

立川ロームにおける管状孔隙が  
地下水涵養に果たす役割

成 岡 市\*  
 駒 村 正 治\*\*  
 高 須 俊 行\*\*

Role of Tubular-pores in the Tachikawa Loam regarding Recharge of Groundwater

Hajime NARIOKA\*, Masaharu KOMAMURA\*\* and Toshiyuki TAKASU\*\*

\*NODAI Research Institute, Tokyo University of Agriculture

\*\*Faculty of Agriculture, Tokyo University of Agriculture

## 1. はじめに

東京西南部に位置する武蔵野台地は、第四紀洪積土の武蔵野ロームを主体として、その上位に立川ローム層が不整合に覆っている。この台地は多くの開析谷に囲まれているので、水収支区は独立しており、不圧地下水（以下「地下水」とする）の大部分は雨水が台地上の平坦な地表面から浸透したものと考えられる。またこの台地の一部では、武蔵野ローム層上部から立川ローム層にわたる地表面下およそ100~600cmのところまで地下水位が変動しており、降雨開始直後短時間のうちに水位が上昇し、多くの場合24時間前後で最高水位に達する。地表面が舗装道路や建築物で被覆されていなければ、深さ0~150cm程度の浅層の土壌水分張力が降雨に対し連動的に変化している。

このような降雨に対する地下水位と土壌水分張力の敏感な応答性は、不飽和帯の飽和度を徐々に高めていくような浸潤過程よりも、雨水は土壌中のある特定の幹線を伝わり地下水面に向かって急速に流下し、その途中で幹線周辺の2次元方向に配分される現象が存在すると考えざるを得ない。

そこで高須ら<sup>1)</sup>は、立川ローム層から不攪乱採取した土壌試料表面に水溶性造影剤（ギ酸第一タリウム飽和水溶液）を滴下して、その浸入経路を軟X線映像によって確かめた。それによると、造影剤は鉛直方向に伸びる管状孔隙内を流下するのが速く、続いてその孔隙内壁面から周辺の微細間隙内に広がっているのがわかった。これ

は土壌内の管路系および水溶液の浸透を同時に可視化したものであった。しかし、そこでは定量的な解析を行なわなかったため、成岡<sup>2)</sup>は、軟X線映像について土壌の不均一性に対応できる精度と分解能を検討しながら、管状孔隙の構造や水みちとしての連続性を定量的に把握する目的で、管路系の立体計測法を開発した。

ここでは本報は、表層直下にある立川ローム層が根群域以深であっても管状孔隙の分布が顕著で、しかも地下水位の変動帯にあってることから、この層を中心に管状孔隙が地下水涵養に果たす役割を検討した。

なお、本報でいう「管状孔隙」とは、土壌間隙（すきま）のうち、円孔断面またはそれに近い断面を持った管状の間隙をいう。実際には土壌中で立体的に連続している大孔隙の一種である。井上<sup>3)</sup>も指摘しているように、大孔隙は単純に大きさのみで定義しかねるものであるが、本報では便宜上、軟X線フィルム映像で肉眼識別できる孔隙を対象にし、そのうち経路の異なる管路が鉛直あるいは水平方向に相互に接続していることが明瞭に判断できる0.1mm径（pF1.5 相当）以上の太さのものを大孔隙と仮定した。以下特に断わりがなければ、管状孔隙を「孔隙」として述べることにする。

## 2. 調査および測定方法

## 1) 調査地点

東京都世田谷区内の用賀（東京農業大学実験圃場、普通畑、「Y地点」とする）、世田谷（植物園、「S地点」

\*東京農業大学総合研究所 \*\*東京農業大学農学部

## 立川ロームにおける管状孔隙が地下水涵養に果たす役割

とする), 宮坂(神社境内, 「M地点」とする)の4地点で土壌調査および地下水・土壌水分張力観測を行なった。YとS地点は目黒川と荏原台の間, M地点は目黒川と淀橋台の間にあり, 双方とも標高40m程度の武蔵野台地面であり, 目黒川の流域となっている。地下水位観測は, S地点1カ所, M地点1カ所の井戸を定点とした。テンシオメータによる0~200cm深の土壌水分張力観測は, S地点2カ所, M地点1カ所を定点として行なった。観測期間は1985年1月から1988年3月である。

## 2) 採土

3地点の深さ10, 20, 30, 40, 50, 70, 100, 120, 150, 180cmで不攪乱土壌, 攪乱土壌を採取した。立川ローム層は地表から約100cm以深にあるが, 比較のため表層からも彩土した。180cm深までの彩土方法は, 不攪乱土壌の場合, 透水試験などに用いる100cm<sup>2</sup>円柱試料を各深度の鉛直方向(10~180cm深), 水平方向(120~180cm深)に3個ずつ採取し, 軟X線撮影用土壌ブロック(120~180cm深)をサンブラ打ち込み位置に近接した同一層位から約20×10×10cmの大きさに切り出すことにした。

攪乱土壌は(採取後)ビニール袋に入れて密封した。

100cm<sup>2</sup>円筒サンブラを土壌断面に打ち込む際には, 打ち込み器を試作して, サンブラ内壁面にグリスをまんべんなく塗った後, カラーに差込み, 図-1のように鉛直・水平面に対して垂直に打ち込んだ。試作器は打ち込み軸が断面に対して垂直方向のみに滑動するので, 円柱試料はサンプル内壁面に密着しながら不攪乱状態で採取できた。

土壌ブロックは, 採取層位の鉛直・水平方向が識別できるように, ブロック表面に適当なマークを付けておいた。現場のローム層は良好な状態で切り出せた。

## 3) 定水位飽和透水, 限界間隙試験

定水位飽和透水・限界間隙試験器を図-2のように試作した。100cm<sup>2</sup>サンブラは上下に透明アクリル製キャップをはめ込み, 3本のねじ付き棒で固定する。試料の上下端面にはフィルターをつけない。キャップは上下とも同型に設計し, サンブラ外壁との接続部分はOリングで密着させ, 気密構造(±600cmH<sub>2</sub>O以上の耐圧が得られる)とした。

