

散水ろ床の浄化機構に関する二・三の考察

東北大学工学部

松本 順一郎

東北学院大学工学部 ○ 長谷川 信夫

三枝工業

小林 浩志

1. 緒言

散水ろ床の浄化機構は生物性吸着および凝集と微生物による酸化がその支配因子であり¹⁾、汚水と微生物との接触時間が長くなるにつれてBOD除去が増加するとしてVelz²⁾あるいはHowland³⁾等による式が提唱されている。これらの式では反応速度定数は生物性吸着および凝集と酸化等をひっくるめた総括係数として示されており、排水の種類が異なると十分に表わしえず補正したりしなくてはならない欠点がある。それ故、筆者らは浄化に關係する因子をできるだけ分割して実験し、浄化能力(特にBOD除去)に及ぼす影響について論じた。すなわち、一般の散水ろ床では滞留時間は散水負荷とろ床深さによって定まり、滞留時間のみを独立させてBOD除去に及ぼす影響について調べることは不可能である。そこで筆者らはろ材として傾斜板を用いた散水ろ床を用いて滞留時間がBOD除去に及ぼす影響について実験し、更に生物膜の生化学的性質について調べ、それらから散水ろ床の浄化を示す式を導いた。

2. 実験装置および実験方法

実験装置の概略を図-1に示す。ろ材として巾350mm、長さ650mm、厚さ10mmの耐水性ペニヤ板を9枚直列に傾斜させて用い、各ペニヤ板の両端には10mmの角材をつけて汚水が系外に流出しないようにした。このろ床における散水負荷として、一般の散水ろ床とろ材表面積当りの負荷が同一になるような散水量を考えた。すなわち、ろ材の表面積を左合⁴⁾、長谷川⁵⁾の値を参考にして $70\text{ m}^2/\text{m}^3$ とし、ろ床深さを1.8mにとれば、ろ床におけるろ材の全表面積は $126\text{ m}^2/\text{m}^3$ 床面となる。本装置では

$$33 \times 60 \times 9 = 17,820\text{ cm}^2$$

となり、このろ床に $5\text{ cm}^3/\text{m}^2 \cdot \text{日}$ の散水負荷をかけるとする

$$\begin{aligned} & \text{と} \\ & 5 \times 10^6\text{ cm}^3/\text{m}^2 \cdot \text{日} \times \frac{17,820\text{ cm}^2}{1.26 \times 10^6\text{ cm}^2/\text{m}^2} = 70,700\text{ cm}^3/\text{日} \\ & \quad \quad \quad \div 50\text{ cm}^3/\text{min} \end{aligned}$$

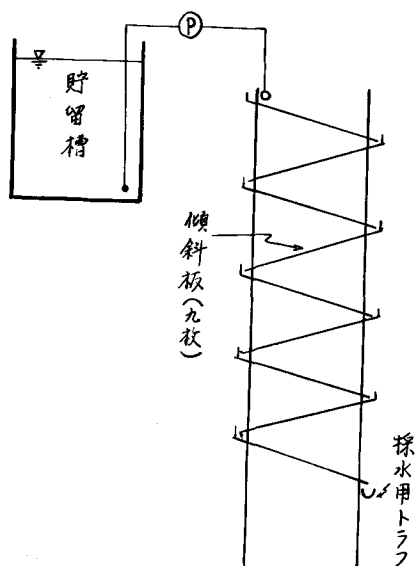


図-1 実験装置

となり、 $50\text{ cm}^3/\text{min}$ の散水量でよいことになる。

一般の散水ろ床では、滞留時間と散水負荷とは従属変数であるが、本装置では傾斜板の角度を変化させることによって独立変数になしえるので、散水負荷を一定にして滞留時間を変化させて実験する

