

(15) 毛管現象を伴う砂層浸透流の浄化と目づまりについて

山梨大学工学部 正 竹 内 邦 良
" 正○坂 本 康
" 学 久 納 誠

1 はじめに

土壌の浄化能力を下水の高次処理に利用する方法はその容易さ、処理能力、省資源性、環境保全面等で多くの利点を持つものとして検討され、すでに実用に供している例も少なくない。¹⁾ また水資源の地下涵養、総合治水の一環としての雨水の地下浸透技術という面からも多くの研究が進められている。²⁾

これ等の方法に共通した技術上のネックは目づまり現象であるが、数多くの研究報告があるにもかかわらずその詳細はまだ明らかにされていない。本研究は汚水を地下埋管により土壌中に浸透させて処理する土壌浄化装置の水理学的特徴の一つである、土壌の毛管力による浸透と重力浸透を合わせて利用する機能を取りあげ、図1のような実験装置を用いて目づまりと浄化作用について実験・観察したものである。

これに類似した実験報告に松本・大久保(1980)によるものがある。彼等は標準砂よりやや粒径の大きい(0.25~0.42 mm の)砂を内径 10 cm 長さ 70 cm の円筒に詰め、各種動水勾配の下に汚水を圧入したが、毛管浸透については考慮していない。また石崎・北川(1980)は函型受け皿(トレンチ)に小砂利を詰め、その中に穴の開いたパイプを通したものを標準砂層に埋めて、水道水の涵養実験を行なった。この実験は毛管力によりトレンチ外に水が運ばれる現象を模擬しており、また実用規模での現地実験も行なわれた。しかしながら汚水を入力した例については、まだ十分な検討に耐えるものはない。

本実験では条件を制御し、再現性がある普遍的な結果が得られるよう努めた。第1に、土壌の複雑な性質を決定している各種要素、例えば腐植物の存在、団粒構造、巾広い粒度分布、水みちの存在などの各々の効果を分離して検討するために、まず粒径が揃っていて均質な豊浦の標準砂を基本材料として調べることにした。第2に汚水としては成分のはっきりした人工尿を用い、しかも装置入力時点での水質を一定にするため、予め滅菌したものを用いた。

2 実験方法

図1に実験装置の概要を示す。砂槽の左 $\frac{1}{8}$ に障壁が設けられていて、汚水は毛管力によりこの障壁を越えなければ右側の重力降下部分へ移動できないようになっている。砂槽幅を 2.5 cm としたのは現象を二次元的に把えるためである。高さを 43 cm としたのは土壌浄化のために好気的な条件の期待できる部分を選んだということであるが、標準砂を用いる場合には砂層のほぼ全域が飽和状態となり毛管サイフォンを構成するため、その意図は生かされなかった。流入・流出口付近には砂の流出を防ぐため小

