

# 常陸太田試験地におけるマクロポアの形態学的特徴と 選択的流出経路の分布に関する研究

野口 正二\*

## Morphological Characteristics of Macropores and the Distribution of Preferential Flow Pathways at Hitachi Ohta Experimental Watershed

Shoji NOGUCHI

\* Forestry and Forest Products Research Institute

### 1. はじめに

自然斜面の水移動は一般的に一様とはならず、水がよく透るところと透らないところが存在する。特に、林地斜面ではマクロポア・パイプが多く存在し、地中における水移動経路を複雑にしている。これらマクロポア・パイプに関する研究は、数多く報告され、マクロポア・パイプからの流出が洪水時の重要な構成要素であることが認識されている (Tanaka *et al.*, 1988; Tsukamoto and Ohta, 1988; 北原・中井, 1992; Sidle *et al.*, 1995)。

土壌のマクロポア・パイプの構造に関する研究は、実験室レベルでいくつかの方法によって調べられてきた。代表的な手法としてコンピュータ化断層撮影法 (CT) を用いた方法 (Anderson *et al.*, 1990; Joschko *et al.*, 1993) や軟 X 線を用いた方法 (Tokunaga, 1988; 成岡, 1990) が挙げられる。また、その他の手法として樹脂や石膏を用いて調べた報告がある (北原, 1989; Mortan *et al.*, 1989; Singh *et al.*, 1991)。

土壌のマクロポアに関する物理的特性の空間的平均値を得るためには、比較的広い領域 (およそ 1-10 m) を調査する必要があると Beven and Germann (1981) は指摘している。しかし、実験室レベルで行われる上記の方法は 1-10 m のスケールで適用することが不可能であり、得られた情報は野外土壌におけるマクロポア・パイプの平均的な特徴を把握しているとは言い難い。一方、土壌断面の観察により 1-10 m スケールでマクロポアの調査が実施されてきた (Jones, 1978; 北原ら, 1988; Tsukamoto and Ohta, 1988)。しかし、これらの報告は

マクロポアの直径や密度に関するもので、その他の形態学的特徴に関する情報は十分でない。また、染料を用いて 1-10 m スケールで、マクロポア・パイプを含む地中の選択的流出経路についても調査されてきた (Bouma and Dekker, 1978; 波多野ら, 1983; van Stiphout *et al.*, 1987)。しかし、これらの報告は農地での適用が多く、場が異なる林地斜面での適用例はあまり多くない。林地斜面での地中水の挙動を明らかにし、マクロポアを含む流出モデルの構築を図るため、マクロポアの勾配・方位・長さ・屈曲度などの形態学的特徴や地中での選択的流出経路を明らかにすることが重要な課題の一つである。

著者は、林地斜面の土壌断面におけるマクロポアの密度、直径、勾配、方位について調査し (Noguchi *et al.*, 1997 b)、さらに、斜面長 2 m の土壌セグメントを対象にマクロポアの長さや屈曲度を測定した (Noguchi *et al.*, 1999)。加えて、2 つの染色方法を用いてその土壌セグメントにおける選択的流出経路の分布を調査した (Noguchi *et al.*, 1999)。本報では、これらの研究を紹介し今後の研究課題について考える。

### 2. 試験地の概要及び試験方法

#### 2.1 試験地の概要

本研究は、常陸太田試験地 (HO: 36° 34' N, 140° 35' E, 15.68 ha) 内の 8 ヶ所 (A~H) と流域外の 1 ヶ所 (I) を対象に実施された (図-1)。本試験地の年間平均降水量は 1,485 mm で、地質は緑色変成岩である。流域 HB (2.48 ha) は 1919 年頃植栽されたスギ・ヒノキで覆われ

