

ISSN 0386-5878  
土研資料 第1590号  
マイクロフィルム第 号

土 木 研 究 所 資 料

# 地下埋管の原理と効果

——地下水涵養と流出抑制——

昭和55年4月

建設省土木研究所  
河川部水文研究室

# 地下埋管の原理と効果

——地下水涵養と流出抑制——

## は　じ　め　に

地下埋管とは水を地下に浸透させるために地中に設けられた管のことである。

土木研究所では地下水を涵養する技術の一つとして、昭和52年度から総合プロジェクト研究の一環として研究に着手し、水の浸透の機構、涵養能力、目づまりの防止方法等を検討してきた。昭和53年度からは埼玉県深谷市における野外実験も併せて実施し、実際の涵養量、地表作物への影響等を調査してきた。その結果地下水の涵養の能力は量質両面で大変すぐれていることが判明した。

地下水涵養の技術としては外国では井戸法、浸透池法がある。地下埋管法はこれらに比べて遜色がなく、国土の狭い我が国に適した新しい涵養技術と言えそうである。

一方都市域においては土地利用の変化に伴って洪水の流出が増大している。地下埋管法によって雨水を地下に浸透させることが出来れば洪水の流出抑制及び低水流量の安定の面で寄与する所が大きいであろう。このような観点から地下浸透量を更に増加させる方法を工夫して検討した結果地下埋管法は流出抑制にもかなり有望であることが判明して来た。

もちろん水の浸透機構は複雑であり、また土壌、地質によって浸透能力は異なるであろうからこれまでの研究だけで、直ちに結論を出すことは早計と思われる。しかし総合的な治水対策の検討が急がれている現状からみて、ひとり土木研究所だけでなく、この問題に関係する多くの方々に研究の現状を知って頂くことが重要であると考えて、実験結果を印刷に付すことにした。関係各位の参考になれば幸いである。

なお本研究の遂行にあたって、馬場紘一、三村清志、西田哲男氏、新見 正氏及び地下涵養委員会及び同涵養専門委員会のメンバー及びその他の方々の助言を頂いた。また深谷市における野外実験には深谷市、埼玉県農事試験場、国土開発技術研究センター、建設技術研究所、実験地土地貸与者馬場氏の協力を得ている。

ここに記して感謝の意を表する。

著 者 水文研究室長 石 崎 勝 義

著 者 研 究 員 北 川 明

## 目

## 次

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| ま え が き .....               | 1  |
| 1. 地下埋管による地下水涵養機構 .....     | 1  |
| 1.1 土壌水帯における浸透と目づまり .....   | 1  |
| 1.2 地下埋管からの浸透量 .....        | 2  |
| 1.2.1 地下埋管の構造 .....         | 2  |
| 1.2.2 地下埋管の室内浸透実験 .....     | 3  |
| 1.2.3 涵養量解析 .....           | 4  |
| 2. 地下埋管の現地実験 .....          | 9  |
| 2.1 現地実験の概要 .....           | 9  |
| 2.2 実験結果 .....              | 10 |
| 2.2.1 最大涵養量 .....           | 10 |
| 2.2.2 長期涵養特性 .....          | 11 |
| 2.2.3 毛管浸透実験 .....          | 12 |
| 2.2.4 雨水の地下浸透実験 .....       | 14 |
| 3. 地下埋管による汚水処理効果 .....      | 15 |
| 3.1 室内実験 .....              | 15 |
| 3.2 実験結果 .....              | 15 |
| 4. 地下埋管による洪水流出の抑制 .....     | 16 |
| 4.1 浸透工法の必要性 .....          | 16 |
| 4.2 地下埋管による雨水浸透 .....       | 17 |
| 4.3 実用化への課題 .....           | 18 |
| お わ り に .....               | 19 |
| 付 録 1. 地下埋管による人工涵養 .....    | 1  |
| 付 録 2. 不飽和浸透室内実験 .....      | 25 |
| 付 録 3. 水田・地下埋管現地実験・研究 ..... | 51 |

地下埋管法は、わが国で開発された地下水涵養の一手法である。地下水の人工涵養は注入法と拡水法に大別される。注入法は井戸によって涵養する方法で、狭い注入井壁を通じて涵養がなされるため、目づまりが発生しやすい。しかも、目づまりが人の手のとどかない所で発生するため、その防御、除去がなかなか容易でない。これに対して、拡水法は、地表面から平面的に地下水を涵養する方法で、目づまりが生じて、その対策は容易であり、涵養手法として確実性を有する。ところが浸透池等の一般的な拡水法は専用の土地が必要となり、国土面積の狭いわが国にとって必ずしも適切な涵養手法とはいえない。そこで拡水法でありながら専用の土地になるべく少なくて済むような涵養手法の開発が望まれるわけである。

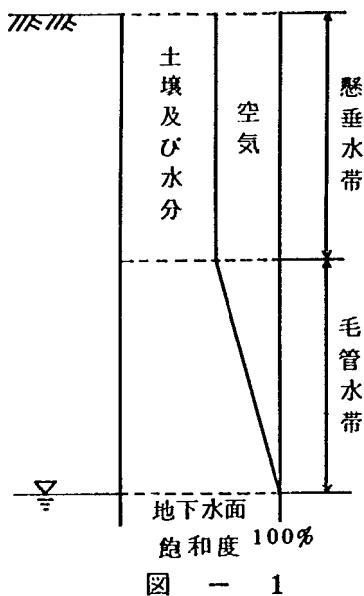
地下埋管法はわが国独自の地下水涵養手法で、農地の地下等を利用し、地上の土地利用と共存できる拡水法の一手法である。畑地かんがいの分野では、かんがい方法の一つとして地下かんがいと呼ばれているものがある。これは地面下に給水して、毛管作用によって植物の根群域を直接潤してかん水の効果を上げようとするものである。よくなわれるのは、地下30～60cmの位置に管径38～75mm程度の土管を埋めて、これにより給水するものである。ちょうど暗渠排水の逆を行なうと思えばよい。

最近この手法は汚水の土壌処理の分野に応用され、毛管浄化法、または地下トレンチ法と呼ばれて、し尿浄化槽の排水処理や事業所排水の処理などに適用されて効果を上げている。地下水涵養手法のどの方法においても必ず目づまりの発生が問題になるが、上記の地下トレンチ法では目づまりの発生が少ないため、地下水の涵養にこの原理を適用することが考えられるようになったものである。地下埋管は、土壌の表層に埋設され、浸透水は微生物の密集する土壌帯を通過し、浄化される。しかし、涵養施設として考える場合、涵養量として充分期待し得るかどうか、また涵養が長期にわたった場合、涵養特性に変化がないかという点が、まず基本的に明らかにされなければならない。なお地下埋管法の応用分野としては、都市域における洪水流出の抑制を目的として雨水を地下浸透させる手法として利用することが考えられる。この点についても、ふれてみたい。

## 1. 地下埋管による地下水涵養機構

### 1.1 土壌水帯における浸透と目づまり

土壌水帯は地層の表層にあって、雨水・表流水が浸透するが、そのときフィルターとして重要な役割をはたす。地下水の水質が良好であるのは、このフィルタリング機構によるものである。また土壌水帯は植物が根によって水分・養分を吸収するところであり、有機体が土壌微生物によって無機体へ変換されるところでもある。土壌体は図-1に示されるように、土壌粒子、空気、水の3相より成る。水分は主に降雨より供給される。降雨の一部は地下水へ供給され、土壌水帯に貯留された水分は、蒸発散によって大気へ還元される。土壌水帯においては水分とともに常に空気が存在する。このため、不飽和帯と呼ばれることもある。これは土粒子の間隙がすべて水によって飽和されている帯水層と大きく異なる点である。また、土壌水帯での水の動きには、水の



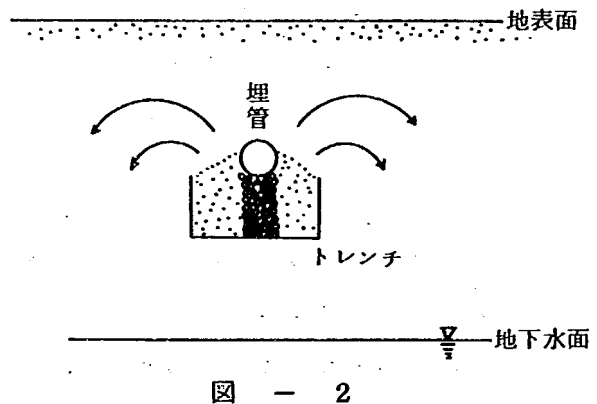
表面張力に起因する毛管圧が重要な役割を果たす。

このように、土壤水帯は浸透水の流動特性においても、また、多種多様な土壤微生物が生存することでも、地下水帯とはかなり異なった特色を有する。

一方土壤の表面は自然の状態では、空隙が大きいいため、雨水が浸透しやすいが、造成地のように土が踏みかためられると、雨水は浸透しにくくなる。特に雨滴が土壤表面に直接あたるときには、表面で土壤の団粒が破砕され、微粒子が土壤の空隙を塞ぐため雨水の浸透は非常に小さくなる。地下埋管法は、このように繊細な挙動を示す土壤表面を避けて、水を直接土壤水帯に供給することによって、地下水を涵養しようとするものである。

図-2は先に述べた地下トレンチの構造を示す。埋管からの供給水は、いったん下のトレンチに貯留される。地下埋管の周りの

砂、土壤の毛管力によって、下方へ浸透することになる。土壤を浸透する浸透水は、土壤内の豊富な土壤菌の作用を受け、次第に浄化される。一般に、浸透水に、有機物が含まれると、土壤微生物が浸透水の浸透面に発生し、これが水の浸透を妨げ、いわゆる目づまり現象が発生する。ところが、不飽和帯での浸透では、目づまりが生じにくい。これは空気存在によって酸素が供給されるため、有機物が好氣的に分解され、さらに、微生物の増殖範囲も広くなり、目づまりが発生しにくい条件を有しているようである。



このように、水を直接土壤帯に浸透させる地下埋管による地下水人工涵養手法は、地上の土地利用をある程度許すだけでなく目づまりが発生しにくい点で、非常にすぐれた涵養手法のように思われる。しかし、涵養能力等の基本的な諸量は明らかでなく、量的な地下埋管の涵養施設としての有効性を明らかにすることが重要となる。

## 1.2 地下埋管からの浸透量

### 1.2.1 地下埋管の構造

地下埋管の構造はその用途、浸透水の水質によって、種々のものが考えられている。図-3に代表的と思われる地下埋管の構造について示す。(a)の場合は、埋管の下にトレンチを有

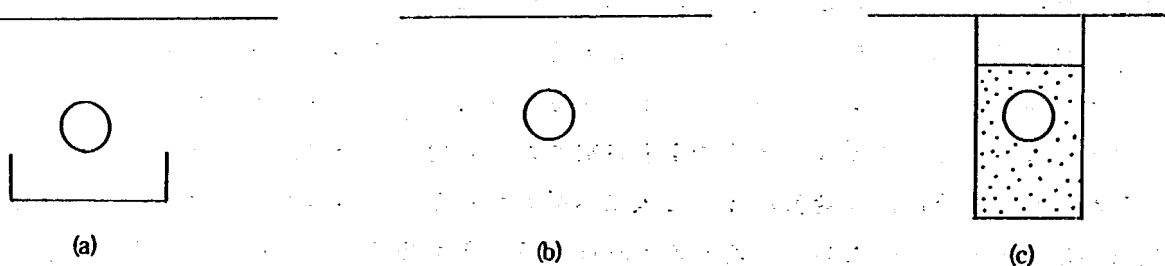


図 - 3

する。水は一旦、トレンチへ貯られ、トレンチから毛管力で拡散、浸透する。浸透水に有機物が含まれていて、地下水汚染の危惧がある場合、土壌での浄化が期待される。また、水分の拡散が長く期待され、灌漑効果も大きいかもしれない。(b)の場合は、土壌にそのまま地下埋管を埋設したものである。浸透水による地下水汚染の心配がなく、土壌の透水性が高い場合に適している。埋管にある程度の水圧がかけられ、かなりの浸透量が期待できるであろう。(c)の場合は、地下埋管の周りを一部有効間隙率の大きい砂に置き換え、土壌内貯留量を増加させるとともに、土壌に対する浸透面積をも大きくし、浸透量の増加も期待したものである。流出抑制のための雨水の地下浸透に適している構造と考えられる。

以上の他に、地下埋管の埋設深、埋設間隔も重要なファクターであるが、浸透量等の目的とするものとの関連で決定されるものであり、次節以降で検討することにする。

### 1. 2. 2 地下埋管の室内浸透実験

地下埋管の構造については、図-3の(a)の場合が、土壌の毛管の作用を含んでいるので浸透量等の基本的な水理量を検討する上で、望ましいと考え、(a)の場合について検討した。

#### a. 実験装置

実験装置の概略を図-4に示す。図中(a)は移動可能な側壁であり、隣接した埋管との境界を表わすものと考えた。すなわち、(a)の間隔を変えることにより、埋管の設置間隔が変わるものとした。また、(b)は連通管であり、ここから流出する水量を涵養量とした。この連通管を通して水位を変化させ、それによる涵養量の変化を把握した。

実験砂は豊浦の標準砂を用いた。その粒径分布は、 $105 \sim 149 \mu$ のものが87%を占め、ほぼ一様粒径の砂である。性質は表-1のようである。

表 - 1

|            |                                          |
|------------|------------------------------------------|
| 1) 比 重     | 2.64                                     |
| 2) 間 隙 率   | 39.4 (乾燥密度 1.6)                          |
| 3) 透 水 係 数 | $K = 1.01 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$ |

#### b. 実験結果

図-5に実験条件を示す。実験結果は図-6に示す。

涵養量を表示する単位には $\text{m}^3/\text{day}$ 等が用いられる。また、涵養高は一日当りの涵養量を埋管の支配面積で除した値で、単位は $\text{mm/day}$ が用いられる。

図-6からわかるように、水位差 $H$ が大きくなるに従って涵養量が大きくなり、また幅 $B$ によっても影響されることがわかる。ただ $B$ の増加による涵養量の増加は直線的ではなく、ある程度まで幅が広がると、ある $H$ に対して一定量に近づくことが予想される。これは毛管作用による浸潤の影響範囲に限界があるためと考えられる。 $H$ の増加についても、水分

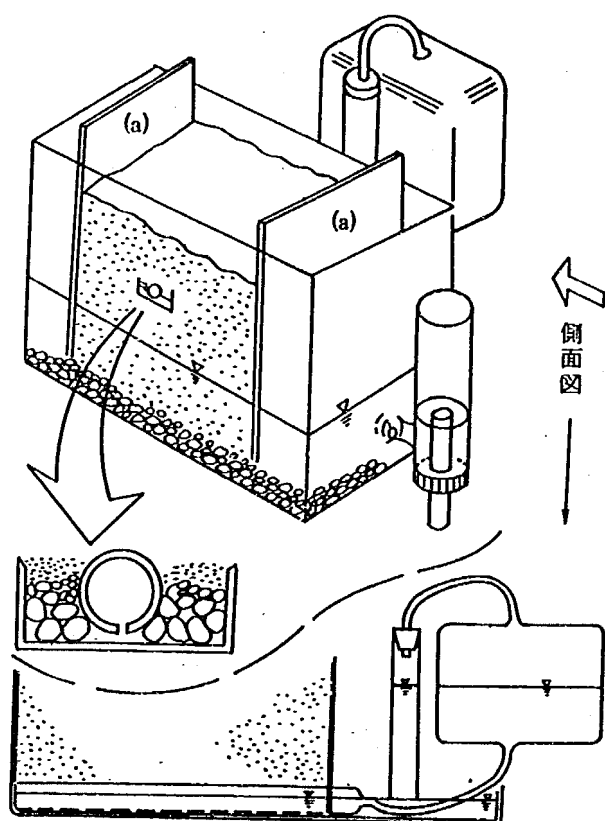


図 - 4

分のポテンシャル勾配も1を超えることはないから、いずれ一定値に近づくことが考えられる。

本実験に豊浦の標準砂を用いたのは、その物理的性質が一般の土壌と異なって安定しており、取り扱いが容易であるからである。現実には標準砂で構成されている土壌は存在しないが、実物の約 $\frac{1}{4}$ 程度の模型でありながら、 $100 \sim 600 \text{ mm/day}$  もの涵養が可能であることが示された。この結果、地下埋管が良好な涵養機能を有する構造物であることが明らかとなった。

### 1.2.3 涵養量解析

上記の実験は、限られた条件での地下埋管からの涵養量の検討であって、さらに広範囲の条件で涵養量について検討する必要がある。ここでは、涵養量に関する解析を実施する。解析結果と実験結果を比較し、解析結果の妥当性を明らかにした上で、実際規模のスケールに拡張する。

#### (a) 解析の基本式

地下水流動の基本式は飽和、不飽和の状態を合せて、次式で示される。

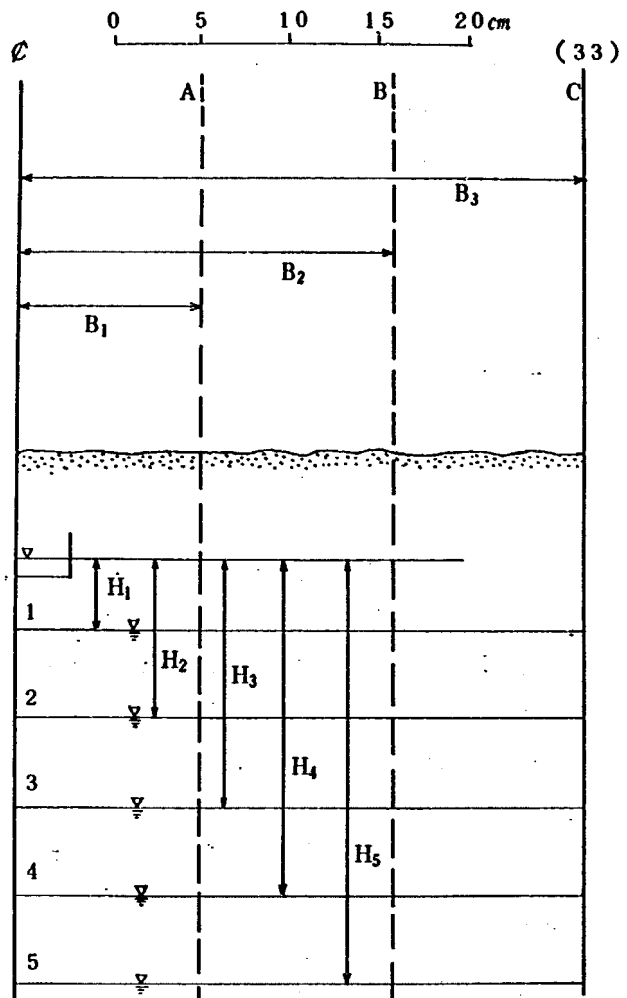


図 - 5

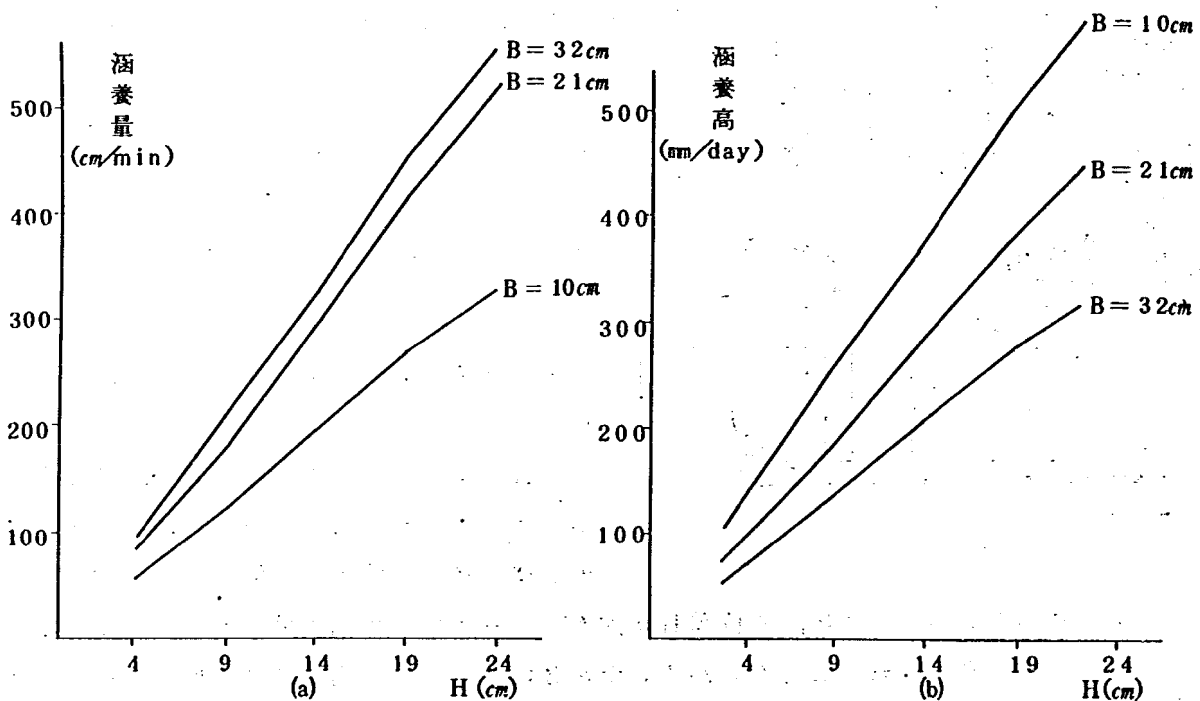


図 - 6

(a) 解析の基本式

地下水流動の基本式は飽和、不飽和の状態を合せて、次式で示される。

$$\left\{ \rho g s (\alpha + n\beta) + \rho n \frac{2S}{2\Psi} \right\} \frac{2\Psi}{2t} = \text{div} \{ \rho K(\Psi) \cdot \text{grad} (\Psi + Z) \} \dots\dots(1)$$

ここに

$\rho$  = 水の密度

$\beta$  = 水の圧縮率

$g$  = 重力の加速度

$\Psi$  = 水頭

$S$  = 飽和度

$Z$  = 鉛直方向座標

$n$  = 間隙率

$t$  = 時間

$\alpha$  = 土粒子スケルトンの圧縮率

また、透水係数  $K(\Psi)$  は、 $\Psi$  の関数であって、図-7 に示されるように次式で近似される。

$$K(\Psi) = \begin{cases} K_0 & \Psi > \Psi_b \\ K_0 (\Psi_b / \Psi)^\eta & \Psi \leq \Psi_b \end{cases} \dots\dots(2)$$

ここに

$K_0$  : 飽和透水係数

: 土粒子径、粒度分布に関する定数

$\Psi_b$  : 飽和状態から脱水するときの  
土壌内空気が現われるときの  
の値

定常の不飽和浸透の場合には、(1)式は簡略化され次式で表わされる。

$$\text{div} \{ \rho K(\Psi) \cdot \text{grad} (\Psi + Z) \} = 0 \dots(3)$$

(b) 解析結果

(3)式を差分式に変換して、数値計算を実施した。なお  $K(\Psi)$  については、 $K_0$  に  $1.01 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$ 、 $\Psi_b$ 、 $\eta$  には図-7 から読み取って、 $\Psi_b = -36 \text{ m}$ 、 $\eta = 18.2$  とした。図-8 に、実験結果と解析結果を示す。両者はほぼ対応しており、解析結果が妥当であることを示している。

図-9 は、スケールを拡張し、現場で涵養を行なう場合を想定したときの涵養高の計算結果である。土質は砂質ロームとし、図-7 にある透水係数値をそのまま用いた。 $K_0 = 5.6 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$ 、 $\Psi_b = -39.8 \text{ cm}$ 、 $\eta = 3.5$  である。地下埋管構造

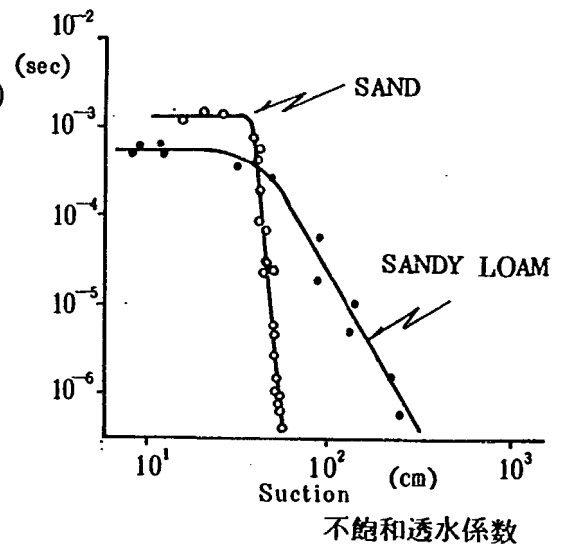


図 - 7

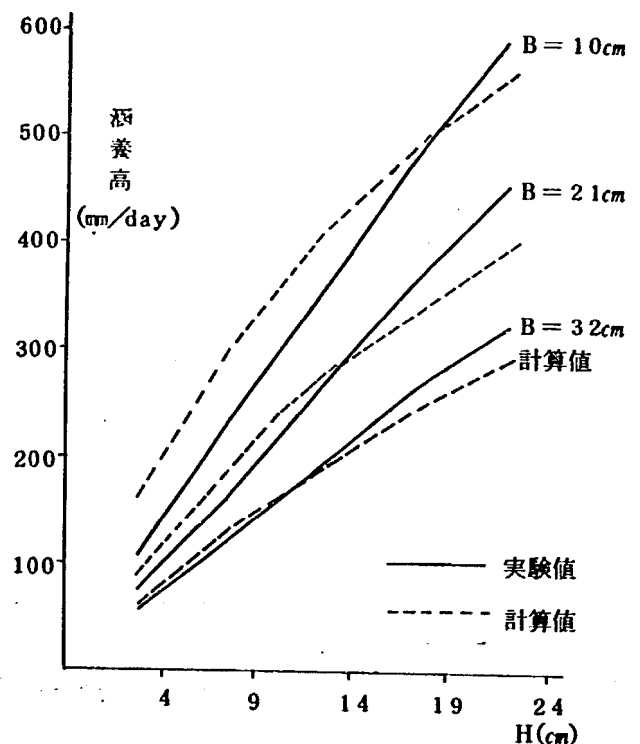


図 - 8

物の寸法は模型実験の寸法と同様に表-2に示してある。

表-2 地下構造物の諸元

|           | 室内実験   | 現地を想定したスケール |
|-----------|--------|-------------|
| 地下構造物の幅   | 30 cm  | 200 cm      |
| 高さ        | 25 cm  | 7.0 cm      |
| 地下構造物中の水深 | 1.0 cm | 3.5 cm      |
| 土 か む り   | 260 cm | 580 cm      |

計算の結果から、涵養高は水位差  $H$  によって影響されるが、 $H$  がある程度以上に大きくなればその影響は無くなる。 $H$  が  $1\text{ m}$  以上であれば、ほぼ一定となっている。むしろ、設置間隔  $B$  による影響の方が現地においては支配的である。図-10は設置間隔と涵養高の関係を示した図である。設置間隔が広がっても、涵養高の減少はゆるやかであって、一本の地下埋管でかなり広い範囲に水を涵養できることを示している。

地下埋管による涵養を畑地で行なう場合、作物への影響が問題となる。地下埋管からの涵養で、土壤水分量の増加が心配されるのである。そこで、不飽和の場合の毛管圧と土壤水分量との関係式を用いて、土壤水分分布の数値解析を実施した。毛管圧と土壤水分量の関係は図-11に示されるごとく、次のように表わされる。

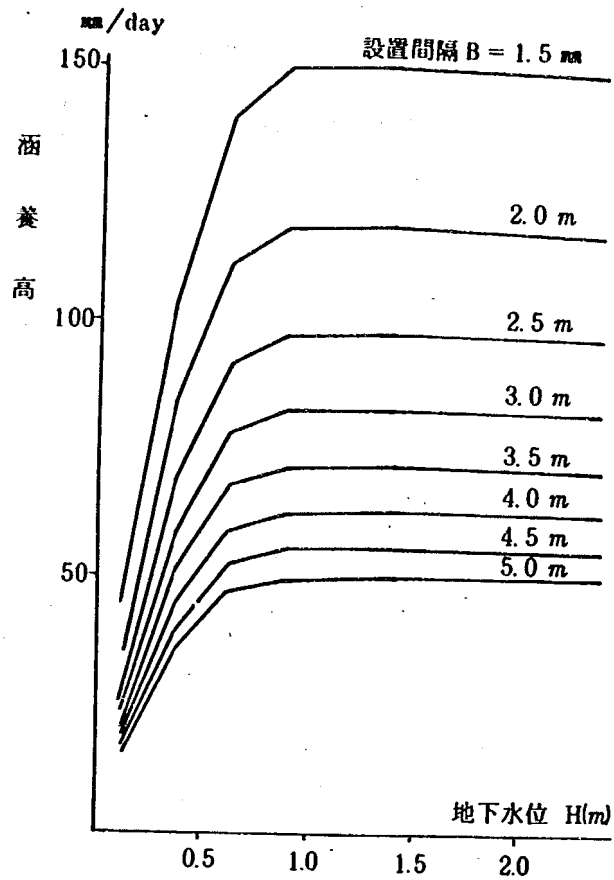


図 - 9

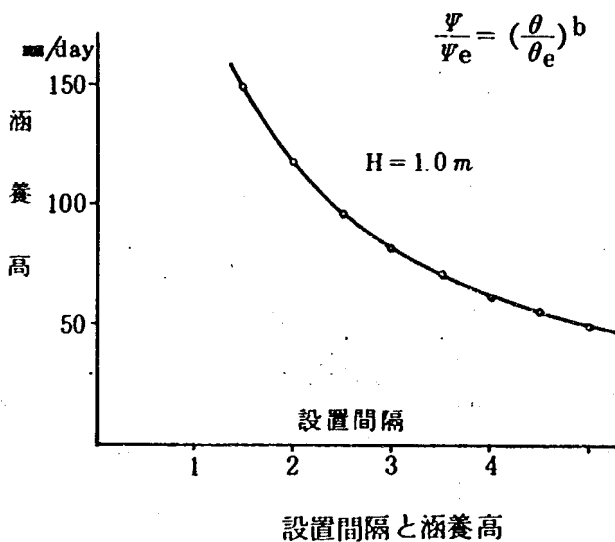


図 - 10

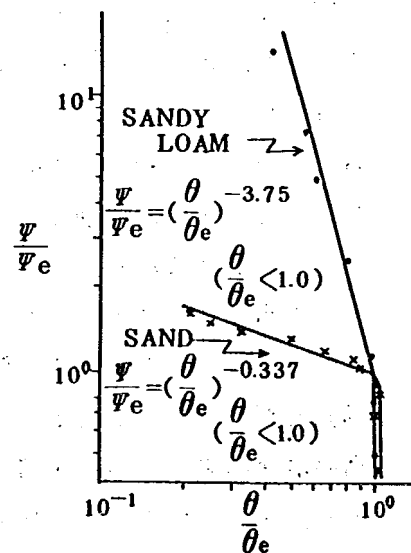


図 - 11

ここに

$\theta$  : 土 壌 水 分 量

$\psi_e$  : 土壌の物理特性によって決まる定数で,  $\psi_b$  とほぼ等しくなる。

$\theta_e$  :  $\psi = \psi_e$  と なる  $\theta$  の 値

$b$  : 土壌の物理特性によって決まる定数

図-12に示す地下埋管の構造の場合での水分分布の計算結果を図-13に示す。なお、(4)式中の定数に用いられた値を表-3に示す。また、水分差  $H$  は  $0.75\text{ m}$  である。計算結果によると、地表近くの含水量は40%以上であり、高いようにも思えるが、ロームは吸着水が多く、通常の場合においても40~50%の含水量といわれることからそれほどの値とは思われない。また、実際の地下水涵養は間欠的になされるから、図-13の水分分布は最大値の分布を示すことになる。詳細な検討は水分量が時間的に変化する非定常解析が必要となる。

表 - 3

|            | 砂     | 砂質ローム |
|------------|-------|-------|
| $\theta_e$ | 0.34  | 0.54  |
| $h_e$      | 38 cm | 40 cm |
| $b$        | 0.337 | 3.75  |

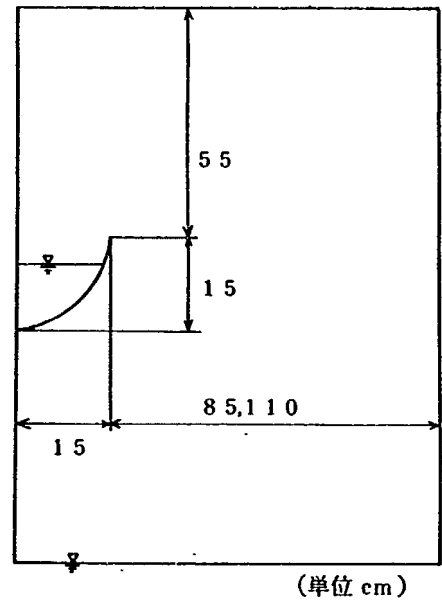


図 - 12

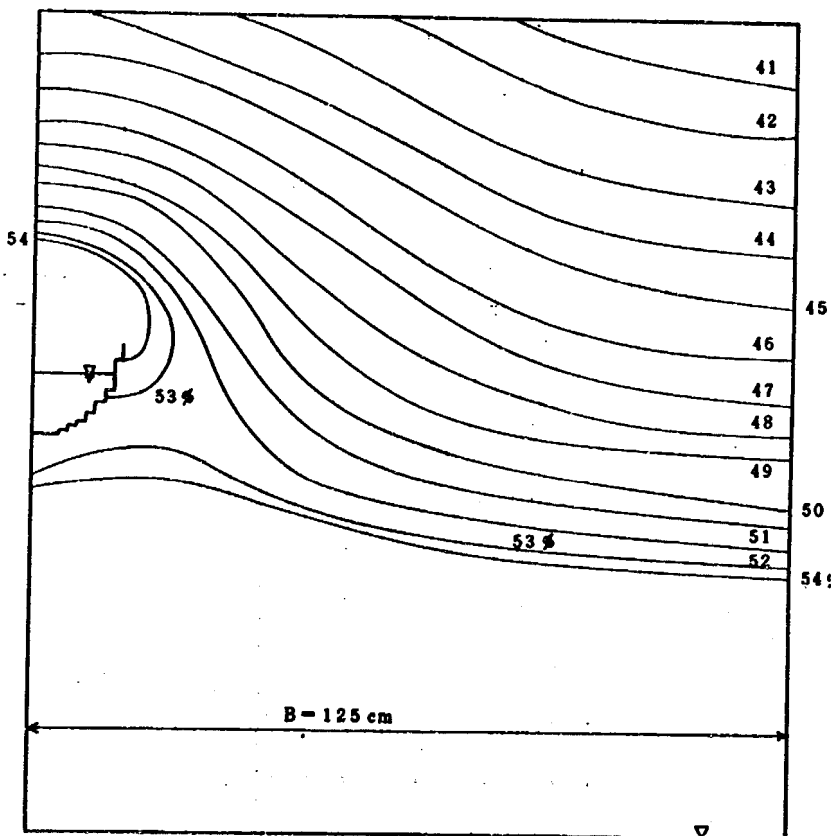


図 - 13

図 14、図 15 は、同じケースでの毛管圧分布と、土壌水分の流向、流速を示したものである。

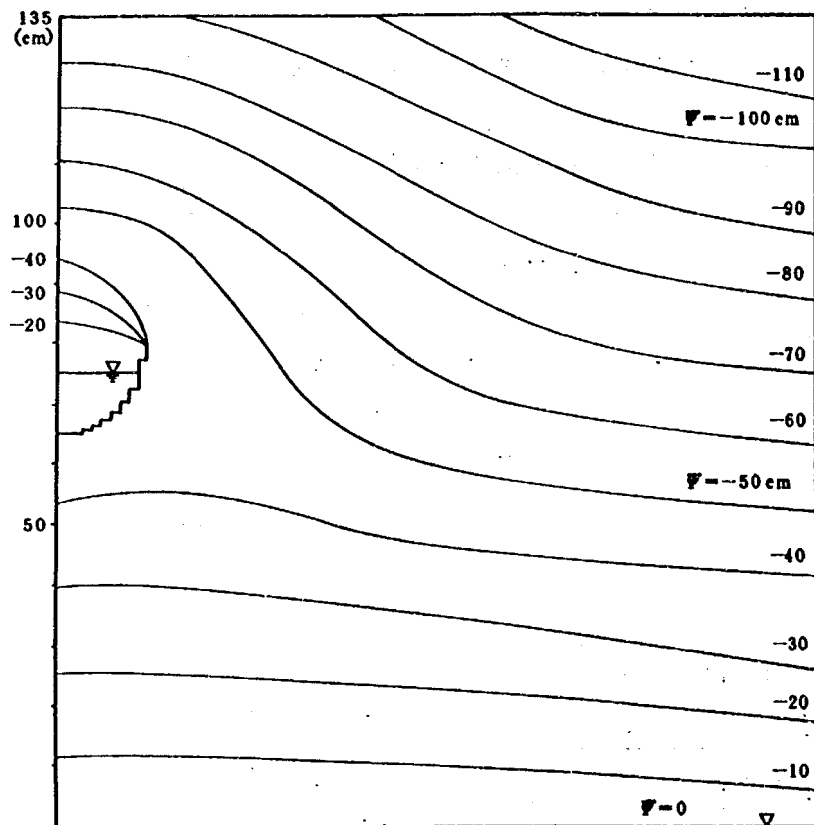


図 - 14

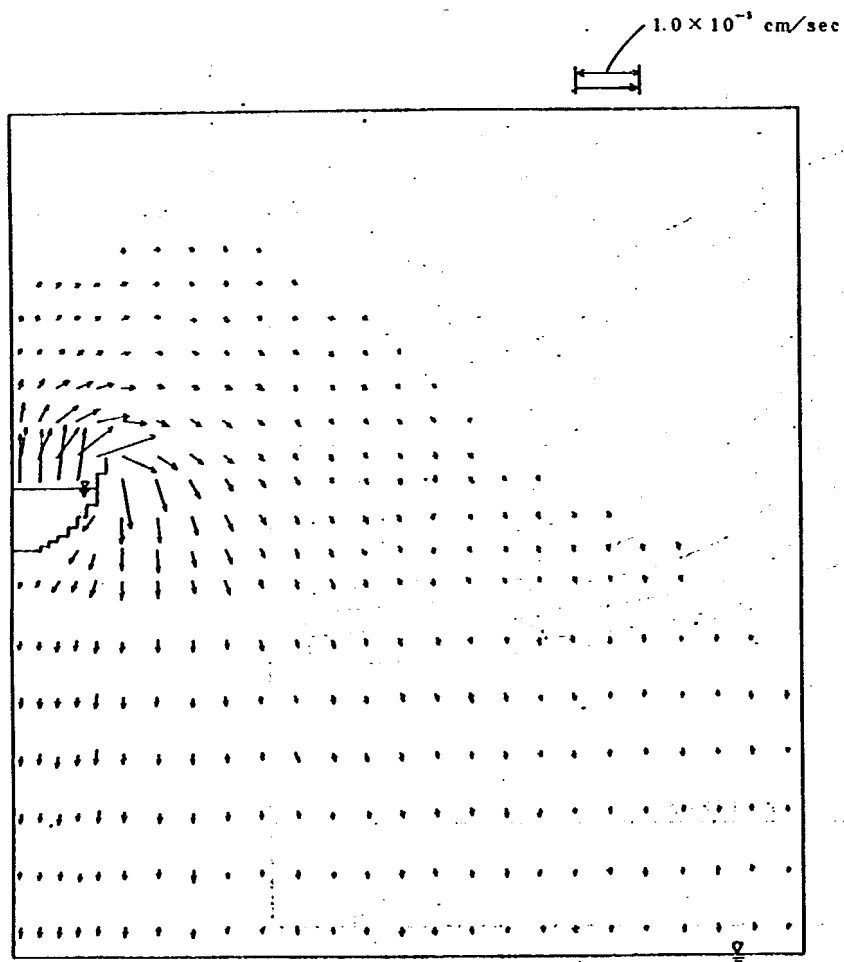


図 - 15

## 2. 地下埋管の現地実験

### 2.1 現地実験の概要

現地実験は埼玉県深谷市郊外荒川左岸扇状地で行なった。本扇状地は洪積台地で、表層はローム層でおおわれている。実験地区は10m四方の4区画に分割されている。第一区には図-16に示される(a)の構造を有する長さ10mの地下埋管が2.5m間隔に敷設されている。第二区およ

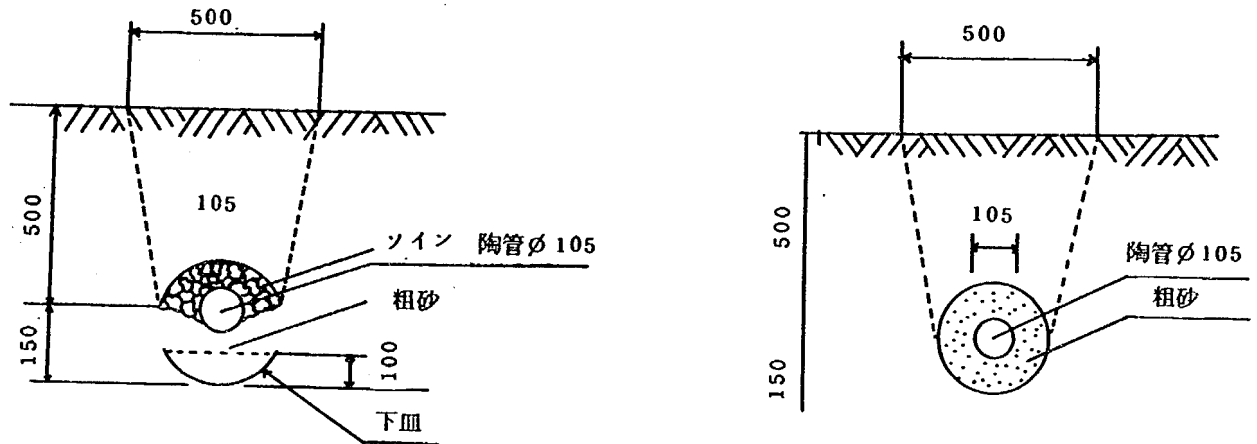


図 - 16

び第三区には(b)の構造を有する地下埋管が同じパターンで敷設されている。第四区には、地下埋管による雨水処理効果を把握するために、図-17に示す地下埋管が埋設されている。また、第四区には、図-18に示されるトレンチを有する地下埋管が敷設されている。

本現地実験の目的とするところは、主に、地下埋管による最大地下水涵養量および長期涵養特性の把握にある。また、栽培作物への影響についても同時に調査されている。最大涵養量の実験については、第一区において実施された。第二区および第三区においては、長期涵養特性つまり、目づまりによる涵養障害の発生に関する検討を実施した。第二区では、実験開始より現在に到るまで、等量が供給されている。第三区では、日供給が徐々に増加され、長期にわたって日涵養量がどの程度まで見込むことが可能かどうか試験される。第四区のとれんちを有する地下埋管は、浸透水に有機物がかなり含まれている場合に用いられる地下埋管構造となる。この場合での地下水涵養量の検討がなされた。さらに、埋設構造の異なる場合での、雨水浸透処理効果の把握のための実験も実施された。

本現地実験土壌の飽和透水係数は図-7に示され砂質ロームとほぼ同様の  $5 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$  であった。

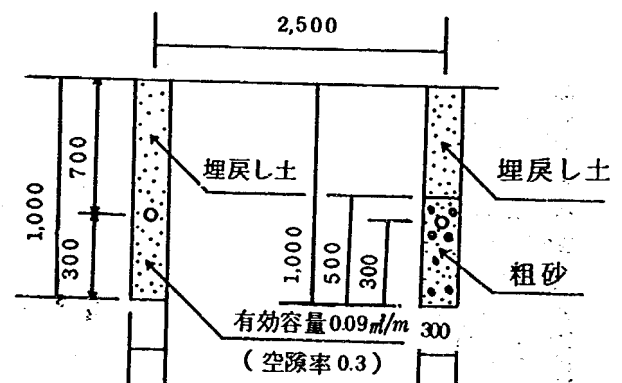


図 - 17

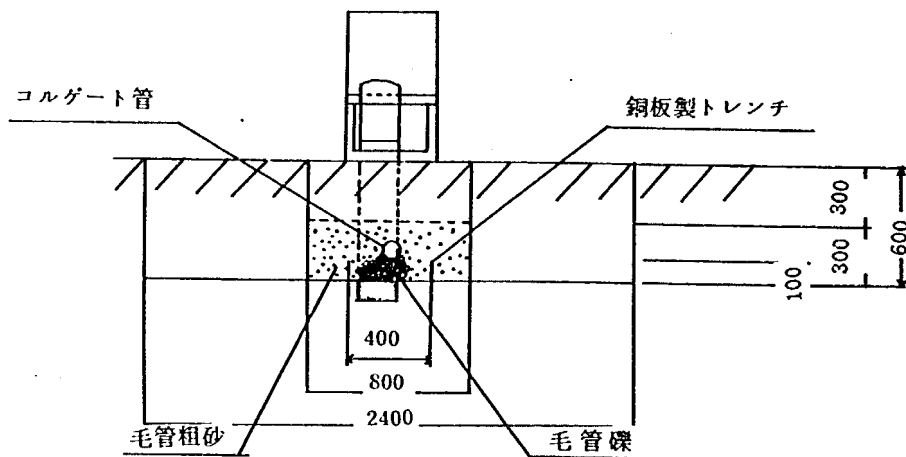


図 - 18

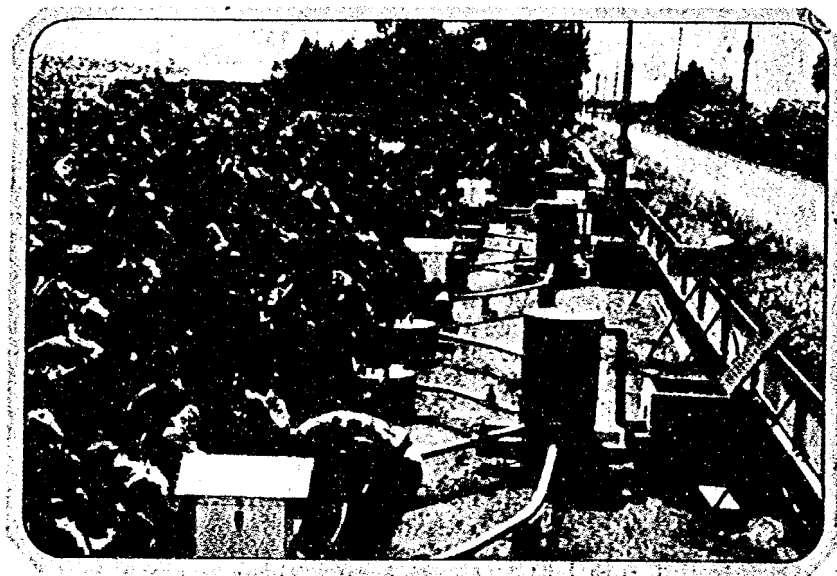


写真-1

←畑地の地下埋管を利用した  
涵養実験

畑地に地下埋管することによって畑地かんがい兼ねた地下涵養を行った場合の浸透量、野菜への影響などを調査している。

## 2.2 実験結果

### 2.2.1 最大涵養量

24時間連続実験の結果を図-19に示す。この実験は、埋管の浸透能力に見合う量を供給し、その変動を見た図であるが、開始3時間で一定量に対し、以降ほとんど変化は見られない。図に示されているように、一定浸透量は埋管1本、1m当り、 $0.150\text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{hr}$ 、あるいは

