

林地緩斜面土層中のパイプフローの特性(2)

誌名	日本林學會誌 = Journal of the Japanese Forestry Society
ISSN	0021485X
著者	北原, 曜
巻/号	71巻8号
掲載ページ	p. 317-322
発行年月	1989年8月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



論 文

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

北原 曜*

北原 曜：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, 1989 植物根系によって発生したと推定されるパイプの水理特性を、透水試験などによって明らかにした。試験方法は以下のとおりである。1) 山腹斜面土層中より、パイプを含めた断面 9.5×9.5 cm, 長さ 30 cm の土壌サンプルを採取する, 2) サンプルに種々の水頭差をかけて透水試験を行う, 3) パイプ内の土を耳かき状のさじで採取し分析する, 4) サンプルのパイプ部分に石膏を流し込み固める, 5) もう一度, 透水試験を行い非パイプ部分の透水係数を求め, 2) との差からパイプフローの流量を算出する, 6) サンプルを分解し, 石膏で固められたパイプ部分を取り出す, 7) このパイプ部分の体積, 直径など形状を測定する。以上の試験を 10 サンプルについて行った結果, パイプの形状は断面が離心率 $0.39 \sim 0.84$ の楕円形であること, パイプ内の団粒化した土の占める体積は 10% 以下であること, パイプ内の水の動きには DARCY-WEISBACH の式が適用でき, MANNING の粗度係数は $0.036 \sim 1.364$ という大きな値を示すことなどが判明した。

KITAHARA, Hikaru: Characteristics of pipe flow in a subsurface soil layer on a gentle slope (II) Hydraulic properties of pipes J. Jpn. For. Soc. 71: 317~322, 1989 Hydraulic properties of pipe inferred to be made from plant roots were clarified by a saturated hydraulic conductivity experiment as follows: 1) collecting soil samples ($9.5 \times 9.5 \times 30$ cm) including pipes from the fields, 2) hydraulic experiment with several hydraulic gradients, 3) collecting soil from the pipes, 4) pouring plaster into the pipes, 5) again, hydraulic experiment with several hydraulic gradients; hydraulic conductivity of non-pipe parts was obtained, and hydraulic properties of the pipes were calculated from the differences between 2) and 5), 6) dissolving the samples and removing the plaster molds of the pipes from them, 7) measuring the plaster molds of the pipes for volumes and diameters. Ten samples were subjected to this method. The vertical sections of pipes were approximately ellipses, and their eccentricities were $0.39 \sim 0.84$. The soil in pipes occupied 10% of their volumes. Pipe flows well-fitted the DARCY-WEISBACH equation. The coefficient of roughness calculated by MANNING's formula was $0.036 \sim 1.364$.

I. はじめに

現在, 山腹斜面土層中の水の動態モデルには, 運動方程式として DARCY 則の成立を前提とした飽和不飽和浸透流理論が多用されている。しかし, 不均質な山腹斜面で真に DARCY 則が成立しているのか否かについては, 十分な検証がなされているとはいえない。これまでの研究をみても, 斜面土層中の水の動態についてのホワイトボックス化はいまだ不十分であり, これをモデル化する際, DARCY 則の検証をせずに飽和不飽和浸透流理論を使うことは大きな危険があろう。一方, 非 DARCY 則としては, パイプフローと基岩表面地下水流 (2) などがあげられているが, 現象そのものが観察しづらい点もあり, その測定方法, 特性などはほ

とんど不明のまま, 現在のところ, それらの現象をモデルに組み込むまでに至っていない。

このように未解明な非 DARCY 則のうち, 筆者らはパイプフローに注目し, 前報 (I) で林地緩斜面土層中のパイプの分類, 分布, 流速などの諸特性について明らかにした。しかし, その水理特性や立体構造などについては不明のまま, パイプフローを含めた斜面流出のモデル化に直接にはつなげていない。そこで本報では, パイプの諸形状の特徴と水理特性について明らかにする。

