

報 文

土壌孔隙中の流体の挙動と孔隙の立体表示

岩間 憲治・多田 明夫・丸山 利輔・渡辺 紹裕

**Movement of Fluid in Soil Macropores
and Three-dimensional Expression of Pore Networks**

Kenji IWAMA · Akio TADA · Toshisuke MARUYAMA and Tsugihiko WATANABE
Faculty of Agriculture, Kyoto University

Summary

In this paper, radiographs of soil macropores were obtained by using soft X-ray radiography and several quantitative analysis were carried out by image processings. The soil samples tested were andosols which have a lot of macropores and duralumin samplers were used due to their strong X-ray transmittance property.

The methodologies and experimental results are as follows :

- 1) By injecting liquid contrast agent (CH_2I_2) into the soil samples, the fluidities were recorded using a X-ray TV video camera. It can be seen by the video recording that the fluid flowed with pulsatory motions in the macropores connected with each other.
- 2) The spatial structures of macropores (in 3D graphics) were drawn from the stereoradiographs using a personal computer resulting to the visual observation on the spatial continuities of soil pore structures and the calculation of their actual lengths.
- 3) The coefficient of the permeabilities were calculated by using the fluid velocities and the diameters of the main macropores, respectively, and compared with the values of the permeability tests. Differences were found among the permeability values of the main macropores and of the soils.

The results of this experiment show the importance of a more reliable information on soil macropore structures through the improvement of the experimental procedure.

Key words : Soft X-ray, Soil macropores, Permeability, Image processing, Stereo radiograph

(Soil Phys. Cond. Plant Growth. Jpn., 66, 11-18, 1992)

1. はじめに

土壌間隙は、水などの各種流体の移動と保留に大きな役割を果たす。このため、従来から土壌間隙について様々な研究がなされてきた(例えば Childs ら¹⁾, 1950; Marshall²⁾, 1958; 中野³⁾, 1971)が、実態の観察にもとづく研究は少ない。特に孔隙の連続性、分岐、屈曲、断面形状変化などは、土壌孔隙の実態に即して表現できていない。そのため、孔隙が浸透・排水に果たす役割は、

定性的に把握できても定量的に把握しきれていない。

近年の各種非破壊検査技術の進歩によって、物体を破壊せずに内部構造を把握できる対象範囲が急激に広がってきた。そのため、例えば医学の分野におけるCTやNMRの利用など、学術的・技術的に大きな発展を遂げた分野も少なくない。土壌物理学の分野でも、徳永・成岡らは軟X線装置を用いて土壌内部の構造を透過像の形で示し、大きな評価を得ている^{4),5),6),7)}。

今回、軟X線土壌間隙写真をコンピュータに取り込み、土壌の物理性を定量的に評価する一つの試みとして、孔隙の発達した黒ボク土壌を対象に以下の研究を行なった。
1) 孔隙中の流体の挙動を軟X線透過像にして、それをビデオ撮影して観察する。

京都大学農学部

キーワード：軟X線、土壌間隙、透水性、画像処理、ステレオ撮影

2) 土壌試料の軟 X 線ステレオ撮影を行ない、粗孔隙の骨格を立体表示して観察する。

なお、ここでは土壌中の気相及び液相の占める空間全体を孔隙とし、そのうち管状またはそれに近い孔隙を孔隙、孔隙の中で直径が100 μ m以上の部分が卓越したものを粗孔隙と呼ぶことにする。

II. 実験の方法

本研究では2回の実験について報告する。いずれも「流体の挙動観察」と「孔隙像の立体表示」を行なっているが、測定項目が異なる場合もあり、「実験1」、「実験2」として区別する。