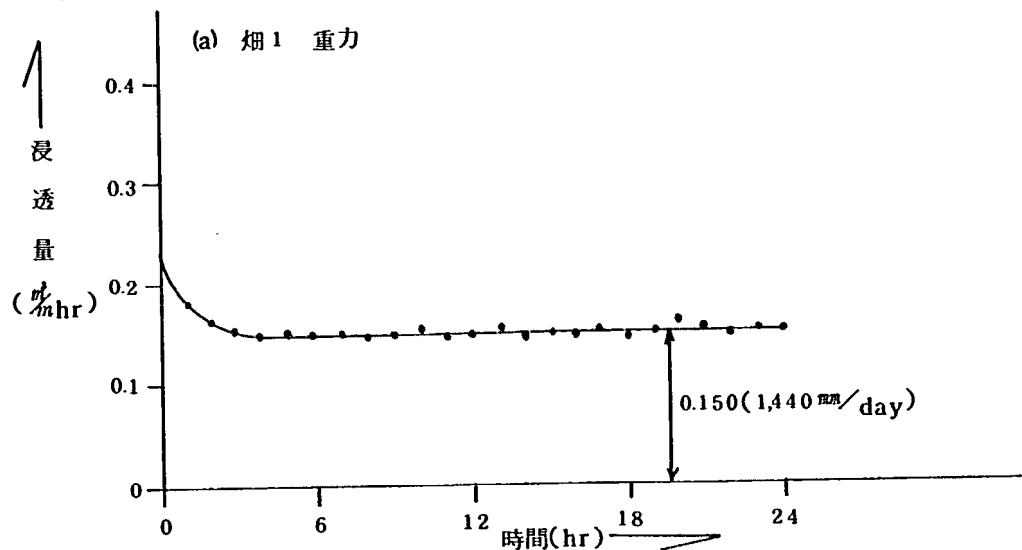


図 - 19

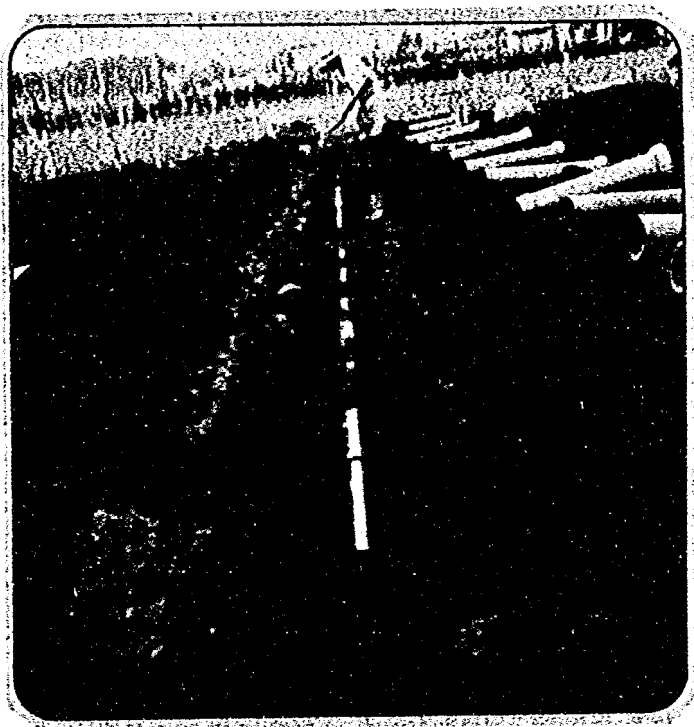


写真 - 2

←地下埋管

径100mm, 長さ1mの陶管を  
水平に布設し, 各管へ配水を行う。

は単位面積当り  $1,440 \text{ mm/day}$  となっている。長期にわたって, このような大きな涵養量が継続しうるかどうかは疑問であるが, 河川の流況から, 短時間の内に地下水の貯留量の増加が必要な状況になっても, 地下埋管は充分対応しうる可能性を有している。

### 2.2.2 長期涵養特性

第二区においては, 53月11月から現在に到るまで,  $50 \text{ mm/day}$  の涵養がなされてきている。図-20は第二区における浸透量と浸透水の負荷量の関係をみた図である。この区においては, 日6回にわたって, 単位面積当りの涵養量が  $50 \text{ mm/day}$  になるように給水されるが, 縦軸は, 給水時間中の平均浸透量を示す。破線は週当りの浸透水中のSS負荷量である。SS負荷量

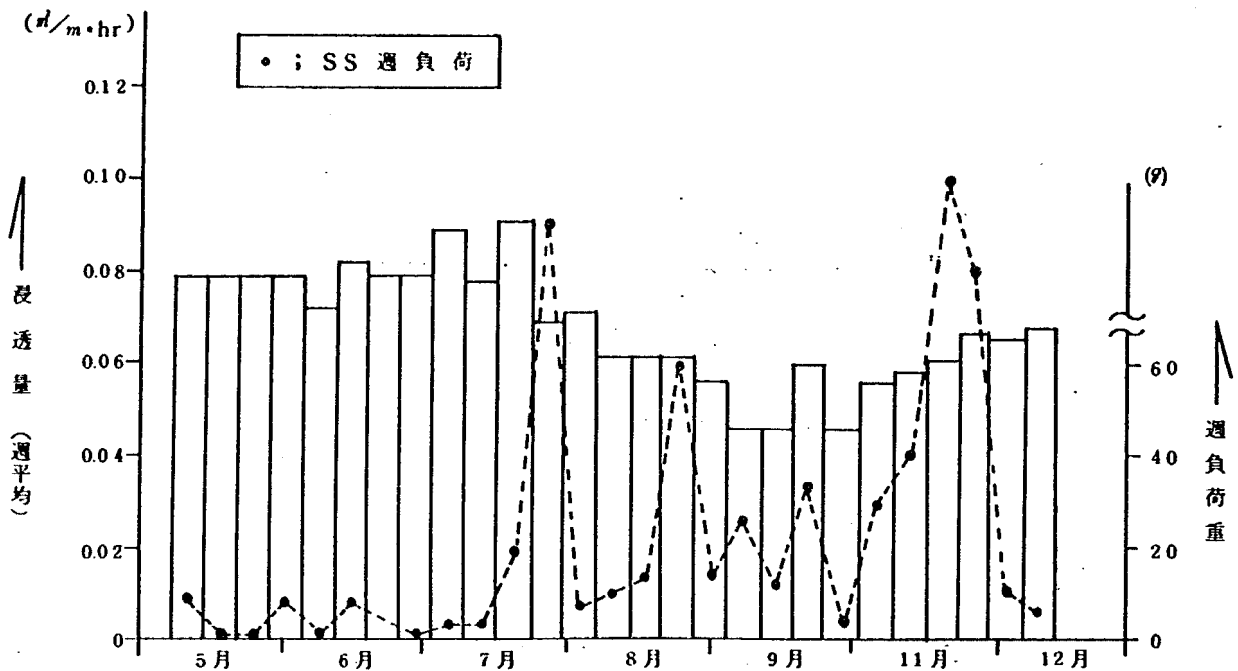


図 20

が少ない場合には、浸透量の変化が見られないが、負荷量が多くなるといづらか、浸透量が鈍ぶる傾向が示されている。データが少なく充分でないが、10月以降は、浸透量の回復傾向が見られている。給水は間欠的になされていて、負荷量減少後の土壌内での有機性 SS の分解作用によるものと考えられないこともないが、今後さらにデータの蓄積を必要とするところである。ただ、 $50 \text{ mm/day}$  の涵養量は充分余裕のある涵養量であり、この実験結果は、地下埋管の耐用年数（掘り返しによる埋め戻し材の取り換えが必要となる年数）の把握のために活用されねばならない。

図-21は第三区における、長期給水パターンを示す。8月21日から現在に到るまで  $200 \text{ mm/day}$  以上の涵養が継続されている。 $200 \text{ mm/day}$  の涵養量は地下埋管による涵養の一つの目安となるものである。この地区での水田での減水深が  $100 \text{ mm/day}$  程度であることを考えると、地下埋管が涵養施設として有効であることがわかる。上記に、地下埋管の耐用年数について触れたが、実際の地下貯水池で用いられる場合、地下水涵養が常に継続するものでない。それゆえ、むしろ、限界累積涵養量について検討することが必要であると考えられる。いずれにせよ、地下埋管は、充分実用に供しうる能力を有しているものと考えられそうである。

### 2.2.3 毛管浸透実験

本実験は、室内実験と同様な機構による浸透の現地実験である。図-18に示される地下埋管から、一旦トレンチへ浸透水が貯られ、土壌の毛管力によって上方へ拡散され、浸透する。図-22は、給水、浸透に伴うトレンチ内の水位の変化を示している。給水は  $30 \text{ l/hr}$  の率で行なわれている。トレンチ内の水位が高いと、毛管力の作用が大きくなり、トレンチ内の水位の低下率、つまり土壌への拡散、浸透率が大きい。トレンチ内の水位の低下に伴いその変化率は小さくなるが、1時間でほぼ  $30 \text{ l}$  の水が浸透していることが示されている。給

53年11月~54年6月18日 25 日

図 2-1 給水量・給水時間間隔実験ケース(1) 堀 3

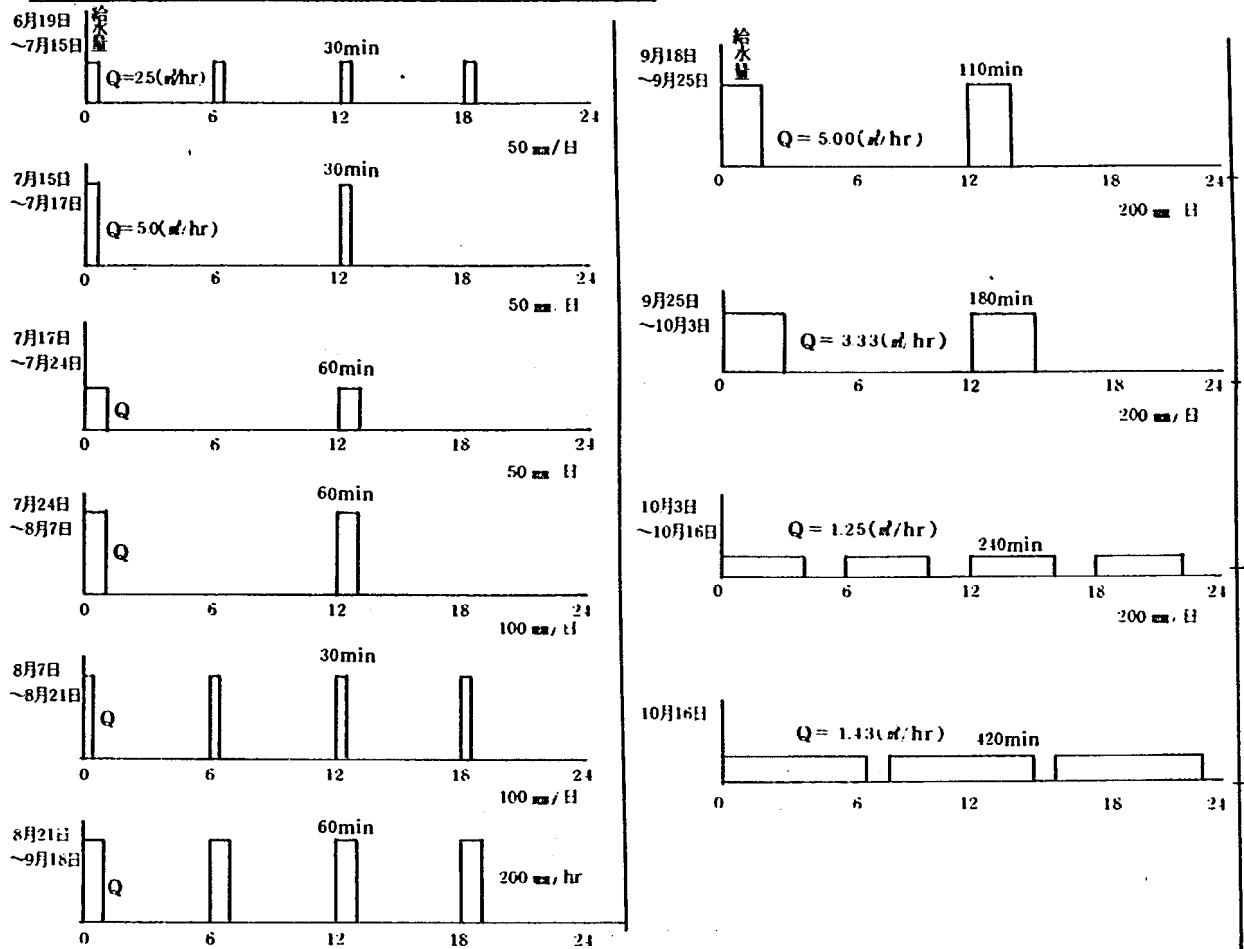


図 - 21

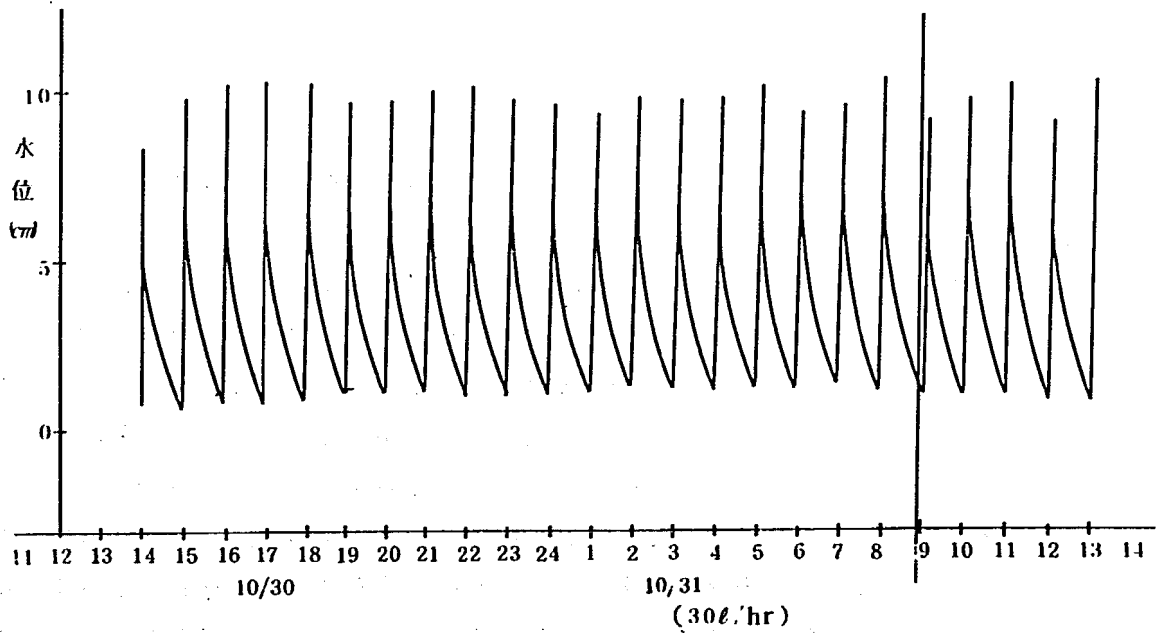


図 - 22

水直後の水位が徐々に上昇しているような傾向は見られていないからである。本装置の長さは  $2.4\text{ m}$  であるから、単位長さ当りの浸透量は  $0.0125\text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{hr}$  である。もし、 $5\text{ m}$  間隔で、埋設されるとすれば、単位面積当りの涵養高は  $60\text{ mm/day}$  となる。埋め戻し砂の有無等の構造の差はあっても、土壌の性質が似ていることから、図-10に示される解析結果とほぼ同様な値が得られたものと思われる。

#### 2.2.4 雨水の地下浸透実験

都市化の著しい地域での洪水対策の一つとして、雨水貯留事業が実施されつつあるが、地下埋管によって雨水を地下に浸透させて、洪水流水を抑制することが考えられる。洪水では、短時間に雨水が集中するので、地下埋管による定常的な浸透の他に1時的な貯留の機能を有することが望ましいと考えて、図-17に示すような構造をもつ浸透実験を行なった。図-23はその結果であって、地下埋管の回りを粗砂で埋め戻したものと、そのままの土壌を

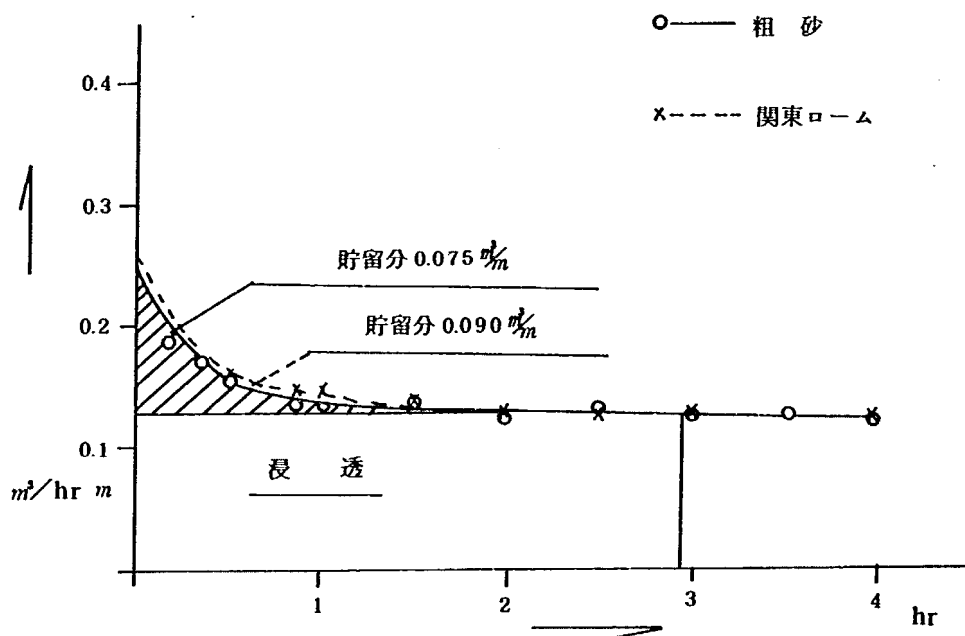


図 - 23

埋め戻したものの2つの構造について、それぞれの浸透特性が比較されているが、その差はほとんど現われていない。実験結果を見ると、地下埋管から供給された水が周囲の置換え、または埋管し部分に注入されると、水はこれらの場所を通じてさらに外側または下方に移動する量が多く、その量は埋管  $1\text{ m}$  あたりで、 $0.125\text{ m}^3/\text{hr}$  の大きさとなる。置換えまたは埋戻し部分の貯留容量は、埋管  $1\text{ m}$  あたり  $0.09\text{ m}^3$  であるから、供給された水の大部分は直ちに地下に浸透したことになる。実験前には、粗砂で埋め戻しをした方が有効間隙が大きく貯留効果が大きくなること、また浸透に対しても粗砂で埋め戻した面が有効となることからその効果が大きくなることを予想した。しかし以上のような理由で、顕著な差は生じなかったものと思われる。もちろん土壌の透水性がかなり小さくなれば、浸透量は小さくなるであろうし、これに伴って、粗砂等による埋め戻しの効果が大きくなると思われる。この点については条件の異なる場所での比較検討が望まれる。

### 3. 地下埋管による汚水処理効果

先に、土壌は有機物の強い分解能力を有することを述べた。ここでは、具体的に室内実験によって、土壌の浄化効果を確認する実験を行なったので、その結果について、概略説明する。

#### 3.1 室内実験

図-24に示す実験装置を用いた。実験は11月から100日間にわたって継続された。表-4に、流入水の分析結果を示す。BOD, CODともほぼ20ppm前後である。装置への日流入量は、装置の単位面積当り10 $\text{mm}^2$ /day弱である。また目づまりの発生を検討するため、同じ装置を用い、水道水を流入水とした実験も平衡して行なった。目づまりの状況は、流入水の流入開始から一定時刻の経過後、図に示されるトレンチ内の流入水の残留量の変化で調べられた。

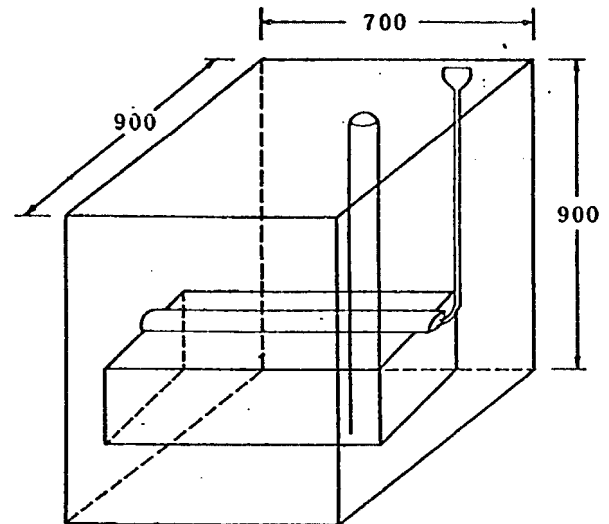


図 - 24

表-4 流入水の分析値

| 月 日                 | 12/4  | 19    | 26    | 1/9   | 17    | 24    |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| pH                  | 6.85  | 6.50  | 6.75  | 6.55  | 6.70  | 6.60  |
| BOD                 | 20.53 | 24.80 | 19.05 | 20.60 | 23.00 | 25.00 |
| COD                 | 22.05 | 21.17 | 18.05 | 25.32 | 22.00 | 22.00 |
| NH <sub>4</sub> - N | 9.86  | 11.64 | 8.90  | 9.59  | 8.90  | 8.90  |
| NO <sub>x</sub> - N | 11.27 | 12.33 | 10.27 | 11.64 | 11.64 | 12.33 |
| T - N               | 21.13 | 23.97 | 19.17 | 21.23 | 20.54 | 21.23 |
| T - S               | 320   | 320   | 500   | 516   | 514   | 510   |

#### 3.2 実験結果

表-5は、流出水の分析結果を示す。COD, BODともほとんど、土壌内で浄化されたことを示している。図-24に示される構造を有する地下埋管からの浸透は、常に不飽和の状態であって、効率的な好気性分解が生じたものであろう。土壌は土壌微生物が多量に生息するのに適した構造を有しており、地下埋管からの浄化は、土壌微生物が活用されたものと考えられる。

目づまりに関しても、水道水の場合実験と比較して、何ら顕著な現象が見られなかった。先に述べたように、地下埋管からの浸透においては、空気と共存しているため、土壌微生物の増殖が

表 - 5 流出水の分析値

| 月 日                | 11/15 | 22    | 28    | 12/4  | 12    | 19    | 26    | 1/9   | 17    | 24    |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| pH                 | 6.75  | 6.80  | 6.75  | 6.85  | 6.80  | 6.75  | 6.70  | 6.80  | 6.70  | 6.70  |
| BOD                | 0.83  | 0.58  | 0.81  | 0.05  | 0.06  | 0.33  | 1.06  | 1.29  | 1.88  | 2.46  |
| COD                | 0.63  | 0.21  | 0     | 0     | 0     | 0     | 0.42  | 0.52  | 0     | 0     |
| NH <sub>4</sub> -N | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
| NO <sub>x</sub> -N | 26.06 | 23.24 | 23.95 | 21.13 | 18.90 | 15.75 | 18.49 | 18.49 | 21.23 | 21.23 |
| T - N              | 26.06 | 23.24 | 23.95 | 21.13 | 18.90 | 15.75 | 18.49 | 18.49 | 21.23 | 21.23 |
| T - S              | 320   | 316   | 40    | 290   | 320   | 510   | 430   | 232   | 282   | 254   |
| DO                 | —     | —     | 10.53 | 9.78  | 9.51  | 11.30 | 11.11 | 12.52 | 12.03 | 14.52 |

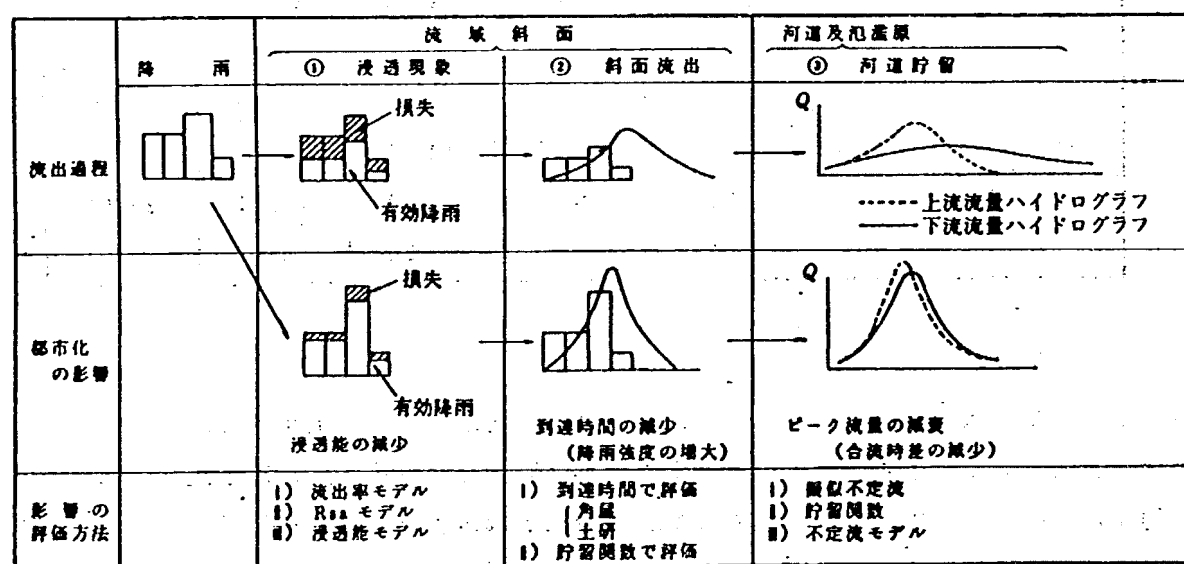
限られた所に集中せず、広い範囲で、効率的な分解がなされるのである。それゆえ、微生物による目づまりが発生しにくい状況となっているものと推定される。

#### 4. 地下埋管による洪水流出の抑制

##### 4.1 浸透工法の必要性

よく知られているように、都市化は洪水の流出に対して、まず第一に、雨水の表面流出を増大させるという点で、第二に流出の到達時間を速めるといって洪水の総量とピーク流量を増大させる。この現象の裏側では、雨水の地中への浸透が減少するため、河川水は地下水によって涵養されることが少なくなり、平常時の水量が著しく減少する。このことは、河川的环境としての機能を低下させている。

都市化による洪水流出を抑制する方法としては、これまで防災調節(整)池や棟間貯留施設が採



用されてきた。これらは上に述べた第2の流出過程において都市化によって早められた到達時間を貯留によって再び遅滞させようとするものである。しかし今後は上記の対策と平行して第一の流出過程において、従前の雨水の浸透能力を保全して、流出量そのものを減少させることも必要と思われる。自然状態においては、雨水のうち地中に浸透する量は意体大きく、最近調査された例でも雨水の4～8割が浸透することは、ごく普通のことである。特に関東地方を覆う関東ロームは、浸透性が大きく洪水の流出率は0.2～0.4程度である。流域の都市化は、表面流出を著しく増大させるから、雨水の浸透能力を保全することの意義は大きい。

住宅公団が、武蔵野台地上の立川幸町団地等で実施している、井戸による雨水の地下注入はその例であって、団地内の雨水を全て井戸によって処理しており、約10年の実績を有している。

また、熊本空港は、阿蘇溶岩の台地上に位置しているが構内の排水を空港に近接して設置した池に導いて、浸透によって処理している。

以上のように雨水の地下浸透は、過去においても実績を有しているが、これらは特に浸透性のよい地層が地表近くに存在することによって、始めて適用が可能になっているように見える。

地下埋管法は、もう少し広い地域において雨水浸透の適用を可能にしようとするものである。

#### 4.2 地下埋管による雨水浸透

土地の表面は、通常植生や小動物の存在によって空隙の多い状態に保たれているため、雨水の浸透が容易である。これに対して造成された土地の如く表面を固められた土地は、空隙が少なく雨水が浸透しにくい。しかし、土層の内部の状態は、造成によってもそう変っていないから、一旦表面から浸透した水が鉛直方向に移動していく速度は、造成前の状態がそのまま維持されていることが多いと思われる。地下埋管によって雨水は浸透能力の減少している地表附近をバイパスして直接地中に移動することが出来る。

井戸による雨水浸透もこれと同じ原理によるが、地中における供給地点が点的であるため、よほど透水性のよい地層でない限り地中における雨水の拡散の面で能力が限定されよう。地下埋管による供給は線的であるから、それほど透水性の大きくない地層でも雨水の地中への拡散が可能になるのである。

次に雨水を浸透させるに必要な地下埋管の長さを試算してみよう。

地下埋管分からの浸透量は、設置された土地の条件によって変化すると思われるが、ここでは埋管1mあたり $0.1\text{m}^3/\text{hr}$ を仮定しよう。いまこの管を5m間隔に設置したとすると、浸透速度は $0.1\text{m}^3/\text{hr} \div 5\text{m} = 20\text{mm}/\text{hr}$ となる。これは、5時間では100mmに相当するので、かなり大きな損失量である。この他に、地下埋管周辺の空隙として $0.1\text{m}^3$ 程度が見込めるが、これは20mm程度に相当し、降雨の時間変動を調節する機能を果たすであろう。

地下埋管を、5mおきに配管するということは、例えば、 $200\text{m}^2$ の個人住宅用の敷地では、延長40mの地下埋管が必要であることを意味する。敷地の周囲に付設するだけでも、この程度の延長は確保できる。

次に棟間貯留等の雨水貯留のための施設に地下埋管を併設することも考えられる。これによって必要な棟間貯留の敷地面積を減少させたり、浸水の頻度を小さくすることが期待できる。なお地質的に浸透の小さい所では必要な埋管の延長が大きくなる。しかしその問題は地下埋管の付設間隔を小さくすることで解決できる。

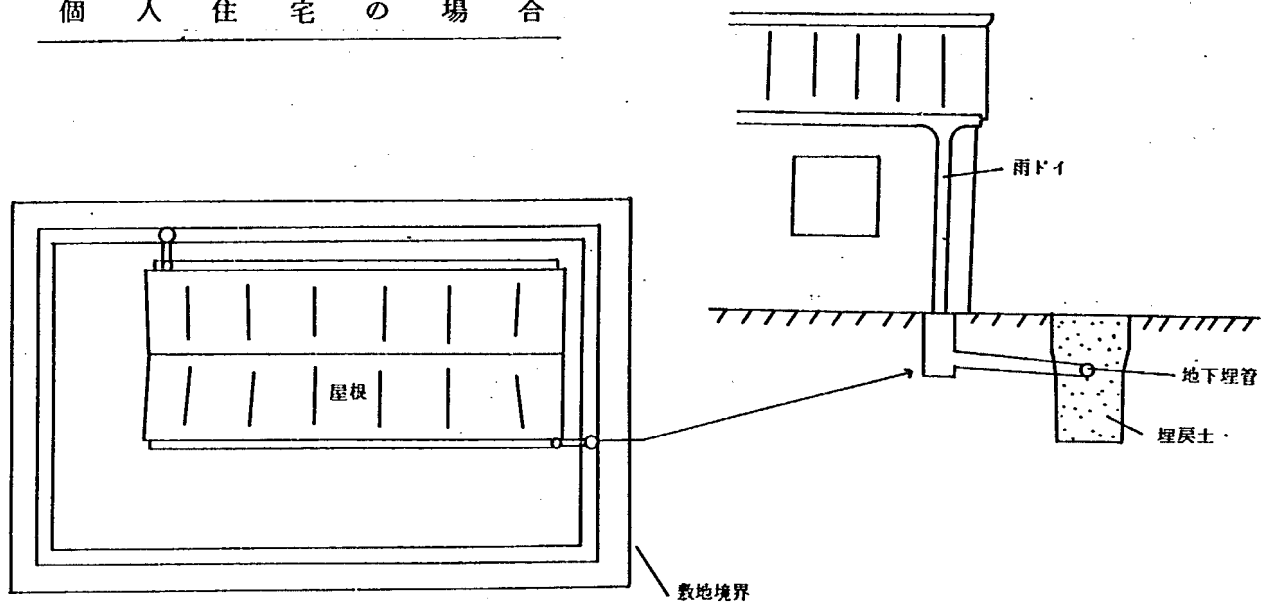


図 - 26

棟間貯留との併用

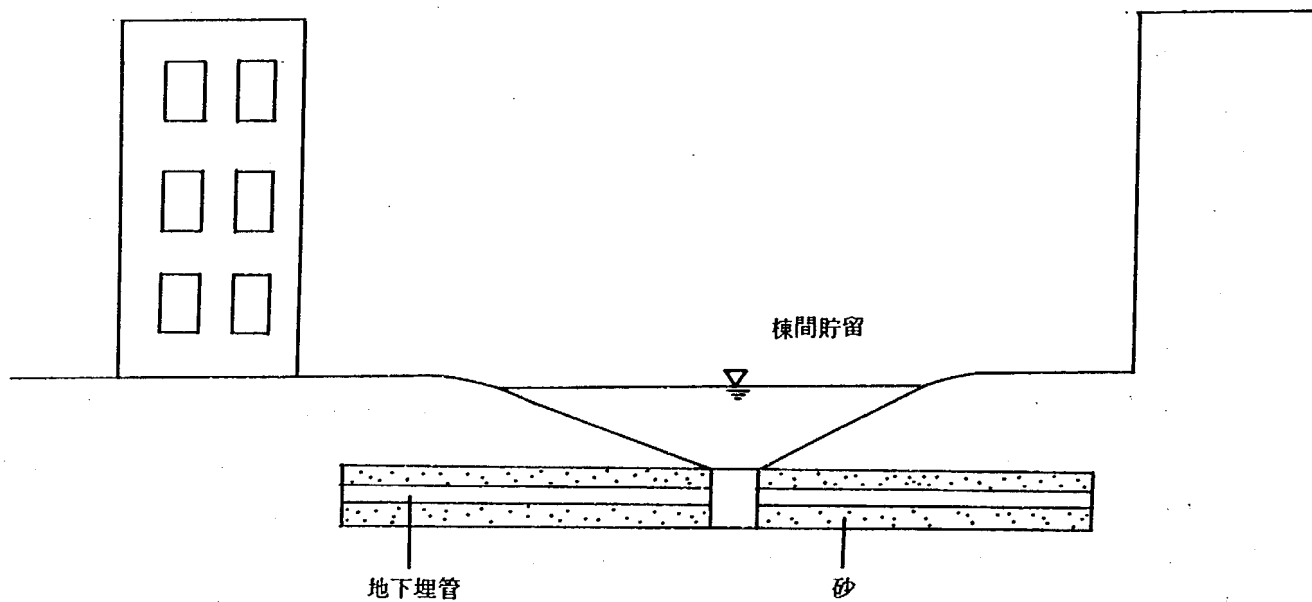


図 - 27

4.3 実用化への課題

以上のように地下埋管によって雨水の浸透をはかり、洪水の流出を抑制する可能性は非常に大きい。特にこの方法は、各戸単位の如く小さい規模でも設置が可能な点に魅力が感じられる。地下埋管敷設の経費も敷地の値段や家屋の値段に比べれば比較にならない位小さいので、例えば

原因者負担の原則を適用して開発者に、設置義務を負わせても、開発の進行を妨げたり、意欲を阻害することは少ないであろう。ここで心配になるのは、維持管理の面である。

都市域では、雨水と言えども水質は必ずしも良好でない。特に一旦地上に落ちた雨水は、浮遊物等を含むのでやはり目づまりの心配がある。この点についてはきめの細かい工夫が必要になりそうである。また雨水を地下浸透させることで地下水を汚染することにならないかと心配する人もあろう。

この点に関しては、先に検討した如く、土壌の浄化機能が期待できるので、悪い水質の水がそのまま地下に達することは考えられず、場合によっては地下水の水質を改良することさえ考えられる。しかしこの点も含めて、地下埋管がどれ位の年月、有効であるのかを検討し、目づまりの回復をはかる方法を工夫することが必要であろう。そのため室内実験と平行して、実際の家屋や団地等での試行が是非必要である。

幸い関東地方建設局、住宅公団によって検討が進められているのは心強いが、条件の異なるなるべく多くの地点で、試行が行なわれることが望ましいと考えている。

## お わ り に

地下埋管法について、浸透の機構や能力について考察してみた。当初は地下水涵養の手法開発を目ざして来たが、途中から副産物的に洪水の流出抑制への適用が加わって来た。

これまでの検討結果では予想以上の好成績であり今後に大きな期待を抱かせる。集中的な技術開発の研究を行なう価値がありそうである。

地表附近の土壤水を扱う不飽和帯の水文学は現在発展中の新しい学問分野であるが、それだけにいろいろな可能性を有しており、実用面からも注目される。

## 一 参 考 文 献 一

新 見 正 他 ； 汚水の土壌浄化法研究 — 続 編 — 新見コンサルタント(株)

建設省土木研究所水文研究室 ； 昭和53年度、地下水涵養技術の開発成果報告

石崎勝義、佐々木健一 ； 洪水氾濫の予測手法に関する調査 昭和53年度研究報告書

石崎勝義、佐合純造 ； 荒川左岸における地下水涵養、用水と廃水 1980, 1月

北 川 明 ； 地下水の人工かん養 地下水ハンドブック 9-9

昭和54年(建設産業調査会)

付 録 1

地 下 埋 管 に よ る 人 工 涵 養

# 目 次

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 1. ま え が き .....        | 1  |
| 2. 地下埋管による地下水人工涵養 ..... | 1  |
| 2.1 概 論 .....           | 1  |
| 2.2 涵養室内実験 .....        | 2  |
| 2.3 実験結果 .....          | 3  |
| 3. 地下水の挙動 .....         | 4  |
| 3.1 総 説 .....           | 4  |
| 3.2 飽和地下水の運動 .....      | 4  |
| 3.3 不飽和地下水の運動 .....     | 5  |
| 3.3.1 吸引圧 .....         | 5  |
| 3.3.2 運動の基礎式 .....      | 6  |
| 4. 数値解析 .....           | 7  |
| 4.1 差分近似及び緩和法 .....     | 7  |
| 4.2 境界条件 .....          | 8  |
| 4.3 計算結果 .....          | 9  |
| 5. 今後の問題点 .....         | 12 |
| 6. 付 録 .....            | 15 |
| 6.1 フローチャート .....       | 15 |
| 6.2 プログラムリスト .....      | 18 |

## 1 まえがき

本来水資源は無限に存在するものではなく、その供給量には限りがある。昨今の水不足の例でも明らかなように、需要量の増大により、一たび渇水が起こればたちどころに事態は深刻となる。そこで供給量を増やす方法を考える必要があるが、従来はその方法として一般に地下水汲み上げが行なわれていた。しかし、安易にそれを行なうと地下水位低下、地盤沈下等の害を生じることがこれまでの経験でわかってきている。これを防ぐためには、汲み上げただけの水を地下に還元しなければならない。これが地下水人工涵養であるが、これまでにそれが行なわれた例は数少ないといわなければならない。

人工涵養を行なって地下水位をコントロールしながら、地下水の利用する方式は地下貯水池と呼ばれるが、この方式の長所は次のようである。

i) 豊水時の河川余剰水を涵養水源として用い、渇水時にそれを汲み上げて使用するようなことが考えられるため、水利用の効率が増す。

ii) 地下の帯水層の容量は一般に地上ダムの利水容量よりも大きく、その使用は渇水時に限られるため、発生頻度の低い渇水に対しても柔軟に対応できる。

これらの地下貯水池の長所は、人工涵養を行なうことによって長所として発揮できることになる。地下水涵養の方法には拡水法及び井戸涵養法がある。拡水法にはさらに涵養に用いる媒体により、水路法、溜池法、溝渠法、洪水法、抗井法などがある。また井戸涵養法には、乾式井戸法、湿式井戸法がある。我が国でこれまで行なわれてきた人工涵養には、ほとんど井戸涵養法が用いられてきた。井戸涵養法の場合、涵養水中のSSなどの物理的な原因、酸化などの化学的な原因により目づまりが生じ、涵養効率の低下が問題となる。目づまりの問題は拡水法についても考えられるものであるが、ここでは詳しく触れずに、本論文の主旨である地下埋管による涵養法について、この方法のもつ涵養機構、涵養能力に関する検討をする。

## 2 地下埋管による地下水人工涵養

### 2.1 概 論

地下埋管による涵養法は、拡水法の中の一つの方法で、地下水面より上の不飽和帯における土壌の毛管力を利用して涵養を行なうものである。この方法の概略を図2-1に示す。この装置による浸透機構は次のようになるものと考えられる。

1) 地下埋管に涵養水が注入されると、水はストレーナ、管の継目を通して直ちに下方の砂利を通して受け皿（地下トレンチと呼ばれる）にたまる。

2) 一時的にトレンチにたまった水は、土壌の毛管作用によって上昇する。その後、水頭差によって横方向、下方に移動し地下水となる。

この方法による涵養の実用性や涵養能力を把握するために、涵養装置の模型により室内実験を行なった。以下にその概要及び結果について述べる。

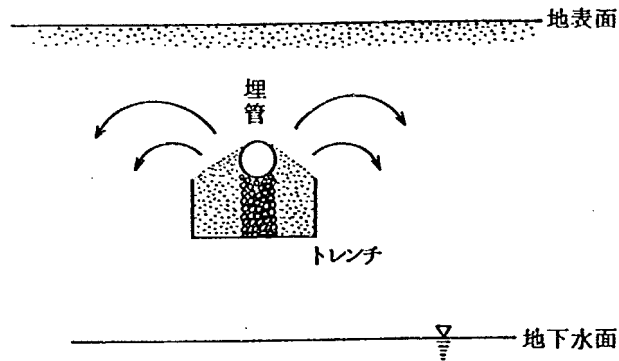


図 2 - 1 地下埋管による人工涵養の概要

## 2.2 涵養室内実験

この室内実験は昭和52年度に行なわれたもので、地下埋管による地下水人工涵養が実用的であるか、またもし実用性があるとしたらどの程度の涵養高が期待できるかを把握することを目的としたものである。さらに、期待される涵養高が得られる時、各種条件の影響を考察し、埋設位置の最適値を探ろうとしたものである。

実験装置の概略を図2-2に示す。図中(a)は移動可能な側壁であり、隣接した埋管との境界を表わすものと考えた。すなわち、(a)の間隔を変えることにより、埋管の設置間隔が変わるものとした。また、(b)は連通管であり、ここから流出する水量を涵養量とした。この連通管を通して水位を変化させ、それによる涵養量の変化を把握した。

実験の試料土には豊浦の標準砂を用いた。その粒径分布は、 $105\mu\sim 149\mu$ のものが87%を占めるほぼ単一粒径の砂である。その性質は次のようである。

- 1)比 重 2.64
- 2)間 隙 率 39.4% (乾燥密度1.6)
- 3)透水係数  $K = 1.01 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$

涵養水には水道水を用い、その水温は4℃前後であった。また、本実験は室内で行なわれたが、室温は3～5℃の範囲であった。測定器具はストップウォッチ、ビーカー、メスシリンダー、温度計、鋼尺である。

実験条件の組み合わせは次のとおりである。

- a)地下トレンチ内の水位と地下水位との差が4, 9, 14, 19, 24 cmについてそれぞれ行なった。以下これをHとする。
- b)側壁(a)の間隔を20, 42, 64 cmの3通りについて行なった。以下、これの $\frac{1}{2}$ をBとする。

測定したパターンを図2-3に示す。B=10, 21, 32 cmのときの試料の底面積はそれぞれ812, 1647, 2473 cm<sup>2</sup>であり、その比は、1:2.03:3.05である。また、実験の手順は次のとおりである。

- 1)実験装置の底に礫を敷きつめる。(これが連通管の役目をはたす。)
- 2)側壁(a)を測定しようとする幅に礫の上に設置する。
- 3)図2-2のように、礫の上に粒径の粗い砂を詰め、徐々に細かい砂を詰めていく。これによ

り試料上のパイピングを防ぐ。

4) 乾燥状態の試料土を、単位体積重量が一定になるように詰める。(乾燥密度 1.6)

5) 試料土を詰める時に地下トレンチを埋設するわけであるが、構造物にも、図 2-2 に示すように礫、粗砂等を詰める。これは、横方向の通水性を良好にし、トレンチ中の水位を一定に保ちやすくするためのものである。

6) 地下水位を最も高いところ(この場合は、 $H_1 = 4\text{ cm}$ )まで上げ、試料土に十分吸収させる。

7) 地下トレンチに水位一定で水を張り、連通管からの越流量を測定する。測定は、各実験条件において涵養量が一定になったと思われる時間(50~120分)まで行なった。

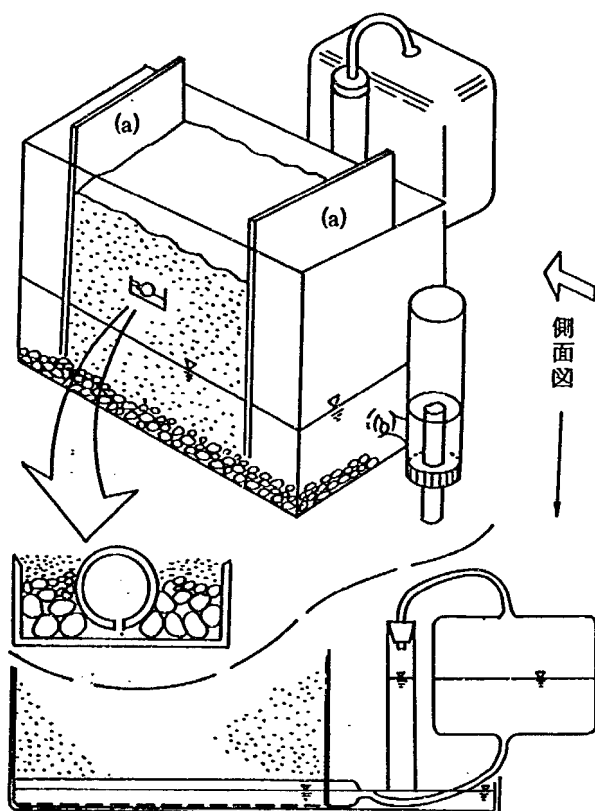


図 2-2 実験装置の概略図

### 2.3. 実験結果

涵養室内実験の結果を図 2-4 (a), (b) に示す。図でいう涵養量とは、ある条件のもとで涵養される量で、単位は  $\text{cm}^3/\text{sec}$  あるいは  $\text{m}^3/\text{day}$  である。また、涵養高は一日当りの涵養量を試料の水平面積で除したものであって、単位は  $\text{mm}/\text{day}$  が用いられる。上図からわかるように、水位差  $H$  が大きくなるに従って涵養量が大きくなり、また幅  $B$  によっても影響されることがわかる。ただ、 $B$  の増加による涵養量の増加は直線的ではなく、ある程度まで幅が広がると、ある  $H$  に対し

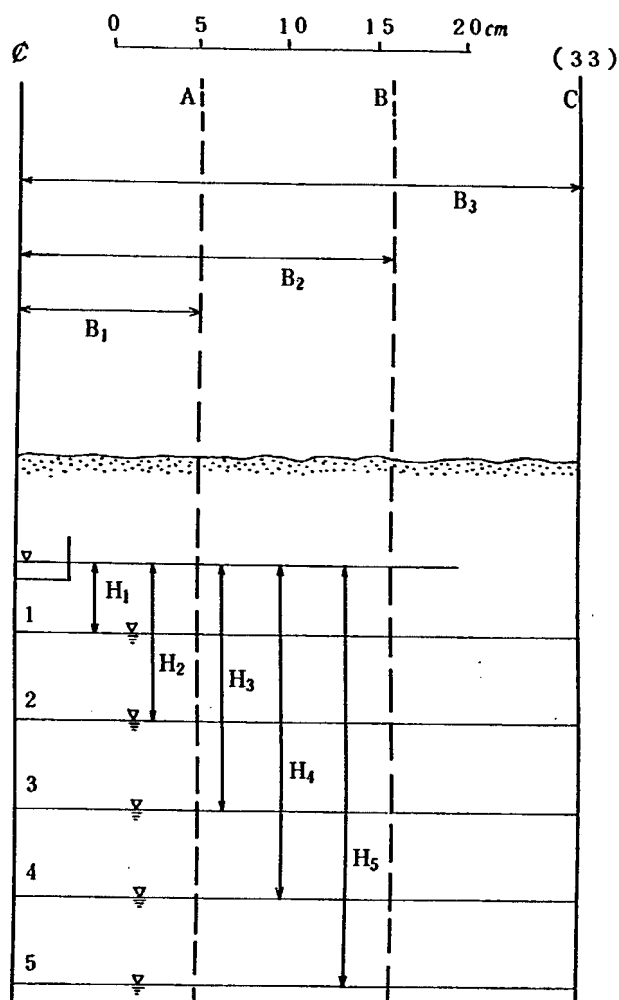


図 2-3

て一定量に近づくことが予想される。これは毛管作用による浸潤の影響範囲に限界があるためと考えられる。また、同図から、涵養量の増加がHの増加に対して直線的に比例すると推測できるようであるが、実際には水が透水係数以上の流速で流れることができるとは考えられない。この点から見て、Hがある程度まで大きくなれば涵養量は一定になることが予想される。

