

東北大学工学部 松 本 順一郎

東北大学工学部 大 沼 正 郎

1. 緒言

この論文では活性汚泥、曝気槽内の流体の混合状態、および曝気時間がどのように活性汚泥法による廃水の浄化に関与しているかを筆者等の実験的研究の結果を中心にして検討した。即ち、最初に回分試験により BOD 除去を検討し、つづいてその活性汚泥についてワールブルク検圧計を使い酸素吸収速度を検討し、次にこれら回分試験の結果にもとづいて連続試験によつて浄化効果を検討し、最後に実際の処理場での活性汚泥法の浄化効果を検討した。

2. 生物学的酸化

物理的原因のみで除去される

有機性廃水が曝気槽内で活性汚泥と接触すると、非常に複雑な機構によつて有機物が除去される場合もあるが、一般的には生物化学的原因により除かれる場合の方がより多いといわれる。

この除去機構については多数の研究がある。(1)(2)(3)(4)(5)

2-1 回分試験

回分試験結果に基づく活性汚泥の浄化機構に関する研究は大別して2つに分類できよう。第1は Monod⁽⁶⁾ の純粋な培地での研究を Downing 等が⁽⁷⁾ 活性汚泥中の硝化菌に適用した一相説、および第2は Garret and Sawyer が提案して Eckenfelder 等が種々の廃水処理施設の設計に使っている二相説である。⁽⁸⁾

a 一相説

活性汚泥の濃度を S , 有機物の最大除去速度を K_{max} , 時間 t における有機物濃度を C , Michaelis-Menten の定数を K_x , 除去有機物 のうち活性汚泥に変換される割合を E_1 , とすれば、

$$\frac{1}{S} \times \frac{dC}{dt} = k_{max} \frac{C}{C_{R+C}} \quad (1)$$

$$dS = E_1 dC \quad (2)$$

b 二相説

対数増殖相における有機物除去速度定数 K_1 , 減衰増殖相における有機物除去速度定数 K_2 , 対数増殖相における除去有機物のうち活性汚泥に変換される割合を E_2 , 減衰増殖相における除去有機物のうち活性汚泥に変換される場合を E_3 , とする。有機物の濃度が高い場合すなわち対数増殖相では、有機物除去の速度又は活性汚泥の増殖速度は有機物濃度と無関係となり、また有機物濃度が低い場合すなわち減衰増殖相では、有機物 除去速度または活性汚泥の増殖速度は有機物濃度と関係が深いといわれる。

対数増殖相

$$\frac{dC}{dt} = K_1 S \quad (3)$$

$$dS = E_2 dC \quad (4)$$

減衰増殖相

$$\frac{dC}{dt} = K_2 C \quad (5)$$

$$dS = E_3 dC \quad (6)$$

活性汚泥による影響を考え $K_2 = K_2' S$ とすると

$$\frac{dC}{dt} = K_2' SC \quad (7)$$

2-2 連続試験

連続試験はこれまでのべた回分試験による生物酸化の状態を更に一步実際の活性汚泥法の状態へと近づける手段である。一般に曝気槽内では有機物の除去と流体の混合現象が同時に起つていていると考えられる。⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾したがって曝気槽内の流体の混合現象を検討することも活性汚泥法の浄化機構を解明するのに重要なことである。曝気槽は非常に大きく、したがって曝気槽内の流体混合現象は複雑であるが、これをできるだけ単純なモデルを使つて近似的に表現するのが適當であろう。筆者等には曝気槽が n 個の小さな等容積の曝気槽から成立していて、各々の曝気槽内の流体は完全混合している、すなわちセルモデルと考え検討を加えたい。