II. サンプルの採取方法と試験方法

サンプル採取地点は, 前報 (I) で示したトレンチのうち最下段の T-1 付近と, 隣接する緩斜面 A, B であ

* 森林総合研究所北海道支所 Hokkaido Res. Ctr., For. and Forest Prod. Res. Inst., Sapporo 004

る。A斜面は、T-1より直線距離で450m離れたトドマツ10年生造林地、B斜面は、同じく400m離れたエゾマツ10年生造林地で、A、B斜面とも土壌断面などはほとんどT-1付近と変わらない。パイプを含めた土壌サンプルは、T-1横で2個、A斜面で7個、B斜面で1個の計10個採取した。採取したパイプは、いずれも前報(1)で示したA型パイプである。すなわち、植物根系によって発生したパイプと考えられるものである。T-1地点とB地点のサンプルが少ないのは、パイプのある土層に直径数cmの礫が多く含まれており、サンプルの採取が困難であったためである。このほかに、土壌の透水係数を確認するため、パイプを含めない土壌サンプルを、A地点で1個、B地点で1個採取した(表-1参照)。

サンプルの採取方法は以下のとおりである。まず、融雪期の地下水位が上昇した際に多数のトレンチを掘削し、パイプフローが確認できたものにあらかじめ印を付けておく。これは地下水位が低下した場合に、トレンチ断面にパイプではない穴が多数見受けられ、それがパイプと見分けがつかないためである。次に、地下水位が低下した5月中旬以降、トレンチの上流側約50cmにもう一つトレンチを掘削し、上流側のパイプを確認する。パイプが連通しているかどうかの確認方法は、下流側のパイプにたばこの煙を吹き込んで行う。パイプでない穴は短い距離でふさがっており、この煙の検査で容易に判別できる。こうしてパイプの経路を確認した後、パイプを含めた非攪乱土壌を、底面を残して断面が $9.5 \times 9.5 \text{ cm}^2$ 、長さ30cm、上面は水平に成型する。これをサンプラー(長さ30cm、幅10cm、厚さ5mmの透明アクリル板をL字型に接着したもの2個)を使って採取する。採取の際はサンプラー内壁にワセリンを塗布し、サンプラー壁面と土壌の間に水みちができないようにする。最後に、サンプラーを接着し、上下流側断面に1mm目の寒冷紗をかぶせて、サンプル採取を終了する。

得られたサンプルは、以下のように試験した。まずサンプルを、図-1に示すような定水位透水試験装置にかけ、水頭差を変えて透水量を測定する(1回目の透水試験)。このとき、サンプルは上下流、天地を自然状態と同じように設置する。測定後、装置からサンプルをはずし、パイプ内の土を耳かき状のさじでかき出す。パイプ内の土はパイプの内壁とは土質がまったく異なっている(後述)ため、その採取は容易であった。ただし、パイプの直径が小さいサンプルでは土をかき出

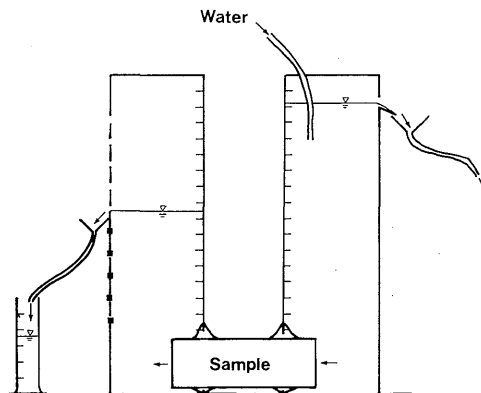


図-1. 透水実験装置の概要

Outline of hydraulic conductivity experiment apparatus

せないものがあつた。かき出した土は土色、絶乾重などを測定する。なお、得られたパイプ内の土は量的に少ないうえに、かき出す際に土壌構造が破壊されているので、比重、容積重、粒径組成は別の直径の大きいパイプ1本から土を採取し測定した。粒径組成は団粒分析装置によって求めた。次にサンプルを縦にし、パイプ部分に石膏を流し込む。石膏が固結した後、もう一度、定水位透水試験を行う(2回目の透水試験)。これによって非パイプ部分の透水量を測定し、1回目の透水量との差からパイプ部分の透水量が算出される。なお、石膏の透水係数はきわめて小さく無視できる値であった。最後に、サンプルを装置からはずし分解する。パイプ部分に固結している石膏を取り出し、その体積、断面形状、延長などを測定する。この他に、非パイプ部分だけの土壌サンプルの定水位透水試験を行い、透水係数を求めた。

