

散水ろ床の機能に関する研究

松 本 順 一 郎 ※

長 谷 川 信 夫 ※※

散水ろ床に下水を散水すると、その流出水は外観上はかなり澄んだきれいな水となる。すなわちろ床流入水と流出水とにおいて、両者の物理的、化学的および生物学的特徴は非常に異なっている。流入水においてはBOD、全有機性窒素、細菌およびアンモニアは非常に多いが、他方硝酸塩は流入水には少ないが流出水には多い。流出水の方が流入水よりもきれいに見えるのは流出水中にはコロイド物質が少ないからである。さらに、流出水に含まれている固形物は流入水と同程度あるいはそれ以上多い場合もあるが、安定しやすく静置すると沈澱する性質のものである。¹⁾

この研究は散水ろ床の機能を生物膜、ろ材、散水負荷、BOD負荷、温度および返送などについて考察したものである。

1 生物膜

下水が散水ろ床によって浄化されるのはろ床に積重ねられているろ材の表面に附着している生物膜の生物化学的作用による^{1) 2) 3) 4)}。この生物膜中には種々の生物が生息している。すなわち、細菌、菌類、藻類、原生動物類および後生動物類（特に線虫類、輪虫類、毛虫類、甲殻類および昆虫類など）などである^{1) 2) 3)}。

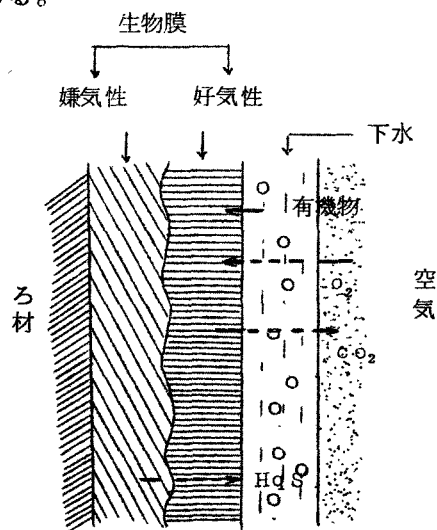


図-1 生物膜の断面図

※ 東北大学工学部

※※ ”

この構成員のうち特に浄化に重要な役割を演ずるのは細菌である。一般に生物膜の断面図は図 — 1 のように示されている³⁾⁵⁾。下水中の有機物は生物膜に吸着あるいは吸収され、酸素は空気中から下水へとその不足量に比例して直接にとけ込み、さらにその溶存酸素は生物膜に移動して生物膜を好氣的に保つ。この有機物は細菌に摂取され、一部は新細胞に変換され、他の一部は酸化されて合成に必要なエネルギー源となる。また、有機物のうち酸化されやすいもの（炭水化物など）はろ床の上部でその多くが減少するが、酸化され難いもの（蛋白質および脂肪など）はろ床の上部から中部、さらに下部において酸化されて行く¹⁾。

散水ろ床の生物相は活性汚泥の場合と異なり、その構成はろ床の深さによって種々異なる。散水ろ床における細菌の垂直分布の一例を表 — 1 に示す⁶⁾。活性汚泥では原性動物のうち繊毛虫類、特に固着型繊毛虫類が原