\* 森林総合研究所森林環境部

〒305-8687 茨城県稲敷郡笠崎町松の里 1

キーワード: 林地, マクロポア, 形態学的特徴, 選択的流出経路

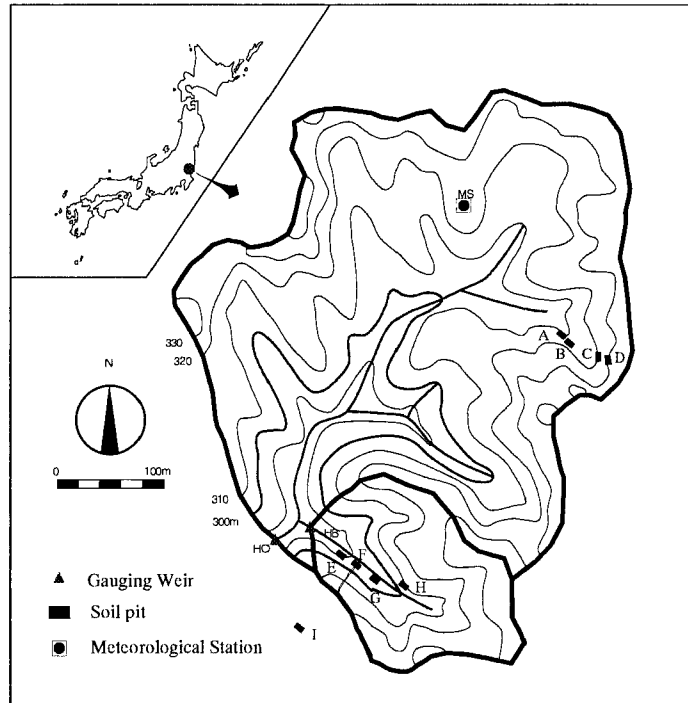


図-1 調査対象地の位置と地形図

Fig. 1 Location and topographic maps of observation sites.

表-1 土壌断面 F における A 層と B 層の土壌物理特性

Table 1 Physical properties of the A and B soil horizons at soil profile F

層位	砂	シルト	粘上	密度	飽和透 水係数	圧力	水頭に	対する	体積含	水率	(Mpa)
	(0.02-2mm)	(2-20 $\mu$ m)	(<2 $\mu$ m)			0	-0.0031	-0.0098	-0.0309	-0.0491	-0.0980
	%	%	%	Mg m <sup>-3</sup>	ms <sup>-1</sup>	m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>					
A	50.3	33.6	16.1	0.690	2.9 $\times 10^{-4}$	0.765	0.503	0.445	0.388	0.360	0.323
B	47.3	36.8	19.5	0.857	3.1 $\times 10^{-4}$	0.695	0.421	0.374	0.324	0.304	0.271

ている。また、流域 HB を除く領域は 1985~1986 年に皆伐され、翌年の 1987~1988 年にスギ・ヒノキが植栽された。調査地 F における土壌物理特性の測定結果を表-1 に示す。土壌断面は有機物層を含む A 層が薄いことが特徴である (表-2)。

## 2.2 試験方法

マクロポアの定義に関する統一見解はなく、マクロポアの語句に対して各研究者によって異なった定義がなされている (Luxmoore *et al.*, 1990)。また、土壌におけるパイプとマクロポアの語句を明瞭に区別するための統一見解もなく、一般的に径が大きいマクロポアがパイプと考えられている (Anderson and Burt, 1990)。本調査に

おいては、土壌断面におけるマクロポアを目視により識別し、直径 2 mm 以上、長さ 20 mm 以上を対象として測定を行った。

調査地 A~I において、土壌断面 (幅 100~160 cm) を人力で可能な深さまで掘削し、その断面に対して、1) マクロポアのマーキング、2) 土壌断面に 10 cm の格子をかけ、マクロポアの位置および土壌層位の測定、3) 定規 (最小スケール: 1 mm) を用いてマクロポアの直径の測定、4) アクリル棒 (直径: 2 mm、長さ 10-12 cm) をマクロポアに挿入し、断面におけるマクロポアの勾配および方位として、断面から突き出たアクリル棒に対してコンパスを用いて勾配と方位の測定を行った。測定方法

表-2 土壌断面におけるマクロポアの密度と土層深さ  
**Table 2** Density of macropores on the soil profile and soil depth

場 所	層 位	密度 (macropores m <sup>-2</sup> )					厚さ (cm)
		最小値	最大値	平均値	標準偏差	変動係数	平均値
地点 A-I	断面	5.4	63.9	25.7	19.7	0.77	68.0
	有機物層を含む A 層	0	114.8	26.0	38.5	1.48	7.6
	B 層	6.0	84.0	28.7	24.0	0.84	35.1
	BC 層	1.5	11.5	5.4	4.3	0.80	45.6
地点 F における断面 No. 1~No. 20	断面	16.8	75.1	43.0	16.2	0.38	31.8
	有機物層を含む A 層	36.2	168.1	95.9	40.7	0.42	4.5
	B 層	4.9	78.1	32.9	20.7	0.63	27.3

