森林土層中の水移動におけるパイプ孔隙の 特性に関する研究

北原 曜

KITAHARA, Hikaru: A Study on the Characteristics of Soil Pipes

Influencing Water Movement in Forested Slopes

要旨:森林土層中の水移動形態の中で極めて大きな比重を占めると考えられるパイプ流について、実態観測及び水理実験をもとに、その特性を明らかにした。対象地は、地質、地形などが異なる2か所で、各斜面にトレンチを掘削し、パイプの型、分布、直径、流量などを観察し、その諸特性を明らかにする一方、1次谷の流量との比較検討を行った。各トレンチには多数のパイプが見出され、植物根系起源のA型と化学的侵食のB型、さらに流出時以外には肉眼で確認できないC型の3型が存在した。支所実験林内ではA型とB型が認められ、両型は分布深、直径が明確に異なった。定山渓流域試験地ではC型が認められた。全型ともパイプ流はマトリックス流に対して明らかに卓越していた。パイプの分布は集中分布型、流速は0.5~3.1cm/sであった。A型パイプを含んだ非攪乱土壌サンプルの透水試験の結果、パイプ流はDARCY-WEISBACHの式がよく適合し、MANNINGの粗度係数はA型か0.4前後、C型が 4前後であった。パイプ流出の時系列的変化についは、1次谷の河川流量のうち少なくとも側壁斜面からの流出は大部分がパイプ流量であった。各パイプからの流出ハイドログラフは互いに近似な波形を示した。パイプの諸特性を組み込んだモデルは、観測値と比較的よく一致した。森林土層の発達過程に及ぼすパイプ流の影響について、流出機構、崩壊機構、地形発達機構との関係を考察した。

次

8

64 1 65 1.1 森林土層中の水移動 65 67 67 1.4 研究対象地の概要 ······ 69 71 2.1 トレンチ掘削による現地観測 ……………………………………………… 71 74 2.3 流量及び流速 78 80 80 85 86 90

1993年2月3日受理

(1) 北海道支所

環境-20 Forest Environment-20

 パイプ流出の時系列的変化 	93
4.1 集水トレンチによる観測	93
4.2 側壁流量	96
4.3 河川流量に占めるパイプ流の割合	98
5 森林土層とパイプ流	101
5.1 パイプ流のモデル化と検証	101
5.2 森林土層の発達過程に及ぼす影響	104
結 言	110
引用文献	110
Summary	112

緒 言

昨今の近代都市の発達と高度な土地利用の進展は,水源地帯である森林の水土保全機能に依拠してい ると言っても過言ではない。すなわち,都市人口を支える水資源の確保と土地生産力の向上のための洪 水・土石災害の軽減は,森林,とりわけ森林土層の特質である水土保全機能に負うところが大きい。こ の森林土層の水土保全機能については,熊沢蕃山をはじめ古来より多くの識者が指摘し,近代において も水源かん養,土砂流出防備,土砂崩壊防備など各種保安林として厳重に保護されてきたところである。 しかし,最近の都市人口の急増と大規模な宅地開発,リゾート開発は,森林の大面積破壊を伴い慢性的 水資源不足と洪水・土石災害の危険性の増大を引き起こしている。

北海道を含めて湿潤な気候下にある我が国の水源地帯では、降水のうち河川流出に寄与する水分量は 半分以上を占める。森林の地表面を流れる木は極めてわずかであるから、降水の半分以上がいったんは 森林土層中に浸透し、やがては河川に流出することになる。森林土層に浸透した水は多様な経路を経て 河川に流出するが、その間に極めて重大な作用を行う。流出現象を例にとれば、森林土層は降水の入力 を変換し、流出として出力にする場とみることができよう。また、森林土層中の水移動は崩壊現象や地 形発達はもちろん、森林植生や水質形成などに極めて重大な影響を及ぼしている。このように、森林土 層中の水移動は、質と量両面が要求される水資源の問題や洪水・土石災害などを通じて、社会的経済的 に人間生活に密接にかかわっている。さらに、最近の大規模土地改変は、森林土層の攪乱により森林土 層中とは異なる水の移動である地表流を発生させ、侵食の急増や河川水質の汚濁など各地で大きな社会 問題を引き起こしている。ところが、森林土層中の水移動は複雑であるため依然として不明な点が多く、 水資源確保や災害防止技術の改善を図る上で大きな障害となっている。特に、洪水ピークの大部分を占 めると推定されている森林土層中の速い流れとして、近年、パイプ流の存在が注目されてきているが、 その実態及び諸特性はまったく未解明なままである。

