

林地緩斜面土層中のパイプフローの特性

誌名	日本林學會誌 = Journal of the Japanese Forestry Society
ISSN	0021485X
著者	北原, 曜 清水, 晃 真島, 征夫
巻/号	70巻7号
掲載ページ	p. 318-323
発行年月	1988年7月

短 報

林地緩斜面土層中のパイプフローの特性

北原 曜*・清水 晃*・真島征夫*

KITAHARA, Hikaru, SHIMIZU, Akira, and MASHIMA, Yukio: **Characteristics of pipe flow in a subsurface soil layer of a gentle hillside** J. Jpn. For. Soc. 70: 318~323, 1988 Several trenches were made along a gentle hillside, and the characteristics of pipe flow in a subsurface soil layer were investigated in the snowmelt season. The following points were clarified: There were two types (A and B) of pipes with different distributions, diameters, and numbers. The A type was centered in the B-layer with a large diameter and a small number. It was inferred that the reason for making it so was in regard to plants. In the lower part of the slope, there were large-diameter pipes. The B type was centered in the C-layer, with a 3.5 mm average diameter and a large number, and it had an aggregated distribution of small groups. The discharges of both pipes were 772 cc/min per trench width of 1 m. It occupied 91% of the total discharge of the entire soil section. The velocity of the pipe flow was about 1 m/min.

I. はじめに

山腹斜面土層中の排水機構については、飽和不飽和浸透理論を用いた解析が進み、実際の河川のハイドログラフとの検証が行われている。しかし、実際の土地の土壤サンプルから得られた透水係数をモデル計算に使うとその適合性は非常に悪いようである。またこれまでの研究で山腹斜面では地表流はほとんど起きていないことが知られてきている。そこで山腹斜面土層中の排水機構の一つに、非常に大きな流速をもつ飽和側方流としてパイプフローの存在が注目されてきた。しかし、その分布、流速、河川流量に占める割合など種々の特性は、ほとんど未解明のまま(3)、イギリス高地のポドソルや泥炭地における JONES (1, 2)らの研究、太田ら(5)の0次谷の谷底末端での測定結果、北原ら(4)の流速の測定結果などがあるにすぎない。

筆者らは、林地の山腹緩斜面にトレンチを数カ所掘削し、地下水水位が上昇する融雪期を利用して、分布、形態、流量、流速などパイプフローの諸特性を調査し検討することができたので報告する。本来、パイプフローの研究についても、他の水文研究同様、降水-流出の統計学的解析とともに水理学的解析から流出モデルを構築していく必要がある。しかし、パイプフローの特性については、測定そのものがむずかしくこれまでに得られている知見はごくわずかである。本報においても、時間的に継続した資料が得られずパイプフローの機能解明までは進めることができなかった。したが

って、時間断面を固定した資料であるため一部統計的解析にとどまったが、これによってパイプフローの水理学的機能に関する要因の分類を行い、今後の水理モデル構築のための基礎とした。

II. 試験地の概要と試験方法

試験地は、札幌羊ヶ丘の林業試験場北海道支場実験林内で、焼山川流域の山腹斜面に設けた。図-1に試験地付近の地形を、図-2に試験地の側面図を示す。側面図には、幅10m内の立木も示した。図示したように、斜面形はほぼ平衡、非集水型で、平均傾斜12.9度、方位はN61Eである。T-2付近の土壤断面と土壤物理性を図-3に示す。土壤型はBdで、母材はC層以下が第四紀洪積統厚砂礫層でくされ礫に富んだ粘土、その上のII A~B層は恵庭岳火山灰層で風化のよく進んだ褐色ロームである。最表層は一部未風化の樽前火山灰層が薄く存在する。

林相は、シラカンバ、ハルニレ、ミズナラ等の落葉広葉樹壮齡林でうっ閉度0.8、林床はチシマザサ(高さ2m)が密に覆っている。試験地とその周囲にはガリー状流路や地表流の形跡がまったく認められない。これまでの観察および土壤や植生の状態等から推定すると、この付近では降雨水や融雪水はいったん地下に浸透した後、土壤中を河川方向へ移動するものと考えられる。

