

軟 X 線による非破壊土壌中の排水機構の解明

森 也寸志*

Characterizing Drainage Process of Structured Soils using Soft X-ray Radiography

Yasushi MORI*

Faculty of Life & Environmental Science, Shimane University

1. はじめに

我々の足下にある土壌には大小さまざまな間隙があり、通水、通気、また保水の役割を果たしている。しかしながら、一般に土壌間隙は、植物根の伸長・枯死、土壌動物の活動、膨潤・収縮などにより不均一な構造を持っている。その空隙が大きいものはマクロポアまたは粗間隙と呼ばれ、逆にそれ以外の密につまった微細間隙から成る部分をマトリックスと呼んでいる。マクロポアは水が迅速に流れる経路となることが多いため、従来の平均化された均一な水移動の解析手法が使えず、土壌汚染などの溶質移動を解明または予測する際には大きな障害となっている。

単純には、水みちを染料で着色することができる（例えば Bouma and Dekker, 1978）。しかしこの手法は、試験後に試料をスライスして染色部分を観察しなければならず、リアルタイムで水移動を観察することはできなかった。現象の的確な理解には、非破壊でこの移動をとらえる必要がある。

放射線ならば土壌を破壊することなく内部を観察することが可能である。ガンマ線は²⁴¹Amなどの放射性同位元素が入手しやすいこと、単一光であること、などから非破壊検査に使うことができた。しかし、放射性同位元素からの光量は微量であるため露出時間を要し、得られる情報は土壌の密度、水分量など静的なものに限定されていた（例えば Aylmore, 1993）。

医療用 X 線 CT を使って直接水移動を観察する例もある。しかしながら、出力が土壌に対して調整されているわけではない。また、撮影上の機械的な限界や逆解析のアルゴリズムの問題から、三次元構造を再構築する手法では十分な解像度は得られず、最高でもその解像度は

1 mm 程度と言われていた（例えば Hopmans *et al.*, 1994）。植物根の直径はこれより小さく、農地でおこであろうマクロポア流、それに続く排水過程を詳細に観察・解析するためにはさらに高精細な画像を得る必要があった。

一方、我が国では徳永ら（1984）、成岡ら（1988）によって軟 X 線を使った土壌粗間隙の造影手法が示された。土壌粗間隙のステレオ撮影（徳永, 1995）によって、根成孔隙が土壌中で卓越することがわかり、その形態の特徴が明らかにされた。さらに土壌間隙の三次元解析法（成岡, 1987; 岩間ら, 1996）も紹介されている。解像度数十 μm の軟 X 線写真写真は微細な孔隙の観察には最適で、水田耕作方法の吟味（佐藤ら, 例えば 1992）、浸透特性の解明（佐々木, 1991）などに利用されている。このように軟 X 線は、土壌粗間隙の形態学的な考察に使われてきた。

筆者は、造影剤をトレーサとして、ラジオグラフィーによって土壌中の透水現象を可視化することを考えた。土壌間隙が水移動に影響する様子を具体的に表し、その成果の一部を Soil Science (Mori *et al.*, 1999 a) や Soil Science Society of America Journal (Mori *et al.*, 1999 b) に発表した。ここでは特に土壌からの排水過程について筆者の行ってきた研究を紹介する。

2. 排水過程の軟 X 線ラジオグラフィー

土壌間隙構造は土地利用によって異なる（森ら, 1992）ため、水移動形態も土地利用ごとに異なると判断した。そこで、灰色低地水田土壌、くろぼく畑地土壌、褐色森林土壌を現場から非破壊で採取し実験に供した（表-1）。軟 X 線を平均的に透過させるため、5 cm 角で筒状の立方体ジュラルミンサンプラーを用い、撮影には側方照射