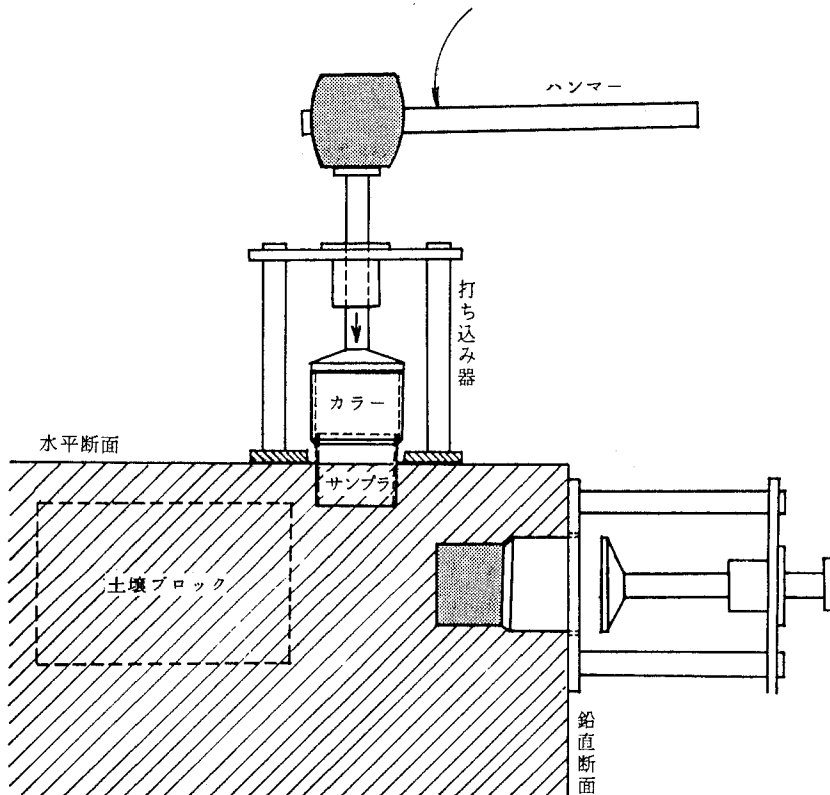


図-1 土壌試料の採取

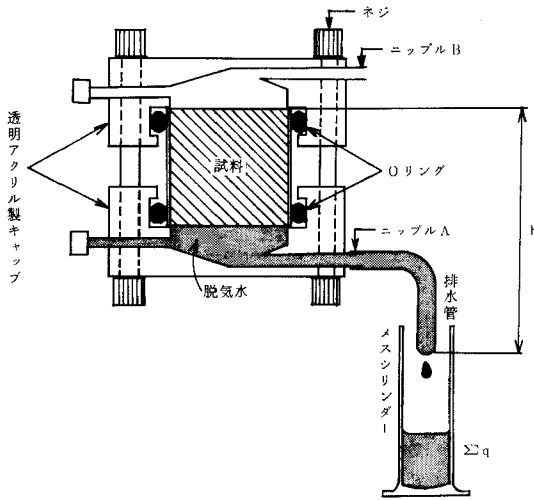


図-2 定水位飽和透水・限界間隙試験器  
(図は限界間隙試験中を示す)

定水位飽和透水試験は、ニップルAにマリオット装置、ニップルBに排水管を接続、他のニップルは閉じておき、脱気水を試料内の上向き（採取層位の鉛直方向）に流すようにした。毛管飽和の後、透水が始まり流量が定常になった段階で所定の測定を行った。

限界間隙試験は田淵<sup>4)</sup>の方法に準じた。本報では、飽和透水試験終了後、ニップルAに排水管を接続、ニップルBは開けておき、試料上端面を基準に0 cmH<sub>2</sub>Oで試料からの脱気がなくなった後に、排水管先端を1時間に5 mmずつ下げて、試料の積算脱水量を測定した。測定の終了は試料下端面から気泡が連続的に出現し始めた時点とした。最終積算脱水量 (Σ q cm<sup>3</sup>, 限界間隙量とする) は、連続気泡出現直前までの量とした。また、脱水開始から連続気泡出現までの水頭差 (Δ h cmH<sub>2</sub>O) も記録した。

水頭差に対する積算脱水量の比 Σ q / Δ h (「脱水勾配」とする) は、100 cm<sup>3</sup> 試料内における限界間隙の接続性、屈曲性および径変化の存在を反映した水みちの大气開放のし易さを示す。大きい値ほど間隙が開放し易い(水が抜け易い) 土壌と判断できる。

#### 4) 造影剤の圧入

軟X線撮影試料は、採取層位から切り出してきた土壌ブロックをさらにストレートエッジ(包丁)で一辺40~70mm、厚さ30mmの直方体に切削整形した。太い孔隙が見える土塊は大きめの試料にし、1個のブロックから3~4個の試料を作った。厚さ方向にX線を透過させるので、

±5%程度の精度で一様な厚さにした。

以上の作業が終了した試料は、水分蒸発防止のためラップフィルムに包み、包装面に試料番号を記入した。

造影剤は、塩基性炭酸鉛 { 2 PbCO<sub>3</sub> · Pb(OH)<sub>2</sub> } を主成分とする油絵具「シルバーホワイト」を用い、適量のスピンドル油に溶かして粘性を調整した。どの程度の粘性にするかは、孔隙の形状・大きさによるが、常温で容積のおよそ3倍に溶かすと、自然含水比状態 (pF2.0 ~ 2.8) で孔隙周辺の微細間隙内にも浸入させることができた。

その造影剤を入れた注射器に先端が平な注射針を付けて、針先端を試料上端面の任意の孔隙開口部にあて、造影剤を土壌内に少しずつ圧入した(図-3)。やがて他の大小開口部から漏出が始まり、それらのいくつかを塞ぐと、今度は別の開口部から漏出してきた。造影剤は、試料下端面に抜けることもあれば、圧入口と同一面の他の開口部から抜け出ることもあり、土壌内部の管路網の通り易い部分から順に浸入していくことがわかる。

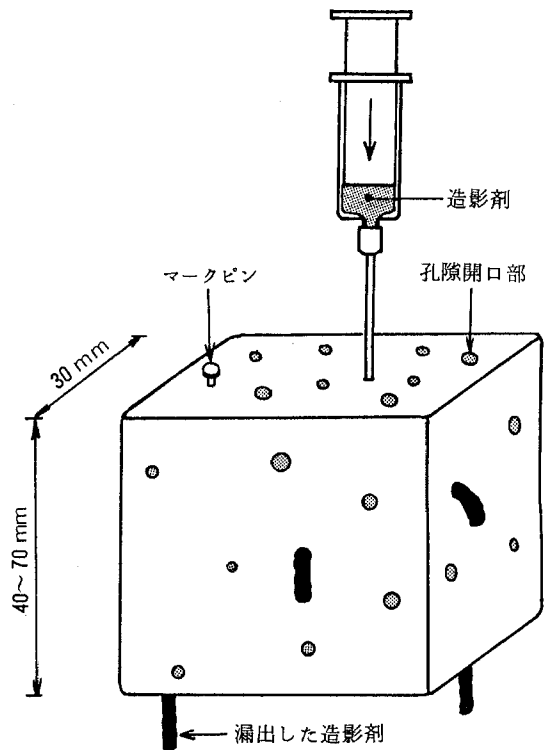


図-3 造影剤の圧入

## 5) 管状孔隙の軟X線ステレオ撮影と計測

既報<sup>2)</sup>に基本的な手法がまとめられているが、以下は本報で行なった具体例を述べる。

軟X線フィルムは、FR (FUJI PHOTO FILM) キャピネ版を半分 (252×151.5mm) に切断して、ビニール製遮光袋に入れた。軟X線発生装置は、CMB-2 (SOFT-TEX) を用いた。揺動式X線ステレオ撮影台は、図-4に示すように試作し、ラップフィルムで包んだ資料を鉛直方向が回転軸 (Y軸) 方向になるように置いて、一対2枚の撮影をした。その際フィルム上にx, y軸の位置を示すスリットも同時撮影した。フィルムは遮光袋ごと試料テーブル (カーボンファイバー) 下面に圧着し、2枚目のフィルム交換の時に試料がずれない構造となっている。撮影条件は、フィルム・焦点間距離655mm, 管電圧60kVp, 管電流mA, 照射時間120~170sec, 揺動角 ( $\theta$ )  $\pm 5^\circ$  とし、散乱線防止のためフィルム背面に鉛箔を合わせた。