本論文は,森林土層中の水移動を解析する上で大きな比重を占めると考えられるパイプ流について, 実態観測及び水理実験をもとに,その特性を明らかにしようとしたものである。

本研究をまとめるにあたり北海道大学農学部の新谷 融教授,藤原滉一郎教授,梅田安治教授には適

切なご教示と多大なご指導をいただき,深く感謝申し上げる。また,本研究を進めるにあたり北海道営 林局治山課と札幌営林署定山渓営林事務所,森林総合研究所森林環境部山地防災研究室の真島征夫室長 と同九州支所防災研究室の清水 晃室長には,本流域試験地設定に多大な協力をいただいた。森林総合 研究所北海道支所連絡調整室及び庶務会計課,経営部長には,本試験地の観測体制の整備に尽力してい ただいた。同北海道支所土壌研究室の太田誠一室長及び塩崎正雄主任研究官には,土壌分布図と土層等 深図を快くご教示いただき,また土壌構造についてご教示いただいた。東京工業大学工学部の日野幹雄 教授には,水理特性について有益なご教示をいただいた。以上の方々に深く感謝申上げる。

なお,本論文は北海道大学審査学位論文「森林土層中の水移動におけるパイプ孔隙の特性に関する研 究」を補筆したものである。

1 研究方法

1.1 森林土層中の水移動

水循環過程における森林土層中の水の移動の役割を概観すると、まず森林流域に降った雨や雪は、樹 冠に遮断され蒸発・昇華するほかはほとんどが森林土層に到達する。森林土層に加わった水は、一部が 植生による蒸散、地表面からの蒸発、土壌水分にあてられたのち、残りが森林土層中を河川に向かって 移動し流出する。この森林土層中の水の移動について分類を行う(Fig.1)。

まず、河川流量ハイドログラフから流出成分の分離を行うと、ハイドログラフの減水部分の変曲点に よって、洪水に関与する直接流出成分と低水時の基底流出成分に分けられる。直接流出成分は、地表流 出と浅い中間流出(中間流とは地表流と地下水流の中間成分)の総和とされ、基底流出成分は、地下水 流出と深い中間流出の総和とされている。これらの流出成分を組み合わせて河川流量ハイドログラフを 説明するために、タンクモデルや雨水流法などさまざまな流出解析手法がある。これらは便宜的には有 効な面もあるが、森林土層内の水の移動をホワイトボックス化するという点では使うことができない。 っまり、これらの概念はあくまでもハイドログラフの形状から推定された流出成分の分類であって、実 際の流出現象を分類したものではない。実際の森林斜面では、地表流はほとんど起こらないことが明ら かとなっており、林床に到達した降雨水はいったんは森林土層中に浸透する。さらに、地中に浸透した 水がどのような経路をとり、どのような運動則で河川へ到達するのかは、河川流量ハイドログラフの流 出成分を分離するという方法では解明できない。

一方,実際の流出現象を水理学的に分類すると,地表流と地中流(浸透流)に大別される。さらに, 地中流はDARCY 則に基づくマトリックス流と非DARCY 則と考えられるパイプ流に分けられる。これら の現象を飽和領域と不飽和領域で分類すると,マトリックス流は両領域で発生するが,パイプ流は飽和 領域のみで発生すると考えられている。このうち,森林土層中の水の運動則に均質土層中の水の流れを 仮定した DARCY 則だけを用いて,それを不飽和領域まで拡張した流出モデルが飽和不飽和浸透流理論 である。これは,流域の森林土層内の水の移動をホワイトボックス化するというこれまでにない手法で あった。しかし,そのモデルの適合度は極めて悪く,また森林土層が不均質であるという実態にもそぐ わない。さらに,このような手法では崩壊機構や地形発達機構などを統一的には説明できないし,森林 植物や動物の水移動に果す役割を正確に評価できない。この原因は,森林土層中の水の運動則の実態を 明らかとせずにモデルに Darcy 則を大前提としたことにある。

