

(7) 散水汙床生物膜の増殖に及ぼす温度の影響

足利工業大学 本田 善則

1 はじめに

下水の生物学的処理法の一つである散水汙床では、汙材表面に形成される生物膜によって下水の浄化が行われる。そこで、汙床の浄化機構を調べたり、汙床設計を行う上で、この生物膜の増殖特性を知ることが必要である。特に、生物膜は冬季に多く、夏季には少なくなると云われており、増殖に及ぼす温度の影響は大きいと考えられ、これらの関係を知ることは重要である。

ここでは、散水開始後からの生物膜の増殖に及ぼす温度の影響について実験・研究したことを報告する。すなわち温度が異なる場合の生物膜の増殖状況、BOD除去量および流出SS量を調べ、これらより生物膜転換率と自己酸化係数を求めて比較検討する。また、実験結果を基にして、生物膜の増殖式を導びき、増殖容量と増殖速度について温度の影響を考察する。

2 生物膜の増殖機構

生物膜の増殖に関連する因子として温度、散水量および有機物負荷が考えられる。温度については微生物学的活動の変化^{1),2),3)}とgrazersの活動変化^{4),5),6)}があり、Shephard et al.⁷⁾は前者が主であり、後者はこれを補うものであるとまとめている。また、散水量について流下水の洗い流し、すなわち剪断効果があり、^{7),8)} Hawkes et al.⁹⁾は散水強度を大きくすると、冬季における生物膜増加を制限できると報告している。有機物負荷の違いについては、Schulze¹⁰⁾は負荷が大きい場合、より多くの生物膜が蓄積すると述べている。

下水中の有機物が生物膜によって除去されると、この除去された有機物の一部は微生物の細胞に合成され、生物膜に転換される。また、生物膜は自己酸化によって減少し、さらに流下水の剪断によって一部減ぜられる。すなわち、汙材上での生物膜の増殖量は除去有機物の生物膜転換量から、自己酸化量と剪断量を差引いたものとなる。これらの関係を図1に示す。除去有機物量は下水の性質、濃度および散水量の負荷条件と、汙床高さや汙材表面積等の汙床の除去能力に関係する。温度はそれぞれの過程に影響する。図1の関係をまとめると、生物膜の増殖は次式で表わせる。

$$\frac{dX}{dT} = a \cdot \frac{dS}{dT} - b \cdot X - \frac{dC}{dT} \quad \cdots \cdots (1)$$

- ここで、X＝生物膜重量（乾燥 g）
- S＝除去有機物量（BOD g）
- C＝流下水による生物膜の剪断量（流出SS g）
- a＝生物膜転換率
- b＝生物膜の自己酸化係数（日⁻¹）
- T＝時間（日）

なお、図1に示すように生物膜を減少させる因子として、grazersの活動があるが、式（1）では考慮に入れず、本実験においては汙床バエの幼虫等の発生を防いだ。

3 実験装置および方法

実験は温度変化±1℃の恒温室で、温度条件として5℃、20℃および30℃の三種類について行った。実験装置を図2に示す。汙材は径約2.6cmのセメントモルタル球を使用し、実験汙床は汙材10個を針金で一列に連ねたものが3段で、合計の汙材数を30個とした。

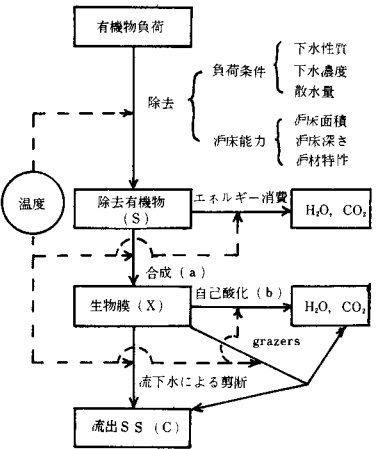


図1 散水汙床生物膜の増殖機構

表1 合成下水原液組成

A 液 (g/ℓ)	
グルコース	50.0
グルタミン酸ソーダ	50.0
塩化ナトリウム	5.0
塩化カルシウム	2.5
硫酸マグネシウム	1.7
B 液 (g/ℓ)	
リン酸1カリウム	14.30
リン酸2カリウム	90.15