曝気槽は等容積 (V_R) の n 個の小さな曝気槽に分けられ、水量負荷を Q 、返送汚泥比を r とし、第 j 番目 ($j=1$) の曝気槽内での微小時間、 dt 間の有機物の物質収支をとる。

$$\text{入量} = (j-1) \text{ 番目の曝気槽からの流入量} = 0j-1(1+r)Qdt \quad (8)$$

$$\text{出量} = (j+1) \text{ 番目の曝気槽への流出量} = 0j(1+r)Qdt \quad (9)$$

$$\text{生物酸化による有機物の除去量} = v_j^+ V_R dt \quad (10)$$

但し有機物の除去速度を v_j^+ とし、流入水有機物濃度を 0_j 、および第 j 段目曝気槽流出水有機物濃度を $0j$ とする。

したがって

$$V_R dC_j = C_{j-1}(1+r)Qdt - C_j(1+r)Qdt - v_j^+ V_R dt \quad (11)$$

$$\frac{dC_j}{dt} = \frac{1}{C_j} (C_{j-1} - C_j) - v_j^+ \quad (12)$$

$$\text{但し } \frac{1}{C_j} = \frac{(1+r)Q}{V_R}$$

有機物濃度が低い場合には(5)式で示すように有機物の除去は一次反応となり、又曝気槽が定常状態となつた場合には $\frac{dC_j}{dt} = 0$ となり、(12)式は次のようになる。

$$C_{j-1} = C_j + K_{2j} C_j C_j \quad (13)$$

したがって

$$C_1 = (1 + K_{22} C_2)(1 + K_{23} C_3) \cdots (1 + K_{2n} C_n) \quad (14)$$

ここで返送汚泥中の有機物濃度が、第 n 段曝気槽流出水の有機物濃度と同じであるとして、第 j 段目曝気槽内での微小時間 dt 間の有機物の物質収支を (13) 式と同様に導くと、

$$\left(\frac{1}{1+r}\right)C_0 + \left(\frac{r}{1+r}\right)C_n = (1 + K_{21} C_1) C_1 \quad (15)$$

曝気槽内で MLSS があまりかわらないとすれば、 $K_{21} = K_{22} = \cdots = K_{2n-1} = K_{2n}$ となり、また

$C_1 = C_2 = \cdots = C_n$ となるから、(14) 式と (15) 式から、流入水と第 n 段目曝気槽流出水の割合は次のようになる。

$$\frac{C_n}{C_0} = \frac{1}{(1+r)(1+K_2 C)^n} \quad (16)$$

3. 実験用曝気槽と実験方法

3-1 回分試験 (12)

回分試験に使つた曝気槽内の混合液の全容量を $2l$ とした。回分試験は 1 日 1 回 500 ml の

希釈脱離液を加えてから、曝気時間 0, 30分, 1時間, 1時間30分, および2時間後の曝気槽内混合液をとり出し、30分間沈澱させた上澄液について水質試験をおこなった。まず $OC = 158 \text{ g/m}^3$ 時で一週間にわたって半連続方式で1日1回500 mlの希釈脱離液を出し入れして、このようにして得られた活性汚泥を $OC = 158 \text{ g/m}^3$ 時で曝気し、曝気槽内浮遊物質濃度（以後 MLSS 濃度と記す）を変化させて、MLSS がどのように有機物除去速度定数（以後 BOD 除去速度定数で表わす）に影響をおよぼすかをしらべた。その後 OC を 30, 42, 63, 97 および 126 g/m^3 時と変化させて、一週間同様にならした活性汚泥で回分試験をおこない、この時に得られた活性汚泥をワールブルク検圧計を使って基質分解酸素吸収速度を測定した。ワールブルク検圧計は水温 20°C 、振幅 5 cm、振動数 80 回/分で、容器には脱離液 10 ml、活性汚泥 0.5 ml、1.0% KOH 溶液を 0.5 ml を入れて基質分解酸素吸収速度を測定した。

3-2 連続試験

連続試験に使った曝気槽は2種類であった。これらを曝気槽Ⅰおよび曝気槽Ⅱとした。曝気槽Ⅰは曝気槽と沈澱槽が一緒になっているものであり、曝気槽部分の容量は $300 \text{ cm}^3 \sim 2000 \text{ cm}^3$ であった。沈澱時間は約2時間であった。⁽¹⁵⁾ 曝気槽Ⅱは図-1に示すように曝気槽は 10000 cm^3 および沈澱槽は 5000 cm^3 であった。曝気槽Ⅱを使って多段曝気をする場合には、曝気槽を小さな4つの曝気槽に分割でき、