そこで近年,連続した大孔隙であるパイプからの流出が注目され,パイプ流が森林土層中の水の移動 の大きな部分を占めているらしいことが認識されてきた。しかしそれだけではなく,パイプ流は崩壊, 地形発達,水質形成,侵食などに大きな影響を及ぼしている可能性も指摘できよう。ところが,パイプ



Fig. 1. 森林土層中の水移動の分類 Classification of water movement in forested soil

流の研究はその測定方法が難しいこともあって未解明な部分が多くいまだ端緒についたばかりで、その 実態は明らかにされていない。本論文では、パイプ流の定義を「地中流の一つで、自然のパイプの中の 集中した流れ」(Jones, 1971)とし、森林土層中のパイプ流について詳細な観測と実験を行うことにより、その法則性を明らかにし、パイプ流が森林土層に及ぼす影響を評価した。

1.2 研究小史

1980年頃よりRICHARDS (1931)による不飽和領域まで拡張されたDARCY 則と, FREEZE (1969, 1971) による数値解法を組み合わせた飽和不飽和浸透流理論による解析が行われた(例えば,谷,1982,1985 ;太田(猛)ほか,1983;太田(岳),1983a,1983b;鈴木,1984など)。これは,それまでの流域試 験地の量水堰流量資料だけを用いた統計的解析から,飽和不飽和透水係数とPF水分曲線という土壌の 水文特性を用いた物理的解析への大転換であった。この理論の検証は,得られた数値解を斜面各部の浅 井戸の地下水位と土壌水分計による観測で行われた。しかし、実際の土壌サンブルの値をこのモデルに 用いると、河川流量のハイドログラフを説明できないこと、流域土層が均質ではないこと、水質形成機 構を説明できないことなどが次第に明らかとなってきた。とりわけ、実測ハイドログラフに計算ハイド ログラフを合わせるためには、DARCY 則の基本である透水係数を実際の土壌サンブルの値より2オー ダー程度高くする必要があり、しかもその適合性は良くなかった。それは、流域の森林土層中の水の運 動則がDARCY 則であるという前提を最初においてしまったことが大きな原因の一つである。基本的な 研究方法として、まず最初に実際の水の移動を詳細に観測し、その水理的、地形的な法則性を明らかに した上で、さらに流域の森林土層の不均質性などを考慮してモデル化していく必要があったと考えられ る。

このような研究の流れの中で,流域内の森林土層に断面を作りそこからの流出観測も開始された(太田ほか,1982;新藤ほか,1983;安原ほか,1984;田中ほか,1984;北原ほか,1986)。それは,それまでの浅井戸による地下水位変化の観測だけではなく,森林土層断面からの流出を直接観測する方法であった。観測の結果,森林土層断面からのパイプ流量はDARCY則をはるかに超えるものであること(塚本ほか,1988;北原ほか,1988b)などが定性的ながら次第に明らかとなってきた。また,田中(1988),塚本ほか(1988)が,JONES(1971,1978)の世界的なパイプ流に関する研究(1981)を紹介しているが、世界的にみてもパイプ流の研究は立ち後れている。このように、パイプ流は森林土層中の水移動に大きく影響していると考えられてきているが、パイプ流の特性に関する研究はいずれも定性的記述的で、研究はいまだ端緒についたばかりである。

このように,我が国内外においてもパイプ流の研究報告は極めて少ない。パイプ流の定量的扱いの最 終目標の一つとして,流出モデルの作成が挙げられるが,パイプ流は観察そのものが難しいこともあっ て,モデルの基礎となるパイプの分布,発達過程,流速,河川流量に占める割合,水理特性などは全く 未解明のままとなっている。

1.3 研究方法

パイプ流の研究フロー図をFig.2に示す。パイプ流の研究方法については、他の水文研究と同様、実 態観測を基礎にその法則性を明らかにし、最終目標の一つとして流出モデルを構築していく必要がある。 しかし、パイプ流は観測方法そのものが開発されておらず、またパイプの実態はよく把握されていない。 そこでパイプ流の通路であるパイプ孔隙の実態について、地質、地形などが極端に異なる2か所で、観 測方法を開発しながら詳細な観測を行った。すなわち、地質・地形の異なる山腹斜面にトレンチを掘削