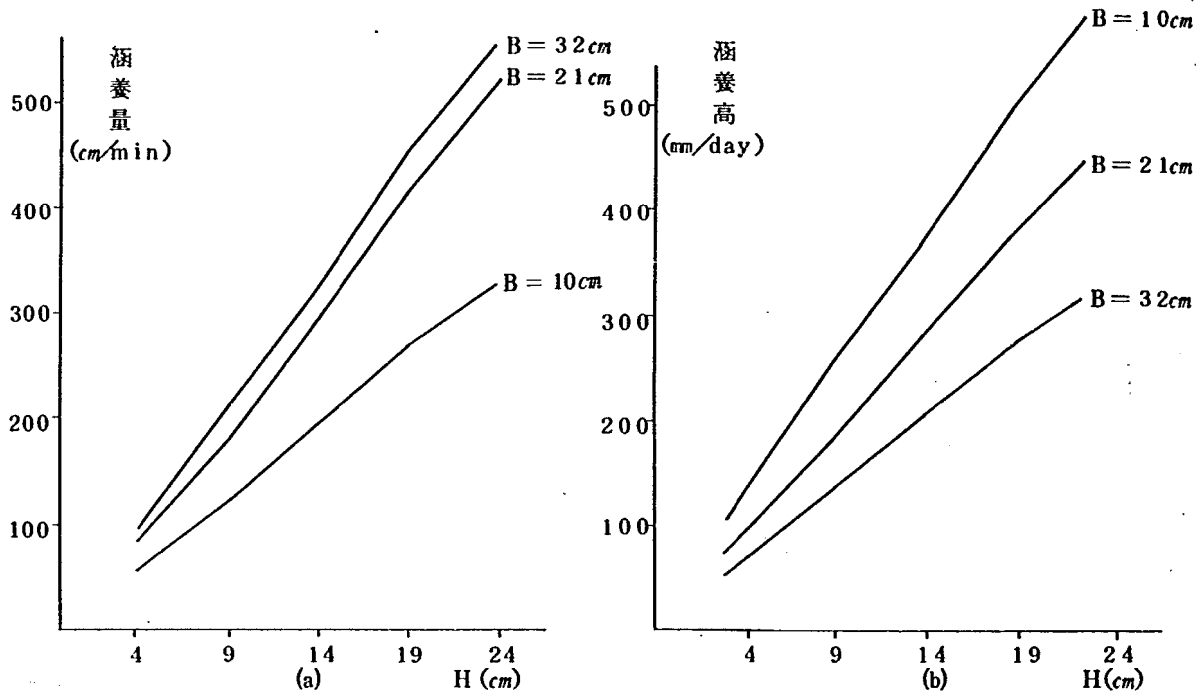


図 2-4

実験に豊浦の標準砂を用いたのは、その物理的な性質が一般の土壌と異なって安定しており、取り扱いが容易であるからである。現実に標準砂で構成されている土壌は存在しないが、実物の約  $\frac{1}{4}$  程度の模型でありながら、1日に100~600mmもの涵養が可能であることが示された。この結果、地下埋管は良好な涵養機能を有する構造物であることが明らかとなった。

### 3 地下水の挙動

#### 3.1 総 説

単に地下水といっても土が水によって飽和されているか、されていないかにより、飽和地下水、不飽和地下水に分けることができ、さらに飽和地下水の中でも加圧帯水層にあるものと不圧帯水層にあるものとはその性質が異なる。今回の検討の対象である地下埋管による涵養法の主役は不飽和地下水であり、この方法のもつ涵養機構を把握するには不飽和地下水の挙動を理解しなければならない。しかし、この不飽和地下水の運動の解明にはさまざまな問題がある。例えば、飽和地下水においてはその通水性はダルシー則により動水勾配に比例するとされているが、不飽和地下水(土壌水)においてはダルシー則で見られる透水係数Kは一定とはならないなどである。

ここではまず、飽和地下水の運動の基本式について述べ、次に不飽和地下水の特性を考慮してそれを基本式にとり入れ、不飽和地下水の運動を表わす式を求める。

#### 3.2 飽和地下水の運動

まず、連続の式及びダルシー則により、水の圧縮性、土の弾性変化を考慮しない簡単な飽和地下水の運動の基本式を示す。ここで図3-1に示す微小物体中の水の出入りを考えてみる。x, y, z方向の微小物体の長さをそれぞれ $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ とする。浸透流速を $q$ 、水の密度を $\rho$ 、間隙率を $n$ とすると、微小物体中の水の質量は

$$\Delta M_w = n \cdot \rho \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z \quad \dots (3.2.1)$$

この水の $\Delta t$ 時間における水の質量の変化量は、

$$\frac{\partial (\Delta M_w)}{\partial t} \cdot \Delta t = \frac{\partial}{\partial t} \cdot (n \cdot \rho \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z) \quad \dots (3.2.2)$$

となり、この値は次に示す $\Delta t$ 時間における水の流出入量の差に等しくなければならない。

その値は図3-1より

$$\left\{ \frac{\partial (\rho \cdot q_x)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho \cdot q_y)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho \cdot q_z)}{\partial z} \right\} \cdot \Delta z \cdot \Delta y \cdot \Delta x \cdot \Delta t \quad \dots (3.2.3)$$

となる。水の圧縮性を無視し、土の弾性変化を考えないことにより、 $\rho \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z \cdot n = \text{const.}$  となり、(3.2.2)と(3.2.3)より

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = 0 \quad \dots (3.2.4)$$

となる。ここでダルシー則  $q = K \cdot \frac{\partial \phi}{\partial l}$  を導入するわけであるが、その前に圧力水頭 $\psi$ の概念を示しておかなければならない。まず、ある点での全水頭を $\phi$ で表わすと

$$\phi = z + \frac{P}{\rho \cdot g} \quad \dots (3.2.5)$$

となる。ここで、 $z$ は位置水頭、 $P/\rho \cdot g$ は圧力水頭である。この $P/\rho \cdot g$ を $\psi$ で表わすことにすると

$$\phi = z + \psi \quad \dots (3.2.6)$$

となる。 $q = -K \cdot \frac{\partial \phi}{\partial l}$ を(3.2.4)に代入すると

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) = 0 \quad \dots (3.2.7)$$

となるが、X, Y方向では位置水頭 $z$ は影響しないので

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{\partial \psi}{\partial x}, \quad \frac{\partial \phi}{\partial y} = \frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad \frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{\partial z}{\partial z} + \frac{\partial \psi}{\partial z} = 1 + \frac{\partial \psi}{\partial z}$$

となるため、結局式(3.2.7)は次のように変形される。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K + K \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) = 0 \quad \dots (3.2.8)$$

この式が今後の検討を行なう上での基礎式となる。

### 3.3 不飽和地下水の運動

#### 3.3.1 吸引圧

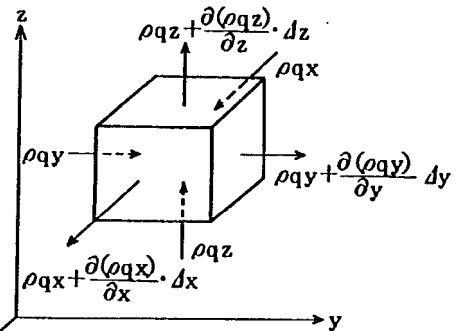


図3-1

不飽和地下水帯は図3-2に示すように、土壤水の状態によって二つの領域に分けられる。図において、毛管水帯では土壤水は地下水面と連続しており、懸垂水帯ではそうでない。まず、懸垂水帯における水の状態を考えると、水は概念的に図3-3に示されるように、土粒子の間に、宙吊りの状態に保たれていると考えられる。一方、毛管水帯で水が地下水面と連続していると考えられることができるが、もし水面以上の圧力水頭 $\Psi$ を0と仮定すると、その位置水頭は水面よりその高さだけ大きいのであるから、水頭差によって水は下方へと流れていくはずである。しかし実際には下方に流れず平衡を保っているのであるから、毛管水帯の任意の点の全水頭は地下水面の全水頭と等しくなければならない。従って、不飽和帯における圧力水頭 $\Psi$ は負となる。ここで再び図3-3の状態を想定して力のつり合いを考えると、水の表面張力を $P$ 、外部圧を $P_0$ 、水の表面張力を $\sigma$ とすると表面圧と外部圧との差は次式で与えられる。

$$P - P_0 = \sigma \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \dots\dots\dots (3.3.1)$$

ここで、 $r_1 > r_2$  なので右辺は負となり、表面圧は外部圧よりも低くなる。よって、懸垂水帯での水の圧力は大気圧以下となる。すなわち、土粒子と水の作るメニスカスにより負圧状態が作られ、それにより水は下方に流れずその位置にささえられているのである。また、毛管水帯においても、土壤空気が大気と連続していれば水圧は大気圧以下となる。

いま大気圧を0とすると、不飽和帯における水圧は負となる。本論文では負圧の値として水頭を用い、 $h = -a \rightarrow -a \text{ cm}$ などと表わす。この $h$ は吸引圧（サクション）と呼ばれる。

### 3.3.2 運動の基礎式

リチャードは、不飽和土において圧力水頭及び位置水頭よりなるポテンシャルの場を考え、その高低差により水が流れるものとした。ここでいう圧力水頭とは先に述べたメニスカスによる吸引圧のことである。リチャードの理論に従うと、垂直二次元における流速 $V$ は次式で表わされる。

$$V = K(\Psi) \frac{\partial \Psi}{\partial x} + K(\Psi) \left( \frac{\partial \Psi}{\partial z} + \frac{\partial z}{\partial z} \right) \dots\dots\dots (3.3.2)$$

この式はダルシー則を拡張した形である。ただ異なるのは、 $K(\Psi)$ であり、これは不飽和透水係数と呼ばれている。不飽和透水係数 $K$ は吸引圧 $\Psi$ の関数として表わされている。図3-4(a)は不飽和透水係数 $K$ の吸引圧 $\Psi$ に関する概略を示したグラフである。

$K$ および $\Psi$ を両対数用紙にプロットすると(b)のようになり、吸引圧が $\Psi_b$ までは $K(\Psi)$ は飽和透水係数とほとんど等しく、それを過ぎると図のように直線的に減少するといわれている。なお、

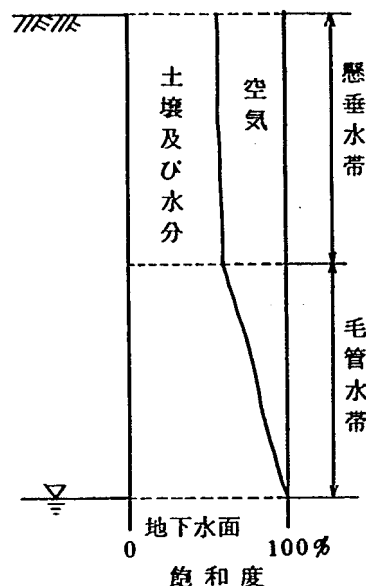


図3-2

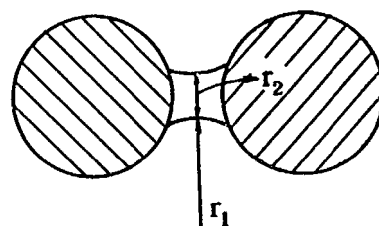


図3-3

ここでは $K$ は $\psi$ の一価関数であるとしているが、実際にはその値は吸水過程及び排水過程において、ヒステリシスを描くといわれている。つまり、不飽和透水係数は吸引圧だけにより表わされるものではなく、土壌水が土粒子にどのような状態で保持されているかによってその値が変化するとと思われるが、本論文ではその影響が小さいものであるとして無視し、以下話を進める。

不飽和地下水の運動の基本方程式は、式(3.2.8)を求めたのと同様に垂直二次元定常的な問題では、

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K(\psi) \cdot \frac{\partial \psi}{\partial z} + K(\psi) \right) = 0 \quad \dots\dots\dots(3.3.3)$$

となる。ここで、不飽和透水係数は次のように近似される。

$$K(\psi) = \begin{cases} K_0 (\text{一定}) & \psi > \psi_b \\ K_0 \left( \frac{\psi_b}{\psi} \right)^\eta & \psi \leq \psi_b \end{cases} \quad (3.3.4)$$

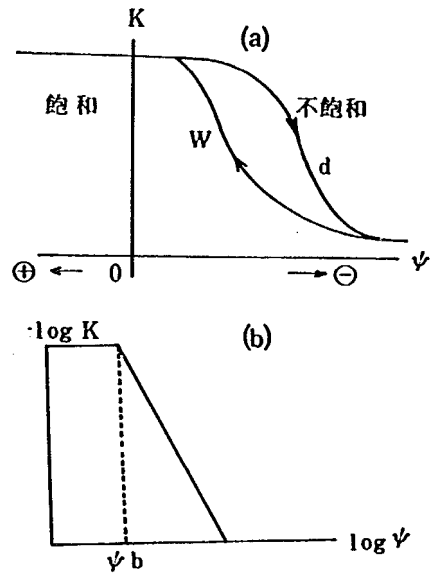


図 3 - 4

#### 4 数値解析

ここでは、不飽和地下水の運動の基本式を差分近似し、室内実験の条件をあてはめて計算を行ない、実験結果と比較してみる。もしも、実験結果と計算結果がよく一致するようであれば、計算の妥当性が示されたことになり、現場スケールへの適用が可能となる。

##### 4.1 差分近似及び緩和法

不飽和地下水の運動の基本式は次のとおりである。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K(\psi) \cdot \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial z} + K(\psi) \right) = 0$$

ここで、 $K(\psi) \cdot \frac{\partial \psi}{\partial x}$ 、 $K(\psi) \cdot \frac{\partial \psi}{\partial z} + K(\psi)$

はそれぞれ、 $x$ 及び $z$ 方向の流速を表わしている。

いま、図4-1に示すような微小区分を考える。図中のI、II、III、IVの地点における流速をそれぞれ $V_I$ 、 $V_{II}$ 、 $V_{III}$ 、 $V_{IV}$ とすると、基本式は次のように近似される。

$$\frac{1}{\Delta x_i} (V_I - V_{II}) + \frac{1}{\Delta z_j} (V_{III} - V_{IV}) = 0 \quad \dots\dots\dots(4.1.1)$$

また、 $V_I$ 、 $V_{II}$ 、 $V_{III}$ 、 $V_{IV}$  はそれぞれ

$$V_I = K_I \frac{\partial \psi}{\partial x} = K(\psi_I) \frac{2}{\Delta x_i + \Delta x_{i+1}}$$

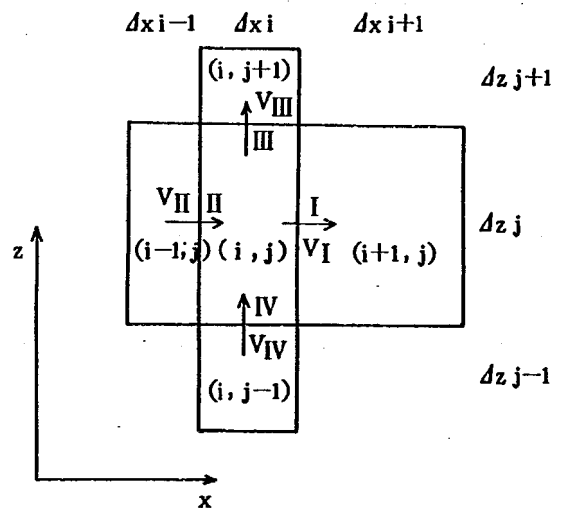


図 4 - 1

$$(\psi_{i+1,j} - \psi_{i,j})$$

$$V_{II} = K_{II} \frac{\partial \psi}{\partial x} = K(\psi_{II}) \frac{2}{\Delta x_{i-1} + \Delta x_i} (\psi_{i,j} - \psi_{i-1,j})$$

$$V_{III} = K_{III} \left( \frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) = K(\psi_{III}) \left\{ \frac{2}{\Delta z_{i+1} + \Delta z_i} (\psi_{i,j+1} - \psi_{i,j}) + 1 \right\}$$

$$V_{IV} = K_{IV} \left( \frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) = K(\psi_{IV}) \left\{ \frac{2}{\Delta z_j + \Delta z_{j-1}} (\psi_{i,j} - \psi_{i,j-1}) + 1 \right\}$$

となる。ここで、 $\Delta x$ 、 $\Delta z$ はそれぞれ等間隔とは限らない。これらを式(4.1.1)に代入すると次のようになる。

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\Delta x_i} \left[ K(\psi_I) \frac{2(\psi_{i+1,j} - \psi_{i,j})}{\Delta x_i + \Delta x_{i+1}} - K(\psi_{II}) \frac{2(\psi_{i,j} - \psi_{i-1,j})}{\Delta x_{i-1} + \Delta x_i} \right] \\ & + \frac{1}{\Delta z_j} \left[ K(\psi_{III}) \frac{2(\psi_{i,j+1} - \psi_{i,j})}{\Delta z_{i+1} + \Delta z_j} - K(\psi_{IV}) \frac{2(\psi_{i,j} - \psi_{i,j-1})}{\Delta z_j + \Delta z_{j-1}} + K(\psi_{III}) - K(\psi_{IV}) \right] = 0 \\ & \dots\dots\dots (4.1.2) \end{aligned}$$

上式を $\psi_{i,j}$ についてまとめると

$$\begin{aligned} & \psi_{i,j} \left[ \frac{1}{\Delta x_i} \left\{ \frac{K(\psi_{II})}{\Delta x_i + \Delta x_{i+1}} \right\} + \frac{1}{\Delta z_j} \left\{ \frac{K(\psi_{III})}{\Delta z_j + \Delta z_{i+1}} + \frac{K(\psi_{IV})}{\Delta z_j + \Delta z_{j-1}} \right\} \right] \\ & = \frac{K(\psi_I)}{\Delta x_i (\Delta x_i + \Delta x_{i+1})} \cdot \psi_{i+1,j} + \frac{K(\psi_{II})}{\Delta x_i (\Delta x_i + \Delta x_{i-1})} \cdot \psi_{i-1,j} \\ & + \frac{K(\psi_{III})}{\Delta z_j (\Delta z_j + \Delta z_{i+1})} \cdot \psi_{i,j+1} + \frac{K(\psi_{IV})}{\Delta z_j (\Delta z_j + \Delta z_{j-1})} \cdot \psi_{i,j-1} + \frac{K(\psi_{III})}{2\Delta z_j} - \frac{K(\psi_{IV})}{2\Delta z_j} \\ & \dots\dots\dots (4.1.3) \end{aligned}$$

ここで、 $\psi$ 以外のものを係数A、B、C、D、E、Fで表わすと

$$A \cdot \psi_{i,j} = B \cdot \psi_{i+1,j} + C \cdot \psi_{i-1,j} + D \cdot \psi_{i,j+1} + E \cdot \psi_{i,j-1} + F \dots\dots\dots (4.1.4)$$

となる。

式4.1.3での $K(\psi_I)$ 、 $K(\psi_{II})$ 、 $K(\psi_{III})$ 、 $K(\psi_{IV})$ は図4-1に示す地点、I、II、III、IVにおける吸引圧 $\psi$ における不飽和透水係数である。また式4.1.4はまわりの4点から中央の $\psi$ の値が求まることを示している。本論文では緩和法によって4.1.4式を解いていく。

緩和法とはある領域に初期値を与え、その領域の境界条件のもとで各メッシュを1つずつまわりの4点から計算を行ない、中央点の値とおき換える。これを全領域について行なう。この手順を $\psi$ が真値に近づくまでくり返すものである。

## 4.2 境界条件

数値解析を行なう場合、境界条件が問題となる。

今問題としている人工涵養について考えてみれば、上部境界が地表面、下部境界が地下水面であるのでこの点を考慮して条件を与えればよい。また、埋管は一定間隔に行なわれると考えられるので左右の境界は個々の埋管との中間にある。図4-2にその概念図を示す。

ここでのモデルは左右対称なのでどちらか一方を考え、中心線上では水の出入りがないと考えてもさしつかえない。よってここでの境界条件は透水係数 $K=0$ とする。次に地下水面および地中構造物の水面を考えると、その境界条件としては、水面での圧力水頭（吸引圧） $\psi=0$ なので、これを境界条件とする。

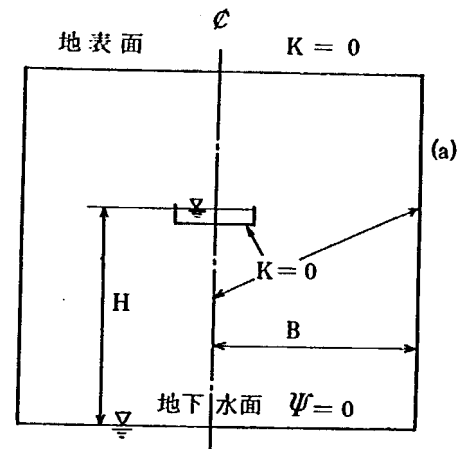


図4-2

また、埋設の巾による境界（図中(a)）は先ほどの対称性と同様に、となりの構造物と対称なので、ここでも $K=0$ とおける。地中構造物は不透水性と考えられるので $K=0$ とおく。考えなければならないのは上部境界条件である。実際現地での上部境界値つまり地表面における吸引力は $100\text{ cm H}_2\text{O}$ くらいであるといわれている。しかしそれは長い目で見た場合での値であり、もし降雨があればその値は非常に小さくなるであろう。よって短い目で見た場合は地表面において水の出入りがないと考えた方が妥当ではないかと思われる。というのは水田において地表面からの蒸発散量は春秋には $3\sim5\text{ mm/日}$ 、夏には $6\sim9\text{ mm/日}$ くらいであり、今回の実験における涵養高数 $\text{cm/日}$ に比べ無視してもよいと思われるからである。よって本実験との比較においては、上部境界条件は $K=0$ とした。

#### 4.3 計算結果

まず、数値解析の妥当性を確かめるために、計算結果と実験結果との比較を行なう。

前にも述べたが、一般的に不飽和透水係数は図4-3に示されるように、次式によって近似することができる。

$$K(\psi) = \begin{cases} K_0 (\text{一定}) & \psi > \psi_b \\ K_0 \left( \frac{\psi_b}{\psi} \right)^\eta & \psi \leq \psi_b \end{cases}$$

ここに、 $K_0$ ；飽和透水係数、 $\eta$ ；土粒子の径、粒度分布に関係した定数である。 $\psi_b$ ；バブリングプレッシャー（ここでは水頭である）と呼ばれ、飽和状態から脱水するとき砂層内に空気が

表われる圧力である。

標準砂の不飽和透水係数のサクションによる変化は図4-3に示してあるが、ここでは $K_0$ は飽和透水係数 $1.01 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$ を用いた。 $\psi_b$ および $\eta$ は図から読み取り、 $\psi_b = 3.6 \text{ cm}$ 、 $\eta = 18.2$ とした。

図4-4に計算結果と実験結果とを示す。図でわかるように、両者はよく一致し、妥当な解析結果と考えられる。計算の結果、 $\psi \geq \psi_b$ となることはなく、透水係数は計算全区間で一定であった。よって涵養量は直接 $K_0$ の値に比例することになる。

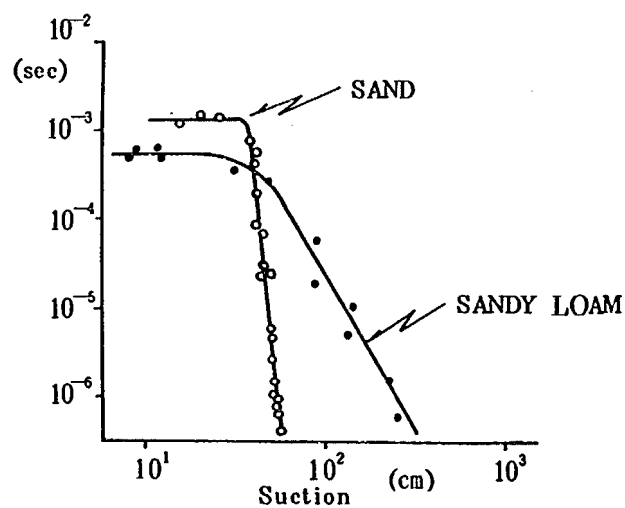


図4-3 不飽和透水係数

表4-1 地下構造物の諸元

|           | 室内実験    | 現地を想定したスケール |
|-----------|---------|-------------|
| 地下構造物の幅   | 3.0 cm  | 20.0 cm     |
| 地下構造物の高さ  | 2.5 cm  | 7.0 cm      |
| 地下構造物中の水深 | 1.0 cm  | 3.5 cm      |
| 土かぶり      | 26.0 cm | 58.0 cm     |

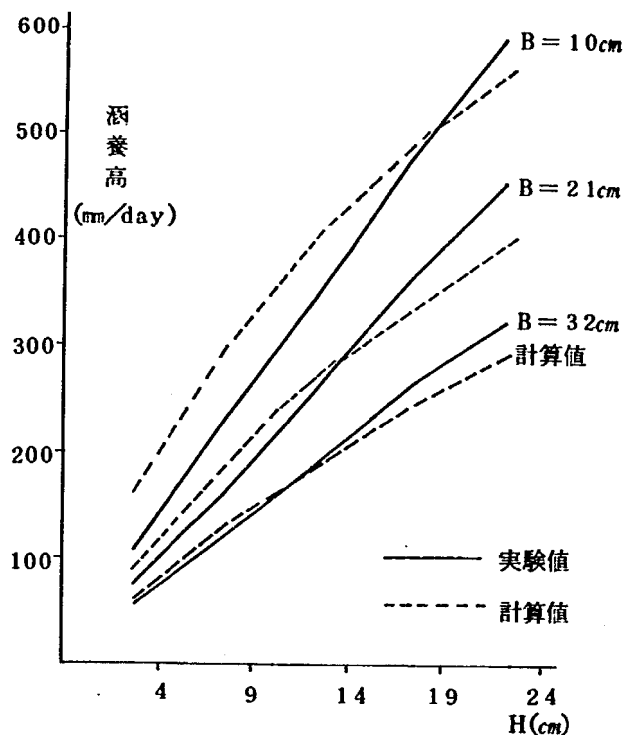


図4-4 実験値と計算値との比較

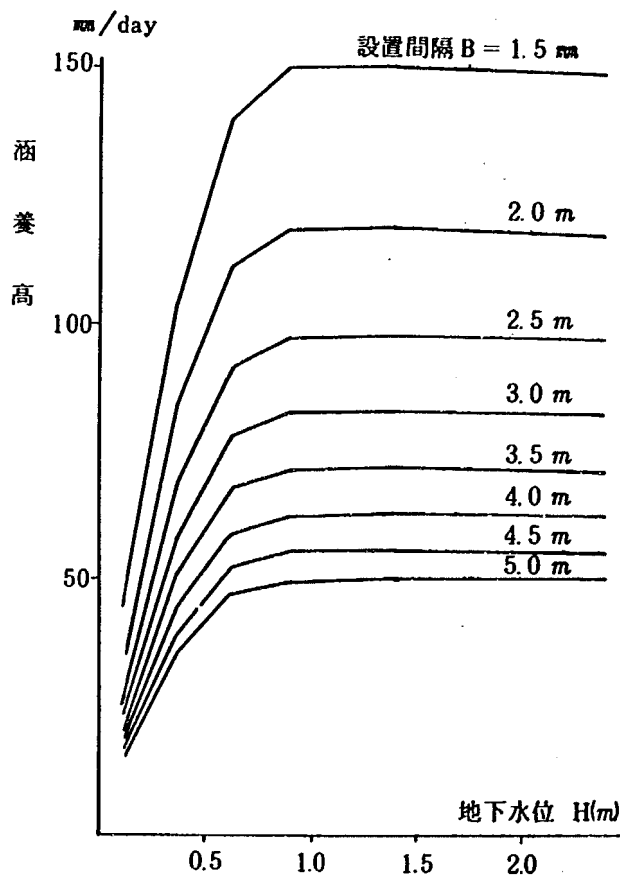


図4-5 計算結果

図4-5はスケールを拡張し、現場で人工涵養を行なうと想定したときの涵養高の計算結果である。土質は砂質ロームとし、図にある透水係数値をそのまま用いた。

$K_0 = 5.6 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$ ,  $\psi_b = 39.8 \text{ cm}$ ,  $\eta = -3.5$ である。地下埋管の構造物の寸法は、模型実験の寸法と同様に表4-1に示してある。計算のための境界条件も模型実験での計算値とまったく同じである。実際には、地表面からの蒸発を考慮した計算を行なうべきであるが、蒸発量は1日せいぜい5~6 mm程度と考えら

れること、さらに蒸発量は地下のトレンチからの流出量に影響しても、涵養量に対する影響は少ないと考えられ、地表からの蒸発を0として計算を行なった。

計算の結果から、涵養高は水位差Hによって影響されるが、Hがある程度以上大きくなれば関係がなく、地下水位がトレンチから1 m以深であればほぼ一定となっている。むしろ、設置間隔Bによる影響の方が現地においては支配的であることがわかった。

地下埋管による人工涵養を畑地で行なう場合、作物への影響が問題となる。すなわち、埋管が地上に近すぎることによって、土壌の湿度が上昇することが心配されるわけである。この点を検討するために計算によって土壌水分量を予想することができれば便利である。ここでは、不飽和地下水の吸引圧と土壌水分量との関係式を用いて、人工涵養を行なうときの土壌水分の分布を計算により求めた。この関係式とは次のとおりである。

$$h = h_e \left( \theta / \theta_e \right)^{-b}$$

ここで、 $\theta$ は土壌含水量、 $h$ は吸引圧である。 $h_e$ ,  $\theta_e$ ,  $b$ は土壌の物理特性によって決まる定数である。中野他の実験によれば、上式の関係は図4-7のようになる。

式中の定数の値を表4-2に示す。

このうち、砂質ロームの数値を現地スケールでの計算に代入する。現地スケールの埋管設置幅等の数値は既に荒川左岸扇状地(深谷市で現地実験が行なわれているので、実際の値を用いた。図4-8にその値を示す。なお、室内実験の場合と

異なり、地下トレンチの形状が半円型になっているので、それを条件として取り入れた。この図

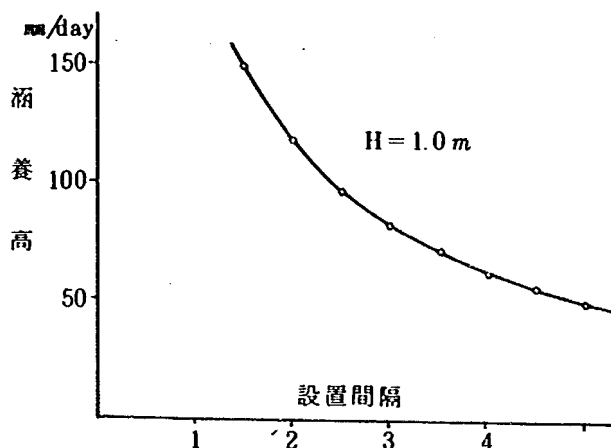


図4-6 設置間隔と涵養高

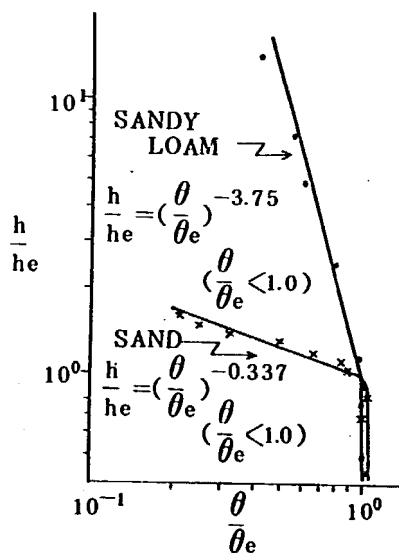


図4-7

|            | 砂     | 砂質ローム |
|------------|-------|-------|
| $\theta_e$ | 0.34  | 0.54  |
| $h_e$      | 38 cm | 40 cm |
| $b$        | 0.337 | 3.75  |

では設置間隔 2 m と 2.5 m の場合のみ計算を行なった (図 4-9)。この結果と図 4-5 とを比較すると、水位差の低い領域ではわずかに差があるが、 $H$  が 1 m 以上になるとほとんど変わらない値となっている。これは、トレンチの形状の差によるものと考えられるが、実際には水位差が 2.5 cm 程度になることはほとんどないと思われるので、実質的な差はないといえる。

図 4-10, 11, 12 に、設置間隔 2.5 cm, 地下水位 1.35 m (水位差  $H = 0.75$  m) のときの吸引圧, 土壌含水量, 流向及び流速, をそれぞれ示す。ちなみに、深谷の現地実験においては、設置間隔 2.5 m であり、地下水位は集中実験区画において 1.2 m となっている。この結果による

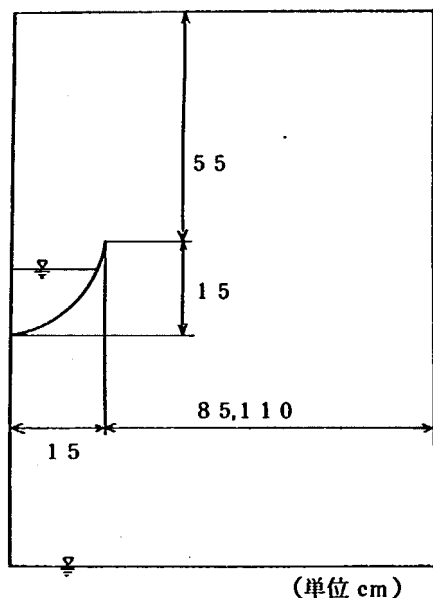


図 4-8

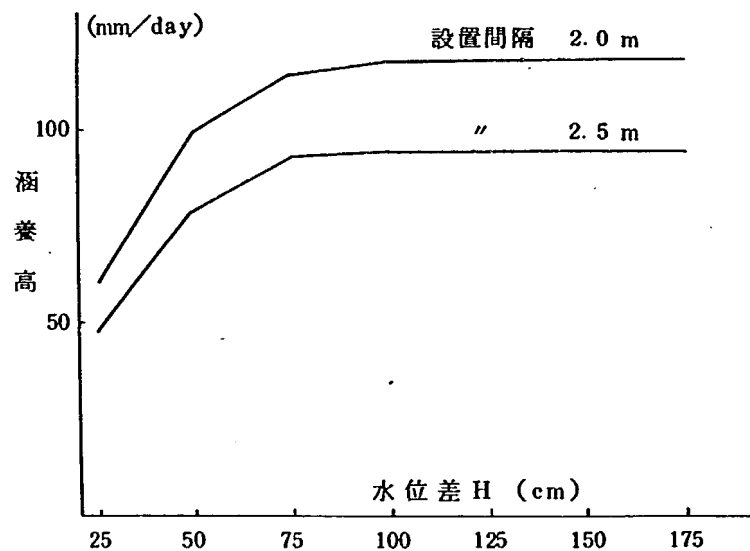


図 4-9

と地表近くの含水量は 40% 以上であり、高いようにも思えるが、ロームには吸着水が多いことを考えると涵養による影響によるものとはいちがいに言えないように思う。また、関東ロームの平均的な含水量は 40~50% といわれているので、それに比較しても大きいとはいえない。

## 5 今後の問題点

地下埋管による人工涵養の機構、能力を計算を行なって検討したが、室内実験場合のみならず現地スケールにおいても相当の涵養高を期待できることがわかった。ただし、現地スケールでの計算は、室内実験結果と計算結果との比較のみを拠りどころとしているため、根拠稀薄なものとなっている。今後は、現地実験の結果との比較により計算の精度を高めていく必要がある。

また、地下埋管が目づまりを起こさないのは、トレンチのまわりが乾湿を繰り返すためであるが、現在の電算プログラムでは定常として計算を行なっているため、その評価ができない。

今後は、時間の項を導入することにより正味の日涵養高を求めるようにプログラムの改良を行なう予定である。

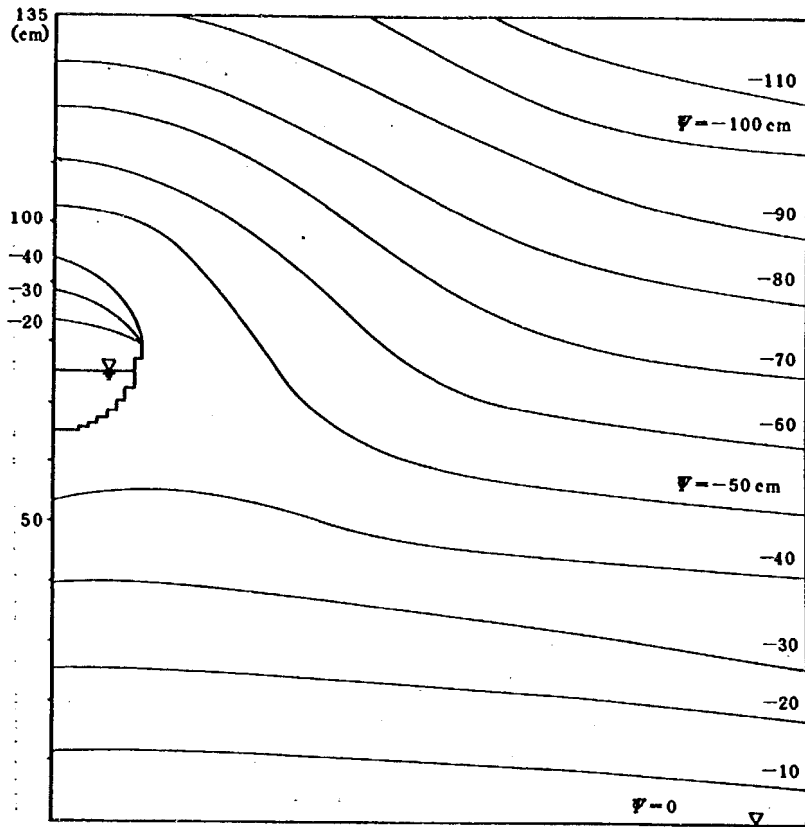


图 4-10  
吸引压分布

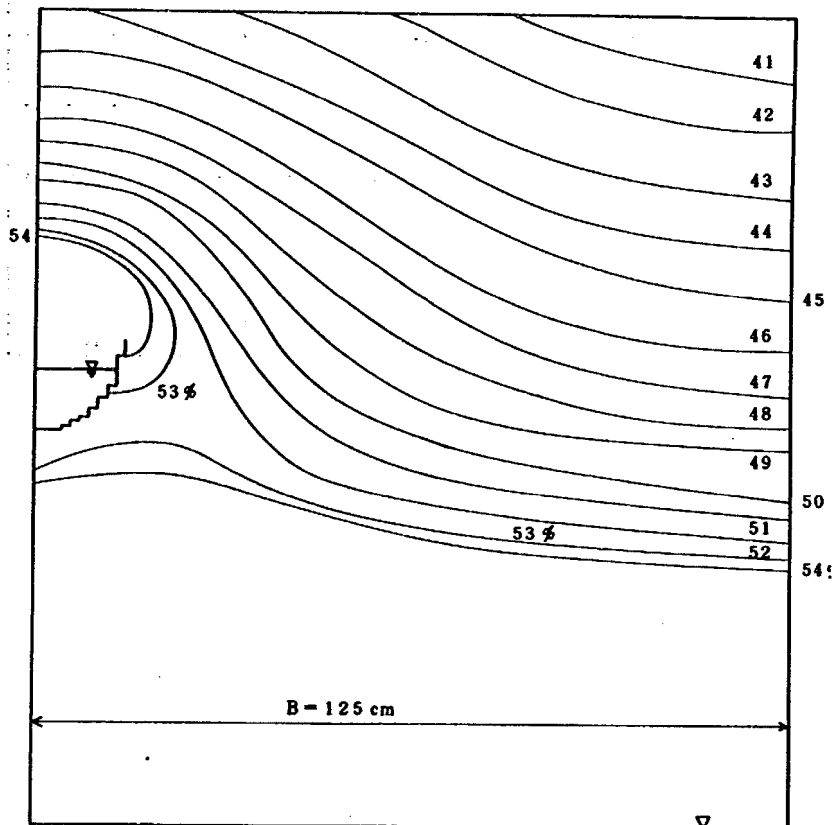


图 4-11  
含水量分布

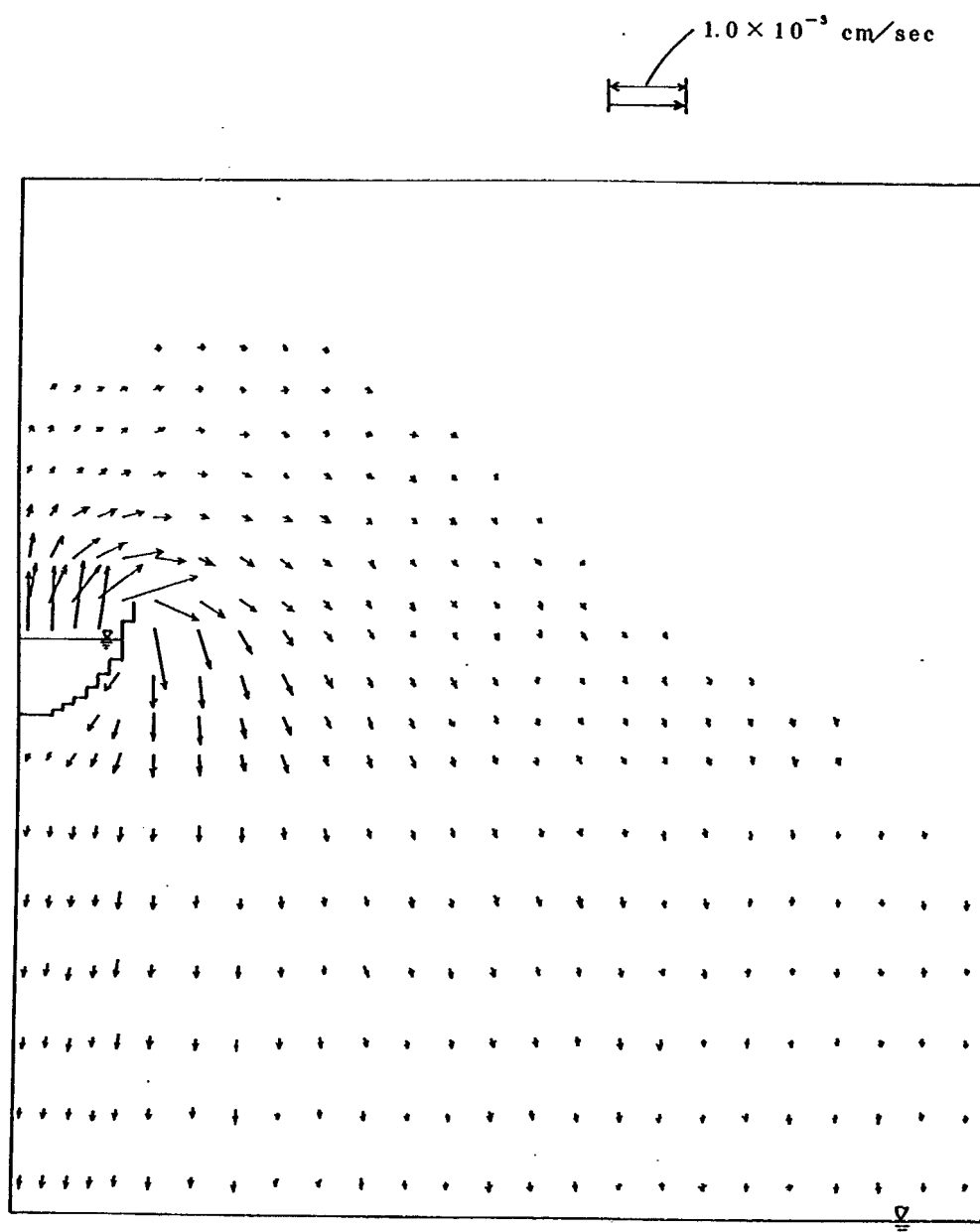
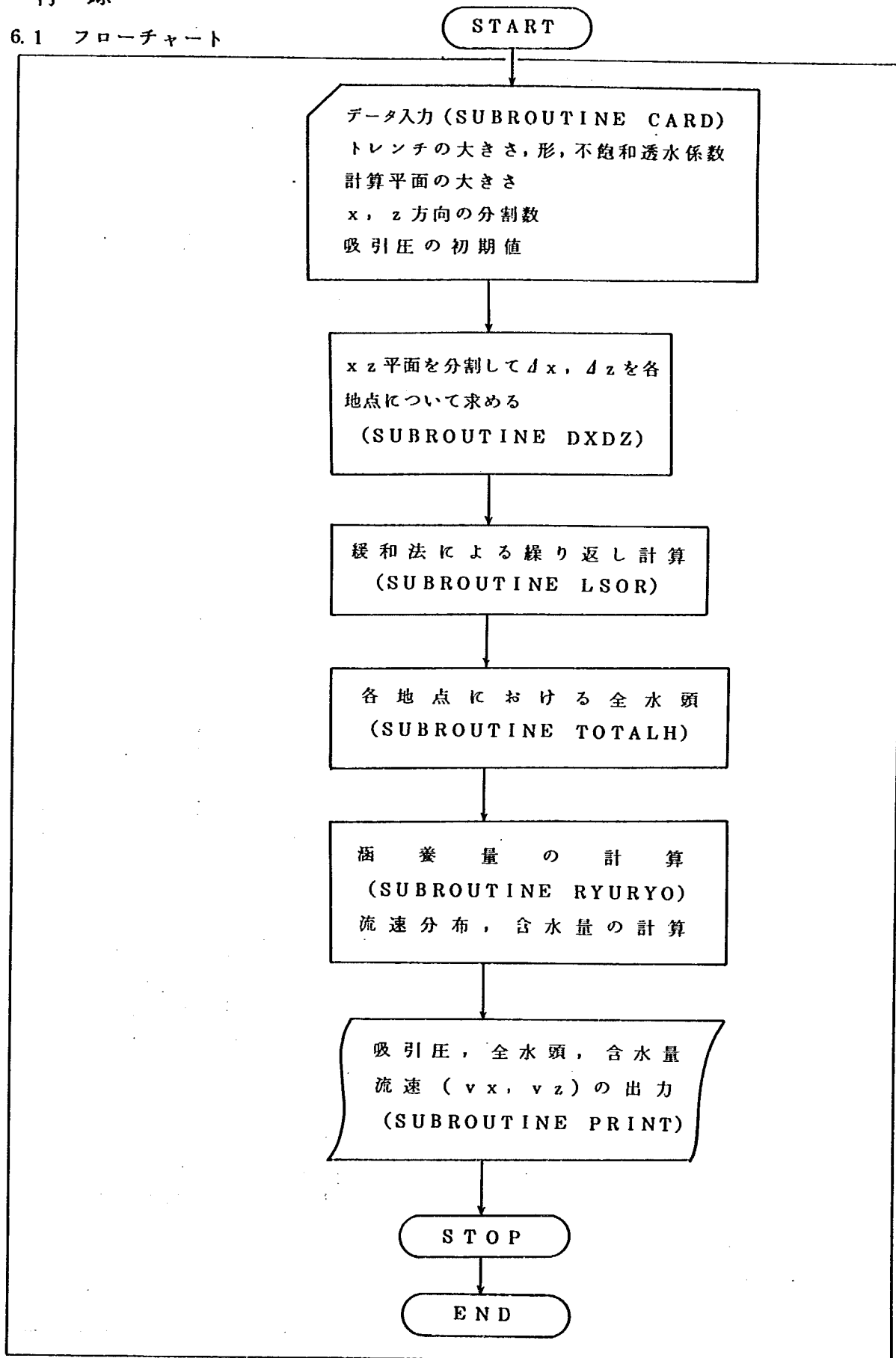
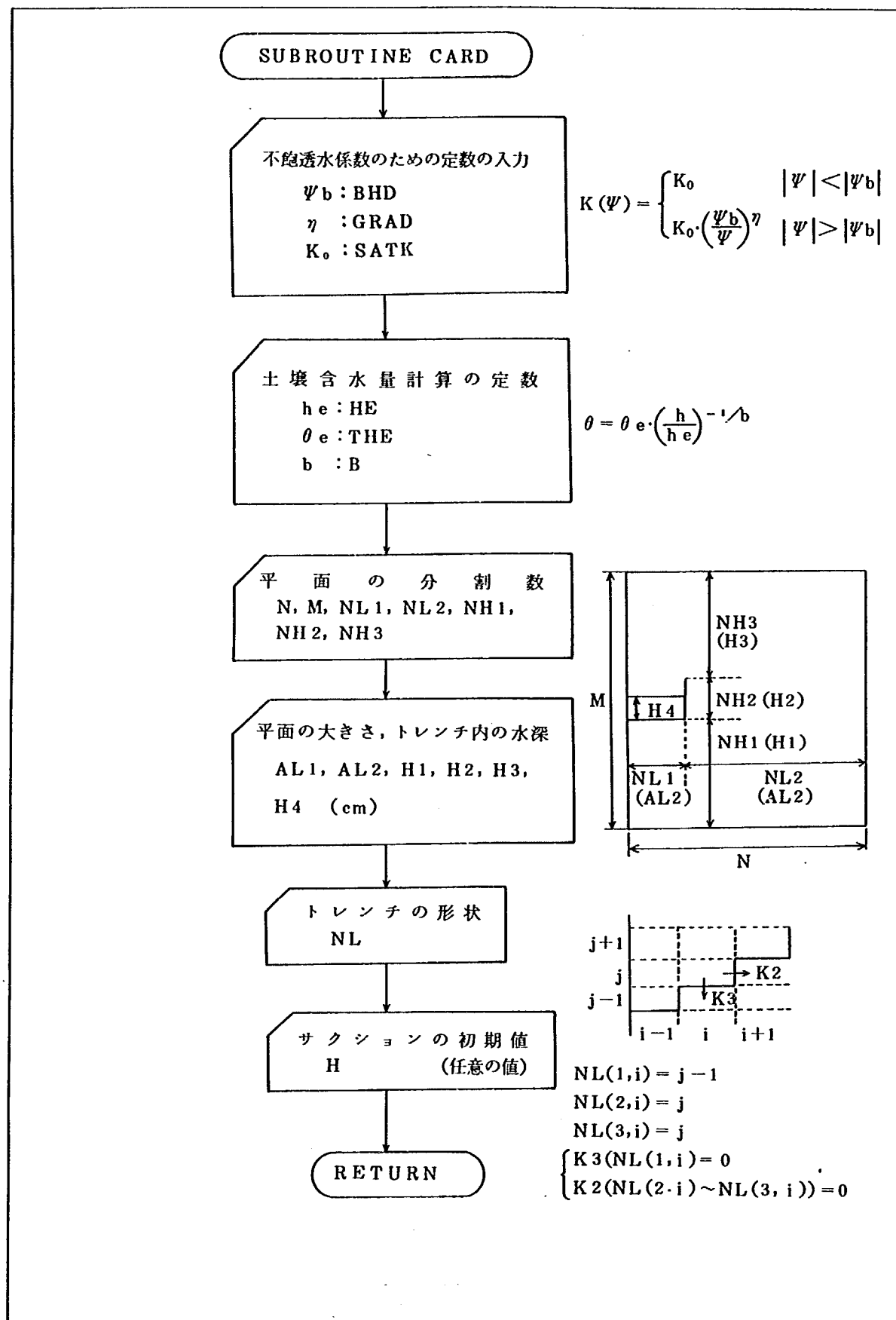