ことができる。なお、排水としてし尿消化槽脱離液を水道水で適当に希釈して用いた。

3. 傾斜板ろ床の滞留時間

実験に用いたろ床における平均滞留時間を求めるために、飽和食塩水を用いて次のような実験を行なった。散水負荷を $7.5 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{日}$ と一定にして、飽和食塩水を $3 \sim 5 \text{ cm}^3$ 瞬時的にろ床流入水中に注加して、流出水中の塩素イオン濃度の時間的变化を測定した。これらの関係はろ材表面に生物膜が付着している場合としない場合とについて調べた。図-2～図-4にそれぞれの結果を示す。図-5には生物膜が付着している傾斜板の角度を変化させた場合の比較をまとめて示した。これからそれぞれの図表を求めて、注加時よりの時間をろ床における平均滞留時間とした。一般

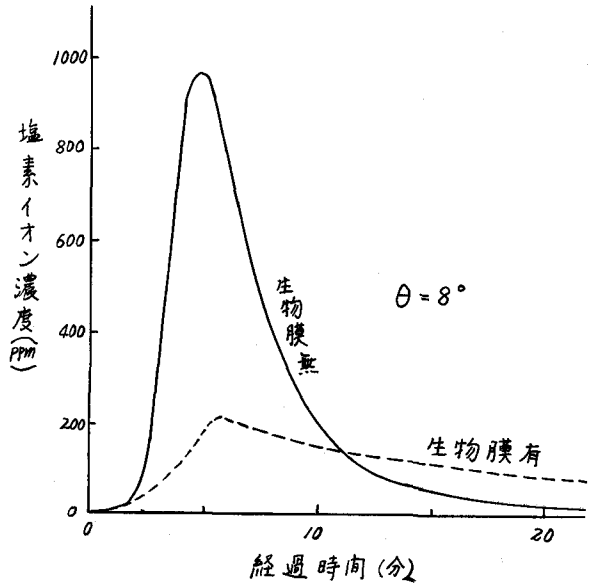


図-2 塩素イオンの時間的変動

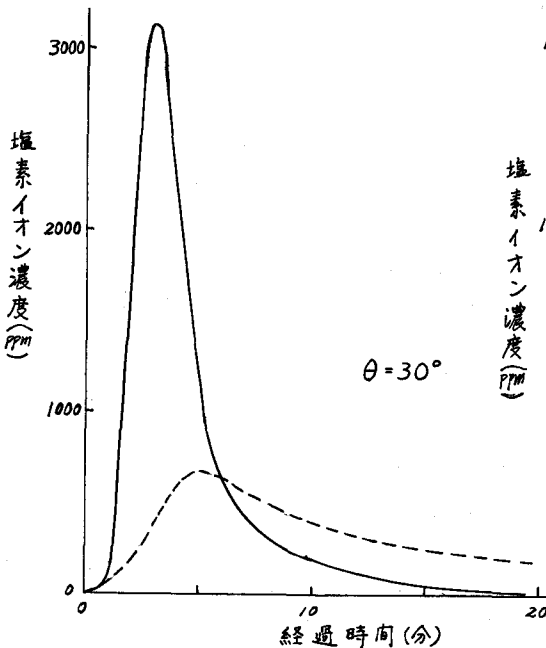


図-4 塩素イオンの時間的変動

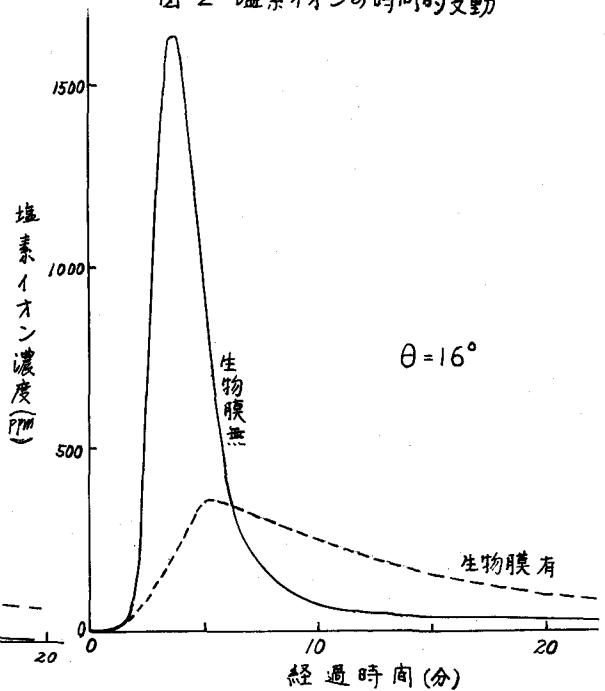


図-3 塩素イオンの時間的変動

の散水ろ床における平均滞留時間は散水負荷によって変動するのは勿論のこと各々の研究者によっても多くの差異があり一概には言えないように推察された。^{5) 6)} 更に、ろ材の径および種類等によって変化することも示されている⁷⁾。散水負荷が $7.5 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{日}$ 程度における平均滞留時間は $400 \sim 2,000 \text{ sec}$ と広い範囲に報告がなされている⁶⁾。