流入水は表 1 に示す合成下水原液 A と B を水道水 1 ℓ に対し、それぞれ 2 ml と 1 ml の割合で希釈し、BOD 140 ㎍とした。下水は流入水槽からマイクロチューブポンプで汚床に送り、散水量は 6 ml/分で行った。20℃では 3.5 ml/分の場合についても実験した。ここで、本実験汚床に対する散水量 1 ml/分は、実際汚床での散水負荷約 2 m²/m²・日に相当するものと考えられる。流入水は 5℃で 1 日 1 回、20℃と 30℃では 1 日 2 回入替え、マイクロチューブはそれぞれの実験で 1 日 1 回取り替えた。

生物膜の乾燥重量は、散水開始後から定期的に湿潤重量を測定し、実験終了時での湿潤重量に対する乾燥重量の比を、それぞれの時点の湿潤重量に乗じて求めた。ここで、生物膜の湿潤重量に対する乾燥重量の比は、実験期間中変化しないものと仮定した。それぞれの時点での湿潤重量の測定は、散水を止めて 10 分間後に行った。

4 実験結果および考察

散水開始後からの生物膜乾燥重量 (g)、BOD 除去量 (g/日) および流出 SS 量 (g/日) の経日変化を図 3 と図 4 に示す。

4-1 生物膜増殖状況

生物膜の増殖について Tomlinson⁴⁾ と Solbé et al.¹¹⁾ はラグ期を経た後、一定量づつ増加する、また 桑原等¹²⁾ は初め漸増し、その後一定状態になると報告している。図 3 と 4 では、生物膜重量は一般に散水開始後ゆるやかに増加し、その後急速に増加し始め、最終的には一定となる傾向を示している。生物膜の増殖をラグ期、増殖期および定常期に分けることができると考えられる。ラグ期間 (T₀) は 30℃の 3 日から 5℃の 52 日まで、低温ほど長くなり、またラグ期間内での蓄積量 (X₀) も低温ほど大きくなった。これらの値を表 2 にまとめる。生物膜重量の増加割合は温度が高い方

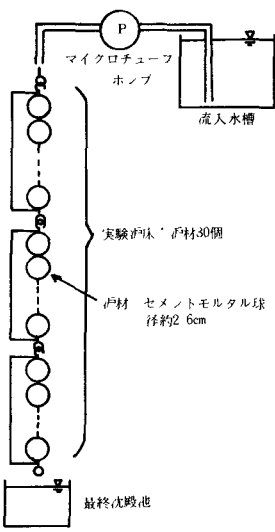


図 2 実験装置

表 2 T₀ と X₀

温度 (℃)	散水量 (ml/分)	T ₀ (日)	X ₀ (g)
5	6	52	3.358
20	6	8	2.196
	3.5	8	1.402
30	6	3	0.652

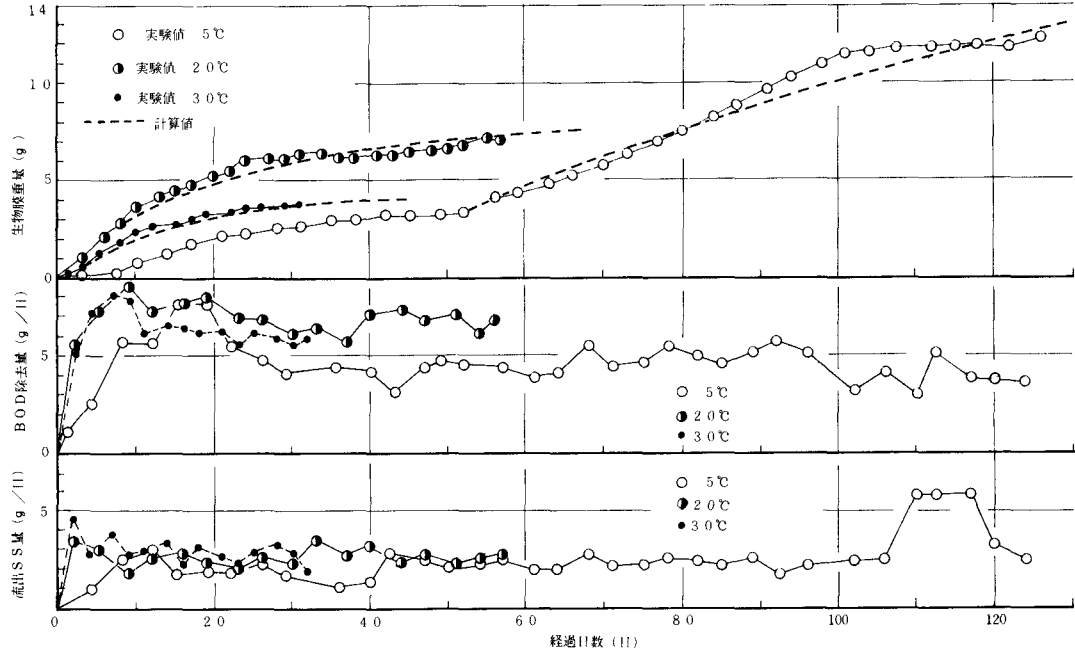


図 3 生物膜重量、BOD 除去量および流出 SS 量の経日変化 (散水量 6 ml/分の場合)