2. 1 供試土壌

供試土壌は、いずれも岐阜大学農学部附属各務原農場(岐阜県各務原市)の畑地から採取した。深さ30cmまで耕起され、土色は深さ50cmまで湿潤状態で5G5/1(緑灰)、乾燥状態で7YR7/2(にぶい黄橙)、それ以上は湿潤状態で7.5YR6/3(にぶい褐)であった。供試土壌は「実験1」では1989年11月18日に耕土層下50cmのAB層から採取し、「実験2」では1991年8月5日に耕土層下15cmのA層、65cmのB層から採取した。土壌の物理性は、表-1の通りである。なお、本論文で報告する供試土壌は、「実験1」では1個、「実験2」ではA層のA1、B層のB1、B2の合計3個である。

2. 2 供試土壌の調整

供試土壌はジュラルミン製直方体サンプラーで採取し、そのまま軟 X 線撮影した。これにより撮影の際、供試土壌を整形する必要がなくなり、撮影が極めて容易となった。また、撮影した試料で他の物理性試験(pF試験、透水試験)を行なえるので、研究上好都合であった。

サンプラーの断面形状は正方形である。従来の円筒形サンプラーと比較して、採取時に四隅に隙間が生じ易い。しかし、ステレオ撮影の設置位置の同定が容易で、かつ

軟 X 線の土壌中の透過距離がどこでもほぼ均一である。このため、孔隙像の相対的な濃度が画像全体にわたって様になり、円筒形サンプラーを用いたものより画像処理上有利となる。なお、正方断面の一辺の大きさは、「実験1」では2.64cm、「実験2」では4.6cmとした。

画像処理の対象となる像は、孔隙像と背景部分とのコントラストが大きい方が望ましい。そこで、コントラストを低下させる一因であるサンプラーの材質について検討し、線吸収係数の低いジュラルミン(主成分:アルミニウム)を採用した。サンプラーの肉厚は2mmである。そして軟 X 線がサンプラーの二つの面を通過する際の X 線強度の減衰割合をステンレスとジュラルミンについて表-2に示した。また参考のため、土壌の減衰割合も同様に示した。この表から、ジュラルミンによる減衰はステンレスよりかなり小さく、X線減衰割合がステンレスの約1/30($\approx 0.0245/0.749$)であることがわかった。

2. 3 実験方法1(流体の挙動観察)

土壌中の流体の挙動を観察するため、以下の方法で実験を行なった。

- 1) 透水実験装置(図-1)に供試土壌をセットする。
- 2) 造影剤を滴下して、流動状況を X 線カメラを通してビデオテープに記録する。

表-1 供試土壌の物理性
Table 1 Properties of soil samples

土壌の物理性	実験 2		
	実験 1	A層	B層
真比重	2.62	2.51	2.52
乾燥密度 (g cm^{-3})	0.66	0.75	0.65
透過係数 ($\times 10^{-9} \text{cm}^2$)	13.1	9.46	8.96

注) 透過係数とは、流体の流れやすさを示す係数であり、土壌の間隙構造によってのみ定まり、流体の性質には無関係である。固有透水係数とも呼ばれる。

表-2 X線強度(X線エネルギー:60kV)
Table 2 X-ray intensity

項目	ステンレス	ジュラルミン	土壌(水山灰)	
	(鉄)	(アルミニウム)	実験 1	実験 2
線吸収係数 (μcm^{-1})	9.27	0.721	0.827	
試料厚さ (T cm)	0.4	0.4	2.64	4.6
I/I_0 ^{注)}	0.0245	0.749	0.113	0.0223

注) X線が供試体を通過する際の減衰の割合は $I/I_0 = \exp(-\mu T)$ で表わされる。ここで、 I : 試料透過後の X 線強度、 I_0 : 試料透過前の X 線強度、 μ : 線吸収係数 (cm^{-1})、 T : 試料の厚さ (cm) である。