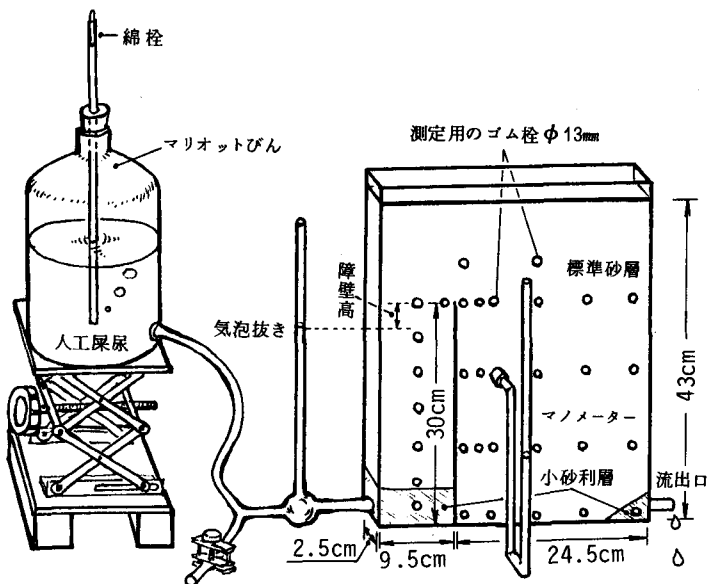


図1 実験装置の概要

砂利を詰めた。砂層内部の測定、サンプリング用に各所に穴を開け、ゴム栓をつけた。負圧部分での圧力測定用マノメーターには空気の侵入を防ぐため砂層との間に布と紙を挟み、数ヶ所に実験開始前からセットしておいた。用いた豊浦の標準砂は粒径 0.105~0.250 mm, 比重 2.65, 空隙率 38.4%, 25℃ の水道水に対する透水係数 $0.045 \text{ cm}^2/\text{sec}$ である。砂層にはあらかじめ上部より十分な水道水を加え、飽和状態にした後数時間置いて尿尿の入力を開始した。人工尿尿の成分は表 1 に示すとおりである。Run1, 2 では C と N 成分のみ他の 5 倍にした。水位を一定にするためマリOTTびんを用いた。気泡抜きも付け加えたがこれは流入水の水位を見る役も果たした。なお実験は室温 (23.3~29.5℃) で行った。

実験は表 2 に示す 6 種類である。Run 0 は 6 月 30 日から 3 ケ月に亘って実施されたもので、汚水濃度は有機物が TOC 5.85 ppm (=COD15.6 ppm), 障壁高 (毛管力で越えなければなら

ない高さ。図 1 参照) は 5 cm としたが、初めの 1 ケ月半はいずれも正確にはコントロールされなかった。有機物量は Run1, 2 は TOC で 29.3 ppm, Run3, 4 は 5.85 ppm である。Run1, 3 は障壁高を 10 cm, Run2, 4, 5 は Run 0 と同じく 5 cm とした。Run1, 2 と 3, 4 はそれぞれ 8 月 15 日, 19 日に開

始され約 1 ケ月半継続したが、濃度・障壁高とも正確にコントロールされた。濃度制御のためにはマリOTTびん内に溜っている間に処理が進んで有機物濃度が低下しないようにあらかじめ 120℃・15 分でオートクレーブにかけ、その後は直接外気と接触しないようにした。またこの処置に伴い、オートクレーブ後十分空気を吹き込み DO を飽和状態に近い濃度にした。

3 実験結果と検討

汚水を用いた実験に先立ち水道水を流入させて物理的目づまりが生じるかどうかを調べた。結果は否であった。すなわち 9 日間に亘る流出水量の変動は最大 ±12% 以内であってそれは主として砂層中にトラップされた空気泡の気温変動に伴う増減によるものと考えられた。したがって以下に報告する目づまりはすべて汚水を流入させたことによるものと考えてさしつかえない。

(1) 流出水量の変化 (図 2a~2c)

図 2 の a, b, c はそれぞれ Run0, Run1, 2, Run3, 4 の流出量の記録である。縦軸の単位は流出量を砂層表面積 85 cm² で除し、流出高で示してある。●は障壁高 5 cm のもの, ○は 10 cm のものである。先ず目につくのはいずれもかなりはげしい変動を繰り返していることである。この変動の原因が何に因るものであるかは(2)に述べる圧力分布の変化よりある程度推定出来る。はじめの 5~7 日の間にどの場合でも $\frac{1}{10}$ ~ $\frac{1}{20}$ に下っている。つづく数日間かなり回復する現象が見られ、その後約 20~30 日間は変動しながらも徐々に減少していく。実験開始後 30 日以降の現象は Run 毎に異り、一般的に述べることは難かしいが、回復しては再び減少する過程を繰り返す傾向があるようである。

Run 0 では 35 日目に障壁高 5 cm の定水位にした。このため変動が滑らかになったのが観察される。Run 1 (b 図○印) は約 4 週間で完全に閉塞状態になり流出が観測されなくなった。そこで出口 (ここでは外か

表 1 人工尿尿組成

成 分	濃 度 *
CH ₃ COONa	20.0mg/ℓ (5.85 mg ⁻ C/ℓ)
NH ₄ Cl	38.2mg/ℓ (10.0 mg ⁻ N/ℓ)
その他の栄養塩	
K ₂ HPO ₄ , KH ₂ PO ₄ , CaCl ₂ , NaCl, MgSO ₄ , FeSO ₄ , H ₃ BO ₃ , MnCl ₂ , ZnCl ₂ , CuSO ₄ , (NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄	
* Run 0, 3, 4 の濃度。Run 1, 2 は C, N のみ上記の 5 倍の濃度。	