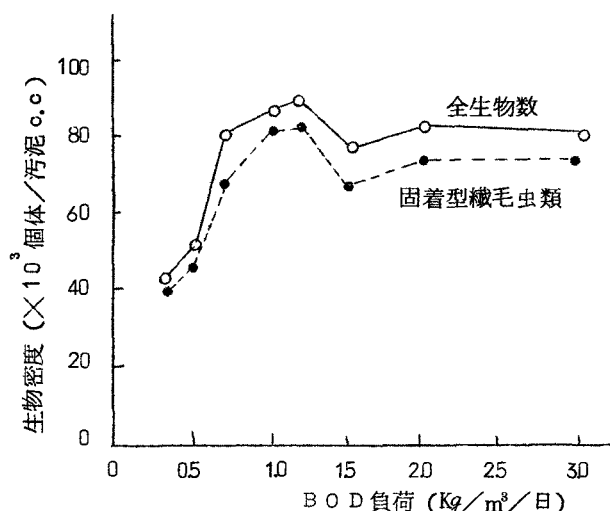
表 — 1 ろ床における各種細菌の垂直分布

細菌 \ 深さ	表 面	1 フート	3 フート	5 フート
NO ₃ 還元性細菌	964	174	96	1,525
蛋白質からH ₂ S生成菌	666	36,281	5,522	1,445
アルブミン分解菌	1,176	933	1,435	1,313
硫酸還元菌	2,854	272	528	361
硫黄バクテリア	66	632	1,130	1,445
アンモニア酸化菌	40	1,205	1,394	2,336
硝 化 菌	4	9	14	331
合 計	5,770	39,506	10,019	8,756

生動物類の主要構成員を占める時、その放流水は良好なものであると云われている⁷⁾⁸⁾。散水ろ床において、中島⁹⁾はその判定に繊毛虫類を示標としてえらび、固着型繊毛虫類が優勢の時にはろ床は良好状態にあると報告して

いる。筆者らが、し尿消化槽の脱離液を散水ろ床で処理した時の原生動物と後生動物とを調べた結果を図-2に示す。基質によって異なるが、都市下水やし尿消化槽の脱離液などの場合のように、散水ろ床においても原生動物類がろ床の浄

図-2 BOD負荷とろ床の生物相との関係



化効果またはろ床の状態を示す示標になることもある。

生物膜の厚さは普通 2～3mm をこえない範囲で好氣的状態を維持できると云われている^{2) 10)}。それゆえ、生物膜は厚くなっても表面からわずか 2～3mm 程度までが好氣的であって、それ以上の部分は嫌氣的になっている。ろ床の浄化効果を高めるためには生物膜をいかに好氣的に保つかと云うことが重要な問題である。

ろ床内の空気流量は外気温と水温との差に比例する¹¹⁾。このろ床内を自然対流する空気中の酸素が下水中にとけ込み、下水中の溶存酸素は増加する。それゆえ、ろ床内では通気を充分行なわせるために、ろ材の空げき率を大きくしたり、下水の流れを乱流にして溶存酸素を増加させる必要がある。さらに溶存酸素を増加させる手段として強制通風による方法も考えられるが、その効果は著じるしいものでないと報告されている。強制通風しても流出水の溶存酸素は平均 4.9ppm で自然対流によるその平均 4.8ppm に比べて大した効果はない。さらに放流水の BOD も 79ppm で 75ppm

に比べてたいした変化はない¹²⁾。このように強制通風してもその有利さがほとんど認められないのは、自然対流でも生物膜に必要な酸素量よりほかに多量の空気流量がある¹³⁾からである。ろ床内外の温度差が4℃あれば、ろ床に18 m³/hrの空気流がある。標準散水ろ床で分解すべき物質に対する全酸素必要量を280 g/m³とするとし、1 m³の空気中に280 gの酸素が含まれているので、1 m³の下水を分解するのに1 m³の空気があれば充分であることがわかる。また下水の平面負荷を約0.8 m³とすると必要空気量は0.8 m³となる。それ故理論的に必要な空気量の22倍の空気量が供給されている。さらにこの場合の酸素利用率は約4%であることがわかる⁴⁾。Johnson¹³⁾は酸素利用率は約5%であると報告している。一方活性汚泥では55～11%であると報告されている。

2 ろ 材

生物膜はろ材の表面に形成されるわけであるから、ろ材としてはその表面が生物膜の付着に都合のよい程度に粗らく、単位体積中に含まれるろ材の全表面積が多く、さらに生物膜が好気的狀態を維持できるように空げき率の多いもの程よいことになる。前二者を満足する条件はろ材の表面が粗らく、粒径の小さいことであり、後者ではろ材の表面が粗らすぎたり、ろ材が小さすぎたりすると汚泥がろ材間に蓄積して通気が阻害され、生物の浄化作用は減少するので、ろ材は滑らかで粒径の大きいもの程通気は良好となり、生物膜を好气的に保つことができるであろう¹⁵⁾。すなわち、ろ材としては表面の粗滑、および粒径の大小が適度に上記の条件を満足するものでなければならないことがわかる。