注 2) 参考文献 7) および 10) より

表-3 ジョードメタンの物理特性
Table 3 Properties of diiodomethane

	化学式	比重	動粘性係数 (毛細管法) m^2s^{-1}	粘性係数 $\text{Pa}\cdot\text{s}$	接触角度 (対ガラス)
ジョードメタン	CH_2I_2	3.316 (20°C)	0.819×10^{-6} (19.6°C)	2.715×10^{-3}	61.4
水	H_2O	0.998 (20°C)	1.004×10^{-6} (20°C)	1.002×10^{-3}	8~9

注) 参考文献4) 及び昭和63年度理科年表(丸善)より

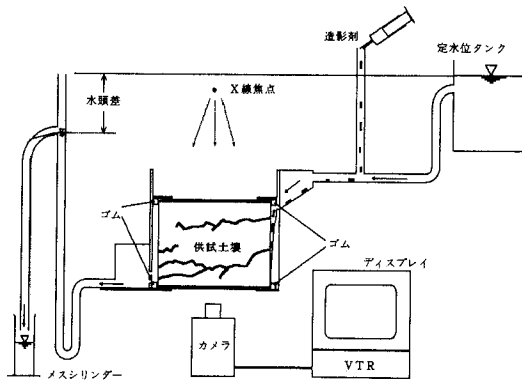


図-1 透水実験装置

Fig. 1 Device for permeability test

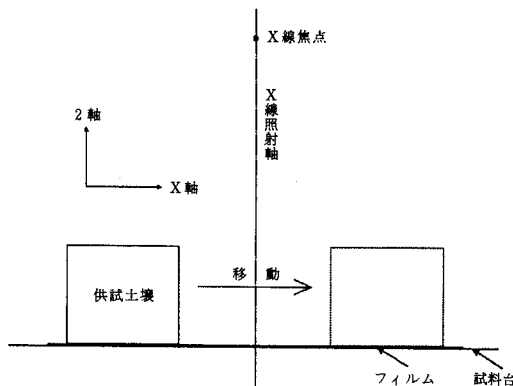


図-2 ステレオ撮影方法

Fig. 2 Principle of stereo radiography

- 3) ビデオ映像を用いて、流体の動きを観察する。
- 4) ビデオ映像から造影剤の流速を測定する。
- 5) 2)~4) と同時に、排水量も測定して実験中の透過係数の変化を確認する。

造影剤にはジョードメタンを用いた。また、その物理特性を表-3に示した。

図-1において、水は右側の定水位タンクから供給した。供試体上端を右向きに設置し、左向きに流れるようにした。水頭差は左側の三つ又ソケットの位置で調節し、

表-4 透過係数(定水位透水試験, 単位: cm^2)
Table 4 Permeability (Constant head permeability test)

水頭差 (cm)	供試体番号		
	A 1	B 1	B 2
10	6.62×10^{-11}	6.13×10^{-11}	4.22×10^{-11}
20	3.45×10^{-11}	2.38×10^{-11}	1.29×10^{-11}
30	1.85×10^{-11}	1.56×10^{-11}	—

注) 供試体 B 2 は、排水が途中で濁りだしたため、水頭差30cmの実験は中止した。

排出水はメスシリンダーへ導き、定水位透水試験も兼ねることを可能にした。

軟 X 線装置の線源の照射軸は鉛直下向きであり、供試土壤中を流動する造影剤を観察するために、供試体を回転させる必要がある。そこで供試体の両端に水頭差を与え、造影剤を横向きに流動させるための駆動力とした。

サンプラーと装置の隙間の漏水を防ぐため、「実験1」ではコーティング剤(防湿パテ AK22)を用いた。しかし供試土壌を大きくすると、コーティング剤とサンプラー・装置の境界部分から水漏れが生じやすかった。また、サンプラー断面内までコーティング剤が押し出され供試土壌表面の構造を破壊した。そこで、「実験2」ではゴムを用いて漏水を防いだ。

2. 4 実験方法2(孔隙像の立体表示)