本実験では傾斜板の角度を $8^{\circ} \sim 30^{\circ}$ と変化させたが、それによって平均滞留時間は生物膜の付着している場合に、 $1230 \text{ sec} \sim 810 \text{ sec}$ と変化することが図-5に示されている。このように、傾斜板の角度を変えることによって、平均滞留時間を変えることができたのでこれらを中心に実験を行なった。

4. 平均滞留時間とBOD除去

平均滞留時間がBOD除去に及ぼす影響について調べるために、散水負荷を $7.5 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{日}$ 、BOD負荷を $0.4 \text{ kg}/\text{m}^2 \cdot \text{日}$ （流入BOD=100 ppm）と一定にして、傾斜板の角度のみを 8° 、 12° 、 16° 、 30° と変化させて実験した。実験結果を図-6に示す。図より、傾斜板の表面が粗

なことから、傾斜板の角度が小さい方が初期のBOD除去が良好な結果を示していることがわかる。しかし、経過日数の増加につれてBOD除去率は傾斜板の角度と無関係にほぼ一定となり、 $50 \sim 55\%$ を示すことが認められた。実験した範囲では、散水ろ床における平均滞留時間と無関係にBOD除去率が一定であることが示され、従来のBOD除去を示す式³⁾などと予言する結果がでた。本実験では平均滞留時間は装置の都合で広い

範囲に渡って取ることができなかったが、それでもBOD除去率は平均滞留時間だけで示されるのではなく他の因子も影響するものと推察される。次に、散水開始後53日目における生物膜の厚さを表-1に示す。なお、傾斜板の角度が 30° の場合は生物膜が脱落して測定不能であった。この表から、散水負荷 $7.5 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{日}$ 、BOD負荷 $0.4 \text{ kg}/\text{m}^2 \cdot \text{日}$ の時には傾斜板の角度が増加するにつれて生物膜の厚さは減少する傾向が若干見られるが、一般には $3 \sim 5 \text{ mm}$ であることが認められる。