* 島根大学生物資源科学部 〒690-8504 松江市西川津町 1060
 キーワード: マクロポア, バイパス流, 軟 X 線, 二重間隙

表-1 非破壊土壌の物理性

Table 1 Physical properties of undisturbed core samples

Soil	Paddy soils		Field soils		Forest soils	
Samplig depth (cm)	20	50	30	50	30	70
Soil texture	LiC	CL	SL	LS	L	L
Ks ($m s^{-1}$)	6.60×10^{-8}	5.57×10^{-6}	4.00×10^{-4}	5.85×10^{-5}	2.47×10^{-4}	1.16×10^{-4}
Porosity ($m^3 m^{-3}$)	0.469	0.552	0.750	0.727	0.715	0.634
Macroporosity ($m^3 m^{-3}$)	0.032	0.021	0.097	0.051	0.150	0.120
Bulk density ($Mg m^{-3}$)	1.41	1.33	0.64	0.74	0.74	0.95

表-2 ジョードメタンと水の物理性の比較

Table 2 Physical properties of CH_2I_2 and water

Material	Specific gravity	Kinematic viscosity ($10^{-6} m^2 s^{-1}$)	Viscosity ($10^{-3} Pa s$)	Surface tension ($10^{-3} N m^{-1}$)
CH_2I_2	3.32	0.818	2.716	3.572
H_2O	0.998	1.004	1.002	7.275

型軟 X 線非破壊検査装置 (AW-100 特, SOFTEX) を使用した。これは土壌水が鉛直下方に流れる際の移動を容易に観察できるように軟 X 線が側方から照射されるように改良した装置である。

強い放射線 (医療用 CT やガンマ線) はその吸収量が鉱物によらず、水分量や乾燥密度とほぼ比例するために、これらの定量化に向く。逆に吸収が物質によらないため、コントラストがつかず高解像度の画像は望めない。一方、弱い X 線は物質によって X 線吸収に違いが出るため、高解像度の写真を望むことができる。物質量の定量化には工夫が必要であるが、造影剤を使えば透水現象を効果的に可視化できる。常温で液体であること、密度が土壌の乾燥密度より大きいことを条件に探し、ジョードメタン (CH_2I_2) が造影剤としての的確であると判断した。表-2 より、比重が水の 3 倍あるものの動粘性は水のそれに近く、表面張力が水より小さいという特性を持つことがわかる。つまり、粘性の違いを考慮する必要があるが、水が浸入するところには同様に浸入できるため水移動のトレーサの一つとして利用可能である。移動する造影剤の軌跡を追うため、撮影時間が短くなるように高感度 X 線フィルム Fuji IX-150 を使用した。

図-1 に示す装置に土壌を装填し、飽和させた後、自動圧力調節器で負圧をかけ、排水試験を行った。飽和土壌からの排水過程を可視化することで、土壌構造が不飽和状態での水移動に与える状況を調べた。飽和土壌の上面を薄く覆う程度に造影剤を湛剤しておく土壌水の排水と併に造影剤が土壌内に引き込まれていき、排水後退線の移動する様子が造影される。これを一定時間毎に撮影

した。撮影された画像の時間毎の差分を取ると造影剤の移動の様子、すなわち排水面の進行の様子がとらえられる。これはサブトラクションと呼ばれる技法の応用で、同技法は医療診断においては効果的な血管造影のために使われている。骨や脂肪をマスク画像として減算すると、目的とする血管を鮮明に浮かび上がらせることができる (香川, 1997)。

また、実験は One-step または Multi-step outflow 試験 (Kool *et al.*, 1985; Parker *et al.*, 1985; Eching and Hopmans, 1993) にのっとって行い、逆解析から不飽和透水係数も同時に求められるようにした。これにより従来の透水係数の概念が画像とどう関わるのか調べることができる。使用した不飽和透水係数のモデルは van Genuchten 式 (van Genuchten, 1980) の Mualem モデル (Mualem, 1976) で、以下のように表される。

$$S_e = (1 + |ah|^n)^{-m} \quad (1)$$

$$S_e = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r) \quad (2)$$

$$K(\theta) = K_s S_e \left[1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^2 \right] \quad (3)$$