筆者らは粒径3～8 cmの花崗岩の碎石を用いてろ材の物理的性質について調べたところ、次のような結果を得た。Schroepfer¹⁶⁾は実験から碎石の径が50～100 mm程度では、ろ材の表面積は50～60 m²/m³であり、

表 一 2 ろ材の物理的性質

測 定 項 目	表示単位	測 定 値
ろ床 1 m ³ 当りの碎石の個数	個	10,622
空 げ き 率	%	45.6
碎石 1 個当りの平均空げき量	cm ³	448
ろ床 1 m ³ 当りの碎石の全表面積	m ²	83.3
碎石 1 個当りの平均表面積	cm ²	81.7

ろ床の空げき率は 49 ~ 55 %であったと報告している。一方左合¹⁷⁾ はろ材の粒径が 12.9 ~ 90 mm の範囲では，ろ床の空げき率は径の増加と共に増加するが大差は見られず 30 ~ 40 % であったと報告している。本実験で用いた内径 20 cm，深さ 1.8 mのろ床に関しては碎石の全表面積は 83.3m²/m³であり，空げき率は 45.6 %であった。

さらに，ろ材は自重によって破碎したり，風化したり，下水に浸蝕されたりしない耐久性のあるものが適当である。この条件に合うものとして，最近合成樹脂系のろ材が開発されつつあるが，まだ未解決の問題も多く含んでいるようである。さらに神山ら²³⁾ は散水ろ床の一変法として回転円板接触体を用いて実験したが，スイスではこのような方式で小規模の処理場の下水を処理している。

3 散水負荷および接触時間

下水が生物膜中の好気性細菌によって充分酸化されるためには，生物膜と充分な接触時間がなくてはならない。そこでろ床における下水の滞留時間が下水浄化の重要な因子となる。これについては次式が提唱されている^{4) 5)}。

$$\frac{L_0}{L_1} = e^{-kt} \dots \dots \dots (1)$$

ここで， L_0 ：ろ床放流水のBOD (ppm)

L_1 ：ろ床流入水のBOD (ppm)

k ：定数

t ：滞留時間 (秒)

さらに，滞留時間は散水負荷と次の関係がある¹²⁾。

$$t = a \frac{D}{Q^b} \dots \dots (2)$$

ここで， a ， b ：定数 (b は一般に $\frac{2}{3}$ である。)

D ：ろ床厚 (m)

Q ：散水負荷 ($\frac{m^3}{m^2/\text{日}}$)

(1)および(2)式より

$$\frac{L_0}{L_1} = e^{-k \frac{D}{Q^{\frac{2}{3}}}} \dots \dots (3)$$

筆者らは実験用散水ろ床を用いて，散水負荷と滞留時間との関係を求めたところ次式を得た。

$$t = \frac{2600}{Q} \dots \dots (4)$$

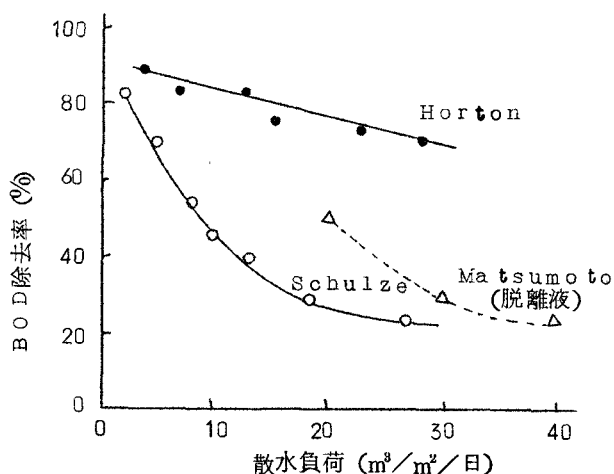
Schulze⁵⁾，およびHortonら¹⁸⁾は散水負荷の増加に伴ってBOD除去率が減少すること