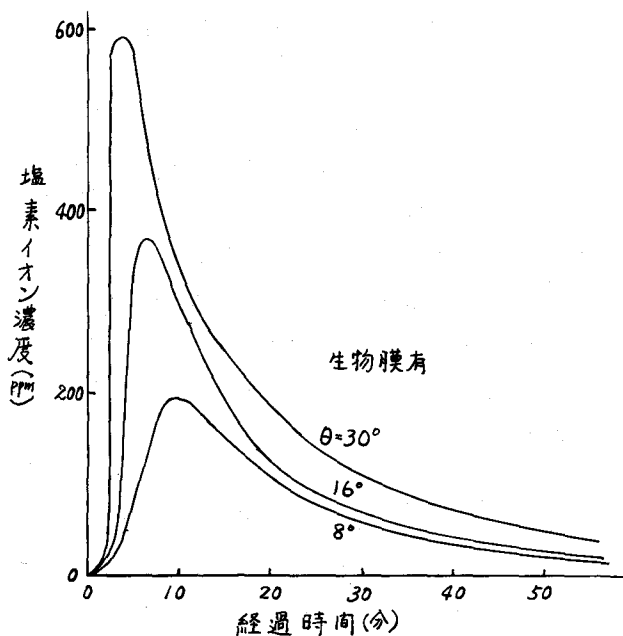


図-5 傾斜板の角度による滞留時間の変化

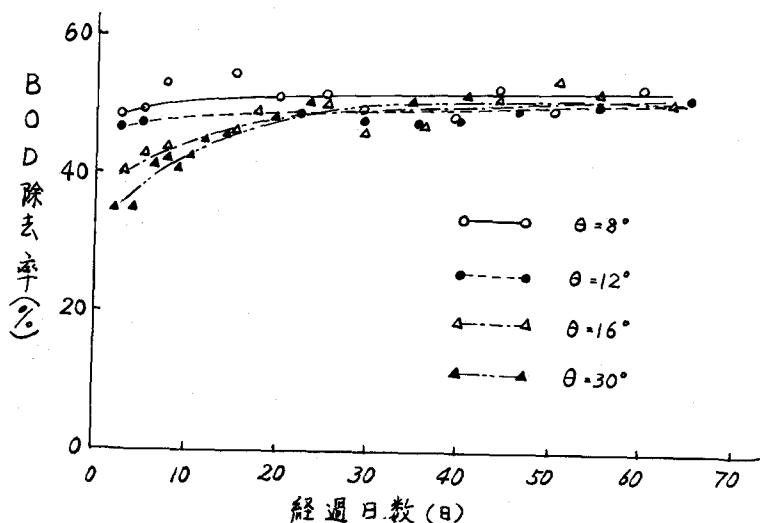


図-6 傾斜板の角度とBOD除去率との関係

5. BOD負荷とBOD除去

表-1 生物膜の厚さ

θ	ろ床上端からの距離 m				
	0.5	1.7	2.9	4.1	5.3
8°	4.1	5.0	4.6	3.5	3.3
12	4.5	4.8	4.1	4.1	3.3
16	4.9	5.3	2.9	2.8	2.7

前節の結果、傾斜板の角度はBOD除去に影響を及ぼさなかったため、 $\theta = 16^\circ$ と一定にして、散水負荷を $4.0 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{日}$ と $7.5 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{日}$ の場合について、BOD負荷を変化させてBOD除去について調べた。実験結果を図-7に示す。図より

散水負荷が 4.0 および $7.5 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{日}$ のいずれの場合も、BOD負荷が $0.5 \text{ kg}/\text{m}^2 \cdot \text{日}$ 以下ではBOD除去率は70% および60%程度とほぼ一定の値を示すが、BOD負荷がそれ以上に増加するとBOD除去率は逆に減少する傾向を示すことが認められる。このような傾向は一般によく認められてお

り、現在まで多くの研究者達^{2) 4) 5) 6)} によって限界BOD負荷と称されている。すなわち、散水ろ床のろ材単位体積当りのろ材によって除去されるBODの量には限度があり、その限度内にBOD負荷があればBOD除去率はほぼ一定であり、その限界を超えたと除去率は減少する。限界BOD負荷について、標準散水ろ床では $0.1 \sim 0.15$, $0.175 \text{ kg}/\text{m}^2 \cdot \text{日}$ 、高速散水ろ床では 1.2 , 1.8 , 2.0 , $2.8 \text{ kg}/\text{m}^2 \cdot \text{日}$ であると報告されている例を示した^{5) 6)}。これらから、限界BOD負荷に大きな差がみられることから、限界の除去BOD量にも差があることが推察される。図-7から、BOD負荷とBOD除去量との