ここで S_e は有効飽和度 ($0 \leq S_e \leq 1$)、 K_s ($m s^{-1}$) は飽和透水係数、 θ_s ($m^3 m^{-3}$) は飽和水分量である。また、 a (cm^{-1})、 n ($m = 1 - 1/n$)、 θ_r ($m^3 m^{-3}$) は実験によって定められるパラメータである。 l は 0.5 と仮定した。

排水に要したサクションは水田土壌で 31.6 kPa、畑地、森林土壌で 10 kPa であった。なお、予備実験をあらかじめ行ったところ、 CH_2I_2 は水を追い越して土壌内に浸入することはなく、また、水が排水された領域には容易に浸入できることを確認した。すなわち、排水形態を

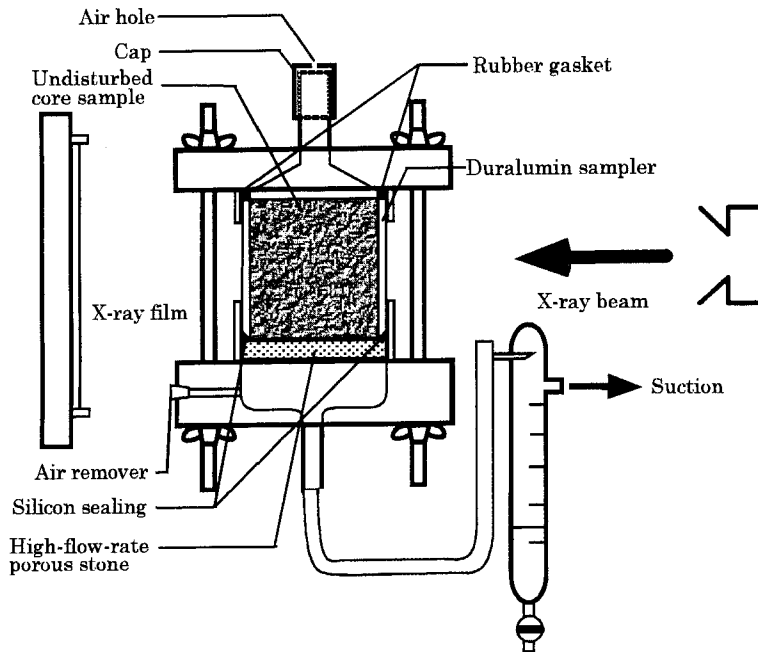


図-1 排水試験の軟 X 線ラジオグラフィー

Fig. 1 Soft X-ray radiography in combination with outflow experiment.

調べる目的であればトレーサとしての問題はあまり生じない。

3. 土壌間隙構造が排水過程に及ぼす影響

図-2 に排水試験中の空隙の広がりを示した。さきに記述したとおり造影剤によって造影された部分が排水の進行を表している。まず、水田では鉛直に独立に発達した管状孔隙が、畑地ではネットワークをくんだ管状孔隙が、森林では団粒間隙が卓越することがわかった。そして、土地利用による水移動形態の違いがあり、水田や畑地土壌では、管状孔隙、次いで団粒間隙、最後に土壌マトリックスと排水が進行しており、間隙構造が排水形態に大きく影響していることがわかった。とりわけ水田土壌については排水順序が明瞭であった。一方森林土壌では土壌全体からの排水が進行するだけで、明瞭な排水傾向は観察されなかった。

管状孔隙は明瞭な直線形状、土壌マトリックスは曖昧な雲状と形状が大きく異なるため分離が用意であった。そのため計測された排水量に対して、どの間隙が機能しているかを形状毎に調べた。すると水田土壌と畑地土壌では管状孔隙から土壌マトリックスへの排水過程の変化が画像上で明確に区別でき、そのときの排水量は間隙量割合にして水田土壌で 6% (試料体積割合で 3.3%)、畑

地土壌で 10% 位 (同 7.5%) であった。この数値は表-1 の粗間隙率 (2.1%, 9.7%) によく一致した。つまり、土壌からの排水は、管状孔隙がよく発達している場合、まず管状孔隙から排水が進み、ついで周辺のマトリックスへと排水が進むことが明らかとなった。