以下の方法に沿って実験を行ない、孔隙像の立体表示を行なった。

まず、供試土壌下端面をベントナイトと濾紙で塞ぎ、供試土を水で飽和した。造影剤を適量(1~2cc)滴下して、ベントナイトから水分が乾燥蒸発するに従って置換浸潤させた。

次に、試料台にフィルムを置き、その上に供試土を置いて、簡易ステレオ写真撮影(1管球固定・1試料水平移動方式)を行なった(図-2)。孔隙の三次元表示を行なうためには、試料の移動位置を正確に測定する必要がある。このため、直径約1mmの鉛玉を四つサンプラーに接着させて、その陰影から移動位置を同定した。造影剤

表一 5 透過係数の経時変化 (定水位透水試験, 水頭差: 10cm, 単位cm²)
Table 5 Variation of permeability (Constant head permeability test, head: 10cm, unit: cm²)

供試体番号	時間 (min)					
	5	15	25	35	45	55
A 1	3.92×10^{-11}	5.06×10^{-11}	6.53×10^{-11}	7.44×10^{-11}	1.01×10^{-10}	6.62×10^{-11}
B 1	5.02×10^{-11}	7.24×10^{-11}	6.13×10^{-11}			

表一 6 異なる水頭差での造影剤の移動速度 (v) と平均直径 (d)

Table 6 Contrast agent velocity in the macropores and the mean diameter

供試体番号	水頭差					
	10cm		20cm		30cm	
	v	d	v	d	v	d
	cm s ⁻¹	mm	cm s ⁻¹	mm	cm s ⁻¹	mm
A 1	0.501	0.52	0.966	0.52		
	0.526	0.35	0.725	0.35		
	0.854	1.05	0.901	0.63		
B 1	0.365	0.72	0.874	0.63	1.64	0.72
	0.414	0.74			1.16	0.35
					1.13	0.77
B 2	1.650	0.60	2.607	0.84		
	0.462	0.57				

の浸潤状況を X 線カメラで確認した後, 適当な状態で写真を 3 ~ 4 枚撮影した。なお, 撮影時の管電圧は 75kV, 管電流は 3.5mA, 露出時間は 3 分とし, フィルムはフジ FR を用いた。

現像後, 粗孔隙の陰影が明確で追跡しやすい像が写ったフィルムを選択し, 左右両画像を別々に拡大写真を作成した。次に, その写真から実際に追跡する粗孔隙を選択した。そして, その粗孔隙の屈曲部分・分岐部分などを, コンピュータに座標入力する部位と定めた。左右両写真について, その部位の中心点にそれぞれ印をつけた。その時, 印をつけた位置が左右両写真において全く同じ粗孔隙の位置になるように注意した。その際, 造影剤が抜け落ちた部分は, 他の写真から判断してその孔隙位置を求めた。なお, この点をここでは追跡点と呼ぶことにした。

追跡点の座標はデジタイザを用いて入力した。得られた孔隙の追跡点は, 次式に従い三次元座標に変換した。

$$X = X_1 + (X_0 - X_1) \times \frac{X_2 - X_1}{L + X_2 - X_1} \quad (1)$$

$$Y = Y_0 + \frac{F - Z}{F} \times \left(\frac{Y_1 + Y_2}{2} - Y_0 \right) \quad (2)$$

$$Z = \frac{X_2 - X_1}{L + X_2 - X_1} \quad (3)$$

但し, (X_1, Y_1), (X_2, Y_2): 各々左側写真, 右側写真の追跡点座標, (X_0, Y_0): X 線照射軸の写真撮影台上の垂点, F: X 線焦点と撮影台の距離, L: 供試体の水平移動距離である。

本実験では焦点距離 $F = 60$ cm, 供試体の移動距離 $L = 6$ cm であった。また, 軟 X 線撮影時に垂点の位置に鉛玉を設置し, その陰影から垂点座標を求めた。