関係を導き図-8に示す。図-8より、BOD負荷の増加につれてBOD除去量は増加して行くが、BOD負荷が $0.6 \text{ kg}/\text{m}^2 \cdot \text{日}$ を超えたとBOD除去量はかえって減少する傾向もみられ、限界BOD負荷的傾向を示すことがわかる。ところが散水負荷が異なるとBOD除去量に差を生じ、ろ床の単位体積

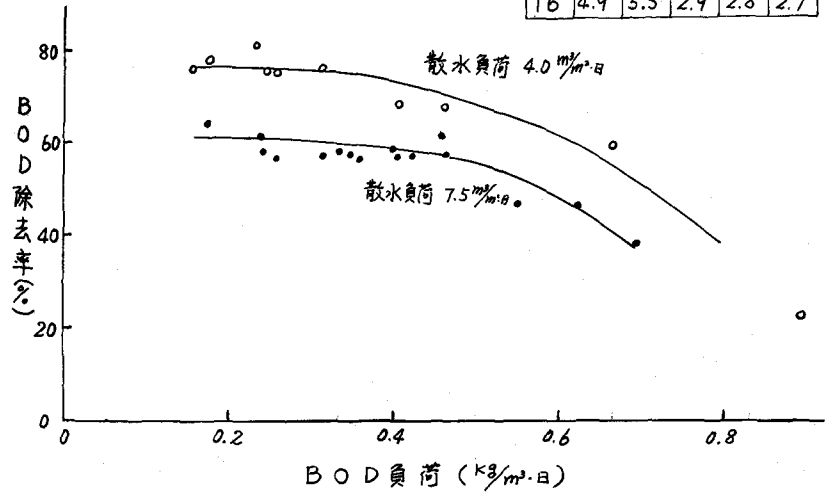


図-7 BOD負荷とBOD除去との関係

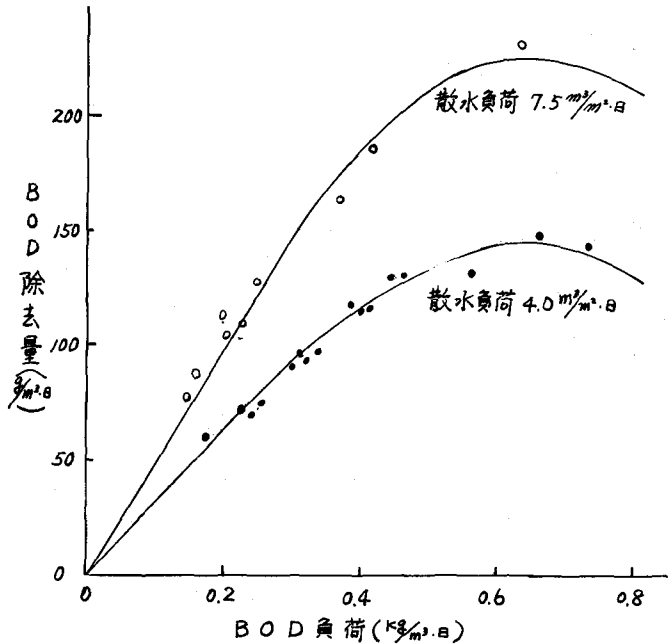


図-8 BOD負荷とBOD除去量との関係

当りのろ材によって除去されるBODの量には限度があるという仮説と予備を生ずることがわかる。このように限界BOD負荷およびBOD除去量は、散水負荷すなわちろ床における滞留時間により、排水の種類・濃度等によって異なることが予想され、後述するように、ろ床で除去されるBOD成分を細分して各々の除去から考察する必要があると推察される。