以上の測定項目によって、非パイプ部分の水利特性を以下のように算出した。非パイプ部分からの流量は2回目の透水試験より得られ $Q_s \text{ ml/s}$ とし、その流速を $v_s \text{ cm/s}$ 、非パイプ部分の断面積を $S_s \text{ cm}^2$ とすると、

$$v_s = \frac{Q_s}{S_s}$$

$$S_s = S - S_p$$

で計算した。ただし、 S はサンプルの断面積で $9.5 \times 9.5 \text{ cm}^2$ 、 $S_p \text{ cm}^2$ はパイプ断面積で、石膏の体積をサンプルの長さで除して求められる。

次にパイプ内の流速については、以下のように求め

た。パイプ内の流量を Q_p ml/s, 流速を v_p cm/s とすると、

$$v_p = \frac{Q_p}{S_p}$$

$$Q_p = Q - Q_s$$

ただし、動水勾配 I と Q_s の関係は 2 回目の透水試験により求められている。

III. 結果と考察

1. パイプの形状

表-1 に、得られたパイプの形状などを示す。表中の No. 1, 2, 3 は同じパイプの上下流であり, No. 6, 7 も同様である。また, No. 8 と 10 は非パイプ部分の土壤サンプルである。まず屈曲度は, サンプルの長さ 30 cm に対するパイプの延長の比を 100 倍したもので, 10 個のサンプルの平均は 103 % 程度であった。パイプは短い距離ならば激しくは屈曲しないようである。平均断面積は, 石膏で固められたパイプの体積をサンプルの長さで除したものであるが, No. 11 は, パイプ断面積

が小さく石膏がサンプルの中まで流下できず, 断片的な資料しか得られなかったため一部推定してある。パイプ断面の形状はこの No. 11 を除いてすべて, 上下に短い楕円形をしていた。これはパイプに上から土圧がかかっているためと推定される。表中の平均長径と短径は, 石膏で固められたサンプルを 5 cm ごとにノギスで測定したものである。これから離心率を求めると, 0.39~0.84 となり, いずれも同程度の値を示した。径深 (R) は, 断面積を離心率から求めた楕円の周長で除して求めた。

パイプ内の土の特徴については, 周囲の非パイプ部分 (B_2 層) の土色が 10 YR 6/8 で明るい黄褐色であるのに対し, パイプ内の土は 7.5 YR 3/3 の暗褐色で A 層の土色に相当しており, 明確な差が認められた。また, 部分的に根系の腐植細片や生根も認められた。石礫は, 周囲の土壤には多く含まれていたが, パイプ内の土には含まれていなかった。土壤構造と堅さに関しても, パイプ内の土は団粒化が進み, きわめて軟でふわふわした状態であったのに対し, パイプ周囲の土壤

表-1. パイプの形状
Shape of pipe

Features	Sample No.												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11*	12	
Collecting point	A	A	A	A	A	A	A	A	B	B	T-1	T-1	
Slope inclination (°)	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	5.7	5.7	10.5	10.5	
Correlation of samples	50cm down-stream of No.1					2m down-stream of No.1		60 cm down-stream of No. 6		Beside No.4		Beside No.9	Beside No. 11
Depth from ground surface (cm)	57	54	55	65	67	48	42	62	64	70	85	78	
Average cross-sectional area (S_p , cm ²)	5.85	5.98	5.72	0.82	5.52	2.13	4.54	—	4.12	—	(0.50)	1.85	
Average maximum diameter (cm)	3.16	3.94	3.02	1.17	2.92	1.74	3.40	—	2.48	—	(0.80)	1.82	
Average minimum diameter (cm)	2.76	2.20	2.46	0.74	2.34	1.60	1.86	—	2.14	—	(0.80)	1.40	
Eccentricity (e)	0.487	0.829	0.576	0.775	0.595	0.393	0.836	—	0.506	—	(0)	0.634	
Hydraulic radius (R , cm)	0.628	0.601	0.663	0.268	0.667	0.406	0.531	—	0.569	—	(0.20)	0.365	
Volume percentage of crumb in the pipe (V_c , %)	5.34	7.54	9.88	small amount	3.35	2.08	9.48	—	4.70	—	small amount	small amount	
Meander length (cm/100 cm)	100.7	100.7	104.3	101.8	103.8	102.0	100.0	—	104.3	—	—	109.5	

* The plaster mold of pipe was incomplete.