しかも混合液がそれぞれの曝気槽を自由に出入できるように仕切板には径 2 cm の小穴をあけた。

返送汚泥はエアー・リフトにより流入水に対して2-6倍返送した。平均汚泥返送比は4であった。曝気槽Ⅰに

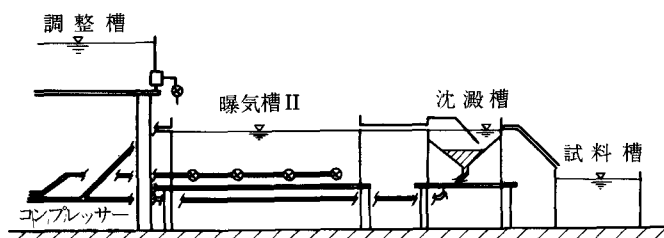


図-1 曝気槽Ⅱの概略図

よる実験を実験 A、曝気槽Ⅰ

でおこなった実験を実験 B とした。曝気槽からの流出水は曝気槽内混合液をとり、30分間沈澱させその上澄液について水質試験をおこなった。

連続試験をおこなうのにあたり、曝気槽Ⅰおよび曝気槽Ⅱの流体の混合状態をしるためにトレーサーとして 0.5 M KCl 溶液を使い、デルタ応答法により検討を加えた。

(実験 A)

空気量を最少量すなわち曝気槽内を自由に活性汚泥が循環できる程度とし、曝気時間を 30分、1時間、2時間、4時間、8時間、12時間および24時間とかえて、処理効率がどのようになるかをしらべた。そして連続試験で得られた結果と、回分試験からもとまつた BOD 除去速度定数をもとにした推定値を比較した。

(実験 B)

まず曝気時間を8時間と一定とし、 OC を4段階、すなわち 34, 44, 54, および 64 g/m^3

・時と変え、処理効率におよぼす DO の影響をしらべ、次に DO を 6.4 g/m^3 ・時、として曝気時間2時間、および4時間とし、処理効率がどのようになるかをしらべた。最後に曝気槽に仕切板をいれ、この仕切板を曝気槽に入れた場合に、処理効率がどのようになるかをしらべた。そして連続試験で得られた結果と、回分試験からまとめた BOD 除去速度定数をもとにした推定値を比較した。

4. 実験結果と考察

4-1. 回分試験

生物学的酸化の理論は大別して一相説と二相説に分けられるが、本質的な意味においてはあまりちがわないと考えられる。本論文の回分試験のように BOD が低い場合には、活性汚泥による BOD 除去は一次反応にしたがうといわれるので、 $DO =$

15.8 g/m^3 ・時の場合について BOD 除去速度定数と

$MLSS$ の関係を図-2に示した。図-2を直線回帰してみると $K_d = 0.125\text{ g}^{0.35}$ となつた。

BOD 除去速度定数 K_d は常用対数でもとめた値である。一般に BOD 除去速度定数は曝気槽内浮遊物質濃度に比例するといわれるが、必ずしもこのようなことはいえないと考えられた。