この斜面の上部から下部に向かって等高線沿いに、幅約0.7m、長さ約5m、深さ約1.2mのトレンチを5

* 林業試験場北海道支場 Hokkaido Br., For. and Forest Prod. Res. Inst., Sapporo 004

本(図-2のT-1~5)掘削し、パイプフローの観測に供した。掘削時期は、トレンチ断面が風化しないように試験開始1週間前の1987年4月14日とした。各トレンチ間の諸元を表-2に示す。各トレンチから1.6m斜面上部側方には、地下1.2m~1.6m深の浅井戸(W-1~5)を掘削し、地下水位を自記した。各トレンチは融雪期に地下水位が上昇し、顕著なパイプフローが認められたので、融雪最盛期の4月21日にトレンチ内を排水し、トレンチ内の全パイプの地表面からの位置と直径を測定した。また同時に各パイプからの流量および非パイプ部分からの流量を測定したが、パイプの位置がトレンチの底(地下120cm)付近のものは測定できなかった。流量測定には、排水による地下水位と

トレンチ内水位の段落ちの影響を最小限に抑えるため、排水後極力迅速に行った。パイプ流量の測定はパイプ直下にロートを置き取水して行い、また非パイプ部分の流量は400cc土壌採取円筒を差し込んで取水した。パイプフローの流速の算出は、トレンチ内の水位が回復した翌日、上部トレンチから順にトレンチ内にトレーサーとして塩化ナトリウム20kgを投入し、すぐ下部のトレンチのパイプ出口に設置した電導度計が示度変化した時間を測定し、トレンチ間距離を除して求めた。

III. 試験結果と考察

図-4にこの融雪期間の浅井戸地下水位の変化を示す。ただし4月21日から23日までは試験のためトレンチ内の排水等を行ったので、自然状態の地下水位変化ではない。全般的な傾向では、斜面上部ほど地下水位は深い位置にあり、また上昇下降の日変化が大きい。しかし浅井戸によっては例外も認められ、これは微地形による影響と考えられる。

図-5に各トレンチの土壤断面を示す。図中でパイプと認定したものは、トレンチを排水する前も勢いよく水が吹き出ていることが目視できたもので、しかも排水した後もパイプ断面から水が吹き出ているものに限定した。したがってこのときのトレンチ水位より上部にあるパイプは含まれていない。また地下水位がトレンチから消失した5月以降に断面を観察すると、パイプ以外にパイプ状の穴があいているものも多数見受けられたが、これらは地下水位上昇時に水が出ていなかったためパイプには含めていない。なお、図にはトレンチの上流側断面を示したが、下流側の対応する位置にも同様のパイプ穴が認められ、パイプが連続してい

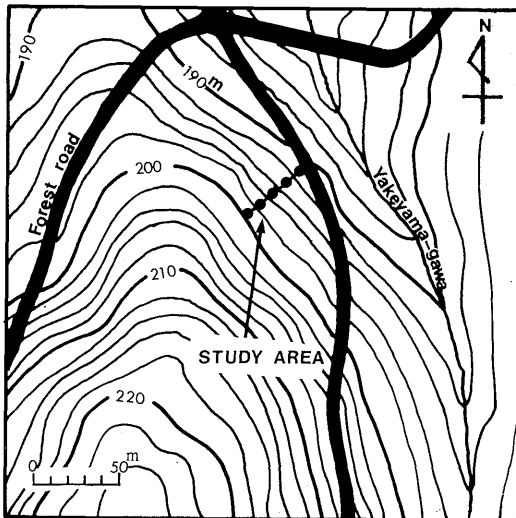


図-1. 試験地付近の地形図
Map of the study area

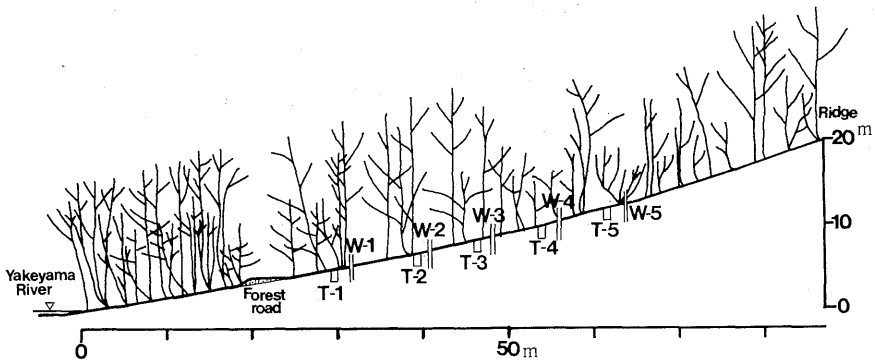


図-2. 試験地の側面図
Cross-section of the study area
Legend: T-1~5, trench; W-1~5, groundwater level gauge

