

東北大学 正 松本 順一郎
東北大学 〇 正 久保 俊治
仙台市 正 高橋 健一

1. はじめに 地下水人工かん養は下水の再利用及び水資源の合理的利用の実用的システムであると考えられるが、下水処理水あるいは汚染された河川水をかん養する場合、土壌中での水質変化及び生物学的目詰りに関する知見は乏けている。本研究は、生物学的目詰りに及ぼす基質濃度の影響について実験的に検討したものである。

2. 実験装置及び方法 図1に実験装置の概要を示す。内径10cm、長さ74cmの不透明塩ビ製装置に砂利を敷き、粒径0.25~0.42mmの河川砂を約40cm高に充填した。'定水位減衰透過方式'で基質(表1)を連続的に投入し、基質濃度の影響について検討した。実験装置は18±2℃に温度コントロールを行った。分析は東洋紙 No.5Cで透過した試料について行った。分析項目はDO, COD, NH₄-N, PO₄³⁻、炭水化物(アスロン法)、有機酸である。表2に実験の初期条件を示す。

3. 実験結果及び考察 表3に実験期間中の平均水質及び平均除去率を示す。実験は透過速度が0.1 m/day以下になるまで継続した。表3より、COD及びPO₄³⁻の除去は流入濃度の高い場合に高い除去率を示している。NH₄-Nの除去は基質濃度の影響をさほど受かず、ほぼ同様な除去率であった。透過速度はRun 1では約3カ月の基質の連続投入後でも0.5 m/day程度を維持していた。図2に経日変化の例を示す。PO₄³⁻及びNH₄-Nの除去は、透過速度の減少とともに、増加する傾向が見られる。図3にPO₄³⁻除去率と透過速度との関係を示す。DOは砂層表面(0~2cm層)でそのほとんどが利用され、砂層2~22cmでの利用は非常に少なかった。流入基質濃度へ最も高いRun 3では透過開始後8日目に砂層下2cmでDOは1 mg/l以下になった。Run 1では30日以降にDOは1 mg/l以下となった。炭水化物の変化はほぼDOと同様な挙動を示した。

4. 土の生物学的目詰りモデル 同一径の直線的な毛細管からなる多孔質体を考える。毛細管の方向は水の流下方向と一致し、毛細管の本数は一定でかつ不変であるとする。(図4)円管内の定常的な流れに対するハーゲン=ポアズイユの法則が毛細管内の流れにも成立するとし、これを解析を行う。次の仮定を行う。(1)毛細管は円形であり、毛細管径は生物学的目詰りの進行とともに一様に細くなる。(2)毛細管の間隙の減少量は透過累積水位高及び流入基質濃度に比例する。

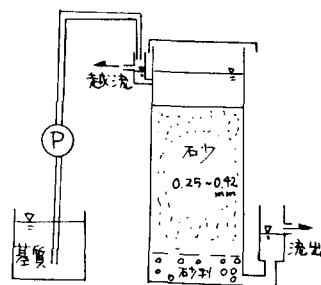


図1. 実験装置

表1. 基質組成 (mg/l)

	Run 1	Run 2	Run 3
C ₆ H ₁₂ O ₆	9	18	36
NH ₄ Cl	9.5	19	38
KH ₂ PO ₄	1.36	2.72	5.44
Na ₂ HPO ₄ ·12H ₂ O	8.35	16.7	33.4
Tap water	1 1	1 1	1 1

表2. 初期実験条件

	Run 1	Run 2	Run 3
初期透過速度 (m/day)	1.60	3.48	3.67
水位差 (cm)	5.5	3.8	3.5
石層高さ (cm)	39.4	39.8	39.3
間隙率 (%)	43.1	44.7	46.9
乾燥密度 (g/cm ³)	1.49	1.45	1.39

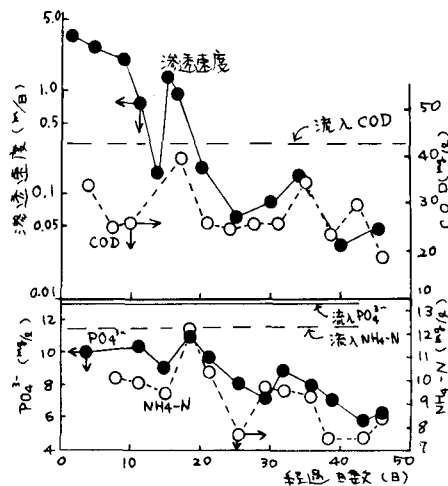


図2. Run 3 経日変化

表3. 平均水質(mg/l)及び平均除去率(%)

	Influent COD	Effluent COD	Influent NH ₄ -N	Effluent NH ₄ -N	Influent PO ₄ ³⁻	Effluent PO ₄ ³⁻
Run 1 (0~90日)	14.4	12.9 (10.4%)	3.04	2.23 (26.6%)	3.27	2.69 (17.6%)
Run 2 (0~46日)	26.9	23.6 (12.2%)	6.16	4.61 (25.1%)	6.58	5.32 (19.2%)
Run 3 (0~46日)	42.4	28.7 (32.2%)	12.2	8.93 (26.8%)	12.9	8.89 (31.1%)

流れに垂直な単位断面当りN本の毛細管が存在すると、多孔質体を通ずる初期浸透速度 q_0 (m/d)は次式で表わせる。(動水勾配: $-\frac{d\psi}{ds}$, 管径 d_0)

$$q_0 = R_1 \cdot N \cdot \bar{u} \cdot \pi (d_0^2/4) \dots (1), \quad \bar{u} = \frac{5\pi d_0^2}{32\mu} \left(-\frac{d\psi}{ds}\right) \dots (2)$$

$$(1)(2)式より, q_0 = R_1 \cdot N \frac{\pi 5 d_0^4}{128\mu} \left(-\frac{d\psi}{ds}\right) \dots (3)$$