次に DO を変えた場合に得られる活性汚泥について、フールブルク検圧計を使い基質分解酸素吸収速度を測定した。

最初 DO が 15.8 g/m^3 ・時

の時に生成された活性汚泥について、底5Bのろ紙でろ過した脱離液を加えた場合の酸素吸収速度を測つたところ、図-3の結果がえられた。

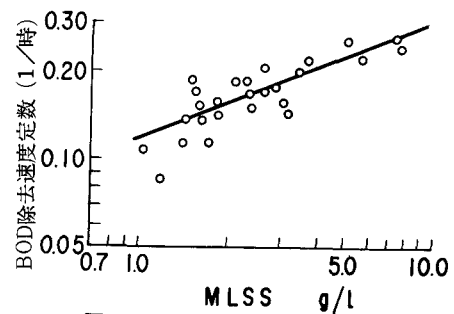


図-2 BOD 除去速度定数と $MLSS$

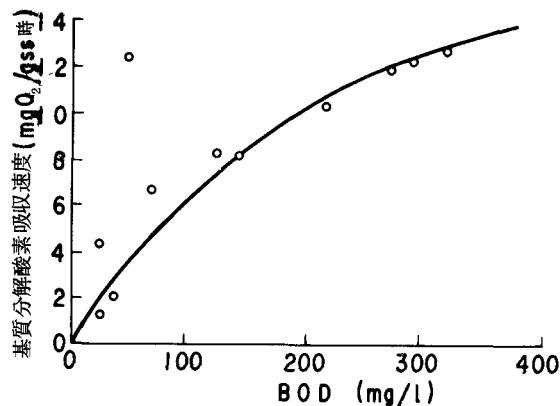


図-3 基質分解酸素吸収速度と BOD

図-4は DO を変えた場合について、図-3と同じように、ろ過しない脱離液を加えた場合の基質分解酸素吸収速度と BOD の関係を示した。この結果、 DO を変えると基質分解酸素吸収速度は DO が高い方がわずかながら大きくなるが、本実験の範囲ではあまりちがわないことがわかった。

したがって BOD 除去速度定数も DO がかわればわずかながら変化すると考えられるが、あまりちがわ

ないのでなかろうかと推定した。

そこで回分試験の結果えられ

たBOD除去速度定数 K_d を $K_d =$

m_1^n として、 $n = 1.0$ および

$n = 0.35$ の場合について m

を常用対数でとめたところ

、全回分試験の平均値として

は夫々 $m_1 = 0.050$ および m_2

$= 0.098$ であつた。

以上の結果から $n = 1.0$ および

$n = 0.35$ の場合について、

MLSS がかわつた場合のMLSS

とBOD 除去速度定数との関

係を表一に示した。

この結果から、MLSS が18%

～48% の範囲では、どちらの方法で推定して

も大差はないと考えられた。

4 - 2 連続試験

連続試験をおこなう前に曝気槽Ⅰおよび曝

気槽Ⅱについてデルタ応答法を利用して曝気槽
内の流体の混合現象について検討を加えた⁽¹⁴⁾

この実験結果から考えて曝気槽Ⅰと仕切板をい

れない、曝気槽Ⅱでは00と水量負荷とは無関

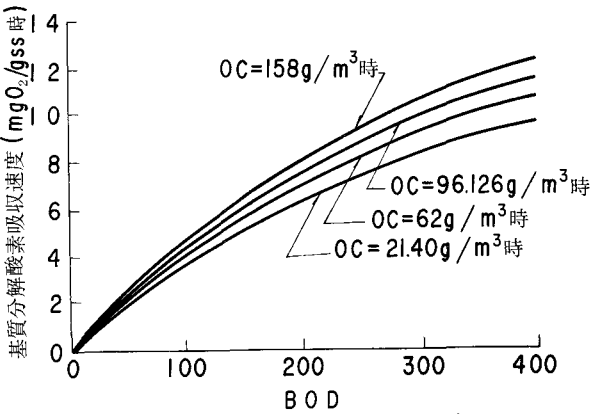
係に、曝気槽内では流体は近似的に完全混合し

ていると考えられた。

また曝気槽Ⅱに仕切板を入れたときは曝気槽内

の流体の混合状態は近似的にセルモデルで表現できた。曝気槽Ⅱで曲型的な完全混合を示した場合の実験値のプロットと理論値曲線とを図一5に示した。また経過時間を曝気時間で割つて無次元化したものを ρ とし、滞在時間分布関数 $W(\rho)$ を最大とする ρ の値を ρ_{max} とすると、曝気槽Ⅰおよび仕切板をいれた曝気槽Ⅱにおける ρ_{max} と曝気槽の段数との関係は表一2に示すとおりであつた。

以上のことから曝気槽Ⅰおよび仕切板を入れた曝気槽Ⅱについて、セルモデルが適用できることがわかつた。図一6には実験Aと実験Bのうち完全混合している場合について示したものであり、各プロットは実験値の平均値であり、曲線は回分試験の結果と(16)式とからBOD除去率を推定した結果を示した。曝気槽に仕切板をいれても各曝気槽内でMLSSの量はかわらないことが実験結果からわかつたのでMLSSの平均値をとり、段数をパラメーターにとつて示したのが図一7である。但し、図一7の中で曝気時間 $n\tau$ は返送比 r を4と考えた値であり、一方、図一6の中での曝気時間 τ には返送