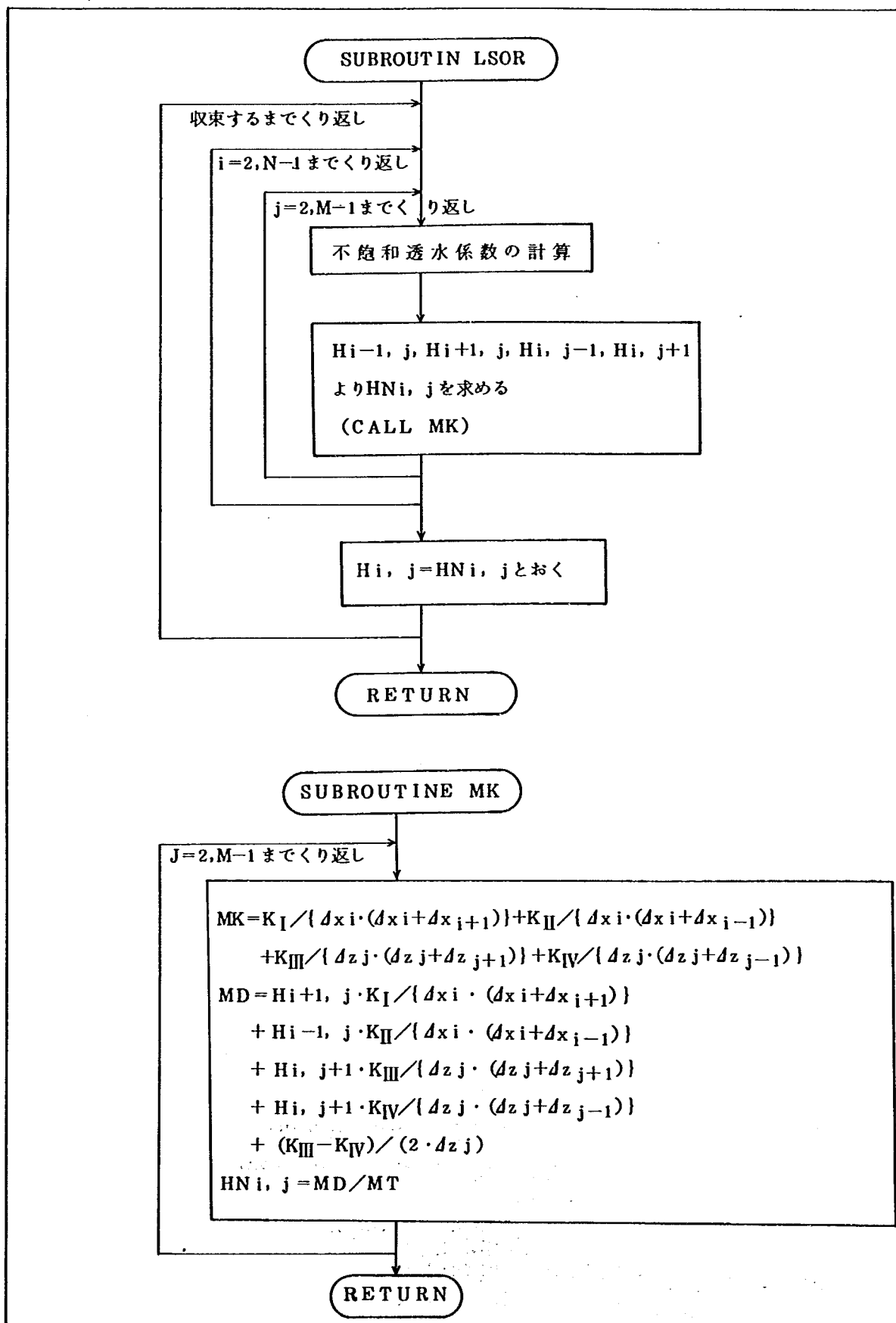
图 4 - 1 2 流速, 流向分布图

## 6 付 録

### 6.1 フローチャート







## 6.2 プログラムリスト

```

1  C04M0N /A/ H(50,50),TH(50,50),HH(50,50)
2  /B/ DX(50),DZ(50),DX1(2,50),DZ1(2,50)
3  /C/ AL1,AL2,H1,H2,H3,H4
4  /D/ HEIGHT,ALENGTH
5  /E/ ITARAT
6  /G/ HE,THE,B
7  /H/ NM1,NM1
8  /I/ NL(3,50)
9  /K/ VX(50,50),VZ(50,50)
10 /L/ NN
11 CALL CARD(N,M,NL1,NL2,NH1,NH2,NH3)
12 NM1=N-1
13 NM1=M-1
14 DH=25.0
15 DO 10 I=1,N
16 H(I,M)=0.0
17 H(I,1)=0.0
18 10 CONTINUE
19 DO 20 J=1,M
20 H(1,J)=0.0
21 H(N,J)=0.0
22 20 CONTINUE
23 H1=H1-DH
24 HEIGHT=HEIGHT-DH
25 H1=H1+DH
26 HEIGHT=HEIGHT+DH
27 CALL DXDZ(NL1,NL2,NH1,NH2,NH3)
28 NH4=NH1+1FIX(NH4/DZ(NH1+1))
29 DO 80 I=2,NL1
30 IF(NL(I,1),GE,NH4) GO TO 90
31 80 CONTINUE
32 90 NM=I-1
33 DO 30 I=2,NM1
34 DX1(I,1)=1.0/(DX(I)+(DX(I)+DX(I+1)))
35 DX1(2,1)=1.0/(DX(I)+(DX(I)+DX(I+1)))
36 30 CONTINUE
37 DO 40 J=2,NM1
38 DZ1(I,J)=1.0/(DZ(J)+(DZ(J)+DZ(J+1)))
39 DZ1(2,J)=1.0/(DZ(J)+(DZ(J)+DZ(J+1)))
40 40 CONTINUE
41 WRITE(6,810) N,M,NL1,NL2,NH1,NH2,NH3
42 WRITE(6,811) HEIGHT,H1,H2,H3,ALENGTH,AL1,AL2
43 WRITE(6,113)
44 WRITE(6,115) (DX(I),I=1,N)
45 WRITE(6,114)
46 WRITE(6,115) (DZ(J),J=1,M)
47 WRITE(6,932)
48 CALL LSOR(N,M,NL1,NL2,NH1,NH2,NH3,NH4)
49 CALL TOTALH(N,M)
50 J2=NM1+NH2
51 J1=J2+1
52 CALL RYURYO(NL1,J1,J2,DZ(J1),DZ(J2),Q)
53 QSWL=Q
54 CALL RYURYO(NM1,2,1,DZ(2),DZ(1),Q)
55 QVL=Q
56 Q=43200.0*(QSWL-QVL)/ALENGTH
57 DO 60 I=2,NM1-1
58 I1=I+1
59 DO 70 J=2,NM1
60 VX(I,J)=VX(I,J)+(TH(I,J)-TH(I1,J))/(DX(I)+DX(I1))*2.0
61 VZ(I,J)=VZ(I,J)+(TH(I,J+1)-TH(I,J))/(DZ(J)+DZ(J+1))*2.0
62 70 CONTINUE
63 60 CONTINUE
64 DO 700 I=2,NM1
65 DO 600 J=2,NM1
66 H0=ABS(H(I,J)/HE)
67 IF(H0,LT,1.0) GO TO 500
68 HN(I,J)=THE*(1.0/H0)**(1.0/8)
69 GO TO 600
70 500 HN(I,J)=THE
71 600 CONTINUE
72 700 CONTINUE
73 WRITE(6,921) ITARAT
74 WRITE(6,923) QSWL,QVL,Q
75 WRITE(6,926)
76 CALL PRINT(H,TH,N,M)
77 WRITE(6,927)
78 DO 100 I=2,NM1
79 DO 100 J=2,NM1
80 T=ABS(H(I,J))
81 IF(T,LE,0.0) GO TO 100
82 TH(I,J)=ALOG10(T)
83 100 CONTINUE
84 CALL PRINT(TH,HN,NH1,NH1)
85 WRITE(6,928)
86 CALL PRINT(VX,VZ,NH1-1,NM1)
87 113 FORMAT(10X,17H.... DX (CM) ....)
88 114 FORMAT(10X,17H.... DZ (CM) ....)
89 115 FORMAT(10X,10F10.3)
90 810 FORMAT(1H,10X,12H... DATA .../10X,2HN=,13,5X,2HN=,13,10X,
91 4HN1=,13,5X,4HN2=,13,5X,4HNH1=,13,5X,4HNH2=,13,5X,
92 4HNH3=,13)
93 811 FORMAT(1H,7HHEIGHT=,F8.3,7H (CM) =,F8.3,3H + ,F8.3,3H + ,F8.3,3H //
94 7HLENGTH=,F8.3,7H (CM) =,F8.3,3H + ,F8.3)
95 920 FORMAT(1H ,10F13.3)
96 921 FORMAT(1H ,8HITARAT =,15,/)
97 922 FORMAT(1H)
98 923 FORMAT(1H,5HQSWL=,E11.4,11H (CM**2/S) ,2X,4HQVL=,E11.4,
99 11H (CM**2/S) ,2X,2HQ=,E11.4,8H (CM/D) ,/)
100 924 FORMAT(1H,22H... POTENTIAL (CM) ...//)
101 926 FORMAT(1H,24H( SUCTION , TOTAL HEAD ) //)
102 927 FORMAT(1H,27H( SUCTION , WATER CONTENT ) //)
103 928 FORMAT(1H,10H( VX , VZ ) //)
104 932 FORMAT(1H,27H... CONDUCTIVITY (CM/S) ...)
105 1000 CONTINUE
106 STOP
107 END

```

```

1      SUBROUTINE CARD(N,M,NL1,NL2,NM1,NM2,NM3)
2      COMMON /A/ H(50,50),TH(50,50),HN(50,50)
3      * /C/ AL1,AL2,H1,H2,H3,H4
4      * /D/ HEIGHT,ALENGTH
5      * /F/ BHD,GRAD,SATK,AO
6      * /G/ HE,THE,B
7      * /I/ NL(3,50)
8      READ(5,130) BHD,GRAD,SATK
9      READ(5,130) HE,THE,B
10     AO=SATK*BHD**(-GRAD)
11     READ(5,100) M,M,NL1,NL2,NM1,NM2,NM3
12     READ(5,120) AL1,AL2,H1,H2,H3,H4
13     READ(5,140) ((NL(J,I),J=1,3),I=2,NL1)
14     ALENGTH=AL1+AL2
15     HEIGHT=M1+H2+H3
16     NM1=M-1
17     NM1=M-1
18     DO 10 J=2,NM1
19 10    READ(5,110) (H(I,J),I=2,NM1)
20     DO 70 I=1,M
21     DO 70 J=1,M
22     H(I,J)=H(I,J)
23 70    CONTINUE
24     DO 80 I=2,NL1
25     DO 80 J=1,3
26     NL(J,I)=NM1+NL(J,I)
27 80    CONTINUE
28     DO 90 I=NL1+1,M
29     DO 90 J=1,3
30     NL(J,I)=M+1
31 90    CONTINUE
32 100   FORMAT(10I5)
33 110   FORMAT(10F8.0)
34 120   FORMAT(8F10.0)
35 130   FORMAT(4G15.3)
36 140   FORMAT(16I5)
37     RETURN
38     END

1      SUBROUTINE LOR(N,M,NL1,NL2,NM1,NM2,NM3,NM4)
2      COMMON /A/ H(50,50),TH(50,50),HN(50,50)
3      * /E/ ITARAT
4      * /H/ NM1,NM1
5      * /I/ NL(3,50)
6      * /J/ HC(50,4)
7      * /K/ VX(50,50),VZ(50,50)
8      * /L/ NH
9      ITARAT=0
10     DO 100 KKK=1,10000
11     ITARAT=ITARAT+1
12     HO=(H(2,1)+H(2,2))*0.5
13     CALL CONDUCT(HO,HC(1,3))
14     J1=1
15     DO 30 J=2,NM1
16     H1=(H(2,J)+H(3,J))*0.5
17     H3=(H(2,J)+H(2,J+1))*0.5
18     CALL CONDUCT(H1,HC(J,1))
19     CALL CONDUCT(H3,HC(J,3))
20     HC(J,2)=0.0
21     HC(J,4)=HC(J,3)
22     J1=J
23 30    CONTINUE
24     HC(NM1,3)=0.0
25     HC(NM1+1,4)=0.0
26     HC(NM1,3)=0.0
27     CALL MK(2)
28     NM(2,NM4)=0.0
29     DO 10 J=2,NM1
30     VX(2,J)=HC(J,1)
31     VZ(2,J)=HC(J,3)
32 10    CONTINUE
33     DO 40 I=3,N-2
34     K=1
35     IT=I+1
36     DO 20 J=2,NM1
37     HC(J,2)=HC(J,1)
38 20    CONTINUE
39     J1=1
40     HO=(H(1,1)+H(1,2))*0.5
41     CALL CONDUCT(HO,HC(1,3))
42     DO 50 J=2,NM1
43     H1=(H(1,J)+H(1,J))*0.5
44     H3=(H(1,J)+H(1,J+1))*0.5
45     CALL CONDUCT(H1,HC(J,1))
46     CALL CONDUCT(H3,HC(J,3))
47     HC(J,4)=HC(J,3)
48     J1=J
49 50    CONTINUE
50     DO 70 J=NL(2,1),NL(3,1)
51     HC(J,1)=0.0
52 70    CONTINUE
53     HC(NL(1,1),3)=0.0
54     HC(NL(1,1)+1,4)=0.0
55     HC(NM1,3)=0.0
56     CALL MK(K)
57     DO 130 J=2,NM1
58     VX(I,J)=HC(J,1)

```

```

59      VZ(I,J)=HC(J,3)
60      130 CONTINUE
61      40 CONTINUE
62      DO 150 I=2,NM
63      MN(I,MN4)=0.0
64      150 CONTINUE
65      I=MN1
66      I1=I-1
67      MO=(HC(I,1)+HC(I,2))*0.5
68      CALL CONDUCT(MO,HC(I,3))
69      DO 60 J=2,MH1
70      HC(J,2)=HC(J,1)
71      60 CONTINUE
72      J1=1
73      DO 80 J=2,MH1
74      HC(J,1)=0.0
75      M3=(HC(I,J)+HC(I,J+1))*0.5
76      CALL CONDUCT(M3,HC(J,3))
77      HC(J,4)=HC(J,3)
78      J1=J
79      80 CONTINUE
80      HC(MH1,3)=0.0
81      CALL MK(I)
82      DO 140 J=2,MH1
83      VX(I,J)=HC(J,1)
84      VZ(I,J)=HC(J,3)
85      140 CONTINUE
86      DO 90 I=2,NM1
87      DO 90 J=1,MH1
88      M(I,J)=MN(I,J)
89      90 CONTINUE
90      100 CONTINUE
91      RETURN
92      END

```

```

1      SUBROUTINE MK(I)
2      COMMON /A/ H(50,50),TH(50,50),MN(50,50)
3      * /B/ DX(50),DZ(50),DX1(2,50),DZ1(2,50)
4      * /M/ MH1,MH1
5      * /J/ HC(50,4)
6      REAL MT(50),MD(50)
7      J1=1
8      I1=I-1
9      I2=I+1
10     DO 10 J=2,MH1
11     MT(J)=HC(J,1)*DX1(1,I)+HC(J,2)*DX1(2,I)
12     * HC(J,3)*DZ1(1,J)+HC(J,4)*DZ1(2,J)
13     MD(J)=M(I2,J)+HC(J,1)*DX1(1,I)+M(I1,J)+HC(J,2)*DX1(2,I)
14     * M(I,J+1)+HC(J,3)*DZ1(1,J)+M(I,J)+HC(J,4)*DZ1(2,J)
15     * 0.5*(HC(J,3)-HC(J,4))/DZ(J)
16     J1=J
17     10 CONTINUE
18     DO 20 J=2,MH1
19     MN(I,J)=MO(J)/MT(J)
20     20 CONTINUE
21     RETURN
22     END

```

```

1      SUBROUTINE PRINT(A,B,M,N)
2      DIMENSION A(50,1),B(50,1)
3      KK=1
4      NN=(M-1)*0.2+1
5      DO 400 I=1,NN
6      IF(I.EQ.NN) GO TO 200
7      WRITE(6,900) KK,KK+4
8      DO 100 J=1,M
9      JJ=M-J+1
10     WRITE(6,910) (A(K,JJ),B(K,JJ),K=KK,KK+4)
11     100 CONTINUE
12     KK=KK+5
13     GO TO 400
14     200 CONTINUE
15     WRITE(6,900) KK,M
16     DO 300 J=1,M
17     JJ=M-J+1
18     WRITE(6,910) (A(K,JJ),B(K,JJ),K=KK,M)
19     300 CONTINUE
20     400 CONTINUE
21     FORMAT(1H0,3H1 =,13,4H TO ,13)
22     900 FORMAT(1H ,1H(,4(E10.3,1H,,E10.3,1H),2X,1H(,E10.3,1H,,E10.3,1H))
23     RETURN
24     END

```

```

1      SUBROUTINE CONDUCT(HD,HC)
2      COMMON /F/ BHD,GRAD,SATK,AO
3      IF(HD+BHD) 10,20,20
4      10 CONTINUE
5      HD=HD
6      HC=AO*HD*GRAD
7      RETURN
8      20 CONTINUE
9      HC=SATK
10     RETURN
11     END

```

```

1      SUBROUTINE OXDZ(NL1,NL2,NH1,NH2,NH3)
2      COMMON /B/ DX(50),DZ(50),DX1(2,50),DZ1(2,50)
3      /C/ AL1,AL2,H1,H2,H3,H4
4      N1=NL1
5      N2=NH1+1
6      N3=NL1+NL2
7      N1=NH1
8      N2=NH1+1
9      N3=NH1+NH2
10     N4=NH3+1
11     N5=NH3+NH3
12     AL41=1.0/FLOAT(NL1-1)
13     AL42=1.0/FLOAT(NL2-1)
14     NH1=1.0/FLOAT(NH1-1)
15     NH2=1.0/FLOAT(NH2)
16     NH3=1.0/FLOAT(NH3-1)
17     DO 1 I=1,N1
18     DX(I)=AL1*ALM1
19     1 CONTINUE
20     DO 2 I=N2,N3
21     DX(I)=AL2*ALM2
22     2 CONTINUE
23     DO 3 J=1,N1
24     DZ(J)=N1+NH1
25     3 CONTINUE
26     DO 4 J=N2,N3
27     DZ(J)=N2+NH2
28     4 CONTINUE
29     DO 5 J=N4,N5
30     DZ(J)=N3+NH3
31     5 CONTINUE
32     RETURN
33     END

```

```

1      SUBROUTINE TOTALH(N,M)
2      DIMENSION ELEVH(50)
3      COMMON /A/ H(50,50),TH(50,50),HN(50,50)
4      /B/ DX(50),DZ(50),DX1(2,50),DZ1(2,50)
5      ELEVH(1)=0.0
6      DO 10 J=2,M
7      JN1=J-1
8      ELEVH(J)=(DZ(J)+DZ(JN1))*0.5+ELEVH(JN1)
9      10 CONTINUE
10     DO 1 J=1,M
11     DO 2 I=1,N
12     TH(I,J)=ELEVH(J)+H(I,J)
13     2 CONTINUE
14     1 CONTINUE
15     RETURN
16     END

```

```

1      SUBROUTINE RYURYO(L,J1,J2,Z1,Z2,0)
2      DIMENSION HC(50)
3      COMMON /A/ H(50,50),TH(50,50),HN(50,50)
4      /B/ DX(50),DZ(50),DX1(2,50),DZ1(2,50)
5      DO 10 I=2,L
6      HD=(H(I,J1)+H(I,J2))*0.5
7      CALL CONDUCT(HD,HC(I))
8      10 CONTINUE
9      Z=0.0
10     DO 20 I=2,L
11     Z=Z+2.0*(TH(I,J1)-TH(I,J2))*HC(I)+DX(I)/(Z1+Z2)
12     20 CONTINUE
13     WRITE(6,30) (HC(I),I=2,L)
14     30 FORMAT(1H0,(10F10.5,/1H ))
15     RETURN
16     END

```

## 参 考 文 献

- 1) 建設省土木研究所, 「地下貯水池による水資源開発」, 土木研究所資料第1190号, 昭和52年
- 2) 水利科学研究所, 「利水合理化調査報告書」, 昭和52年
- 3) 水収支研究グループ, 「地下水資源学」, 昭和48年
- 4) 八幡敏雄, 「構座 土壌物理」, 農業土木学会誌 41巻2号～42巻2号, 1973～1974
- 5) Freeze R. A., 「Three-dimensional, transient, saturated-unsaturated flow in a groundwater basin」, Water Resources Research, 7(2), P 347～366, 1971
- 6) 「数値解析ハンドブック」, オーム社
- 7) 金丸昭治, 高棹琢馬, 「水文学」, 朝倉書店
- 8) 中野政詩他, 「Measurement and Prediction of Hydraulic Conductivity in Unsaturated Porous Medium」, 農業土木学会論文集, 69号, 1977
- 9) 中山敬一他, 「地中に埋設した給水溝からの水分移動」, 農業土木学会論文集, 72号, 1977
- 10) Eagleson, 「Dynamic Hydrology」, McGraw-Hill
- 11) 近畿地建琵琶湖工事々務所, 「都市下水の陸水還元に関する調査研究(Ⅱ)」, 1977
- 12) 新見正, 有水彊, 「汚水の土壌浄化法研究——総論——」, 新見コンサルタント工房株式会社, 1977

## 付 録 2

### 不 飽 和 浸 透 室 内 実 験

## 目 次

|         |                       |    |
|---------|-----------------------|----|
| 1       | 目 的 .....             | 25 |
| 2       | 涵養水質と浸透量 .....        | 26 |
| 2-1     | 毛管現象による浸透能(その1) ..... | 26 |
| 2-2     | 毛管現象による浸透能(その2) ..... | 33 |
| 2-3     | 毛管現象による浸透能(その3) ..... | 35 |
| 3       | 涵養水の土壌浄化と目づまり .....   | 38 |
| 3-1     | 窒素の土壌吸着 .....         | 38 |
| 3-2     | 土壌による汚水の浄化 .....      | 39 |
| 4       | 目づまり防止対策の検討 .....     | 42 |
| 参 考 文 献 |                       |    |



## 1 目 的

地下水人工涵養方法に目づまり、水質浄化にも効果があるといわれている不飽和浸透法がある。この手法は、汚水を土壌浄化する面での研究は進んでいるが、地下水人工涵養には利用された事例がない。

そこで不飽和浸透による地下水人工涵養についての問題点の抽出とその対策についてまず室内実験で検討するものである。

## 2 涵養水質と浸透量

地下への水注入は、地下水へ直接注入、上部から浸透能だけ注入、または一たん貯留し、土壌の毛管現象を利用して上昇させてから地下へ浸透注入等あるが、目づまり、または浄化の面から、土壌の毛管利用が適当と考えられるのでつぎの実験をおこなった。

### 2-1 毛管現象による浸透能（その1）

毛管現象の速度が、表面積、浸透する土壌の面積、あるいはそれらの比率によってどのように変化するかを知るためつぎの実験をおこなった。

実験装置は図2-1に示した通りである。約70ℓのパケツに図に示したような容器を入れ、ヘッドを一定としてその毛管によりパケツの下から浸透する水量を測定して浸透量とした。

内管の種類は3種類とし、表2-1の通りである。

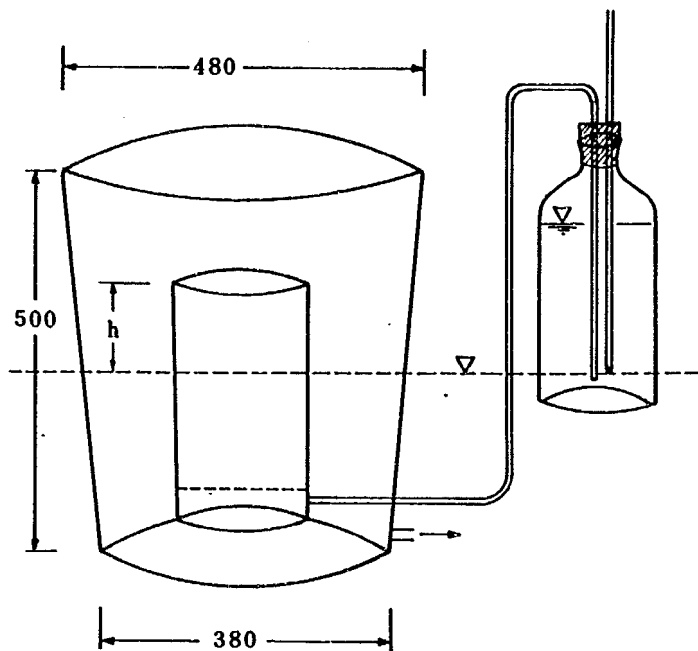
表2-1 内管の種類

|       | 直 径 (mm) | 表面積 (cm <sup>2</sup> ) | 外/内   | (外-内)/内 | 外-内 (cm <sup>2</sup> ) |
|-------|----------|------------------------|-------|---------|------------------------|
| No. 1 | 100      | 78.5                   | 19.36 | 18.36   | 1441.3                 |
| No. 2 | 180      | 254.3                  | 5.98  | 4.98    | 1265.5                 |
| No. 3 | 270      | 572.3                  | 2.66  | 1.66    | 947.5                  |

#### 1) 水位(h)と浸透能

内容器の底の部分には1~4cmの石を入れ、その他は外および内容器全体に世田谷心土をつめ、水位(h)を一定として、浸透速度を測定した。その結果は表2-2〜表2-5に示した通りである。

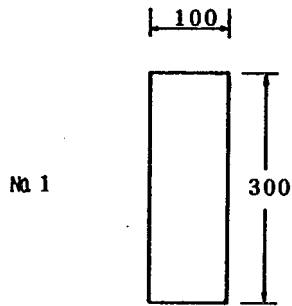
地下部へ水を地下水として貯留する場合、直接、水位の差で浸透することから、その浸透係数により浸透量が定まる。したがって、浸透係数の測定により算出することができる。しかし、この場合は目づまりもはげしく持続性にも欠けると考えられるので一たん毛管現象で上げてから浸透させようとするものである。このように浸透させたら毛管能力によってその量が決定づけられる。本実験のはじめは、水位以下の内容器部分に水が貯留されてから毛管が起るので、最初の測定量に大きなばらつきがみられたが、数時間後比較的安定した。水位(h)の小さい程その安定性が悪く、水位が大き



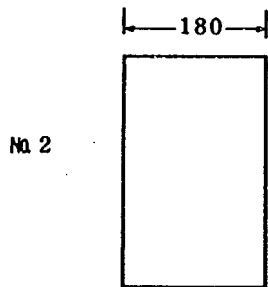
$$\begin{aligned}\pi r^2 L &= 3.14 \times 0.24 \times 0.24 \times 0.5 \\ &= 0.070895 m^3 \\ &\div 70 L\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\pi r^2 &= 3.14 \times 0.22 \times 0.22 \\ &= 0.152 m^2 \\ &= 1519.8 cm^2\end{aligned}$$

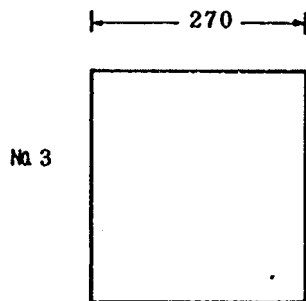
内容器の底部 5 cm は 1 ~ 4 cm の石



$$\begin{aligned}\pi r^2 L &= 3.14 \times 0.05 \times 0.05 \times 0.3 = 0.0024 m^3 = 2.4 L \\ \pi r^2 &= 3.14 \times 0.05 \times 0.05 = 0.0079 m^2 = 78.5 cm^2 \\ 1519.8 / 78.5 &= 19.36 \\ (1519.8 - 78.5) / 78.5 &= 18.36\end{aligned}$$



$$\begin{aligned}\pi r^2 L &= 3.14 \times 0.09 \times 0.09 \times 0.3 = 0.0076 m^3 = 7.6 L \\ \pi r^2 &= 3.14 \times 0.09 \times 0.09 = 0.0254 m^2 = 254.3 cm^2 \\ 1519.8 / 254.3 &= 5.98 \\ (1519.8 - 254.3) / 254.3 &= 4.98\end{aligned}$$



$$\begin{aligned}\pi r^2 L &= 3.14 \times 0.135 \times 0.135 \times 0.3 = 0.0172 m^3 = 17.2 L \\ \pi r^2 &= 3.14 \times 0.135 \times 0.135 = 0.0572 m^2 = 572.3 cm^2 \\ 1519.8 / 572.3 &= 2.66 \\ (1519.8 - 572.3) / 572.3 &= 1.66\end{aligned}$$

図 2-1 浸透能実験装置

表 2-2 水位(h) 20 mm の浸透能 (ml)

| 時 間 (min)                  | No1   | No2   | No3   |
|----------------------------|-------|-------|-------|
| 60                         | 1900  | 2100  | 2450  |
| 60                         | 1650  | 1300  | 2150  |
| 60                         | 1550  | 1200  | 1800  |
| 60                         | 1400  | 2000  | 1500  |
| 59                         | 1500  | 2000  | 2600  |
| 60                         | 1650  | 2050  | 2550  |
| 60                         | 1450  | 2000  | 2400  |
| 60                         | 1700  | 2050  | —     |
| 60                         | 1750  | —     | —     |
| 65                         | 1050  | 2400  | 2600  |
| 32                         | 2000  | 1150  | 1200  |
| 60                         | 1900  | 1900  | 2100  |
| 129                        | 4400  | 4650  | 4700  |
| 計 825                      | 22100 | 24800 | 26050 |
| 平 (ml/min) 均               | 26.79 | 32.42 | 36.95 |
| 浸透速度<br>$10^{-4}$ (cm/sec) | 3.1   | 4.3   | 6.5   |
| 毛管速度<br>$10^{-5}$ (cm/sec) | 5.7   | 2.1   | 1.1   |

表 2-4 水位(h) 70 mm の浸透能 (ml)

| 時 間 (min)                  | No1  | No1  | No3  |
|----------------------------|------|------|------|
| 60                         | 450  | 500  | —    |
| 61                         | 450  | 500  | 600  |
| 64                         | 500  | 350  | 600  |
| 55                         | 400  | 450  | 500  |
| 60                         | 500  | 450  | 550  |
| 61                         | 450  | 500  | 550  |
| 59                         | 550  | 400  | 600  |
| 60                         | 500  | 500  | 600  |
| 61                         | 350  | 500  | 500  |
| 61                         | 400  | 350  | 550  |
| 58                         | 350  | 450  | 450  |
| 66                         | 500  | 400  | 550  |
| 50                         | 400  | 300  | 500  |
| 計 776                      | 5800 | 5650 | 6550 |
| 平 (ml/min) 均               | 7.47 | 7.28 | 9.15 |
| 浸透速度<br>$10^{-5}$ (cm/sec) | 8.6  | 9.6  | 16.0 |
| 毛管速度<br>$10^{-4}$ (cm/sec) | 15.8 | 4.8  | 2.7  |

表 2-3 水位(h) 50 mm の浸透能 (ml)

| 時 間 (min)                  | No1   | No2   | No3   |
|----------------------------|-------|-------|-------|
| 58                         | 900   | 1300  | 1000  |
| 64                         | 1000  | 1350  | 1000  |
| 57                         | 900   | 1300  | 700   |
| 63                         | 1050  | 1450  | 900   |
| 54                         | 950   | 1300  | 800   |
| 61                         | 950   | 1450  | 850   |
| 計 357                      | 5750  | 8150  | 5250  |
| 平 (ml/min) 均               | 16.11 | 22.83 | 14.71 |
| 浸透速度<br>$10^{-4}$ (cm/sec) | 1.8   | 3.0   | 2.6   |
| 毛管速度<br>$10^{-3}$ (cm/sec) | 3.4   | 1.5   | 0.43  |

表 2-5 水位(h) 100 mm の浸透量 (ml)

| 時 間 (min)                  | No1  | No2  | No3  |
|----------------------------|------|------|------|
| 68                         | 150  | 350  | 200  |
| 55                         | 150  | 300  | 250  |
| 57                         | 100  | 250  | 200  |
| 93                         | 200  | 350  | 400  |
| 27                         | 100  | 100  | 100  |
| 60                         | 150  | 200  | 200  |
| 60                         | 150  | 300  | 300  |
| 60                         | 150  | 250  | 150  |
| 計 480                      | 1150 | 2100 | 1800 |
| 平 (ml/min) 均               | 2.40 | 4.38 | 3.75 |
| 浸透速度<br>$10^{-5}$ (cm/sec) | 2.8  | 5.6  | 6.5  |
| 毛管速度<br>$10^{-4}$ (cm/sec) | 5.1  | 2.8  | 1.1  |

くなると数分間で安定する。表の数値は安定したと思われてからできるだけ連続的に測定したものである。測定値から浸透下降速度と毛管上昇速度を算出した。

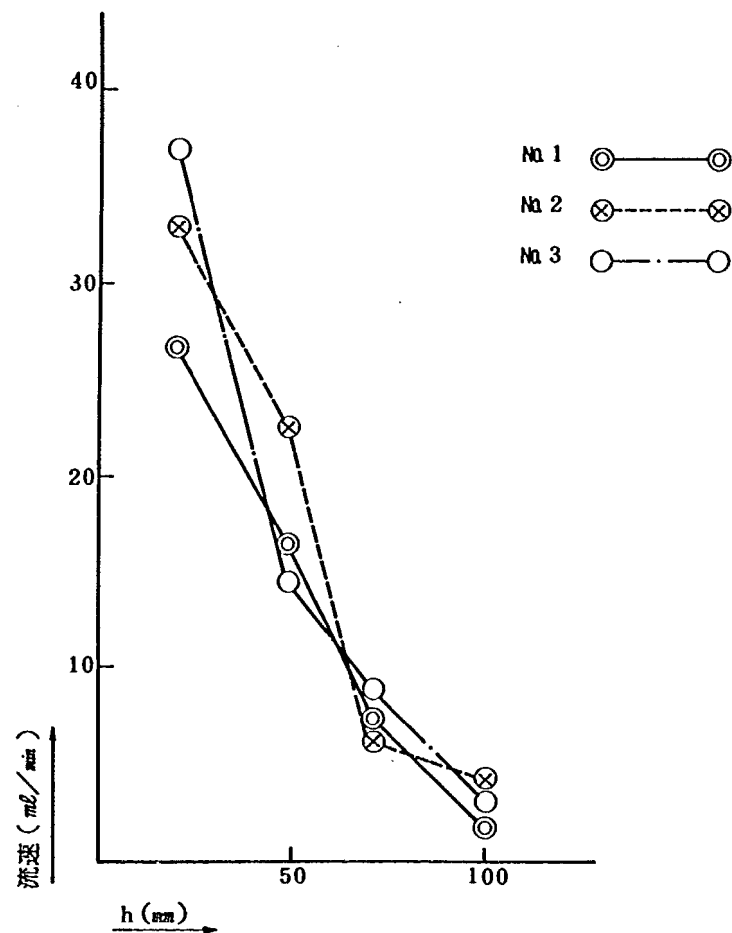


図 2-2 水位と流速の関係

水位と流速の関係は図 2-2 に示した通りである。当然のことながら内容物の  $h$  の小さい（水位の高い）程流速（浸透量）が大きい。また  $h$  の小さい時は内容物の表面積の大きい方が流速が大きいが  $h$  が大きくなるとあまり関係がないように思われる。

## 2) 諸条件と浸透能

内容物の大きさ、表面積、外容器の大きさ、表面積、またはそれらの比率等と浸透能の関係は図 2-3～図 2-6 に示した通りである。

$h$  20 mm では、内容物の表面積が大きい程水の浸透能が大きく、また外容器の表面積と内容物の表面積の比率が大きくなると浸透能が小さい。

$h$  50 mm では、内容物の表面積、外内の表面積比率等と水の浸透能とはあまり関係がみられない。

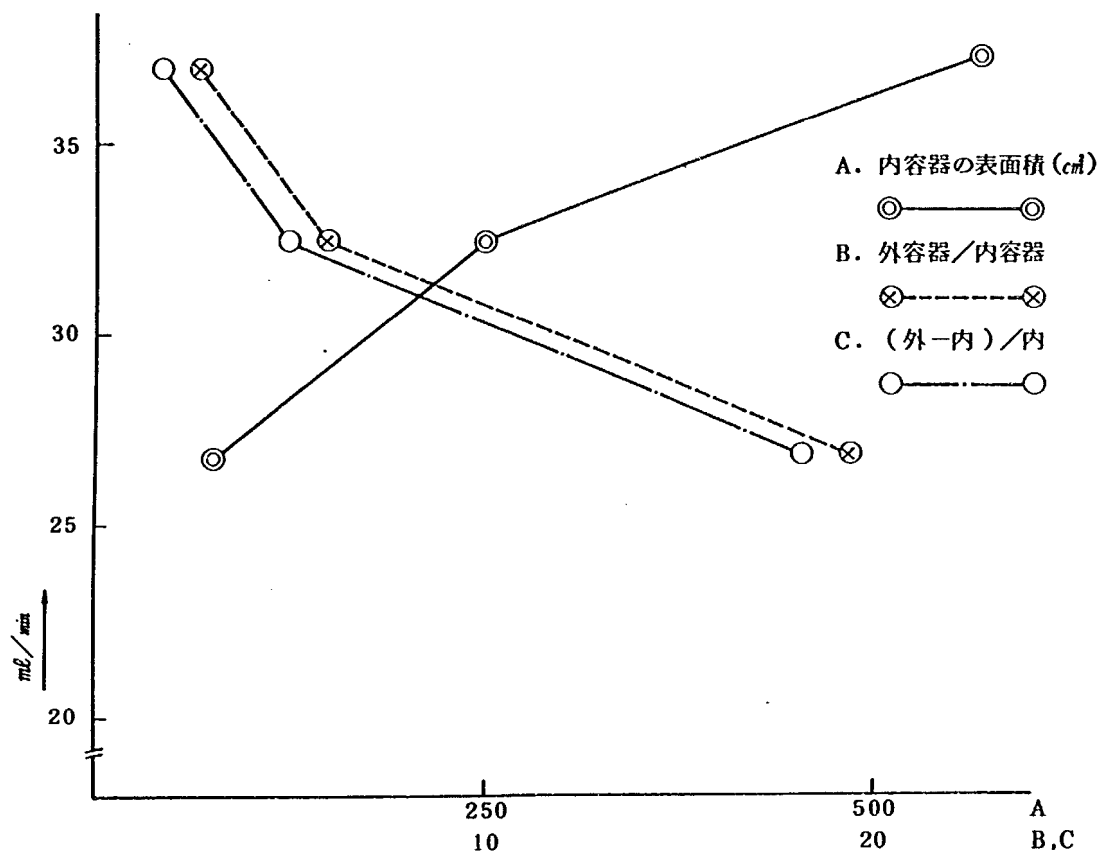


図 2-3 h 20 mm での浸透能

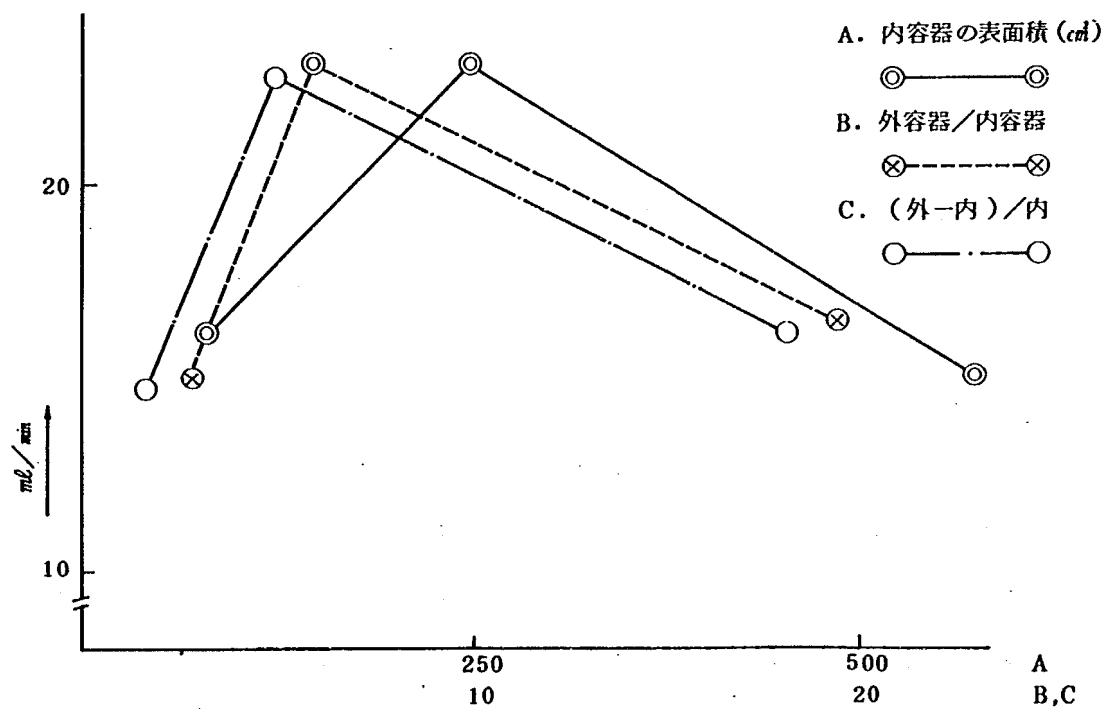


図 2-4 h 50 mm での浸透能

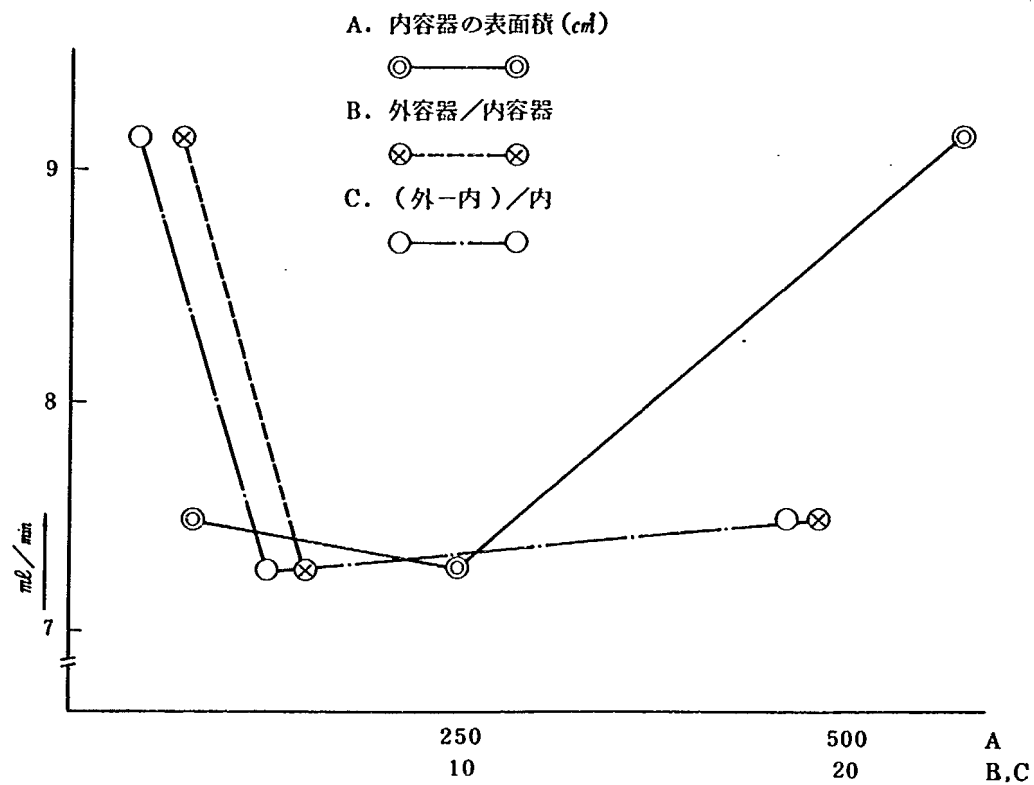


図 2-5 h 70 mm での浸透能

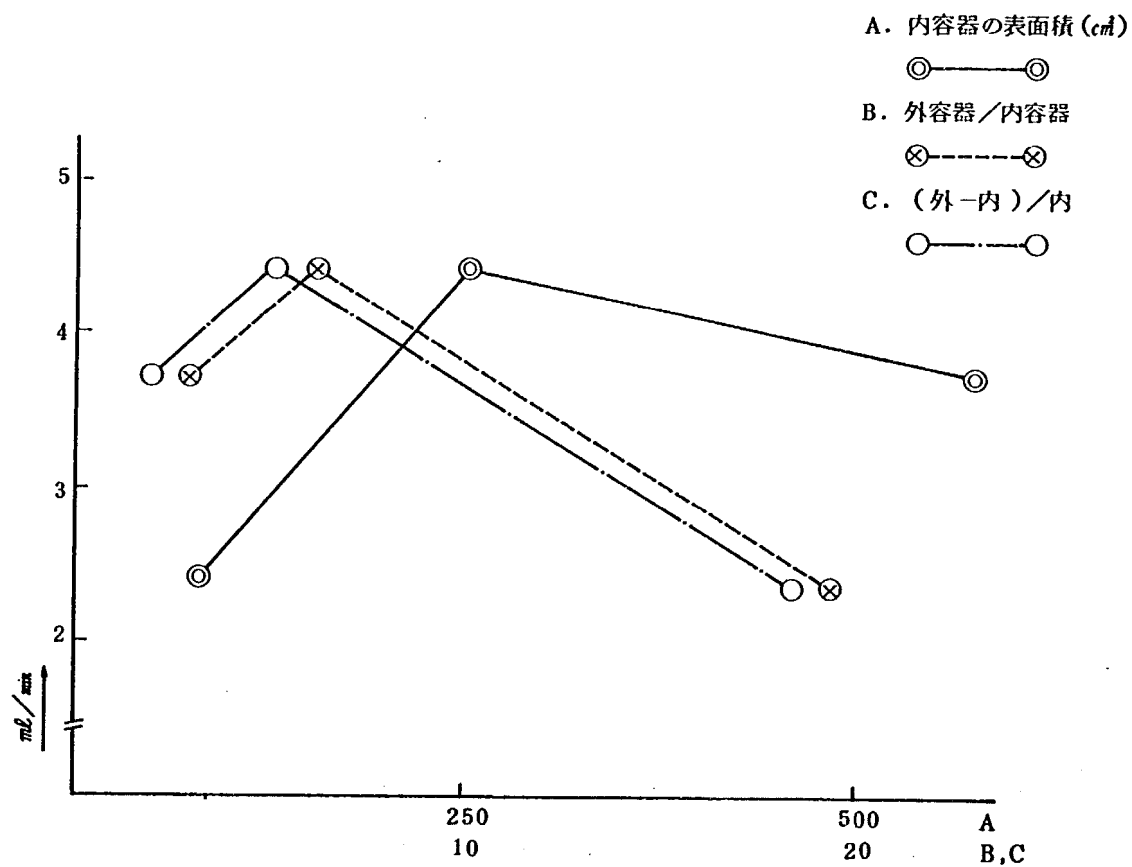


図 2-6 h 100 mm での浸透能

$h = 70 \text{ mm}$ では、内容器の表面積が大きい程、また外内の表面積の比率が大きくなると浸透能が小さい。

$h = 100 \text{ mm}$ では、内容器の表面積が大きい程、また外内の表面積の比率が大きくなると浸透能が小さい傾向がみられる。

全体的に毛管現象で上昇する場合、上昇表面積が大きい程、浸透量が大きくなるが、一たん上昇したものが、土壌に拡散した後浸透するとすれば、外内表面積の関係から浸透量を支配するのは拡散能ではなく、毛管能であると考えられる。

