

(16) 地下水人工涵養池における生物学的目づまりに及ぼす滲透速度の影響

東北大学工学部 松本 順一郎
〇大久保 俊治

1. はじめに

地下水人工涵養は地下水資源の保全ならびに下水の再利用の合理的かつ実用的なシステムであると考えられる。地下水人工涵養システムにおいては、長期間にわたる高い滲透速度の維持が必要であり、さらにシステムの設計および運転のために、土の目づまり機構の解明が必要となる。土の目づまりを起こす要因として、物理的、化学的ならびに生物学的要因が考えられるが、下水2次処理水を土壤還元する場合には生物学的目づまりが大きな問題となる。

従来、地下水人工涵養に伴う土の目づまりに関しては、De Vries¹⁾、Changら²⁾、Riceら³⁾の研究が挙げられる。Nevoら⁴⁾は生物学的目づまりと酸化還元電位との関係を示し、Avnimelechら⁵⁾、Mitchell⁶⁾は生物学的目づまりと多糖類の生成について調べた。また、Woodら⁷⁾は人工涵養池における嫌気性細菌の増殖が透水係数や涵養水の化学的性質に影響することを明らかにした。

これらの研究は地下水人工涵養と関連する生物学的目づまりに関する基礎的知見を与えたが、土の生物学的目づまり現象の複雑さから、生物学的目づまり過程については未だ明らかにされていない点が多い。本研究は、地下水人工涵養池における生物学的目づまりおよび水質変化に及ぼす滲透速度の影響について、砂カラムを用いて実験的に検討したものである。

2. 実験装置および方法

実験装置の概要を図1に示す。使用したカラムは内径10.7cm、長さ74cmの不透明塩化ビニル製であり、側壁に採水口およびピアゾメーターを設けた。カラムに砂利を約10cm高に敷き、濾過砂(粒径: 0.25-0.42mm)を約40cm高に均一に充填した。砂表面より10cm高の側壁に越流口を設け、定水位減衰濾過方式で実験を行った。流出口の高さを調整し、初期滲透速度を3段階に変化させた。基質は表1に示す動水勾配で連続的に投入された。各カラムの動水勾配は約3カ月の実験期間中、一定に維持された。実験装置は $18 \pm 2^{\circ}\text{C}$ に温度制御され、自栄養性微生物の増殖を防ぐためカラムは遮光された。

基質投入前に滲透速度および透水係数が安定するまで、水道水を滲透させた。表1に充填カラムの初期条件を示す。長さのディメンジョンとして砂の幾何平均粒径をとった場合、各カラムのレイノルズ数は1以下であった。

基質組成を表2に示す。単一炭素源としてグルコースを用い、基質のC/N比は144である。

有機物指標として重クロム酸COD、グルコース、揮発性脂肪酸が測定された。グルコースは酵素法により、脂肪酸はガスクロマトグラフィを用い定量した。アンモニア性窒素はインドフェノール法により測定し、重クロ

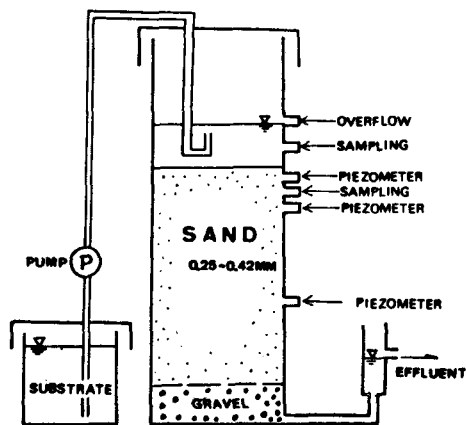


図 1 実験装置

表 1 充填カラムの初期条件

	R-1	R-2	R-3
滲透速度($\text{m}/\text{日}$)	18.1	8.7	4.2
動水勾配(-)	0.83	0.47	0.22
間隙率(%)	46.2	45.5	46.3