図一4 基質分解酸素吸収速度とBOD

表一 BOD除去速度定数とMLSS

MLSS	K = 0.050よりとめた結果		K = 0.098よりとめた結果	
	常用対数	自然対数	常用対数	自然対数
1g/l	0.050	0.115	0.098	0.226
3g/l	0.150	0.345	0.133	0.306
5g/l	0.250	0.575	0.173	0.378
7g/l	0.350	0.807	0.190	0.447
9g/l	0.630	0.451	0.213	0.488

比 r を 0 と考えた値で示した。

以上から、推定値と実験値の平均値は近似的に同じであつた。しかし

曝気槽Ⅰで曝気時間 8 時間の場合、わずかながら 00 が高い方が処理効率が良いと考えられた。ここで流入水 BOD が 227 mg/l 、流入水 SS が 381 mg/l 、および $MLSS$ が 3000 mg/l とした場合、 BOD 除去率を 90% 以上期待したい場合の曝気時間、 BOD 負荷、 BOD/SS 、および汚泥日令をもとめてみると、1 段曝気では $S^{0.35}C$ が 3.5 以上であることが必要であるから、曝気時間 2.4 時間、 BOD 負荷 $0.20 \text{ kg/m}^3\text{日}$ 、 BOD/SS , 0.07 kg/kg日 、および汚泥日令 8 日となる。

また図-7 から、曝気時間が同じであれば、曝気槽を多段化すればそれだけ BOD 除去率が高くなることがわかる。最後に、実際の処理場の活性汚泥法による処理効果について、回分試験の結果からもとめた推定値と現場試験をした結果とについて比較をする。0 処理場および 8 処理場は兩者ともにし尿処理の 2 次施設として活性汚泥法を使っている。0 処理場では 2 段曝気方式であり、一方、8 処理場ではステツプ・エアレーション方式を採用し、希釈し尿消化槽脱離液は曝気槽の 3 点から流入するようになっている。8 処理場でのステツプ・エアレーション方式は第 3 段目曝気槽までであり、第 4 段目には流入水が入らない。

0 処理場および 8 処理場で運転条件を表-3 に示した。0 処理場および 8 処理場の曝気槽内の流体の混合状態は、第一番目の曝気槽について試験したところほぼ完全混合であつた。流出水 BOD を近似的に推定するには図式解法が簡便である。

ここで (15) 式の左辺の第 2 項を無視すると

$$V_1^* = \frac{1}{C_1} \times \left(\frac{1}{1+r} C_0 - C_1 \right) \quad (15)$$

又(12)式から

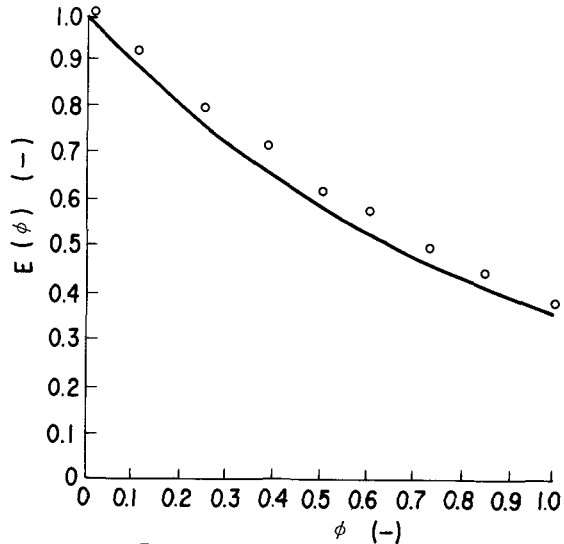


図-5 曝気槽Ⅱの完全混合の例

表-2 曝気槽の段数と ϕ_{max}

実験番号	曝気槽Ⅰの ϕ_{max}	曝気槽Ⅱの ϕ_{max}		
		2 段	3 段	4 段
1	0.05	0.50	0.70	0.76
2	0.13	0.43	0.66	0.67
3	0.10	0.46	0.68	0.70
4	0.03	0.45	0.63	0.69
5	0.07	0.42	0.66	0.74
6	0.05	0.45	0.67	0.73
7	0.07	0.46	0.61	0.67
8	0.07	0.48	0.67	0.75
9	0.07	0.47	0.61	0.79
10	0.08	0.46	0.68	0.73
平均値	0.07	0.46	0.66	0.72

$$v_j^* = \frac{1}{C_j} (C_{j-1} - C_j)$$

(12)