を実験により求めた。

図一3 散水負荷とBOD除去率との関係

散水負荷とBOD除去率との関係を図一3に示す。筆者らもし尿消化槽の脱離液を用いて実験したところ同様の結果を得た。(図一3)

ろ材として陶製球を使用した時の散水



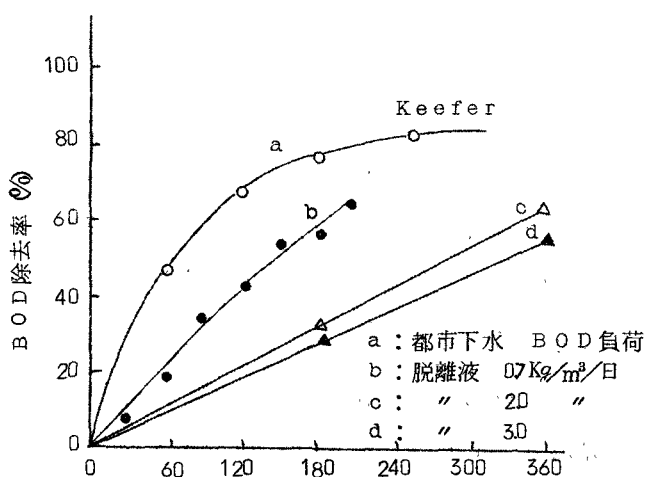
負荷と陶製球表面を流れる水膜の厚さとの関係を求めて、散水負荷が増加するにつれて水膜の厚さは増加し、その範囲は 0.2 ~ 0.8 mm であると報告されている¹⁷⁾。筆者らはすでに求めた平均滞留時間から散水された水は碎石の全表面積をつつむようにして流れると仮定した場合の水膜の厚さを計算により求めた。(表 - 3)

表 - 3 平均滞留時間と水膜の厚さ

散水負荷($\text{m}^3/\text{m}^2/\text{日}$)	平均滞留時間(秒)	水膜の厚さ(mm) (計算値)
10	210	0.29
20	164	0.44
30	92	0.46
40	85	0.47
60	37	0.31
100	28	0.39

(3)式において、ろ床の浄化効果はろ床厚にも関係していることが示されている。もちろん、ろ床が深い程同一散水負荷であれば生物膜との接触時間が長くなるのでそれだけ浄化効果は良好になる。しかし、深いろ床だと、ろ床下部を好氣的に保つことの困難さ、およ