現像・水洗・乾燥処理の済んだフィルムはライトボックス上に平坦に張り付け、CCDカメラ (SONY, XC-7) に焦点距離70mmレンズをセットして、フィルム直上300~500mmから撮像した。撮像軸はフィルム面に直交さ

せ、撮像範囲はカメラ結像面の有効範囲の約20% (面積割合) 程度にとどめておき、カメラレンズ歪などの幾何学的歪の影響をなるべく受けないようにした。映像信号はimage  $\Sigma$  (NIPPON AVIONICS) で高速画像処理すると同時に、モニター画面を見てフィルム映像のX-Y直交軸 (フィルム上のスリット像) とイメージメモリのX-Y直交軸を合致させた。

A/D変換した256階調のデジタル画像は、パーソナルコンピュータ (NEC, PC-9801VM2, メインメモリ640KB) に転送・ファイル化し、さらに平面位置補正、ヒストグラム解析、等濃度分布表示などの画像処理を行なって、一対2画像の孔隙中心部の対応位置をY軸方向に順次追跡し、3次元座標および孔隙内径 ( $\phi$ , 孔隙映像の幅) を連続的に算出した。また、屈曲度 ( $\tau$ ) を [管路長] / [直線長] から求めた。追跡距離は、Y方向について1ステップ当り0.1~0.2mm (カメラの撮像距離によって増減)、始点・終点間 (直線長) で平均15mmとした。計測精度は1ステップ当りの追跡距離に限定されるが、本報では前述したとおり内径0.1mm以上の孔隙を対象としたので、約1/20mmの精度をとった。ただし  $\tau$  は、管路が複雑なほど値が大きくなる (管路の軌跡

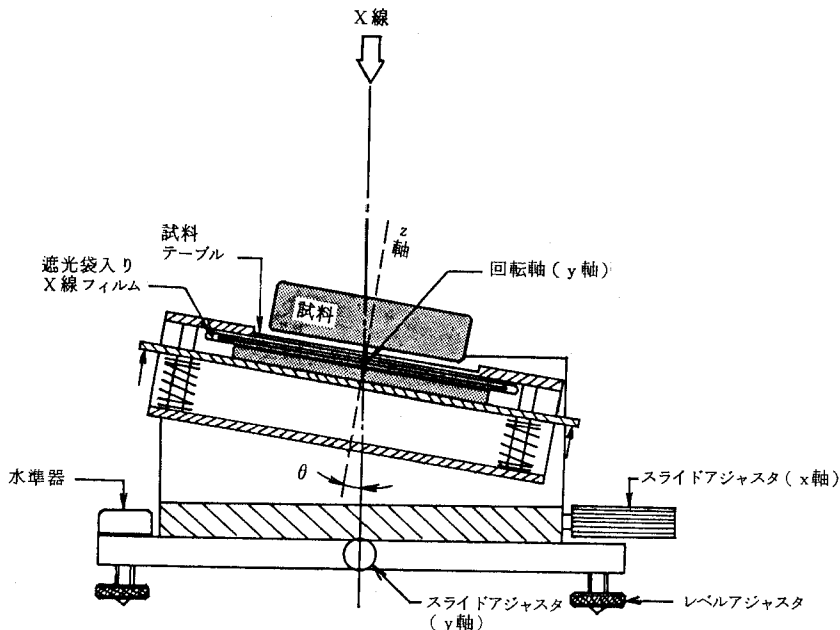


図-4 揺動式X線ステレオ撮影台 (断面図)

が長くなる)ので、管路長演算にあたっては2次スプラインによる平滑化処理を行なった。

また、孔隙画像はある幅を持っているので、その中心部分を追跡するだけの目的ならば、細線化処理で骨格部分を抽出する方法もあり得よう。しかし細線化した画像データでは孔隙中心の追跡と孔隙径算出を同時に行なうことはできず、しかも土壤粒子像が画像近傍演算のノイズになっている可能性も高い。土壤の軟X線映像には粒子、間隙、および造影剤で浮き上がらせた孔隙像など多くの情報が記録されている。したがって本報では、細線化処理をせずに孔隙と土粒子群の境界位置を追跡できるようプログラムの設計を工夫した。

### 3. 結果および考察

#### 1) 土壤断面

土壤断面を図-5に示す。各地点とも表層は黒褐色で腐植に富む黒ボク土であり、堅果状構造を呈している。Y地点では深さ100 cm以深で褐色、角塊~壁状構造、S地点では深さ130 cm以深で明褐色、角塊~亜角塊状構造、

M地点では100 cm以深で褐色、角塊~壁状構造であり、3地点ともやや密な組織の火山灰層である。根系限界深さは、肉眼観察により100~150 cm深と認めた。地下水位変動帯は、S地点で130~340 cm深、M地点で300~670 cm深であった。土性については、3地点とも表層が軽埴土であり、下層になるにしたがって重埴土または壤土となっている。

また、S地点では130~200 cm深さFe結核、管状斑鉄の発達、グライ層等がみられた。管状斑鉄は径5~10 mmの大孔隙内壁に酸化鉄が硬く沈澱していたもので、これは孔隙内壁面をコーティングし、管路を保存する役割を果たしている。

次に、3地点からまとめた飽和透水係数(鉛直方向)と三相割合の平均値を図-6に示す。

飽和透水係数は、3地点とも表層から下層にかけて $10^{-2}$ ~ $10^{-3}$  cm/secのオーダーで、一般的な関東ロームの飽和透水係数と同程度で概して大きい値であり、深度方向の差はあまりみられず、表層と下層はそれぞれオーダーの範囲で近似した透水性を示している。