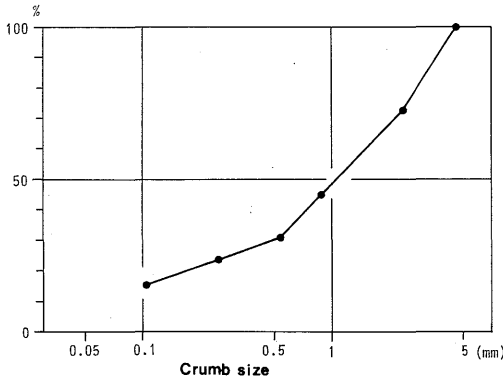


図-2. パイプ内の土の団粒組成
Size distribution of water-stable aggregates of the soil in a pipe

は無構造、堅で、両者は大きな違いがあった。以上のように、パイプ内の土は周囲とはまったく土質が異なっており、A型パイプ（前報（I）参照）が植物根系の枯死によって発生したという推定を裏付けている。

サンプルとは別の直径の大きなパイプ内から得られた土の比重は、 2.67 g/cm^3 で、C層とほぼ同じであった。腐植が入っているにもかかわらず、このように高い比重を示す原因は、パイプ部分が流路になっているため、比重の高い物質が残留していることが考えられる。パイプ内の土の絶乾重を比重で除して体積を求め、パイプの全体積に対する占有体積を算出した結果、 $2.08 \sim 9.88 \%$ でいずれも 10% 以下の値を示した。なお、パイプ内の土は同一のパイプでも比較的詰った場所と疎な場所がある。パイプ内の土はこのような状態であるため、容積重測定用の試料は、サンプルとは別の直径の大きなパイプから1個採取したにとどまったが、得られた容積重（絶乾重）は 16.41 g/100 cm^3 であった。この値を比重で除して、パイプ内の土の占有体積割合で求めると 6.15% で、先に求めた10サンプルの値と同程度であった。パイプ内の土の団粒の粒径加積曲線を図-2に示す。図示のようにパイプ内は団粒がよく発達し、中央粒径 d_{50} は 1.04 mm であった。なお、非パイプ部分の d_{50} は、 0.21 mm であった。

2. パイプの水力特性

図-3, 4に透水試験結果を、表-2にパイプ、非パイプ部分の水力特性の算出結果を示す。なお、No. 2, 4, 12は、パイプ中に石膏を流し込んだ後、非パイプ部分の透水試験を行わなかったため、近接のサンプルの透水係数を援用した。また、No. 11は測定中にサンプル