6. 生物膜とBOD除去

散水ろ床の生物膜の生物活性について調べるために、生物膜中のDNAと生物膜の酸素消費速度を測定した。まず、DNAの測定はSchneider法⁹⁾を基本として用い、ジフェニルアミンによるペントース部分の呈色反応によった。散水負荷およびBOD負荷等がDNA量にどのような影響を与えるかについて調べた結果を表-2に示す。表より、実験した範囲の負荷では、DNA量は900~1200 mg/L生物膜と負荷とほぼ無関係に一定であろうと推察された。金子¹⁰⁾は活性汚泥中の核酸量を名古屋市中心として調査しDNA/VSS=1.2~2.4%程度と報告しており、本実験ではろ材表面積1㎡当りの乾燥重量は750g程度、そのうち灰分が28%、生物膜の厚さが5mm程度であったので、生物膜中の揮発性物質は、

$$VSS = \frac{750g}{10000cm^2} \times \frac{1}{0.5cm} \times (1-0.28) \\ = 108g/L$$

となり、DNA/VSS=0.8~1.1%程度であることが知れる。これらから、活性汚泥および生物膜における核酸量には大差のないことが推察された。

次に、生物膜の重量について測定した結果を表-3に示す。なお、この場合の散水負荷は7.5 m³/m²・日、BOD負荷は0.42 kg/m²・日、傾斜板の角度は30°であった。

表-3 生物膜の重量と灰分

ろ床上端からの長さ m	乾燥重量 g/m ²	灰分 %
0.5	751	28.0
1.5	769	28.5
3.5	638	25.2
5.0	498	27.5

表-2 負荷とDNA量

θ	散水負荷 m ³ /m ² ・日	BOD負荷 kg/m ² ・日	ろ床上端からの長さ m	DNA mg/L
8°	7.5	0.42	1.6	933
8°	7.5	0.42	2.8	930
12°	7.5	0.42	1.6	930
16°	7.5	0.42	2.8	915
16°	4.0	0.22	2.8	995
16°	4.0	0.22	4.0	996
16°	4.0	0.39	2.8	1180
16°	4.0	0.39	4.0	1060
16°	4.0	1.54	2.8	1230
16°	4.0	1.54	4.0	1160

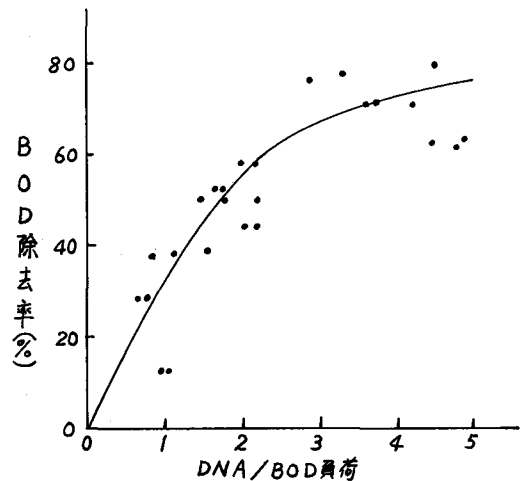


図-9 DNA/BOD負荷とBOD除去率との関係。

BOD負荷に対するDNAの比がBOD除去率に及ぼす影響について調べた結果を図-9に示す。図-9より、DNA/BOD負荷をこれらBOD除去率との間に相関関係があることが示される。唯、この関係が如何なる意味を持つかについては未だ不明である。

生物膜の酸素利用速度を測定するため、ワールフルス検圧計を用いて実験した。本実験ではろ床に

堆積している汚泥といわゆる生物膜とを分離することは不可能なので、汚泥を含めて試料を採取した。試料はホモジナイズして1ccを使用した。実験の水温は20°C, 振巾を6cm, 振盪数を80rpmとして行なった。その結果 $0.26 \text{ mg O}_2 / \text{cm}^2 \cdot \text{hr}$ の酸素利用速度がえられた。長谷川¹¹⁾が回転円筒式散水ろ床を用いて測定したところ $0.37 \text{ mg O}_2 / \text{cm}^2 \cdot \text{hr}$ となり類似の酸素利用速度であることがわかった。一方、活性汚泥の酸素利用速度はほぼ $10 \sim 20 \text{ mg O}_2 / \text{cm}^2 \cdot \text{hr}$ であり、筆者らの実験から散水ろ床における酸素利用速度は活性汚泥のそれに比して著しく小さいことが推論される。なお、生物膜における生物化学的酸化のために消費される酸素がこのような実験から求められると推察されよう。