三相割合も各地点で同じようなパターンを示し、表層か

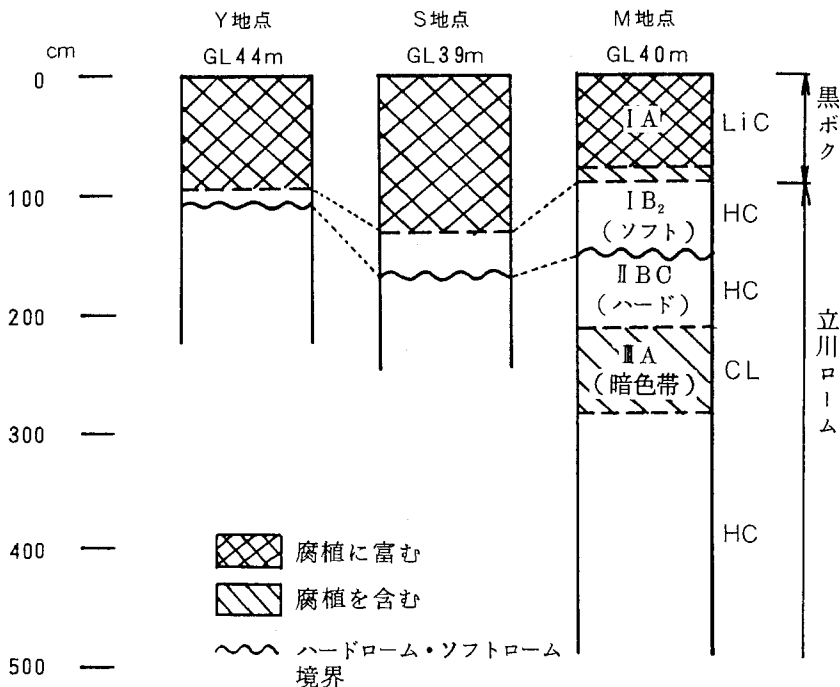


図-5 調査断面

## 立川ロームにおける管状孔隙が地下水涵養に果たす役割

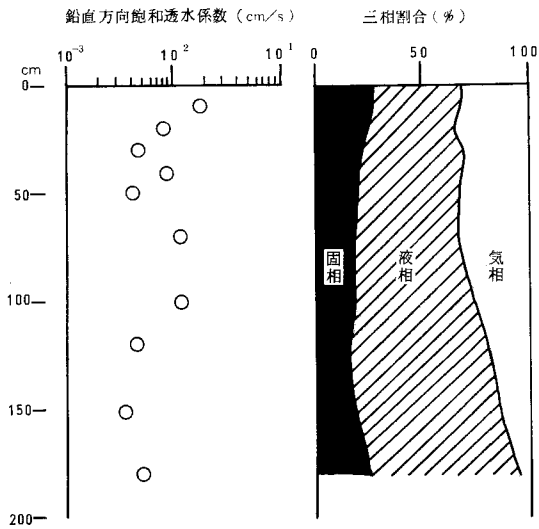


図-6 断面の飽和透水係数と三相割合  
(3地点平均)

ら下層までの固相率は20~30%の範囲であった。固相率が低い値であるのに対して、気相率、液相率は高く、とくに気相率が下層でもそれほど減少しない点は関東ロームの特徴である<sup>5)</sup>。

また、3地点10~180cm深さにおける間隙分布を図-7に示した。鉛直方向の100cm<sup>3</sup>試料全てについてプロットしてある。いずれの深度でもおおよそpF1.0~2.0(等価直径0.3~0.03mm)にピークがあり、下層ではpF2.5~2.8(0.001~0.005mm)にピークがあるので、表層から下層にかけて雨水の重力排水を担う非毛管間隙が多く存在しているとともに、下層では貯留を担う毛管間隙も

兼ね備えていると判断できる。

ここで、表層から下層にかけて透水性や間隙割合に大きな差がみられない理由について考察する。

M地点では、220~290cm深あたりに暗褐色(7.5 YR 3/4)を帯びた暗色帯があった。表層(黒ボク, IA)直下から暗色帯(III A)直上にかけての層は、層位関係から $1.2 \times 10^4$  y. B. P. 頃<sup>6)</sup>から $2.1 \sim 2.2 \times 10^4$  y. B. P. 頃<sup>7)</sup>の立川ローム層(TcL)と判断される。またこの層は、立川ローム第1部層(IB<sub>2</sub>層, 「ソフトローム」)と第2部層(IBC層, 「ハードローム」)と考えられており<sup>8)</sup>、その境界はきわめて起伏に富んでいる。松井はこの起伏の成因について、腐植土形成以前の森林土壌の説を検討しながらも、ソフトロームにおける乾湿の反復による塊状構造の発達の下限にあたる可能性を考えている<sup>9)</sup>。森林土壌であれば、根系の発達程度から根群域下限に起伏が生じる可能性もある。一方、佐瀬らは、関東ローム層から植物珪酸体を普遍的に検出しており、ソフトロームから暗色帯にかけて、ササ属、キビ亜科を主体とするイネ科植物相、暗色帯で深から武蔵野ローム上部にかけてササ属がきわめて優勢なイネ科植物相を推定し、亜寒帯林域および落葉広葉樹林域が中心となって分布していたと考えている<sup>10)</sup>。立川ローム層を軟X線映像で観察すると、どの層でも類似した量と形状の孔隙がみられる。これは、孔隙の多くはイネ科植物等の根系によって形成され、地形や植物遷移に極端な変化がなく土壌生成とともに徐々に堆積していった、と考えることによって説明できる。しかしながら、当該層における孔隙の成因が、植物根系によるのか、土壌動物によるのか、あるいはその他のものによるかはまだ明らかではない。たとえば渡辺