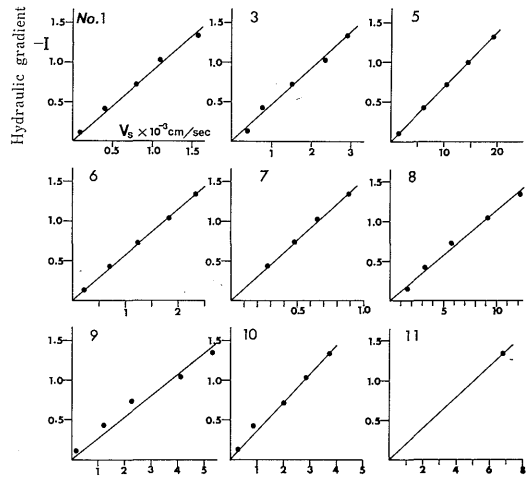


図-3. 非パイプ部分の水力実験結果
Hydraulic experimental results of non-pipe part

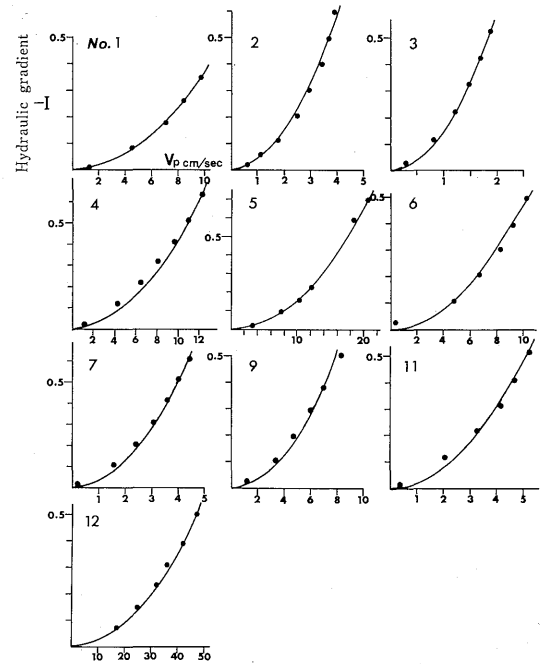


図-4. パイプ部分の水力実験結果
Hydraulic experimental results of pipe
Legend: —, Eq. (2).

が破壊したので1点しか資料が得られなかった。図示のように非パイプ部分の透水性は、原点を通る直線で回復できDARCY則がよくあてはまった。すなわち、 k を透水係数とすると、

表-2. パイプの水理特性
Hydraulic properties of pipe

Properties	Sample No.											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Coefficient of permeability of non-pipe part ($k, \times 10^{-3} \text{cm/s}$)	1.13	(1.13)	2.18	(8.86)	14.42	1.74	0.653	8.86	3.77	2.74	5.13	(5.13)
Friction factor (f')	4.56	43.2	194	2.26	2.18	3.72	3.30	—	8.52	—	7.36	0.162
Coefficient of roughness calculated by MANNING'S formula ($n, \text{s/m}^{1/3}$)	0.207	0.633	1.36	0.127	0.145	0.174	0.542	—	0.279	—	0.218	0.0357
Estimated velocity of pipe flow in practical slope inclination ($v_e, \text{cm/s}$)	3.82	1.21	0.602	3.54	5.69	3.40	1.31	—	3.61	—	3.12	28.4
Reynolds number in the case of $v_e, d=1.04\text{mm}$	24.8	7.9	3.9	23.0	37.0	22.1	8.5	—	23.4	—	20.3	184
Reynolds number in the case of $v_e, d=\text{average diameter of pipe}$	707	232	103	211	935	355	215	—	521	—	156	2858

Note : Parenthesized numbers indicate presumed values.

$$-I = \frac{1}{k} v_s \tag{1}$$

となった。(1)式より得られた k は、ほぼ 10^{-3}cm/s のオーダーであった(表-2)。この値は前報(1)などで求めた値と近似であった。またサンプラーが透明であるため、内壁と土壌との間に水みちができるかどうかをよく観察できたが、サンプラー内壁にワセリンを塗布してあるので、測定中にすべてのサンプルで水みちができていないことが確認できた。以上の諸点から、この方法で求めた透水係数は、野外の実際の透水係数をよく表していると考えられた。

次に、パイプ部分の $I \sim v_p$ の関係は図-4で示されたように、

$$-I = a v_p^2 \tag{2}$$

でよく表された。ここで a は係数である。先に述べたように、パイプの屈曲度は平均 103%程度であったので、曲りによる損失水頭を無視すると、(2)式は、DARCY-WEISBACHの式、

$$-I = f' \frac{v_p^2}{R \cdot 2g}$$

で表すことができる。ただし、 f' は摩擦損失係数、 R は径深、 g は重力加速度である。すなわち、パイプ内の流れは管路の流れとして扱える。

なお、(2)式を

$$v_e = \frac{1}{\sqrt{a}} \sqrt{I_s}$$

ただし、 I_s はサンプル採取地点の斜面傾斜角、として得

られた野外の流速の推定値 v_e を表-2に示す。この値は前報(1)で示した実測の流速 $0.5 \sim 3 \text{cm/s}$ とほぼ一致しているので、この推定式は野外のパイプフローの流速をよく表していると考えられる。

