

土壌を利用した水環境の保全技術 ー 雨水浸透と土壌浄化 ー

石 崎 勝 義

1. 開発に伴う水環境の変化

人間をとりまく環境の要素の一つとして水が重要な位置を占めていることは多くの人が認めるであろう。地上の植物は雨水の供給によって成育し、それに依存する動物も水のあり方の影響を免れ得ない。洪水の氾濫状況や土壌の乾湿が土地利用のあり方に大きな制限を与えていることも容易にうなづけよう。

さて流域が人為によって開発されることが、それまでの水の循環の経路や速度に大きな変化をもたらすことはよく知られている。

森林や畑地は降雨をよく浸透させる。平地林では降雨の殆んどは一たん土壌中に浸透した後に流出すると言われている。このため短い時間に集中した降雨も土壌中での貯留作用によってその時間波形は平均化され、ピーク流量は著しく小さくなる。

土壌中に浸透した水の一部は更に鉛直降下して地下水を涵養する。これは洪水後にゆっくりと流出し晴天時の河川の流量を形成する。

流域の開発が進むとこのような水の循環の形態が変化する。変化の内容は図1-1のように3つに大別される。

このうち河川に流出するまでの変化について考えてみよう。

第1は土壌への雨水浸透の減少である。

森林や畑地であった土地が、屋根やアスファルトで被われるようになって雨水の土壌への経路が失なわれる。浸透の経路を失った雨水は表面流出として直接河川に流出する。地下水は雨水による涵養の量が減少する。

第2は流出速度の増大である。

地表流出が増大することもあるって開発地域内の道路には側溝や下水路が敷設される。これらの集水施設が

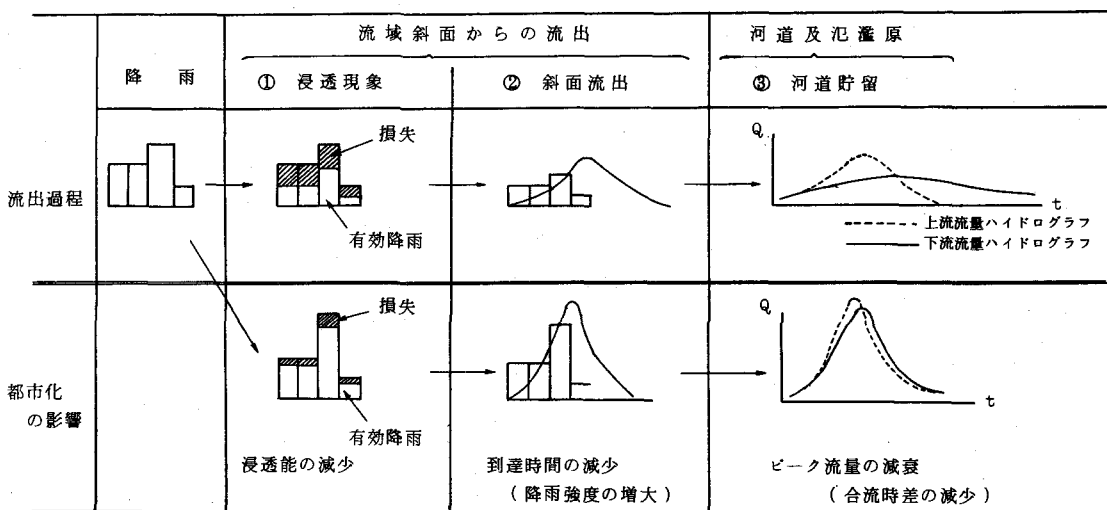


図1-1 流出の過程と開発の影響

表 1-1 流域の開発と流出率（奥田）

河 川	流 出 率
出 崎 川（市 街 地）	0.89
植 田 川（開発途上流域）	0.74
香 流 川（自 然 流 域）	0.54

建設されると降水は流域内で貯留されることが少なくなって速やかに河川に流出する。降水が河川に流出するに要する到達時間は著しく短縮されるため洪水のピーク流量は従前に比して増大する。図 1-2 は側溝の設置で流出がどのように変化するかについて木下が行った試算の結果である。¹⁾ 1,000 m × 1,000 m の正方形の土地で、斜面こう配 1/500、斜面粗度係数 0.01 の土地に図 1-3 のように 10 本の側溝（図では 5 本）が設けられた場合の流量波形の変化をシミュレーションによって推定したものである。側溝によるピーク流量増大の効果が大きいことが窺われる。

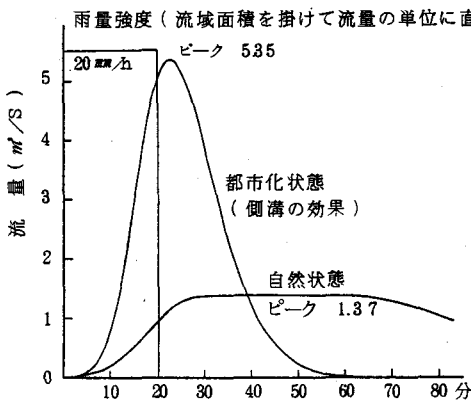


図 1-2 都市化のうち側溝の効果（木下）

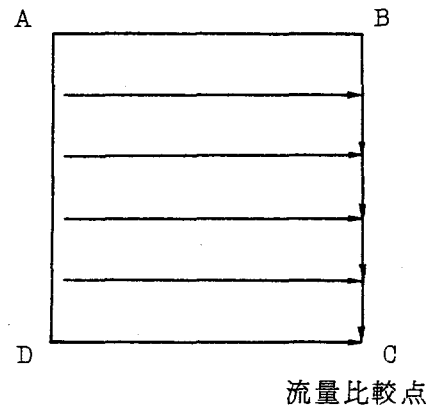


図 1-3 モデル的斜面（木下）

次に水質面から流域の開発に伴う水環境の変化を考えてみよう。

流域に住む人が多くなれば発生する汚濁量が大きくなるのは当然である。もちろん生産活動や人間生活によって発生する汚濁量は技術と経費の投入によってなるべく減少させることが必要であるが、それでも人間の営為がある限り汚濁は発生するであろう。しかしここで注意すべきは、発生した汚濁が河川や湖沼への汚濁負荷となるのは汚濁が水によって運ばれるからである。

以前には農家の裏手には「ため」があって農家からの排水はここに一時貯留された後、徐々に土壤に浸透していた。汚濁はこの場合河川への直接流出の経路をもたず、ためと土壤というフィルターにおいて浄化の

機会を与えられた後に河川に流出していたのである。ためはあまり衛生的ではなかったが、農村の小川は水がきれいで、そこに生育するせりなどを食するに心配することなどなく、夏には裸になって水遊びをするのに何のためらいもなかった。

開発によって設置された側溝や下水は、これも開発によって生じた降雨水の地表流出の強力な輸送力によって、開発地域で発生する汚濁（この中には街路樹の落葉なども含まれるのだが）を効率的に河川や湖沼に運ぶ役割をも荷うこととなったのである。図1-4は合流式下水道の吐口をもつ河川における雨天前後の底質の変化を調べたもので雨天後の晴天時にも汚濁流出の影響が残っていることを示している。²⁾