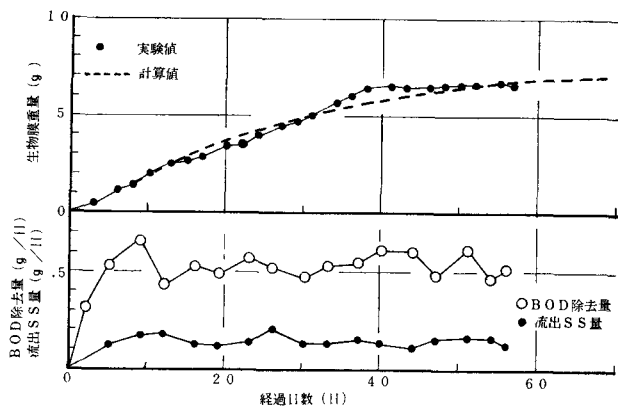


図4 生物膜重量、BOD除去量、流出SS量の経日変化(3.5 ml/分)

が大きく、早く定常状態に達した。一方、増殖量は低温ほど大きくなった。

実験終了時における生物膜の湿潤重量に対する乾燥重量の比を、汙床上部から汙材10個づつをまとめて、上段、中段および下段について測定した。乾燥重量比は上段ほど大きくなった。汙床全体での平均値については図5に示す。乾燥重量比は温度が高くなるほど、大きくなった。つぎに、生物膜の乾燥重量に対する強熱減量比についても同様の測定を行ったが、汙床深さ別に関しては一定の傾向が見られなかった。図5に示す汙床全体での平均強熱減量比は5℃の場合が他の温度の場合に比べて大きくなった。

4-2 BOD除去量

本実験で用いた合成下水は放置しておくと、BOD濃度が低下し、特に高温の場合は著しくなる。図6は30℃の場合における下水入替え後から次の入替え時点までの流入水と流出水のBOD濃度の変化を示したものである。入替え6時間後から流入水と流出水ともに低下し始めた。BODの定期的測定は入替え4時間(13時)前後で行っており、この値を用いたBOD除去量は図6に示される四辺形ABCDで表わされる。しかし、実際の除去量は斜線部分であるために、これらの面積比を計算して、除去量を補正した。この補正係数は0.965であった。なお、5℃の場合は下水入替えから次の入替えまで流入水の変化はなく、また20℃では入替え14から16時間後、すなわち時刻9時の入替え前に若干低下したが、補正の必要はなかった。

図3と図4にそれぞれの温度条件でのBOD除去量の経日変化を示す。BOD除去量は散水開始後、生物膜の発生とともに急増し、生物膜が増殖期に入る前後で低下し、その後は若干変動はあるが、ほぼ一定となった。散水開始後から、生物膜が発生し汙材全体を被う時点までは、流下水は生物膜表面全体をつつで流れていた。しかし、生物膜がさらに増加すると、流下水は生物膜表面全体をつつで流れず、筋状になって流れており、流下水の接触面積はほぼ一定と推察された。本実験で用いた球形汙材では生物膜が増加すると、この表面積も増加するわけであるが、BOD除去量は生物膜表面と流下水の接触面積によって支配されると考えると、上記のことから除去量の初期での増加と増殖期での一定

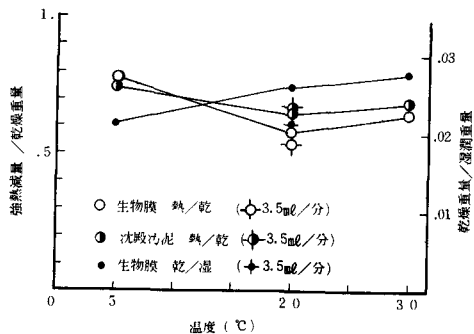


図5 生物膜および沈殿汚泥の乾燥重量に対する強熱減量比と生物膜の湿潤重量に対する乾燥重量比

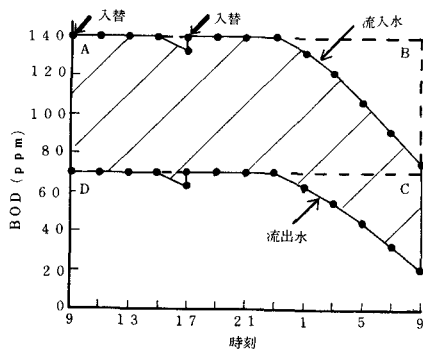


図6 BOD除去量の補正(30℃)