表 2 各 Run の実験条件

Run No.	障壁高	水頭差	初期流速*	有材物濃度	期 間
0	5~10cm	20~25cm	179cm ² /日	5.85mg ⁻ C/ℓ	80.7.1 ~10.6**
1	10	20	150	29.25	8.15 ~ 9.26
2	5	25	190	29.25	8.15 ~10.6**
3	10	20	157	5.85	8.19 ~ 9.27
4	5	25	199	5.85	8.19 ~10.6**
5	5	25	175	5.85	9.21 ~10.6**
*流速は流量を装置の全表面積 85 cm ² で割った値。 **その後も継続					

ら空気が入り有機物処理がおこるのを防ぐため直径 2 mm 位の間隙になっている)に溜ったコロイド状微生物体を取り除いたところたちまち回復した。Run 2 についても類似の溜り物があり、取り除いた。この際異臭おびたく、嫌気性状態を示しており、砂層は図 8 のような部分で黒変していた。Run 0, 3, 4 では出口にもコロイド状物質は付かず、上記のような現象は観察されなかった。明らかに有機物濃度の高いものを与えたことによる影響である。

(2) 流出量変化と目づまりの位置および原因 (図 3~4)

(1)に述べた流量減は目づまりに起因するものであるが、その発生位置および原因を調べる目的で2つの検討を行った。1つは流線網についてである。図 3 は Run 3 の流速ベクトル図で 38 日目にローダミンを注射して測定したものである。cm/day

この図と水道水を 8 日間流した後に測定した流線網とを比較すると、少なくとも確認できるような差はなかった。水道水の場合に比べて Run 3 の流出量が 3 割以下に減少しているにもかかわらず、流線網が一致するということは、Run 3 の砂層全域の透水性が一様に低下したか、あるいは出口または上昇部分だけ局部的に低下したかのいずれかである。

そこで第二の検討とし、そこで第二の検討として砂層内部の透水係数の変化を調べるために、新たな実験 Run 5 を行った。実験条件は TOC 5.85 ppm 障壁高 5 cm で Run 4 と同じである。ただし、Run 5 では人工尿尿をオートクレーブにかけた後析出すると見られる SS (この場合は 3.6 ppm) による影響を極力除くため 1 μ のろ紙 (Whatman 社 GF/B) でろ過した液を用いた。この場合の流出量変化は図 4a に示す通りであった。ろ過しない Run 4 では流出量が半