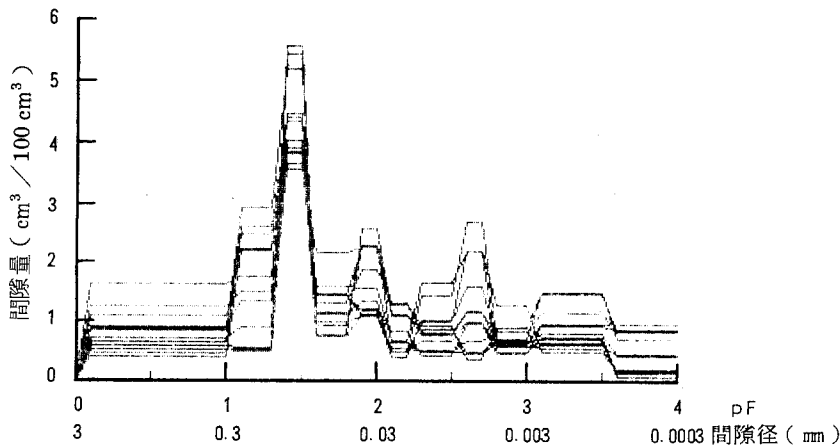


図-7 0~180cm深の間隙分布

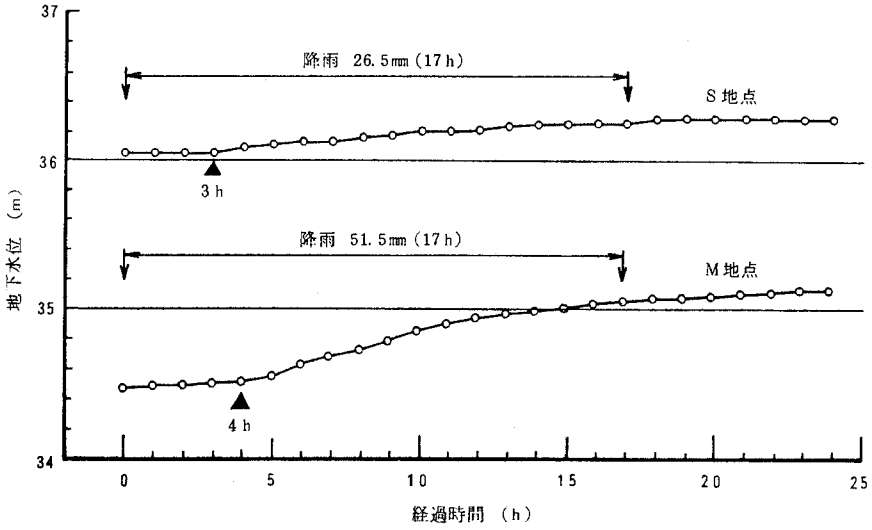


図-8 降雨と地下水位

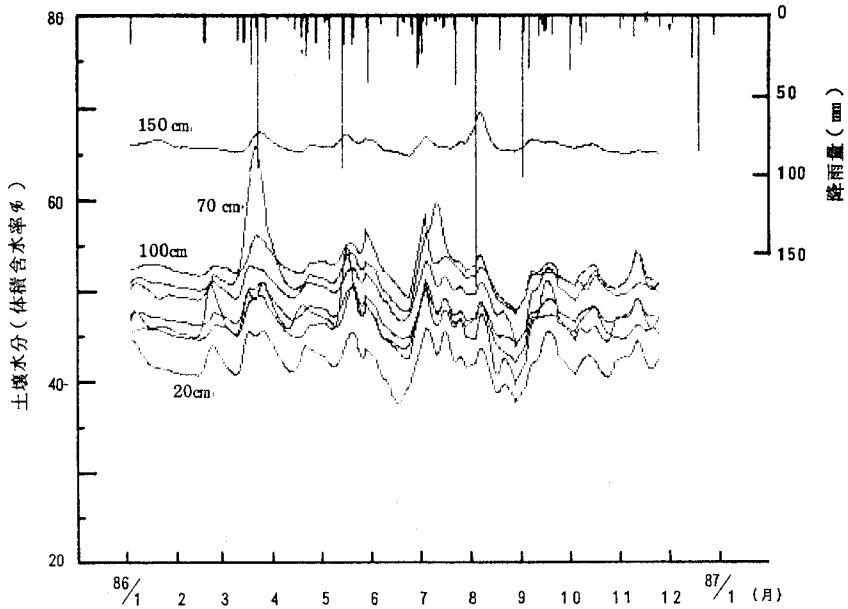


図-9 降雨量と土壌水分の経年変化

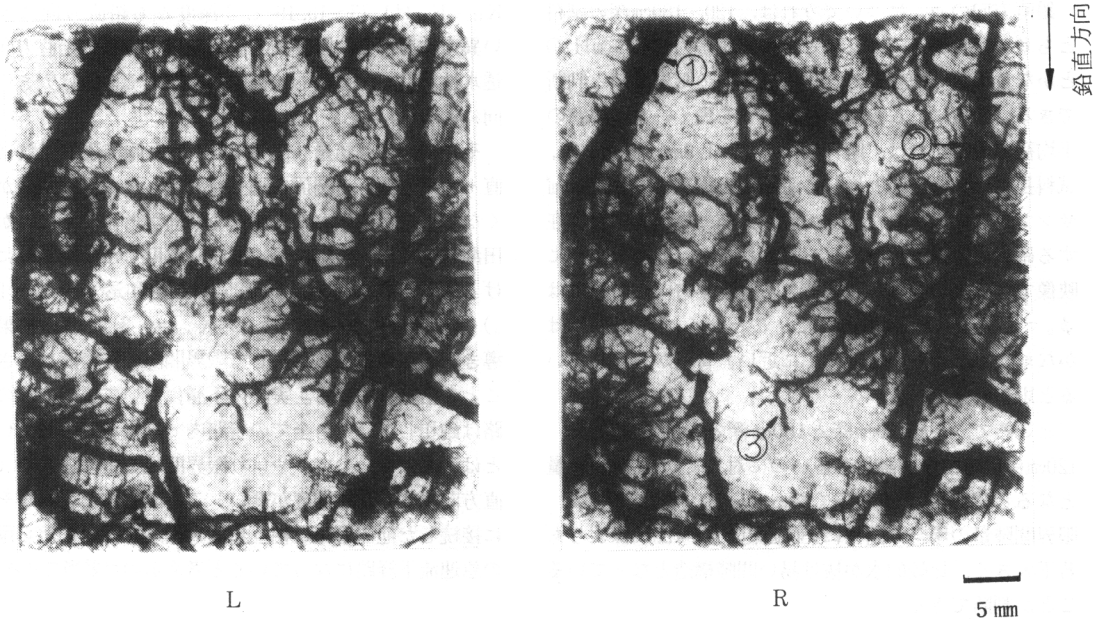


写真-1 S地点180 cm深(立川ローム)における管状孔隙  
(軟X線ステレオ映像, 試料厚30 mm, 右下スケールは投影面上の寸法)

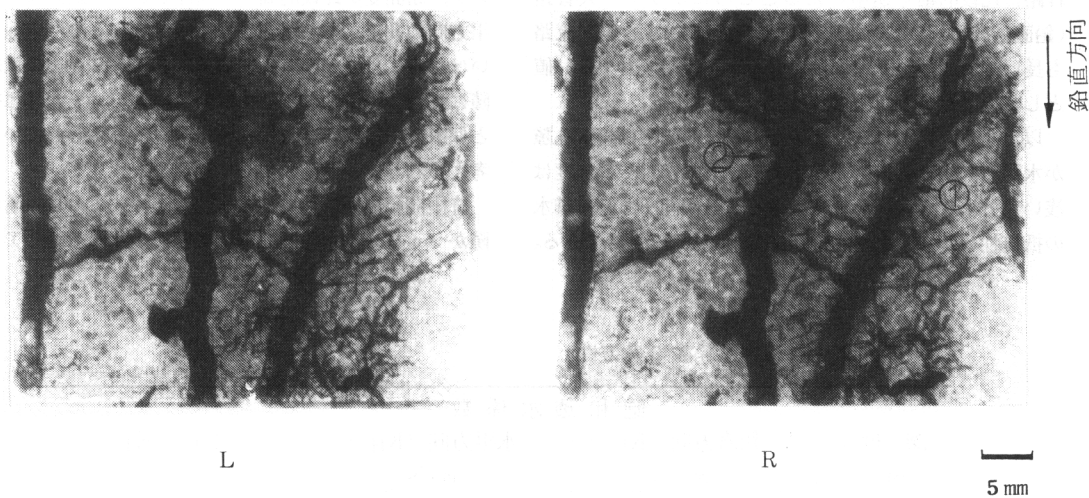


写真-2 Y地点180 cm深(立川ローム)における管状孔隙  
(データは写真-1に同じ)