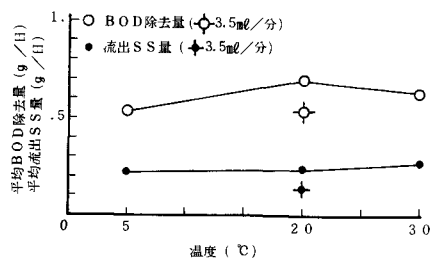


図7 平均BOD除去量と平均流出SS量に及ぼす温度の影響

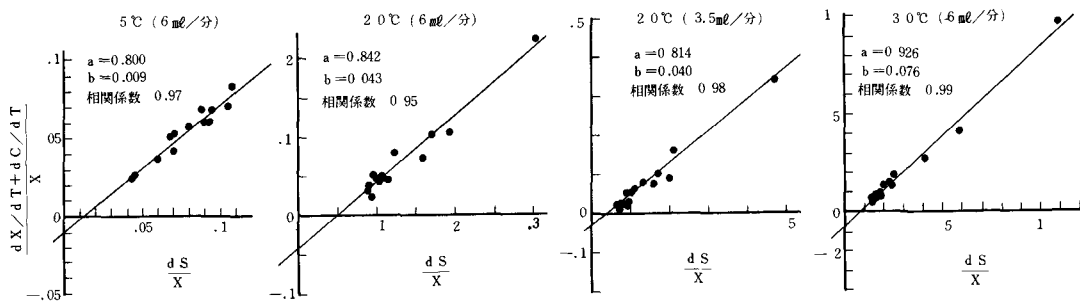


図8 生物膜転換率（a）と自己酸化係数（b）の決定

状態を説明できる。なお、生物膜自身は増加すると、横方向へ拡がり、また生物膜内部では水および有機物の移動があるから、下水が流れていない部分でも増殖できる。

生物膜の増殖期でのBOD除去量の平均値を図7に示す。5℃から20℃まで大きくなり、30℃で低下した。従来より温度が高くなると、除去率は高くなると云われているが、30℃では流出水が時々黒くなっており、生物膜底部での嫌氣的分解が進んでいるためと推察される。20℃において散水量が6 ml/分の場合は3.5 ml/分の場合に比べると、散水量で1.71倍であったが、除去量で1.29倍であり、除去量は負荷量に比例しなかった。

4-3 流出SS量

図3と図4に示される汙床流出水のSS量（g/日）は、5℃の場合の110日から120日目にかけての増加を除くと、生物膜の増殖期ではほぼ一定であった。BOD除去量の場合と同様に、流下水と生物膜表面との接触面積が一定であると考ええると、上記のことが説明できる。

流出SS量の平均値を図7に示す。温度が高くなるほど、大きくなっており、高温では生物膜がより剪断されやすくなるものと考えられる。また、20℃において散水量が6 ml/分の場合は3.5 ml/分の場合に比べると、散水量で1.71倍で、流出SS量で1.78倍であり、流出SS量は散水量に比例していた。

図5に沈殿汚泥の乾燥重量に対する強熱減量比を示す。強熱減量比は温度変化に対し生物膜の場合と同じ傾向を示していた。流出水中のSおよび最終沈殿池汚泥は、流下水によって生物膜の一部が剪断されたものと考えられる。

4-4 生物膜転換率と自己酸化係数

式（1）を変形すると、

$$\frac{dX/dT + dC/dT}{X} = a \cdot \frac{dS/dT}{X} - b \quad \dots\dots\dots (2)$$