しかし、毛管能が拡散面積と無関係であることは考えられないので、（外容器面積－内容器面積）／内容器表面積と毛管速度の関係を図2-7に示してみた。

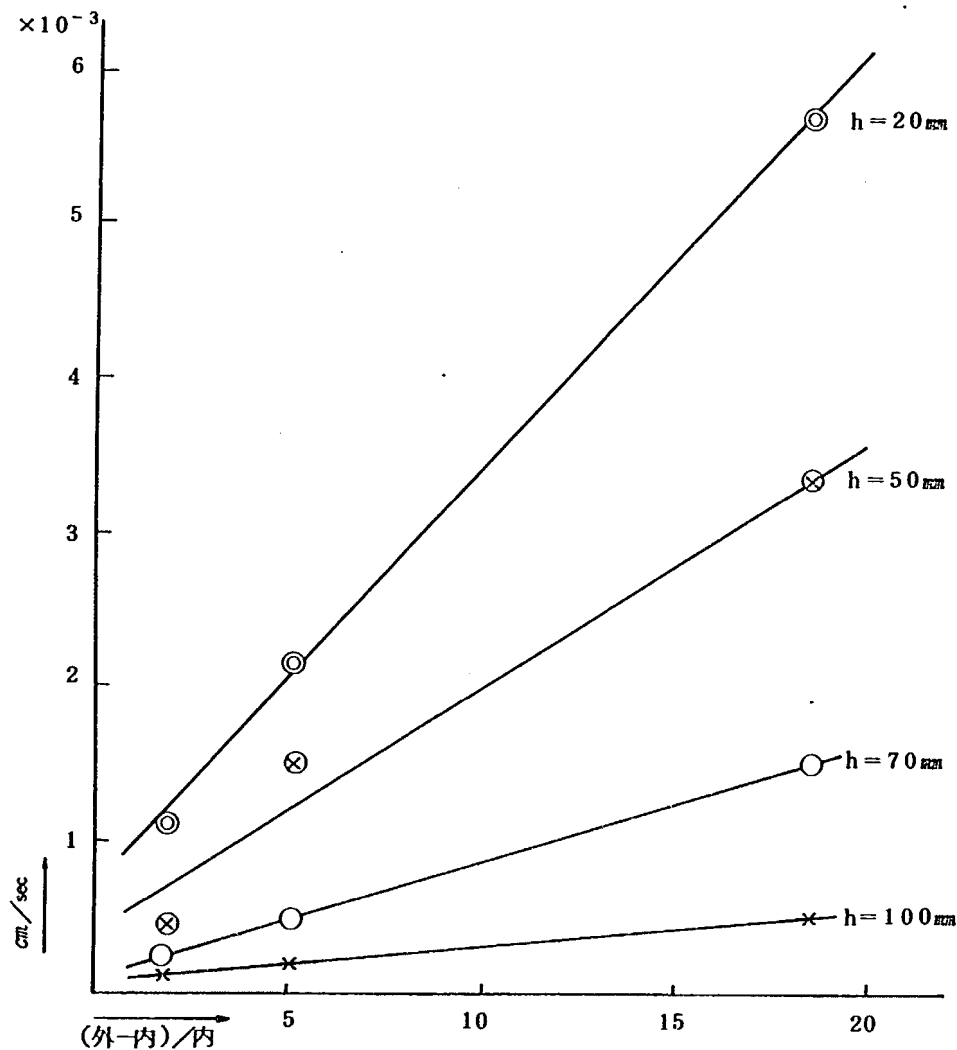


図2-7 毛管速度と（外－内）／内との関係

この図から（外－内）／内、いわゆる拡散面積によって毛管速度が明かに支配されるが、毛管速度が大きくなっても、その表面積が小さくなっているため毛管上昇量との関係は別問題である。

## 2-2 毛管現象による浸透能（その2）

少し大型の装置で毛管現象による浸透能の試験をおこなった。実験の装置は図2-8に示した通りである。

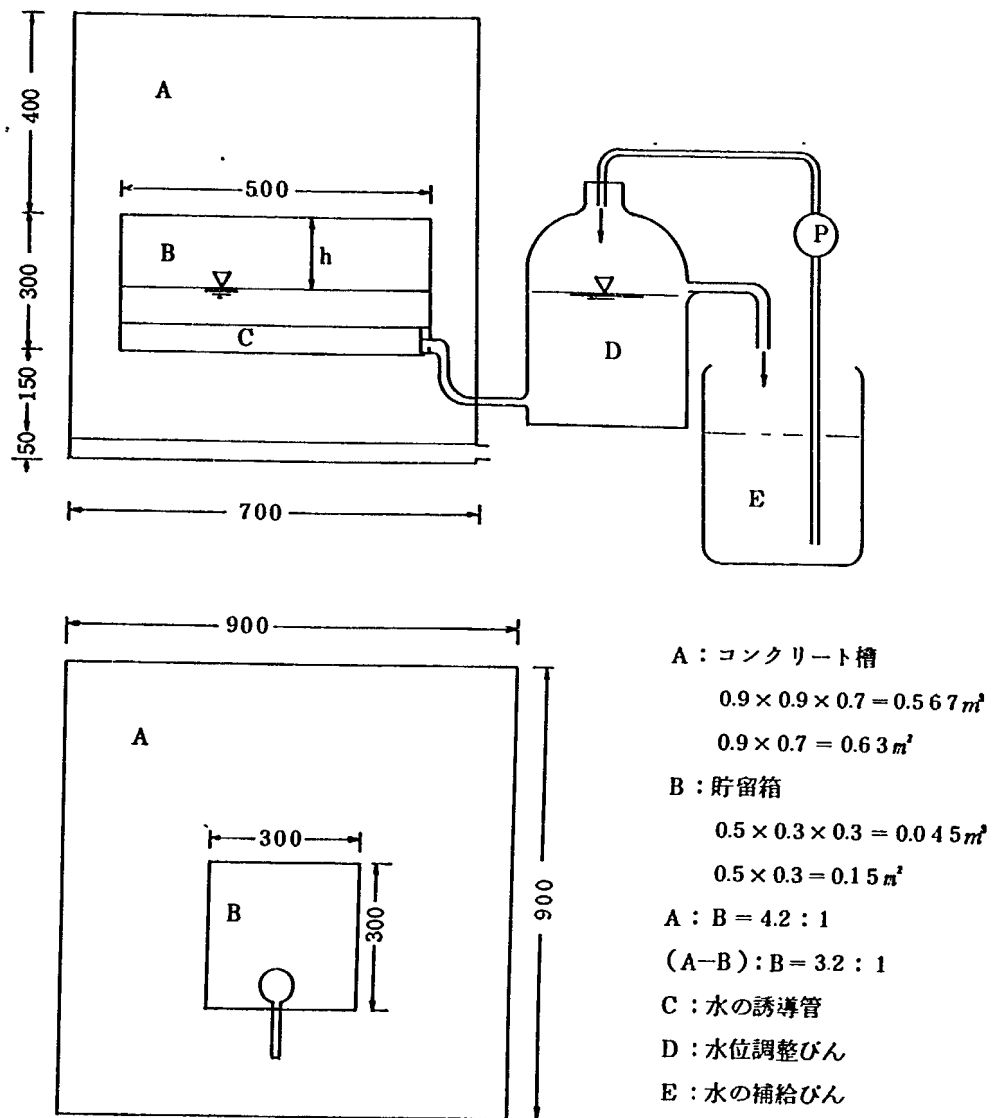


図2-8 実験装置

この装置の水の貯留箱の底の部分に誘道管がついているので、ここには10～50mm程度の石をつめ、その上には砂を入れた。これをコンクリート槽の中央部分に固定してコンクリート槽を世田谷心土で満たした。水位調整びんにより水位(h)を変えて、その変化による水の毛管、そして浸透量をコンクリート槽の底の部分から流出する水で測定した。その結果は表2-6～表2-9に示した通りである。

表 2-6  $h = 170 \text{ mm}$  の浸透量

| 時間(min) | 浸透量( $\ell$ ) | $\text{ml}/\text{min}$ | $\ell/\text{hr}$ | $\text{ml}/\text{m}^2 \cdot \text{min}$ |
|---------|---------------|------------------------|------------------|-----------------------------------------|
| 60      | 0.5           | 8.3                    | 0.50             | 55                                      |
| 60      | 0.5           | 8.3                    | 0.50             | 55                                      |
| 60      | 0.3           | 5.0                    | 0.30             | 33                                      |
| 60      | 0.4           | 6.7                    | 0.40             | 44                                      |
| 90      | 1.1           | 12.2                   | 0.73             | 81                                      |
| 90      | 0.5           | 5.6                    | 0.34             | 37                                      |
| 930     | 6.1           | 6.6                    | 0.40             | 44                                      |
| 390     | 2.4           | 6.2                    | 0.37             | 41                                      |
| 240     | 1.0           | 4.2                    | 0.25             | 28                                      |
| 600     | 3.0           | 5.0                    | 0.30             | 33                                      |
| 平 均     | —             | 6.12                   | 0.30             | 40.8                                    |

浸透速度  $2.1 \times 10^{-5} \text{ cm/sec}$ 毛管速度  $6.8 \times 10^{-5} \text{ cm/sec}$ 表 2-8  $h = 80 \text{ mm}$  の浸透量

| 時間(min) | 浸透量( $\ell$ ) | $\text{ml}/\text{min}$ | $\ell/\text{hr}$ | $\text{ml}/\text{m}^2 \cdot \text{min}$ |
|---------|---------------|------------------------|------------------|-----------------------------------------|
| 60      | 3.2           | 53.3                   | 3.20             | 355                                     |
| 120     | 6.5           | 54.2                   | 3.25             | 361                                     |
| 60      | 2.9           | 48.3                   | 2.90             | 322                                     |
| 120     | 6.3           | 52.5                   | 3.15             | 350                                     |
| 120     | 5.7           | 47.5                   | 2.85             | 317                                     |
| 840     | 42.7          | 50.8                   | 3.05             | 339                                     |
| 690     | 35.5          | 51.4                   | 3.08             | 343                                     |
| 810     | 40.0          | 49.4                   | 2.96             | 329                                     |
| 平 均     | —             | 50.6                   | 3.04             | 338                                     |

浸透速度  $1.8 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$ 毛管速度  $5.6 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$ 表 2-9  $h = 40 \text{ mm}$  の浸透量

| 時間(min) | 浸透量( $\ell$ ) | $\text{ml}/\text{min}$ | $\ell/\text{hr}$ | $\text{ml}/\text{m}^2 \cdot \text{min}$ |
|---------|---------------|------------------------|------------------|-----------------------------------------|
| 30      | 4.1           | 136.7                  | 8.20             | 910                                     |
| 30      | 4.1           | 136.7                  | 8.20             | 910                                     |
| 30      | 3.7           | 123.3                  | 7.40             | 820                                     |
| 30      | 4.2           | 140.0                  | 8.40             | 930                                     |
| 60      | 8.2           | 136.7                  | 8.20             | 930                                     |
| 30      | 4.0           | 133.3                  | 8.00             | 890                                     |
| 30      | 4.1           | 136.7                  | 8.10             | 910                                     |
| 60      | 8.0           | 133.3                  | 8.00             | 890                                     |
| 120     | 16.2          | 135.0                  | 8.10             | 900                                     |
| 30      | 4.5           | 150.0                  | 9.00             | 1000                                    |
| 30      | 4.1           | 136.7                  | 8.20             | 910                                     |
| 30      | 4.1           | 136.7                  | 8.20             | 910                                     |
| 30      | 3.7           | 123.3                  | 7.40             | 820                                     |
| 90      | 11.4          | 126.7                  | 7.60             | 840                                     |
| 30      | 3.9           | 130.0                  | 7.80             | 870                                     |
| 30      | 3.9           | 130.0                  | 7.80             | 870                                     |
| 60      | 8.4           | 140.0                  | 8.40             | 930                                     |
| 30      | 4.1           | 136.7                  | 8.20             | 910                                     |
| 平 均     | —             | 134.2                  | 8.05             | 895                                     |

浸透速度  $4.7 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$ 毛管速度  $1.5 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ 表 2-7  $h = 120 \text{ mm}$  の浸透量

| 時間(min) | 浸透量( $\ell$ ) | $\text{ml}/\text{min}$ | $\ell/\text{hr}$ | $\text{ml}/\text{m}^2 \cdot \text{min}$ |
|---------|---------------|------------------------|------------------|-----------------------------------------|
| 60      | 1.6           | 26.7                   | 1.60             | 178                                     |
| 60      | 1.5           | 25.0                   | 1.50             | 167                                     |
| 60      | 1.6           | 26.7                   | 1.60             | 178                                     |
| 60      | 1.3           | 21.7                   | 1.30             | 144                                     |
| 210     | 3.8           | 18.1                   | 1.09             | 121                                     |
| 60      | 1.2           | 20.0                   | 1.20             | 133                                     |
| 840     | 20.5          | 24.4                   | 1.46             | 163                                     |
| 570     | 13.2          | 23.2                   | 1.39             | 154                                     |
| 900     | 21.2          | 23.6                   | 1.42             | 157                                     |
| 平 均     | —             | 23.4                   | 1.40             | 156                                     |

浸透速度  $8.1 \times 10^{-5} \text{ cm/sec}$ 毛管速度  $2.6 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$

表の数値から水位(h)と浸透量の関係を図示すると、図2-9のようになる。

水位(h)と浸透量の関係式は、コンクリート槽の大きさ、水の貯留箱の大きさ、土壌の種類、土壌のつめ方等によって変化すると思われるので一般的ではない。

### 2-3 毛管現象による浸透能(その3)

土壌の種類によって毛管速度がどのように異なるかをみるためつぎの実験をおこなった。

土壌の種類は表2-10に示した6種類である。

直径30mm、長さ1mの管に各種土壌を表-10に示した量だけつめ、水位を一定として、毛管による上昇速度を測定した。その結果を表2-11、12、図2-10に示した。

この結果から、砂が非常に毛管上昇速度が速く、30分で17cm程度上昇する。しかしその後その速度がおそくなって、8時間後で

は22cm程度でそれ以後はあまり上昇しない。世田谷心土も比較的上昇速度が速く、8時間後には40cm近くまで上昇する。その他の土壌は速度もおそく、上昇率も小さい。したがって毛管により上昇させる場合、少ない高さであれば、砂が特に有利である。

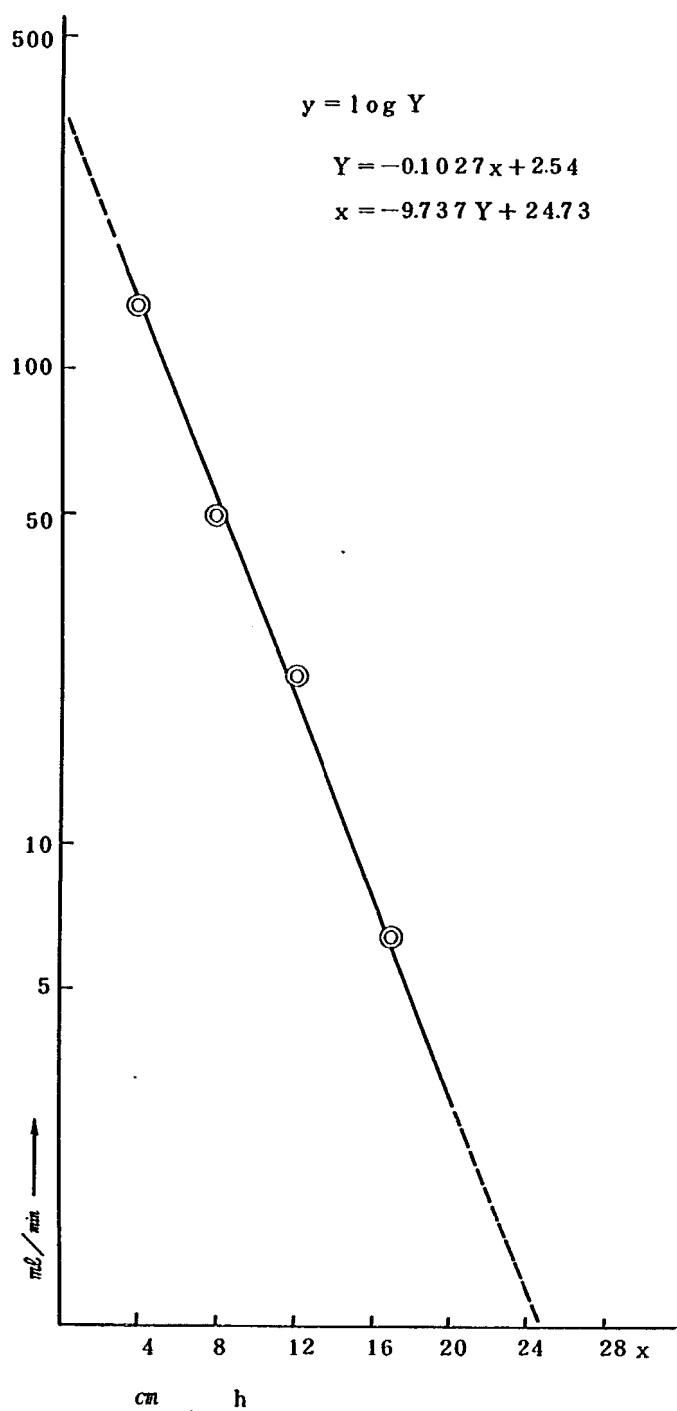


図2-9 水位(h)と浸透量の関係

表 2-10 試験土壌の種類

| No     | 1        | 2     | 3     | 4     | 5        | 6       |
|--------|----------|-------|-------|-------|----------|---------|
| 土 壌 種  | 砂 (<2mm) | 世田谷表土 | 世田谷心土 | 沖 積 土 | 富山粘土     | 福島粘土    |
| 水分(%)  | 14.0     | 12.02 | 19.68 | 7.25  | 11.44    | 5.79    |
| 真比重    | 2.74     | 2.57  | 2.78  | 2.63  | 2.82     | 2.78    |
| 仮比重    | 1.32     | 0.90  | 0.77  | 0.82  | 1.03     | 1.10    |
| 間隙率(%) | 51.82    | 64.98 | 72.30 | 68.81 | 63.48    | 60.43   |
| 備 考    | —        | —     | —     | 平 塚   | モンモリロナイト | カ オ リ ン |
| 高さ(mm) | 925      | 870   | 915   | 900   | 905      | 895     |
| 量 (g)  | 863      | 553   | 498   | 521   | 659      | 696     |

表 2-11 各種土壌の毛管速度 (cm)

| 時間 (分) | 1    | 2    | 3    | 4    | 5   | 6    |
|--------|------|------|------|------|-----|------|
| 0.5    | 5.5  | 0    | 1.0  | 0    | 0   | 0    |
| 1.0    | 7.5  | 0    | 2.0  | 0.3  | 0   | 0    |
| 1.5    | 8.9  | 0.2  | 2.8  | 0.7  | 0   | 0.3  |
| 2.0    | 9.6  | 0.3  | 3.3  | 0.8  | 0   | 0.4  |
| 2.5    | 10.8 | 0.3  | 4.0  | 0.9  | 0   | 0.5  |
| 3.0    | 11.4 | 0.5  | 4.3  | 1.0  | 0   | 0.8  |
| 4      | 12.3 | 0.8  | 4.8  | 1.2  | 0.2 | 1.2  |
| 5      | 13.2 | 1.1  | 5.0  | 1.3  | 0.3 | 1.5  |
| 10     | 14.6 | 2.3  | 6.7  | 2.1  | 1.0 | 2.9  |
| 15     | 15.4 | 2.9  | 8.5  | 2.9  | 1.5 | 4.1  |
| 20     | 16.0 | 3.7  | 10.2 | 3.7  | 1.8 | 5.0  |
| 25     | 16.5 | 4.3  | 12.8 | 4.3  | 2.2 | 5.7  |
| 30     | 16.8 | 4.9  | 12.7 | 4.5  | 2.5 | 6.0  |
| 40     | 17.5 | 5.7  | 14.3 | 5.3  | 3.0 | 7.0  |
| 50     | 17.9 | 6.6  | 15.8 | 6.4  | 3.4 | 8.3  |
| 60     | 18.2 | 7.6  | 17.5 | 7.1  | 3.6 | 9.1  |
| 70     | 18.4 | 8.2  | 19.0 | 7.6  | 3.8 | 9.8  |
| 80     | 18.6 | 8.9  | 20.0 | 8.5  | 4.1 | 11.0 |
| 90     | 18.8 | 9.7  | 20.9 | 9.0  | 4.6 | 11.8 |
| 100    | 19.0 | 10.3 | 21.7 | 9.4  | 5.0 | 12.4 |
| 110    | 19.1 | 10.8 | 22.5 | 9.9  | 5.2 | 13.0 |
| 120    | 19.3 | 11.4 | 23.5 | 10.5 | 5.3 | 13.7 |

表 2-12 各種土壌の毛管速度 (cm)

| 時間 (hr) | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    |
|---------|------|------|------|------|------|------|
| 0.5     | 16.8 | 4.9  | 12.7 | 4.5  | 2.9  | 6.0  |
| 1.0     | 18.2 | 7.6  | 17.5 | 7.1  | 3.6  | 9.1  |
| 1.5     | 18.8 | 9.7  | 20.9 | 9.0  | 4.6  | 11.8 |
| 2.0     | 19.3 | 11.4 | 23.5 | 10.5 | 5.3  | 13.7 |
| 2.5     | 19.6 | 13.0 | 25.8 | 11.7 | 6.4  | 15.0 |
| 3.0     | 19.9 | 14.9 | 27.6 | 12.7 | 6.9  | 16.7 |
| 3.5     | 20.2 | 15.8 | 29.7 | 13.8 | 7.4  | 17.9 |
| 4.0     | 20.5 | 17.0 | 30.7 | 14.7 | 8.0  | 18.7 |
| 4.5     | 20.7 | 18.1 | 32.2 | 15.5 | 8.4  | 20.2 |
| 5.0     | 20.9 | 19.3 | 33.3 | 16.3 | 8.8  | 21.1 |
| 5.5     | 21.1 | 20.4 | 34.5 | 16.9 | 9.2  | 21.8 |
| 6.0     | 21.3 | 21.3 | 35.6 | 17.6 | 9.5  | 22.5 |
| 6.5     | 21.5 | 22.1 | 36.6 | 18.2 | 10.3 | 23.4 |
| 7.0     | 21.7 | 23.1 | 37.3 | 18.7 | 10.8 | 24.1 |
| 7.5     | 21.9 | 24.0 | 38.1 | 19.2 | 11.1 | 24.7 |
| 8.0     | 22.0 | 24.9 | 38.8 | 19.8 | 11.5 | 24.4 |

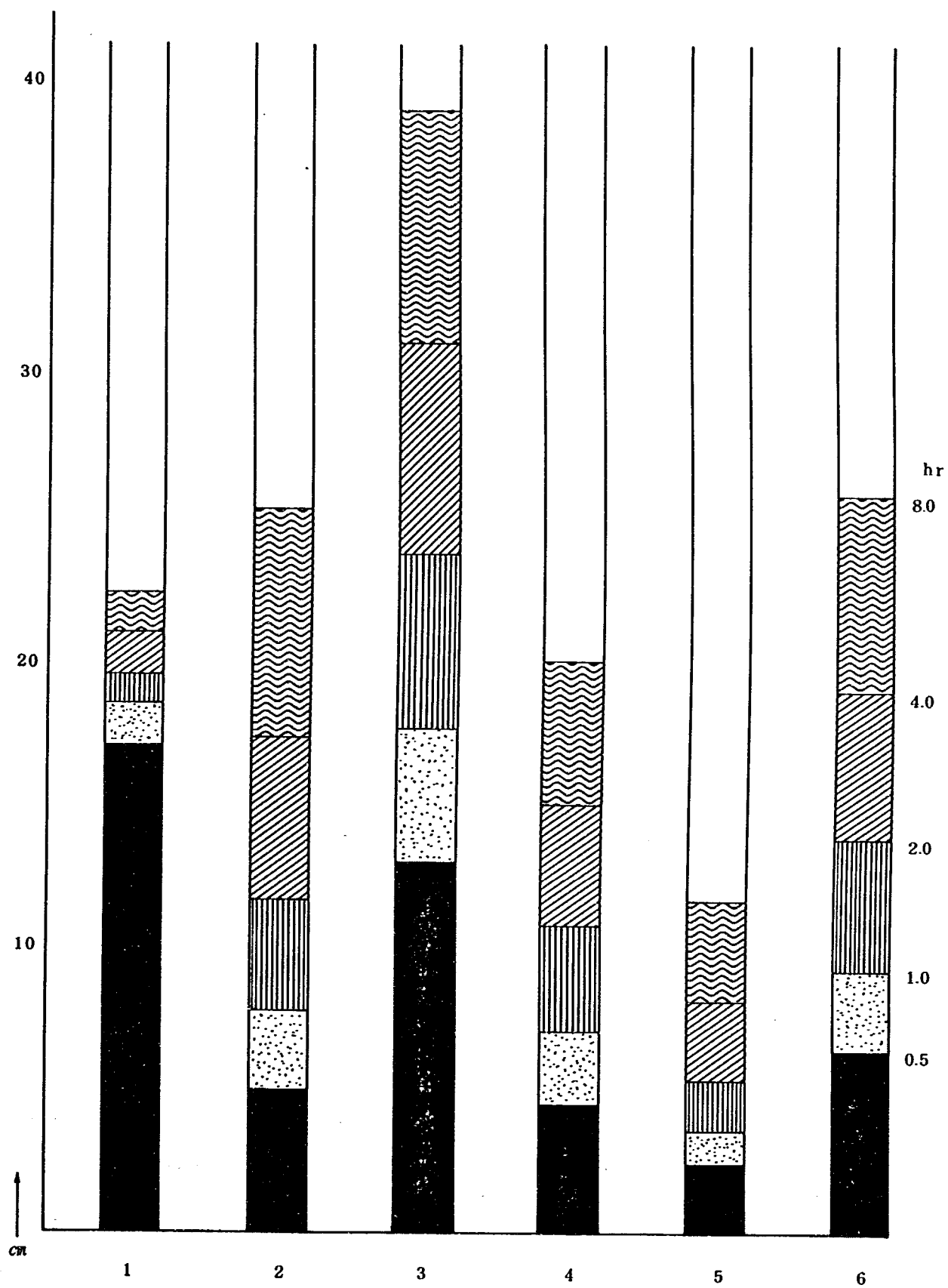


図 2-10 各種土壌の毛管速度

### 3 涵養水の土壌浄化と目づまり

土壌による汚水の浄化は古くより知られ、この浄化能力を高め、積極的に水質汚濁防止対策に利用しようとする試みも多い。土壌による水浄化はつぎのような反応による。

- a) 物理，化学的吸着
- b) 微生物の増殖，固定
- c) 生物，化学的酸化還元反応

これらの反応を高率的に利用することにより、今後水質汚濁防止に大きな役割をはたすであろう。しかし、現在この浄化方法のネックとなっているのが目づまりであり、目づまりの防止対策が確立されない限り大きな期待はできない。

目づまりの原因としてつぎのようなことがあげられている<sup>1)</sup>

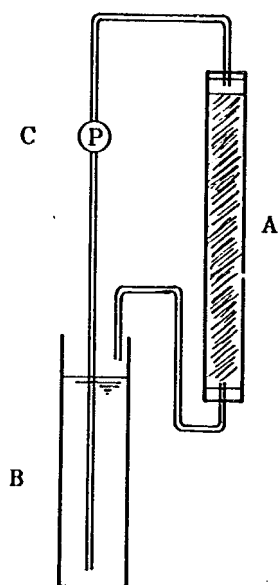
- a) 注入水中の浮遊物
- b) 微生物の繁殖
- c) 化学反応による不溶性物の生成
- d) 土粒子の配変化
- e) 空気胞

#### 3-1 窒素の土壌吸着

土壌に対する窒素の吸着は、土壌の種類その他諸条件により異なる。

図3-1に示すような装置により、砂(100g)、世田谷表土(50g)をカラムにつめ、各溶液( $\text{NH}_4\text{SO}_4$ ,  $\text{KNO}_3$ ,  $\text{KNO}_2$ )12時間循環させて後窒素を測定して吸着量を算出した。この結果は表3-1に示した通りである。

土壌に対する窒素の吸着量は、粘土の吸着能が大きいので粘土の多く含有する土壌が大きいのが一般的な見方である。しかし本実験の場合、砂の吸着能が表土と比較して多少大きくなっている。窒素の形態別にみると $\text{NH}_4-\text{N}$ の吸着はるかに大きく、 $\text{NO}_3-\text{N}$ も多少吸着するが、 $\text{NO}_2-\text{N}$ は、本実験では全く吸着されなかった。これは、 $\text{NH}_4-\text{N}$ が土壌により吸着され除去されたとしても、いずれは酸化され $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}_3$ となり流出する可能性がある。



A : 土壌カラム  
径 26 mm  
長さ 200 mm  
B : 貯留容器  
容積 1 L  
C : 定量ポンプ

図 3-1 実験装置

表 3-1 土壌の窒素吸着量

| 土 壌 種                  | 窒素形態                   | N 濃 度<br>(ppm) | N吸着量<br>(mg/g) |
|------------------------|------------------------|----------------|----------------|
| 砂<br>( $<2\text{mm}$ ) | $\text{NH}_4\text{-N}$ | 10             | 0.082          |
|                        |                        | 50             | 0.252          |
| 世 田 谷<br>表 土           | $\text{NH}_4\text{-N}$ | 10             | 0.060          |
|                        |                        | 50             | 0.216          |
|                        |                        | 100            | 0.143          |
|                        |                        | 500            | 0.453          |
|                        |                        | 1000           | 0.804          |
|                        | $\text{NO}_3\text{-N}$ | 100            | 0.018          |
|                        |                        | 500            | 0.158          |
|                        |                        | 1000           | 0.281          |
|                        | $\text{NO}_2\text{-N}$ | 100            | 0              |
|                        |                        | 500            | 0              |
|                        |                        | 1000           | 0              |

### 3-2 土壌による汚水の浄化

図-8 に示した装置を使用して、これの合成汚水の浄化能について実験をおこなった。

合成汚水の成分は表 3-2 に示し、その分析値は表 3-3 に示した通りである。

表 3-2 合成汚水の成分

| 薬 品                          | 使用量 (mg)                    | 成 分 (mg)                                                         |
|------------------------------|-----------------------------|------------------------------------------------------------------|
| $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ | 48.2                        | N 23.0                                                           |
| $\text{K}_2\text{SO}_4$      | 15.9                        | $(\text{NH}_4\text{-N } 10.2)$<br>$(\text{NO}_3\text{-N } 12.8)$ |
| $\text{MgSO}_4$              | 65.9                        | $\text{P}_2\text{O}_5$ 13.0                                      |
| $\text{KNO}_3$               | 18.5                        | $\text{K}_2\text{O}$ 17.2                                        |
| $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$   | 59.9                        | $\text{CaO}$ 20.5                                                |
| $\text{KH}_2\text{PO}_4$     | 24.8                        | $\text{MgD}$ 22.1                                                |
| ブドウ糖                         | 33.3                        | X                                                                |
| $\text{FeCl}_3$              | $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 2~5 |                                                                  |
| $\text{H}_2\text{O}$         | 1 L                         |                                                                  |

表 3-3 合成汚水の分析値

| 成 分                    | 濃 度 (ppm) |
|------------------------|-----------|
| pH                     | 6.80      |
| BOD                    | 18.7      |
| COD                    | 24.3      |
| SS                     | 0         |
| $\text{NH}_4\text{-N}$ | 10.6      |
| $\text{NO}_3\text{-N}$ | 15.8      |
| T-N                    | 26.4      |
| D.O.                   | 7.77      |

$h = 80 \text{ mm}$ として、8月24日から流量を測定しながら流入し、流出水进行分析した。その結果流出量は表3-4、流入成分量は表3-5、流出水の分析値は表3-6に示した通りである。

表3-4 合成汚水の流入量

| 月 日   | 時 間   | t-t'(分) | 流 入 量(ℓ) | ml/min | ml/m <sup>2</sup> ・min |
|-------|-------|---------|----------|--------|------------------------|
| 8. 24 | 18:00 | —       | —        | —      | —                      |
| 25    | 9:00  | 900     | 49.0     | 54.4   | 363                    |
|       | 20:00 | 660     | 30.0     | 45.5   | 303                    |
| 26    | 9:00  | 780     | 37.0     | 47.4   | 316                    |
|       | 12:30 | —       | —        | —      | —                      |
|       | 16:00 | 210     | 10.0     | 47.6   | 317                    |
|       | 17:00 | —       | —        | —      | —                      |
| 27    | 10:00 | 1020    | 50.0     | 49.0   | 327                    |
|       | 18:30 | 510     | 21.5     | 42.2   | 281                    |
| 28    | 9:30  | 900     | 45.3     | 50.3   | 336                    |
| 29    | 10:00 | —       | —        | —      | —                      |
|       | 18:00 | 480     | 25.5     | 53.1   | 354                    |
| 30    | 10:00 | —       | —        | —      | —                      |
|       | 18:30 | 510     | 24.4     | 47.8   | 319                    |
| 31    | 10:00 | —       | —        | —      | —                      |
|       | 19:00 | 540     | 15.0     | 27.8   | 185                    |
| 9. 1  | 10:00 | 900     | 3.5      | 3.9    | 25.9                   |
| 2     | 10:00 | 1440    | 2.5      | 1.7    | 11.6                   |

表3-5 流入成分量

| 月 日   | 水量(ℓ) | 累計(ℓ) | BOD  | COD   | NH <sub>4</sub> -N | NO <sub>2</sub> -N | T-N   | T-S |
|-------|-------|-------|------|-------|--------------------|--------------------|-------|-----|
| 8. 25 | 49    | 49    | 0.92 | 1.19  | 0.52               | 0.77               | 1.29  | 15  |
| "     | 30    | 79    | 1.48 | 1.92  | 0.84               | 1.25               | 2.09  | 24  |
| 26    | 44    | 123   | 2.30 | 2.99  | 1.30               | 1.94               | 3.24  | 37  |
| "     | 10    | 133   | 2.49 | 3.23  | 1.41               | 2.10               | 3.51  | 40  |
| 27    | 50    | 183   | 3.42 | 4.45  | 1.94               | 2.89               | 4.83  | 55  |
| "     | 25.8  | 208.8 | 3.90 | 5.07  | 2.21               | 3.30               | 5.51  | 63  |
| 28    | 45.3  | 254.1 | 4.75 | 6.17  | 2.69               | 4.01               | 6.70  | 76  |
| "     | 10    | 264.1 | 4.94 | 6.41  | 2.80               | 4.17               | 6.97  | 79  |
| 29    | 49    | 313.1 | 5.85 | 7.64  | 3.32               | 4.95               | 8.27  | 94  |
| "     | 25.5  | 338.6 | 6.33 | 8.22  | 3.59               | 5.35               | 8.94  | 102 |
| 30    | 48    | 386.6 | 7.23 | 9.39  | 4.10               | 6.11               | 10.21 | 116 |
| "     | 24.4  | 411.0 | 7.69 | 9.98  | 4.36               | 6.49               | 10.85 | 123 |
| 31    | 31.8  | 442.8 | 8.28 | 10.75 | 4.69               | 7.00               | 11.69 | 133 |
| "     | 15    | 457.8 | 8.56 | 11.13 | 4.85               | 7.23               | 12.09 | 137 |
| 9. 1  | 3.5   | 461.3 | 8.63 | 11.21 | 4.89               | 7.29               | 12.18 | 138 |
| 2     | 2.5   | 463.8 | 8.67 | 11.27 | 4.92               | 7.33               | 22.24 | 139 |

(単位 g)

表3-6 流出水の分析値

| 月 日                | 8/25 | 26    | 27    | 28 | 29   | 30    | 31   | 9/1   | 2     |
|--------------------|------|-------|-------|----|------|-------|------|-------|-------|
| pH                 | —    | 6.90  | —     | —  | 6.90 | 6.90  | —    | —     | 7.00  |
| BOD                | 0.25 | 0     | 0.60  | —  | —    | 0.27  | —    | 0.79  | 2.29  |
| COD                | 0.43 | 0.22  | 0.43  | —  | 0.51 | 0     | 0.51 | 0.82  | 1.03  |
| SS                 | 0    | 0     | 0     | 0  | 0    | 0     | 0    | 0     | 0     |
| NH <sub>4</sub> -N | —    | 0.70  | 0.35  | —  | —    | 0.70  | —    | 0.70  | 0.70  |
| NO <sub>3</sub> -N | —    | 9.87  | 10.22 | —  | —    | 11.98 | —    | 12.69 | 12.69 |
| T-N                | —    | 10.57 | 10.57 | —  | —    | 12.68 | —    | 13.39 | 13.39 |
| T-S                | 293  | 159   | 150   | —  | —    | 205   | —    | 223   | —     |
| DO                 | 7.50 | 8.11  | 7.75  | —  | —    | 7.36  | —    | 7.17  | 7.21  |

この結果では、流入汚水が成分的に条件がよければ、約一週間程度で微生物繁殖による目づまりのため、流入量が減少し、約10日ぐらいで完全に毛管作用が不能となる可能性がある。この季節は温度条件も微生物繁殖のためにはよく、目づまりは、その微生物の繁殖の有無にかかっている。

汚水浄化からみると、BOD、COD、NH<sub>4</sub>-Nは殆んど除去されその効果が大きい。しかし、NO<sub>3</sub>-Nは全く除去効果がなく、そのまま流出され、NH<sub>4</sub>-Nの酸化により増加する可能性もある。

この実験で、目づまりのため流入しなくなったので、これを逆流させたところ、どろどろの微生物体が出た。後一週間経て、同じように清水を流入させたところ完全にその浸透速度は回復していた。

## 4 目づまり防止対策の検討

目づまりの原因として前記5項目をあげたが、流入水の浮遊物、微生物の繁殖については、人工的な操作によりある程度防止することができよう。前述の汚水浄化試験の目づまりは、逆流の時に生物体が流れだしたことから、明らかに微生物の繁殖が原因である。微生物の繁殖に季節的にも好条件であったのでその目づまりも非常に速かったのであろう。

微生物の繁殖には常に水が貯留されている部分が多い程好条件となる可能性があるのので、ぎのような実験をおこなった。

実験装置は図4-1, 4-2に示した通りである。

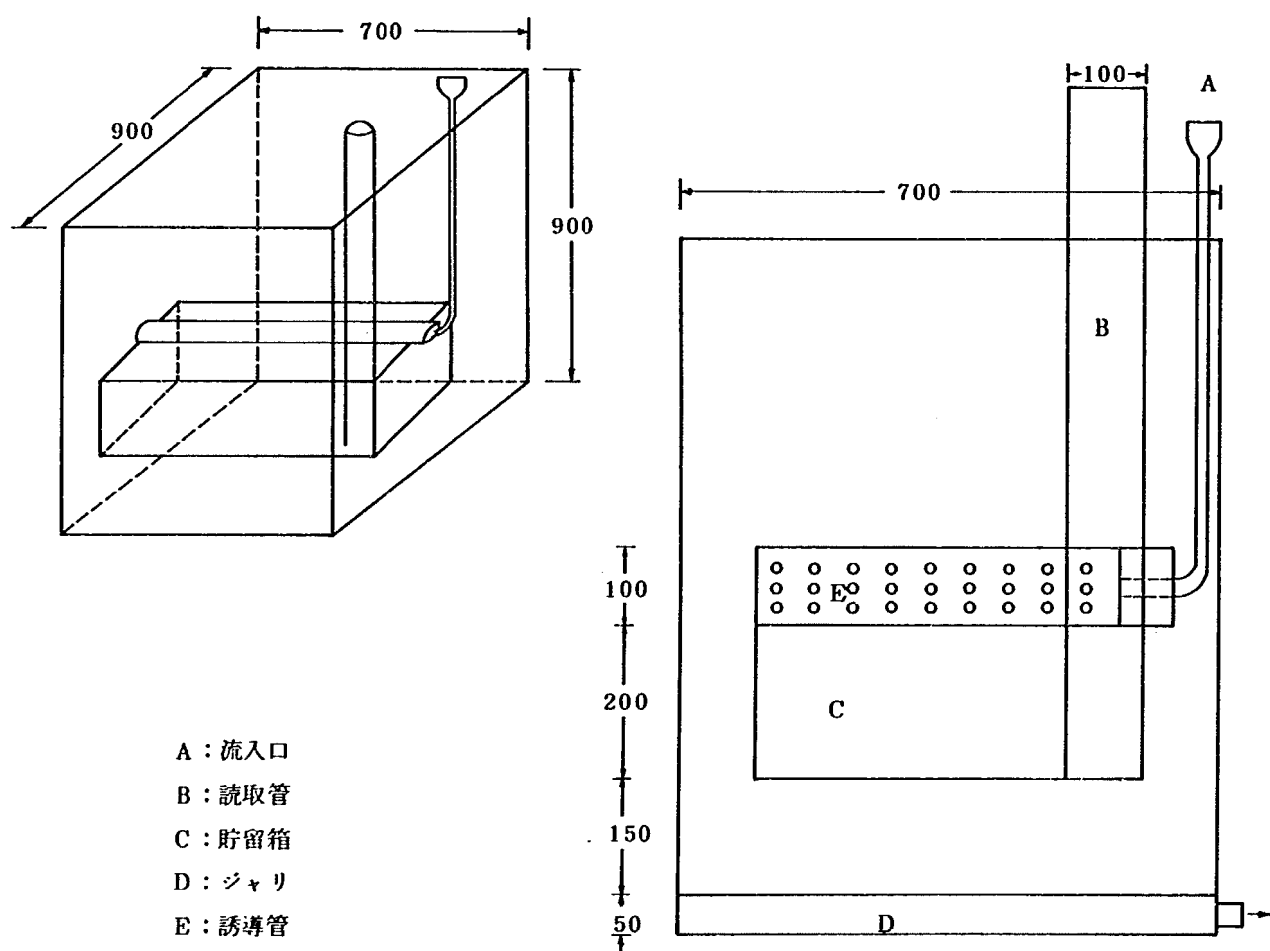


図4-1 実験装置

流入汚水は浄化試験で使用した合成汚水とし、その分析値は表4-1に示した。

試験のはじめは11月4日であり、その日から1日2回、4ℓずつ8ℓ流入した。流入量ならびに流出量は表4-2に示した。

流入汚水は合成したものであるので、その分析値も前の浄化試験の場合と大差がない。

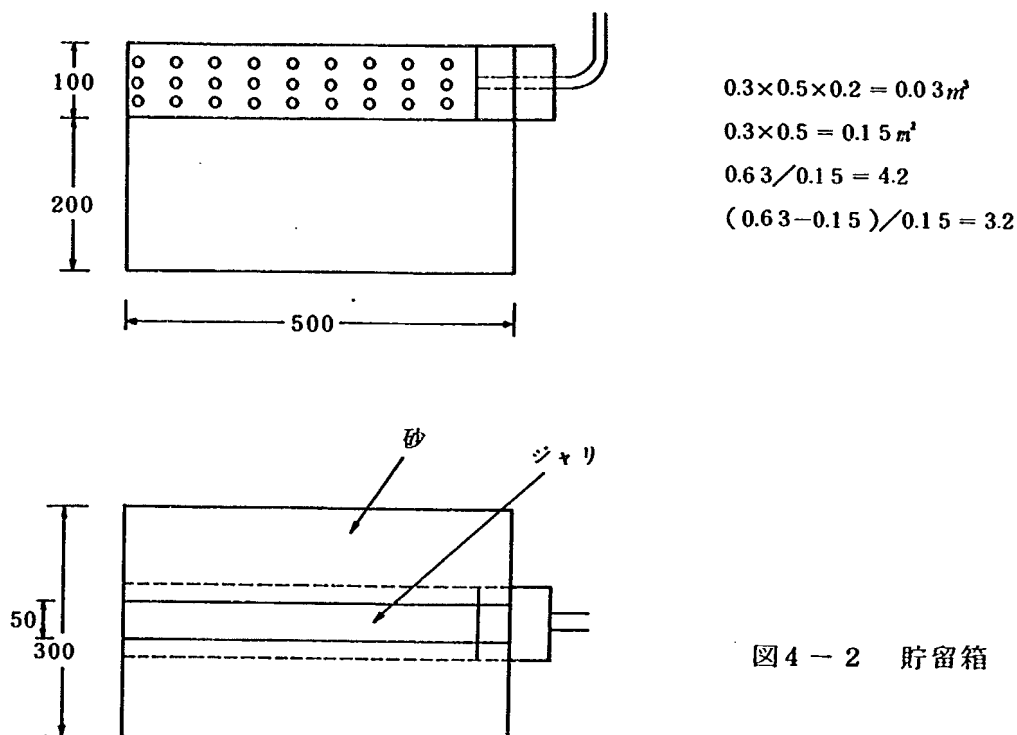


図4-2 貯留箱

表4-1 流入水の分析値

| 月 日                | 12/4  | 19    | 26    | 1/9   | 17    | 24    |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| pH                 | 6.85  | 6.50  | 6.75  | 6.55  | 6.70  | 6.60  |
| BOD                | 20.53 | 24.80 | 19.05 | 20.60 | 23.00 | 25.00 |
| COD                | 22.04 | 21.17 | 18.05 | 25.32 | 22.00 | 22.00 |
| NH <sub>4</sub> -N | 9.86  | 11.64 | 8.90  | 9.59  | 8.90  | 8.90  |
| NO <sub>x</sub> -N | 11.27 | 12.33 | 10.27 | 11.64 | 11.64 | 12.33 |
| T-N                | 21.13 | 23.97 | 19.17 | 21.23 | 20.54 | 21.23 |
| T-S                | 320   | 320   | 500   | 516   | 514   | 510   |

