5 \times (BOD_{inf} - BOD_{eff})}{0.5 \times (BOD_{inf} - BOD_{eff}) + (SS_{inf} - SS_{eff})} \dots [1]$$

一般に、都市下水における沈殿下水のBOD_{inf}とSS_{inf}はほぼ等しく、また活性汚泥が正常に動いていれば、BOD_{eff}とSS_{eff}は20 ppm以下である。そこで、[1]において、BOD_{inf} = SS_{inf} = a, また、

BOD_{eff} = SS_{eff} = 20 とすると、

$$PBS = \frac{0.5 \times (a - 20)}{0.5 \times (a - 20) + (a - 20)} = \frac{1}{3}$$

となり、aに関係なく、MLSSにおけるPBSは33%と一定である。

参考までに、非溶解性BOD(固形物BOD)のPBSに対する影響を調べる。固形物BODは始めSS_{inf}として測定されるが、長期間のうちには生物性活性汚泥に変わるから、非生物性のSSを減少させる必要がある。実験データがないので、固形物BODの生物性活性汚泥に変化する割合について はっきりとしたことはわからないが、スキムミルクはBOD 0.65gを示すことから、BOD 1gは1.5gのSSを減少させるものと仮定した。したがって[1]は

$$PBS = \frac{0.5 \times (a - 20)}{0.5 \times (a - 20) + (b - 20) - a \times (1 - c) \times 1.5} \dots [2]$$

となる。ただし、BOD_{inf} = a, SS_{inf} = b
BOD_{eff} = SS_{eff} = 20 溶解性BODの割合 = C%
沈殿下水について、a = b, かつ 100 < a < 200
また C = 80% と仮定すると、[2]のPBSは0.43となり、[1]より3割程大きくなる。

2. 生物性活性汚泥の滞留時間

連続培養法における微生物濃度は、滞留時間といくら大きくとっても、微生物の収量係数以上にはならず必ず上限が存在する⁹⁾。ところが活性汚泥法においては、沈殿池と設け沈殿汚泥と曝気槽に返送するので、理論的にはMLSSの上限はない。したがって活性汚泥法は、連続培養法において、培養槽に微生物を通さないスクリーンを設置したものと同じである。このスクリーン付き培養槽においても、有機物は微生物に変わるから、微生物濃度は時間とともに増加する。それゆえ、この連続培養法を定常状態に保つておくには、増殖微生物を除去する必要がある。これらのことから、培養槽における微生物の平均滞留時間は、培養槽微生物を単位時間当りの増殖微生物で割ったものとなる。

これらの関係とFig-1の活性汚泥法に適用すると、培養槽微生物(TBS)は、MLSSとPBSの積に更に培養槽体積(曝気槽と沈殿池)をかけ

$$TBS = MLSS \times PBS \times \frac{Q}{24} (D+E) \dots [3]$$

増殖微生物(GBS)は、BODの収支と水量から

$$GBS = 0.5 \times (BOD_{inf} - BOD_{eff}) \times \frac{Q}{24} \dots [4]$$

したがって、活性汚泥法における生物性活性汚泥の
滞留時間(Retention Time, RT)は^[3]~~[4]~~より

$$RT = \frac{1}{\frac{Q}{V} \frac{B_0}{B_0 - B}} \quad [5]$$

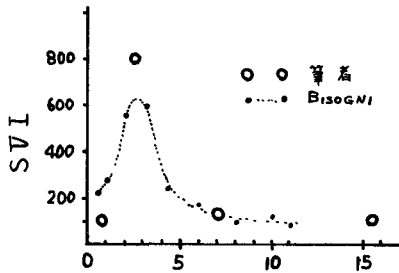


Fig-3 滞留時間とSVI

なお参考までに、活性汚泥の滞留時間とSVIの関係について、実験結果をFig-3に示す。筆者はこの実験と連続培養法で行なっているが、Bisogni¹⁰⁾は普通の活性汚泥法で実験している。この図からわかるように滞留時間が4日以上になると、SVIは200以下となり汚泥の沈降性は良い。実際の廃水においては非生物性のSSも存在するから、沈殿汚泥は圧密の作用を受け、SVIはもう少し低下するものと考えられる。Bisogniの研究によると、滞留時間が0.5~1.0日の汚泥もSVIが200位である。そこでこの条件における汚泥を調べると、一種の膨化汚泥の状態を呈し、上澄水は白濁(他の汚泥の上澄水は無色透明)していたが、黄色の沈殿汚泥も認められた。それゆえ、この条件における汚泥の沈殿率は考え方により二通りある。