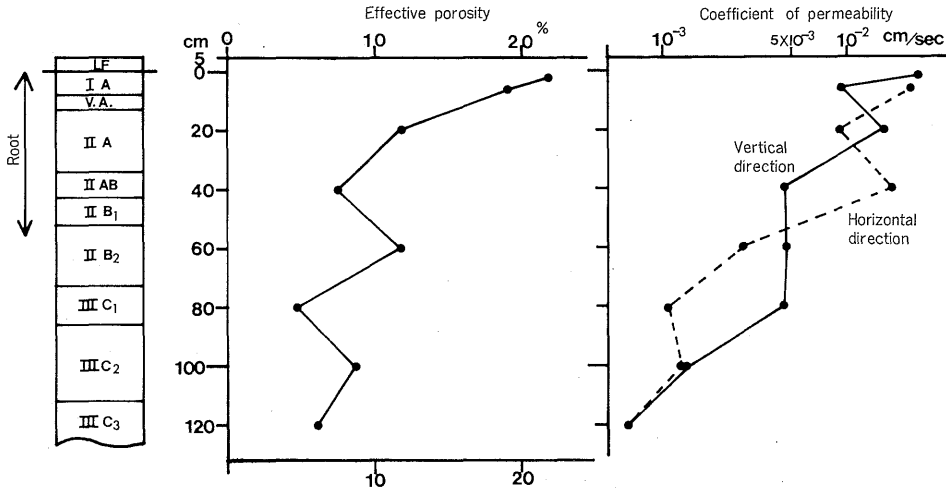


図-3. 土壌断面と土壌物理性
Soil profile and properties

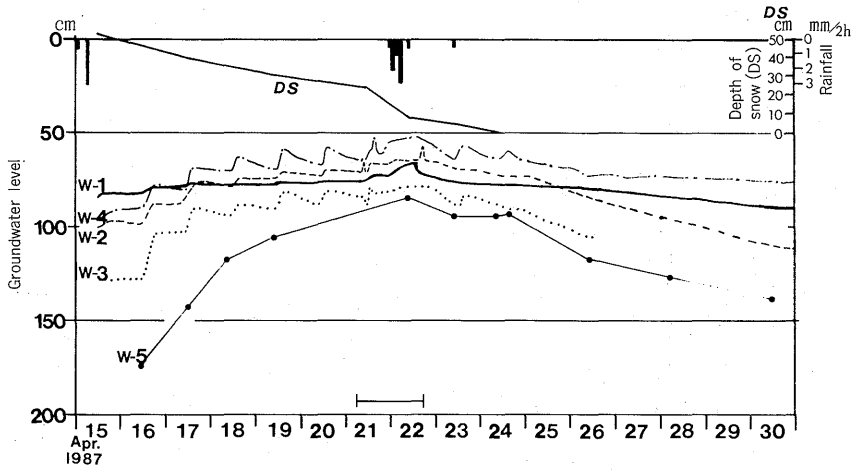


図-4. 融雪期の地下水水位変化
Change of groundwater level in the snowmelt season

表-1. パイプの二型の比較
Comparison of two types of soil pipes

Type	Average depth** from ground surface (cm)	Average diameter** (mm)	Average discharge (q,cc/min)	Average number** per trench width (n,m)	Average discharge per trench width (q×n,cc/min/m)
A	75.1	21.7	109.0	0.60	65.4
B	101.4	3.5	111.3	6.35	706.8

** Significant at 1 percent level

ることを確認できた。

図に示したように、各トレンチともパイプは数多く認められた。ここでパイプの穴中に黒色団粒や腐植が認められたものをA型(図-5の白丸)、まったく認め

られないものをB型(同じく黒丸)として、二者の性質について統計的検定を行った。まずトレンチ間でパイプの地表面からの分布深、直径、流量、トレンチの幅1m当りの本数密度の違いについて分散分析した