Fig. 2. パイプ流の研究フロー図 Flow chart of pipe flow studies

し,パイプの型,分布,直径,流速,流量などの諸特性の実態を明らかにした。この野外観測は,時間 的に継続した資料ではなく時間断面を固定した非時系列的資料であるため,一部統計的な解析にとど まったが,これによってパイプ流の水理学的機能に関する要因の分類を行う基礎とした。

パイプの水理特性の解明は、パイプ流の特性を解明しモデル化を行う上で不可欠のものである。そこ でパイプの水理特性を調べた。水理特性は、実態観測した試験地よりパイプを含めた土壌サンプルを採 取し、透水試験を行うことにより明らかにした。またこの結果と、定山渓流域試験地のトレンチでトレー サーを用いた結果と比較検討した。

次にパイプ流出の時系列的変化について測定した。これまではパイプ流の非時系列的な特性を調べた が、パイプ流の全貌を把握するためには時系列的特性についても解明する必要がある。しかし、パイプ 流の時系列変化も全く未知であるため、試験地にコンクリート製の集水トレンチを作成し、降雨に対す るパイプ流の反応を測定し、さらに、この資料と試験地に既設の量水堰資料を用いて、パイプ流量と河 川流量の関係を時系列的に解析することにした。

森林土層とパイプ流の関係について検討するため、まずパイプ流のモデル化とその検証を行った。これは、解明されたパイプ流の非時系列的な特性と時系列的な特性を取り込んで、パイプ流のモデル化を 行い、集水トレンチ資料を用いてその検証を行うこととした。最後にこれまでの章で明らかとなったパ イプ流の諸特性を用いて、森林土層に及ぼすパイプ流の影響を考察しようとした。

1.4 研究対象地の概要

研究対象地は、地形・地質の全く異なる2か所(Fig. 3)を選定した。この2か所を研究対象地とした理由は、Table 1に示したように傾斜、土壌母材、土質などが大きく異なっており、パイプ流の観察 に好適と考えられたからである。Fig. 4に支所実験林における試験地(北原ほか、1986、1988b)の地 形図を示す。試験地は、支所実験林内を流れる焼山川流域の山腹斜面である。林相はシラカンバ、ハル



Fig. 3. 研究対象地の位置図 Sites of pipe flows investigated



Fig. 4. 支所実験林内の試験地の地形 Topography of the study site (H) in the experimental forest of Hokkaido Res. Ctr.

Table 1. 両試験地の地形・地質の比較

Comparison of topography and geology between both study sites

	傾斜 Inclination	土壤母材 Bed rock	透水係数(cm/s) Coefficient of permeability	地下水位 Groundwater level
支所実験林	緩傾斜地 (3~14度)	ローム,未 固結堆積層	やや不良 10 ⁻³ 以下	上昇しやすい
Experimental	Gentle	Loam,	Rather	Easy rising
Forest of	$(3 \sim 14 \text{ degree})$	Unhardened	poor	
Hokkaido Res.		accumulation	Below 10^{-3}	
Ctr.		layer		
定山渓流域 試 験 地	急傾斜地 (37度)	火成岩	良 好 10 ⁻² 程度	水深浅い
Jozankei	Steep	Igneous rock	Good	Difficult
Experimental	(37 degree)		About 10^{-2}	rising
Watershed				



Fig. 5.土壌断面と土壌物理性Soil profile and properties

ニレ、ミズナラなどの落葉広葉樹壮齢林でうっ閉度0.8、林床はチシマザサ(高さ2m)が密に覆って いる。観測斜面は、斜面長88m、平均傾斜12.9度で、斜面型は平衡非集水型である(Photo 1)。本斜面 は、これまでの観察で大雨時や融雪期にも地表流は全く発生していないことが分かっている。また、ガ リーや地表流の痕跡も全く認められない。従って、この斜面では、降雨水や融雪水はいったん土中に浸 透した後、土層中を河川方向へ移動するものと考えられる。

土壌断面図と土壌の有効間隙率及び透水係数の分布について Fig.5 に示す。有効間隙率は, PF が 0 ~1.7の水分を保持できる間隙の割合である。土壌型は B_Dで, 母材は C 層以下が第四紀洪積統輪厚砂 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。