る可能性が高いと考えている。

鉛直方向の $\phi_e$ についてみれば、120, 180cm深の試料とも $\phi_e = 1.58\text{mm}$ で、このときの実測張力は $1.9\text{cmH}_2\text{O}$ とかなり小さい値をとり、排水性良好の限界間隙と判断できる。さらに、この開口径が試料を貫く一本の経路の平均径と仮定すれば、図-10から $r = 1.8\text{mm/mm}$ となり、試料長にたいして80%増しの管路長と推算できる。100 $\text{cm}^3$ サンプルに採取された土壤の脱水方向に最大孔隙が存在する確率は、採土位置によって異なるが、前述のように映像で3mm級の孔隙が確認できる（水平方向の試料では $\phi_e = 3.3\text{mm}$ というのもあった）ことから、実際の $\phi_e$ はかなり太く、 $r$ も小さい（1に近い）管路が存在していると思われる。

ところで、下層120cm深と180cm深とを比較すると、120cm深の方で全間隙量が多いのに対して、限界間隙量となると180cm深の方が多くなっている。脱水勾配は、限界間隙量の場合と同様に180cm深の方が120cm深よりも若干大きく、比較的水が抜け易い間隙構造となっていることが判断できる。

また、鉛直方向と水平方向とを比較すると、限界間隙量は120cm深で約1.2倍、180cm深で約1.1倍鉛直方向が大きく、脱水勾配は、120cm深で約2.8倍、180cmで約1.9倍鉛直方向に大きい。写真-1, 2から判断して、100 $\text{cm}^3$ 円筒試料における鉛直方向の大气開放経路は、太くダイレクトなものが優勢であるのに対して、水平方向の開放経路は比較的細く途中いたるところにネックや大管路（鉛直方向に延びる）との分岐・合流部分があり、流路も長いので、限界間隙量は少なく、脱水勾配も小さい値として出てくると考えられる。

以上から、立川ローム層の地下水位変動帯は管状孔隙が水平方向よりも鉛直方向に発達しており、その程度は浅い部分よりも深い部分で大きくなる傾向があり、排水の抵抗性はかなり小さい構造になっていると判断できる。

次に、表-2に鉛直・水平方向の飽和透水係数を示す。 $K_U/K_H$ は1.73~15.19と3深度とも鉛直方向に大きい異方性を示し、限界間隙試験結果と同様に鉛直方向に透水性が良く、しかも比較的深い層でその差は大きい傾向にある。

そこで、粗間隙量（ $pF1.8$ 以下）と飽和透水係数（鉛直・水平方向）の関係を図-11に示した。粗間隙量が多くなると透水係数も大きくなる傾向がある。ところが、田淵ら<sup>12)</sup>は、立川ローム層から採取した土壤試験における限界間隙透水係数（ $K_{we}$ ）と飽和透水係数（ $K_{ws}$ ）との関係について、 $K_{we}/K_{ws} = 0.3$ という結果を導き、飽和透水係数に対して限界間隙の影響度は小さいことを指摘している。実際の下層においては、一部の管路は飽和していても全ての管路内で飽和流が生じているとは考えにくいので、やはり限界間隙を主体とする（鉛直方向に太く、屈曲度が低い）ごく限られた管路がそれに接続した他の管路と相互に圧力伝達を行いながら雨水の急速流下経路になっていると考えるのが妥当であろう。

#### 4. おわりに

立川ローム層では、雨水は、体積の80%以上を占める量的に優勢な間隙のうち、10%に満たない通水し易い構造の管状孔隙を迅速に伝わり、地下水面に向かって急速流下する。一方、その管路とも接続しているかもしれないが、屈曲度が比較的高い（流路が長い）鉛直または水平方向の孔隙も多数存在し、雨水はこれらの内壁面あるいはさらに分岐・展開している細孔隙から周辺の微細間隙に浸透し貯留される。すなわち、立川ロームには排水と保水の二段機能が管状孔隙によって備えられていると考えられる。

降雨開始後短時間で地下水位が上昇するのは、管状孔隙がバイパス的水みちとなって多くの水量を通して

表-2 飽和透水係数の異方性

深 度 cm	飽 和 透 水 係 数		$K_U / K_H$
	鉛直方向 ( $K_U$ ) cm/s	水平方向 ( $K_H$ ) cm/s	
120	$4.11 \times 10^{-3}$	$2.38 \times 10^{-3}$	1.73
150	$3.79 \times 10^{-3}$	$1.40 \times 10^{-3}$	2.70
180	$4.83 \times 10^{-3}$	$3.18 \times 10^{-4}$	15.19

注) 値はY, S地点の平均

## 立川ロームにおける管状孔隙が地下水涵養に果たす役割

によれば、ミミズは全間隙の2/3にあたる生息孔を作ることもあるという<sup>11)</sup>。孔隙形態に関する検討を要するので即断はできないが、ミミズの体幅は数百 $\mu\text{m}$ ～数 $\text{mm}$ であるので、立川ローム層の管状孔隙のサイズに合っていないとはいえない。土壌動物の深さ方向の分布は植物根系より浅いが、ロームの堆積過程で土壌環境が土壌動物に対して良好なコンディションであったとすれば、孔隙は深度方向に普遍的に分布し、場合によっては上下層の孔隙が連続することになる。

以上のこと\*は、透水性や間隙割合に深度間の差異があまりみられない理由として考えることができよう。

## 2) 降雨開始後の地下水位上昇と土壌水分増加

地下水位について図-8に降雨開始後24時間以内の記録例を示す。S地点では、降雨開始後約3時間目に水位が上昇し始めた。その時の地下水深が298 $\text{cm}$ であったから、雨水はおよそ $2.8 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ の速さで地下水面に到達したと推定できる。M地点では550 $\text{cm}$ 深さの地下水位が約4時間目に上昇し始めたので、同様に $3.8 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ の速さと推定できる。これが雨水の平均流下速度とすれば、実際の雨水はかなりの速さで流下していることになる。