11月4日より現在未だ連続しているが、季節的に微生物の繁殖には非常に悪い条件である。誘導管を上にもっていったのは、水が入って貯留した時、誘導管は水中に入らないように、水が入ったら直ちに空洞になるよう考案されたものである。貯留箱の中、誘導管の下に50mm巾の石をつめたのは、水を流入した時に、貯留箱からあふれて浸透することのないようにするためである。

汚水が流入口から朝4ℓ入り、貯留箱に貯留される。最初は水位(h)が高いので非常に速いが、徐々におそくなり、最後には殆んど上昇しなくなる。その速度は読取管から水位を測定したものである。

表4-2 流入および流出量

| 月 日         | 流入量(ℓ) | 流 入 の な い 日                       | 流出量(ℓ)             | 率 (ℓ) |
|-------------|--------|-----------------------------------|--------------------|-------|
| 11月 4日<br>} |        | 6, 9, 13, 20, 23, 27, 30          | 14日 0.9<br>15日 4.8 |       |
| 11月30日      | 156    | (4ℓ/日 17)                         | 79                 | 50.6  |
| 12月 1日<br>} |        | 1, 4, 11, 25                      |                    |       |
| 12月31日      | 200    | (4ℓ/日 13, 24, 26, 31)             | 193                | 96.5  |
| 1月 1日<br>}  |        | 1, 2, 3, 4, 18, 22                |                    |       |
| 1月31日       | 172    | (4ℓ/日 16, 19, 20, 25, 28, 29, 31) | 178                | 103.5 |

コンクリート槽の上部にはビニールを張ってあるので、土壌表面からの蒸散は少なかったと思われる。100%以上流出するのは雨や雪のためである。流入、流出量の正確な数値をとるため、晴天の9日間連続的に数値をとったのが表4-3である。

土壌表面の蒸散量が殆んどなく、98%程度が地下に浸透することがわかるが、この実験では、ビニールで蒸散を防止しているので一般的ではない。

浸透速度は貯留箱の水位を測定したものであるが、汚水を入れたものと水道水を入れたものとを比較した。その結果は表4-4～表4-13、図4-3～図4-12に示した通りである。

表4-3 流入、流出の比率

| 月 日   | 流入量(ℓ) | 流出量(ℓ) |
|-------|--------|--------|
| 1 7   | 8      | 7.8    |
| 8     | 8      | 7.8    |
| 9     | 8      | 7.8    |
| 10    | 8      | 7.4    |
| 11    | 8      | 7.6    |
| 12    | 8      | 7.9    |
| 13    | 8      | 8.1    |
| 14    | 8      | 8.1    |
| 15    | 8      | 7.9    |
| 計     | 72     | 70.4   |
| 率 (ℓ) | —      | 97.8   |

表4-4

| 11月8日 | A (cm) | B (cm) |
|-------|--------|--------|
| 9:50  | 15.0   | 16.0   |
| 10:30 | 9.0    | 11.5   |
| 11:00 | 6.0    | 8.5    |
| 11:30 | 4.5    | 7.0    |
| 12:10 | 3.4    | 6.0    |
| 13:05 | 2.5    | 4.8    |
| 13:35 | 2.0    | 4.5    |
| 14:05 | 1.4    | 4.0    |
| 14:40 | 1.4    | 3.2    |

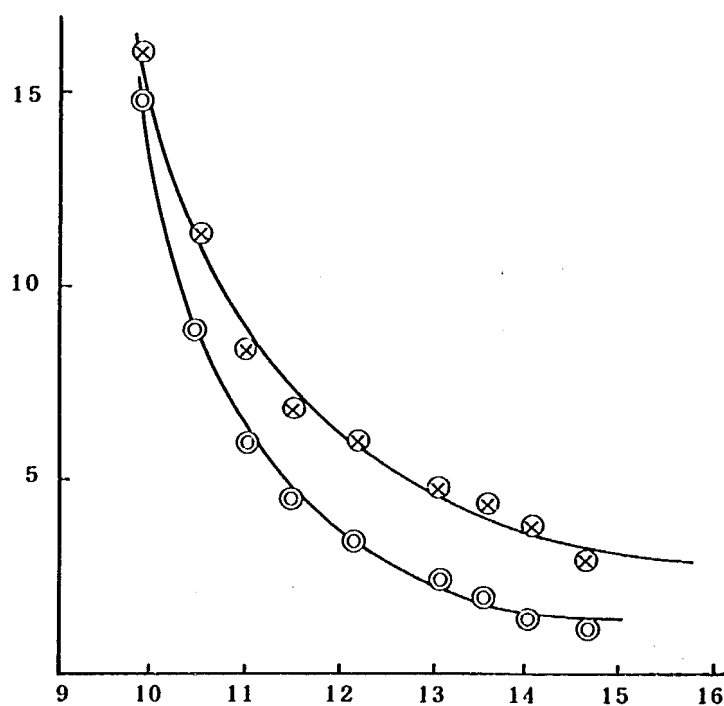


表 4 - 5

| 11月12日 | A (cm) | B (cm) |
|--------|--------|--------|
| 9:00   | 16.0   | 17.5   |
| 9:30   | 11.2   | 14.0   |
| 10:00  | 7.2    | 10.0   |
| 10:30  | 5.6    | 8.8    |
| 11:50  | 3.5    | 6.0    |
| 12:30  | 2.8    | 5.2    |
| 13:30  | 2.0    | 4.4    |

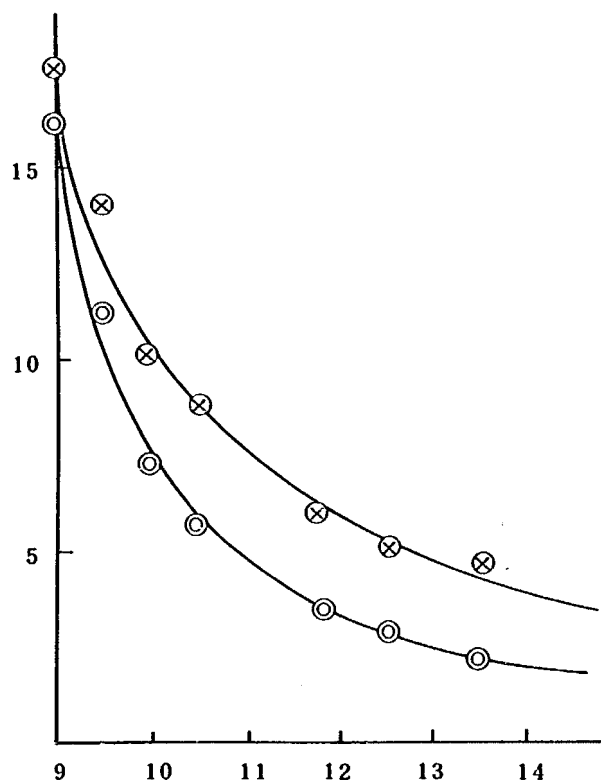


图 4 - 4

表 4 - 6

| 11月18日 | A (cm) | B (cm) |
|--------|--------|--------|
| 9:30   | 17.0   | 18.0   |
| 10:00  | 10.0   | 14.5   |
| 10:30  | 7.6    | 10.6   |
| 11:00  | 6.0    | 9.0    |
| 11:35  | 4.5    | 7.5    |
| 12:00  | 3.6    | 6.8    |
| 17:00  | 2.0    | 3.0    |

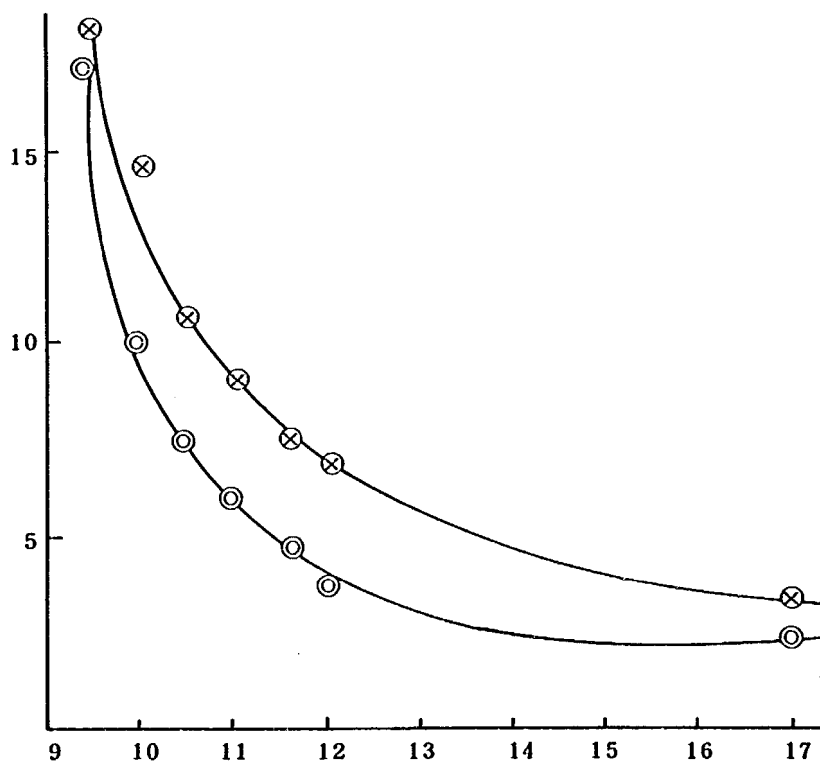


图 4 - 5

表 4-7

| 11月22日 | A (cm) | B (cm) |
|--------|--------|--------|
| 9:25   | 18.0   | 18.0   |
| 10:00  | 10.4   | 14.0   |
| 10:30  | 7.0    | 10.4   |
| 11:00  | 6.0    | 8.5    |
| 12:00  | 4.5    | 7.0    |
| 13:00  | 3.4    | 5.8    |
| 14:00  | 2.6    | 5.0    |
| 15:00  | 2.4    | 4.6    |
| 16:22  | 1.6    | 3.5    |
| 17:00  | 1.5    | 3.4    |

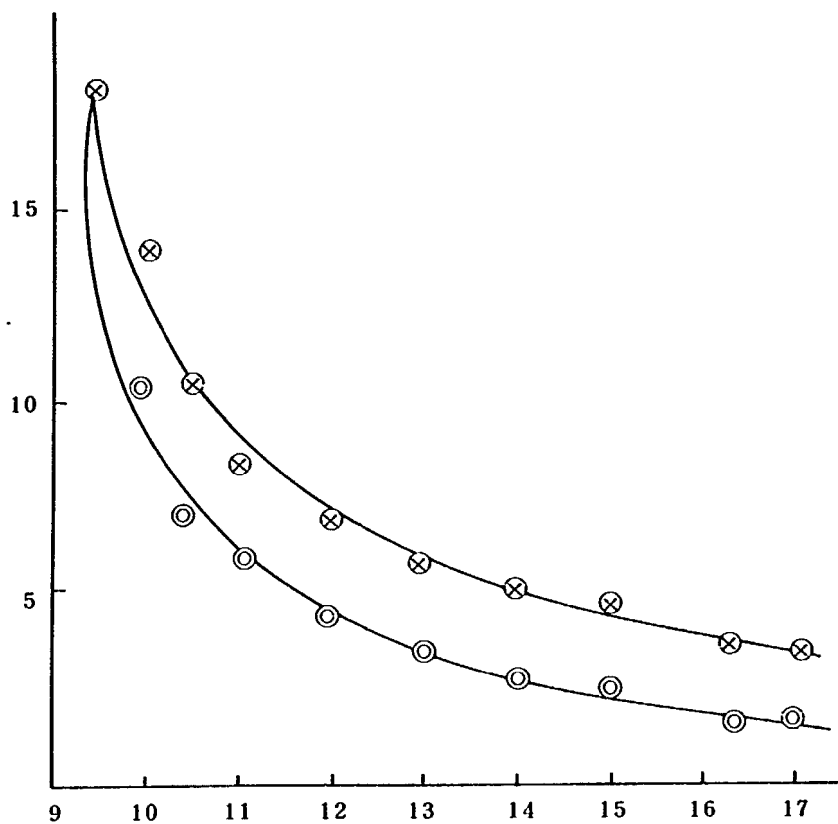


图 4-6

表 4-8

| 11月29日 | A (cm) | B (cm) |
|--------|--------|--------|
| 9:00   | 17.6   | 18.2   |
| 9:30   | 12.6   | 15.4   |
| 10:00  | 8.9    | 12.0   |
| 10:30  | 7.0    | 10.0   |
| 11:00  | 6.0    | 8.6    |
| 11:30  | 5.0    | 7.8    |
| 12:00  | 4.5    | 7.1    |
| 13:00  | 3.6    | 6.0    |
| 14:00  | 3.0    | 5.2    |
| 15:00  | 2.6    | 4.8    |
| 16:00  | 2.2    | 4.2    |
| 17:00  | 1.8    | 3.4    |

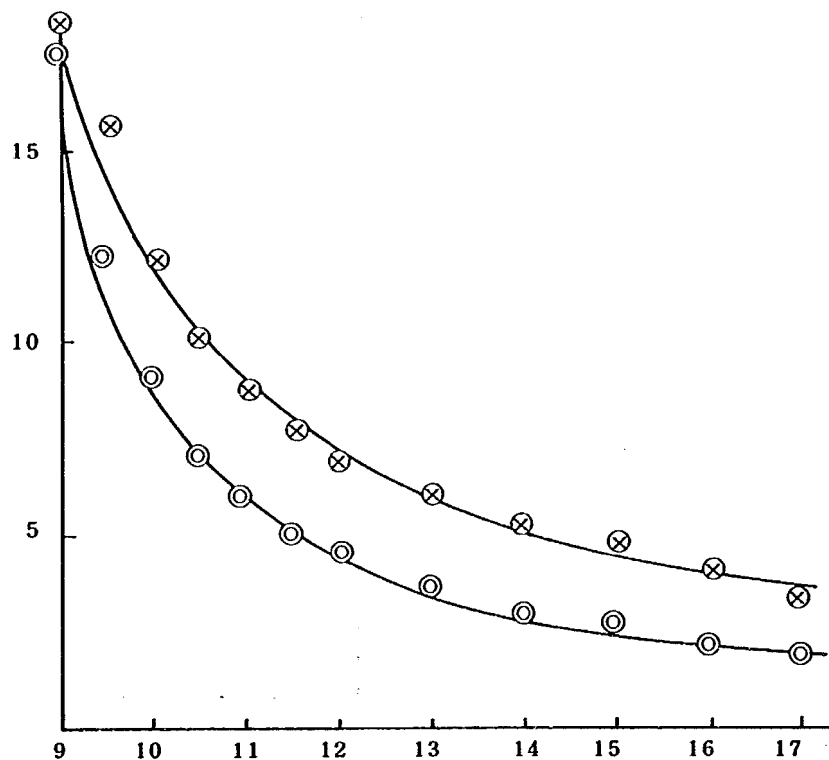


图 4-7

表 4 - 9

| 12月12日 | A (cm) | B (cm) |
|--------|--------|--------|
| 9:35   | 18.2   | 17.4   |
| 10:35  | 9.6    | 13.2   |
| 11:00  | 8.5    | 11.0   |
| 12:50  | 5.5    | 8.0    |
| 15:40  | 4.5    | 6.0    |
| 17:05  | 3.0    | 5.2    |

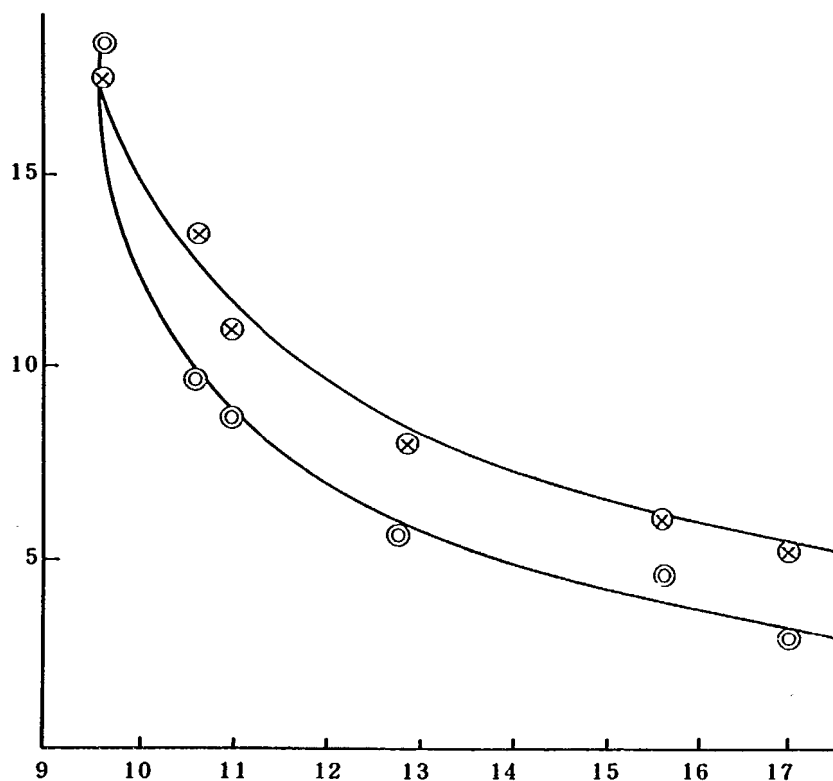


图 4 - 8

表 4 - 1 0

| 12月20日 | A (cm) | B (cm) |
|--------|--------|--------|
| 9:00   | 19.0   | 19.8   |
| 9:30   | 14.4   | 16.2   |
| 10:00  | 10.5   | 13.2   |
| 10:35  | 8.7    | 11.0   |
| 11:00  | 8.0    | 9.5    |
| 12:00  | 6.2    | 8.0    |
| 13:00  | 5.5    | 7.2    |
| 14:00  | 5.0    | 6.2    |
| 15:00  | 4.0    | 5.7    |
| 16:00  | 3.4    | 5.0    |
| 17:00  | 3.0    | 4.5    |

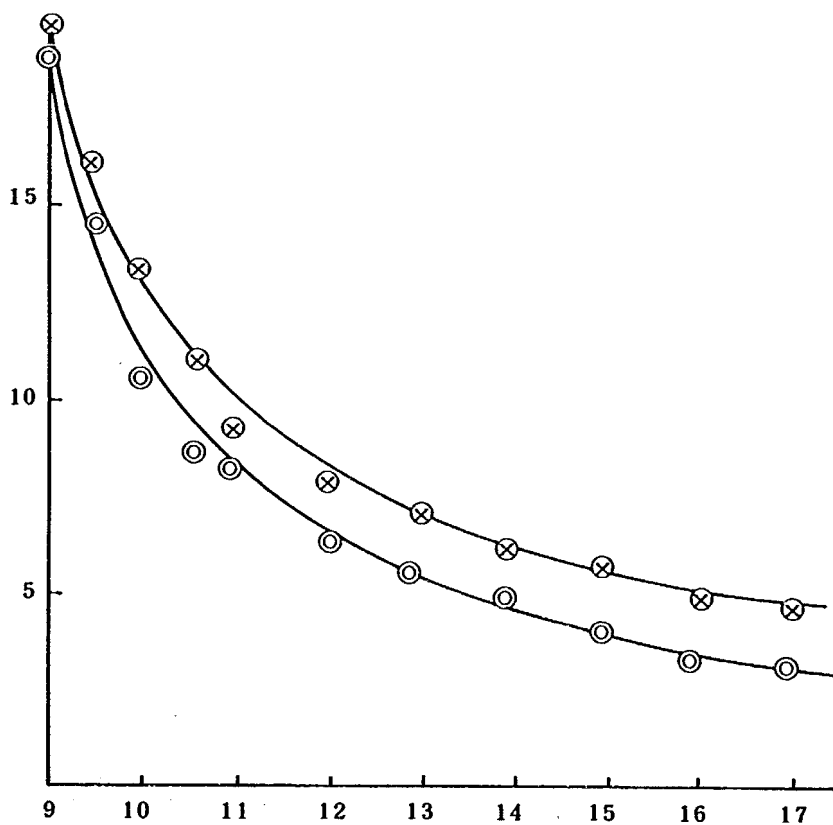


图 4 - 9

表 4-1 1

| 12月28日 | A (cm) | B (cm) |
|--------|--------|--------|
| 9:55   | 19.2   | 20.6   |
| 10:30  | 14.0   | 15.6   |
| 11:00  | 10.2   | 12.8   |
| 12:00  | 7.6    | 10.0   |
| 14:00  | 5.7    | 7.6    |
| 16:00  | 4.5    | 6.3    |
| 18:30  | 3.5    | 5.0    |
| 19:00  | 3.5    | 5.0    |

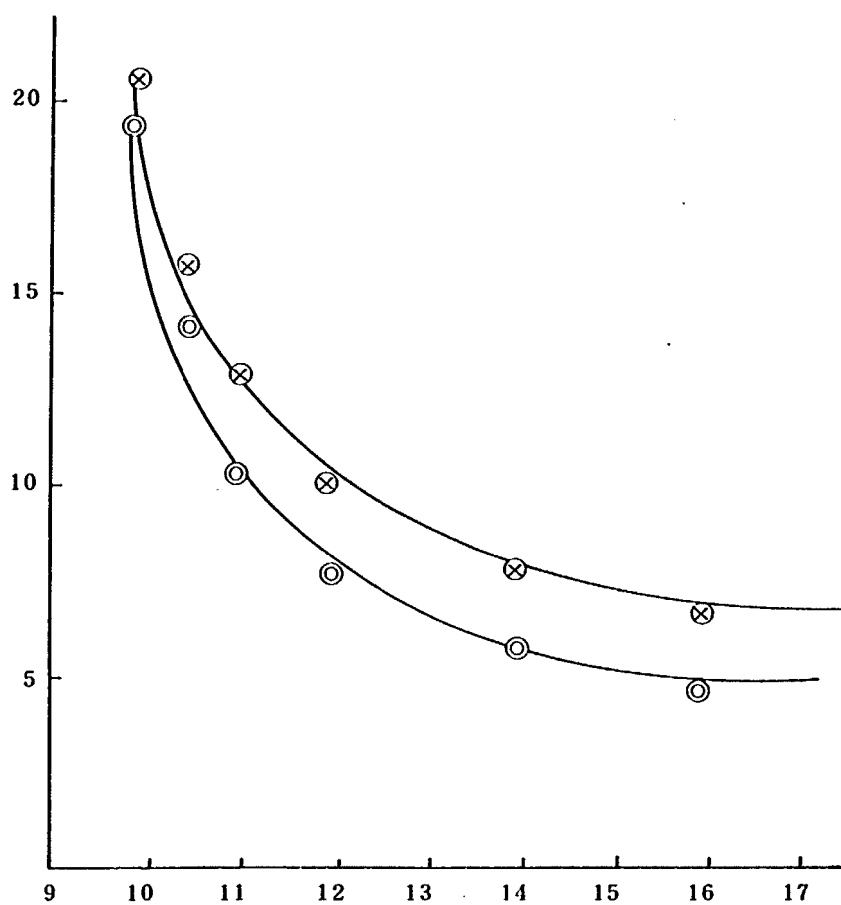


图 4-1 0

表 4-1 2

| 1月10日 | A (cm) | B (cm) |
|-------|--------|--------|
| 9:25  | 18.0   | 20.4   |
| 9:55  | 14.6   | 16.0   |
| 10:25 | 11.1   | 13.0   |
| 10:55 | 9.1    | 11.2   |
| 11:25 | 8.0    | 10.0   |
| 12:55 | 6.4    | 8.2    |
| 13:55 | 5.5    | 7.6    |
| 14:55 | 5.4    | 6.5    |
| 15:55 | 5.0    | 6.0    |
| 16:55 | 4.2    | 5.4    |
| 17:55 | 4.0    | 5.0    |
| 19:55 | 3.5    | 4.4    |

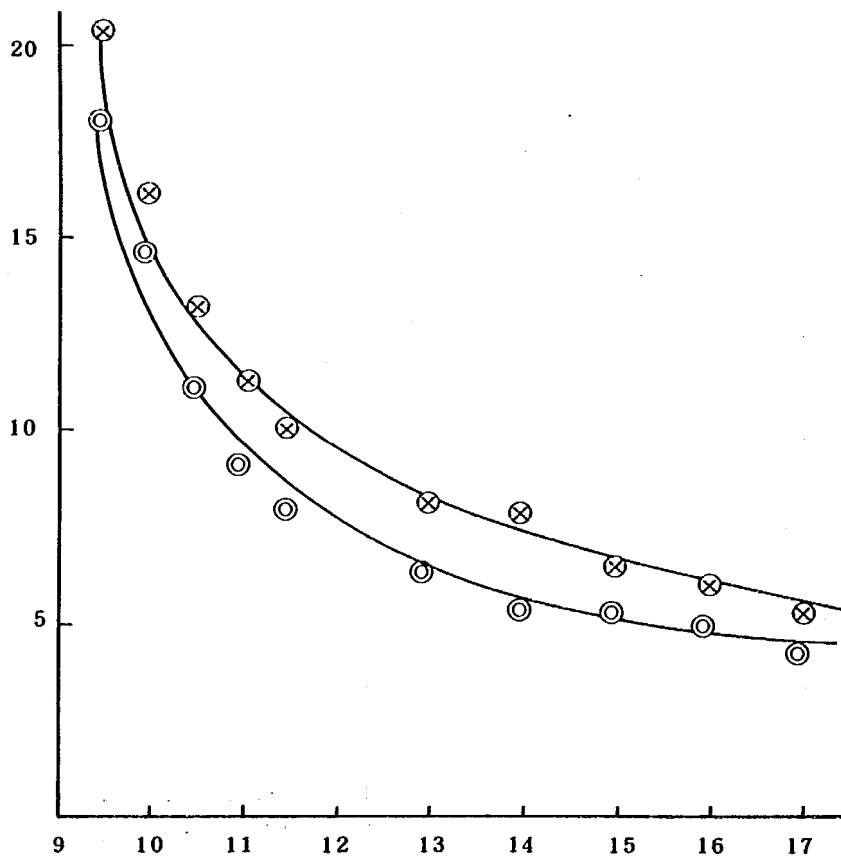


图 4-1 1

表4-13

| 1月20日 | A (cm) | B (cm) |
|-------|--------|--------|
| 10:20 | 19.4   | 21.0   |
| 10:50 | 14.5   | 16.0   |
| 11:20 | 11.5   | 13.4   |
| 11:50 | 9.5    | 11.6   |
| 12:20 | 8.5    | 10.5   |
| 15:00 | 6.0    | 7.5    |
| 16:00 | 5.5    | 6.8    |
| 17:00 | 5.0    | 6.5    |

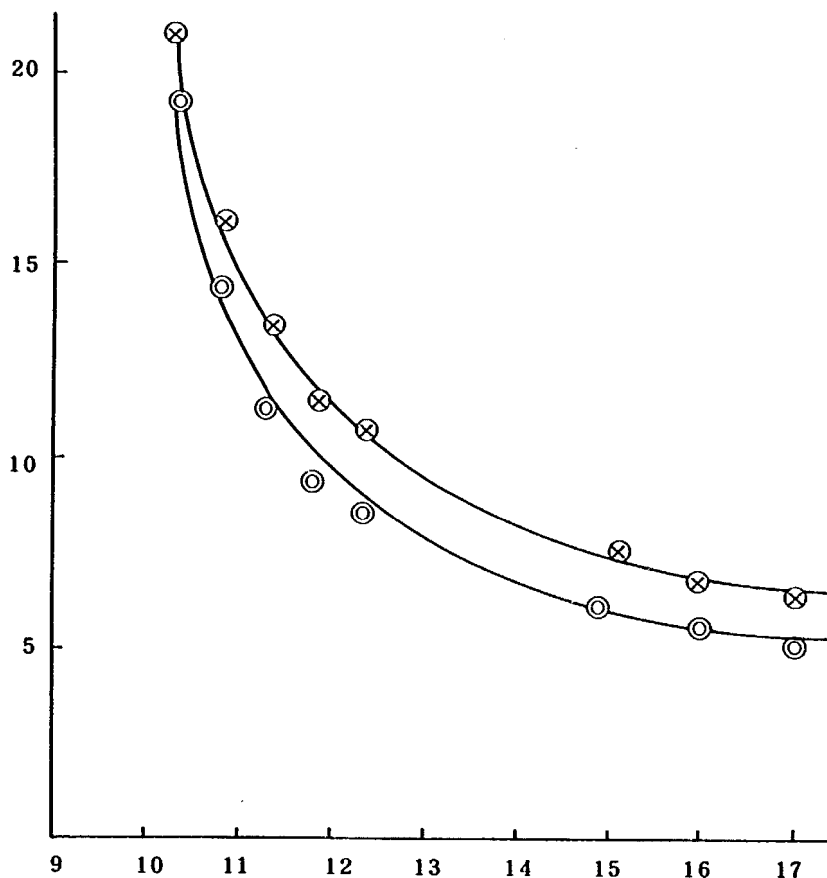


図4-12

浸透速度は現在もあまり変わっていないが、最後に残る量が少し多くなっている。しかし水道水だけのものも同じような傾向にあるので、微生物繁殖のための目づまりではなく、物理的例えば空気胞等が原因であろうと思われる。

流出水の分析値は表4-14に示した。

表4-14

| 月 日                | 11/15 | 22    | 28    | 12/4  | 12    | 19    | 26    | 1/9   | 17    | 24    |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| pH                 | 6.75  | 6.80  | 6.75  | 6.85  | 6.80  | 6.75  | 6.70  | 6.80  | 6.70  | 6.70  |
| BOD                | 0.83  | 0.58  | 0.81  | 0.05  | 0.06  | 0.33  | 1.06  | 1.29  | 1.88  | 2.46  |
| COD                | 0.63  | 0.21  | 0     | 0     | 0     | 0     | 0.42  | 0.52  | 0     | 0     |
| NH <sub>4</sub> -N | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
| NO <sub>x</sub> -N | 26.06 | 23.24 | 23.95 | 21.13 | 18.90 | 15.75 | 18.49 | 18.49 | 21.23 | 21.23 |
| T-N                | 26.06 | 23.24 | 23.95 | 21.13 | 18.90 | 15.75 | 18.49 | 18.49 | 21.23 | 21.23 |
| T-S                | 320   | 316   | 40    | 290   | 320   | 510   | 430   | 232   | 282   | 254   |
| DO                 | —     | —     | 10.53 | 9.78  | 9.51  | 11.30 | 11.11 | 12.52 | 12.03 | 14.52 |

この程度の汚水を浸透させても殆んど汚濁物は流出することはないと考えてよい。

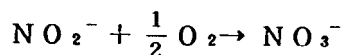
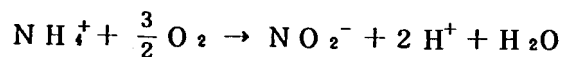
流入汚濁源の量を計算すると表4-15のようになるが、これらがいつまでもその形でとどまるとすればいずれは流出されることになる。しかし土壌中の微生物により酸化、あるいは還元反応により分解され土壌中からなくなろう。

ここで問題になるのは窒素である。NH<sub>4</sub>-N は殆んど流出していないが、T-N からみて、NH<sub>4</sub>-N は土壌中で酸化されて、NO<sub>2</sub>-N または、NO<sub>3</sub>-N となって流出されている可能性が強い。

表 4 - 1 5 汚濁源の流入量

| 項 目                | 算出基準 | 1 1 月 | 1 2 月 | 1 月  | 計     |
|--------------------|------|-------|-------|------|-------|
| BOD                | 20   | 3.12  | 4.00  | 3.40 | 10.52 |
| COD                | 20   | 3.12  | 4.00  | 3.40 | 10.52 |
| NH <sub>4</sub> -N | 10   | 1.56  | 2.00  | 1.72 | 5.28  |
| NO <sub>3</sub> -N | 12   | 1.87  | 2.40  | 2.06 | 6.33  |
| T-N                | 22   | 3.43  | 4.40  | 3.78 | 11.61 |
| T-S                | 300  | 46.8  | 60.0  | 51.6 | 158.4 |

(単位 g)



NO<sub>2</sub>-N として流れるようになると、その毒性が強いのて危険性も大きいが、流出水の DO 濃度が大きいので酸化されているとすれば、NO<sub>3</sub>-N となっていると思われる。一たん酸化された窒素が、還元層に入れば、N<sub>2</sub> として空中に脱窒されることになるので、このような条件づくりができれば汚水浄化の面でも役立てられよう。

現在の実験は、11 月に入ってからのもので、これが夏になったらどうなるか、また、浮遊物質による目づまりをどのように防止するか今後の課題である。

## 文 献

- 1) 北川明 注入井による注入機構に関する考察 — 特に目づまりについて —  
土木技術資料 19-9 (1977)
- 2) 石崎勝義, 北川明 地下貯水池による水資源開発 土木技術資料 19-9 (1977)

## 参 考 文 献

○土木研究所水文研究室，勉強会にて

毛管浄化研究会 新 見 正 氏 講演

○汚水の土壌浄化法研究 一総 論一

新 見 正， 有 水 彊 共著

から抄録

## ○ トレンチ構造を利用した浸透による目づまりについて

現在までこの問題に関する基礎的研究はあまり行われてきていない。ただこの問題に関連する現象について、いくつかのことがらが認められている。

一つは、素掘り水路、水田からの漏水であるが現象として、横方向の浸透（畦畔浸透）については、素掘り水路底及び水田の床が比較的短時間で目づまりをするのに比べ目づまりを、起しにくいことが、知られている。図－１は、雑排水の、素掘り浸透槽の断面図であるが、使用後３ヶ月位経過すると、素掘りみぞの側壁に微生物膜が発生し、それが、ほとんど不透水膜に近い構造物と汚水の

重力浸透をさまたげた。

ところが、風呂排水など、一度に供給された汚水は、約 10 cm 前後汚水面を上昇させ (H.W.L), 遂次矢印の方向に地表近くを毛管浸透し、夜間未使用期間中に L.W.L ま で低下し、水位の周期変動は するものの、それ以上の水位上昇は、起さなかった。

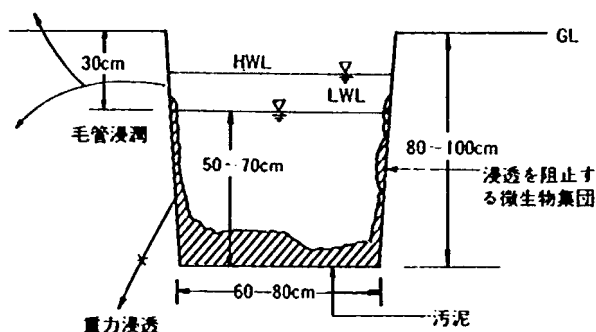
このことが、なぜ地表面下 30 cm 前後の土壌部分が、微生物によって、目づまり現象を起こさないか、水田等の、横方向の漏水が、なぜ起こるか、土壌微生物の、存在とからめて、今後解明されるべき問題の一つである。

次にこれらの定量的研究であるが、土壌物理学においてもトレンチ溝側壁（垂直面）の土壌浸透と、底部（水平面）の土壌浸透では、微粒子の、被覆の構成いかんによる目づまり現象の発生（水平面）と防止（垂直面）という自然現象の応用であるから土壌ごとに大きく異なる（ $1/10 \sim 1/100$ ）という説明以上には、定量化されていない。

一方嫌気微生物による土壌浸透過程での目づまり現象であるが、実験によると図－２の ような浸透時間と浸透速度の関係が得られた。

この実験は、直径 3 cm の透明な管に土壌を充てんし、湛水条件で過後の尿尿汚水を重力浸透させたものであるが、実験開始後 2 ヶ月位経過した時点で、急速に速度が減少する変曲点ができる。

この時点で、数日の間に浸透速度は  $1/10$  以下まで減少する。この現象を外部から観察す



図－１ 雑排水の素掘り浸透槽

ると、土壌表面数cmの位置が、黒色に変わり、悪臭が発生し、好氣的条件から嫌氣的条件に変化したものと考えられる。

そこで殺菌剤を汚水に混入して、浸透を続けると、黒色に変化していた土壌がもとの土壌の色に戻りそれと平行して速さももとの速さに回復する。

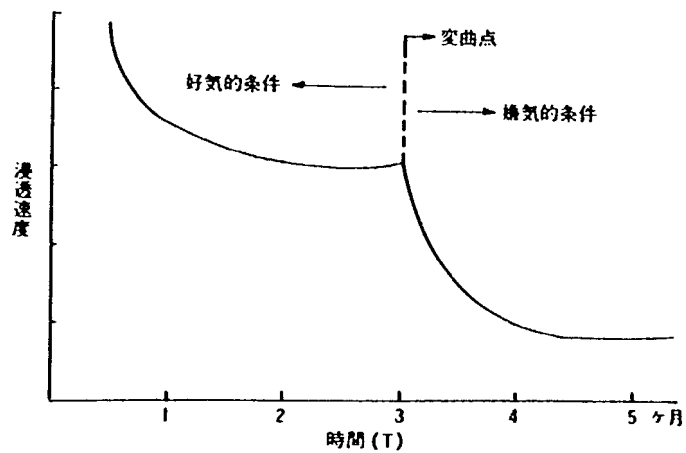


図-2 微生物環境と浸透速度

この実験から土壌中での、汚水による目づまり現象は、垂直浸透を前提とした場合嫌氣的条件での微生物が大きな原因となっていることが理解される。

現在、目づまりの原因として考えられるのは、①SSによるもの②空気及びガスによるもの③Cl<sup>-</sup>によるもの④物質の吸着によるもの⑤嫌氣性微生物によるもの⑥表面微粒子膜によるもの、などが掲げられる。③については、主に砂漠地帯で問題となるが、日本ではあまり問題とならない④についてもほとんど影響はない。基本的には、その他のものではあるが、①については、負荷量を土壌中で分解可能な量におさえる②については、ガスが抜けるような構造にすることで解決が可能である。⑤については前述したが⑥の現象については、土壌に水を入れた場合、土壌の粒子が分離する現象が見られる。この分離した微粒子は、空隙につまることにより表層にミリオーダー(1~2mm位)の膜を張り「目づまり」の原因となる。例えば、砂利道等において凹地水がたまるのは微粒子による膜が原因と思われる。この対策としては、目づまりの原因となる微粒子のない土壌を造ることであろう。例として、外国のトレンチ構造、日本でのトレンチ構造(建築基準法)を示せば、微粒子の分離を防ぐために素掘りの底に約30cm位の砂層をひく工法が掲げられる。

スプリンクラーで汚水を浸透させた場合、この方法では均等散水は難しく、また表面に水がたまり浸透効果が期待できない。雨水についても同様な実験を行ってみた。この場合浸透速度は1/100位に下がった。これらは微粒子による「目づまり」に起因すると思われる。そこで、アメリカではスプリンクラーの間断的使用方法を取り入れている。つまり、2日間散水を行い、5日間休むという方法である。これは5日の間に微粒子による影響を物理的方法(風、日などによる表面の乾湿、温度変動、及び生物的方法(土壌動物)などにより軽減させることであろう。しかし日本においては、土地、経済、悪臭、病原性微生物による規制が多いため最初から土の中に入れる方法がとられている。

次に土壌浄化による処理能力、再生水の水質についてであるが

1) BOD CODについては、

温度と通気が理想的な条件を与えればBODの分解能力は $1\text{ m}^2$ 当たり、1日 $100\text{ g}$ 以上である。これを土壌化学の単位である乾土 $100\text{ g}$ 当たりに換算(深さ $50\text{ cm}$ 比重2として)すると、 $10\text{ mg}/\text{日}$ である。これは実験室規模での目安であるから、実際トレンチ溝のごとく、 $20\text{ cm}$ の被覆土壌下で行なわれるBOD分解能は $20\sim 50\text{ g}/\text{日 m}^2$ を設計値とすれば安全側である。

ろ速が増加するに従って、BOD除去率は低下し、濃度が増加するに従って除去BOD量が増加する原則には変わらないから、一定の面積を使用して単位面積当りのBOD除去能力は、稀釈しないほど効果的である。

重力浸透条件では、高濃度なものが水みちを通して地下水に至る可能性があるので、毛管サイフォン浸潤法のごとくトレンチ溝全体に均等に配水され、水みちを通過しない確実な保証があれば、高濃度汚水の方が目詰まりをおこさない限度内で合理的である。

温度低下の影響を心配する面もあるが、秋田県の家畜汚水での経験では、 $2^\circ\text{C}$ 以下の水温でも夏期とあまり変わらない除去率が得られた。

これは吸着、ろ過などの作用が相当有力で、微生物作用は、長い期間の平均値としてあらわれるのと、土壌微生物が低温条件に順応された効果の相乗作用であろうと推定されているが、詳細は明らかでない。

COD除去率はBOD除去率に比較して、一般に悪いのが普通である。

2) SSについては、

土壌浄化の、SSの除去率が高いのは、土壌粒子が緩速、急速ろ砂より小さい点にあり、土壌小動物を例にとると、温帯落葉広葉樹林での $1\text{ m}^2$ 当りの総重量は $20\sim 50\text{ g}$ であり、その体重に近いSS量が1日に動物の消化器を通過するものと考えてよい。除去率としては、 $98\%$ 以上を望むことが出来る。

3) Nについては、

土壌浄化法で除去し得る物質の中で一番変動が多い除去率を示すものである。いい方を変えれば、一番処理が複雑で、むずかしい技術を必要とするとのいい方が適切かもしれない。

その理由は、 $\text{NH}_4$  から $\text{NO}_3$  に変化する過程で、電氣的性質が(+)から(-)に変わり、土壌の電氣的性質は(-)であるから、例えば嫌氣的な水田のごとく $\text{NH}_4$  の状態であれば、土

壤に吸着されて流亡しないが、好気的な畑土壌のごとく  $\text{NO}_3$  の状態であれば同(-)の電気的性質であるので、土壌に吸着されずに地下に浸透するので、除去率が低下するという原理がある。

それ以上にN体は  $\text{NH}_4 \rightleftharpoons \text{NO}_3$  の可逆的变化を繰り返し、 $\text{NH}_4$  の状態では、 $\text{N}_2$  のガスに脱窒させることができないが、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{NO}_3$  の状態であると、脱窒によって  $\text{N}_2$  ガスとして大気の循環系に戻すことができるという特徴がある。 $\text{NO}_2$  からの  $\text{N}_2$  ガス化と  $\text{NO}_3$  からの  $\text{N}_2$  ガス化に必要とする炭素源には大きな差があり、今後の重要な研究課題とされている。

土壌微生物による硝化能は、全国いずれの土壌についても測定済みであり、その値はほぼ  $0.5 \text{ mg} \sim 5 \text{ mg} / \text{乾土 } 100 \text{ g, 日}$ 、であり、 $1 \text{ m}^2$  の面積（深さ  $50 \text{ cm}$ 、比重2として）に換算すれば、 $5 \sim 50 \text{ g} / \text{日}$  の  $\text{NH}_4$  が  $\text{NO}_3$  に変化する。

この  $\text{NO}_3$  が  $\text{N}_2$  ガスにまで脱窒する能力を、土壌ごとに測定された値は見当たらないが、農学の知見である各種の実験値から検討すると、硝化能に近い値が推定し得る。硝化能に近い脱窒能を推定するのに畑状態で生成された硝酸が水田状態にすると数日のうちに全量脱窒する現象や、土壌内の地下水位を変動させることによって、施肥窒素量の50%以上が脱窒するという現象がある。

ちなみに現在、活性汚泥法では  $\text{C}_1\text{BOD}$  は除去されているが  $\text{NH}_4$  が残る。またアメリカ工兵隊ではCは除去せずに  $\text{NH}_4 \rightarrow \text{NO}_3$  として土壌に注入している。

#### 4) Pについては、

土壌がPを除去する能力が高いのは、一つは粘土性土壌の吸着性であり、他の一つは酸性土壌のFeとAlのイオンによる凝集作用である。

したがって酸性条件の土壌に毛管水条件で浸潤し、水みちを通らない浸透方式とすればPの除去効率が低い。

吸着、凝集作用に期待するのであるから、無理に地表である必要はないが、Pは気体にならないので、植物体への結合を考えれば、地表面の近くで吸着凝集させることが必要である。

地下圧入とか、礫層への井戸枠浸透でない限り重力浸透でも毛管浸潤でも除去率は99%以上が認められている。

5)  $Cl$ については、

汚水中の  $Cl$  濃度は高くても 100 ppm 前後であるので、土壌でのこの物質の処理能力が皆無でも、環境問題としては実際的にはほとんど影響がない。

しかし、 $Cl$  濃度が汚水の稀釈率を判断する一つの方法とされているのでここに触れると、一般に土壌で  $Cl$  を処理することは不可能である。また土壌中での  $Cl$  の蓄積量と流量については十分な知見が得られていない。

平均値で見ると、汚水を連続して土壌中に供給する条件では、土壌中に蓄積することはないが、短い時間で測定するとある時点で大きな変動値が出ることを頭において考える必要がある。

最後に図-3に簡易トレンチ溝の断面図を示す。

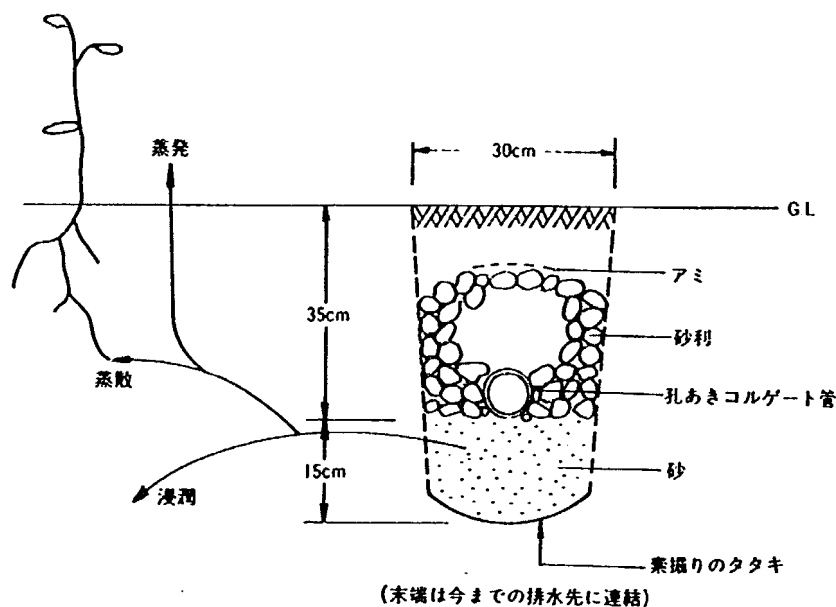


図-3 簡易トレンチ溝断面図

これには、網、穴あきコルゲート管という一般にない資材が示されているが、これは土壌が砂利中に落下したり、穴あき管が植物根によって目詰まりしないための工夫であって、目詰まりすればまた掘りかえる努力をするのであれば、無理に特別な資材を用いる必要はない。ただパイプ材料であるが塩ビ管では、管内にSSが附着する恐れがあるし、コンクリート管では、硫化水素によって腐食を起す。一般のかんばい事業に用いられている陶管については、電気的な附着を起す心配がない。