となる。すなわち、 $(dS/dT)/X$ を横軸に、 $\{(dX/dT) + (dC/dT)\}/X$ を縦軸にプロットした際、得られた直線の勾配と切片として、生物膜転換率（a）と自己酸化係数（b）がそれぞれ決定される。温度条件が異なる場合の実験結果を図8に示す。aとbは最小2乗法を用いて決定したが、相関係数はすべての場合0.95以上であり、プロットの直線性が支持された。

aとbの値を温度に対して比較したものが図9である。aは温度が高くなるほど、大きくなった。活性汚泥法では、汚泥転換率（あるいは収率係数）に及ぼす温度の影響について、15℃付近で若干大きく他ではほぼ一定¹³⁾、20℃で最大¹⁴⁾、また4℃～20℃では一定で31℃になると低下する¹⁵⁾などの研究がある。aについてはさらに他の温度条件での実験が必要である。bは温度が高くなるほど大きくなった。20℃の温度条件で散水量が異なる場合のaとbの値は、ほとんど同じであった。同一下水の場合、負荷条

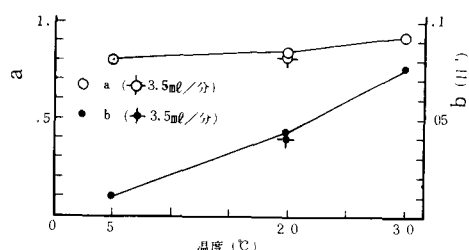


図9 aとbに及ぼす温度の影響

件が異なっても、同一温度では a と b は同じ値になることが予想される。

5 生物膜増殖式の展開

5-1 生物膜増殖式

本実験では、増殖期においてBOD除去量と流出SS量はほぼ一定という結果が得られた。ここで、生物膜の増殖期において $dS/dT = \text{一定} = \Delta S$ (g/日)、 $dC/dT = \text{一定} = \Delta C$ (g/日) と仮定すると、式(1)は次のようになる。

$$\frac{dX}{dT} = a \cdot \Delta S - b \cdot X - \Delta C \quad \dots\dots\dots (3)$$

式(3)を $T = T_0$ (ラグ期間 日) で $X = X_0$ (ラグ期間内で蓄積した生物膜量 g) として、積分すると、

$$X = \frac{a \cdot \Delta S - \Delta C}{b} \left\{ 1 - e^{-b(T-T_0)} \right\} + X_0 \cdot e^{-b(T-T_0)} \quad \dots\dots\dots (4)$$

となり、増殖期における生物膜の増殖を表わす式が得られる。

表2、図7および図9の値を用いて、式(4)により計算した結果を図3と図4の点線で示す。実験値と良く一致しており、式(4)により生物膜の増殖を説明できると考えられる。

5-2 増殖容量

式(4)において T すなわち経過日数を大きくすると、 $e^{-b(T-T_0)}$ は0に近づき、定常期における生物膜重量は次の式となる。

$$G_c = \frac{a \cdot \Delta S - \Delta C}{b} \quad \dots\dots\dots (5)$$

G_c (g) は下水濃度と散水量による負荷条件、汙床面積、汙床高さおよび汙材特性による汙床の除去能力、また温度条件が与えられると、汙床内で生物膜が増殖できる最大量となる。ここで、この G_c を増殖容量と定義する。実際の汙床では春に脱落が良く観察されるが、これは生物膜の蓄積量が大きくなり、生物膜底部での嫌気的分解やgrazersの活動により、生物膜が汙材によって支えきれなくなり、脱落するものである。そこで、 G_c が大きい場合には、汙材による生物膜の支持限界量との関係¹⁶⁾で、実際には G_c を求めることができない場合がある。

図10に温度が変化した場合の G_c の値を示す。温度が低くなるほど、大きくなった。すなわち、冬季で生物膜が増大することがわかる。これは特に、 b が低温で小さくなるためである。

5-3 増殖速度

式(4)によれば、生物膜の増殖速度は増殖期に入った時点で最大で、その後減少してゆき、定常期で0になる。各種の条件における増殖速度を比較するために、増殖期に入った時点での速度と増殖容量の1/2になった時点での速度について検討する。これらを初期増殖速度(ΔX_0 、g/日)および平均増殖速度(ΔX_m)と定義する。

ΔX_0 は式(3)に $T = T_0$ で $X = X_0$ を代入することにより求まる。

$$\left(\frac{dX}{dT} \right)_{T=T_0} = \Delta X_0 = a \cdot \Delta S - b \cdot X_0 - \Delta C \quad \dots\dots (5)$$

図11に ΔX_0 と温度との関係を示す。 ΔX_0 は温度が高くなるほど大きくなった。つぎに、 ΔX_m は式(3)において、 $X = G_c/2$ を代入することにより求まる。