地点 A-I での結果について地点 F は最初の断面 (No. 1) での測定結果を含む

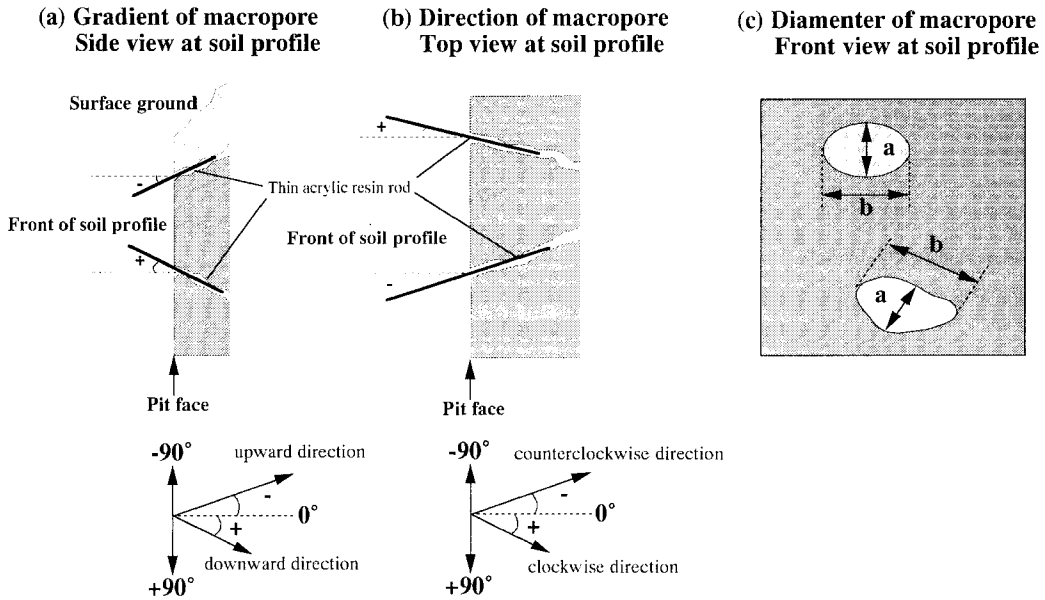


図-2 土壌断面におけるマクロポアの直径、勾配、方位の測定  
 (a) 土壌断面に対して直角をなす方向を 0 とし、上向きと下向きをそれぞれ負および正と定義した。(b) マクロポアの方位は土壌面を 0 とし、時計回りおよび反時計回りの向きをそれぞれ正および負と定義した。(c) “a” および “b” をそれぞれ短・長の直径を示す。

**Fig. 2** Measurement of morphological characteristics of macropores in the soil profile.  
 (a) The gradient of macropores was defined as 0 for orientation perpendicular to the pit face, with the angles in the upper and lower directions assigned negative and positives, respectively.  
 (b) The planar orientation of macropores was defined as 0 for the azimuth angle of the pit face, for clockwise and counterclockwise was assigned positive and negative values, respectively.  
 (c) “a” and “b” are small and large diameters.

の概念図を図-2に示す。さらに、土壌断面のマクロポアの形態学的特徴に対して、異なる空間的スケール（流域内の9地点（A～I）とある1地点）での測定結果を検討するため、調査地Fにおいて、斜距離10cm間隔で斜面上方に向かって20断面（斜面長2m）を対象に同様の調査を行った。その際、土壌断面にマーキングされたマクロポアに粉チョーク（赤、青、黄色）を吹き付けてマクロポアのトレースを行い、マクロポアの長さおよび屈曲度を求めた。なお、近接するマクロポアをトレースする際、異なる色の粉チョークを使用した。調査地Fにおける20断面のマクロポアを対象とし、マクロポアの離心率 ( $Ecc$ ) および屈曲度 ( $T$ ) を以下の式から求めた。

$$Ecc = [(d_i/2)^2 - (d_s/2)^2]^{0.5} / (d_i/2) \quad (1)$$

ここで、 $d_i$  と  $d_s$  はそれぞれマクロポアの最大直径と最小直径である。また、

$$T = \sum l_i / L \geq 1 \quad (2)$$

ただし、

$$\sum_{i=1}^{n-1} l_i = \left[ \sum_{i=1}^{n-1} (x_i - x_{i+1})^2 + (y_i - y_{i+1})^2 + (z_i - z_{i+1})^2 \right]^{0.5} \quad (3)$$

$$L = [(x_c - x_b)^2 + (y_c - y_b)^2 + (z_c - z_b)^2]^{0.5} \quad (4)$$

ここで、 $L$  は各マクロポアの起点 ( $x_b, y_b, z_b$ ) から終点 ( $x_c, y_c, z_c$ ) までの直線距離、 $l$  は土壌断面上のマクロポア

アをトレースした距離、( $x_i, y_i, z_i$ ) は断面*i*における位置、 $n (\geq 3)$  はマクロポアをトレースした際の土壌断面の数である。 $n \geq 3$  のマクロポアに対して、式(2)から屈曲度を求めた。マクロポアの長さは、 $n=1$  のとき土壌断面から消失した位置までの距離で、 $n \geq 2$  のとき式(3)から求めた距離に観察された最後の土壌断面から消失した位置までの距離を加えた長さとした。