付 録 3

水田・地下埋管現地実験・研究

# 目 次

## 1 概 要

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 1-1 目 的 .....            | 5 1 |
| 1-2 地下水涵養技術にかかわる課題 ..... | 5 1 |
| 1-3 昭和53年度調査内容 .....     | 5 3 |

## 2 実験条件

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| 2-1 実験施設 .....        | 5 8 |
| 2-2 給水方法 .....        | 5 9 |
| 2-3 観測機器および観測方法 ..... | 6 0 |
| 2-4 実験方法 .....        | 6 3 |

## 3 実験結果

|                |     |
|----------------|-----|
| 3-1 実験経緯 ..... | 6 5 |
| 3-2 観測結果 ..... | 6 6 |

## 4 水田拡水法

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| 4-1 日給水量の違いによる浸透特性の比較 .....      | 6 7 |
| 4-2 地表面と空気の接触時間と浸透量の関係 .....     | 7 0 |
| 4-3 夏期と冬期の浸透特性の比較 .....          | 7 1 |
| 4-4 浸透量の時系列的変化(目づまり発生等の検討) ..... | 7 2 |
| 4-5 地下水位と浸透特性の比較 .....           | 7 3 |
| 4-6 最大涵養量 .....                  | 7 4 |

## 5 地下トレンチ浸透法

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 5-1 日給水量の違いによる浸透特性の比較 ..... | 7 5 |
| 5-2 給水時間間隔と浸透特性 .....       | 7 5 |
| 5-3 浸透特性の時系列的変化 .....       | 7 5 |
| 5-4 最大涵養量 .....             | 7 6 |

|       |                         |    |
|-------|-------------------------|----|
| 5 - 5 | 浸透水の水質変化 .....          | 77 |
| 5 - 6 | 雨水貯留効果 .....            | 77 |
| 6     | まとめ                     |    |
| 6 - 1 | 水田拡水法による地下水涵養 .....     | 80 |
| 6 - 2 | 地下トレンチ浸透法による地下水涵養 ..... | 80 |
| 7     | 今後の課題                   |    |
| 7 - 1 | 水田拡水法 .....             | 81 |
| 7 - 2 | 地下トレンチ浸透法 .....         | 82 |

# 1. 概 要

## 1-1 目 的

近年の我が国の経済発展に伴ない、地下水使用量も増大の一途をたどり、現在年間淡水使用量のうち地下水が 16% 約 138 億 m<sup>3</sup> も使用されている。しかし、地下水の自然涵養量と利用量の収支は、年間約 20 億 m<sup>3</sup> の利用量が超過しているといわれ、地盤沈下、その他障害を引起す原因となっている。

地下水障害を防止し積極的な地下水資源の開発をはかる目的で地表水を人工的に地下水に涵養することが考えられ外国では早くから実用化されているが、地質、地形・水利用形態の異なる我国では、ほとんど実施されていなかった。

地下水を人工的に涵養するには環境への影響、法制度等の社会的な問題、地形、地質条件、目ずまり等の技術的な問題など解決しなければならない点は多くある。

ここでは地下水を人工的に涵養するための技術について数ヶ年にわたり研究開発をおこない、地下ダム等による積極的な地下水の利用開発に資する事を目的とする。すでにこの調査は昭和 51 年度から開始され初年度は地下水の人工涵養に伴なう社会的な影響の調査計画の検討、国内外における研究の現状、技術的に最も問題となる注水時の目ずまりに対する室内実験がおこなわれている。

本調査はこれまでの研究成果をもとに

- ・水田の涵養能力の冬期利用

- ・地下トレンチを用いて畑地かんがいと兼ねた地中からの涵養

に着目し、現場における人工涵養の実験を 3 ヶ年にわたり観測調査するために現地の水田および畑地に実験施設を建設し各種の測定結果をもとに拡水法による人工涵養の技術を確立しようとするものである。

## 1-2 地下水涵養技術に係わる課題

本調査は地下水涵養手法のうち「水田拡水法」と「地下トレンチ浸透法」についてその涵養技術の開発および適正涵養能力の把握を目的として現地においてさまざまな実験を行うがこれらの涵養技術における課題を整理する。

### 1) 水田拡水法における課題

#### (1) 水田の適正涵養量

- ・かんがい期，非かんがい期の減水特性の把握
- ・減水特性と地下水位との関係
- ・土中水分量と浸透特性
- ・土質との関係 etc

(2) 目づまりによる浸透能力の減少（浸透量の時系列的変化）

- ・給水方法（連続給水，間断給水）による違い。
- ・地表面と空気の接触時間との関係
- ・土質との関係 etc

(3) 作物への影響

- ・溶脱
- ・地温への影響
- ・土中水分変化
- ・収量への影響
- ・減水深の変化 etc

2) 地下トレンチ浸透法における課題

(1) 地下トレンチによる適正涵養量

- ・トレンチ構造（埋設深，間隔，下皿，材料）と水分量分布の関係
- ・給水方法（給水量，給水間隔）と浸透特性の把握
- ・水分量分布の時間移動
- ・毛管浸透，重力浸透の分離
- ・土中水分量と浸透特性
- ・土質との関係 etc

(2) 目づまりによる浸透能力の減少

- ・給水水質（特にSS）との関係
- ・給水方法（給水間隔，給水量）との関係
- ・土質との関係 etc

(3) 作物への影響

- ・水分量分布と作物への影響
- ・涵養量と溶脱の関係
- ・根圏等作種との関係 etc

(4) 地下水質への影響

- ・ 給水水質と土壌浄化能力との関係
- ・ 給水許容負荷量との関係
- ・ 土壌中養分の溶脱による影響
- ・ トレンチ構造との関係 etc

(5) 地下トレンチの暗渠排水としての効果

1-3 昭和53年度調査内容

本年度は、現地（深谷市櫛引161、深谷市岡部町衛生処理センター前）の水田および畑地約0.5haに、

- ・ 水田排水法
- ・ 地下トレンチ浸透法

の実験施設を建設し（図1-1参照）、昭和53年10月20日に給水を開始して以来、水田および地下トレンチからの浸透特性を把握する為に表1-1に示すような、実験を行っている。実験項目を表1-2にとりまとめる。

表1-1 実験区別、実験目的、給水方法等

|        | 区画名称  |        | 実験目的                            | 給水方法                                              | 観測内容         |                                       |
|--------|-------|--------|---------------------------------|---------------------------------------------------|--------------|---------------------------------------|
| 水田     | 常時実験区 | 実験区    | 常に水面がある場合の浸透特性の把握               | 常に水面があるように0.4, 8, 12, 16, 時から15分ずつの給水（約120mm/日）   | 給水量<br>水田水位  | 雨量<br>蒸発量                             |
|        |       | 100mm区 | 実験区と30mm区の間条件における浸透特性の把握        | 2, 10, 18 時から15分ずつの給水（約80mm/日）                    | 〃            |                                       |
|        |       | 30mm区  | 間断給水における浸透特性の把握                 | 22時から15分の給水（約30mm/日）                              | 〃            |                                       |
|        | 一     | 自然区    | 自然対象区                           | 給水しない                                             | 水田水位         | 地下水位<br>(2ヶ所)<br>土中水分量<br>(4ヶ所)<br>水質 |
| 地下トレンチ | 実験区中  | 実験区    | 最大涵養量の把握<br>浸透水水質の把握            | 集中実験                                              | 給水量<br>受水槽水位 | 水質                                    |
|        | 常時実験区 | 50mm区  | 地下トレンチの最大浸透量に近い給水を行った場合の浸透特性の把握 | 給水強度をさした9, 11, 13, 15, 17, 19時より15分ずつの給水（約48mm/日） | 〃            |                                       |
|        |       | 25mm区  | 一般のかんがい水量程度の給水を行った場合の浸透特性の把握    | 20時より15分の給水（約22mm/日）                              | 〃            |                                       |
|        | 実験区中  | 雨水貯留区  | 自然対象区<br>雨水貯留効果の把握              | 集中実験                                              | 〃            |                                       |

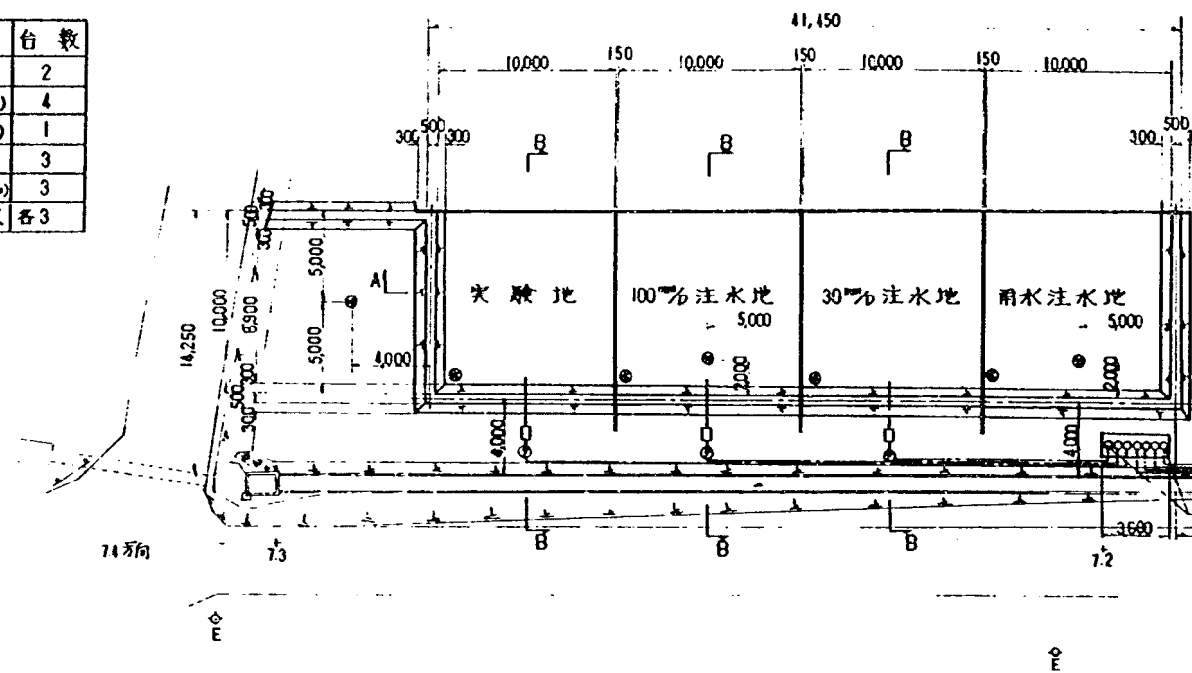
（注） 給水方法の（ ）内は実質給水量を示す。

水田抽水法観測機器表

| 凡例 | 機器名           | 台数 |
|----|---------------|----|
| ①  | 水分観測孔         | 2  |
| ②  | 減水位計 (RR-20)  | 4  |
| ③  | 地下水位計 (RR-5)  | 1  |
| ④  | タイマー          | 3  |
| ⑤  | 水中ポンプ (0.13%) | 3  |
| □  | 水量計及び汚水マス     | 各3 |

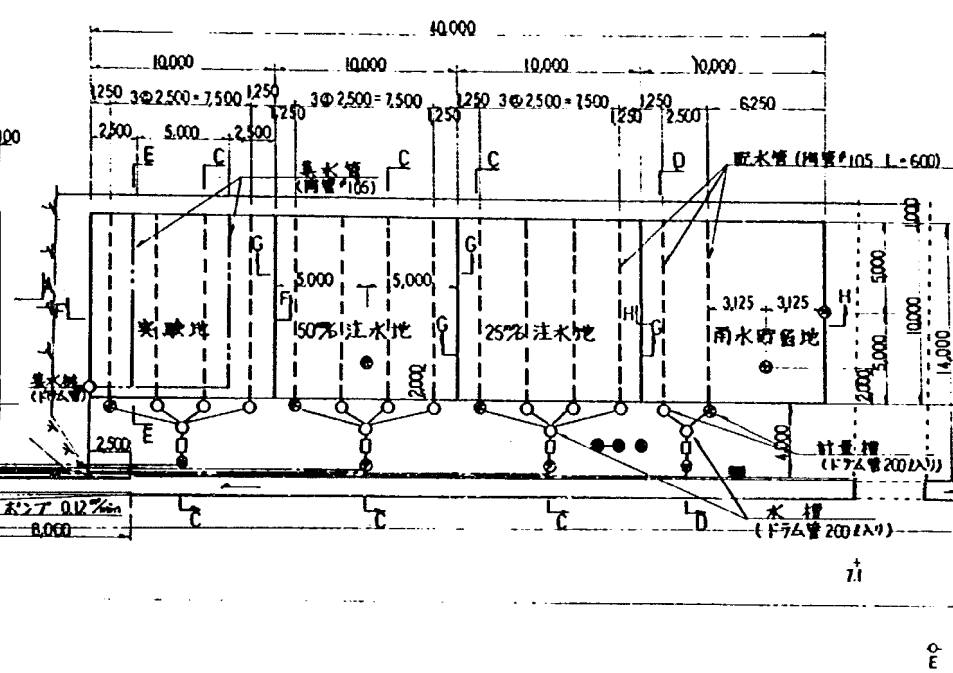
水田抽水法平面図

S=1/200



地下水トレンチ浸透法平面図

S=1/200

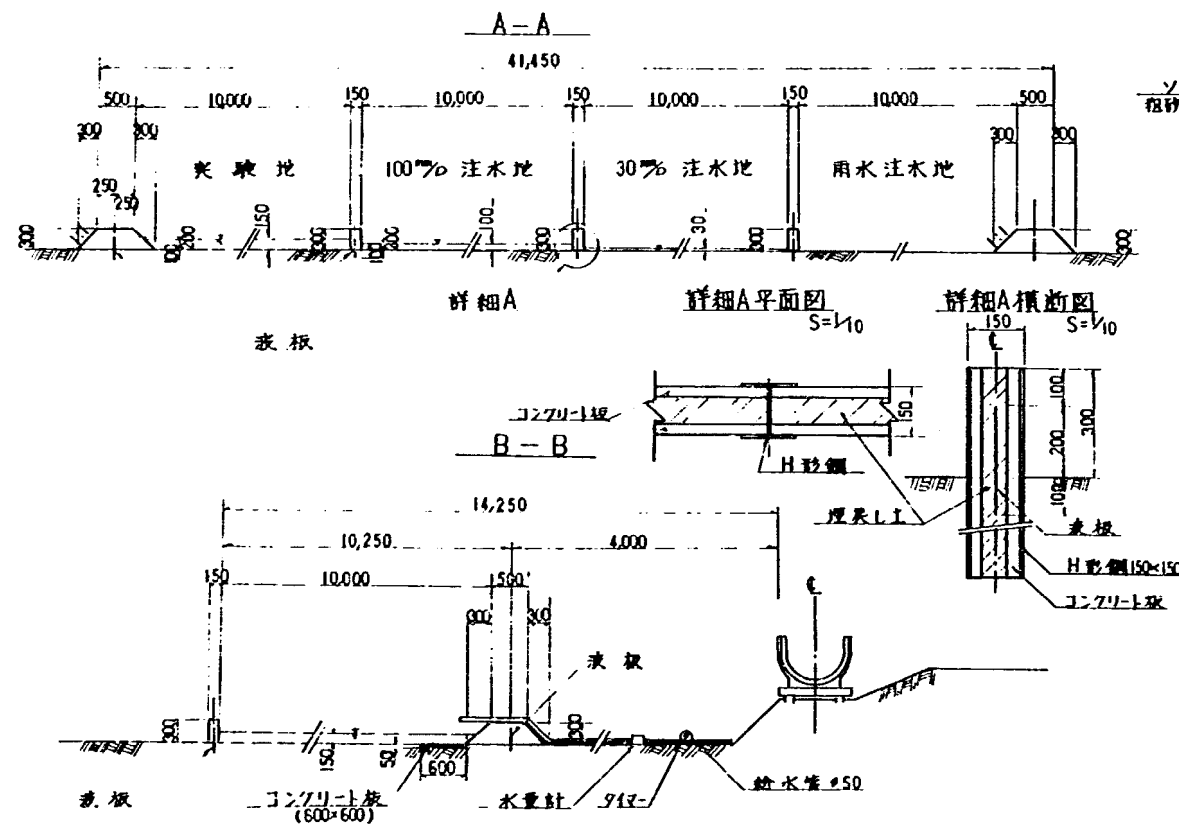


地下水トレンチ浸透法観測機器表

| 凡例 | 機器名           | 台数 |
|----|---------------|----|
| ①  | 自記雨量計 (PT-5)  | 1  |
| ②  | 水分観測孔         | 2  |
| ③  | 電接計器 (LD-100) | 1  |
| ④  | 水位計 (RR-1)    | 4  |
| ⑤  | 減水位計 (RR-20)  | 1  |
| ⑥  | 地下水位計 (RR-5)  | 1  |
| ⑦  | タイマー          | 2  |
| ⑧  | 水中ポンプ (0.13%) | 4  |
| □  | 水量計及び汚水マス     | 各4 |
| ■  | 計量槽           | 14 |
| ■  | 集水料           | 1  |
| ■  | 動力制御盤電力計      | 1  |
| ■  | 切替スイッチ        | 2  |

水田抽水法縦断面図及び横断面図

S=1/50



地下水トレンチ浸透法縦断面図及び横断面図

S=1/50

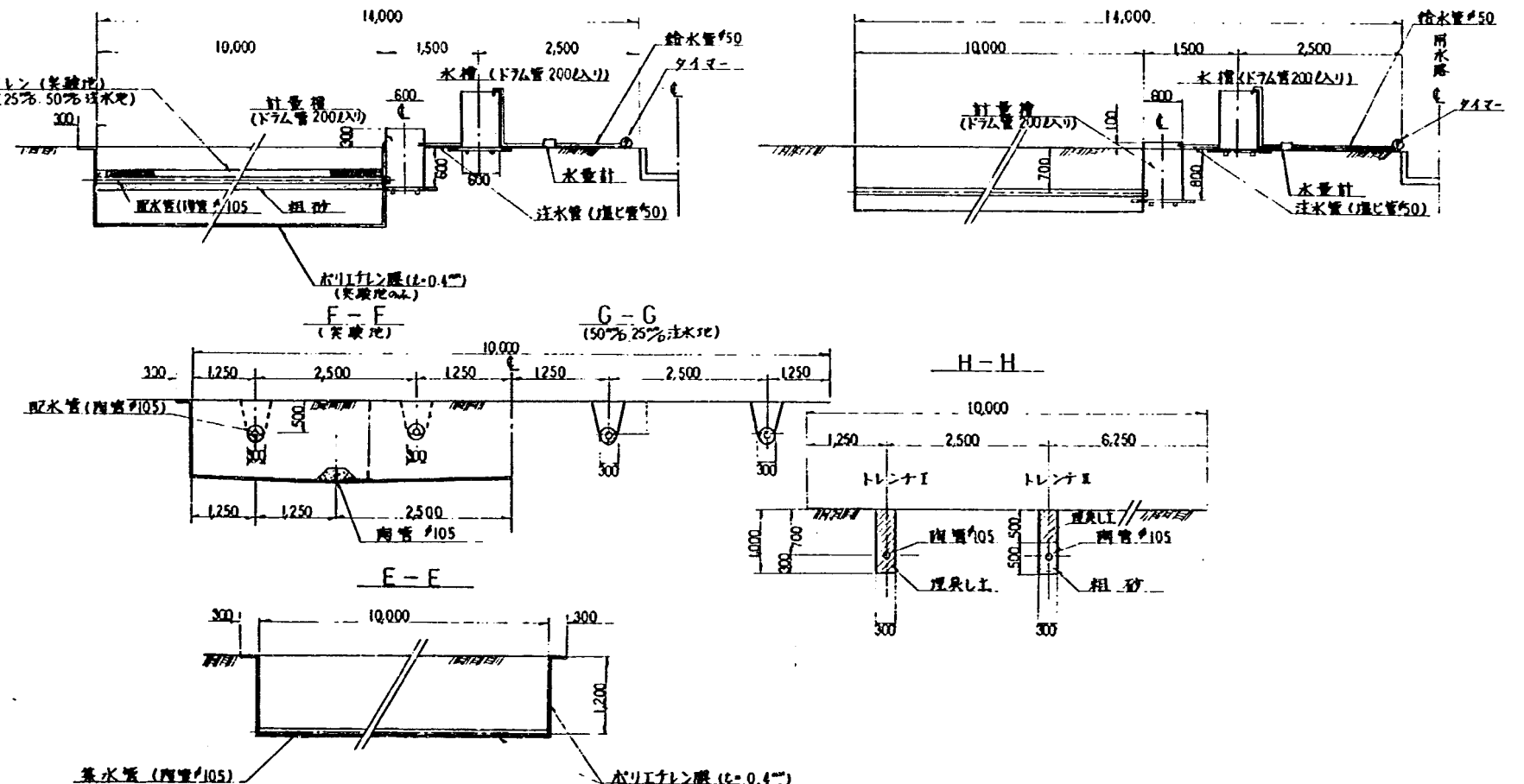


図1-1 水田抽水法及び地下トレンチ浸透法実験施設図



表 1 - 2 実験項目

| 項 目                  | 水 田 拡 水 法                           | 地 下 ト レ ン チ 浸 透 法                  |
|----------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| 日 浸 透 量              | 水田水位，給水量，雨量，蒸発量から水収支を検討し，日浸透量を算出する。 |                                    |
| 日給水量の違いによる浸透特性       | 実験区，100 mm区，30 mm区の浸透特性を比較する。       | 50 mm区，25 mm区，実験区，雨水貯留区の浸透特性を比較する。 |
| 給水間隔と浸透特性            | 地表面の乾燥時間の違いによる浸透特性の違いを比較する。         | 給水間隔の異なる給水時の浸透特性を比較する。             |
| 夏期と冬期の浸透特性           | 夏期（かんがい期）と冬期（非かんがい期）の浸透量を比較する。      |                                    |
| 浸透量の時系列的変化（目づまり発生状況） | 日浸透量，浸透時間の変化を調べる。                   |                                    |
| 最大涵養能力               | 各種条件による実験結果の比較から日最大浸透量より把握する。       | 集中実験による連続給水等の結果から最大浸透量を把握する。       |
| 地 下 水 位 と 浸 透 特 性    | 地下水位と日浸透量，減水勾配等を比較する。               |                                    |
| 土 中 水 分 量 と 浸 透 特 性  | 涵養に伴う土中水分量の変化と浸透特性を検討する。            |                                    |
| 浸透水水質変化              | —                                   | 実験区において供給水，浸透水の水質変化を調べる。           |
| 簡易施設による雨水貯留効果        | —                                   | 雨水貯留施設として，地下トレンチの貯留効果，浸透効果を検討する。   |

## 2. 実験条件

### 2-1 実験施設

#### 1) 給水施設

施設図および取水設備図を図1-1(1)(2)に示すが、実験用水は、処理センター横の排水路よりポンプ取水し、約80mはなれた給水タンク（実験場内）に一時貯留し、自動給水により各実験区へ給水される。

水源（処理センター横排水路）からの取水は、給水タンク（実験場内）の水位によって制御され、給水タンクの水位が少しでもさがると取水を開始するようになっている。

また各区画への給水は、給水タンク内のポンプをタイマーでコントロールして自動的に行えるようになっているが、地下トレンチへの給水は、一担配水槽（各区画一つずつ）に給水し、さらに4本のトレンチ入口につけられた受水槽へ給水するシステムになっている。図2-1に給水系統図を示す。

#### 2) 水田施設

水田内に10m×10m区画を4ヶ所並設し、区画毎に日給水量を変化させている。水田排水法は、地表面に水をはり浸透させるものであるが、水田に張った水がクロを横断して浸透しないようにクロの中に不透水板を設置している。

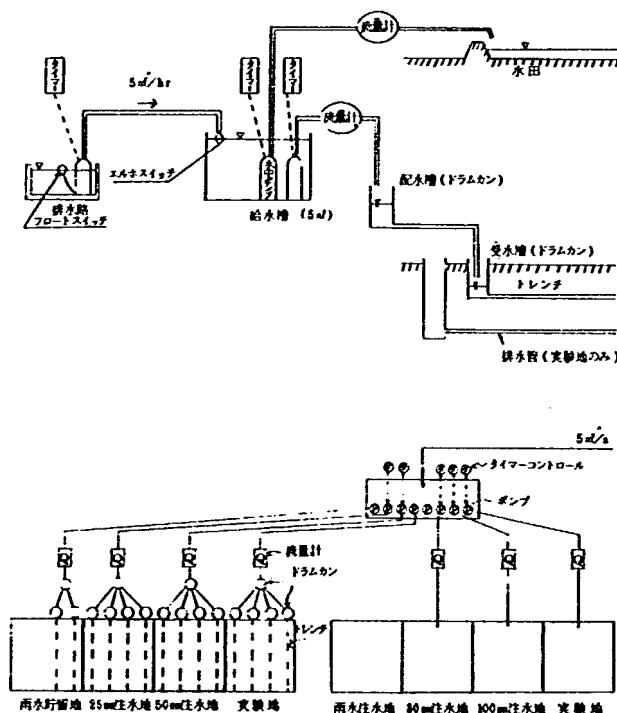


図2-1 地下水涵養給水系統図

### 3) 地下トレンチ施設

畑地内に  $10\text{ m} \times 10\text{ m}$  の区画を 3ヶ所， $5\text{ m} \times 10\text{ m}$  の区画を 1ヶ所並設し，各区画に地表面から  $0.5\text{ m}$  ( $5\text{ m} \times 10\text{ m}$  の区画のみ  $0.7\text{ m}$ ) の位置に  $2.5\text{ m}$  間隔でトレンチを埋設した。すなわち 3 区画には 4 本ずつ 1 区画には 2 本のトレンチが埋設されている。前 3 区画のうち，1 区画は，実験区として地表面から  $1.2\text{ m}$  のところにビニール膜を設置し，浸透水を集水できるようになっている。また 2 本のトレンチを埋設している  $5\text{ m} \times 10\text{ m}$  の区画は，雨水貯留実験を行うため，そのうち 1 本の下に埋戻土の代わりに粗砂が入れている。施設断面図を図 2-2 に示す。

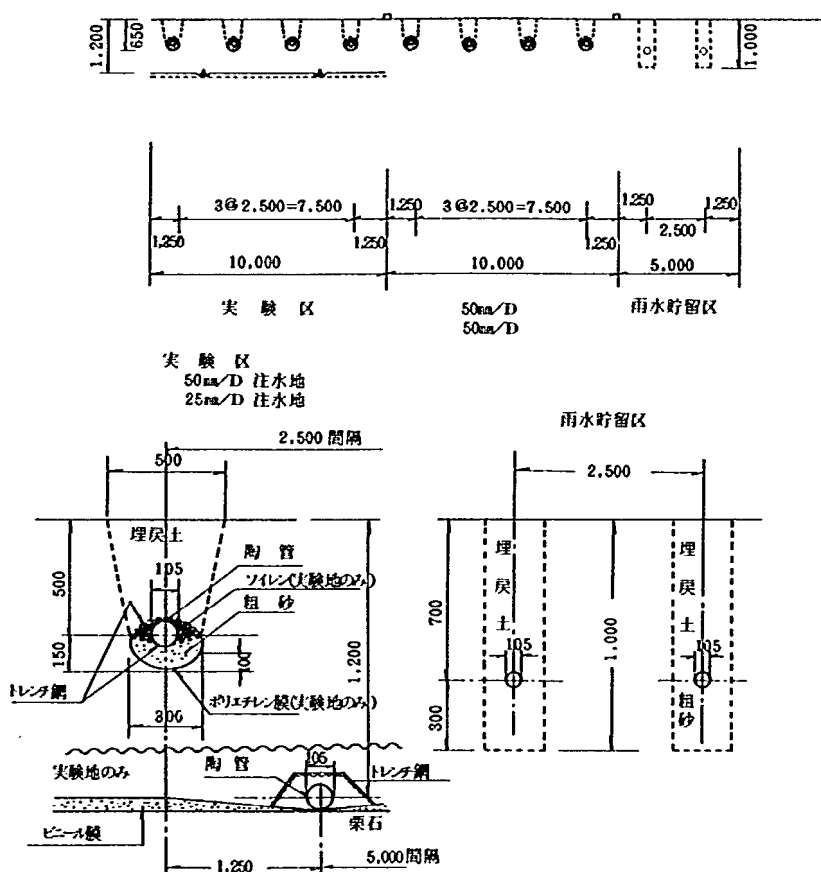


図 2-2 地下トレンチ施設断面図

### 2-2 給水方法

水田の自然区を除く 3 区画と，地下トレンチの実験区，雨水貯留区を除く 2 区画は，常時実験区（毎日給水）であり，タイマーセットによる自動給水を行っているが，タイマーコントロールが 15 分単位であるため，表 2-1 に示すようなコントロールを行っている。また正確な給水量は積算流計で計測する。

なお，集中実験区（地下トレンチ実験区，雨水貯留区）への給水は切替スイッチにて行っている。

表 2 - 1 常時実験各区への給水方法

| 区 画 名 称        |                             | 目標給水量<br>( $\text{m}^3/\text{日}$ ) | ポンプ能力<br>( $\text{m}^3/\text{分}$ ) | タイマーセット<br>時間 (分)          | タイマーセット回数<br>(1回15分) |                                | 給水量 <sup>*2</sup><br>( $\text{m}^3/\text{日}$ ) |
|----------------|-----------------------------|------------------------------------|------------------------------------|----------------------------|----------------------|--------------------------------|------------------------------------------------|
| 水<br>田         | ① 実験地<br>(150mm)            | 15                                 | 約 0.167                            | $15/0.2=75$                | 回<br>5               | 時 <sup>*1</sup><br>0,4,8,12,16 | 12.5                                           |
|                | ② (100mm)<br>注水地            | 10                                 | 0.193                              | $10/0.2=50$<br>$\div 45$   | 3                    | 2,10,18                        | 8.7                                            |
|                | ③ (130mm)<br>注水地            | 3                                  | 0.167                              | $3/0.2=15$                 | 1                    | 22                             | 2.5                                            |
| 地下<br>トレン<br>チ | ④ 50mm <sup>*3</sup><br>注水地 | 5                                  | 0.130                              | $5/0.15=33$<br>$\div 30$   | 2                    | 6,14                           | 3.9                                            |
|                | ⑤ 25mm<br>注水地               | 2.5                                | 0.120                              | $2.5/0.15=17$<br>$\div 15$ | 1                    | 20                             | 1.8                                            |
| 計              |                             | 35.5                               | —                                  | 180                        | 12                   | —                              | 29.4                                           |

\* 1 各々の時間から 15 分ずつ給水を行う。

\* 2 流量計でチェックを行う。

\* 3 12/13 よりバルブをつけ約 0.5  $\text{m}^3/\text{分}$  にて 1 日 6 回 (90 分) の給水に切り替えた。

① 実験区 : 常に水面があるように給水する。

② 100 mm 区 : ①③の間。

③ 30 mm 区 : 減水深程度の給水を行う。

## 2 - 3 観測機器および方法

本実験においては、図 2 - 4 に示すような位置に観測機器を配置して以下のような諸量を観測している。

- 降雨量
- 蒸発量
- 水田水位
- 受水槽水位
- 地下水位
- 給水量
- 土中水分量

以下に各項目の観測計機器および測定方法の説明を行う。

## 1) 降水量

水収支を検討するために自己雨量計RT-5（受水口径20cm）に電接計数器LD-100を接続し、7日巻自記紙にて観測している。

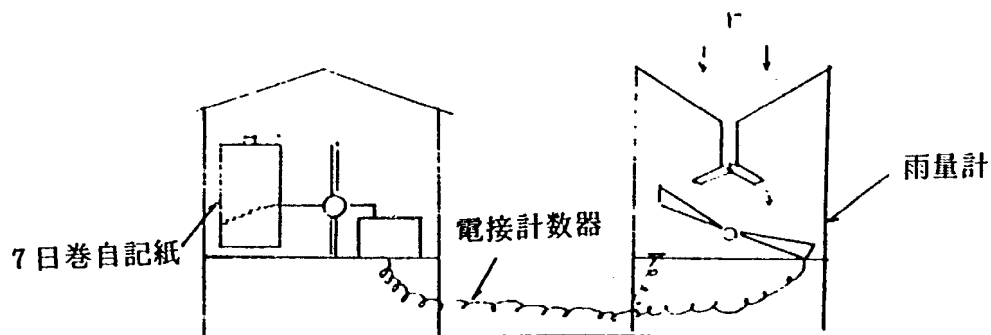


図2-3(1) 雨量計

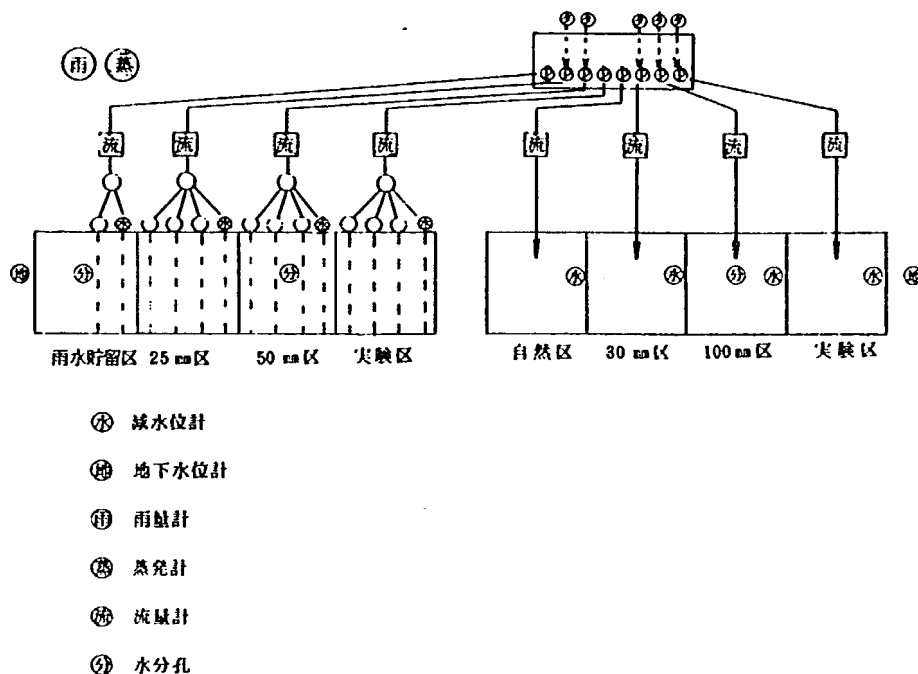


図2-4 観測機器設置位置

## 2) 蒸発量

水収支を検討するために蒸発皿（口径70cm）と減水位計（RR-20）を組み合わせて7日巻自記紙に記録する。

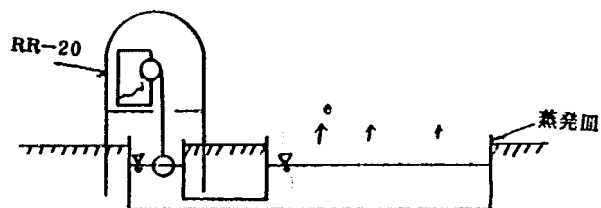


図2-3(2) 蒸発計

### 3) 水田水位

水田の各区画に減水位計 (RR-20) を設置し、水田水位を、7日巻自記紙に記録する。

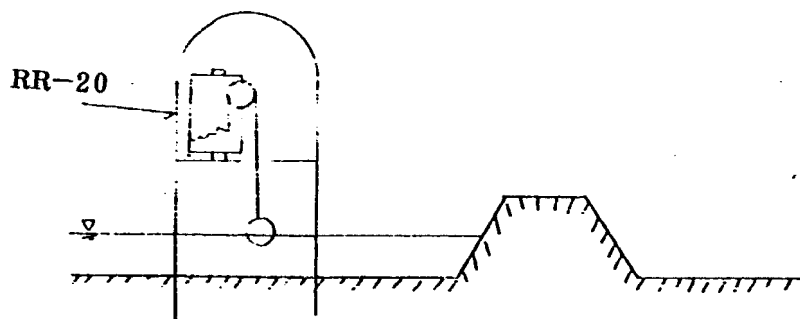


図 2-3(3) 水田減水位計

### 4) 受水槽水位

地下トレンチの水位を7日巻自記紙に記録するために各区画に1ヶ所ずつトレンチの入口につけられた受水槽上にRR-5型 (リチャール 1~2 m計) を設置して計測する。

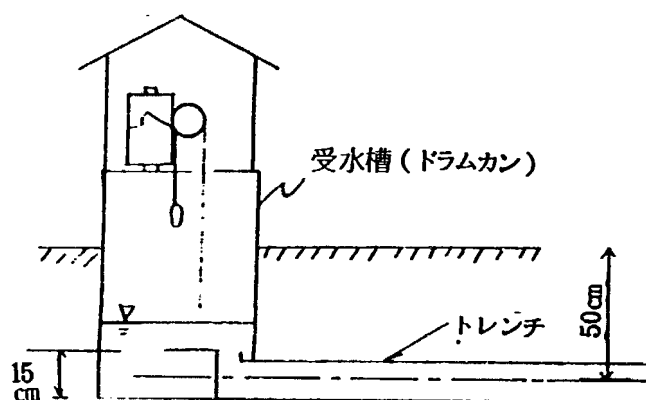


図 2-3(4) 地下トレンチ減水位計

### 5) 地下水位

\*RR-5型 (リチャール, 5~10 m計) を用いて地下水位の変動を7日巻自記紙に記録する。

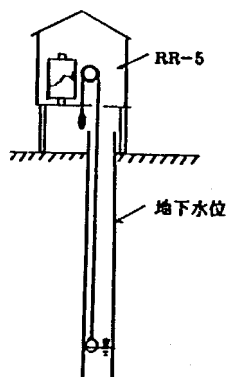


図 2-3(5) 地下水位計

\* 実験の基礎条件の把握と給水による地下水涵養状況を検討する。

## 6) 給水量

各実験区への給水量は、積算流量計で読みとる。

## 7) 土中水分量

給水に伴う土中水分量の変化を

中性子水分計（水田 2 ケ所，地下トレンチ 2 ケ所）

テンションメータ（地下トレンチ雨水貯留 3 ケ所）

にて追跡する。

## 2-4 実験方法

各実験区画の施設および給水方法をとりまとめてきたが，これらの区画においてそれぞれどのような実験を行うかを以下にとりまとめる。

### 1) 水田実験区

常時水面を保つように（空気と地表面をふれさせないように）給水し，水位と給水量を計測して浸透量および浸透特性を把握する。

### 2) 水田 100 mm 区

1 日 1 回（約 30 mm）の給水を行う 30 mm 区（ほとんどの時間地表面が空気とふれている）と，常時水面を保っている実験区の間の状態をつくり，水位と給水量を計測して地表面と空気の接触が浸透特性にどのような影響を与えるかを検討する。

### 3) 水田 30 mm 区

1 日 1 回約 30 mm の給水を行い，水位と給水量を計測する。ほとんどの時間地表面が空気と触れている場合の浸透特性を把握する。

### 4) 自然区

給水は行わず，給水を行った区画の稲作への影響を把握するための対象区とする。

### 5) 地下トレンチ実験区

地下トレンチ 50 mm 区とのちがいは，トレンチの下に下皿が入っていることと，地表面より 1.2 m のところに集水膜があり，浸透水を集水できることである。当区画における実験は，集中実験の形をとり

- ・ 連続給水における最大浸透量
- ・ 浸透水の水質変化

を検討することを目的に受水槽の水位を一定に保つように給水し，浸透量が一定値にな

るまでつづける。給水量，浸透量，給水水質，浸透水水質を測定する。

給水および浸透水水質を測定する理由は，

- ・ 水質と浸透特性（主に目づまり）の関係
- ・ 地下水保全を対象とした給水許容負荷量

を把握するためである。

#### 6) 地下トレンチ 50 mm区

地下トレンチの最大浸透量に近い給水を行った場合の浸透特性を把握するために，50 mmを1日6回に分けて給水し，給水量と受水槽水位を計測している。また給水停止後の受水槽水位の浸透特性から，時系列的な浸透特性の変化を把握する。

#### 7) 地下トレンチ 25 mm区

一般のかんがい水量程度の給水を行った場合の浸透特性を把握する為に給水量と受水槽水位を計測している。50 mm区との比較で

- ・ 日給水量のちがいによる浸透特性のちがい
- ・ 給水時間間隔のちがいによる浸透特性のちがい

を検討する。

#### 8) 雨水貯留区

本区画には2本のトレンチが2.5 m間隔で埋設されており，トレンチ下部に一方は埋戻土，一方には粗砂が入れてある。ドラムカン水位を一定に保って給水し，給水量を計測することでトレンチ1 m当りの最大浸透量，貯留量を算出し，雨水貯留の効果を検討する。

また，本区画には，テンションメータが表面から50，90，120 cmの深さに設置されており，給水に伴う土中水分の変化を追跡している。

### 3 実験結果

#### 3-1 実験経緯

昭和53年10月20日に給水（水田は11月16日）を開始して以来、各区画毎の給水および浸透特性を追跡してきた。実験の主な経緯を表3-1にとりまとめる。

表3-1 実験経緯

| 年・月・日    | 取水・給水                                                 | 水田                                                                            | 地下トレンチ                                                | その他                                 |
|----------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| 53.10.20 | 排水路からの取水はフロートスイッチにより水があれば連続取水可、水槽にエルボスイッチをつけ満杯になればOFF | 実験デモンストレーション                                                                  |                                                       |                                     |
|          |                                                       |                                                                               | 給水開始<br>50mm区(6,7)<br>25mm区(8)<br>*6時から15分という意味       |                                     |
| 11.11    |                                                       |                                                                               | 実験区にて集中実験を試みるが浸透水(50分後開始)が激しく、排水用ポンプ設置                |                                     |
| 11.16    |                                                       | 給水開始(タイマーセット)<br>(実験区(0,4,8,12,16)<br>100mm区(2,10,18)<br>30mm区(22))           | 実験区にて集中実験<br>タイマーセット変更<br>(50mm区(6,14)<br>25mm区(20))  | ・水分測定<br>・採水(給水、浸透水)<br>・テンションメータ設置 |
| 11.30    |                                                       |                                                                               | タイマーセット変更<br>(時間間隔を変える)<br>(50mm区(6,20)<br>25mm区(14)) |                                     |
| 12.5     |                                                       |                                                                               | 雨水貯留区給水開始<br>(週1回1時間)                                 |                                     |
| 12.6     |                                                       | 氷はる                                                                           | 集中実験(最終8mm/15分)                                       | ・水分測定                               |
| 12.12    |                                                       |                                                                               | 雨水貯留区にテンションメータ設置<br>(深さ50,90,120cm)                   | ・採水(給水、浸透水)分析                       |
| 12.13    |                                                       |                                                                               | 50mm区タイマーセット変更6回/day<br>(9,11,13,15,17,19時)           |                                     |
| 12.14    |                                                       | 実験区藻の発生                                                                       |                                                       |                                     |
| 12.19    |                                                       |                                                                               | 50mm区減水目盛読み開始(週1回)<br>テンションメータ読み開始<br>(雨水貯留区の実験と並行して) | 連続採水分析開始<br>(給水水質週毎)                |
| 54.1.9   |                                                       | 30mm区の自記紙記録(水位波形状)が困難であったため水位計にスリットを入れ支柱にシリコン油をぬった。また現象を見るため給水を22時から14時に変更した。 | 雨水貯留区集中実験<br>50mm区減水目盛読みを毎週行っている。                     | 採水分析を毎週行っている。                       |
| 1.13     | 各施設のレベル測定                                             |                                                                               |                                                       |                                     |
| 1.16     |                                                       |                                                                               |                                                       | 地下水位の低下に伴いヒモの調節                     |
| 1.26     |                                                       |                                                                               |                                                       | 地下水位が地表面から-5.0m以上になったので5m計から10m計に変更 |
| 1.31     |                                                       |                                                                               | 各区画の各トレンチへの給水強度分布を測定                                  |                                     |

### 3-2 観測結果

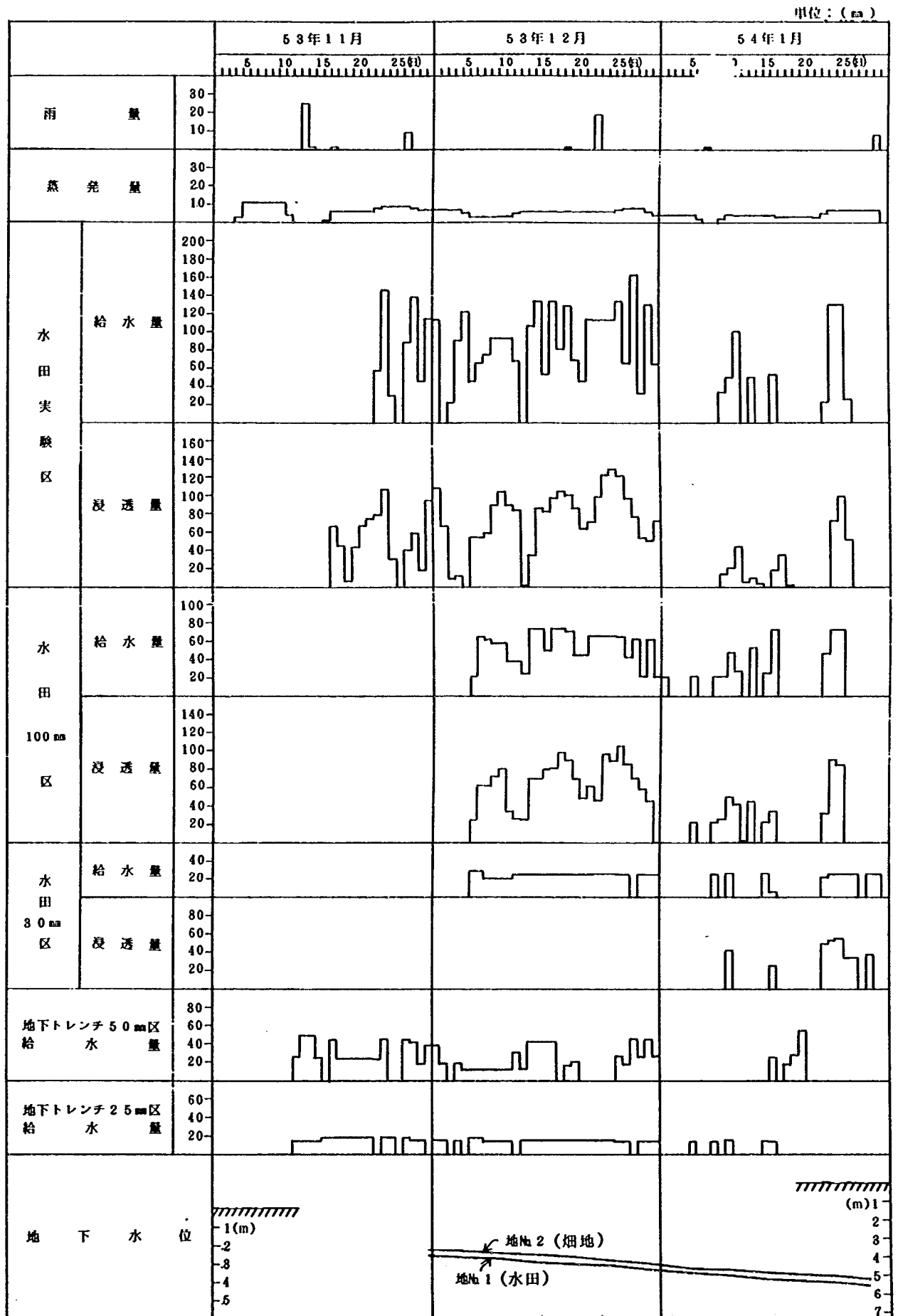
昭和53年度の報告書作成にあたって観測データは、昭和54年1月31日までのものをとりまとめることにする。観測データは各測項目毎に以下のように整理した。