もう1か所の試験地は札幌定山渓の定山渓流域試験地(Fig.6)で,小樽内川支流の時雨1の沢に位置し札幌営林署2241林班の一部である。その諸元は,流域面積2.013ha,最低標高(流末量水堰)312m, 高低差127.5m,平均傾斜36.7度,不断河川長95.1m,河床勾配16度,谷線の方位角E10Sの非常に急峻な1次谷である(北原ほか,1987)。この流域の水収支は、1987~89年の平均で無積雪期(5月5日から11月21日)の降水量703.7mmに対して,蒸発散量は457.1mmであった(北原ほか,1988a,1991a)。 最大積雪水量は1987~91年の平均で389mmである。

林相はトドマツ,イタヤカエデ,ミズナラ,シナノキなど針広混交の天然林で,材積は175m³/ha, 本数密度は約600本/haである。基岩は石英斑岩,土層は湧水点上部の谷頭堆積地が350cmであるほかは, 河道沿いが60cm以下,山腹が60~180cmである。谷頭堆積地は斜面上部からの崩積土が厚く堆積した ものと考えられる。土壌型は,流域の尾根に近い部分はP_D型またはB_B型,山腹はB_D型,谷すじはB_E 型,河道及び湧水点付近は基岩が露出している。

なお、札幌付近では夏期に降雨の量と強度が小さい反面、3月末から4月下旬の融雪期には毎日10~ 15mm 程度の融雪水量が約20日以上続いて発生する。そのため、融雪期に森林土層へ供給される水量は、 この期間の降水量と合わせて3週間で計350mm 程度にもなり地下水位の上昇が著しく、飽和浸透流の 一つであるパイプ流の観測に適している。また、地下水位が最大となるのは、この付近で例年4月中下 旬の消雪日直前で、その予測が容易であり、しかも融雪水量は気温の高いよく晴れた日中に最大となる ため、パイプ流の観測をよい条件で行える。これに対し、夏期の降雨は、大雨が夜間に発生することが 多いことや、大雨の予測が難しいことなどにより、パイプ流の観測が困難である。このようなことから、 パイプ流の観測には融雪期は最適であると考えられる。

2 パイプ孔隙の実態

2.1 トレンチ掘削による現地観測

斜面にトレンチを掘削し,森林土層断面におけるパイプの分布,直径,流量,流速などを測定した。まず, 支所実験林の試験地における測定方法は,斜面の上部から下部に向かって等高線沿いに,深さ1.2m,長さ 5m,幅0.7mのトレンチを5本掘削し(Fig. 7のT-1~5),パイプ流の観測に供した。掘削時期は、トレ ンチ断面が風化あるいは攪乱されないように測定開始1週間前の1987年4月14日とした。パイプ観測に は新鮮な森林土層の断面が必要で,森林土層断面が凍上融解や乾燥などで攪乱するとパイプの存在が不 明確になることがある。各トレンチから1.6m 斜面上部側方には、地下1.2~1.6m 深の浅井戸(Fig. 7 のW-1~5)を掘削し、地下水位を連続観測した。

各浅井戸では融雪期に地下水位が上昇し、トレンチでは顕著なパイプ流が観測されたので、融雪最盛 期の4月21日にトレンチ内を排水し、各トレンチ断面のすべてのパイプの分布、直径、流量などを測定 した。また、同時にパイプ流量と非パイプ部分からの流量を測定した。ただし、パイプの位置がトレン チの底(地下120cm)付近のものは採水できないため測定できなかった。流量測定は、排水による森林 土層内の真の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



Fig. 6. 定山渓流域試験地の地形と土壌型, 土層厚の分布 Topography, soil type, and soil depth of the study site (J) in Jozankei experimental watershed

- A: 湧水点量水堰 Measuring weir at spring point of valley head
- B:集水トレンチ Trench for measuring pipe flow and matrix flow
- C:流末量水堰 Measuring weir at stream end

た。パイプ流量の測定方法は、パイプ直下にロートを置き採水して行い、また非パイプ部分からの流量 は400cm³土壌採取円筒を差し込んで取水した。Fig.8にその概略を示す。