調査地Fにおいて、土壌断面のマクロポアをトレースする前に、白色ペイントを散水した。白色ペイントは有機物層における吸着の影響が少なく、林地での地中水の挙動をトレースするための染料として使われている（辻村ら, 1991; Noguchi *et al.*, 1997a）。散水装置は、土壌断面から斜面長で2.0m山側に設置し、始めに河川水を散水（60 L h<sup>-1</sup>, 2 h）し、断面からの流出が定常状態になったのを確認後、水性白色ペイント（20%）に置き換えて散水（60 L h<sup>-1</sup>, 1 h）した。なお、散水装置については、Tsuboyama *et al.* (1994) が詳細に報告している。

### 3.1 マクロポアの形態学的特徴

土壌断面におけるマクロポアの密度の測定結果を表-2に、直径、勾配、および方位の測定結果を表-3に示す。マクロポアの密度は、有機物層を含むA層において0～114.8 macropores/m<sup>2</sup>、B層において6.0～84.0 macropores/m<sup>2</sup>であった。マクロポアの直径は、有機物層を含

表-3 マクロポアの形態的特徴

Table 3 Morphological characteristics (diameter, gradient and

場 所	層 位	直 径				勾 配		
		最小値	最大値	算術平均 mm	標準偏差	最小値	最大値	算術平均 degree
地点	断面 (n=140)	2	40	12.3	9.7	-46	90	1.1
A-I	有機物層を含むA層 (n=20)	4	30	16.9	8.6	-38	36	-13.0
	B層 (n=103)	2	40	10.9	9.6	-46	90	1.6
	BC層 (n=17)	5	40	15.4	9.4	-14	54	14.2
地点Fにおける	断面 (n=453)	2	60	16.0	9.8	-72	67	-18.0
	有機物層を含むA層 (n=129)	2	48	20.2	8.6	-66	36	-26.0
断面 No. 1～No. 20	B層 (n=318)	3	60	14.2	9.7	-72	67	-14.9
	C層 (n=6)	7	38	17.3	11.7	-31	10	-8.3

ただし、 $n$  は測定されたマクロポアの数、地点A-Iでの結果について地点Fは最初の断面 (No. 1) での測定結果

む A 層に存在するものが、B 層に存在するものより大きい傾向があった。マクロポアの勾配は、斜面勾配と同じ向きの負の勾配を持つものが多くを占めた。マクロポアの方位は、80%以上が土壤断面に対して  $-50^{\circ} \sim +50^{\circ}$  の範囲に存在した。土壤断面のマクロポアの形態学的特徴に対して、異なる空間的スケール（流域内の 9 地点（A～I）間と F 地点での 20 断面）における測定結果の相違は見られず（表-3）、勾配や方位は同様の頻度分布を示した（図-3）。

マクロポアの成因について、全マクロポアの 40、37 および 19% がそれぞれ地中水による侵食によるもの、植物根系によるもの、および植物根系と地中水の相互作用によるものと推定された。一方、地中水のフラックスの方向は、鉛直方向と斜面勾配との合力で示される（Harr, 1977）。また、スギの根系の分布について、刈住（1979）および福永・山寺（1994）によって調査されている。マクロポアの勾配と方位の測定結果は、地中水のフラックスの方向とスギの根系分布調査結果に類似するものであった（図-3）。このことから地中水や根系がマクロポアの勾配および方位の形成に影響を及ぼしているものと推察される。これらの関係を実証するためには、さらなる野外での調査や実験室での試験が必要であろう。

記載されたマクロポアの約 80% は楕円で近似され、その離心率は 0.256～0.998（平均値：0.652）であった。

(直径、勾配および方位)

direction) of soil macropores

標準偏差	方 位			
	最小値	最大値 degree	算術平均	標準偏差
26.3	-85	90	2.4	39.2
17.2	-50	68	4.6	32.1
27.1	-86	88	4.0	40.5
23.3	-85	90	-4.2	45.0
22.3	-90	84	-3.7	35.5
17.3	-80	84	-7.3	33.7
23.4	-90	80	-2.3	35.7
15.2	-90	74	1.3	60.1

を含む

マクロポアに粉チョークを吹き付けトレースした結果、約 70% のマクロポアは 1 断面内でとぎれ、1% のマクロポアが 5 断面にわたり連続していた ( $\geq 40$  cm)。多くのマクロポア ( $\geq 80\%$ ) は、土壤マトリックス内に終結していることが観察された。マクロポアの長さは 2.0～61.8 cm（平均値：11.6 cm）であった（図-4）。しかし、マクロポアが白色ペイントに染色された土壤マトリックスと連結して終結していることが観察された。このことは、マクロポアは選択的流出経路として機能している土壤マトリックスと連結して流出に寄与していることを示している。また、いくつかのマクロポアは基岩の亀裂に接続し、その亀裂から流出水が観察された（図-6d）。