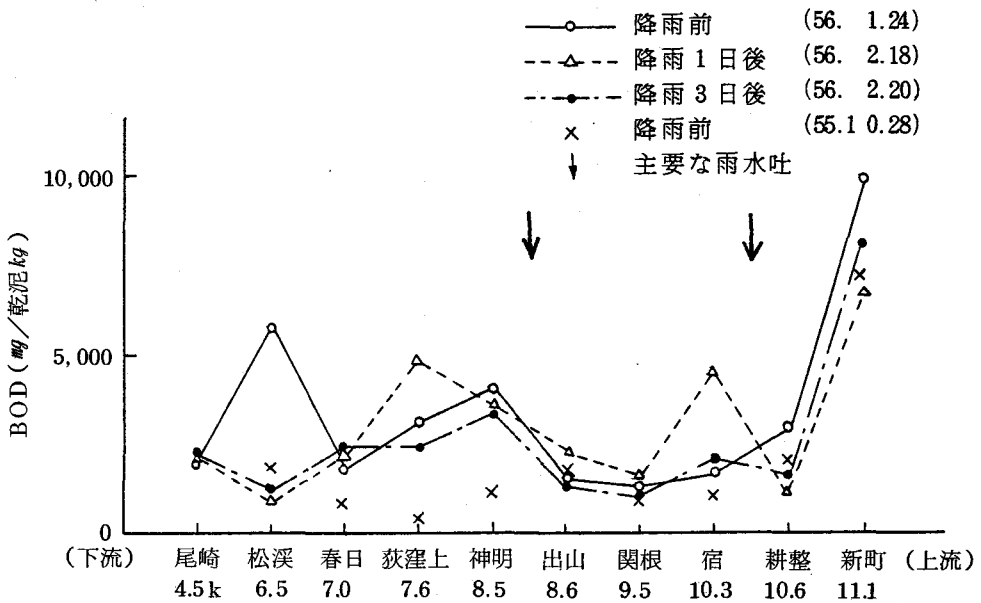


図1-4 善福寺川底質の変化

さて流域の開発によって生じる水循環の変化のうち洪水流量の増大に対しては、これまで主として河川改修によって河道の疎通能力を大きくする対策がとられて来たが、その他に流域における対策 — 流出抑制 — も実施に移されて来ている。その中心は防災調節池や現地貯留により流出を遅らせることであるが最近（土壌への浸透をはかって洪水時の流出そのものを減少させることも試行されるようになってきた。雨水を土壌に浸透させることは治水上の負担を軽くするだけでなく、汚濁の河川への流出を防ぐことになる。更に地下水を涵養して平常時の河川水を養うと言った具合に、開発による水循環の変化をいくらかでも緩和して水環境を保全する事に寄与する可能性が強い。³⁾

もちろん開発された地域で雨水を土壌に浸透させることは技術・経済・社会などの側面でいろいろ解決すべき問題のあることは確かであるが、その効用が単に洪水対策のみに限られずもっと総合的な機能を有していることを考えると、今後大いに研究を進める必要を感じるのである。

2. 土壌中の水の流れ

2-1 土壌の特徴

土壌は陸地の表層にあって、それ自体が植物や動物の生存にとって基本的な環境であるが、さらに水を受

け入れて貯留したり地下水を涵養するという重要な役割を果たしている。

土壌とは地層のうち「生物遺体ないしは腐植の集積・変化・分解，岩石の風化産物の分解，二次鉱物の生成，物質の移動や集積などが活発に進行している部位」をさす。

土壌は物理的にみると土粒子と間隙で構成されている。

全容積Vのうちで土粒子を除いた間隙の部分が全容積の何％にあたるかを示す数字が間隙率である。

林地や畑の自然な状態の土壌と造成したり盛土された地表面とでは間隙率が異なる。

表2-1 はいろいろな土質の間隙率の範囲を示す。

表2-2 は現地の畑で測った間隙率の実測値を示す。

表2-1 物質の間隙率（概根）

物	質	間 隙 率 (%)
関 東 ロ ー ム		65 ~ 85
シルト粘土		50 ~ 60
細	砂	40 ~ 50
中	砂	35 ~ 40
粗	砂	25 ~ 35
	礫	20 ~ 30
砂	礫	10 ~ 30
密 な 岩 石		< 1
割れ目のある風化した火成岩		2 ~ 10
透水性のいい新しい玄武岩		2 ~ 5
多孔質溶岩		10 ~ 50
凝 灰 岩		30
砂	岩	5 ~ 30
石 灰 岩		10 ~ 20

表2-2 畑土壌の間隙率（八幡）

沖 積 土 壌	44 ~ 68 %
洪 積 土 壌	40 ~ 58 %
砂質土壌および砂丘	40 ~ 56 %
火 山 灰 表 層 土	73 ~ 77 %
火 山 灰 下 層 土	78 ~ 83 %

表2-3 吸引圧と相当間隙径（八幡）

吸 引 圧	h cm	1	10	20	40	60	80	160		
	pF(= log h)	0	1.0	1.3	1.6	1.8	1.9	2.2		
相当間隙径 d mm		3.0	0.3	0.15	0.075	0.05	0.038	0.019		

土壌の間隙がどのような大きさのもので構成されているかは水の貯留や流動と大きな関係がある。

いま土壌を容器につめて吸引圧を少しづつ高めて水を除いていくと吸引圧に応じた水分量が土壌に残ることになる。いま間隙が毛細管で構成されていると仮定すると間隙の相当直径は表2-3のように表わされる。

吸引圧がおよそ60 cm (pFにして1.8)を境にしてそれより弱い吸引圧で排水されてしまう間隙を非毛管孔隙、脱水にそれ以上の吸引力を要する間隙を毛管孔隙という。

さて現地土壌には団粒構造と呼ばれる構造が存在する。それは微小な粒子が周囲より強固な力で結合して団粒 (aggregate) と呼ばれるより大きな粒子を作り出し、土壌全体がそのような団粒の集りできているような構造をさしている。(図2-1)

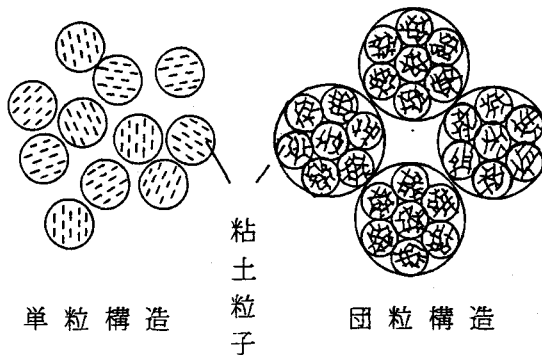


図2-1 土の単粒構造と団粒構造(服部^⑫による)

団粒構造がよく発達した土では、団粒の中の土粒子間の間隙の他に相隣る団粒相互間にもっと大きな間隙が加わる。後に紹介するように一見水を通しにくいと思われるシルト質やローム質の土壌が実際には水をよく通し、又貯留することが出来るのはこの団粒の作用に他ならない。

団粒構造は圧力を加えられると容易に破壊される。とくに土壌間隙に水分が多いときは団粒間の結合力が失われるため団粒構造が破壊されやすい。

土壌の浸透能力や浄化能力はこの団粒構造の存在に負うところが大きい。従って土壌にこのような機能を期待するときは、造成にあたって過度に締め固めないこと、或は工事にあたって重機械の近接を避けること等の注意が必要になる。

さて土壌の間隙には主に①水、②空気、③生物が収容されている。

土壌中の水分を分類すると次のようになる。

土壌中の水	{	結合水
		自由水 { 懸垂水 重力水

結合水は土壌の固相表面の物体吸着力に基くもので土壌に強く保持されている。

自由水は土壌間の間隙に収容されており毛管力や重力の作用をうけて流動する水分であって土壌水と呼ばれている。

土壌中の間隙のうち水が占めていない空間には空気が存在する。間隙のすべてが水で占められているとき土壌間隙は飽和状態であるという。間隙に空気が存在するときは不飽和状態 (unsaturated) という。