4. 土壌間隙の二重構造性

積算排水量から逆解析によって推測された不飽和透水係数を図-3 に示した。飽和透水係数 (以下 K_s と略記) は通常実測値として与えられている。しかしながら、 K_s を固定値として与えると解の収束が極めて不安定になることがわかり、これも変数であると仮定して解析を行った。図では、実測の K_s を圧力 $1 \text{ cmH}_2\text{O}$ の部分にプロットした。すると不飽和部分と飽和部分で透水係数が不連続に変化する試料が見られた。この傾向は畑地でも見られたもの特に水田土壌で強く 1 オーダー以上の違いがあった。これはさきの土壌間隙構造の影響であると考えられた。つまり飽和状態では管状孔隙の存在によって飽和透水係数が大きく決定される。ついで、その間隙からの排水が終了したあと周囲の土壌マトリックスからの排水になる。しかし、そこは密に土壌が充填されているために、ある一定の負圧になるまではマトリックスからの排水は生じない。排水が始まったマトリックスはマクロ

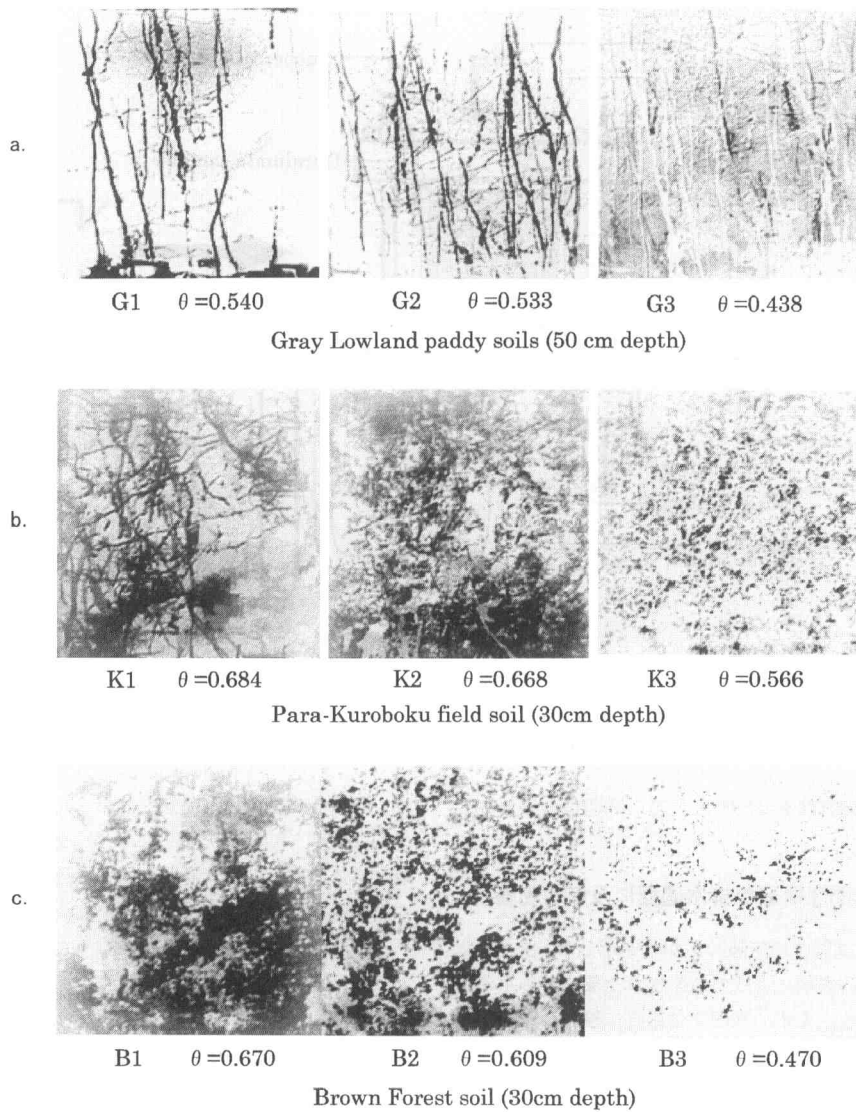


図-2 造影剤の移動で見た排水過程の進行 (a. 水田土壌, b. 畑地土壌, c. 森林土壌)
(Mori *et al.* (1999b) より)

Fig. 2 Time sequential drainage patterns of paddy soil (a), upland field soil (b), and forest soil (c).
After Mori *et al.* (1999 b).