表 2 基質組成

グルコース	54	mg/l
NH_4Cl	57	mg/l
KH_2PO_4	8.2	mg/l
$\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	50	mg/l

ロム酸 COD, 溶存酸素濃度およびpHは下水試験法(1974)に準じて分析した。濾過サンプルを得るためには、東洋濾紙株式会社製No 5 c濾紙が用いられた。

3. 実験結果および考察

3.1 溶存酸素濃度の経日変化

Run 1, 2, 3の溶存酸素の経日変化はほぼ同様な挙動を示したので、Run 3の例を図2に示す。砂表面下2 cmにおける溶存酸素は初期15日間に急激に減少し、14日後には 1 mg/l 以下になった。さらに、26日後からは若干上昇し 1 mg/l 以上になった。砂表面上5 cmにおける貯水槽中の溶存酸素も初期の15日間は急激に減少し、その後 1.4 mg/l から 5.9 mg/l に増加した。26日以後は、貯水槽中の溶存酸素濃度はほぼ一定であった。以上のことより、初期の15日間では、砂層表面において好気性微生物の増殖あるいは活動が盛んであるが、26日以後は好気性微生物よりもむしろ嫌気性微生物あるいは通性嫌気性微生物が優占していると思われる。

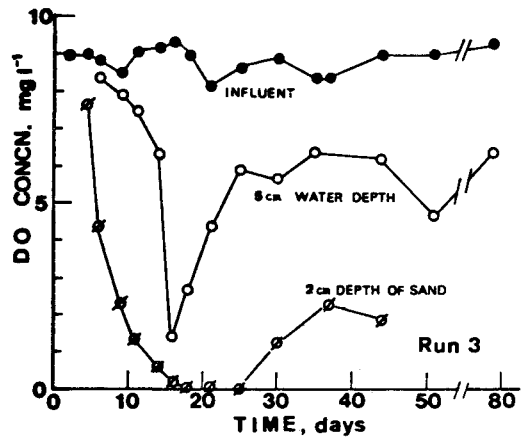


図 2 溶存酸素の経日変化

3.2 有機物の除去

有機物指標として溶解性CODを用いて、有機物の除去性を比較検討した。溶解性CODの経日変化の例を図3に示す。初期の25日間では、COD濃度は砂カラムの深さの増加とともに減少する傾向があるが、26日以後では、砂表面下2 cmにおけるCODが流入CODより高くなる現象が観察された。この現象は好気的条件下で増殖した微生物に起因する代謝産物が嫌気的条件下で分解し生じたものと推察される。各カラム流出水のCOD平均除去率は、

Run 1で25.8%, Run 2で26.8%, Run 3で31.4%であり、初期透過速度が低いほど高い除去率を示した。

COD濃度と透過流量のデータを用いて、除去されたCOD累積量を計算した結果を図4に示す。初期の27日間では、砂層表面(0~2 cm)でのCOD累積除去量も砂カラム全体(0~40 cm)でのCOD累積除去量も増加する傾向が見られる。しかし、28日以後では砂層表面(0~2 cm)での累積除去量は徐々に減少する傾向が見られる。図3に示すように、砂表面下2 cmにおけるCODが流入CODより高くなることに起因してい