さらに土壌水分張力観測結果の例を土壌水分に換算して図-9に示す。冬期は降水量が少ないため土壌水分が少なく変化はほとんどない。夏期は降水量が多く蒸発量も多いため、全層の水分量の変動が大きく波形も複雑なパターンを示している。深さ方向で比較した場合、表層から下層にかけての懸垂水帯は降雨開始直後から短時間のうちに増加し、24時間以内にピークに達している。下層の毛管水帯では、降雨開始直後から増加し始めるが、24時間以内にピークに達するとは限らず、1～3日かかることもある。連続降雨期間と連続干天期間を比較すると、懸垂水帯(およそ70 $\text{cm}$ 以浅)では期間の長さに関係なく変動しているが、毛管水帯(およそ70 $\text{cm}$ 以深)では連続干天期間が続いても降水量があっても変動がない場合がある。

## 3) 管状孔隙の形状

雨水の急速流下による地下水位の上昇や下層における土壌水分の連動的増加は、肉眼でも識別できる孔隙が重要な機能を果たしていると思われる。管状孔隙の実例として、写真-1(L, R)および写真-2(L, R)を示した。2組の写真はそれぞれ一対のステレオ映像で、両眼立体視すると孔隙群の存在形態を見ることができる。

写真-1の土壌試料はS地点から採取し、写真-2のそれはY地点から採取した。いずれも180 $\text{cm}$ 深の立川ローム(ハードローム)である。黒い筋が造影剤で、孔隙お

\*立川ローム層の堆積過程で、大孔隙が植物根系もしくは土壌動物によって形成されたという考え方。

よびその周辺内に圧入したものである。向かって下方向を地下水側としている。背景の灰色に見える部分はマトリックスである。鉛直方向の孔隙といっても、映像には斜めに延びているもの、曲がりくねっているもの等さまざまな孔隙が存在しているので、以下は鉛直方向に比較的連続している孔隙のいくつかについて述べる。なお水平方向の孔隙については、ほとんどが鉛直方向に延びる太い孔隙から分岐しており、映像範囲を横切るような連続した経路を見いだせなかったので、計測の対象から外した。

写真-1の太い孔隙①は斜入しており、内壁面のところどころに分岐孔隙結合部にあたる凹部が見え、平均内径 $\bar{\phi} = 2.4 \text{mm}$ (変動係数C.V.=14.5%)、屈曲度 $\tau = 1.3 \text{mm/mm}$ である。②は大小管路が束状になった構造を見せ、周辺に細い孔隙群が密集しており、 $\bar{\phi} = 1.2 \text{mm}$ (C.V.=13.3%)、 $\tau = 1.7 \text{mm/mm}$ である。③は右上方の管路から造影剤が入り込み途中で停止したもので、先端にメニスカスが見える。その先にも孔隙が続いているが、映像では識別不能である。

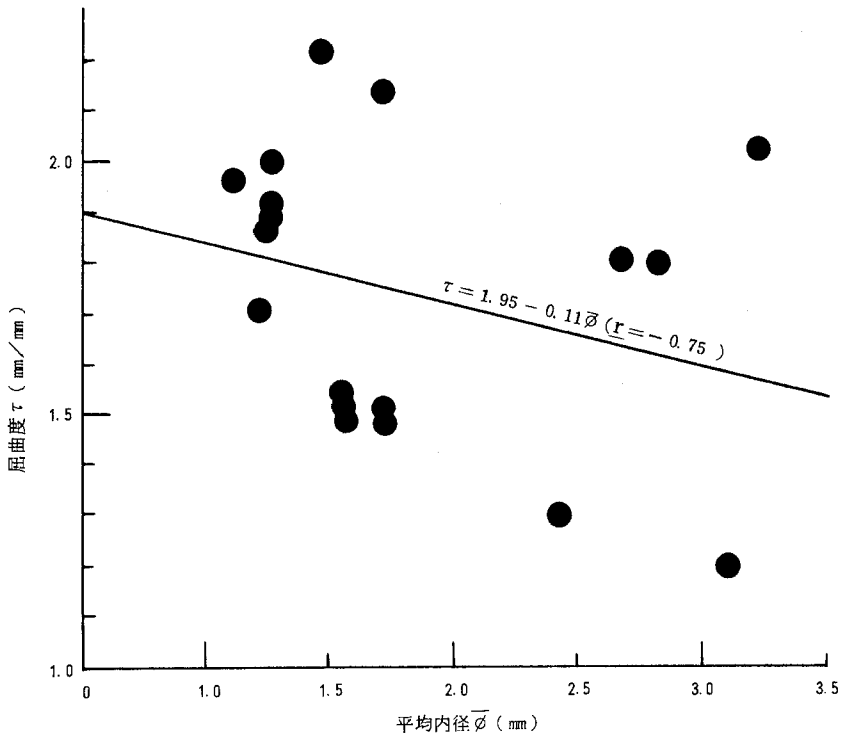
写真-2では、比較的大直径の孔隙が見られ、①は $\bar{\phi} = 2.8 \text{mm}$ (C.V.=7.1%)、 $\tau = 1.8 \text{mm/mm}$ で、周辺に分岐した細孔隙間がみえる。②は $\bar{\phi} = 3.1 \text{mm}$ (C.V.=13.5%)、 $\tau = 2.1 \text{mm/mm}$ であり、周辺の間隙に造影剤が入っている。この2本の管状孔隙は、太くて蛇行しているのが特徴的である。また他の映像で認めた最大孔隙には、 $\bar{\phi} = 3.1 \text{mm}$ (C.V.=6.45%)、 $\tau = 1.2 \text{mm/mm}$ というのもあった。これを等価張力に換算すると $1.0 \text{cmH}_2\text{O}$ (=0.3/0.31, ジュレンの式)とかなり小さく、屈曲度も低い。

次に、計測した孔隙(18経路)における $\bar{\phi}$ と $\tau$ の関係を図-10に示した。 $\bar{\phi}$ と $\tau$ は負の相関関係にあり、内径が大きくなると屈曲度は小さくなる傾向にある。また、 $\bar{\phi}$ の変動係数はおよそ6～20%の範囲にあったが、 $\bar{\phi}$ と変動係数との相関は明瞭ではなく、孔隙の1本ごとに径変化の度合(なめらかさ)が異なっているのが特徴であった。その径変化が流体の移動に関してどのような影響を与えるかについては今後の検討を要するところである。

立川ローム層では数十組以上の軟X線映像を得ているが、同一層位であっても大小孔隙の混ざり具合は複雑で、今のところ類型化していない。したがって本報では一部の孔隙映像について計測を行い、透水・限界間隙試験は同一層位の別試料(複数個)を用いて行なった。