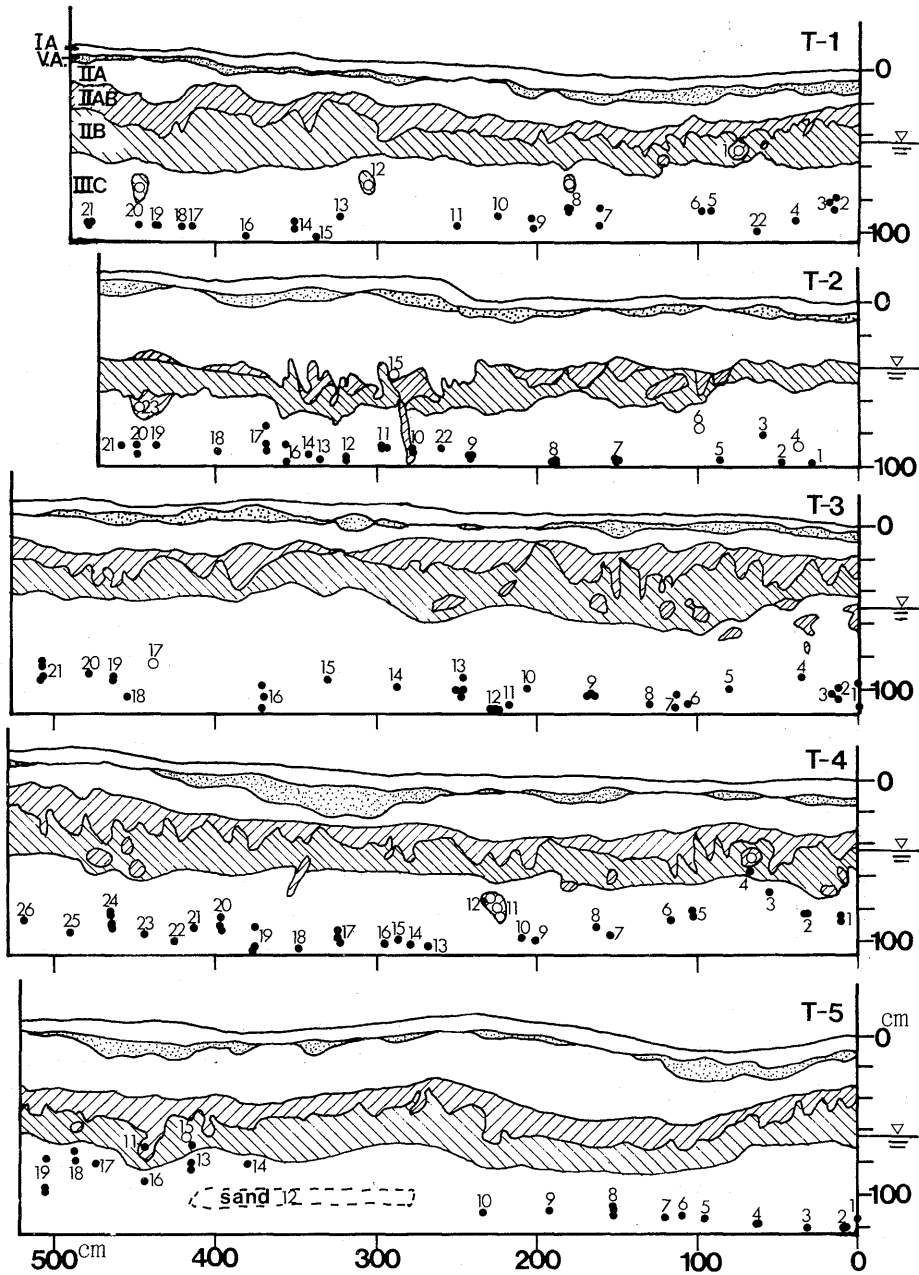


図-5. 各トレンチのパイプの分布

Distribution of soil pipes in each trench

Legend: ○, A type; ●, B type

結果では、B型はT-3の分布深を除いてトレンチ間に5%水準では有意差がなかった。A型については各トレンチで1~4本なので検定を行わなかったが、T-1の流量がやや大きいほかはトレンチ間の差は小さいようである。このようにA、B型とも各トレンチで差が

小さいようなので、全トレンチのパイプをA型とB型に分けて、その分布深、直径、流量、トレンチの幅1m当りの本数密度について検定したところ、表-1に示すように、分布深、直径、1m当りの本数密度については1%水準で有意差が認められた。パイプ1本当

りの平均流量は両型とも約 110 cc/min で差がなかった。図-6 にパイプの直径別分布深、図-7 にトレンチの幅 1 m 当りのパイプ本数の直径分布を示す。

以上の結果より A, B 型は明瞭に分けることができた。次に各型の特徴と成因について述べると、A 型は B 層付近の比較的浅い土層中に多く認められ、またパイプ周辺の土層は黒色土化しており、パイプ穴の内部には径 1~3 mm の黒色団粒状の土粒が数多く認められた。なお T-2 の No. 8 のように、A 型の一部のパイプには腐植化した木本根系の樹皮が外周を巻いているものもあった。これらの点から推定すると A 型パイ