図-4 ろ床厚とBOD除去率との関係

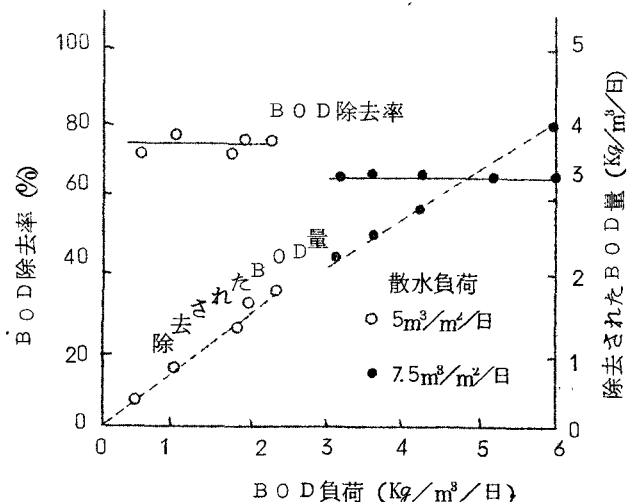


び生物相の垂直分布における差異などによってろ床の浄化はある程度抑制されるであろう。Sahulze⁵⁾，Keeferら²⁰⁾，およびVelz²¹⁾などはろ床厚とBOD除去率との関係を求めた。(図一4中曲線a.)これより，ろ床厚が1.8 m 程度まではろ床厚の増加と共にBOD除去率はかなりの増加がみられるが，その後の増加量はゆるやかである。し尿消化槽の脱離液を実験用散水ろ床で処理した結果を図一4の直線bで示す。さらに二段ろ過の実験を行なった結果を示すと図一4の直線cおよびdの通りである。直線b，cおよびdより，脱離液では下水に比べて除去率が悪いうえに流入水のBODが高いとろ床厚3.6 m 程度では，BOD除去率の増加は直線的であることがわかる。以上のことからろ床の浄化効果は散水負荷のみならずろ床厚とも関係していることが認められる。

4 BOD 負荷

BOD 負荷は生物膜との接触時間とは無関係であるので，ろ床の浄化率とは関係がないとSchulze⁵⁾らはのべている。しかし，ろ床の単位体積当りの有機物の除去量には限度があることが考えられる⁴⁾⁵⁾。BOD 負荷がある限界以上であれば，BOD 負荷はさらに増

図一5 BOD 負荷と浄化効果との関係

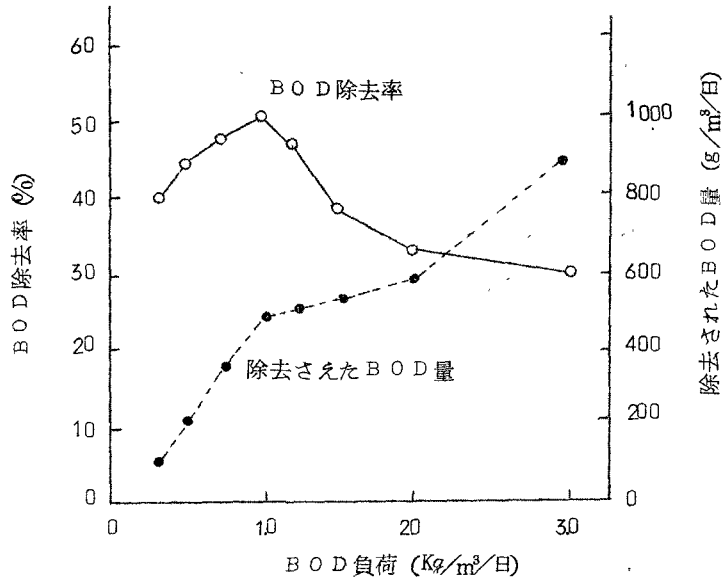


加しても除去率はかえって減少するだろう。図 - 5 に B O D 負荷とろ床の浄化効果との関係を示す⁵⁾。図 - 5 より下水の場合限界 B O D 負荷は少なくとも $6 \text{ Kg/m}^2/\text{日}$ であることがわかる。さらに、一般に B O D 負荷はこの限界値

以下なので

効率に影響がないと報告している。筆者らはし尿消化槽の脱離液について同様の実験を行なった。その実験結果を図 - 6 に

図-6 B O D 負荷と浄化効果との関係



示す。図 - 6 より B O D 負荷の増加につれて、B O D 除去率は増加していることが認められ、限界 B O D 負荷はほぼ $10 \text{ Kg/m}^2/\text{日}$ であることが推察された。なおこの負荷で、一日ろ床 1 m^2 当りの除去された B O D 量は 500 g 程度であることがわかる。以上から B O D 負荷には限界 B O D 負荷があり、ろ床の機能を充分發揮させるにはこの限界 B O D 負荷以下でなければならないことが推論される。