## 4) 限界間隙と透水性

ソフトおよびハードローム層に当たっている120、180 $\text{cm}$ 深の鉛直・水平方向の限界間隙試験の結果を表-1



図—10 鉛直方向に延びる管状孔隙の内径と屈曲度

表—1 限界間隙試験結果

深 度	方 向	全 間 隙 量	限 界 間 隙 量	脱 水 勾 配 ( $\Sigma q / \Delta h$ )	限 界 間 隙 最 大 開 口 径
cm		cm <sup>3</sup>	( $\Sigma q$ ) cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup> /cm H <sub>2</sub> O	( $\phi_e$ ) mm
120	V	85.20	2.25	0.36	1.58
	H	85.20	1.88	0.13	3.33
180	V	80.66	3.19	0.43	1.58
	H	80.66	2.82	0.23	1.50

注) V : 鉛直方向, H : 水平方向, 間隙量は 100 cm<sup>3</sup> 試料中の体積を示す。

のようにまとめた。なお、調査した立川層の限界間隙量は1.8~7.7cm<sup>3</sup>(全間隙の約2~9%, pF1.8以下相当の粗間隙の約15~36%)であった。

前述の軟X線映像から判断して、孔隙の一部が限界間隙となっていることは間違いないさうである。限界間隙試験において、試料末端から連続気泡が流出したときは、少なくとも一本の経路(管路)は完全開放されているが、それに追従したその他の管路は不完全な開放状態となっ

ている。もし試料中の1本1本の孔隙が脱水負圧に対して同じ抵抗生をもっているならば、限界間隙量は多数の管路の開放量を表しているはずである。また、表中の $\phi_e$ は100cm<sup>3</sup>試料上・下端面付近における後退メニスカスに対するサクションから換算した等価直径のうち最大径を示し、完全開放した限界間隙の開口径と仮定した。この場合、鉛直方向では、試料端面の最大開口部は1本の径路をたどってそのまま他端面の最大開口部につな

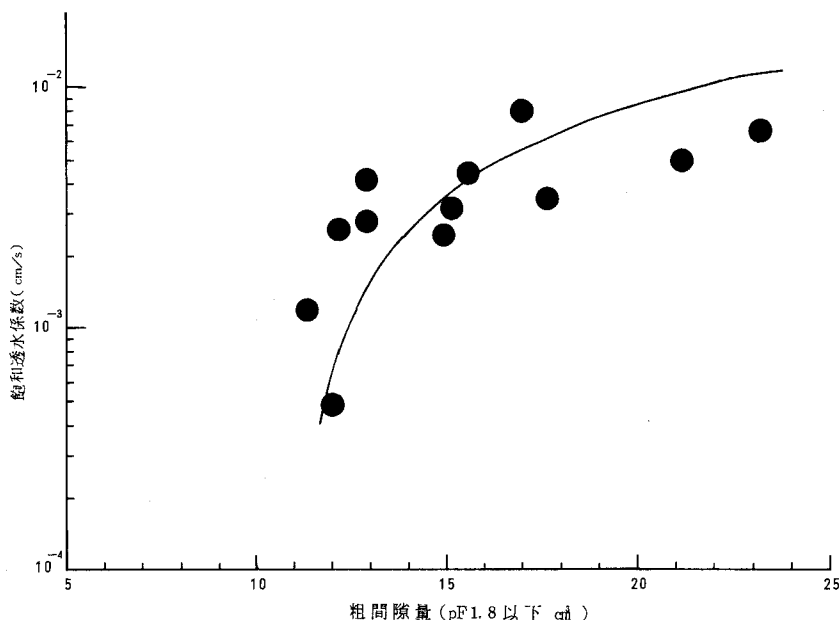


図-11 粗間隙量と飽和透水係数

結果であり、しかも水平方向は比較的透水性が低い間隙構造になっているから、鉛直方向の管路が短時間で満水することによると推察される。

管状孔隙群が不均一に分布しているように見えるのは、動物の循環器系のような構造が地下で構成されているようなもので、管路系の連続性・接続性は組織的に展開されており、物質の移動現象や貯留に関してかなり合理的な機能の分化が行なわれているのではないかと考えられる。

今後は、管状孔隙の物理的機能についてさらに詳細な検討を進めたい。

最後に、調査にあたって種々ご協力いただいた世田谷区関係各位、ならびに現地観測等に協力された研究室専攻学生諸君に対して、心から感謝申し上げます次第である。

#### 引用文献

- 1) 高須俊行・駒村正治・成岡 市: 土と基礎, 34(11), 51-56 (1986)
- 2) 成岡 市: 農土誌, 55 (9), 29-35 (1987)
- 3) 井上久義: 農土論集, 132, 111-120 (1987)
- 4) 田淵俊雄: 研究の資料と記録, 13, 29-32 (1963)
- 5) 駒村正治: 第四紀研究, 24 (3), 229-238 (1985)
- 6) 山路 進・鈴木正章・遠藤邦彦・大沢真澄・二宮修治・新井房夫・宮地直道・鈴木和博: 日本第四紀学会講演要旨集, 12, 54-55 (1982)
- 7) 町田 洋・新井房夫: 化学, 46, 339-347 (1976)
- 8) 松井 健: 土と基礎, 32 (4), 1-4 (1984)
- 9) 松井 健: 考古学研究, 23 (2), 59-66 (1976)
- 10) 佐瀬 隆・細野 衛・守津川徹・加藤定男・駒村正治: 第四紀研究, 26 (1), 1-11 (1987)
- 11) 渡辺弘之: 土壤動物のはたらき, 51-52, 海鳴社 (1983)
- 12) 田淵俊雄・田淵公子・長田 昇: 農土研究別冊, 7, 53-60 (1963)

## Summary

The groundwater table level (unconfined aquifer) ranges from 1 to 6 m below the ground surface in the Musashino Plateau, Tokyo, Japan. The water level which rises at the start of rainfall reaches the peak level within 24 hours, and the soil moisture almost simultaneously increases in the relatively shallow subsurface (0–1.5 m depth) due to the existence of tubular pores (macropores) extending from the surface to the aquifer (in Tachikawa Loam, tephra layers).

In this paper, the internal diameter and tortuosity of some tubular pores were analysed by Soft X-ray images using the stereoscopic measuring method. The physical characteristics of the tubular pores were estimated by the permeability test, etc.

Large pores running continuously in the vertical direction were 3.1 mm in diameter (coefficient of variation 6.45%) with tortuosity of 1.2 mm/mm. The larger the diameter of the pores, the lower their tortuosity. Coefficient of the variation was about 6–20%, and the ratio of the pore diameter varied.

The vertical tubular pores (less than 10% of the total pore volume) can be easily drained. Accordingly, rain-water rapidly trickles down (velocity:  $10^{-2}$  cm/s) to the groundwater table. As many tubular pores exhibit higher tortuosity in the vertical or horizontal direction, rain-water percolates from these pores (or fine pores which branch off and spread out) to the surrounding soil matrix.

The heterogeneous distribution of the tubular pores is comparable to the circulatory system of higher animals. The continuity and cohesiveness of the tubular pores which were developed systematically may account for the effective physical functions in the subsoil.