ポアとは物理的に全く異なる存在であるから透水係数も当然異なる。これによって不連続点が生じると考えられた。また、今回使用した Mualem-van Genuchten 式はこのような構造上の不連続性を想定していない。このため、マクロポアの透水特性となる K_s を不飽和透水係数の推定に使用すると解が不安定になるものと考えられた。

これらは先に軟 X 線画像から得られた各土壌の排水

傾向とよく一致する。これは概念的には二重間隙モデルといわれており、Gerke and van Genuchten (1993) は図-4 のような透水係数の分布モデルを提案している。マクロポアは体積としてはわずかであるため、pF 試験でこの特徴を抽出することは難しい。この特徴はむしろ速さを指標とする透水係数のグラフでははっきり示される。今回はこれを間隙構造の特性・数値解析両者から示せたことになる。先のデータで言うならば、(b) の曲線 3 と

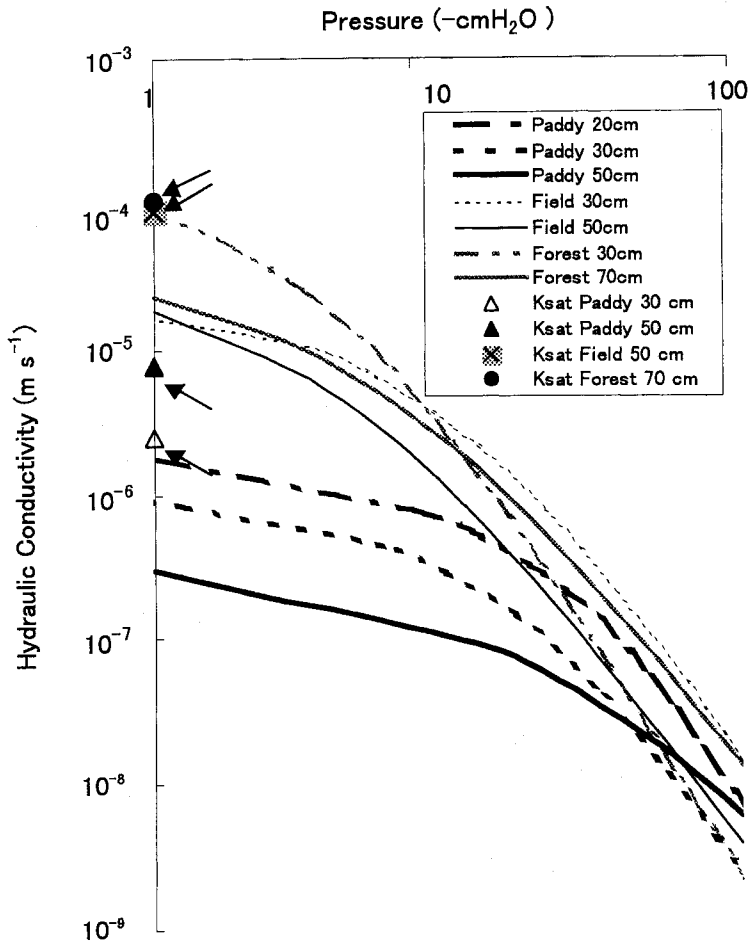


図-3 逆解析によって得られた不飽和透水係数
矢印先のドットは実測の飽和透水係数
(Mori *et al.* (1999 b) より)

Fig. 3 Optimized unsaturated hydraulic conductivity.
Saturated hydraulic conductivity was drawn as single markers (see arrow). After Mori *et al.* (1999 b).