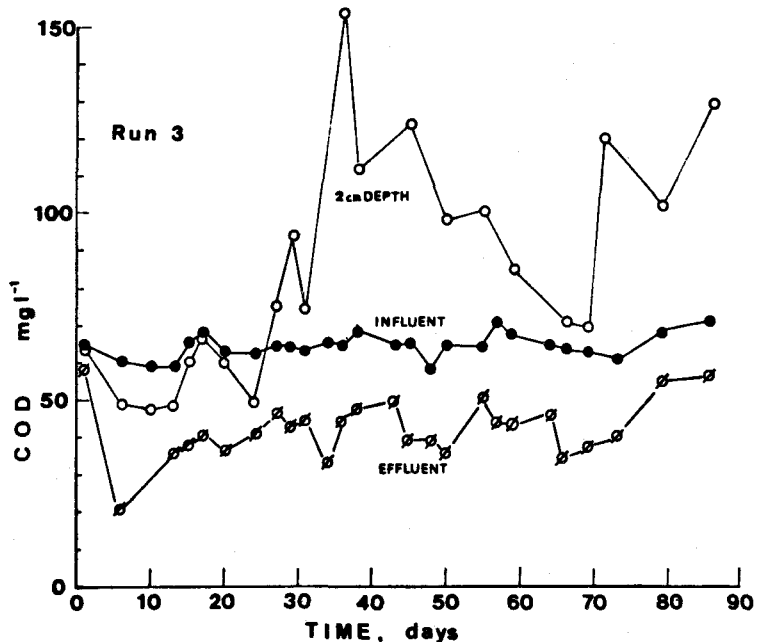


図 3 CODの経日変化

と考えられる。砂カラム全体（0～40 cm）でのCOD累積除去量は28日以後も若干増加する傾向があるが、初期の増加率に比べ小さい。これは、Run 3の透過速度が28日以後では0.5 m/日程度まで減少するために、COD累積除去量の増加率も減少するものと思われる。砂層表面（0～2 cm）でのCOD累積除去量が最大になった時点で、砂カラム全体での累積除去量に対する砂層表面で累積除去量の割合を求めると、Run 1で0.49、Run 2で0.39、Run 3で0.33であった。透過速度の速いカラムほど砂層表面での除去量が多い傾向がある。

グルコース濃度の経日変化は溶存酸素濃度の挙動と類似していた。砂層表面下2 cmにおいて、初期の10日間をのぞき、検出されなかった。砂層表面下2 cmにおけるCOD成分はグルコースに起因するものではなく、生物活動による中間生成物あるいは代謝物ではないかと思われる。各Runにおけるグルコース濃度の変化は、溶存酸素の挙動と同じように大きな差は認められなかった。

3.3 揮発性脂肪酸の生成

ガスクロにより検出された揮発性脂肪酸は5種類であり、酢酸、プロピオン酸、イソ酪酸、n-酪酸、ならびにイソ吉草酸であった。揮発性脂肪酸の生成は基質投入後5日目から起り、酢酸が他の脂肪酸に比べ多く生成された。図5に酢酸の経日変化を示す。また、表3に各揮発性脂肪酸の平均濃度を示す。表3に示すように、Run 1では流出酢酸濃度が砂層表面下2 cmにおける酢酸濃度よりも高く、砂層の深さ方向に酢酸濃度は増加している。すなわち、砂層全体にわたり酢酸の生成が起っていると考えられる。一方、Run 3では砂層表面下2 cmにおける酢酸濃度が流出のそれよりも高く、主に砂層表面で酢酸が生成され、砂層下部ではそれが利用あるいは分解（形態変化）されていると思われる。これらの結果より、Run 3においては砂カラムの上層と下層で微生物相が変化していると推察される。表4に残存CODに対する生成した脂肪酸の換算CODの比を示す。表4からも前述のことが推察され、透過速度は揮発性脂肪酸の生成に大きな影響を及ぼ