プの成因には植物が関与していることが考えられる。また A 型は本数密度が小さく直径は大きい、1 本当りの流量は B 型と差がない。ただし、測定時の地下水位が上昇していれば、A 型はさらに数多く認められたと推定される。1 本のパイプについてみると、地下水位と流量は一定の関係が認められる(4)ので、地下水位が上昇すれば、A 型の流量も増大すると考えられる。断片的ではあるが、実際に 4 月 21 日の測定時よりトレンチの地下水位が約 10 cm 上昇した 22 日の T-1, 2, 3 の観測では、より浅い土層から新たに T-1 で 2 カ所、T-2 で 7 カ所、T-3 で 2 カ所の A 型パイプが認められた。流量についても同様で、21 日に T-1 の No. 12 が 540 cc/min であったのが 22 日には 1,896 cc/min となるなど、各パイプとも 1.4~7.4 倍に増加した。斜面位置による差では、T-1 の No. 12 が直径 91 mm、流量 540 cc/min というように、斜面下部には直径が大きく流量の大きいパイプが存在するようである。

一方、B 型は地下 1 m 程度の C 層に分布し、直径が 2~3 mm の円形のものも多く、ときに土層の裂け目のような形のものもある。直径 1 mm 以下のパイプの観測もれの可能性はあるが、B 型のパイプ本数の直径別分布(図-7)は、指数分布を示しそうである。この型では腐植の影響がまったくないようで、成因の一つとしては地下水の化学的侵食によることが考えられる。B 型は流量では A 型と差がないが、本数が多いので総流量は多い(表-1)。図-8 に B 型パイプの流量の頻度分布を示す。図示したように、流量の頻度分布については指数分布を示しているようであり、100 cc/min 以下の流量が多い。大きな流量を示したのものとしては、T-1 の No. 17 が 696, No. 14 が 230, T-2 の No. 14 が 251, T-3 の No. 5 が 282, No. 6 が 222, T-4 の No. 9 が 446, No. 8 が 328 cc/min などがある。T-5 では 100