2. 5 透過係数の推定

土壌孔隙立体像とビデオ映像から, 造影剤の流動速度を求め, これを用いて「透過係数 (表一 1 の注を参照)」を式 (4) から推定した。

$$k_2 = \frac{\rho g}{\mu A} \sum_{i=1}^n N_i \times \frac{\pi D_i^2 V_i}{4I} \quad (4)$$

但し, A: 試料断面積 (cm), μ : 粘性係数 ($\text{gcm}^{-1}\text{s}^{-1}$), g : 重力加速度 (cms^{-2}), ρ : 密度 (g cm^{-3}), N_i : 本数, D_i : 孔隙直径 (cm), V_i : 造影剤の流速 (cm s^{-1}), I: 動水勾配である。

また, 軟 X 線写真中で連続性に注意しながら粗孔隙を選択し, ポアズィユ式をもととした式 (5) で透過係数を計算した。

$$k_3 = \frac{\pi \rho g}{128 \mu A} \sum_{i=1}^n D_i^4 \quad (5)$$

但し, I: 動水勾配, μ : 水の粘性 (20°C で $1.002 \times 10^{-2} \text{gcm}^{-1}\text{s}^{-1}$), g : 重力加速度 (980cms^{-2}), ρ : 水の密度 (20°C で 0.9982gcm^{-3}) である。

孔隙直径は, 適当な間隔で数点測定した。そしてその算術平均と, 数点の中で最小値を示すものの二種類を求め, 透過係数を比較した。

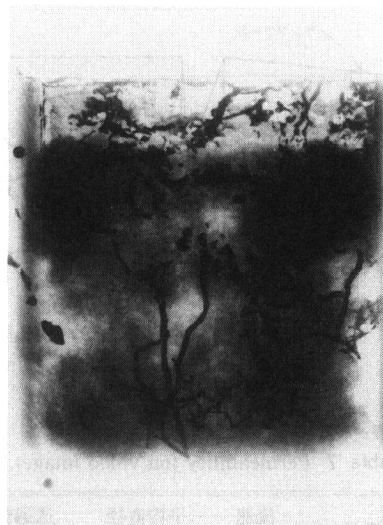
III. 実験結果

3. 1 粗孔隙中の流体の挙動観察

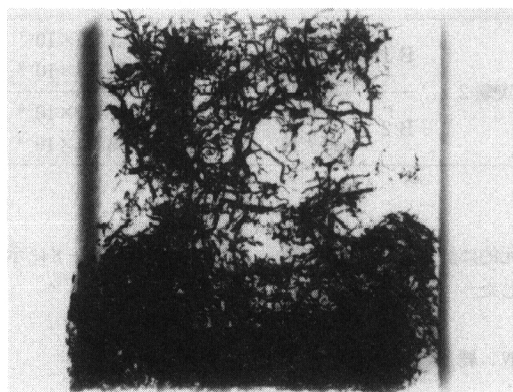
粗孔隙中の造影剤の挙動を軟 X 線透過像にして録画し



写真一 軟X線写真 (実験 1)
Soft X-ray radiograph (Experiment 1)



写真一 3 軟X線写真 (実験 2, B1)
Soft X-ray radiograph (Experiment 2, B1)



写真一 2 軟X線写真 (実験 2, A1)
Soft X-ray radiograph (Experiment 2, A1)



写真一 4 軟X線写真 (実験 2, B2)
Soft X-ray radiograph (Experiment 2, B2)

たビデオ映像から、以下の知見を得た。

- 1) 造影剤の挙動であるとはいえ、土壤中の流体状況を初めて記録することができた。
- 2) 水頭差を変化させると、造影剤の流動経路が変化した。
- 3) 時間経過と共に、造影剤の流動速度は倍近く変化した。
- 4) 造影剤が少量流れる場合、球状になって孔隙内を転がるように動いた。一般に量の多少にかかわらず、造影剤は水と接触面積が小さくなるような形状で流動した。
- 5) 造影剤は、脈動する状態で流れた。その中で、連続して大量に流れる場合は一定速度で流れるが、断続的に少量流れる場合は、主にネック部分で一旦止まり暫くして急に流れるような挙動を示した。