汚泥の滞留時間に直接は関係ないが、曝気槽における有機物の除去について回分法で実験を行うと、30分値で上澄水中の有機物はほとんど除去されている。とこが除去された有機物の酸化率は、6時間位経過後においても5~10%程度である。これらのことより、曝気槽における活性汚泥の作用はほとんど吸着作用(物理的反応)と考えることができ、吸着された有機物は長い時間とをかけて徐々に微生物に変わるものと思われる。

Ⅲ 計算

前章において、活性汚泥法における新しい示標・生物性活性汚泥の滞留時間について説明した。ここにおいては、活性汚泥法の標準法、変法のStep-Aeration法・Contact-Stabilization法・High-Rate法・

Modified法について、この示標が何日位になるか、計算を行なった。

1 標準活性汚泥法(Conventional)

標準活性汚泥法は、次の条件により運転管理されているものとする^{1) 2)}

$BOD_{inf} = SS_{inf} = 120$, $BOD_{eff} = SS_{eff} = 20$
 $MLSS = 2000$, 返送汚泥率25%, 返送汚泥濃度=10000, 処理水=Q/日, 曝気時間: 6h

沈殿時間: 2h

※ 生物性活性汚泥の割合(PBS)

$$PBS = \frac{1}{3}$$

※ 処理施設における生物性活性汚泥(TBS)

$$TBS = \frac{1}{3} \times 2000 \times \frac{Q}{24} \times (6+2) = 222Q$$

※ 1日当りの増殖生物性活性汚泥(GBS)

$$GBS = 0.5 \times (120 - 20) \times Q_{\text{日}} = 50Q_{\text{日}}$$

※ 生物性活性汚泥の滞留時間(RT)

$$RT = 222Q / 50Q_{\text{日}} = 4.44 \text{日}$$

また、 $BOD_{inf} = SS_{inf} = 150$ の場合には、

※ $TBS = 222Q$

※ $GBS = 0.5 \times (150 - 20) \times Q_{\text{日}} = 65Q_{\text{日}}$

※ $RT = 222 / 65 = 3.43 \text{日}$

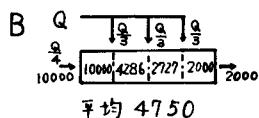
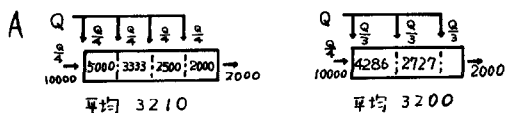
参考までに、上記の条件における有機物負荷・汚泥日令を次に示す。

BOD_{inf}	120	150
$BOD \text{ kg} / \text{MLSS kg} \cdot \text{日}$	0.24	0.30
$BOD \text{ kg} / \text{m}^3 \cdot \text{日}$	0.48	0.60
S.A. (日)	4.17	3.33

上に示したように、 $BOD_{inf} = 150$ の時の方が、有機物負荷・汚泥日令は設計基準に良く合う。 $BOD_{inf} = 150$ におけるRTは3.43日と4日より短い。しかし、返送汚泥装置の汚泥量を加算したり、非溶解性のBODを考慮すると、微生物量は2~3割増加するから、この条件におけるRTは4日以上になるものと考えられる。

2. Step-Aeration法

Step-Aeration法における返送汚泥の操作は、標準法と同一である。しかし、曝気槽平均汚濁物濃度は、処理下水の分流水法により変化する^{1) 2)}。例を次に示す(ただし、 SS_{inf} の影響は無視する)。曝気時間はAについて4時間、Bについて3時間とする。



A・Bにおいて、曝気時間を除く他の運転条件が、標準法と同じ場合には、RTは次のようになる。

BOD _{inf}	A		B	
	120	150	120	150
PBS	1/3	1/3	1/3	1/3
TBS(%)	233	233	253	253
GBS(%)	50	65	50	65
RT(日)	4.66	3.59	5.06	3.90

参考までに、有機物負荷・汚泥日令は

BOD _{inf}	A		B	
	120	150	120	150
$\frac{BOD_{kg}}{MLSS \cdot kg \cdot 日}$	0.23	0.28	0.20	0.25
$BOD_{kg} / m^3 \cdot 日$	0.72	0.90	0.96	1.20
S.A.(日)	4.44	3.56	4.95	3.99