パイプ流の流速は、トレンチ内の水位が回復した翌日、斜面上部の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(食塩)20kgを401の水に溶かしたものを投入し、すぐ下部のトレンチ のパイプ出口に設置した電導度計の示度変化した時間から算出した。トレーサーとして食塩水を用いた のは、環境的にほとんど影響せず極めて安価でしかも簡易な電導度計で電導度が直接測定できるためで ある。

一方,定山渓流域試験地では、1988年にトレンチを作成してパイプ流の実態を観測した。トレンチは 単に土を掘削しただけのもので,量水堰の60m上流右岸の河道より7m離れた山腹斜面に作成した(北 原ほか、1989c)。この斜面は非集水平衡斜面形で傾斜は38.5度で,これまで数年間の観察では融雪期や 大雨時に地表流が発生したことがない。土層厚は30cm,そのうちA層は25cm,風化層は基岩直上の5 cmである。

測定方法は、支所実験林の試験地の場合と同様で融雪期の1988年4月20日に、斜面の上下に189cm 離 してトレンチ(幅約25cm,長さ112cm)を掘削し、飽和地下水面を確認した後、パイプの分布、流量、 流速を測定した。流量については、パイプ流量は容器を下部トレンチのパイプ孔にあてて測定し、土層 断面全体からの流量は下部トレンチの基岩上に流出してきた水を集めて測定した。パイプ流速は、食塩 をトレーサーとして、電導度計を下部トレンチのパイプ孔に設置して測定した。なお調査時は、融雪最 盛期に前日の24.5mmの降雨が重なり、量水堰での流量は1.102mm/h であった。このほか土壌採取円筒 を用いて、基岩直上の風化層でパイプを含まない部分の土壌サンプルを採取し、透水係数、粒径組成の 測定を行った。



- 74 --

2.2 断面形状並びに分布特性

Fig.9に、1987年融雪期における支所実験林の試験地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 般的な傾向としては、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動が大きい。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。

Photo.2にパイプから勢よく流出している状況を示す。パイプ流は飽和地下水位以深に発生するため、 トレンチに水がたまっている状態では観察しづらい。そこで、パイプ流が明確に分かるように、写真撮 影の前にトレンチの水を少し排出してある。

Fig.10に各トレンチの土層断面を示す。図中の数字はパイプの番号であるが、トレンチ間で同じ番号 でも連続したものではない。パイプと認定したものは、トレンチを排水する前も勢よく水が吹き出して いたのが確認され、しかも排水後もパイプ断面から水が吹き出ているものに限定した。従って、この時 の地下水位より浅い土層中にあるパイプは含まれていない。また、地下水面がトレンチから消失した5 月以降に土層断面を観察すると、パイプ以外にパイプ状の孔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のでパイプに含めていない。なお、図にはトレンチの斜 面上部側断面を示したが、下流側の対応する位置にも同様のパイプ孔が認められ、パイプが連続してい ることが確認できた。

図示のように各トレンチとも多数のパイプが見出されたが,パイプにはその内部に黒色団粒や腐植が 認められた A 型(図中の白丸)と全く認められない B 型の(黒丸)の2 型があった。この A, B 2 型の 分布深, 直径, 本数密度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



Fig. 9. 融雪期の地下水位変化 Changes in groundwater level during snowmelt season

21~22日の地下水位はトレンチ内の水の排水試験による影響がある。 Groundwater levels on Apr.21-22 were influenced by a drainage experiment.



Fig. 10. 各トレンチのパイプの分布 Distribution of soil pipes in each trench

図中の数字はパイプの番号 Numerals indicate pipe numbers ○:A型, A type ●:B型, Btype

Table 2. パイプの 2 型の比較

Comparison of two types of soil pipes

型	地表面から の深さ	直径	流量	本数密度	トレンチの幅1m 当たりの流量
Туре	Average depth from ground surface (cm)	Average diameter (mm)	Average discharge (cm ³ /s)	Average number per trench width (/m)	Average discharge per trench width (cm ³ /s/m)
A	46~ 97(75.1)	3~91(21.7)	0.03~ 9.0(1.82)	0.60	1.09
В	55 - 129(101.4)	1~65(3.5)	0.04~11.6(1.86)	6.35	11.78

()内は平均 Parenthesized numbers indicate the average.