図-5 にマクロポアの屈曲度と長さの関係を示す。マクロポアの屈曲度は、1.00～1.52（平均値：1.14）であった。軟 X 線を用いて 84 cm<sup>3</sup> の土壤サンプルにおけるマクロポアの屈曲度を求めた結果、1.2～2.0 の値であった（成岡, 1990）。本研究の結果は、北原（1989）が 2,708 cm<sup>3</sup> の土壤サンプルを対象に石膏を流し込み、土壤パイプの屈曲度を求めた結果（1.0～1.1）と同様の値であった。これらマクロポアの屈曲度の値について測定方法が異なるため、直接的に比較することはできない。しかし、軟 X 線を用いた方法は、本研究での測定方法と石膏を用いた方法と比較して、対象とするマクロポアと測定可能なサンプルサイズが小さい。これらが測定されたマクロポアの屈曲度の値が、本研究や北原（1989）による結果より大きくなる理由と考えられた。

### 3.2 選択的流出経路

図-6 に白色ペイントによって染色された選択的流出経路の例を示す。いくつかのマクロポアは、周りの土壤マトリックスと交わらず、流出に寄与していた（図-6a）。しかし、多くのマクロポアは周辺の土壤マトリックスに拡大し、流出に寄与していることが観察された（図-6b）。一方、土壤断面においてマクロポアでなく、ち密度が疎である土壤マトリックスの領域が染色されているのが観察された（図-6c）。この部分は B 層に存在するが、A 層と同じ暗褐色を示し根系が集中していた。また、基岩の亀裂から流出水が観察された（図-6d）。興味深い点として、20 断面全てにおいて白色ペイントによって基岩直上の B 層の部分が染色されていることが観察された（例えば図-6c）。このことは、基岩に沿って流下する選択的流出経路が存在し、地中水の挙動を考える上で基岩地形が重要であることを示している。

### おわりに

マクロポアの密度は、有機物層を含む A 層において

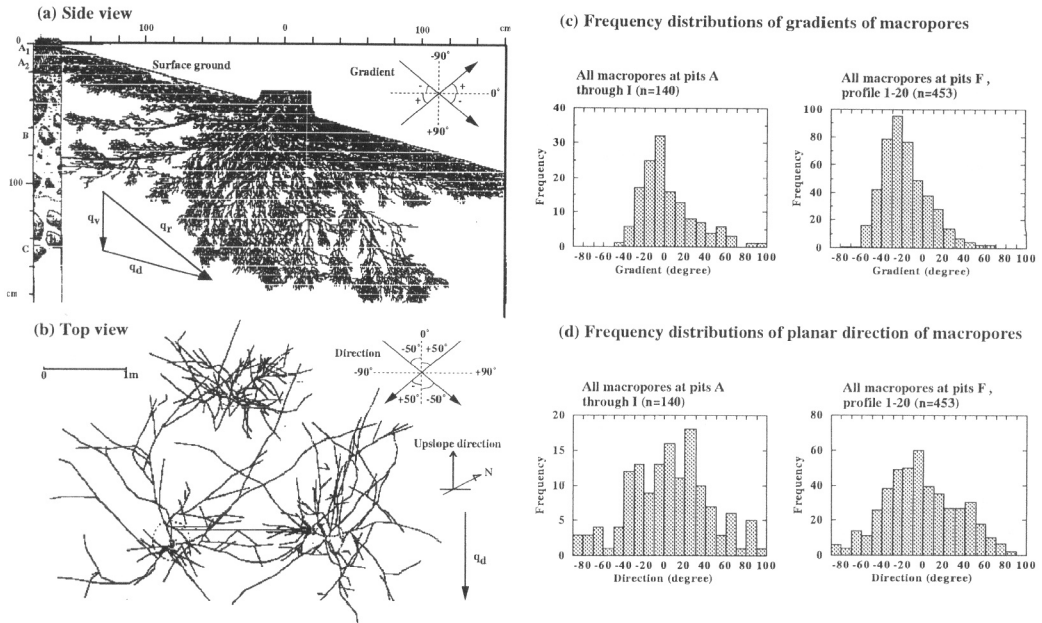


図-3 斜面における水フラックスと根系の方向とマクロポアの勾配・方位の頻度分布 (a) ヒノキの根系分布の例 (刈住, 1979) (b) スギの根系分布の例 (福永・山寺, 1994) (c) マクロポアの勾配の頻度分布 (d) マクロポアの方位の頻度分布, ここで  $q$  は水フラックス, 添え字の  $r, d, v$  はそれぞれ合力, 斜面および鉛直方向を示す。

Fig. 3 Directions of water flux and root systems on a slope, and frequency distributions of gradients and planar direction for macropores. (a) An example of *Chamaecyparis obtuse* roots (Karizumi, 1979) (b) Horizontal distribution of *Cryptomeria japonica* roots (Fukunaga and Yamadera, 1994) (c) Frequency distributions of gradient of macropores (d) Frequency distribution of planar direction of macropore. Where  $q$ =water flux ;  $r, d, v$  denote resultant, downslope, and vertical directions.