以上計算したように、Step-Aeration 法における曝気時間は、標準法のそれに対し 2/3 ~ 1/2 であるが、RTは標準法よりやや長くなっている。これらのことから、Step-Aeration 法における曝気時間は、標準法に比べ、なぜ短かくて良いのか、その理由を理論的に説明することができた。

3. Contact-Stabilization 法 (Biosorption)
Contact-Stabilization 法における実験データは Ullrich¹⁰⁾の研究による。運転条件を次に示す。

BOD_{inf} = 307, SS_{inf} = 226, BOD_{eff} = 20, SS_{eff} = 18, MLSS = 1896, 返送汚泥濃度 = 6885, 曝気時間: 0.5h, 沈殿時間: 2.0h
安定化槽滞留時間: 6h

$$\star PBS = \frac{0.5 \times (307 - 20)}{0.5 \times (307 - 20) + (226 - 18)} = 0.41$$

$$\star TBS = 0.41 \times \frac{Q}{24} \times (1896 \times 2.5 + 6885 \times 6) = 786 Q$$

$$\star GBS = 0.5 \times (307 - 20) \times Q_{日} = 144 Q_{日}$$

$$\star RT = 786 / 144 = 5.49 日$$

4. High-Rate 法 (欧州式)

High-Rate 法においては、汚泥濃度が高い Det-

mold (Emde)¹²⁾ と中濃度の Zürlich (Wuhrmann)¹³⁾ のデータと参照する。

(1). Detmold

BOD_{inf} = 223, BOD_{eff} = 27, MLSS = 8600, 曝気時間: 52分, 沈殿時間: 243分,

$\star PBS = 1/3$ と仮定 (データ不足)

$$\star TBS = \frac{1}{3} \times 8600 \times \frac{Q}{24 \times 60} \times (52 + 243 分) = 587 Q$$

$$\star GBS = 0.5 \times (223 - 27) \times Q_{日} = 98 Q_{日}$$

$$\star RT = 587 / 96 = 5.99 日$$

(2) Zürlich

BOD_{inf} = 167, SS_{inf} = 78, BOD_{eff} = 16, SS_{eff} = 18, MLSS = 3270, 曝気時間: 144分, 沈殿時間: 132分,

$$\star PBS = \frac{0.5 \times (167 - 16)}{0.5 \times (167 - 16) + (78 - 18)} = 0.557$$

$$\star TBS = 0.557 \times 3270 \times \frac{Q}{24 \times 60} \times (144 + 132 分) = 349 Q$$

$$\star GBS = 0.5 \times (167 - 16) \times Q_{日} = 75.5 Q_{日}$$

$$\star RT = 349 / 75.5 = 4.6 日$$

以上の計算結果より、Contact-Stabilization 法と High-Rate 法における RT は 4 日以上となり、標準法や Step-Aeration 法と同じである。

5. Modified-Aeration 法

Modified 法においては、Torpy¹⁴⁾の研究のうち、MLSS の低い実験と、高い実験について、RT を求める。この実験においては、溶解性の BOD が測定されているので、SS_{inf} に対する、固形物 BOD の影響も考えた。固形物 BOD の生物性汚泥の変換量については、1対1 と仮定した。

(1). MLSS の低い実験

BOD_{inf} = 166, SS_{inf} = 167, BOD_{eff} = 67, SS_{eff} = 46, MLSS = 360, 曝気時間 = 沈殿時間: 2.2 h, 溶解性 BOD_{inf} = 71 (固形物 BOD 95), 溶解性 BOD_{eff} = 39 (固形物 BOD 28)

$$\star PBS = \frac{0.5 \times (166 - 67)}{0.5 \times (166 - 67) + (167 - 46) - (95 - 28)} = 0.48$$

$$\star TBS = 0.48 \times 360 \times \frac{Q}{24} \times (22 + 22) = 31.7 Q$$

$$\star GBS = 0.5 \times (166 - 67) \times Q_{日} = 50 Q_{日}$$

$$\star RT = 31.7 / 50 = 0.63 日$$

(2). MLSS の高い実験

BOD_{inf} = 160, SS_{inf} = 153, BOD_{eff} = 75,

SS_{eff} = 49, MLSS = 920, 曝気時間 = 沈殿時間: 0.9h, 溶解性BOD_{inf} = 69 (固形物BOD91), 溶解性BOD_{eff} = 45 (固形物BOD30)