土壌間隙に空気が存在することは、それが水に代り得るという意味で水の貯留機能にとって重要である。

しかし土壌で有機物等の分解を期待する場合には、分解が好氣的に行なわれるという点や目づまりの急速な進行を防ぐという点でやはり空気の存在が重要になる。

土壌間隙内の空気の圧力は、大気と通じているときは同じ圧力となるが、毛管力で支えられている水に囲まれているときは一般に大気より小さい圧力 (負圧) となる事に留意したい。

最後に土壌間隙内の生物について説明しよう。

土壌中には生物遺体や腐植が集積していることは先に述べたが、これらを栄養とする土壌微生物 (糸状菌、藻類、原生動物、細菌) や小動物 (アメーバ、線虫、ミミズ、ダニ、ワラジムシ) が食物連鎖を形成して存在する。また生きている植物の根が栄養を吸収している。

これらの生物は栄養の供給増加に応じて繁殖が盛んとなる傾向がある。例えば土壌中での有機物の分解速度は有機物濃度の増大とともに大きくなることがわかっている。

土壌内の間隙のその大きさは広い範囲に分布しているが、とくに団粒内部は外部と隔絶されているため細菌などの微生物にとっては最も安定した「棲み家」となっているようである。

おわりに土壌粒子の表面積について述べよう。詳しいことは成書に譲るとしてその結果だけを紹介すれば土壌固相のおおよその表面積は次のようになっている。

砂 質 土	数 m^2/g 程度
粘 土	100 m^2/g 程度
関 東 ロ ー ム	300 m^2/g 以上
ベントナイト	500 m^2/g 以上
活 性 炭	1,200 m^2/g

(八幡：土壌の物理, より)

2-2 不飽和帯の透水性

外から土壌内に水を移動させることを浸透 (infiltration) という。地表面からの浸透に関しては土壌物理学や農業土木、水文学の分野でかなり研究されて来ているが、地表面をバイパスして管によって直接水を供給することはこれまで行なわれておらず、研究者にとっても新しい課題である。しかし水の流れを記述する基本的な式は地表面からの浸透と殆んど類似である。⁴⁾

飽和状態の流れに対してはいわゆるダルシー則が成立する。

$$q = -K_0 (\nabla \varphi + \nabla z) \quad (2-1)$$

ここに q : 見かけの流速

K_0 : 飽和透水係数

φ : 圧力のポテンシャル

z : 位置のポテンシャル

不飽和状態の場合には空気による浸透流路の遮断や浸透断面積の減少、或は空気の作用等があるためその流れは複雑であるが、土壌の間隙は飽和状態になったり不飽和状態になったりを繰り返すので、その基礎式が同一の式形をもつことは解析上好都合である。そこでリチャーズは飽和流に対してのダルシー式に準じて飽和・不飽和に共通する流れの基礎式として次の式を仮定した。

$$q = -K(\theta)(\nabla\varphi + \nabla z) \quad (2-2)$$

ここに $K(\theta)$: 土壌含水量に応じた透水係数, ふつう不飽和透水係数と呼ばれる。

θ : 含水量

飽和状態の場合に倣って流れの非定常連続式に代入すると(2-2)式は次のように飽和・不飽和を通じた流れの基礎式(リチャードのポテンシャル方程式と呼ばれる)が得られる。

$$\nabla \left\{ K(\varphi)(\nabla\varphi + \nabla z) \right\} = C(\varphi) \frac{\partial \varphi}{\partial t} \quad (2-3)$$

ここに $C(\varphi) = \frac{\partial \theta}{\partial \varphi}$ であって比水分容量とよばれる。

不飽和透水係数 $K(\varphi)$ の吸引圧に対する変化は土壌の種類によって異なる。

図2-2はバウアーが砂・ローム・粘土に対して示した不飽和透水係数変化の概念図であって, 砂の場合には吸引圧の増大に伴ってその透水係数が急激に減じるのに対しロームや粘土では吸引圧がある程度まで(この場合は100 cm位)大きくなっててもその透水係数は飽和時($\varphi = 0$)の値と同一で, 吸引圧がこれより大きくなる場合に透水係数が小さくなるとしている。

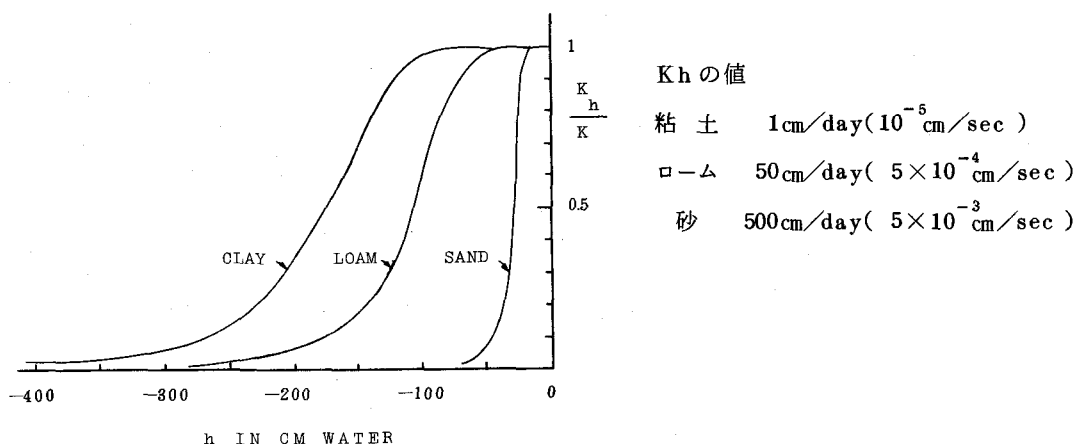


図2-2 不飽和透水係数の変化概念図
(K_h は飽和時の透水係数, Bouwer ⑦)

しかしこのような透水係数変化の傾向は多分に室内での透水試験に基いて得られた知見であって関東ロームなどの現地土壌が有する大きな透水係数の値を説明することが出来ない。(表2-4)

図2-3は現地において自然のままの状態です透水試験を実施した場合の透水係数の変化であって, 吸引圧が小さい範囲でも, ローム, 粘土の透水係数が砂のそれと同じように飽和に近づくに従って急激に大きくなっていく傾向を捉えている。

このように現地土壌の透水係数を室内試験で測定することは団粒構造が破壊された状態での測定となりやすく現地の真の透水係数を推定できない可能性がある。

表 2-4 関東ロームの飽和透水係数測定例⁴⁾

採 土 地	深 さ (cm)	構 造	間 隙 率 (%)	飽和透水係数 (cm/sec)
農 大 (表 土)	0	団 粒 状	76	2×10^{-2}
〃 (心 土)	80	カ ベ 状	83	3×10^{-2}
宇 都 宮 大 (心 土)	100	カ ベ 状	78	4×10^{-2}
〃 (鹿沼土)	240	団 粒 状	87	1.5×10^{-1}

現地における透水係数の測定は高度な技術と手間を要する。そこで雨水浸透の計画をたてる場合には、実施しようとする現地において実物の浸透施設を小さい延長で実際に設置してみてその能力を測定することが最も確実である。

3. 雨水浸透工法

3-1 雨水浸透の方法

地下水涵養の方法としてこれまで採用されてきた方法としては、①浸透池法、②井戸涵養法が挙げられる。

浸透池法は最も普通に行なわれている方法で専用の池を設けて水を浸透させる。目づまりが生じた場合には水を落した上で底質のかき取りを行う。

ニューヨーク州のナソー郡は地下水涵養を目的として開発地域の雨水を浸透池によって浸透させることを義務づけている。

井戸法は水を直接帯水層に送りこもうとするもので、目づまりの発生に対して有効な回復法がないのが難点である。良好な水質の水を礫質などの帯水層に注入する場合には目づまりが少なく有効な方法となる。住宅都市整備公団は東京都下の住宅団地の屋根及道路への雨水を井戸によって礫層に注入している。既に10年以上経過している例もあるが良好に機能が確保されている。