となる。ここで BOD 除去速度線図すなわち縦軸に単位時間当りの BOD 除去、横軸に BOD の関係を示す図をパラメーターを MLSS とし表-1 を基礎にしてもとめる。次に横軸で $\frac{1}{1+r}$ の点から、勾配 $-\frac{1}{C_j}$ の直線をひけばこの直線が (15) 式右辺の直線となり、BOD 除去速度線図とこの直線の交点から横軸に垂線をおろせばその値が第 1 段目曝気槽内 BOD となり、同様にして第 j 段目では v_{j-1} の点から、勾配 $-\frac{1}{C_j}$ の直線をひき、BOD 除去速度線図とこの直線の交点から横軸に垂線をおろせば、第 j 段目曝気槽内の BOD がもとまる

0 処理場の結果を表-3、また同様にして 8 処理場の結果を表-3 に示した。但し 8 処理場では MLSS をもとめなかつたので、各曝気槽の MLSS を返送汚泥から算定したところ、第 1 槽 MLSS = 3890 mg/g 、第 2 槽 2607 mg/g 、第 3 および、第 4 槽 1956 mg/g であった。以上、近似的に推定した値と実測値を比較すると、0 処理場、8 処理場ともほぼ一致しているといえよう。

5. 総括および結論

本研究では筆者等は活性汚泥法の浄化機構に関して回分試験、連続試験および現場調査をおこない、活性汚泥法の処理効率、特に BOD 除去率に影響をおよぼす因子

のうちに活性汚泥、曝気時間および曝気槽内の流体の混合状態を中心に検討した。この結果回分試

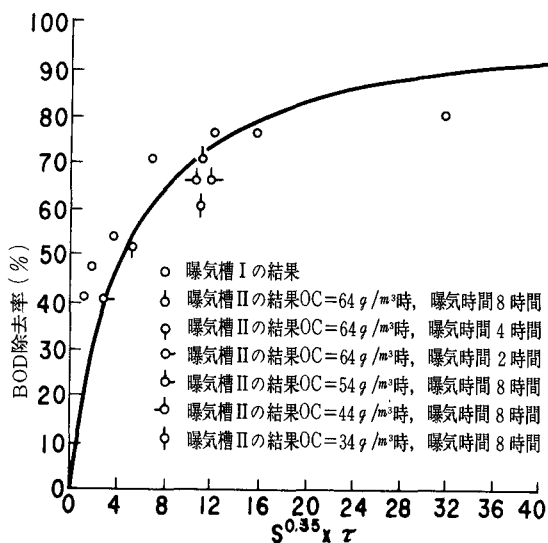


図-6 完全混合時のBOD除去率

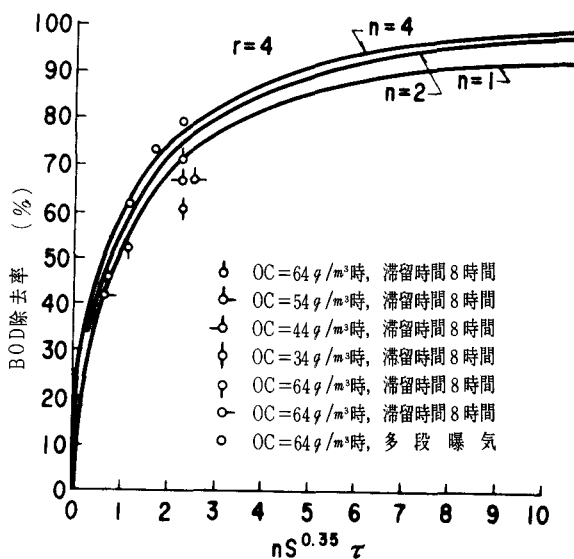


図-7 曝気槽 II のBOD除去率

験をおこなうことにより、単位時間当たりBODの除去をもとめ、曝気時間、MLSS量および曝気槽内流体の混合状態をすることにより近似的に流出水BODを推定できることがわかった。しかし、これまでのべた因子以外に曝気槽内の酸素、廃水の種類、PH、水温、界面活性剤およびその他各種の金属類などが活性汚泥中の微生物に与える影響は少ないといわれている。また参考文献には活性汚泥量として近似的にMLSS量を使つてあらわしたが、活性汚泥量をMLSS量を使つて示すことが場合によつては適当でないこともある。