7. 考察

一連の実験を通して次のような考察がえられた。

a) 散水負荷 $7.5 \text{ m}^3 / \text{m}^2 \cdot \text{日}$, BOD負荷 $0.42 \text{ kg} / \text{m}^2 \cdot \text{日}$ と一定にして、傾斜板の角度を変化させ滞留時間を影響因子として実験した結果、BOD除去率はほぼ一定で50~55%であったことから、次のような考察をした。散水ろ床の浄化機構について考察する時、従来の式ではBOD除去が滞留時間すなわち微生物との反応時間のみに関係すると考えているが、ろ床における流れの生物膜へのせん断力等に伴うBODの除去のような物理的因子をBOD除去の機構を示す式に導入する必要があると思われる。

b) 散水負荷を4.0および $7.5 \text{ m}^3 / \text{m}^2 \cdot \text{日}$ とし、BOD負荷がBOD除去に及ぼす影響について調べたところ、限界BOD負荷は $0.6 \text{ kg} / \text{m}^2 \cdot \text{日}$ 程度であったが、単位体積当りのろ材によって除去されるBOD量には限度があると言われていた考え方に予備するよう、散水負荷が $4.0 \text{ m}^3 / \text{m}^2 \cdot \text{日}$ ではBOD除去量は $150 \text{ g} / \text{m}^2 \cdot \text{日}$, $7.5 \text{ m}^3 / \text{m}^2 \cdot \text{日}$ では $220 \text{ g} / \text{m}^2 \cdot \text{日}$ と大きな違いのあることが示された。それ故、BOD成分を生物的凝集によって減少するものと生物学的酸化によって減少するものとに分けて考えていく必要があると思われる。

c) 散水ろ床における生物膜中のDNA量は $900 \sim 1200 \text{ mg} / \text{L}$ と活性汚泥に比して大差がないが、しかし、生物膜における酸素利用速度は $0.26 \sim 0.37 \text{ mg O}_2 / \text{cm}^2 \cdot \text{hr}$ 程度と活性汚泥に比して小さいことが認められた。

8. BOD除去に関する式の誘導

式を誘導するに当たって、7で述べた事を基にして次のような考え方をした。

a) ろ床で除去されるBOD成分を生物的凝集によるものと生物学的酸化によるものとに区分する。凝集と酸化によるBOD成分のそれぞれの減少速度は残存量に比例するものとする。但し、残存量が多い時(限界BOD量以上のBOD量の時)には減少速度は一定とし、この時の残存量の限界値を限界負荷と称する。

b) ろ材の種類・形等に起因して、生物膜のせん断力・滞留時間等に影響を及ぼす因子を考え、これはBODの減少速度に無関係に一定であると考える。

以上の仮説にもとずいて式を導くと、

L: ろ床で除去されるBOD

L_1 : 生物的凝集によって減少するBOD

L_2 : 生物学的酸化によって減少するBOD

L_0, L_{01}, L_{02} : 各々限界負荷におけるBOD

t : 時間

K_1, K_2, K_3 : 定数

1) $L_1 > L_{01}, L_2 > L_{02}$

$$\frac{dL}{dt} = -K_1 L_{01} - K_2 L_{02} - K_3 \dots\dots (1)$$

$$L = -(K_1 L_{01} + K_2 L_{02} + K_3)t + C \dots\dots (2)$$

$$t=0 \text{ の時 } L = L'$$

$$\therefore L = -(K_1 L_{01} + K_2 L_{02} + K_3)t + L' \dots\dots (3)$$

2) $L_1 > L_{01}, L_2 \leq L_{02}$

$$\frac{dL}{dt} = -K_1 L_{01} - K_2 L_2 - K_3 \dots\dots (4)$$

$$L = \exp(-\int K_2 dt) \left\{ \int (-K_1 L_{01} - K_3) \exp(\int K_2 dt) dt + C \right\} \dots\dots (5)$$