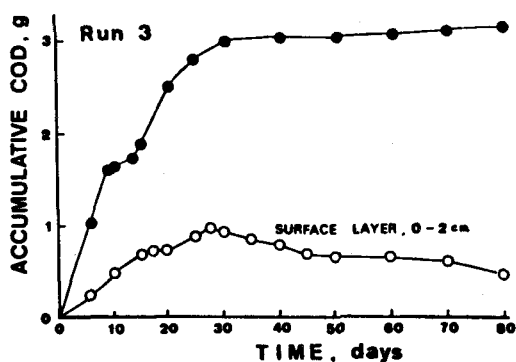


図4 COD 累積除去量

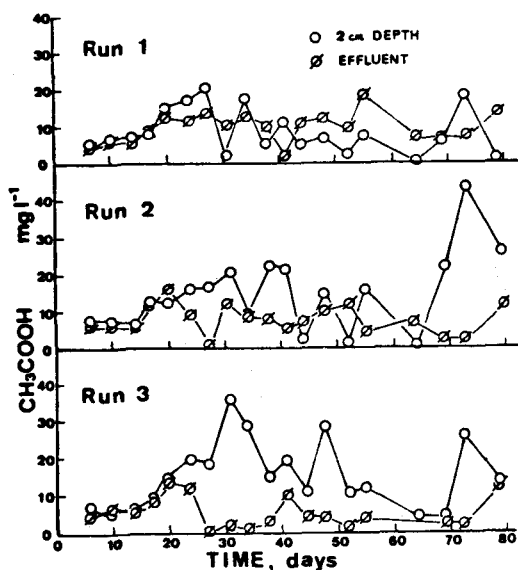


図5 酢酸の経日変化

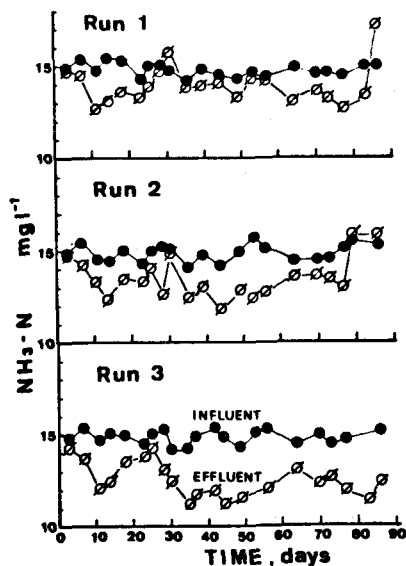


図6 $\text{NH}_3\text{-N}$ の除去

表 3 各揮発性脂肪酸の平均濃度 (mg/l)

	酢 酸	プロピオン酸	イソ酪酸	n-酪酸	イソ吉草酸
Run 1 砂表面下 2 cm	9.2	2.7	—	0.2	—
流 出	10.1	1.1	0.1	0.1	0.1
Run 2 砂表面下 2 cm	13.3	3.0	0.3	0.2	0.3
流 出	9.3	1.5	0.2	0.1	0.3
Run 3 砂表面下 2 cm	15.7	3.2	0.4	0.5	0.6
流 出	6.0	0.7	—	—	—

すと思われる。

3.4 アンモニアの除去

アンモニア性窒素の経日変化を図6に示す。基質投入後25日目までは各Runにおける挙動は同様であるが、26日以後では滲透速度の遅いカラムほど高い除去率を示す傾向がある。アンモニア性窒素平均除去率はRun 1で7.3%, Run 2で10.7%, Run 3で15.5%であり、平均除去率も滲透速度が遅いほど高い除去率を示した。

3.5 滲透速度の変化

図7に滲透速度の経日変化を示す。滲透速度は単位断面積当りの滲透水量と定義され、ここでは比流量に等しい。図7より滲透速度の減少特性を4段階に分類した。

- (1) 初期の10日間では、滲透速度は好気性微生物の増殖に伴う溶存酸素の減少とともに急激に減少する。
- (2) 11~20日目までは、滲透速度はほぼ一定か、わずかに増加する傾向がある。この期間には、低い溶存酸素濃度によって好気性微生物の増殖が抑制されたものと思われる。
- (3) 21~30日目までは、滲透速度は急激に減少した。この期間に砂層表面下2 cmでCODが流入CODより高くなる現象から、砂層表面で嫌氣的分解が起り、嫌氣的条件下で目詰りが進行したと考えられる。
- (4) 31日以降では、滲透速度は徐々に減少し、Run 2, 3の速度は0.1 m/日以下になった。地下水人工涵養システムでは、この段階に達す前に閉塞した表面を取り除くか、乾燥する必要があると思われる。