これに対して雨水を土壤に供給する方法が最近考案されている。その方法は、①透水性舗装、②地下埋管（浸透トレンチ）、③浸透樹、④浸透U字溝などである。

土が露出している地表は目づまりを起しやすい。これは地表面が水びたしになることによってスレーキングと呼ばれる現象が生じ、団粒が壊われて細粒土が細かい空隙をふさぎ地表面に目づまりしたクラストを作るためと理解されている。上記工法は地表面を保護して目づまりを起しにくくしたり、地表面をバイパスして直接土壤中に供給することにより目づまりを起しにくくしている。

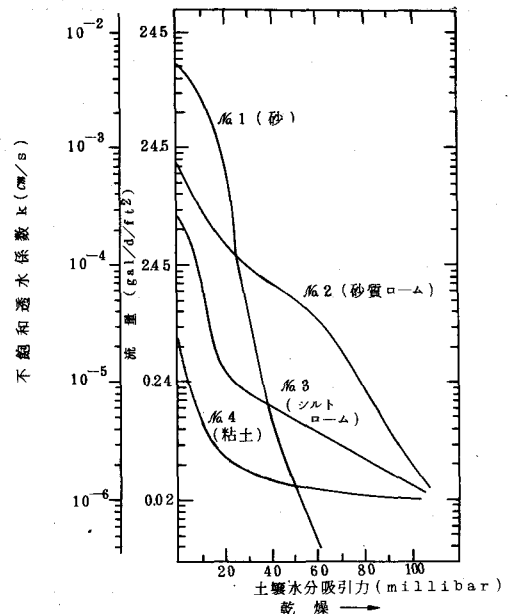


図 2-3 不飽和透水係数の変化 (Keeney, et al., 1975)

最近施工されている人工芝を利用した浸透も土壤に水を供給する方法である。

土壤は先に述べた如く間隙が大きいので貯留作用が大きい。基盤地層の透水性がそれほど大きくなくても水は表層の土壤に一時貯えられ、その後徐々に降下して空隙が回復される。時おり起る降雨のような水を浸透させるのに土壤は適している。

土壤に水を供給する4つの工法のうち地下埋管法は施設の大部分が地中にあるため地表面積を占有することが少なく、その延長を適当に定めることによって所要の浸透能力を確保するように計画することが出来る。

地下埋管による浸透は新見正氏が汚水処理の分野で考案した図3-1のような地下トレンチ法にヒントを得て考案したもので図3-2のようなタイプが考えられる。⁵⁾

タイプ(a)は単にパイプを地中に埋め、同じ土で埋戻したものである。パイプとしては面的に多数の穴を有した有孔管や空継ぎの土管が用いられる。パイプから土壤中に供給された水は、土壤中の大きい間隙を経路として利用し、主として重力の作用によって降下して行く。

タイプ(b)は管のまわりを砂や礫のような透水性のよい材料で置き換えたものであって浸透能力の向上と目づまり防止を狙っている。

タイプ(c)は埋管の下にトレンチを有するもので汚水処理分野で使用されているタイプである。埋管から一たんトレンチに供給された水は毛管力によって上方に移動し土壤帯に至る。この工法では浸透速度に限度があり、一定以上となればタイプ(a)と同様重力の作用で水が移動するようになる。

以上のように地下埋管法の構造は簡単なものであるがこれらの浸透能力は決して小さくない。

図3-3は、関東ロームで被われた深谷地区におけるタイプ(a)の地下埋管の現地実験の結果である。これによると埋管

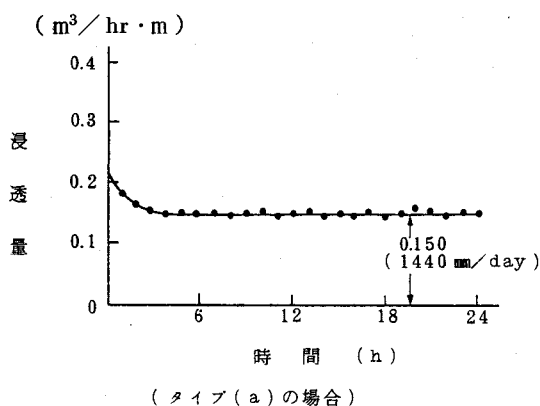


図3-3 地下埋管の浸透能力

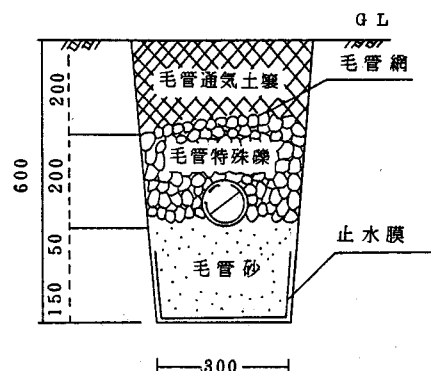


図3-1 汚水処理分野で用いられている地下トレンチ

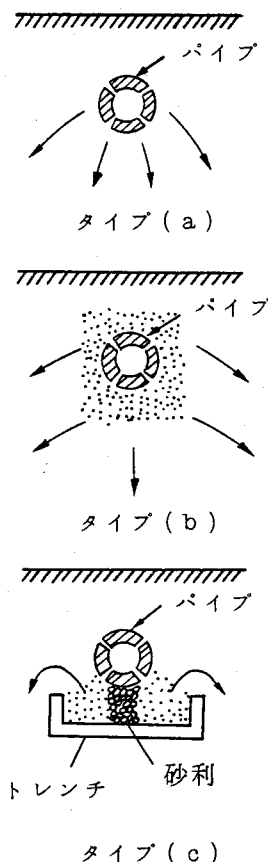


図3-2 地下埋管の種類

1 mあたりの浸透量は $0.150 \text{ m}^3/\text{hr} \cdot \text{m}$ となっている。この実験では2.5 m間隔で埋管を配置しているので、単位面積あたりの浸透量は $60 \text{ mm}/\text{hr} = 1,440 \text{ mm}/\text{day}$ に相当する。この値は水田の減水深（10～50mm/day程度か）や裸地の浸透能力（100mm/day程度か）に比べると非常に大きいように見えるが、適正に管理された浸透池では、実績値として1～2m/dayくらいの涵養能力が見られるので、それほど不思議なこととは言えない。ただ、わざわざ地表を占用する浸透池をもたずに棟間や庭や農地等の地下を利用するだけで、浸透池と同レベルの浸透能力を期待できる点に魅力が感じられるのである。

上記の $1,440 \text{ mm}/\text{day}$ という浸透能力は透水係数に換算すると $k = 1.6 \times 10^{-3} \text{ cm}/\text{s}$ に相当し、表2-4の測定例から見れば充分にうなずける値である。

3-2 雨水浸透の計画

雨水浸透技術が実際に適用されだしてからまだ日が浅いが、実務者の努力で設計を進めるにあたっての手順が確立しつつある。もちろん今後得られる知見で変わっていく可能性はあるが、現状では大変参考になると思われるので紹介する。⁶⁾なおここでは地下埋管について住宅・都市公団が行っている設計手順を紹介するが、他の工法についても同様の方法が使用できよう。

(1) 単位設計浸透量

$$f_c = C \cdot y (1 - D - E) I_r \quad (3-1)$$

ここに f_c : 単位設計浸透量 ($\ell/\text{hr} \cdot \text{m}$)