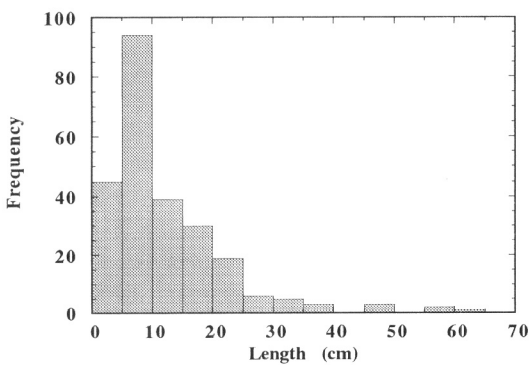


図-4 マクロポアの長さの頻度分布  
Fig. 4 Frequency distribution of length for macropores.

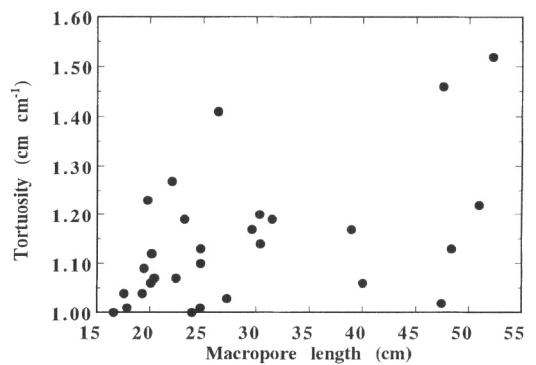


図-5 マクロポアの屈曲度と長さの関係  
Fig. 5 Relationship between tortuosity and length of macropore.

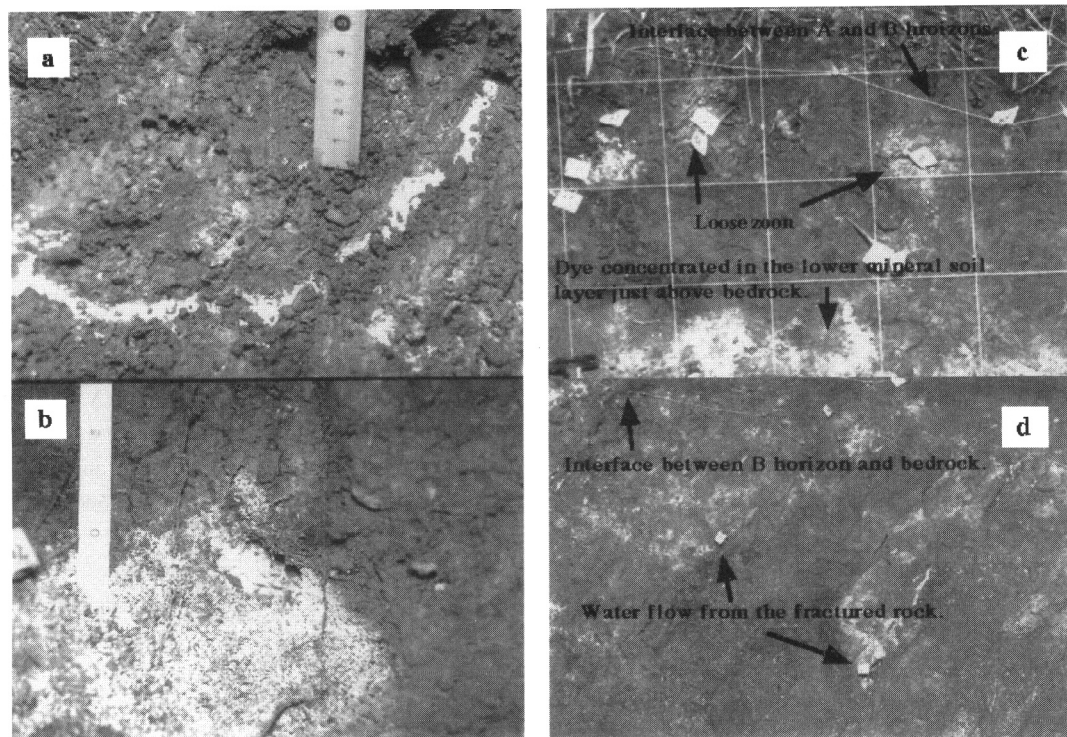


図-6 染料によって示された土壌の水移動のいくつかの形態 (a) マクロポアに沿って白色ペイント; (b) 染色されたマクロポアとその周辺の土壌マトリックス; (c) 染色された土壌密度が疎な部分; (d) 亀裂からの流出