- 6) 造影剤は水より重く、供試体下端面に近くにつれ低位置に集中した。

「実験 2」について、水頭差を変化させた場合の排水量から計算した透過係数を表一 4 に示した。どの供試体も透過係数は水頭差と逆比例するのがわかる。

供試体 A1, B1について、水頭差が10cmの場合の透過係数の経時変化を10分平均で表一 5 に示した。時間と共に透過係数が、供試体 A1では減少し、供試体 B1では増加するのがわかる。

造影剤の挙動が一定となった時点で、同じ流線を通ら

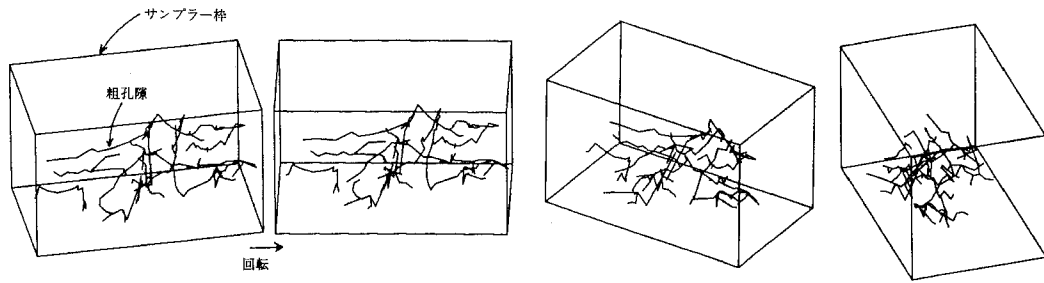


図-3 粗孔隙の3次元回転表示(時計回り)

Fig. 3 Three dimensional display of soil macropores

表-7 透過係数(ビデオ画像による)
Table 7 Permeability (on video image)

供試体番号	流速 cm s ⁻¹	平均直径 cm	透過係数 cm ²
実験 1			3.08×10 ⁻⁹
	0.501	0.052	
A 1	0.526	0.035	1.77×10 ⁻¹⁰
	0.854	0.105	
実験 2			
B 1	0.365	0.072	6.45×10 ⁻¹¹
	0.414	0.074	
B 2	1.650	0.060	1.15×10 ⁻¹⁰
	0.462	0.057	

表-8 透過係数(ステレオ写真による)
Table 8 Permeability (on stereoradiography)

供試体番号		孔隙直径 cm	透過係数 cm ²
実験 1	平均	0.062	5.17×10 ⁻⁸
	最小値	0.041	9.88×10 ⁻⁹
	最大値	0.063	4.59×10 ⁻⁹
実験 2	平均	0.146	1.29×10 ⁻⁷
	最大値	0.063	4.59×10 ⁻⁹
	平均	0.126	7.19×10 ⁻⁸
	最大値	0.067	5.64×10 ⁻⁹

ないように選択した造影剤の経路について、その流速を測定して表-6にまとめた。この表から、造影剤の流速は、水頭差が増加するにつれて上昇し、孔隙径との相関性は弱いことがわかる。

3. 2 土壌孔隙の立体表示

画像立体化の対象とした写真を写真-1~写真-4に示す。そのうち、「実験1」及び「実験2」のB1, B2の3供試土壌のステレオ写真を用いて立体画像化を行ない、「実験1」について図-3に示す。このような画像をパソコンのディスプレイに回転表示させることで、孔隙の立体的な連続状態を観察できる。また、その三次元座標から孔隙の長さなどを計算できる。なお、「実験2」のA1は、造影剤が供試土壌内で点状・面状に広がり、孔隙を認識し追跡点を求めるのは困難であるため、画像立体化は断念した。