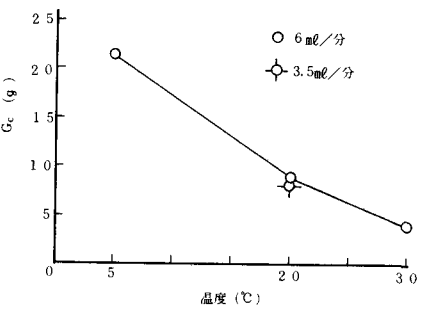


図10 増殖容量に及ぼす温度の影響

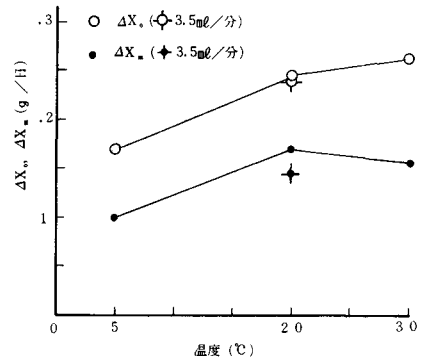


図11 増殖速度に及ぼす温度の影響

$$\left(\frac{dX}{dT}\right)_{X=G_c/2} = \Delta X_m = \frac{a \cdot \Delta S - \Delta C}{2} \quad \dots\dots\dots (6)$$

図11に ΔX_m と温度との関係を示す。 ΔX_m は20℃で最大になった。 ΔX_m については、BOD除去量と流出SS量に関係し、20℃ではBOD除去量が大きくなること、30℃では流出SS量が大きくなることによる。

以上のことから、生物膜は低温では増殖速度は小さく、増殖はゆるやかであるが、増殖量は大きくなる。逆に、高温では増殖速度は大きい、早く定常期に達し、増殖量は小さくなる。

6 まとめ

散水開始後からの生物膜の増殖に及ぼす温度の影響について実験・研究した結果、次の結論が得られた。

- (1) 散水汙床生物膜の増殖は、増殖期でのBOD除去量と流出SS量を一定と仮定することにより、式(4)で説明できる。
- (2) 増殖速度は高温の方が大きくなるが、より早く定常期に達する。
- (3) 生物膜の増殖量は低温ほど大きくなるが、これは生物膜自己酸化係数の低温での減少による。

なお、ここでは5℃、20℃および30℃の温度についてだけ検討したが、10℃、15℃および25℃などの他の温度についても実験を行う予定である。

謝辞：本研究は東北大学教授松本順一郎先生の御指導を受けているものであり、深謝の意を表します。また、実験に御協力いただいた本学助手 中山隆男君、本学土木工学科学生石井高司君、石井康宏君および川島丈代君に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) Holtje, R. H.: Sewage Works J., 15, pp. 14—29, 1943
- 2) Heukelekian, H.: Sewage Works J., 17, pp. 23—38, 1945
- 3) Cooke, W. B. and Hirsch, A.: Sewage and Industrial Wastes, 30, pp. 138—156, 1958
- 4) Tomlinson, T. G.: J. Inst. Sew. Purif., (1), pp. 168—183, 1946
- 5) Lloyd, L.: J. Inst. Sew. Purif., (2), pp. 119—139, 1945
- 6) Reynoldson, T. D.: J. Inst. Sew. Purif., (1), pp. 158—172, 1939
- 7) Shephard, M. R. N., Biol. M. I. and Hawkes, H. A.: W. P. C., Vol. 75, pp. 58—72, 1972
- 8) Hawkes, H. A.: Int. J. A. W. P., Vol. 9, pp. 693—714, 1965
- 9) Hawkes, H. A. and Shephard, M. R. N.: Water Research, Vol. 6, pp. 721—730, 1972
- 10) Schulze, K. L.: Sewage and Industrial Wastes, 4, pp. 458—467, 1957
- 11) Solbé, L. G., Ripley, P. G. and Tomlinson, T. G.: Water Research, Vol. 8, pp. 557—573, 1974
- 12) 桑原猛児, 桃井勲: 水処理技術, Vol. 8, №3, pp. 25—32, 1967
- 13) 橋本奨, 鳥山明夫: 下水道協会誌, Vol. 14, №161, pp. 26—36, 1977
- 14) Friedman, A. A. and Schroeder, E. D.: W. P. C. F., Vol. 44, pp. 1433—1442, 1972
- 15) Mahna, J. F.: W. P. C. F., Vol. 50, pp. 678—687, 1978
- 16) 本田善則: 土木学会年講, 第33回, 1978