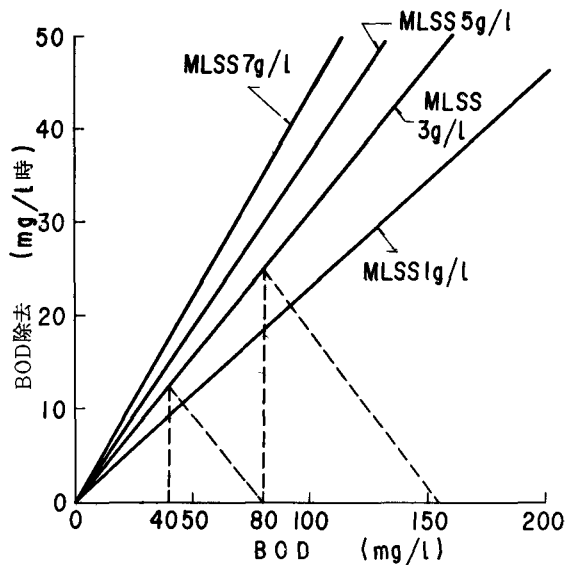


図-8 O処理場の推定BOD

活性汚泥法を使つて有機性廃水を処理する場合には好成績を期待できる半面、活性汚泥はそれ自体非常に複雑であり、かつまたデリケートな微生物の集合体であるから、その取扱いは細心の注意を払う必要があろう。

表-3 O処理場とS処理場の現場調査

	希釈水	脱離液	返送汚泥	空気量	第1段MLSS	第2段MLSS	第3段MLSS
	m ³ /日	m ³ /日	m ³ /日	m ³ /日	mg/l	mg/l	mg/l
O処理場	270	32	1000	14400	2636	2738	—
S処理場	3175	51	1132	39600	3890	2607	1956
	第4段MLSS	流入水BOD	第1段BOD	第2段BOD	第3段BOD	第4段BOD	放流水
	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
O処理場	—	660	80 61	40 43	—	—	45
S処理場	1956	147	40 —	51 —	55 —	41 —	31

ただし第1、2、3、および4段目BODの上段は推定値であり、下段は実測値である

参考文献

- (1) Eckenfelder W. and McCabe B. J. "Waste Treatment", pp156-187, Pergamon Press, (1960)
- (2) Hunken K.H. "Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft", Heft 4, Oldenbourg, (1960)
- (3) Keshavan K. et al, Proc. A. S. C. E., Sanitary Eng. Div. pp 99-126, (1964)
- (4) Martin E. J. and Washington D. R., Air and Water Pollution, vol 10, pp 343-356, (1966)
- (5) Washington D. R. et al., Air and Water Pollution, vol 10, pp357-383, (1966)
- (6) Monod J., Ann. Rev. Microbio., vol 3, pp 371-394, (1949)
- (7) Downing A. L. et al, J. Inst. Sew. Purif., pp 130-158, (1964)
- (8) Wilson I. S. "Advances in Water Pollution Research". pp27-59. Pergamon Press, (1964)
- (9) 矢木 榮, 宮内照勝, 化学工学、第19 卷, 507~517頁, (昭30),
- (10) 宮内照勝, 続新化工講座, 14, 28-36頁、日刊工業新聞社、(昭35)
- (11) Kramers H. and Westerterp K.R. "Elements of Chemical Reactor Design and Operation" pp 22-61, Netherland Univ. Press, (1963)
- (12) 松本順一郎、大沼正郎、第21回土木学会年次学術講演会講演概要第Ⅰ部、149-1~149-2 (昭41)
- (13) 松本順一郎、大沼正郎、第2回下水道研究会発表講演集、82~84頁、(昭40)
- (14) 松本順一郎、大沼正郎、第3回下水道研究発表会講演集、95-96頁、(昭41)