Fig. 6 Various patterns of water movement in the soil as indicated by dye (a) dye stained along a macropore; (b) stained macropore and soil matrix around it; (c) dye distributed vertical loose zone; (d) water flow from the fractured rock

0~114.8 macropores/m<sup>2</sup>, B層において6.0~84.0 macropores/m<sup>2</sup>であった。マクロポアの直径は、有機物層を含むA層に存在するものが、B層に存在するものより大きい傾向があった。マクロポアの勾配は、斜面勾配と同じ向きの負の勾配を持つものが多くを占めた。マクロポアの方位は、80%以上が土壌断面に対して-50°~+50°の範囲に存在した。土壌断面のマクロポア直径、勾配および方位に対して、異なる空間的スケール(流域内の9地点(A~I)間とF地点での20断面)において、同様の傾向を示した。斜面長2mの土壌セグメントにおけるマクロポアを追跡した結果、マクロポアの屈曲度は1.00~1.52(平均値:1.14)で、マクロポアの長さは2.0~61.8cm(平均値:11.6cm)あった。マクロポアが白色ペイントに染色された土壌マトリックスと連結して終結していることが観察され、マクロポアは選択的流出経路として機能している土壌マトリックスと連結して流出に寄与していると考えられた。また、白色ペイントを用いた

染色試験により、多くのマクロポアは周辺の土壌マトリックスに拡大し流出に寄与していること、亀裂からの流出や基岩地形が地中水の挙動を予測するために重要であることなどが指摘された。

常陸太田試験地では、マクロポアを含む土壌断面からの流出に対して混合置き換え実験が実施され、その結果からマクロポアと相互に作用する周辺土壌層の拡大や斜面方向へのマクロポアの伸長が推察された(Tsuboyama *et al.*, 1994)。本研究は、混合置き換え実験の結果を支持することを示した。さらに、今回の選択的流出経路の調査結果を踏まえて、自然降雨時におけるマクロポアを含む土壌断面からの流出特性について考察された(Noguchi *et al.*, 2000)。今後、森林流域におけるマクロポア・パイプ流出を含む地中水の挙動を明らかにするために、複数の手法(形態調査、流出・土壌水分の観測、トレーサー試験など)でアプローチすることが有効であるといえよう。

近年、ファイバースコープを用いて第四紀砂礫層のパイプの形態的特徴を調査した結果、1 m以上の長さがある土壌パイプの存在が報告されている (Terajima *et al.*, 2000)。本研究は緑色変成岩を母材としたスギ・ヒノキを植生とする森林斜面において調査したものである。今後、異なる地質、気候、植生におけるマクロポア・パイプの形態学的特徴および選択的流出経路についての調査事例を積み重ねる必要がある。

## 謝 辞

本研究を遂行するにあたり、フィールドでの測定や議論をして頂いた森林総合研究所・坪山良夫主任研究員、細田育広主任研究員およびシンガポール大学・ロイ・サイドル教授に感謝致します。