粗孔隙の長さとして表-6及び式(4)をもとに、造影剤の流動速度から透過係数を推定し、表-7に示した。なお、「実験1」、「実験2」の動水勾配Iは各々4.8, 2.0である。また、同じ供試土壌を撮影した写真から、ビデオ映像中の造影剤の流動経路を推定し、実際の距離を三次

元的に計算して、式(5)より流速を求めて表-8に示した。

IV. 総合評価

4. 1 「実験1」について

3. で計算した透過係数の結果を表-9に示した。ここで、k₁: 変水位透水試験(JSFT311)の結果、k₂: 造影剤の流速と粗孔隙のデータから求めたもの(式(4))、k₃: 孔隙径(平均値)とポアズィユ式から求めたもの(式(5))、k₄: 孔隙径(最小値)とポアズィユ式から求めたもの、k₅: 粗孔隙に関して、径の異なるパイプラインを直列に接続したものと考えて計算した結果である。

透過係数のオーダーは全て同じであり、数本の粗孔隙で透過係数は大きく決まると思われる。そのうちk₂はk₁の約0.24倍である。この理由は、造影剤は水より重く流動の際下向きの孔隙を通過するため、ビデオ映像中の造影剤の流動経路とステレオ写真の陰影とが一致しないからと考えられる。また、k₃~k₅をk₁と比較する限り、粗孔隙径の最小部分が透過係数を支配するものと思われる。その他に、各々の透過係数の値が異なる理由として、

- 1) データの読み取り誤差

表一9 透過係数の比較 (実験1, 単位: cm^2)
Table 9 Comparison of permeabilities (test 1, unit: cm^2)

	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5
透過係数	1.31×10^{-8}	3.08×10^{-9}	5.17×10^{-8}	9.88×10^{-9}	2.99×10^{-9}
k_1 との比	1	0.24	3.95	0.75	2.28

表一10 透過係数の比較 (実験2, 水頭差: 10cm, 単位: cm^2)
Table 10 Comparison of permeabilities (test 2, head: 10cm, unit: cm^2)

供試体番号		k_1	k_2	k_3	k_4
A 1	透過係数	9.46×10^{-9}	1.77×10^{-10}	—	—
	k_1 との比	1	0.0187		
B 1	透過係数	9.72×10^{-9}	6.45×10^{-11}	1.29×10^{-7}	4.59×10^{-9}
	k_1 との比	1	0.0066	13.3	0.47
B 2	透過係数	8.21×10^{-9}	1.15×10^{-10}	7.19×10^{-8}	5.64×10^{-9}
	k_1 との比	1	0.0140	8.76	0.67

2) ジョードメタンと水との物理性の差異

3) 計算を簡略化するために設けた前提条件が挙げられる。

4. 2 「実験2」について

「実験2」における変水位透水試験で得られた透過係数 (k_1) に対する実際の孔隙径から計算した透過係数 ($k_2 \sim k_5$) の比 (表一9) は、「実験1」におけるそれより (表一10) も値が極端に異なる傾向を示す。その中で、 k_2 はどの供試土壌でも k_1 の2%以下である。この原因として次の点が考えられる。

1) データの読み取り誤差

2) 造影剤の流路が互いに異なる

サンプラーの断面積が「実験1」, 「実験2」で各々異なり、また動水勾配も各々4.8, 2.0と異なっている。このため、2) の原因として比重差による造影剤の下方への流動経路選択の自由度が「実験1」より「実験2」の方が大きいことによると考えられる。

k_3, k_4 についても、その差の原因は k_2 と同様であると考えられる。

4. 3 土壌孔隙画像の評価

写真一1~写真一4を見て分かる通り、供試土壌層位のA層とB層はかなり違った構造を示す。造影剤の流動を記録したビデオ映像を見ても、A層では造影剤は土壌全体にわたって浸潤している。これは、A層は風化および動植物の影響を受け易く、多数の粗孔隙および微細孔隙が連続していることの反映と思われる。一方、B層