3.6 透水係数の変化

砂層表層(0~4 cm)における透

表4 残存CODに対する脂肪酸の割合 (%)

Run 1 表面 2 cm	18.0
流 出	28.5
Run 2 表面 2 cm	26.1
流 出	23.9
Run 3 表面 2 cm	26.5
流 出	18.9

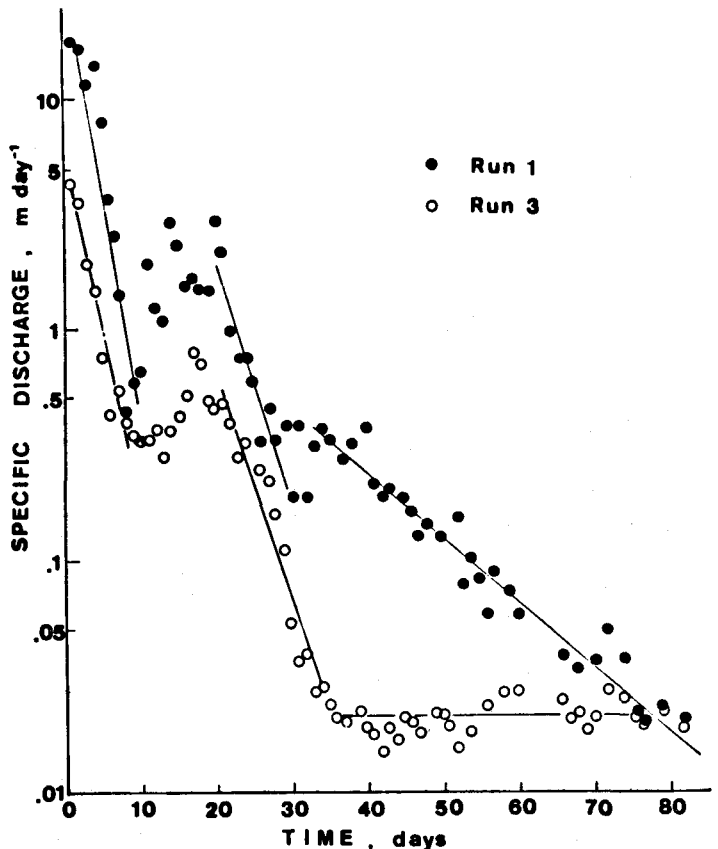


図 7 滲透速度の経日変化

水係数はほぼ同様に減少し、初期渗透速度は砂層表面における透水係数にさほど影響しなかった。図8に砂層中層（4～22 cm層）における透水係数の経日変化を示す。10日すぎからRun1での透水係数はRun2, 3に比べ急激に減少し、砂層4～22 cm層でも目詰り現象が観察された。Run1は渗透速度のもっとも速い系であり、渗透速度は砂層下部での目詰りに大きな影響を及ぼすと思われる。

4. 生物学的目詰りモデル

図9に土の生物学的目詰りモデルを示す。図9に示すように同一径の直線的な円形毛細管からなる多孔質を考え、毛細管の方向は流下方向と一致し、毛細管の本数は一定であるとする。

円管内の定常的な流れに対するハーゲン・ポアズユの法則が毛細管内の流れにも成立すると仮定し理論展開を行った。ハーゲン・ポアズユの法則から流速と動水勾配との間に直線的関係が導かれる。