I_r : 現地注入試験による終期浸透量 ($\ell/\text{hr} \cdot \text{m}$)

D : 降雨による影響

y : 供用期間中の目づまりによる影響

E : 地下水位の影響

C : 安全率

(2) 終期浸透量の試験

単位設計浸透量を決定する最も大きな要因は、浸透を実施しようとする現地土壌の透水性と浸透施設の形状・諸元である。

現地土壌の透水特性は、前章で述べた如く、室内の土質試験だけでは把握できないのが現状である。

一方、浸透施設の形状・諸元についても、どのようなものが最も効率的か、現状では決定できず、標準的な形状・諸元は、今後の研究や試行による調査に待つべきであろう。

そのため、現状では、直接現地において実施しようとする実物大の浸透施設を小さい延長で設置して、その測定値をもとにして浸透量を決めることが必要と思われる。浸透量は時間的に変化するので、浸透量がほぼ一定となる終期浸透量を採用することが安全側である。

(3) 目づまりによる影響

目づまりは時間とともに進行して、浸透能力は設置当初に比べてしだいに減少していく。

土木研究所は、目づまりを発生させる汚濁負荷の主要なものとしてSSをとり、相対浸透量 y とSS累加量 x (kg/m)との関係を調べた。その結果、式(3-2)のようになることがわかった。

$$y = e^{-0.015x} \quad (3-2)$$

一方、SSの累加量は式(3-3)のように表わされる。

$$X = S_0 \left(\frac{Af}{L} \right) R_0 T \quad (3-3)$$

ここに X : SS 累加量 (kg/m)

S_0 : 流入雨水の SS 濃度 (kg/m^3)

Af/L : 浸透施設密度 (m^2/m) ($=1\text{m}$ の地下トレンチが担当する集水面積)

R_0 : 年間総降雨量 ($\text{m}/\text{年}$)

T : 供用年数 (年)

年間降雨量や流入雨水の SS 濃度は場所によって変化すると思われるが、いま試みに東京都内の実測例 ($R_0 = 1.5\text{m}/\text{年}$, $S_0 = 0.0748\text{kg}/\text{m}^3$) について、供用期間ごとの相対浸透量を計算してみると表 3-1 のようになる。

表 3-1

設置密度 m^2/m \ T (年)	1	3	5	10	30	50
5	0.99	0.97	0.95	0.91	0.77	0.65
10	0.98	0.95	0.91	0.84	0.60	0.43
15	0.97	0.92	0.88	0.77	0.46	0.28
20	0.96	0.90	0.84	0.71	0.36	0.18

(4) 降雨による影響

降雨のあるときは、地下埋管からの浸透量が小さくなることが心配される。図 3-4 は降雨によって地表から $5\text{mm}/\text{hr}$ の雨水浸透がある場合の浸透量をシミュレーションによって推定したものである。これを見ると、降雨のために浸透量は $50\text{mm}/\text{日}$ 、すなわち $2\text{mm}/\text{hr}$ 程度減少していることがわかる。

(5) 地下水の影響

地下水位が高いときは、浸透量が小さくなることが心配される。

図 3-5 はシミュレーションによって求めた地下水位と浸透能力との関係である。浸透能力は、トレンチから地下水面までの距離 H によって影響を受け

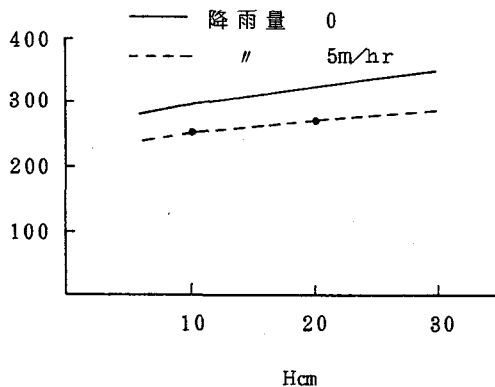


図 3-4 降雨の場合の浸透量の変化 (シミュレーション)

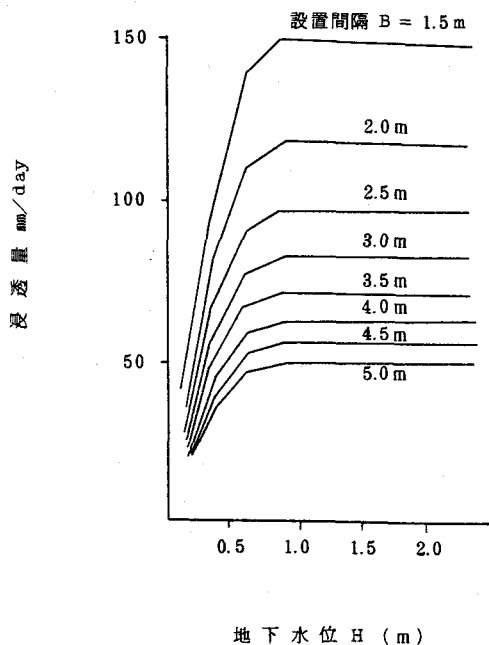


図 3-5 地下水位と涵養高

るが、 H がある程度以上大きくなれば、その影響は小さくなる。このシミュレーションの場合には、水位差 H が 1 m 以上あれば、浸透能力は地下水位と無関係になることが推定できる。

4. 土壌による水質浄化

汚水を土壌の表面に散水して水質の浄化を行う方法は土地灌漑法と呼ばれており、下水処理法のうちでも最も古いものの一つであろう。

とくに土壌は水と比較して有機物に対する許容量が大きい。水中では有機物の存在が ppm のオーダーで問題になるが、土壌中ではその 1,000 倍程度の有機物を含有させることができる。土壌中における有機物の分解速度は、土壌中の有機物量にはほぼ比例する。従って土壌は有機物の分解・浄化の場として水中に比べて極めて高能率でありかつ生じる問題も小さいと言える。もちろん土壌有機物の年令を ^{14}C 年代測定法で調査すると数百年から数千年の値になるという調査があるように、有機物の中には安定度の高いものがあるため分解に長年月を要することもあることは知っておく必要がある。

土壌はまた窒素・リンなどの栄養塩類を減少させる効果もある。

このように土壌の浄化能力は大きいですが、その一方で土壌の受け入れ能力は無限ではないし、地下水の汚染等の心配もある。従って土壌の浄化機能を活用するときは計画上十分な検討を行うとともに維持管理にも十分に注意することが望まれる。

4-1 土壌の浄化機構⁷⁾

土壌の浄化機構を大別すれば①吸着、②濾過、③分解、④植物への取り込みとなる。

① 吸 着

土壌固相の表面には物理的・化学的に各種の分子・イオンが吸着される。粘土やシルトの単位体積あたりの表面積が大きいことは先に述べた通りである。粘土の場合にはイオン置換によって負に帯電するので陽イオンを吸着する。更に土壌に有機物が供給されると活性の高い腐植コロイドが生じクーロン力によって陽イオンを吸着する。このように土壌は NH_4^+ や K^+ などの陽イオンを吸着するが、一方アルカリ性の場合には PO_4^{3-} や NC_3^- などの陰イオンが吸着される。

② 濾 過

排水中の固形物は土壌を通過する際に土壌表面に堆積・附着して捕捉される。

土壌中に捕捉された固形物のうち有機質のものは分解されていくが無機質のものは土壌中に蓄積していく。このため沈澱を主体とした前処理を行うことが普通行なわれ、このことによって土壌での処理量も増大させることが出来る。