目詰りが進行し、毛細管径が d_0 より d に減少した時、浸透速度 q は次式で表わされる。

$$q = R_2 \cdot N \frac{\pi 5 d^4}{128\mu} \left(-\frac{d\psi}{ds}\right) \dots (4)$$

仮定(2)より、間隙の減少量が浸透累積水位高(Q)と流入基質濃度(C_i)で表現でき次式を得る。

$$\frac{\pi}{4} (d_0^2 - d^2) N = R_3 \cdot Q \cdot C_i \dots (5)$$

本実験では動水勾配 $(-\frac{d\psi}{ds})$ 及び流入基質濃度(C_i)は一定であるので、

(3)(4)(5)式を連立させることにより次式をうる。

$$q = \frac{dQ}{dt} = R_4 q_0 \{1 - R_5 Q\}^2 \dots (6)$$

$$\text{ここを} R_4 = R_2/R_1 \dots (7), \quad R_5 = \sqrt{\frac{R_1 R_3^2 \pi 5}{8\mu \pi N q_0}} \left(-\frac{d\psi}{ds}\right) C_i^2 \dots (8)$$

(6)式を積分し、基質投入前の初期条件 $t=0$ で $Q=0$ を用いると次式をうる。

$$Q = \frac{(1/R_5) t}{(R_4/R_5 q_0) + t} \dots (9)$$

各実験条件における目詰り現象と比較する為、基質投入前の初期浸透速度 q_0 を(9)式の両辺を割り、次式をうる。

$$\bar{Q} = Q/q_0 = \frac{K_1 t}{K_2 + t} \dots (10)$$

$$\text{ここを} K_1 = 1/(R_5 q_0) \dots (11), \quad K_2 = R_4/(R_5 q_0) \dots (12)$$

実験結果に対して(10)式を用いて整理した結果を図5に示す。(線形化して、 K_1 及び K_2 を求めた。)

$\bar{Q}$ は基質投入からある時間後に、浸透累積水位高が初期浸透水位高の何倍であるかを示し、 K_1 は飽和定数である。図5より、流入COD濃度は44mg/lのRun 1をのぞき、本モデルは実験結果をよく表現していると思われる。著者らからすでに報告している初期浸透速度と変化させた実験結果を同様に整理すると、流入COD濃度は64~69mg/l、初期浸透速度3.5~18m/d、 $K_1=5.6\sim7.1$ 、 $K_2=2.7\sim4.4$ となり、 K_1 及び K_2 は初期浸透速度の影響を受けず、基質濃度により決まる定数であるとと思われる。(文献)(1) "Dynamics of fluids in porous media", pp162-164, Jacob Bear 著(1972), (2) "下水二次処理場の土壌汚染に關する実験的研究" 第3回年報, 公本大工務。さらに本研究の共同実験者である内藤敏夫君(当時東北工)に感謝する。

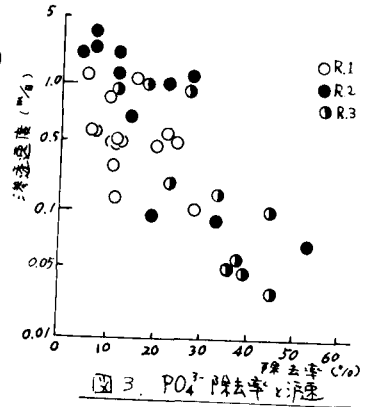


図3. PO₄³⁻除去率と流量

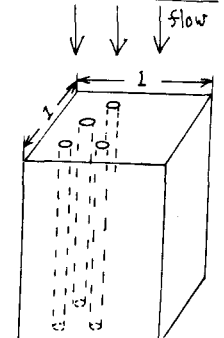


図4. 土の目詰りモリ

- Run 1 (COD=14.4mg/l)
- Run 2 (COD=26.9mg/l)
- Run 3 (COD=42.4mg/l)
- Run 4 (COD=68.3mg/l)

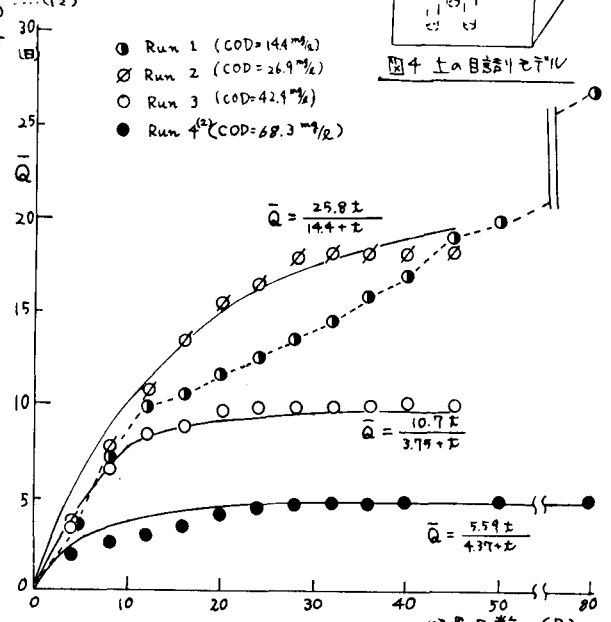


図5. $\bar{Q}$ と t の関係