$$\star PBS = \frac{0.5 \times (160 - 75)}{0.5 \times (160 - 75) + (155 - 49) - (91 - 30)} = 0.486$$

$$\star TBS = 0.486 \times 920 \times \frac{Q}{Q_0} \times (0.9 + 0.9) = 33.5 Q$$

$$\star GBS = 0.5 \times (160 - 75) \times \frac{Q}{Q_0} = 42.5 \frac{Q}{Q_0}$$

$$\star RT = \frac{33.5}{42.5} = 0.79 \text{ 日}$$

以上の計算結果より、Modified法におけるRTは1日以内である。筆者やBisogniの研究によると、RTが1日以内の汚泥は、RT2~3日に較べSVIは低い、上澄水は白濁し、BODも50~70ppmと高い。これらのことより、Modified法(中級処理)における活性汚泥の生物学的条件は、標準法などの高級処理法とはまったく違っているものと考えられる。

IV 結論

活性汚泥法に微生物の連続培養の考え方を応用してみた。活性汚泥法と連続培養法の相違点は、(1)流入水に非生物性の浮遊物を含むこと、(2)汚泥を返送するので培養槽浮遊物濃度が高いことである。しかし、(1)については培養槽におけるBOD・浮遊物の物質収支から、生物性活性汚泥の割合を算出し、(2)については、培養槽に存在する全微生物に対する単位時間当りの増殖微生物の割合から、その槽における微生物の平均滞留時間を考えると、活性汚泥法は連続培養法の一形態であることが説明できる。

それゆえ、活性汚泥法において、生物性活性汚泥の滞留時間という新しい指標を考え出した。標準活性汚泥法や、変法のStep-Aeration法、Contact-Stabilization法、High-Rate法における、生物性活性汚泥の滞留時間について計算してみると、処理が良好に行われていれば、すべての処理施設においてその値は4日以上であった。また、この指標を用いると、Step-Aeration法における曝気時間が、標準法に比較し、なぜ短かくて済むのか、その理由について理論的に説明することができた。

したがって、生物性活性汚泥の滞留時間は活性汚泥法における運転管理の指標、ならびに設計基準として利用できるものと考えられる。実際問題としては有機物負荷が増加している処理場の運転は、生物性活

性汚泥が増えるよう、曝気槽浮遊物濃度を上げると、曝気時間を長くともはよい。

おわりに、この論文をまとめるまでに大分長い時間がかかっている。その間お世話になった、都立大学工学部衛生工学研究室の皆様、ならびに卒業生にお礼申し上げます。

参考文献

1. 建設省監修 "下水道施設設計指針と解説" 日本下水道協会 (1973)
2. 建設省監修 "小規模下水道施設基準と解説" 日本下水道協会 (1971)
3. 合田 健 "活性汚泥法の最近の進歩" (1~4) 用水と廃水, Vol 3 No 1~4
4. 洞沢 勇 "汚泥日令に関する新提案" 下水道協会誌, Vol 9 No 99 (1972)
5. M. Ramanathan and A.F. Gaudy, J.W.P.C.F. Vol 44 No 3 p 441 (1972)
6. 生方 悠 "活性汚泥の増殖速度とBOD除去について" オ11回下水道研究会講演集 (1974)
7. 野原・生方 "活性汚泥の滞留時間と硝化作用" オ11回下水道研講演集 (1974)
8. J.H. Sherrard and E.D. Schroeder, Water Research Vol 6 p 1039 (1972)
9. D. Herbert et al "The Continuous Culture of Bacteria" J. gen. Microbiol Vol 14 (1956)
10. J.J. Bisogni and A.W. Lawrence, Water Research, Vol 5 p 753 (1971)
11. A.H. Ullrich and M.W. Smith, Sewage and Industrial Waste, Vol 29, No 4, p 400 (1957)
12. D. Kehr and W. von der Emde, J.W.P.C.F., Vol 32, No 10, p 1066, (1960)
13. K. Wuhrmann, Sewage and Industrial Waste, Vol 26, No 1, p 1, (1954)
14. W.N. Jorpy and M. Lang, Pro. ASCE, SA-3, Proc. paper, 1681, (1958)