縦軸の交点に K_s がプロットされ、そこから不連続に下がった位置から曲線 2 が始まるような現われ方をしたことになる。さらに、管状孔隙を流れる飽和流の速さを造影剤の移動速度から推測すると、レイノルズ数が 10 を越え、層流から乱流への遷移状態に近いことが確認された。このように土壌の中には二重間隙構造を持つものがあり、そのうち管状孔隙を持つものについては、環境負荷物質の移動モデルを作成する際には特に考慮する必要がある。つまり、通常仮定される移流・分散方程式はもちろん、動・不動水 の概念を用いたモデル (Coats and Smith, 1964; van Genuchten and Wierenga, 1976) でも、いずれも粘性項が卓越することが仮定されており、

慣性項の影響が無視できない移動は想定されていない。また、これまでは領域を二分割するだけにとどまっていたが、今後は更にマクロポアの形状、マクロポア・マトリックス間の連続性の問題にも焦点を当てる必要があると考えられた。

5. まとめ

水移動は土壌間隙構造に大きく影響され、排水傾向には管状孔隙から土壌マトリックスへという順序が存在することがわかった。この変化点は粗間隙量とよく一致し、飽和から不飽和への透水係数の不連続点として現れることが逆解析からわかった。飽和時に管状孔隙が強く

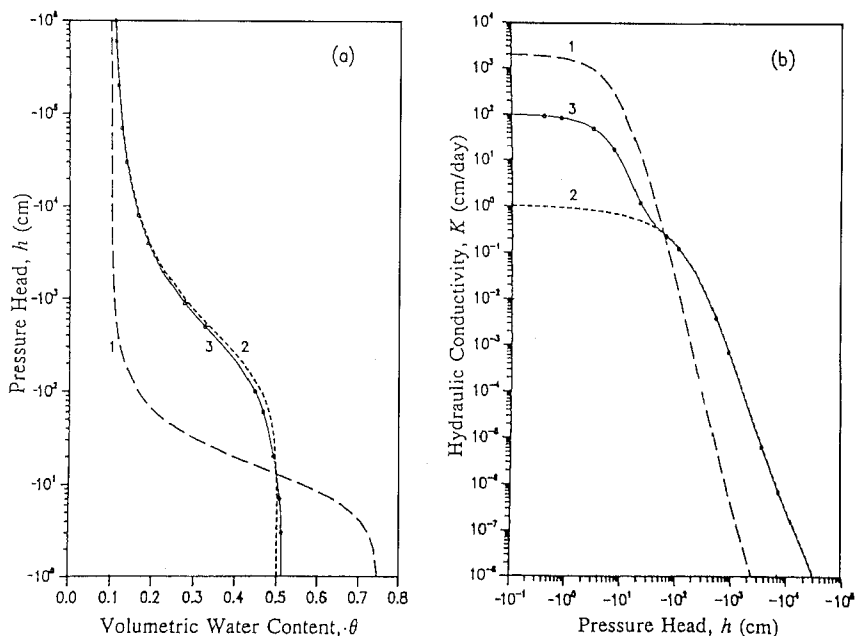


図-4 二重間隙モデルの土壌水分特性曲線 (a) と透水係数 (b)
1: マクロポア, 2: マトリックス, 3: 土壌総体
(Gerke and van Genuchten (1993) より)

Fig. 4 Hydraulic properties of a dual-porosity medium: (a) Retention and (b) hydraulic conductivity of macropore (1), matrix systems (2), and total porous medium (3).

After Gerke and van Genuchten (1993).