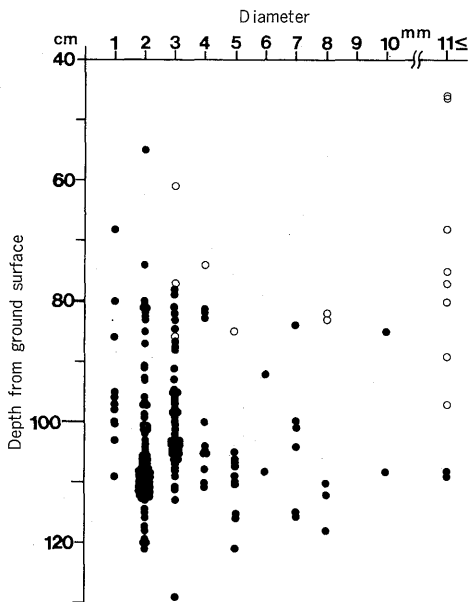


図-6. パイプの直径別分布深

Distribution of soil pipes classified by diameter
Legend: ○, A type; ●, B type

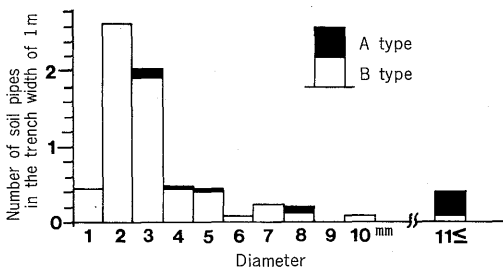


図-7. トレンチの幅 1 m 当りのパイプ本数の直径別分布

Number of soil pipes classified by diameter in the trench width of 1 m

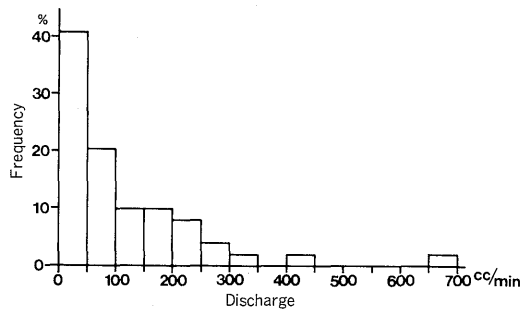


図-8. B 型パイプの流量の頻度分布

Frequency distribution of discharge of the B type

表-2. パイプフローの流速の測定結果
Measurement of velocity of pipe flow

Section	Slope distance (m)	Slope inclination (°)	Pipe number	Velocity (cm/min)	Type
T-5 → T-4	7.10	14.3	18	133.1	B
			22	57.0	B
			9	55.5	B
T-4 → T-3	7.20	11.5	8	184.6	B
			7	167.4	B
			5	164.9	B
			4	145.0	B
			2	135.0	B
			10	113.4	B
			13	112.2	B
			16	93.9	B
			17	92.9	A
			18	92.9	B
			T-3 → T-2	6.65	12.7
22	88.7	B			
10	86.7	B			
15	79.8	A			
T-2 → T-1	9.25	10.5	11	88.7	B
			9	81.6	B
			18	50.2	B
			12	48.9	A
			1	43.5	A
			10	42.0	B
			3	38.5	B
8	32.1	A			

cc/min を超えるような B 型パイプは存在しなかった。

なお、B 型の分布型について検定したところ、すべてのトレンチで小集団をもつ集中分布型を示し、ランダム分布からの隔たりは有意差があった。この結果から、比較的均質とみられる土層中でも他より透水の良好な部分があって、そこにパイプが集中的に存在することが推定される。

非パイプ部分の土壌面からの流出は採取位置によってやや差があったが、平均 $0.965 \text{ cc}/100 \text{ cm}^2/\text{min}$ で非常に少なく、この値を換算すると透水係数 $k=8.7 \times 10^{-4} \text{ cm}/\text{sec}$ となり、C 層の $k=5 \times 10^{-3} \sim 5 \times 10^{-4} \text{ cm}/\text{sec}$ と同様な値であった。したがって、この非パイプ部分からの流出はダルシー則に従うと考えられる。またこの値を T-1 の幅 1 m 当りの地下水位以深 (地下 45 ~ 120 cm) の非パイプ部分からの流量にすると $72.4 \text{ cc}/\text{min}$ である。これを表-1 に示したパイプからの流

量と比較すると、トレンチの幅 1 m 当りの総流量 $844.6 \text{ cc}/\text{min}$ に占めるパイプからの流量は、A 型 7.7%、B 型 83.7% で計 $772.2 \text{ cc}/\text{min}$ 、91.4% であった。非パイプ部分である面からの流量は 8.6% にすぎず、ダルシー則に従う側方流はわずかであるといえる。実際には地下 1.2 m より深い位置に分布するパイプからの流量は、トレンチの排水が不完全なため測定できなかったので、パイプフローの総流量に占める割合はさらに大きいものと推定される。

最後に、流速の測定結果を表-2 に示す。試験の都合上すべてのパイプの流速を求められなかったが、いずれのトレンチ間とも流速 $32 \sim 185 \text{ cm}/\text{min}$ で、流速の大きいパイプは約 $1 \text{ m}/\text{min}$ 程度の近似な値を示した。この値は前年に北原ら (4) が予備的に求めた値 $108 \text{ cm}/\text{min}$ と同様な値であった。パイプの型の違いによる流速の差については不明確であった。以上のように、この斜面の排水機構にはパイプフローが卓越していた。斜面土層中に地下水位が発生、上昇しやすいにもかかわらず地表流が発生しないような緩斜面では、パイプフローがよく発達している可能性がある。また、このような斜面では、地下水位の動水勾配にもよるが、非常に速い流速で排水が行われるものと考えられる。

IV. おわりに

本試験地のように地下水位が発生し上昇しやすい緩斜面では、その排水機構にパイプフローの占める割合が非常に大きいことが判明した。今後はパイプの立体的構造、あるいは地下水位とパイプの流量流速との関係、集水面積、パイプ内の粗度、パイプの発生限界等の水理学的機能について、その調査方法を開発しながら明らかにしていく必要がある。

引用文献

- (1) JONES, J. A. A.: Soil piping and stream channel initiation. *Water Resour. Res.* 7 (3): 602~610, 1971
- (2) ———: Soil pipe networks: distribution and discharge. *Cambria* 6: 1~21, 1978
- (3) KIRKBY, M. J.: *Hillslope Hydrology* (日野幹雄ら訳: 新しい水文学). 330 pp, 朝倉, 東京, 1983
- (4) 北原 曜・真島征夫・清水 晃: 飽和側方流の流速について. *日林北支論* 35: 202~204, 1986
- (5) 太田猛彦・野口晴彦・塚本良則: 小流域の林地における水の動態に関する研究 (IV) 降雨・流出過程におけるパイプフローの特性. 93 回日林論: 459~461, 1982

(1987 年 10 月 19 日受理)