また、MANNING式、

$$n = \sqrt{a} R^{2/3}$$

より、粗度係数 n (ただし、m-s系) を求めると、表-2に示したようになる。表のように、 n の値は $0.036 \sim 1.36$ で 10 サンプルの平均は 0.37 であった。この値は従来知られている鋼管の $0.01 \sim 0.02$ 、自然河川の $0.03 \sim 0.10$ よりかなり大きい。また、この値はこれまで MANNING則を用いた雨水流法においてトライアルで求められた等価粗度 $0.15 \sim 5$ と同程度の値を示している。雨水流法は、山腹斜面の流出を地表流として粗度を算出しているが、パイプの粗度を用いれば土壤中の飽和地下水流でも説明は可能である。なお、 n の値が大きいパイプは、パイプ内の土の占有体積百分率が大きい傾向がある。

なお、No. 4, 7, 9, 11 は、(2)式の適合度がやや悪い。この原因は、これらのサンプルは必ずしも REYNOLDS数 (Re , 後述) の低いものではない点(表-2参照)を考慮に入れると、1回目と2回目の試験の透水係数が異なったことによると考えられる。すなわち、1回目の試験では、パイプから非パイプ部分へ内壁を通して水の浸透、あるいはその逆があったはずであるが、2回目の試験ではパイプ部分が石膏で固められて

おり、パイプ内壁での水の出入りが無い。このため、非パイプ部分からの透水量が異なっていたと考えられる。

パイプ内に、団粒化した土が均等に詰っていたと仮定した場合の Re について、表-2 に示す。計算は

$$Re = \frac{v_e \cdot d}{\nu}$$

とした。ここで、 d は先に求めたパイプ内の土の d_{50} 、 ν は動粘性係数で、融雪期の地下水温が 3.5°C であったので $0.0160 \text{ cm}^2/\text{s}$ である。表-2 の5段目に示したように、パイプ内に土が均等に詰っていたと仮定した場合、 Re が DARCYLE 則の適用範囲である 10 以下になるものがある。したがって、野外で動水勾配が小さく、しかもパイプ内に土が詰っている場合には、部分的にパイプ内でも DARCYLE 則が成立している可能性がある。または、 Re が 20~40 程度のパイプも多いので、DARCYLE 則と DARCYLE-WEISBACH の式の境界領域の運動則で水が動いている場合があることは十分考えられる。

一方、パイプ内に土がまったくない場合の Re については、 d の値としてパイプの平均直径 (表-1 の短径と長径の平均) を用いて計算した (表-2 の最下段)。表に示したように、 Re は 100~2,900 程度で、管路における DARCYLE-WEISBACH の式の適合範囲を示していた。

以上のように、パイプフローの流速とパイプ内の土の量によっては、一部 DARCYLE 則が成立する可能性があるが、多くの場合は管路における DARCYLE-WEISBACH の

式がよく適用できるものと考えられる。この点について、今後さらに詳細な検討が必要と思われる。

IV. おわりに

前報および本報で、パイプフローの分類、分布、流速、水理特性などを明らかにしてきたが、パイプフローを含めた斜面流出モデルの構築には、パイプの集水機構と立体構造を知ることが必要不可欠であろう。今後はこれらについて、測定方法を開発しながら明らかにしていくつもりである。

末尾ながら、東京工業大学工学部の日野幹雄教授には、有益なご教示をいただいた。本研究を進めるにあたり森林総合研究所北海道支所防災研究室の真島征夫室長と清水 晃氏には、種々のご協力をいただいた。同支所土壌研究室の太田誠一室長と塩崎正雄氏には、土色、土壌構造についてご教示をいただいた。以上の方々に深く感謝申し上げる。

引用文献

- (1) 北原 曜：林地緩斜面土層中のパイプフローの特性。日林誌 70：318~323, 1988
- (2) 中尾欣四郎・石井吉之・浦上晃一・徳永英二：流域における流出特性の比較研究—豊平川研究流域—。比較河川学の研究 (代表岸力)：22~35, 1985

(1988年12月19日受理)