5 温 度

散水ろ床の浄化作用は好気性細菌によっておこることはすでに述べた。一般に細菌は高温であればその代謝速度は大きく、低温であれば小さい。

有機物の除去効果はこの代謝と関係するので、当然ろ床の効率は冬に減少し、夏に増加するであろう³⁾。

し尿消化槽の脱離液を散水ろ床で処理して、筆者らは水温とBOD除去率との関係の調べた。(図一七)さらに水温とBOD除去率との関係を次の如く導いた。

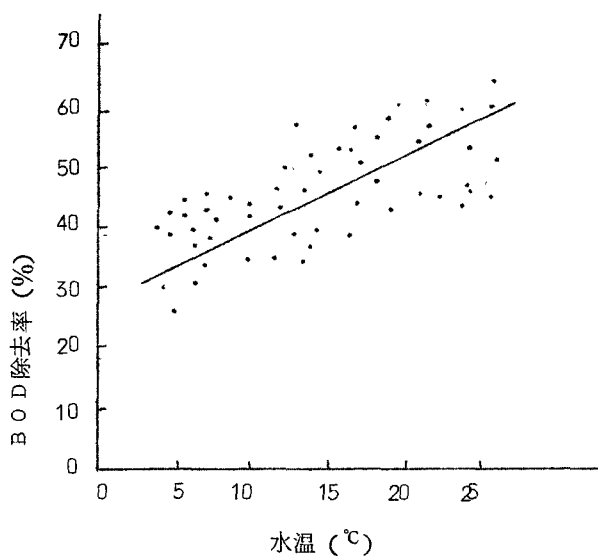
$$Y = 1.1 \times 2.79 \dots\dots (5)$$

ここで、Y：BOD除去率(%)

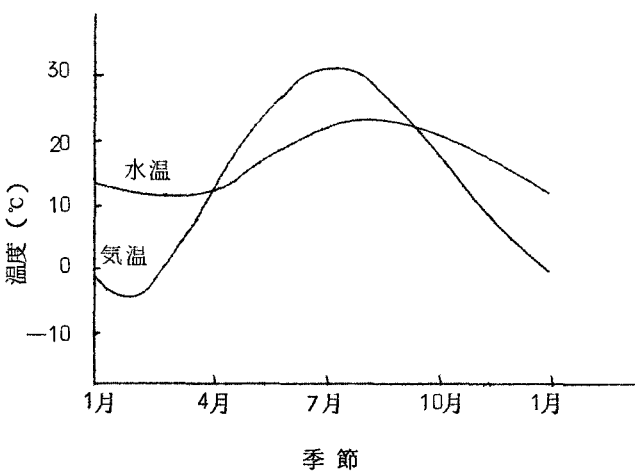
X：水温(℃)

Schroepferら²²⁾も実験から両者の間に直線関係が成立することを述べている。水温と気温との関係は図一八に示す通りである。²²⁾。図からわかるように水温の変化は気温程大

図一七 水温とBOD除去率との関係



図一八 季節による気温と水温の変化



な変化を示さないことに注意しなければならない。³⁾ ²²⁾

6 返 送

下水の濃度が高い時満足すべき放流水を得るために、一般に返送を行なう。左合¹⁵⁾ および Rigbi ら¹⁹⁾ は返送比が 1～2 位ではろ床の浄化効率にほとんど影響をおよぼさないとしており、筆者らのし尿消化槽の脱離液を用て行なった実験からも返送比が 1～2 (稀釈した脱離液に対して) の範囲ではろ床の浄化効率にほとんど差がないことがわかった。一方返送比を増加すると、流入下水と放流水の水質の差は小さくなり、返送は無益なものとなる。それゆえ、返送比には限界値があり、その値は 8 であると推察される³⁾。返送比が増加すると散水負荷が増加するので、ろ床の浄化効果は減少するが、流入下水の溶存酸素量は増加する。流入下水中に溶存酸素を多量に維持させることはろ床を操作する上で大切である¹⁸⁾。よってろ床の浄化効率を減少させない程度で返送を行なうことは高濃度の下水を稀釈したり、流入下水の溶存酸素量を増加させる効果があるものと推察された。