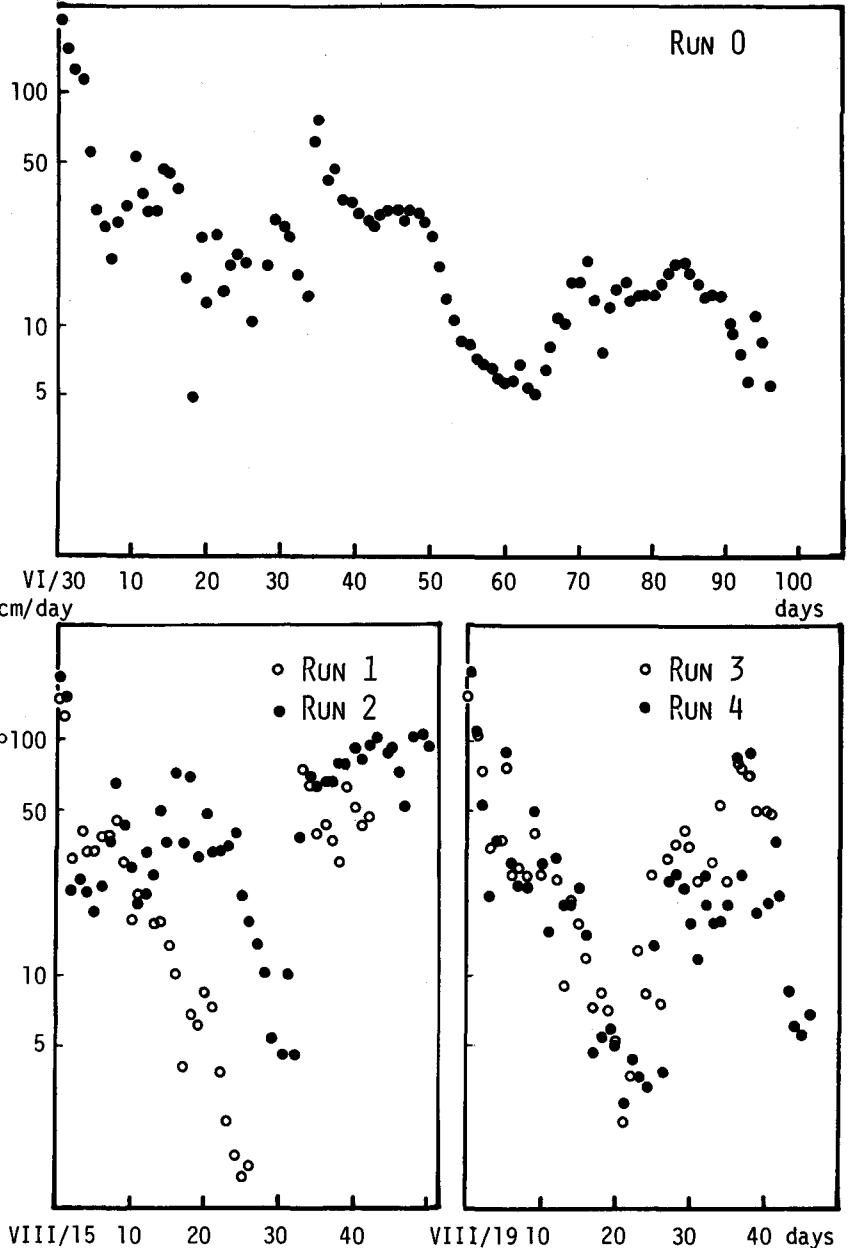


図 2 流出量の時間変化図

減するまでに18時間しかかからなかったが、ろ過したRun5では5日間たってやっと半減していることがわかる。これによりRun0~4の初期の目づまりの主因はSSであると言える。またRun1,2およびRun3,4で約1日後に障壁高が10cmの方が5cmより流出量が多くなるという逆転現象が生じているのは、5cmの方が流量が多かったため、流入水中のSSが多く詰り10cmに追い抜かれる結果になったと考えられる。

次に図3に○印で示した流線上の各点での水圧の時間変化と流出量をもとに、各区間での透水係数を計算

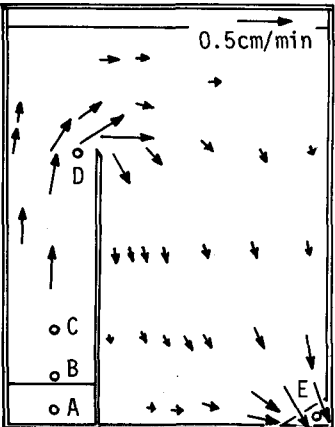


図3 速度ベクトル図
(Run3 38日目)

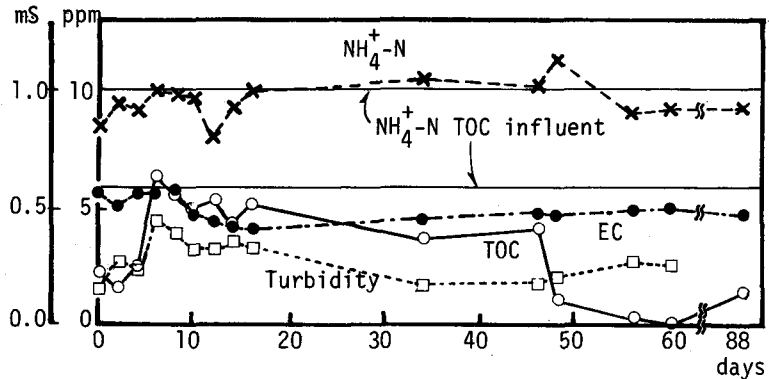


図5 各水質指標の時間変化図 (Run 0)