では造影剤は粗孔隙を中心に浸潤している。これはA層に比較して、小数の粗孔隙が存在しているためと考えられる。

ビデオ映像を見る限り、造影剤の流動が顕著な孔隙はA層・B層ともに数本に限定される。この孔隙は太さや方向、屈曲度などに共通点がなく、水頭差を変化させると流動経路が変化する孔隙も存在した。その様子から、孔隙の連続性及び流動させる際の駆動力 (水頭差, 重力等) が流動経路を決める重要な因子になると考えられる。

図一3は、土壌孔隙の骨格を立体回転表示させた例である。写真一3と比べると主要な孔隙形状の傾向を比較的良く表わすと考えられる。

残された課題として、現在のような画像解析手法では、土壌孔隙の立体化の際の追跡点の特定など正確な結果を得るための測定にかなりの労力が要求される。そのため、様々な試料を数多く分析することは困難である。

V. おわりに

以上、まとめると次のことがいえる。

1) 土壌中の粗孔隙を流体が通過する様子を初めて記録できた。流体の動きを造影剤の陰影から判断しており、水も全く同じ流動を示すとは考え難いが、流動体 (造影剤・水) が孔隙や間隙を連絡して脈動して流れる様子をはっきりと確認できた。

2) 土壌孔隙のステレオ写真から、孔隙の骨格部分の立

体画像を作成した。また、土壌孔隙の立体的な連続状況や実際の長さなどを観察・測定できた。

3) 本研究で示した実験方法・画像解析手法では、追跡点の同定などかなりの部分が自動入力できずに手入力に頼る必要があり、正確な結果を得るためにかなりの労力が必要であった。

今後、造影剤と水の性質の違いを考慮して流動状況进行分析し、本研究で試作した土壌孔隙画像処理システムの完成度を高める予定である。

研究の遂行にあたり、岩手大学徳永光一教授、東京農業大学成岡市博士、岐阜大学西村直正助手らに助言及び協力を頂いた。記して感謝の意を表す。また、この研究は文部省科学研究費(一般研究 A 代表者丸山利輔課題番号01420043)の補助を受けたことを付記する。

参 考 文 献

- 1) E. C. Childs ら: The permeability of porous materials, Proc. Roy. Soc. (A201), pp. 392-405 (1950).
- 2) T. J. Marshall: A relation between permeability and size distribution of pores, J. Soil Science, 19, 1, pp. 1-8 (1958).
- 3) 中野政詩: 土の水分量と毛管張力との関係(脱水過程)一理論一, 農土論集 (35), pp. 1-9.
- 4) 徳永光一ら: 重液浸入法の開発とそれによる土壌間隙の軟 X 線透写像についての考察, -X 線透写像による土壌と間隙に関する研究 (I) -, 農土論集 (114), pp. 61-68 (1984).
- 5) 徳永光一ら: 粘質水田土の粗孔隙の実体と透水性について, -X 線透写像による土壌と間隙に関する研究 (II) -, 土壌の物理性 (51), pp. 49-59 (1985).
- 6) 徳永光一ら: 火山灰下層土における粗孔隙の根成的特徴について, -立体視による孔隙の軟 X 線透写像の観察一, 農土論集 (126), pp. 75-80 (1986).
- 7) 成岡 市: 軟 X 線映像による土壌孔隙の立体計測法, 農土誌 53 (9), pp. 841-847 (1987).
- 8) 岩間憲治ら: 土壌の MICROMORPHOLOGY, 第29回土壌物理研究部会報告集, pp. 70-84 (1990).
- 9) 岩間憲治ら: 軟 X 線による土壌孔隙の測定と土壌物理性の評価, 平成3年度農業土木学会大会講演要旨, pp. 116-117 (1991).
- 10) 日本非破壊検査協会: 非破壊検査便覧[新版], 日刊工業新聞社 (1986).

(受稿年月日1992年1月17日)