## 参 考 文 献

- Anderson, M.G. and Burt, T.P. (1990): Subsurface runoff. In *Process studies in hillslope hydrology*. Anderson, M.G. and Burt, T.P. (eds.), 539 pp, John Wiley & Sons Ltd., Chichester, 365-400.
- Anderson, S.H., Peyton, R.L. and Gantzer, C.J. (1990): Evaluation of constructed and natural soil macropores using X-ray computed tomography. *Geoderma* **46**: 13-29.
- Beven, K. and Germann, P. (1982): Macropores and water flow in soil. *Water Resour. Res.* **18**: 1311-1325.
- Bouma, J. and Dekker, L.W. (1978): A case study on infiltration into dry clay soil morphological observations. *Geoderma* **20**: 27-40.
- 福永健司・山寺喜成 (1994): 山地斜面におけるスギ植栽木の根系分布に関する調査研究 (II) 個体間における根系の水平分布. 1994年日本緑化工学会大会要旨集, p. 90-93.
- 波多野隆介・佐久間敏雄・岡島秀夫 (1983): メチレンブルートレーサー法による水みちの分布状態. *土壌肥料学会誌*, **54**: 490-498.
- Harr, R.D. (1977): Water flux in soil and subsoil on a steep forested slope. *J. Hydrol.* **33**: 37-58.
- Jones, J.A.A. (1978): Soil pipes network: distribution and discharge. *Gambria* **6**: 1-21.
- Joschko, M., Muler, P.C., Kotzke, K., Dohring, W. and Larink, O. (1993): Earthworm burrow system development assessed by mean of X-ray computed tomography. *Geoderma* **56**: 209-221.
- 刘住 昇 (1987): 樹木根系図説. p. 1121, 誠文堂新光社, 東京.
- 北原 曜・清水 晃・真島征夫 (1988): 林地緩斜面土層中のパイプフローの特性, *日林誌*, **70**: 318-323.
- 北原 曜 (1989): 林地緩斜面土層中のパイプフローの特性 (II) パイプの水理特性, *日林誌*, **71**: 317-322.
- 北原 曜・中井裕一郎 (1992): 1次谷流域における河川流量とパイプ流量の関係, *日林誌*, **74**: 49-54.
- Luxmoore, R.J., Jardine, P.M., Wilson, G.V., Jones, J. R. and Zelazny, L.W. (1990): Physical and chemical controls of preferred path flow through a forested hillslope. *Geoderma* **46**: 139-154.
- Moran, C.J., McBratney, A.B. and Koppi, A.J. (1989): A rapid method for analysis of soil macropore structure: I. Specimen preparation and digital binary image production. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **53**: 921-928.
- 成岡 市 (1989): 土壌の粗孔隙の計測法とその物理的機能に関する研究. 東京農業大学総合研究所紀要, **1**: 1-58.
- Noguchi, S., Abdul Rahim, N., Baharuddin, K., Sammori, T., Tani, M. and Moridada, K. (1997a): Soil physical properties and preferential flow pathways in tropical rain forest, Bukit Tarek, Peninsular Malaysia. *J. For. Res.* **2**: 115-120.
- Noguchi, S., Tsuboyama, Y., Sidle, R.C. and Hosoda, I. (1997b): Spatially distributed morphological characteristics of macropores in forest soils of Hitachi Ohta Experimental Watershed, Japan. *J. For. Res.* **2**: 115-120.
- Noguchi, S., Tsuboyama, Y., Sidle, R.C. and Hosoda, I. (1999): Morphological characteristics of macropores and the distribution of preferential flow pathways in a forested slope segment. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **63**: 1413-1423.
- Noguchi, S., Tsuboyama, Y., Sidle, R.C. and Hosoda, I. (2000): Subsurface runoff characteristics from a forest hillslope soil profile including macropores, Hitachi Ohta, Japan. *Hydrol. Process.* in press.
- Sidle, R.C., Tsuboyama, Y., Noguchi, S., Hosoda, I., Fujieda, M. and Shimizu, T. (1995): Seasonal hydrologic responses at various spatial scales in a small forested catchment, Hitachi Ohta, Japan. *J. Hydrol.* **168**: 227-250.
- Singh, P., Kanwar, R.S. and Thompson, M.L. (1991): Macropore characterization for two tillage systems using resin-impregnation technique. *Soil*



- Sci. Soc. Am. J. **55** : 1674-1679.
- Tanaka, T., Yasuhara, M., Sakai, H. and Marui, A. (1988) : The Hachioji Experimental Basin study --Storm runoff processes and the mechanisms of its generation. *J. Hydrol.* **102** : 139-164.
- Terajima, T., Sakamoto, T. and Shirai, T. (2000) : Morphology, structure and flow phases in soil pipes developing in forested hillslope under by a Quaternary sand-gravel formation, Hokaaido, northern main island in Japan. *Hydrol. Process* **14** : 713-726.
- Tokunaga, K. (1988) : X-ray stereoradiographs using new contrast media on soil macropores. *Soil Sci.* **148** : 199-207.
- Tsuboyama, Y., Sidle, R.C., Noguchi, S. and Hosoda, I. (1994) : Flow and solute transport through the soil matrix and macropores of a hillslope segment. *Water Resour. Res.* **30** : 879-890.
- 辻村真貴・田中 正・島野安雄 (1991) : 川上試験流域における浸透能と湿潤後の水の流動経路について, 筑波大演習林報告, **7** : 137-161.
- Tsukamoto, Y. and Ohta, T. (1988) : Runoff process on a steep forested slope. *J. Hydrol.* **102** : 165-178.
- Van Stiphout, T.P.J., Van Lanen, H.A.J., Boersma, O. H. and Bouma, J. (1987) : The effect of bypass flow and internal catchment of rain on the water regime in a clay loam grassland soil. *J. Hydrol.* **95** : 1-11.

受稿年月日：2000年11月11日  
受理年月日：2000年12月18日