$$t=0 \text{ の時 } L = L'$$

$$L = \exp(-K_2 t) \left\{ L' - \frac{K_1 L_{01} + K_3}{K_2} [1 - \exp(K_2 t)] \right\} \dots\dots (6)$$

3) $L_1 \leq L_{01}, L_2 > L_{02}$

$$\frac{dL}{dt} = -K_1 L_1 - K_2 L_{02} - K_3 \dots\dots (7)$$

$$L = \exp(-\int K_1 dt) \left\{ \int (-K_2 L_{02} - K_3) \exp(\int K_1 dt) dt + C \right\} \dots\dots (8)$$

$$t=0 \text{ の時 } L = L'$$

$$L = \exp(-K_1 t) \left\{ L' - \frac{K_2 L_{02} + K_3}{K_1} [1 - \exp(K_1 t)] \right\} \dots\dots (9)$$

4) $L_1 \leq L_{01}, L_2 \leq L_{02}$

$$\frac{dL}{dt} = -K_1 L_1 - K_2 L_2 - K_3 \dots\dots (10)$$

$$L_1 + L_2 = L, L_1 + \alpha L_1 = L \text{ とする (10) の式は}$$

$$\frac{dL}{dt} = -(K_1 + \alpha K_2)L - K_3 \dots\dots (11)$$

$$L = \exp(-\int (K_1 + \alpha K_2) dt) \left\{ \int (-K_3) \exp(\int (K_1 + \alpha K_2) dt) dt + C \right\} \dots\dots (12)$$

$$t=0 \text{ の時 } L = L'$$

$$L = \exp[-(K_1 + \alpha K_2)t] \left\{ L' - \frac{K_3}{K_1 + \alpha K_2} [1 - \exp(K_1 + \alpha K_2)t] \right\} \dots\dots (13)$$

以上の式の導出により, (3), (6), (9), および (13) 式を得た。従来のBOD除去に関する式は(13)式において $K_3=0$, $K_1 + \alpha K_2 = K$ とした場合に当たる。

参考文献

1. Eckmelfelder W.W and O'Connor D.J. "廃水の生物学的処理" 岩井重久訳 コロナ社

2. Vely C.J. "A Basic Law for the Performance of Biological Filters, S.W.J. Vol.20 pp 607~617 (1948)
3. Howland W.E. "Flow over Porous Media as in a Trickling Filters" 12th Ind. Waste Conf. Purdue Univ pp 435~465 (1958)
4. 左合正雄 "散水汙床の基本問題に関する実験的研究【I】" 水協誌 239号 (昭和29年)
5. 長谷川信夫, 松本順一郎 "散水ろ床に関する実験的研究" 土木学会論文集 106号 pp 7~14 (昭和39年)
6. 長谷川信夫, 松本順一郎 "散水ろ床の機能について" 水処理技術 Vol 7, NO. 4 pp 29~46 (1966)
7. 左合正雄, 森野 "散水汙床の限界BODに関する実験的研究" 才5回下水道研究発表会講演集 pp 192~194 (昭和43年)
8. Schulze K.L. "Trickling Filter Theory" W.S.W Vol 32. pp 100~103. (1960)
9. 三浦義彰他 "核酸の定量的検出法" 蛋白質・核酸・酵素 Vol 11. pp 424~
10. 金子光美他 "活性汚泥中の核酸量(才二報)" 才4回下水道研究発表会講演集 pp 103~105 (昭和42年)