③ 分 解

土壌中の間隙には動物・微生物が棲息しており、通気性がよいことにも助けられて有機物を分解する役割を果たしている。

土壌中に供給される有機物には、糖類・デンプン・タンパク質・脂肪・セルローズ・ヘミセルローズ・リグニンなどが含まれている。

糖類・デンプンなどは土壌動物（ミミズ・ダニ・アリ）や微生物によって分解される。

セルローズ・ヘミセルローズは糸状菌・細菌によって分解される。

タンパク質は土壌微生物により分解され、さまざまな中間段階を得て最終的にはほとんどアンモニアに変る。次に窒素について考えてみよう。

排水中に含まれるアンモニアやタンパク質を起源とするアンモニアは細菌によって酸化され、安定な硝酸になる。水中の窒素はアンモニア性のときは酸素を消費し、メタンガスを発生させるなど環境面で害が大きいが硝酸性になることによってその害は比較的小さなものとなる。硝酸性窒素は条件によっては脱窒菌の作用で窒素ガス N_2 に還元され大気中に戻される。水田では好気的な表層の下位に還元層と呼ばれる嫌気性細菌の活動する土層があって脱窒が行なわれていることはよく知られている。一般の土壌においても団粒内部は空気の流通は小さい間隙を通じて行なわれるため酸素不足が生じて脱窒細菌などが活動できることも報告されているが、詳細についてはよくわかっていないようである。

④ 植物への取り込み

植物はその成長のために窒素・リンなどの栄養を必要とする。植物体が栽培植物や生産樹木の場合にはこれらの物質は植物体に取り込まれた後、土壌から取り去られることになる。一方農業経営の面からみると土壌を利用した水質浄化は植物への過度の栄養補給となってマイナスに働く場合もあり、更に消費者に対して心理的な影響を与える場合もあるので実施には慎重な配慮が必要となる。

4-2 地下水への影響

土壌で処理された水は普通降下して地下水を涵養する。土壌での処理が不十分の場合には地下水の汚染が心配される。汚染要因として有機物・窒素・リン・病原体などを取って考えてみよう。

有機物は前節で説明したように土壌の分解能力が極めて大きいので、良好な土壌を経た浸透水は有機物をあまり含まない。事実地下水の水質を検査すると、CODについて1 ppmを越える地下水は市街地などを除けばほとんど検出されない。

リンについても同様であって土壌の吸着によるリンの除去率は80~100%と極めて高いのが普通である。

以上のように有機物、リンに関しては地下水汚染として問題となることはこれまでほとんど報告されていない。ただし、以上は排水が良好な土壌を通過した場合について言えることであって、土壌の透水性が非常に高い場合や土壌層の厚さが小さい場合には必ずしも十分な浄化が期待できないことに注意する必要がある。また、「吸い込み井戸」などによる浸透も地下水への直接の水みちが形成されやすく、十分な浄化が期待できない場合がある。

次に窒素に関して、考えてみよう。

先にも述べたように良好な土壌を通過した排水中の窒素はかなり速く硝酸性になるが、更に還元されて窒素ガスに還元されることは常に期待できないので、地下水中には硝酸性窒素が補給されることになる。硝酸性窒素が存在することの問題点はまだ明確ではないようであるが、水道法に基く水質基準では亜硝酸性窒素と硝酸性窒素の合計濃度を10mg/l以下と定めている。

次に病原体による地下水汚染については赤痢・腸チフスなどの伝染の可能性があり重要な問題である。病原体としては細菌、ウイルス寄生虫があり、いずれも土壌に散布された後死滅あるいは不活性化されていくが、その速度は散布の方法・病原体の種類、環境条件で異なり、感染力を保つ期間が変化する。

図4-1は土壌におけるウイルスの挙動の一例であって鉛直方向に1.6 mを通過することによってウイルスが1/1,000(除去率99.9%)となっていることが分かる。

大腸菌群についても同様の土壌吸着の効果が認められている。

以上のように土壌は病原体を除去する効果が大きいのが現実には汚染源周辺の井戸から細菌やウイルスが発見される。

窒素および病原体による地下水汚染の問題は現在研究が進行中であるが、その対策として土壌処理施設の密度と必要な土壌層の厚さに関して一定の基準を設けることが行われている。

我国の場合には地下水を飲用水源として利用してきた歴史もあり、地下水を清浄な水質に保全したいと考える人が多い。そのため地下水への影響を排除するため、土壤中で浄化した水をビニールシートやコンクリート床で再び集水して地表水として放流することも行なわれるようになった。

4-3 土壌の目詰まり

有機物を含む水を土壤に浸透させるとしばしば目詰まり (clogging) が生じる。目詰まりによる浸透能力の大巾な減少は土壤処理システムにとって重大な問題である。

図4-2は室内実験によって目詰まりの進行を見たものである。⁹⁾ 目詰まりによる浸透能力の減少は最初は徐々に進行するが、透水性がかなり減少した段階 (この場合には浸透量が 0.4 l/min になった段階) から浸透能力が急激に減少する。後段の急激な目詰まりは有機性の固形物の沈澱がバクテリアの繁殖をもたらし、これによって形成された生物膜 (スライム) が土壤の間隙をふさぎ、浸透能力を大巾に減少させたものと理解されている。

ところが目詰まりの原因となっている生物膜は水中においては体積が大きい、周囲の水が排水されて乾燥状態に置かれると固相から剥落したり、その体積を減じたりする。酸素の大量の供給が分解を早めることもあろう。こうして目詰まりが生じた土壤は水の供給がとめられることによって目詰まりが解消しその浸透性を完全ではないにせよ回復するのである。

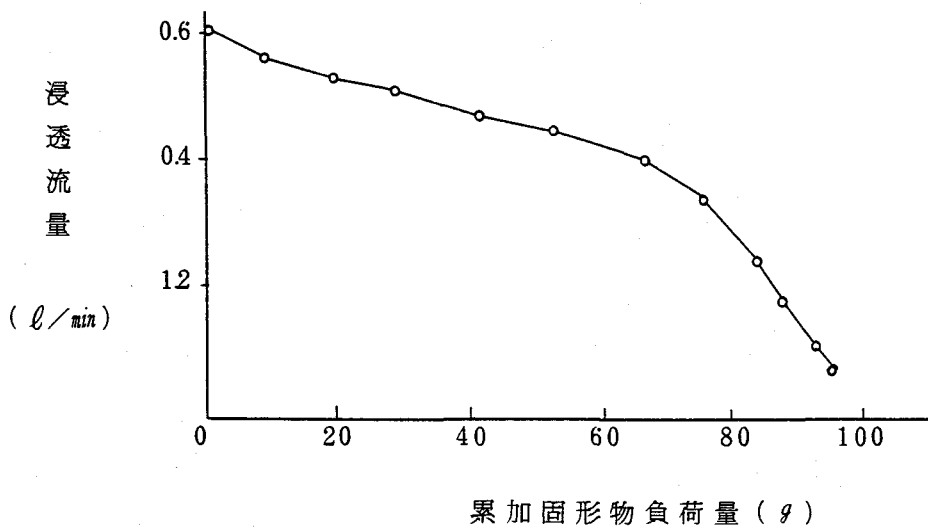
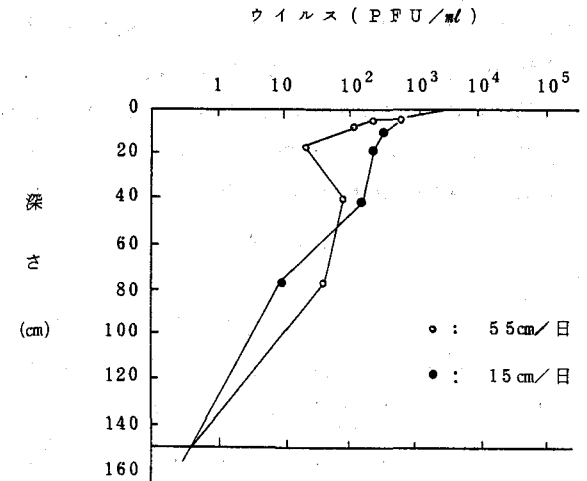