○:A型,Atype ●:B型,Btype 深, 直径, 流量, トレンチの長さ1m当たりの本数 密度の違いについて分散分析した結果では, 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本なので検定は行えなかったが, 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。

このように、A、B型とも各トレンチ間の差が小 さいので、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、トレンチの長さ1 m当たりの本数密度について検定した(Table 2)。 その結果、分布深、直径、本数密度については1% 水準でA、B型間に有意差が認められた。また、パ イプ1本当たりの平均流量は両型とも1.85cm³/s前 後で差がなかった。

Fig. 11にパイプの直径別分布深を示す。A型とB型とは明確に分布深が異なり、A型は地下100cm以深には分布せず、逆にB型は浅いところには少ない。直径は明らかにA型がB型より大きい。Fig. 12にトレンチの長さ1m当たりのパイプ本数の直径

別分布を示す。パイプ直径はB型パイプで2~3mmのものが多いが,A型ではllmmを超えるものが 多い。

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。ま ずA型は, B層付近の比較的浅い土層中に多く認められ,パイプ周辺の土層は黒色土化している。また, A型のパイプ孔の内部には径1~3mmの黒色団粒状の土粒が数多く認められた。特に, T-2のNo. 8などA型のパイプには, 腐植化した木本根系の樹皮が外周を巻いているものがあった。これらの点 から推定すると、A型パイプの成因には植物根系の枯死が推測される。また、A型は本数密度が小さく 直径は大きいが、1本当たりの流量はB型と差がないのが特徴である。ただし、測定時の地下水位が さらに上昇していれば、A型はより多く認められると推定される。断片的ではあるが、実際に1987年4 月21日の測定時よりトレンチの地下水位が10cm上昇した翌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か所、T-2で7か所、T-3で2か所のA型パイプが新たに確認された。 一方、B型は地下1m程度のC層に分布し、直径が2~3mmの円形のものが多く、ときに土層の裂 け目のような形のものもある。直径1mm以下のパイプの観測もれの可能性はあるが、B型パイプの直 径別の本数分布(Fig.12)は直径3mm以下に集中している。この型では腐植など生物的な影響が全く ないようで、成因の一つとしては地下水の化学的侵食など非生物的なものが考えられる。

本数の多かった B 型パイプの森林土層断面における分布を I & 指数(MORISHITA, 1962)を用いて統計 的に検定したところ、すべてのトレンチで小集団を持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。これは比較的均質と思われる同一地域の森林土層中でもほかより透水の良好な部分



Fig. 12. トレンチの幅1m当たりのパイプ本数の直径別分布 Number of soil pipes classified by diameter per 1m of trench width



Fig. 13. 定山渓流域試験地のトレンチの土層断面 Soil profile of simple trench in site J

が存在し、そこにパイプが集中的に分布するためと推定される。

パイプの連続性については、支所実験林の試験地においてA型パイプをこれまで数回掘削して追い かけたことがあるが、いずれも少なくとも4~5mは確認できた。ある例では、3mほど掘り進めたと ころ埋没した木の根株が現れたことがあり、腐朽した木片も確認できた。また、傾斜の緩い斜面ではパ イプはやや屈曲しているようであった。パイプ孔の掘削は途中で中止したが、斜面上部に向かって連続 していると考えられる。

一方,定山渓流域試験地におけるトレンチの土層断面のパイプの分布をFig. 13に示す。本試験地では トレンチを上下部の二つ掘削したが,図は下部トレンチ断面を示したものである。パイプの認定は,支 所実験林の試験地と同様で,他の部分より顕著に流出している部分をパイプとした。しかし,この流域 試験地は基岩が石英斑岩であるため,土層は直径数 mm の粒径の大きな礫が多く,パイプ孔の認定は難 しかった。パイプの分類について,塚本 (1988)は,顕在パイプ (Visible pipe)と潜在パイプ (Invisible pipe)に分けたが,支所実験林のような未固結堆積層にみられたパイプはA,B型とも顕在パイプ,定 山渓流域試験地のような非流出時に肉眼で確認できないパイプは潜在パイプに相当すると考えられる。 本試験地の潜在パイプの成因は,礫間の微細な粒径の土が水により物理的に洗脱されてできた可能性が 考えられる。下部トレンチの土層断面には多数のパイプが認められたが,そのうち大流量7本の諸特性 を述べる。なお,トレンチの長さ1m当たりの本数密度は,上トレンチで2.7本/m,下トレンチで6.3 本/mであったが,小流量のパイプも含めるとさらに数が多くなる。