表3-2 観測データの整理

| 項 目              |          | 整 理 方 法                                    |
|------------------|----------|--------------------------------------------|
| 雨                | 量        | 自記紙より雨量を読みとる                               |
| 蒸 発              | 量        | 自記紙記録に日雨量を考慮して算出する                         |
| 地 下 水 位          |          | 自記紙記録を標高に直し図化した                            |
| 給 水              | 量        | 積算流量計の読みを用いて日給水量に換算した                      |
| 水田水位および浸透量       |          | 自記紙より水田水位および浸透量を読みとり雨量および蒸発量を考慮して日浸透量を算出した |
| 水田夏期減水位          |          | かんがい期の減水曲線は地表面付近で変曲点を生じたので、減水勾配を変曲点前後で算出した |
| 地下トレンチ50mm区浸透特性  |          | 地下トレンチ50mm区受水槽の給水停止後の減水位曲線の勾配を求める          |
| 地下トレンチ実験区連続浸透可能量 |          | 地下トレンチ実験区の連続給水実験の結果をとりまとめる                 |
| 雨水貯留区浸透可能量       |          | 地下トレンチ雨水貯留区の連続給水実験の結果をとりまとめる               |
| 土中水分             | 中性子水分計   |                                            |
|                  | テンションメータ | 給水に伴う目盛の変化を図化する                            |
| 水                | 質        | 給水および浸透水水質をとりまとめる                          |

図3-1に昭和53年11月から昭和54年1月までの観測結果をグラフで示す。

図 3 - 1 観測結果グラフ



## 4 水田拡水法

### 4-1 日給水量の違いによる浸透特性の比較

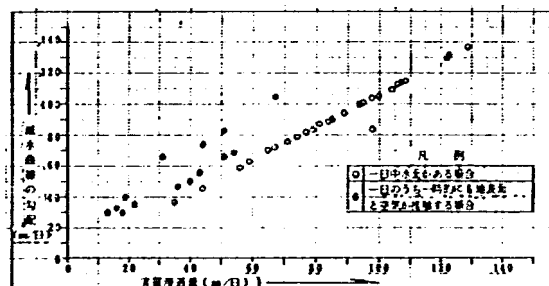
各区画への日給水量は、実験区、100mm区、30mm区で異なるが、水田地表面への供給量についてみると、水面がある時間の違いとして表現される。すなわち実験区と100mm区を比較すると、計画通り給水ができれば実験区はもちろんのこと100mm区もほとんどの時間水面が存在し、水頭の差はあるが地表面への水供給状態は同じである。また同一区画においても計画通りの給水は困難であり日給水量は表3-5に示すように変化している。このように計画給水量の異なる各区画の比較がそのまま日給水量の違いを反映するものではないので日給水量を実質浸透量<sup>\*1</sup>で代表させ、対応する減水曲線の勾配（想定日浸透量<sup>\*2</sup>mm/日）との関係を図4-1に示す。実質浸透量の多い日は減水曲線の勾配が大きい。このことは、水面が存在する時間が長いほど減水曲線の勾配が大きいことを示す。

また日給水量の違いは水田地表面への供給状態において水頭（水深）の差として現われる。図4-2(1)の水田実験区水位自記紙は水深の異なる部分の減水勾配の違いを示すものがある。水深の増大につれ減水勾配も増大している。また図4-2(2)は、夏期の水田水位自記紙であるが水深の減少につれ減水曲線の勾配がゆるやかになっていることがわかる。図4-2に水深と減水勾配の関係を示す。水深の増大につれ、減水勾配が増大している。

\* 1 実質浸透量：水位低下量（mm/日）+日雨量-日蒸発量

\* 2 想定日浸透量：減水曲線の勾配（mm/hr）×24 hr

#### (1) 実験区



#### (2) 100 mm区

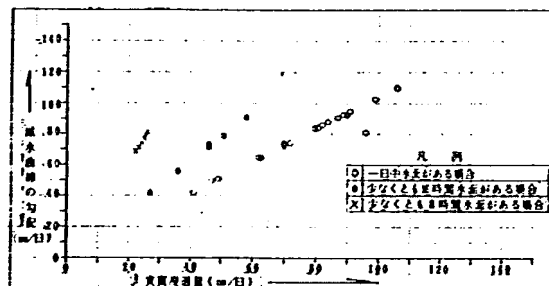
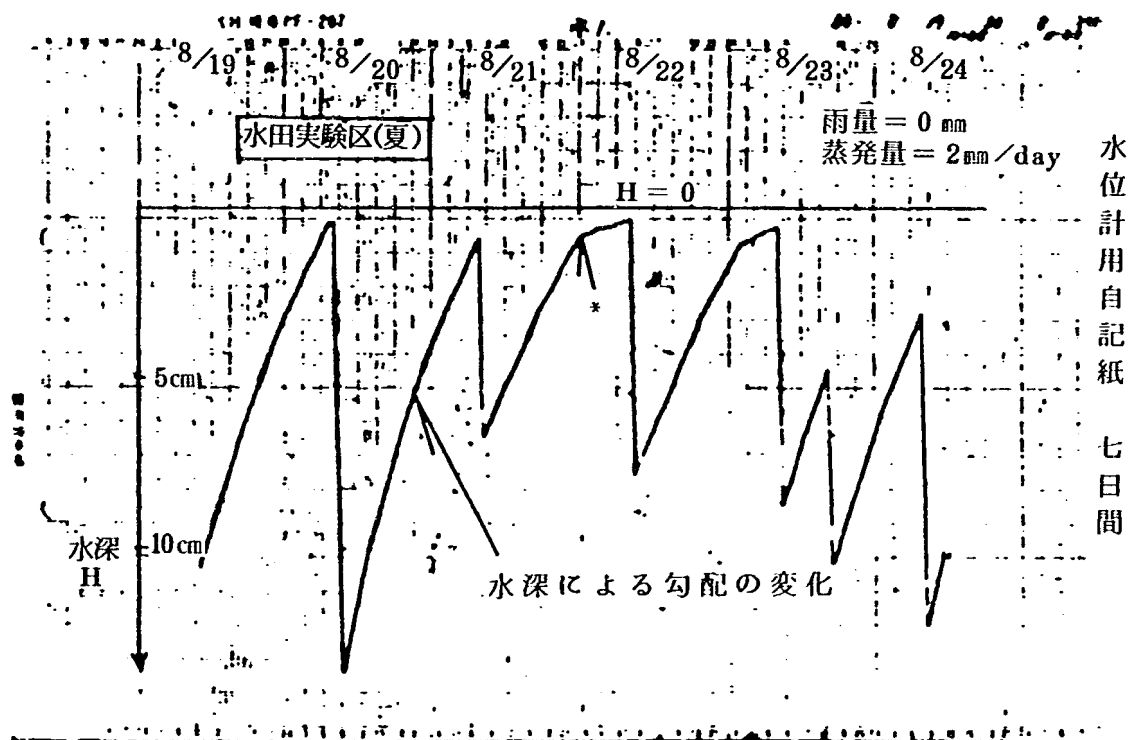
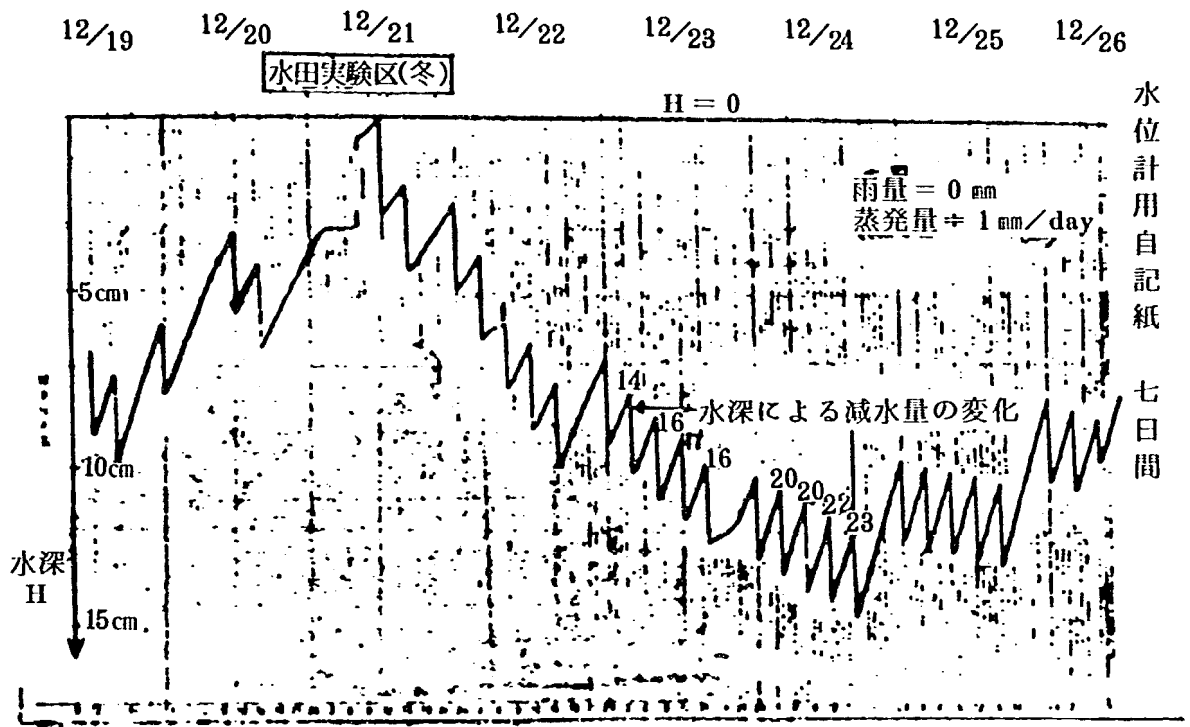


図4-1 実質浸透量～減水曲線の勾配（日浸透量）



\* この変曲点は、水深によるものより、周辺水田水位  
(≠地下水位)によるものと考えられる。

図 4 - 2 水深～減水量

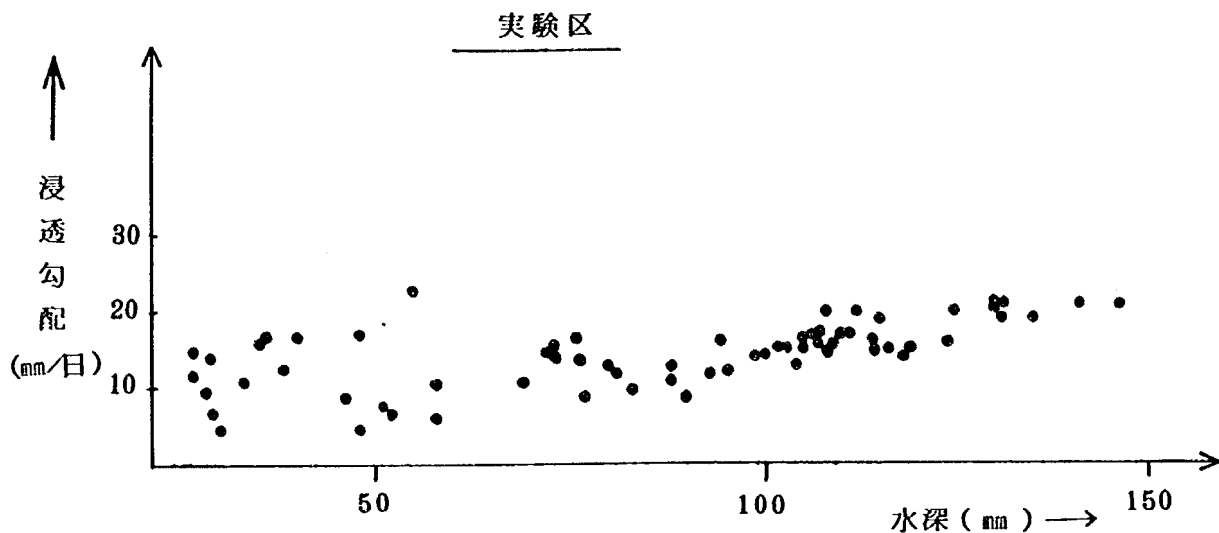


図 4 - 3 水深と浸透勾配の関係

#### 4 - 2 地表面と空気の接触時間と浸透量の関係

水面を保った状態で浸透させる場合（連続浸透）と，間断的に，地表面を空気に触れさせながら浸透させる場合（間断浸透）で浸透量がどのようになるかを検討する。地表面が空気と接触し，乾燥するとひびわれを生じ，一見浸透量を増大させるように思われるが，図 4 - 4 の自記紙が示すように，地表面が空気と触れている状態から，給水を行った場合，減水勾配（時間当りの浸透量）は，常時水面が維持されるにつれて急勾配となる傾向が現われた。その変化量は，3 倍程度であり，減水勾配が一定になるまでに，水面を保持して，1 日程度かかっている。地表面が空気に接触した後の給水開始後時間と減水勾配の関係を示したものが図 4 - 5 である。この地表面が空気と触れた後，減水深が一時的に低下する原因としては，表層内の空気が有効浸透断面を減少させていること，水田地表面の堆積物（12 月中旬実験区において藻が発生）の影響等が考えられる。

また，これらの現象は実験区のみに生じ，100mm 区には生じていないが，その原因として地表面土壌の乾燥状態の違いが考えられる。実験区は，水深がなくなると，地表面をおおう生物（藻），その他の堆積物が浸透能力を減少させるような膜となることが考えられる。一方，100m 区は，実験区に比べ藻の発生が少ない上に，実験区の浸透水分の影響を受けているかもしれない。

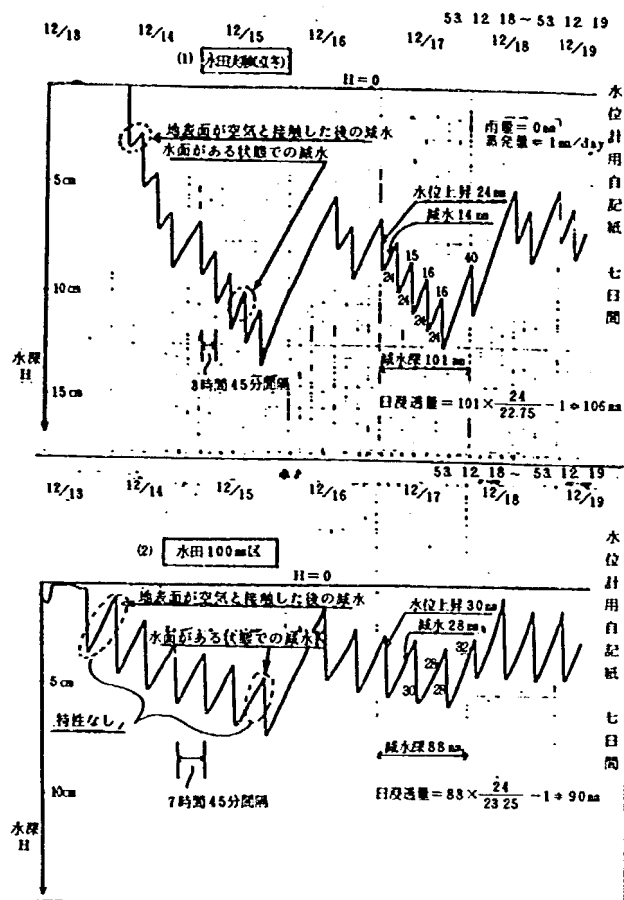


図4-4 地表面状態による浸透特性

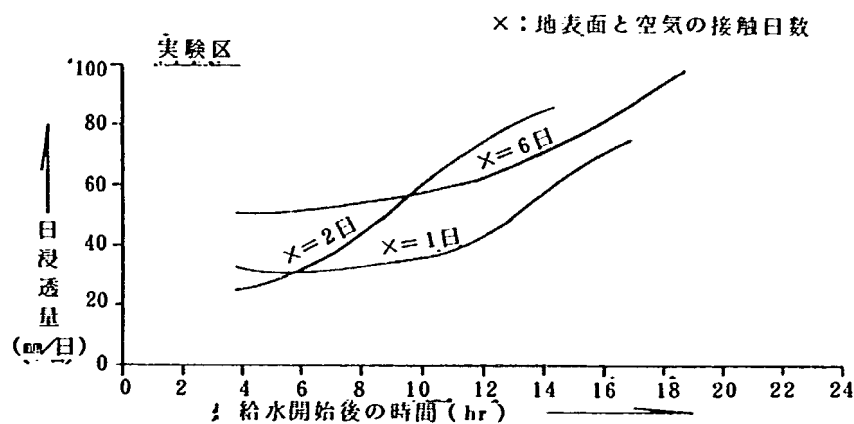


図4-5 給水開始後の時間～日浸透量\*

(注): 日浸透量は給水開始後の時間に従っているが、地表面と空気の接触日数との関係は明らかではない。

\* 日浸透量: 減水勾配  $\left( \frac{h(\text{mm})}{T(\text{hr})} \right) \times 24 \text{ hr}$

#### 4-3 夏期と冬期の浸透特性の比較

水田掘水法は、かんがい期水田の地下水涵養能力を非かんがい期においても利用しよ

うとするものである。従って、かんがい期と非かんがい期の水田における浸透特性を比較することは、冬期水田を利用する水田排水法の地下涵養能力を把握する上で重要なことである。

夏期は常に水面を保った状態で水供給がなされており、たとえ一時的に、水深がなくなっても地表面は乾燥することはない。また地下水位が高く、当実験場の地下水位計は周辺水田水位とはほぼ同一の水位を示している。夏期の減水曲線は、水深が小さくなると周辺水田の水頭（地下水位）の影響を受けているとおもわれ、減水勾配が小さくなる（変曲点が生じる）。

一方冬期は、地下水位が低下し、夏期のような減水曲線上の変曲点は生じないが、水深がなくなると、地表面が乾燥し、実験区においては、その後の浸透量に影響を与えている。

これらの現象を日浸透量（mm/日）を用いて比較したものが表4-1である。

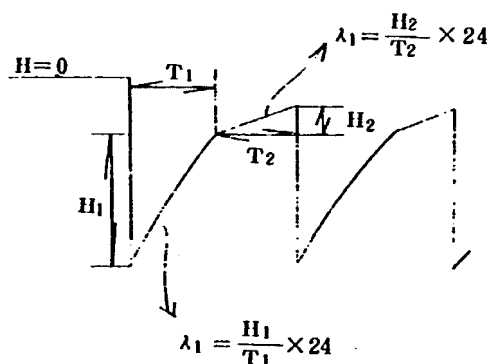
表4-1 夏期と冬期の日浸透量比較

（mm/日）

|        | 夏期平均日浸透量<br>(8.15~9.5) |             | 冬期平均日浸透量<br>(11.17~1.26) |                        |             |
|--------|------------------------|-------------|--------------------------|------------------------|-------------|
|        | $\lambda_1$            | $\lambda_2$ | ① 1日中水面がある場合             | ① 一時的、地表面が<br>空気に触れる場合 | ①、②<br>の平均値 |
| 実験区    | 109<br>(17)            | 13<br>(4)   | 89<br>(34)               | 51<br>(16)             | 77<br>(50)  |
| 100mm区 | 122<br>(15)            | 27<br>(12)  | 78<br>(22)               | 76<br>(14)             | 77<br>(36)  |
| 30mm区  | 104<br>(13)            | 31<br>(9)   | —                        | 72<br>(8)              | 72<br>(8)   |
| 自然区    | 152<br>(11)            | 45<br>(13)  | —                        | —                      | —           |
| 平均     | 122                    | 29          | 84                       | 66                     | 75          |

（注）（ ）はデータ数

$\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  は自記紙記録を用いて以下のように算出した。



#### 4-4 浸透量の時系列変化（目づまり発生等の検討）

地下水涵養において目づまりによる涵養能力の減少は大きな問題となっている。図4-6(1)に日浸透量を時系列的に示すがこれらの変動は地表面と空気の接触および水深の変化

が主な原因と考えられ目ずまりによると思われる浸透能力の減少は現段階では把握できない。そこで水面が一日中ある場合の日減水深のみとり出し、(図4-6(2))、時系列的に並べてみたが傾向は見い出せない。

また実験区および100mm区には、緑色の藻がそれぞれ給水開始後2ヶ月および3ヶ月で発生しているがこれらの影響も定量的には把握できない。ただ地表面が空気に接触した後の浸透特性に、これら地表面上の堆積物および生物が影響を与えているものとおもわれる。

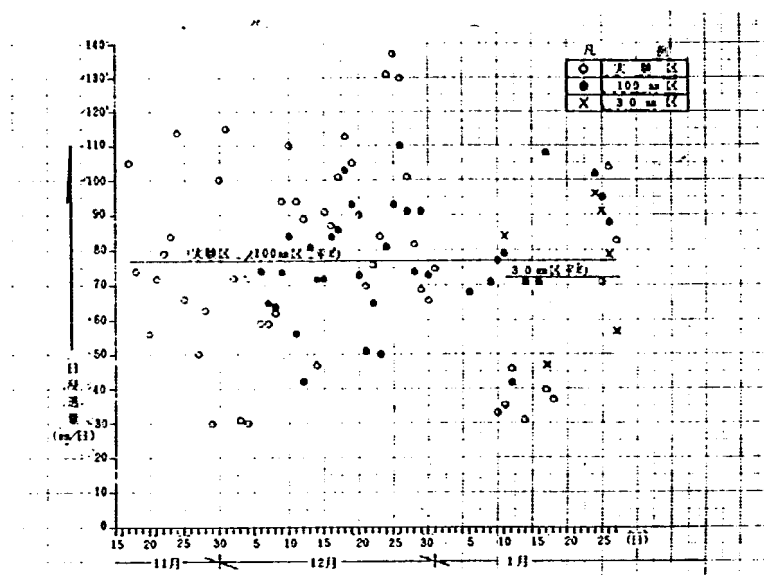


図4-6(1) 日浸透量の時系列変化(その1)

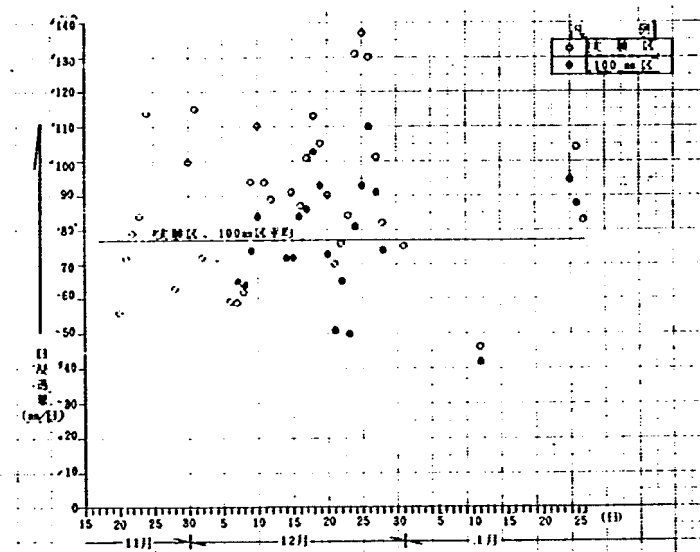


図4-6(2) 日浸透量の時系列変化(その2)

#### 4-5 地下水位と浸透特性の比較

当実験場の地下水位の特性は、かんがい期はほぼ水田水位に相当し、非かんがい期に入<sup>\*1</sup>って低下を続け、12月には地表面から約-5.0 mに達している。ここでは、水田給水開

始（11月16日）以後の日浸透量と地下水位の関係をプロットしたが、明確な関係は把握できなかった。

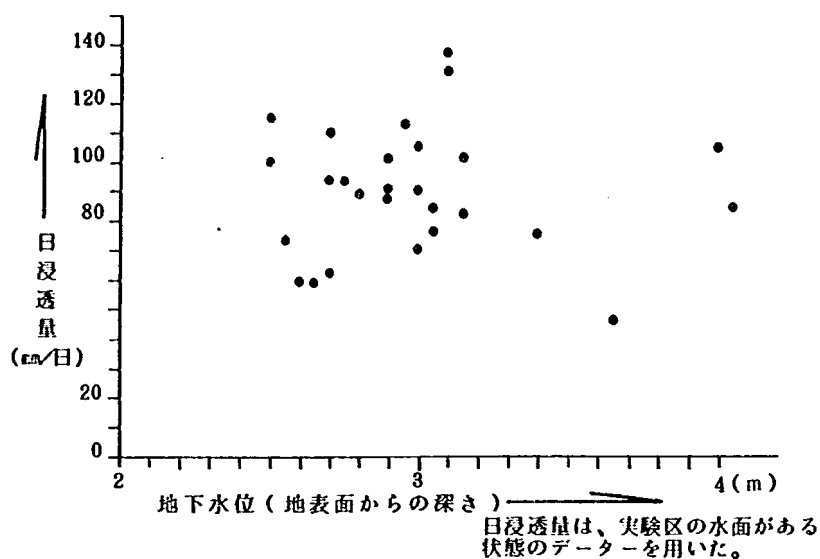


図4-7 地下水位と日浸透量の関係

\* 1 観測開始（11月）以後約30mm/日ずつ低下している。

#### 4-6 最大涵養量

夏期（8月15日～9月5日）水田の日浸透量は、減水曲線上の周辺水田水位の影響を受けない部分で推定すると平均122mm/日、冬期水田の日浸透量は、常時水面がある場合で平均84mm/日で夏期の70%に相当する。一日中水面がある場合と、一日のうち一時的に地表面が空気に触れた場合では前者の方が大きな減水を示しており、かつ時系列的に変化が充分把握されていないので、現段階では当実験場の最大涵養量は約80～90mm/日とおもわれる。

## 5 地下トレンチ浸透法

### 5-1 日給水量の違いによる浸透特性の比較

ここでは常時実験区画の50mm区と25mm区の浸透特性の比較になる。50mm区は現在、一日6回に分けて(1回15分約 $0.8\text{m}^3/100\text{m}^2 \div 8\text{mm}$ )ずつ2時間間隔で給水しているが、実験開始当初は1日2回に分けて給水していた。25mm区は1日1回(15分)給水をつづけている。すなわち当初50mm区は、12時間おきに約 $2\text{m}^3$ ずつ給水し、25mm区は、24時間おきに約 $2\text{m}^3$ 給水していたが、50mm区において15分間に $2\text{m}^3$ の給水 $0.2\text{m}^3$ (トレンチ1m・1時間当り)が困難になったため1日6回に分けて給水している。

### 5-2 給水時間間隔と浸透特性

給水時間間隔が、浸透時間(受水槽内残留量が0になるまでの時間)に影響を与えていることは、50mm区の受水槽水位記録により明らかに現われる(図5-1参照)。現在9、11、13、15、17、19時に給水しているが9時および11時の浸透はすみやかであり15時以降は、受水槽内に給水が残留し、浸透に時間を要する。

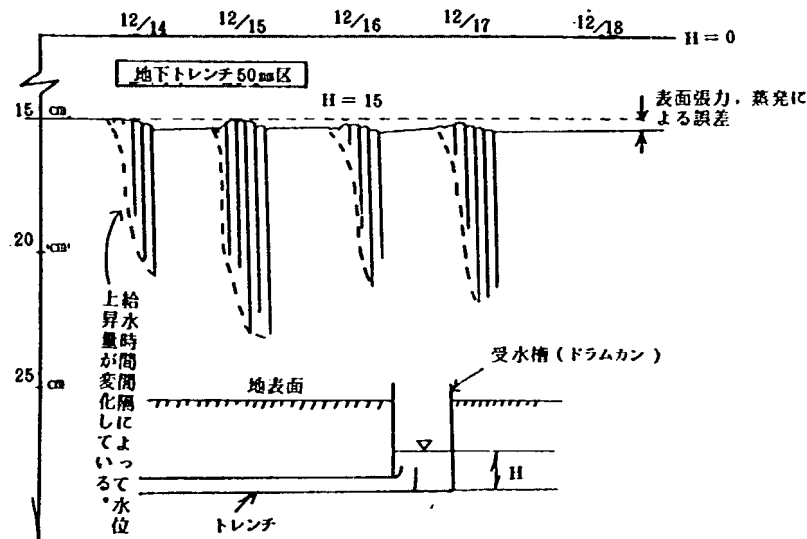


図5-1 地下トレンチ50mm区受水槽水位

### 5-3 浸透特性の時系列的変化

50mm区の13時の給水における受水槽内水位の減水特性により、浸透のすみやかさの時系列的変化を検討する。

図5-2は、50mm区の一審残留量の多い受水槽の水位の減水勾配変化を示す。減水勾

配は給水の継続につれ、むしろ増大して（浸透がすみやかになって）おり、少なくとも目づまり現象は生じない。

この減水勾配が増大している原因については、今後継続実験を行い検討していきたい。

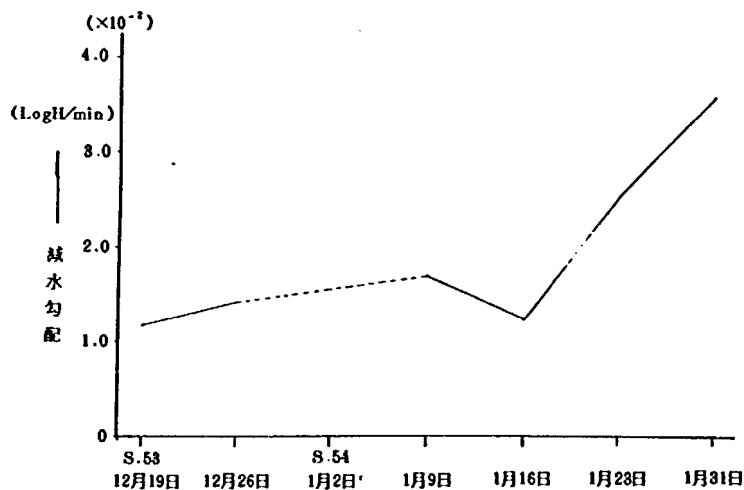


図 5-2 受水槽内水位減水勾配の時系列的変化

#### 5-4 最大涵養量

日涵養量は、作物の影響は不明であるが、現実験地では 50 mm / 日以上可能である。また、実験区における浸透強度実験では、定常状態（給水量と浸透量が等しくなる状態）で 32 mm / hr ( 0.08 m<sup>3</sup> / m hr ) であった。（ただし、1.2 mまで掘り返し、埋設した集水膜の影響が考えられる。）この値は、雨水貯留区においてもほぼ同様の値（0.07~0.14 m<sup>3</sup> / m hr）を示しており、この状態が続けば、重力浸透と毛管浸透を合わせた状態での最大浸透量は、700~900mm / 日と考えられる。今後は浸透量のうちの毛管浸透分と重力浸透分の分離を行う必要がある。

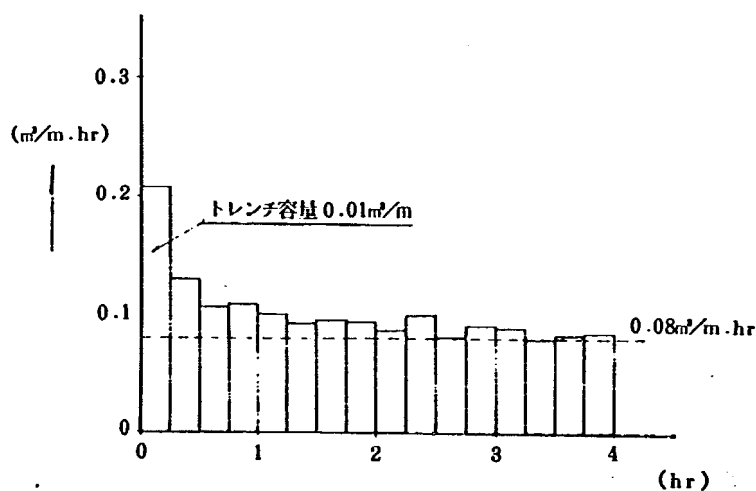


図 5-3 地下トレンチ実験区浸透強度（12月6日）

## 5-5 浸透水の水質変化

今回の実験に用いた給水の平均水質を表5-1に示す。

表5-1 実験水平平均水質

| pH  | BOD<br>mg/l | COD<br>mg/l | NH <sub>4</sub> -N<br>mg/l | NO <sub>2</sub> -N<br>mg/l | NO <sub>3</sub> -N<br>mg/l | T-N<br>mg/l | T-P<br>mg/l | SS<br>mg/l | Cl <sup>-</sup><br>mg/l |
|-----|-------------|-------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------|-------------|------------|-------------------------|
| 7.8 | 4.3         | 6.7         | 0.46                       | 0.03                       | 2.0                        | 15          | 0.27        | 16         | 1.3                     |

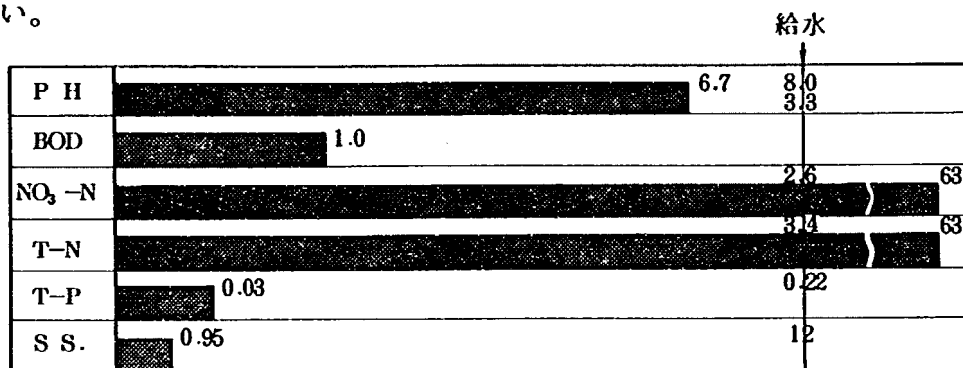
また地下トレンチ実験区における給水水質と浸透水水質を比較したものが図5-4である。土壌の浄化、吸着作用によるSS, BOD, T-Pの減少、肥料の溶脱によるNO<sub>3</sub>-Nの増大が顕著である。

実験の主目的は

- ・水質（主にSS）と目ずまりの関係
- ・地下水保全を考えた給水許容負荷量

を把握することである。これらのデータから将来河川等から給水する場合の負荷量、また地下水保全上の給水許容負荷量を算定する資料としたい。

図5-4は、重力浸透と毛管浸透を合わせた状態で給水した場合の給水水質と浸透水水質の変化を示したものであるが、今後は毛管浸透のみによる土壌浄化作用の検討も行ってゆきたい。



注) 昭和53年11月16日と12月12日採水の平均値

■ 浸透水水質

図5-4 給水水質と浸透水水質の比較

## 5-6 雨水貯留効果

雨水貯留区の構造は、図5-5に示すとおりである。一方には埋戻土が、一方には粗砂が入っている。当初2本同時に給水していたが、以後埋戻土の方に1時間給水した後、粗砂の方に1時間給水し、連続給水における浸透可能量を求めた（表5-2）。

これより，埋戻土については，給水開始以後，1時間で約 $0.23\text{ m}^3/\text{m}$ の給水が可能であることがわかった。今，トレンチ埋設部の空隙率を $0.3$ と仮定すると，この部分の貯留量は $0.09\text{ m}^3/\text{m}$ となり，周辺土壌への浸透量は， $0.14\text{ m}^3/\text{m}$ となる。図5-6は粗砂トレンチを用いて2時間連続給水した場合の浸透強度曲線を示すが，埋設部の貯留量を同じく $0.09\text{ m}^3/\text{m}$ とすると，40分ではほぼ一定になっているから

$$\begin{aligned}\text{周辺土壌への浸透量 (}\text{m}^3/\text{m}\cdot\text{hr)} &= (40\text{ 分間の給水量} - 0.09) \times \frac{60}{40} \\ &= (0.13 - 0.09) \times \frac{60}{40} \\ &= 0.07\text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{hr}\end{aligned}$$

となり，この値がほぼその後の浸透量（ $0.07\text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{hr}$ ）に相当している。また，この値（ $0.07\text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{hr}$ ）は実験区の連続浸透可能量（ $0.08\text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{hr}$ ）とほぼ同じ値を示している。

\* 1 受水槽水位を一定に保つように給水した。

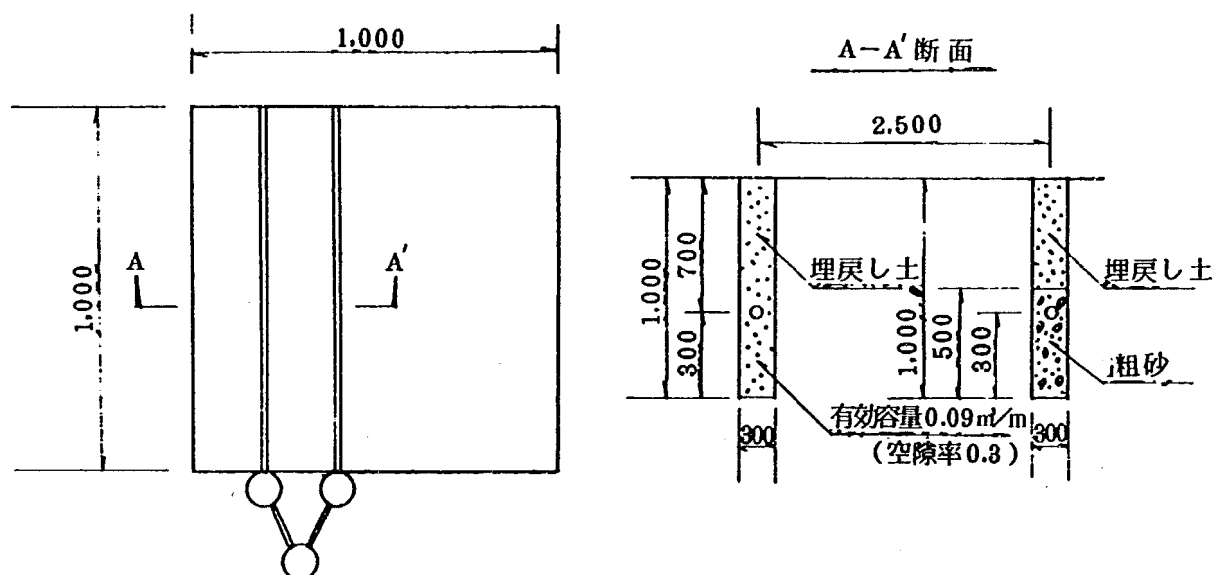


図5-5 雨水貯留区構造図

表 5 - 2 雨水貯留区 1 時間当りの浸透量

|        |             | 浸 透 量 ( $\text{m}^3/\text{hr}$ ) |      | トレンチ 1m 当りの浸透量 ( $\text{m}^3/\text{hr}\cdot\text{m}$ ) |      |
|--------|-------------|----------------------------------|------|--------------------------------------------------------|------|
|        |             | 埋 戻 し 土                          | 粗 砂  | 埋 戻 し 土                                                | 粗 砂  |
| 給水方式 1 | 1 2 月 1 2 日 | 4.45                             |      | 0.22                                                   |      |
|        | 1 2 月 1 9 日 | 4.21                             |      | 0.21                                                   |      |
|        | 平 均         | 4.33                             |      | 0.215                                                  |      |
| 給水方式 2 | 1 2 月 2 6 日 | 2.64                             | 2.59 | 0.26                                                   | 0.26 |
|        | 1 月 1 0 日   | 1.68                             | 1.83 | 0.17                                                   | 0.18 |
|        | 1 月 1 6 日   | 3.12                             | 1.35 | 0.31                                                   | 0.14 |
|        | 1 月 2 3 日   | 2.05                             | 1.54 | 0.21                                                   | 0.15 |
|        | 1 月 3 1 日   | 2.24                             | 1.03 | 0.22                                                   | 0.10 |
|        | 平 均         | 2.35                             | 1.67 | 0.23                                                   | 0.17 |

給水方式 1 : 2 本同時に 1 時間の給水

2 : 埋戻し土に 1 時間給水の後、粗砂に 1 時間給水

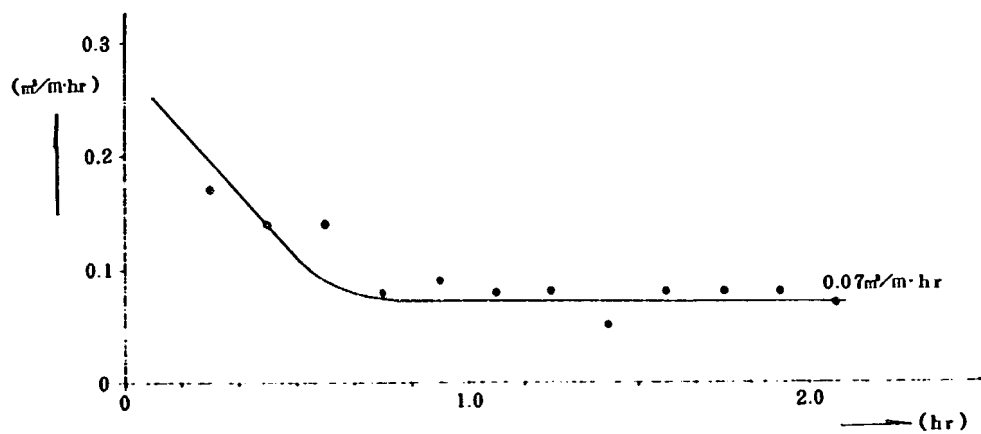


図 5 - 6 浸透強度曲線 (粗砂トレンチ)

浸透量について、埋戻土と粗砂の間で違いが生じたが、これらのデータから試算すると、100  $\text{m}^2$  の敷地に 20 m と 30 m のトレンチを埋設した場合、100 mm の雨量を貯留するのに、トレンチ 20 m では約 3 時間、トレンチ 30 m では約 2 時間かかることになる。

## 6 ま と め

### 6-1 水田排水法による地下水涵養

- 1) 日平均浸透量は、かんがい期 120mm/日、非かんがい期 75mm/日であった。
- 2) 最大浸透量は常に水面のある実験区で生じ、約 90mm/日であった。
- 3) 水田における浸透特性は、かんがい期、非かんがい期において異なった傾向が見られ、地下水位の影響を受けているように思われる。
- 4) 減水勾配(時間当りの浸透量)は、常に水面が維持されている方が大きく、水面が維持されてから約 1.0 日で一定勾配に近づく。
- 5) 減水勾配は、地表面と空気が接触することによって、一時的に小さくなる。接触時間との関係は明らかになっていない。
- 6) 減水勾配は水田水深が大きい程大きくなる。
- 7) 実験経過 3 ヶ月の時点で、目づまりの現象は認められない。

### 6-2 地下トレンチ浸透法による地下水涵養

- 1) 日涵養量は、作物への影響は不明であるが、50mm/日以上可能である。
- 2) 集中実験(2~4時間の実験)における最大涵養能力の実験結果では、実験区、雨水貯留区ともに重力浸透と毛管浸透をあわせた状態での供給可能量は、0.07~0.08ml/m·hr であった。これから推定すると、かなりの日浸透量に達するものと予想される。
- 3) 給水量と給水時間間隔の関係をみると、土中水分量が浸透特性に及ぼす影響が非常に大きいと思われる。
- 4) 給水水質浸透水水質の比較からは、SS(12→1mg/ℓ)、BOD(3→1mg/ℓ) T-P(0.21→0.03mg/ℓ)の減少が顕著であった。
- 5) 実験経過 3 ヶ月の時点で、目づまりの現象は認められない。

## 7 今後の課題

今年度らの実験を通して、作物等への影響、目づまりの発生を勘案しつつ地下トレンチによる地下水の涵養、非かんがい期水田による地下水涵養の有効性を検討していく上で、今後の課題を以下にとりまとめる。

### 7-1 水田排水法

#### 1) 実験・観測

水田排水法にかかわる数々の課題のうち本年度調査において明らかになったものは、6-1に示すようなものであり今後の課題として以下のようなものが残される。

表7-1 実験・観測上の課題

| 課 題             | 実 験 ・ 観 測 方 法                              |
|-----------------|--------------------------------------------|
| 地表面と空気の接触時間と浸透量 | データを蓄積すると共に、地表面堆積物の分析を行い、減水曲線の特性との関係を検討する。 |
| 給水量、水田水位と浸透量    | 給水量と水田水位の変化と、浸透特性の変化を長期データの蓄積により検討する。      |
| 長期間給水の影響        | 長期間の給水により、浸透量が変化するかどうか、時系列データを蓄積して検討する。    |
| 浸透量と地下水位との関係    | データの蓄積を行い、検討する。                            |
| 畦浸透量の把握         | 実験区画間の水位の関連を検討する。                          |
| 浸透量と水質との関係      | 給水水質のうちSSを継続的に分析し、日浸透量とSSとの関係を把握する。        |
| 浸透量と土質・土壌との関係   | 土質分析（透水係数、粒度、空隙率）を行い、浸透特性との関係を明らかにする。      |

#### 2) 解 析

本年度は、53年11月～54年1月の3ヶ月間のデータを用いて減水特性と各要因との関係を検討してきたが、今後は、長期間のデータ蓄積に伴って、多数の要因がからみあって生じる浸透現象に対しては重回帰分析等を適用させて整理してゆくことが必要であるとおもわれる。

## 7-2 地下トレンチ浸透法

### 1) 実験観測

表 7-2 実験観測上の課題

|             | 課 題           | 実 験 ・ 観 測                                                          |
|-------------|---------------|--------------------------------------------------------------------|
|             | 適 正 給 水 方 法   | 給水量・給水時間間隔と、受水槽内残留水量・水位減水勾配の関係を把握し、最大浸透量、作物への影響を勘案しつつ、適正給水方法を検討する。 |
| 浸透係数と把握要因との | 土中水分量と浸透時間の関係 | 中性子水分計、テンションメーターのデータを充実させ、土中水分量と浸透時間の関係をおさえる。                      |
|             | 地下水位との関係      | 年間を通してのデータを蓄積する。                                                   |
|             | 給水水質と浸透量の関係   | 給水水質のうち、SSを継続的に分析し、浸透時間、浸透量とSSの関係を把握する。                            |
|             | 土質・土壌との関係     | 土質分析（透水係数、粒度、空隙率）を行う。                                              |
|             | トレンチ構造の検討     | 下皿の有無・埋戻材料・埋設深・間隔等と浸透特性および目づまり発生状況の関係を把握する。                        |
| 浸透機構の解明     | 浸透流成分の分離      | 毛管浸透と重力浸透成分を分離して観測できるような装置を考える。                                    |
|             | 浸透水の挙動        | 浸透水の地下水涵養機構を追跡するため、土中水分のポテンシャル線を描けるような観測を行う                        |
| その他         | 給水水質と浸透水質の関係  | 土壌浄化作用の有効性の検討を行う                                                   |
|             | 再水貯留効果        | 土中水分量、トレンチ構造との関係を把握する。                                             |

### 2) 施 設

トレンチ下皿からの毛管浸透は、目づまり防止、水質浄化に効果があると言われているが本年度の施設では、毛管浸透量の実測は困難である。従って、今後、重力浸透と、毛管浸透を分離観測できるような施設の新設が必要であるとおもわれる。

その他簡易浸透施設として

・粗砂の代わりにモミガラを使用した雨水貯留施設

等も考えられる。

### 3) 解析

3ヶ月の実験の結果、地下トレンチからの浸透は、給水量、給水時間間隔等土中水分量を決定する要因に従っているように思われる。そこで中性子水分計・テンションメーターによる土中水分量のデータ等を蓄積し、浸透機構の把握を行ってゆきたい。