図4-2 固形物負荷量と流量変化



注：9日間浸透，5日間乾燥サイクルにおける3回の平均値

図4-1 土壤カラムの深さとウイルス濃度 (高木)⁸⁾

このように排水の供給を連続ではなく間欠的に行うこと—ある時間給水をつづけたらしばらく休み、また給水を行うという具合に給水、停止を繰返しながら行うこと—は土壌の浄化機能を維持する上で大変効果的な方法である。

この点に関して高橋一三氏が興味ある研究を紹介しているので引用させて頂く。

図4-3は一定濃度汚水（BOD 90mg/ℓ，SS 46mg/ℓ）を使用して、水量負荷を40mm/日に一定し、間けつ給水を1回/週，3回/日，6回/日とかえて処理効果を比較したものである。¹⁰⁾ 効果の指標としてはABS（アルキルベンゼン・スルフォネートの略）の除去率がCOD除去率に比例することを利用してABS除去率を採っている。これを見ると間けつ給水回数が多いほど除去率が高くなっていることがわかる。

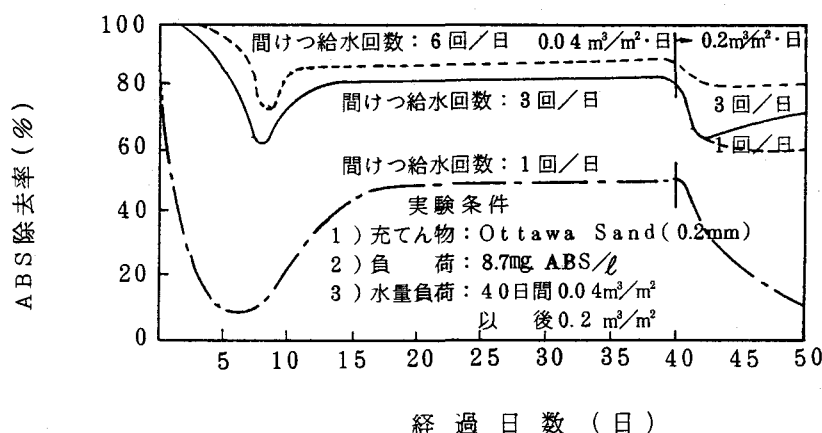


図4-3 間けつ給水方式の効果 (Gordon, G.Robeck)

一方2年以上の長年月の浸透の場合、浸透能力が低下しないのでその機能が維持される場合も多いが、他方徐々に浸透能力が低下し、ついに所期の能力が確保されなくなるケースも多数見られており、土壌処理は目詰まりの防止の観点から計画と管理に慎重な配慮が必要である。

4-4 各戸型土壌処理の例（セプティクタンクシステム）

アメリカ合衆国の全国の約30%においては家庭排水はその近傍で戸別に処理されている。これら各戸処理のほぼ98%は一次処理としてセプティクタンクを、二次処理として土壌浸透（Soil Absorption）を利用して全体をセプティクタンクシステム（STSA System）と呼んでいる。この方式の典型的な例を図4-4に示す。

セプティクタンクは図4-5のような構造をもっている。家庭からの排水（し尿と雑排水）がこのタンクに流入すると油分とスカムが浮上し、固体粒子は底部に沈澱し汚泥層を形成する。スカム・汚泥は3～5年に1回の間隔でポンプで汲み上げられる。

土壌浸透は図4-6のようなトレンチによって直接地中から浸透させる方式となっている。浸透性が大きい土壌でも礫で置換えた部分と土壌との境界面で生物膜が形成されるため浸透性は1日あたり30～50mm程度になる。

表4-1はセプティクタンクシステムからの処理水の水質の一例を示している。トレンチより1m深い位置においてはBOD・SS・大腸菌・ウイルス・アンモニア・リンなどがこの場合には十分に除去されていることがわかる。しかし硝酸はかなり存在しているので面積あたりの浸透量が大いときは地下水の硝酸濃

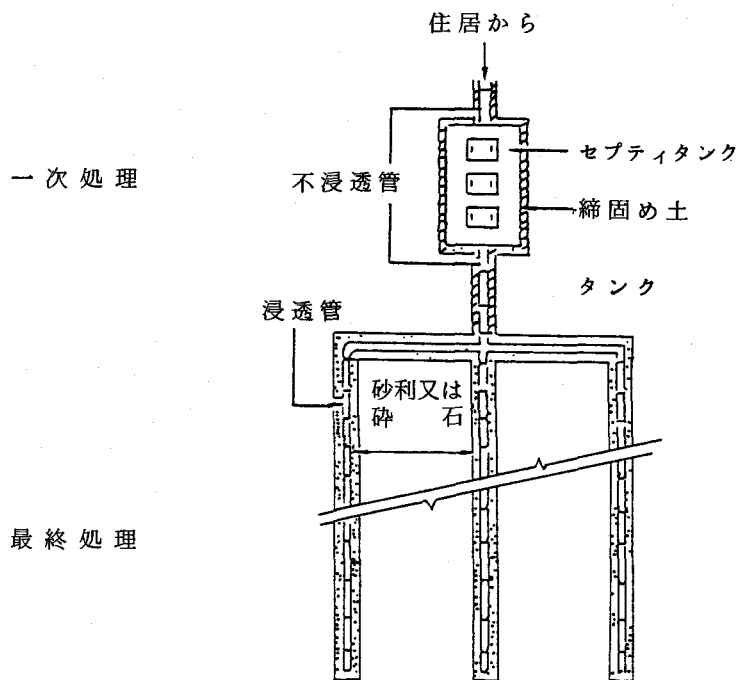


図4-4 現地排水処理システム

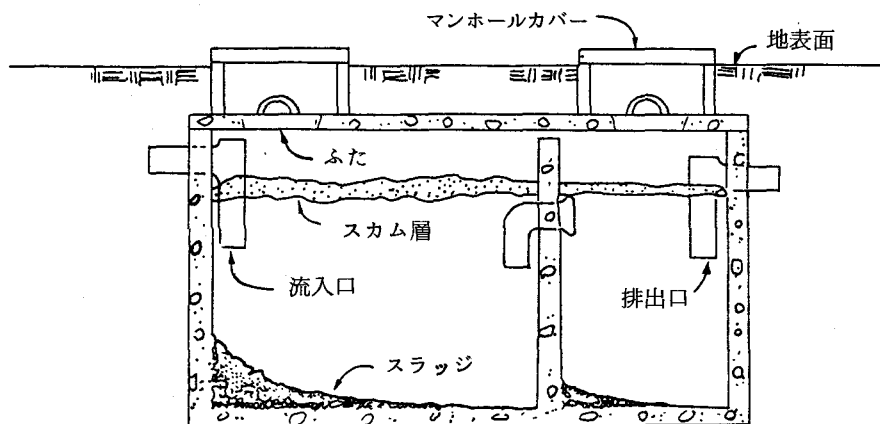


図4-5 セプティックタンク

度が高くなるであろう。窒素除去はこの場合には全体で $1/2 \sim 3/4$ の除去率となっている。

土壌がシルト質・粘土質である場合には透水性が小さくて面積あたりの処理水量があまり期待できない。一方浅い位置に亀裂のある岩盤・礫層などが存在する場合には排水は飽和帯に急速に浸透しバクテリア・ウイルスその他の汚染物質が直接地下水に流入する心配がある。