次の仮定に基づき解析を行った。

(1) 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累積比流量に比例する。

比流量は単位断面積当りの流量と定義され、比流量と渗透速度は等しいと考えられる。それ故に累積比流量は累積渗透水位高に等しい。

多孔質体に単位断面当りN本の毛細管が存在する場合、多孔質体を流下する比流量は次式で表わせる。

$$q_0 = k_1 N u A_0 \quad (1)$$

$$u = \frac{\rho g}{32\mu} d_0^2 \left(-\frac{d\phi}{ds}\right) \quad (2)$$

$$A_0 = \frac{\pi}{4} d_0^2 \quad (3)$$

ここで、 q_0 ：初期比流量、 N ：単位断面積当りの毛細管数、 u ：毛細管内の平均流速、 A_0 ：毛細管の初期断

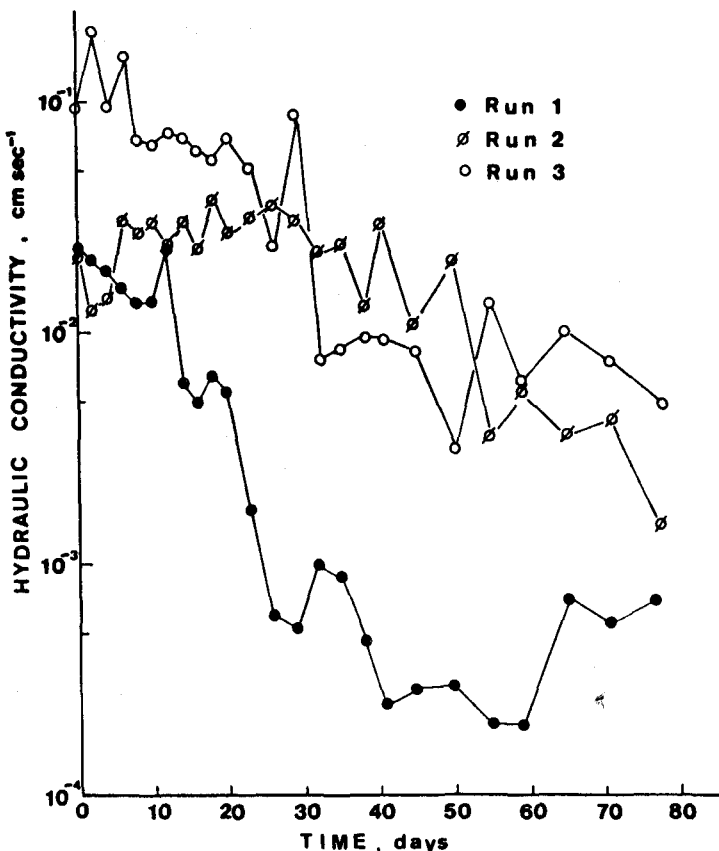


図8 透水係数の変化（4～22 cm）

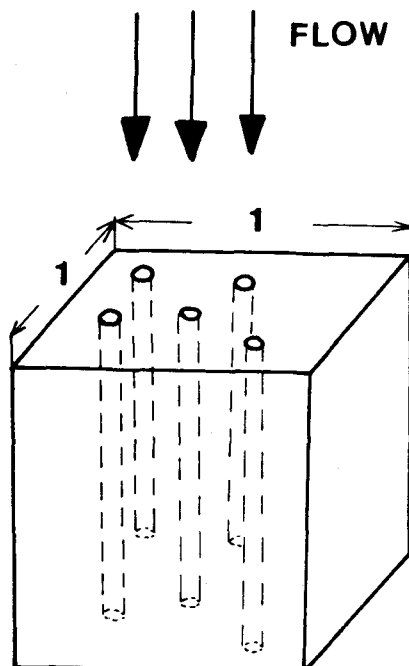


図9 生物学的目詰りモデル

面積， $-(d\phi/ds)$ ：動水勾配， μ ：粘性係数，
 ρ ：流体の密度， k_1 ：定数。

(1)，(2)，(3)より次式が得られる。

$$q_0 = k_1 N \frac{\pi \rho g d_0^4}{128 \mu} \left(-\frac{d\phi}{ds} \right) \quad (4)$$