機能する場合には不連続の度合いが強く、団粒間隙が発達している場合は不連続の度合いが小さいことも示された。土壌間隙の二重構造性を立証するデータが得られ、物質移動の解明に役立つことが期待された。

また、徳永、成岡らに始まる軟X線造影法を動的な現象に応用し、発展の方向性を示すことができた。軟X線造影法は、土壌中の物質移動のメカニズムを目に見える形で示し、今まで不明であった現象を明らかにする可能性を持つ。本研究手法が土壌に関わる問題解決の一手段として利用されることを期待したい。

謝 辞

本研究を遂行するに当たり、軟X線非破壊検査装置は、京都大学農学部水環境工学分野所有のものを使用させていただいた。京都大学名誉教授、現石川県農業短期大学の丸山利輔学長、京都大学農学研究科の三野 徹教授のご提案・ご厚意に深謝申し上げます。

参 考 文 献

Aylmore, L.A.G. (1993): Use of computer-assisted

tomography in studying water movement around plant roots. *Advances in Agronomy*, Vol. 49: 1-54.

Bouma, J and L.W. Dekker (1978): A case study on infiltration into dry clay soil. 1. Morphological observations. *Geoderma*, 20: 27-40.

Coats, K.H., and B.D. Smith (1964): Dead-end pore volume and dispersion in porous media. *Soc. Petrol. Eng. J.*, 4: 73-84

Eching, S.O. and J.W. Hopmans (1993): Optimization of hydraulic functions from transient outflow and soil water pressure data. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57: 1167-1175.

Gerke, H.H. and M.T. van Genuchten. (1993): A dual-porosity model for simulating the preferential movement of water and solutes in structured porous media. *Water Resour. Res.* 29: 305-319.

Hopmans, J.W., M. Cislerova, and T. Vogel (1994): X-ray tomography of soil properties. *Soil Sci. Soc. Am. Special Publication no.* 36: 17-28.

- Kool, J.B., J.C. Parker and M. Th. van Genuchten. (1985): Determining soil hydraulic properties from one-step outflow experiments by parameter estimation: I. Theory and numerical studies. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **49**: 1348-1354.
- Mori, Y., K. Iwama, T. Maruyama and T. Mitsuno. (1999 a): Discriminating the influence of soil texture and management-induced changes in macropore flow using soft X-rays. *Soil Science*, **164**: 467-482.
- Mori, Y., T. Maruyama and T. Mitsuno. (1999 b): Soft X-ray radiography of drainage patterns of structured soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **63**: 733-740.
- Mualem, Y. (1976): A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.* **12**: 513-522.
- Parker, J.C., J.B. Kool and M. Th. van Genuchten (1985): Determining soil hydraulic properties from one-step outflow experiments by parameter estimation: II. Experimental studies. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **49**: 1348-1354.
- van Genuchten M. Th. and P.J. Wierenga (1976): Mass transfer studies in sorbing porous media, I. Analytical solutions. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **40**: 473-481.
- van Genuchten, M. Th. (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **44**: 892-898.
- 岩間憲治, 堀野治彦, 丸山利輔, 渡邊紹裕 (1996): 土壌孔隙構造の3次元分布解析と孔隙特性の定量化, *農土論集*, **182**: 103-108.
- 香川 威 (1997): X線の医学利用, X線ハンドブック, 電子科学研究所: 369-371.
- 佐々木長一 (1991): 火山灰下層土の限界間隙に関する研究, *農土論集*, **151**: 65-73.
- 佐藤照男 (1992): 不耕起栽培による低湿重粘土水田の土地改良と汎用化の展望, *農土誌*, **60** (8): 11-16.
- 徳永光一, 成岡 市, 深谷高俊 (1984): 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**: 61-68.
- 徳永光一 (1995): 土壌間隙の X線立体造影法, 畑地農業振興会.
- 成岡 市 (1987): 軟 X線映像による土壌孔隙の立体計測法, *農土誌* **55** (9): 29-35.
- 成岡 市, 駒村正治, 高須俊行 (1988): 立川ルームにおける管状孔隙が地下水涵養に果たす役割. 土壌の物理性, **56**: 2-13.
- 森也寸志, 志賀慎子, 岩間憲治, 渡邊紹裕, 丸山利輔 (1992): 土地利用による土壌間隙構造の差異—軟 X線による観察を中心にして—, 土壌の物理性第66号: 19-27.

受稿年月日: 2000年1月31日

受理年月日: 2000年2月29日