このように地形・地質の状態に応じていろいろな土壌浸透の方式が用意されている。図4-7はこの内のマウンド方式を示しており米国内の多くの地域で利用されて成果を挙げている。

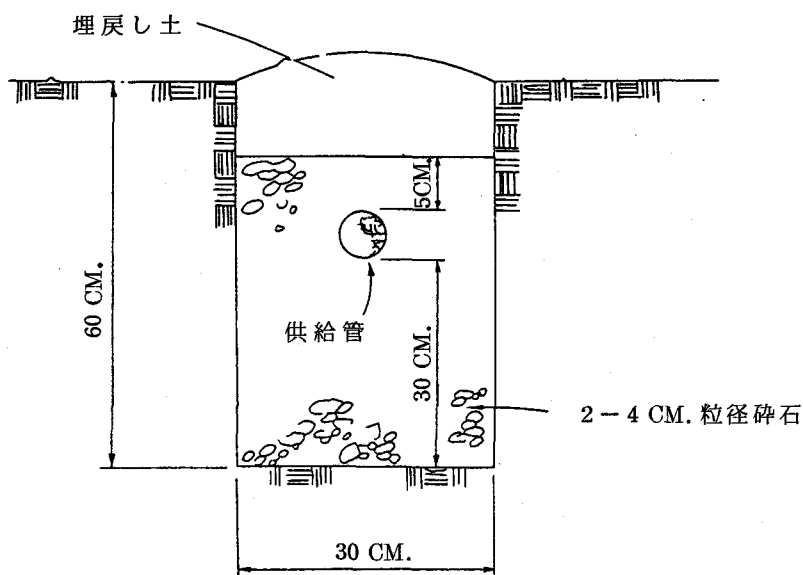


図4-6 浸透トレンチ

表4-1 セプティクタンクシステムからの処理水の水質^a

	流 入 水	セプティクタンク からの 流 出 水	トレンチ下 30 cm	トレンチ下 90 cm
BOD ₅ , mg/ℓ	270 - 400	140 - 175	0	0
SS, mg/ℓ	300 - 400	45 - 65	0	0
大 腸 菌 群				
MPN/100ml	$1 \times 10^6 - 1 \times 10^8$	$1 \times 10^3 - 1 \times 10^6$	0 - 100	0
ウイルス PFU/ml ^b	Unknown	$1 \times 10^5 - 1 \times 10^7$	0 - 1,000	0
窒 素				
全 窒 素	100 - 150	50 - 60	—	—
アンモニア性 (NH ₄ ⁺)	60 - 120	30 - 60	B - 60 ^c	B
硝 酸 性 (NO ₃ ⁻)	< 1	< 1	B - 40	B - 40
全 リ ン				
mg/ℓ	10 - 40	10 - 30	B - 10	B - 1

a. Hansel et al., 1980.

b. PFU = plaque forming units.

c. B = background.

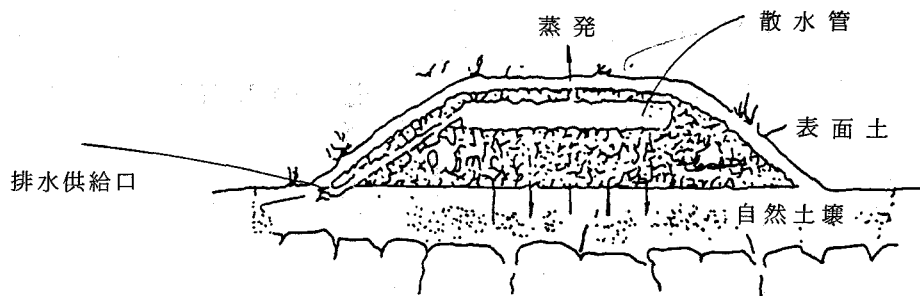


図4-7 マウンド方式

土壌処理方式の一つとしてアメリカで広く行なわれている方式を紹介したが我国でも新見氏が考案した方式が10年以上の使用実績を有するに至っている。

以上は各家庭からの直接の排水であってかなり高濃度の排水を対象としたものであるが、土壌を利用した水質浄化は下水処理水のような中濃度の排水を対象とした場合も技術開発が進められており、アメリカのマスキーゴン郡の場合のように10年以上も安定して良好に稼動している例がある。¹⁰⁾

これらの動向は最近発表された「自然浄化機能を活用した水質の改善方策に関する調査報告」に要約されているのでここでは割愛する。

5. おわりに

人為による地表形態の変化が水の循環経路を変え、又人間活動が水質汚濁問題を発生させている。その対策として土壌が大きな役割を果たす可能性を秘めている事がご理解頂ければ幸いである。

土壌を水環境の保全という工学的な観点から見た場合我々の保有している知識はまだまだわずかであって、土壌物理学、土壌微生物学、農業水文学、衛生工学などの知識を借りながら浸透・浄化の機構とその応用を解説すべく努力してみた。筆者の浅学のため意外な誤りや見落としがあるかも知れないと恐れている。ご指摘頂ければ幸いである。

水に関する問題は上流・下流の対立、原因者と被害者の対立などを招きやすいが、土壌を利用する技術は発生源における問題解決に寄与する可能性がある。河川改修・下水道敷設のような従来手法と補完し合って効果的な水対策が生まれることを期待したい。

参 考 書

- ① 八幡敏雄著：「土壌の物理」 東大出版会（1975）
- ② Loehr et al. : Land Application of Wastes, Van Nost. Rein. Co. (1979)
- ③ 山崎不二夫編：「水資源を考える」 三共出版（1981）
- ④ 高橋一三著：「土壌の汚染と浄化作用」産業用水調査会
- ⑤ 新見 正, 有水 彊：「汚水の土壌浄化研究 — 総論 — 」毛管浄化研究会（1977）
- ⑥ 日本学術振興会「水 — その学際的アプローチ」丸善（1983）
- ⑦ Bouwer : Groundwater Hydrology, McGraw-Hill Book Co. (1978)
- ⑧ 榎根 勇：「水文学」大明堂（1980）

- ⑨ 力石定一：「日本経済の条件」読売新聞社（1976）
- ⑩ 半谷高久，加藤 迪編「水とつき合う」化学同人（1983）
- ⑪ 押田勇雄編「都市の水循環」日本放送出版協会（1982）
- ⑫ 服部 勉「大地の微生物」岩波書店（1972）
- ⑬ 古坂澄石「土壤微生物入門」共立出版（1969）
- ⑭ 洞沢 勇「排水の生物学的処理」技報堂（1976）

参 考 文 献

- 1) 木下武雄「都市化による流出の変化」土木技術資料 9－9（1967）.
- 2) 馬場洋二・益倉克成・谷本光司・山守 隆「合流式下水道敷設河川・未敷設河川における水質・底質の比較」土木技術資料 23－7（1981）
- 3) 石崎勝義「雨水浸透による水環境の保全」月刊下水道 5－4（1982）
- 4) 石崎勝義・北川 明「地下埋管からの浸透機構とその応用に関する研究」土木研究所報告第 161 号（1984）
- 5) 石崎勝義・寺川 陽・石原 旭・長沢靖之「雨水の地下浸透処理による流出の抑制」土木学会誌（1982）
- 6) 石崎勝義「雨水浸透技術の現状と課題」月刊下水道 6－14（1983）
- 7) 科学技術庁資源調査所「自然浄化機能を活用した水質の改善方策に関する調査報告」（1984）
- 8) 高木兵治「処理下水の農業利用における衛生的問題点の動向（Ⅰ），（Ⅱ）」用水と廃水，24－2, 3（1982）
- 9) 建設省下水道部訳アメリカ環境庁「プロセスデザインマニュアルー都市廃水の土壌処理用ー」（1977）