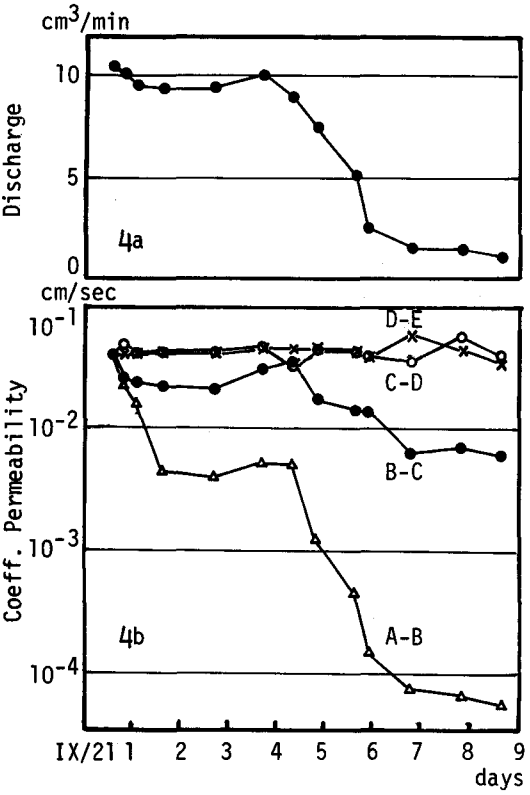


図4 流出量(a)および流線上の各区間での透水係数(b)の時間変化図 (Run5)

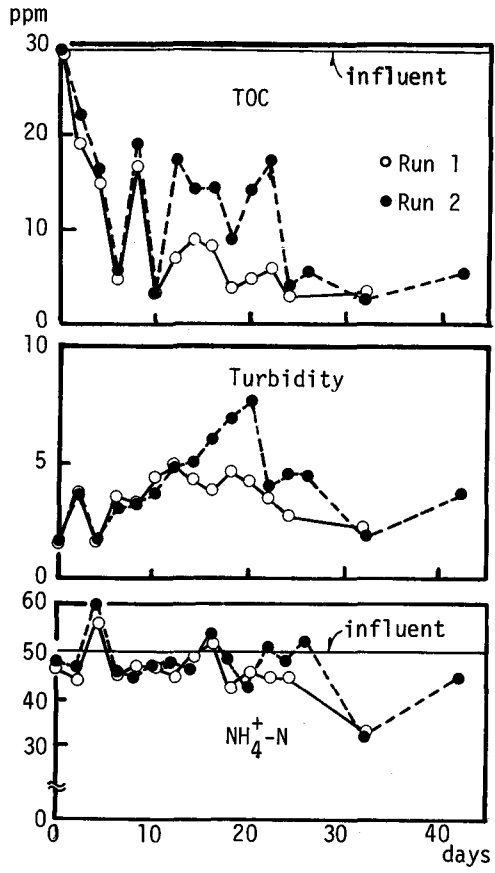


図6 各水質指標の時間変化図
(Run 1, 2)

した結果が図4bである。透水係数はAB,BC間で低下しており、特にAB間の透水係数は5日後に2%に落ち、さらに12日目以降は0.02%前後に落ちた。このことは砂利・砂兩層の境界面にSSや微生物体による過膜が形成されたことを意味している。BC間の透水係数が日毎にわずかつつ低下しているのは、目づまりがしだいに砂層の奥へ進行していくことを示していると思われる。CD,DE間では透水係数の変化ははじめの10日間では見られなかった。このことから、(1)で述べた流出量のはげしい変動は、境界部分の膜が流量制御の主要因になっており、これが破壊・再生を繰り返すことによるものと考えられる。

(3) 流出水の水質 (図5～6)