ある時間経過後，毛細管径が d に減少し，その時の
 累積比流量が Q である時，(4)式と同様にして次式が得
 られる。

$$q = \frac{dQ}{dt} = k_2 N \frac{\pi \rho g d^4}{128 \mu} \left(-\frac{d\phi}{ds} \right) \quad (5)$$

ここで， Q ：累積比流量， q ：比流量， t ：時間，
 k_2 ：定数。

また，毛細管径が d である時の間隙の減少量は，
 $\pi N (d_0^2 - d^2)/4$ であり，仮定(2)より次式を得る。

$$\frac{\pi}{4} N (d_0^2 - d^2) = k_3 Q \quad (6)$$

ここで， k_3 ：定数。

本実験は動水勾配一定の条件下で行われたので，
 (4)(5)(6)より d_0 および d を消去し次式を得る。

$$q = \frac{dQ}{dt} = k_1 q_0 (1 - k_3 Q)^2 \quad (7)$$

ここで， $k_1 = k_2/k_1$ ， $k_3 = \sqrt{\frac{k_1 k_3^2 \rho g N}{8 \mu \pi g_0}} \left(-\frac{d\phi}{ds} \right)$

初期条件 $t = 0$ で $Q = 0$ を用いて(7)式を積分し次式を得る。

$$Q = \frac{K_1 t}{1 + K_2 t} \quad (8)$$

ここで， $K_1 = q_0/k_1$ ， $K_2 = k_3 q_0/k_1$

(8)式に実験結果を代入し， K_1 および K_2 の回帰曲線を決定した。表5に算出された K_1 および K_2 を示し，図10に実験結果との比較を示す。図10より，初期浸透速度の増加とともに浸透可能水量(K_1)も増加した。最後に，本研究は文部省科学研究費環境科学特別研究(303007,代表者 松本順一郎)より一部補助されたことを付記する。

<参考文献>

- 1) De Vries J.: W. P. C. F., 44, p 565 (1972)
- 2) Chang A.C.: W. P. C. F., 46, p 1715 (1974)
- 3) Rice R. C.: W. P. C. F., 46, p 708 (1974)
- 4) Nevo Z. each: Water Res., 1, p 231 (1967)
- 5) Avnimelech Y. et al.: Soil Sci., 98, p 222 (1964)
- 6) Michell R. et al.: Appl. Microbio., 12, p 219 (1964)
- 7) Wood W. W. et al.: Water Resour. Res., 11 (4), p 533 (1975)

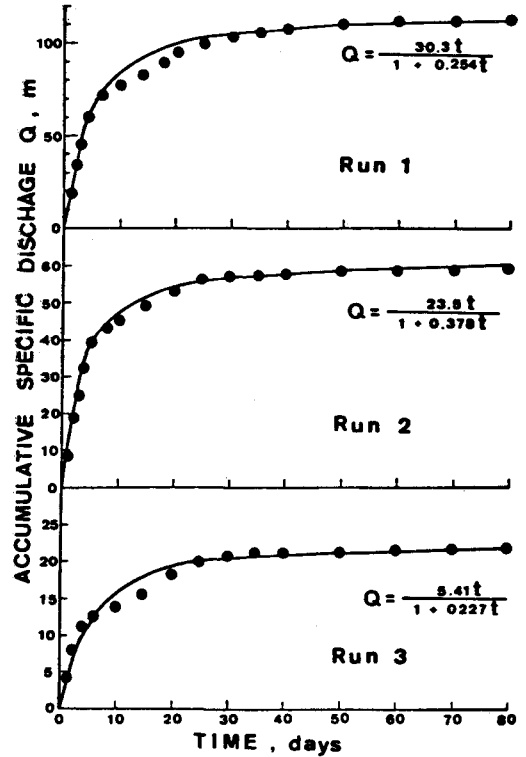


図10 実験結果との比較

表5 K_1 および K_2 の計算結果

	K_1	K_2
Run 1	30.3	0.254
Run 2	23.6	0.376
Run 3	9.41	0.227