参 考 文 献

1. Keefer, C.E : Sewage Treatment Works, pp264～297
McGraw—Hill (1940)
2. Schulze, K.L : Experimental Vertical Screen Trickling
Filter, Sewage and Industrial Wastes,
Vol 29 pp458～467 (1957)
3. McKinney, R.E : Microbiology for Sanitary Engineers,
pp199～212 McGraw—Hill (1962)
4. Eckenfelder, W.W. and O' Corner, D.J. : Biological Waste
JR

Treatment, pp221 ~ 245 Pergamon Press
(1961)

5. Schulze, K.L : Trickling Filter Theory, Water and Sewage Works, Vol 32 pp100 ~ 103 (1960)
6. 洞 沢 勇 : 散布炉床法について (4) , 管工事工業 , pp2 ~ 7
7. Baines, S. et al : Protozoa as Indicators in Activated Sludge Treatment, Sewage and Industrial Wastes, Vol 25 pp1023 ~ 1033 (1953)
8. McKinney, R.E. and Gram, A. : Protozoa and Activated Sludge, Sewage and Industrial Wastes, Vol 28, pp1219 ~ 1225 (1956)
9. 中 島 文 夫 : 散布ろ床管理の基礎的事項について , 水道協会雑誌 218号 pp55 ~ 58 (昭和 27 年)
10. Imhoff, K : Taschenbuch der Stadtentwässerung, pp139 ~ 153 R. Oldenbourg. (1962)
11. Bloodgood, D.E. et al : Fundamental Hydraulic Principle of Trickling Filter, Sewage and Industrial wastes, Vol 31 pp243 ~ 253 (1959)
12. Johnson, W.K : Ventilation of Trickling Filters, Sewage and Industrial Wastes, Vol 24 pp135 ~ 148 (1952)
13. Rhame, G.A. : Effects of Forced Draft Ventilation at a Municipal Sewage Treatment, Sewage and Industrial wastes, Vol 30 pp1308 ~ 1311 (1958)
14. 津 田 松 苗 : 汚水生物学 , pp190 ~ 205 , 北隆館 (1964)

15. 左 合 正 雄 : 散水ろ床の基本問題に関する実験的研究(Ⅲ) ,
水道協会雑誌, 第 241 号 pp14 ~ 20
(昭和 29 年)
16. Schroepfer, G.J : Effect of Particle Shape on Porosity
and Surface area of Trickling Filter,
Sewage works journal, Vol 23
pp1356 ~ 1366 (1951)
17. 左 合 正 雄 : 散水ろ床の基本問題に関する実験的研究(Ⅲ) ,
水道協会雑誌, 第 239 号 pp30 ~ 41 (昭和29年)
18. Horton, R.K. et al : Studies on the Treatment of
Sewage and Textile wastes by Recirculating Filtration, II, Domestic Sewage on a
Continuous Basis, Sewage works journal,
Vol 14 pp818 ~ 833 (1942)
19. Rigbi, M. et al : Efficiency of a Small High-Rate
Trickling Filter Plant at Jerusalem,
Israel, Sewage and Industrial wastes,
Vol 12 pp852 ~ 865 (1956)
20. Keefer, C.E and Kratz, H.JR : Experimentals with High-Rate
Trickling Filters at Baltimore,
Sewage works journal, Vol 12 pp477 ~ 484
(1940)
21. Velz, C.J : A Basic Law for the Performance of
Biological Filters, Sewage works journal,
Vol 20 pp607 ~ 617 (1948)
22. Schroepfer, G.J. et al : Temperature Effects on Trickling

Filters, Sewage and Industrial wastes,
Vol 24 pp705 ~ 722 (1952)

3. Bachmann, F. : High Capacity Filtration; The Biofiltration System, Sewage works journal, Vol. 13 pp895 ~ 917 (1941)
4. 神 山 桂 一 郎 : 回転円板接触体による下水及び澱粉廃水処理の研究
pp304 ~ 305 第 13 回上下水道研究発表会講演
概要集 (昭和 37 年)