流出水の水質については、各水質項目別に経時変化を調べ、各項目間の関係を定性的に検討した。図5はRun0についての、また図6a～6cはRun1,2についての代表的な水質項目の変化図である。まずTOCの時間変化は、図2に示した流出量の変化とよく似た動きをしている。とくに、図2bと図6aの1～10日までの増減は極めて良く一致している。これは流出量の増減、つまり滞留時間が有機物の減少量を決める主因であることを示している。水質項目間ではTOCと濁度の傾向が類似しているが、これは流出有機物が濁質状の菌体により構成される部分が多いためと考えられる。有機物の除去率はRun1,2の10日～30日目のTOCで40～80%であった。

(4) 砂層内の有機物分布 (図7～9)

砂層内の有機物分布を見るため、砂層各点から注射器で試料水を採取しTOCを測定した。図7a～7eは、Run2の場合の経過図である。1日目、10日目では底部や中央部で高い値を示す。原因は不明だが、分析は濁質を含めて行っており、後述のように濁質の寄与が少なくないことから、濁質の分布に対応しているとも考えられる。20日目は障壁沿の部分が高く、流線に沿っての減少がみられる。30日目もほぼ同様の分布を示し、全体に値が低くなっている。この間は系が比較的安定し、分布も似ていると考えられる。値が下がったのは、流量が $33\text{ cm}^3/\text{day}$ から $45\text{ cm}^3/\text{day}$ に減少したことによる。40日目には部分的に20 ppm以上の所が現われている。これについては、30日～40日目の間に図8に示したような黒い部分が生じたので、嫌氣的部分が増えたものと考えられ、それに伴う変化といえる。40日目の試料を 0.45μ のメンブランフィルターでろ過してTOCを測ると、図7fのようになる。これを見るところ過ぎない図7eの場合に20 ppm以上の

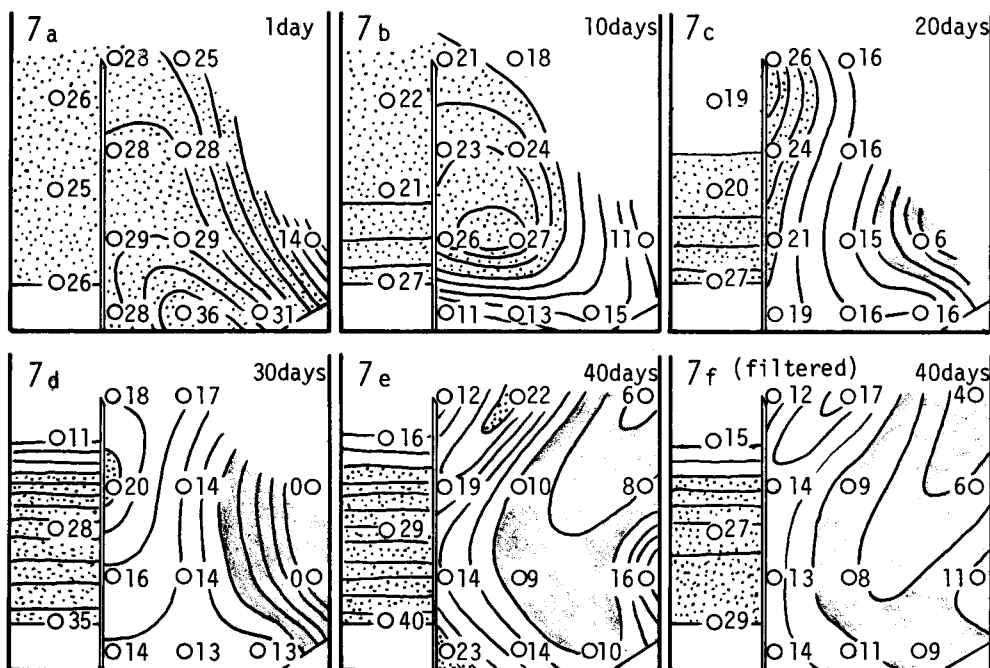


図7 砂層内TOC分布の時間変化図 単位は ppm (Run 2)

高い値を示した部分には、濁質状の有機物があつたことがわかる。これは、嫌気化が附着微生物の剝離をひきおこし、濁質状の有機物の増加をもたらしたことによるものと考えられる。

次に、図8に○印で示した流線上でのTOC変化を見る。図9はRun2の場合の結果である。測点のうち①、⑧は砂利層、②は砂利-砂の境界面上5mmの砂層、④は流入水の水位に相当する高さである。上昇部は時間と共に②の点で値が増加し、④では減少している。これは、この間の浄化作用が盛になっていることを示している。40日目について、0.45μフイルターでろ過したものとは、他の点では差は2ppm以下であるが、②では40ppmになり差が大きい。このことは、菌体が濁質の形で境界面付近に蓄積されていることを意味する。このように、砂層中の微生物は、附着状態ばかりでなく懸濁状態で存在するものも多いと推定される。

砂の附着微生物の重量を測るため、Run1について40日目には各点からとった砂の強熱減量を調べた。砂は110℃で4時間乾燥したものを、600℃で1時間強熱し減量を測定した。値は砂層では境界面付近の点②の他は2.7mg/g～3.4mg/gの間にあるが、②では4.3mg/g、砂利層では入口の①で10.8mg/g、出口の⑧で12.9mg/gであった。なお、未使用の砂自体は2.9mg/gである。これより、附着微生物量が多いのは砂層の入口のごく限られた領域と砂利層であることがわかる。

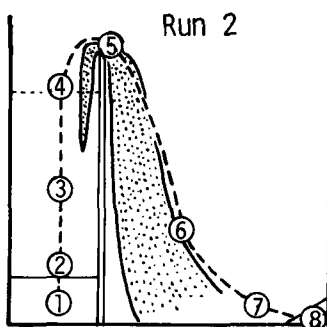


図8 黒色化した領域
(Run2 30～40日目)

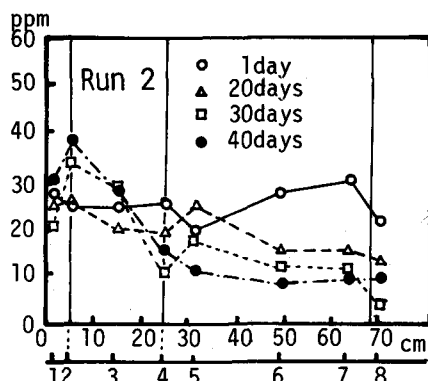


図9 流線上の点①～⑧におけるTOCの分布とその時間変化図 (Run2)

4 結論および今後の研究方向

以上のことから飽和状態で毛管サイフォンを構成した標準砂層中の浸透流に関しては、次のように結論出来る。

- (1) 汚水浸透による目づまりは小砂利層から標準砂層に移る境界面およびその付近の標準砂層に集中的におこり、浸透量を大幅に減少させる。その原因はSSおよび微生物であるが、初期にあってはSSの影響が大である。
- (2) 浸透量はかなりはげしい変動を繰り返す。これは境界面に形成された目づまり膜が不安定で時おり破壊され、再生・破壊を繰り返すためと考えられる。
- (3) TOCは境界面の目づまり膜付近だけで急激に減少するだけでなく、主として障壁左の上昇部で連続的に減少する。したがって目づまり膜は流量を制御する機能を果し、その結果滞留時間は流量に反比例して長くなり浄化が進むという構造になっている。また浄化能力は時間と共に増強される。

今後に残された研究課題としては、(1)粒径の変化する砂層内境界面での目づまりの生成過程、ことに原因物質であるSSと微生物体の目づまりに果たす役割について、(2)砂層内での有機物浄化過程の追跡、さらに最も重要なこととして、(3)土壌のもつ団粒構造・不飽和浸透の性質が目づまり・浄化にかかわる機構の解明という課題がある。

〔参考文献〕

1. 新見・有水：汚水の土壌浄化法研究，毛管浄化研究会，1977
2. たとえば、石崎・北川：注入井による地下水涵養——特に目づまりとその対策——，第23回水理講演会論文集，1979
3. 石崎・北川：地下埋管の原理と効果，建設省土木研究所資料 1590号，1980
4. 松木・大久保：地下水人工涵養池における生物学的目づまりに及ぼす浸透速度の影響，衛生工学研究討論会論文集，1980