2.3 流量及び流速

支所実験林試験地において、1本のパイプについてみると、Fig. 14に示したように地下水位と流量は 一定の関係が認められる(北原ほか、1986)ので、各パイプとも地下水位が上昇すれば流量も増大する。 例えば、21日にT-1のNo.12が9.0cm³/sであったのが、22日には31.6cm³/s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,前述のT-1のNo.12が直径91mm,9.0cm³/sというように,斜面下部には 直径が大きく流量の大きいA型パイプが存在するようである。すなわち,斜面位置によりパイプの本 数密度は変らないが,斜面下部には大流量のパイプが含まれるようである。

Fig. 15に B 型パイプの流量の頻度分布を示す。図示のように、流量の頻度分布は指数分布を示しているようであり、1.7cm³/s 以下の流量が多い。4月21日の測定では大きな流量を示したものとしては、T -1のNo.17が11.6、No.14が3.8、T -2のNo.14が4.2、T -3のNo.5が4.7、No.6が3.7、T -4のNo.9が7.4、NO.8が5.5cm³/s などがある。T -5では、2.0cm³/s を超えるような B 型パイプは存在しなかった。なお、A 型の流量の頻度分布は、本数が少なく明瞭な傾向は把握できなかった。

森林土層断面における非パイプ部分からの流出は、採取位置によりやや差があったが、平均 0.00016cm³/s/cm²で非常に少なく、この値を換算すると透水係数k =8.7×10⁻⁴cm/sとなり、C層のk =1×10⁻³cm/sと近似な値であった。従って、この非パイプ部分からの流出はDARCY 則に従うと考え られる。この値をT-1の長さ1m当たりの地下水位以深(地下45~120cm)の非パイプ部分からの流 量にすると1.21cm³/sとなる。これをTable 2 に示したパイプからの流量と比較すると、トレンチの長

— 78 —

さ1m当たりの総流量14.1cm³/sに占めるパイプからの流量は、A型7.7%,B型83.7%で計12.9cm³/s, 91.4%であった。非パイプ部分からの流量は8.6%にすぎず、DARCY 則に従う浸透流はわずかであると いえる。実際には地下1.2mより深い位置にあ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、パイプ流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。

定山渓流域試験地では、トレンチ断面のパイプのうち大流量7本の平均流量は5.9cm³/sであった。 これをトレンチの長さ1m当たりの流量に換算すると、36.75cm³/s/mとなる。一方、トレンチ断面か らの総流量は111.8cm³/s/mであったので、7本のパイプからの流出は総流量の32.9%を占めたことに



Fig. 14. 地下水位とパイプ流量の関係 Relationship between groundwater level and pipe discharge

Fig. 15. B型パイプの流量の頻度分布 Frequency distribution of discharge for B type

- 79 -



Fig. 16. 上部トレンチにトレーサー投入後,下部トレンチのパイプの流出水にあらわれた 電導度の変化

Change of electric conductivity of pipe outlet water in downward trench after throwing tracer to upward trench

なる。この試験地の森林土層は礫が多く、パイプ以外の断面からの流出が DARCY 則かどうか不明であったので、REYNOLDS 数(R_e) で検討した。まず、この層の透水係数は 3.32×10^{-2} cm/s であったので、その透水係数に斜面傾斜として動水勾配0.6225を乗じて求めた流速 v_s は0.0207cm/s となる。また中央粒径は0.34cm であったのでこれをdとし、 ν をこのときの水温3.5度の値0.016cm²/s とおくと、

 $R_e = v_s d/\nu$

であるから R_e は0.44となる。R_eの値が10以下の場合は DARCY 則に従う流れと考えられており,トレン チのパイプ以外の土層断面からの流出は明らかにマトリックス流である。従って,流速0.0207cm/s に 基岩からの飽和地下水深15cm (Fig. 13参照)を乗じて求めた流量は,31.0cm³/s/m となる。以上をま とめると,マトリックス流により27.7%,大流量のパイプから32.9%の流出があり,残り39.4%が小流 量のパイプからの流出と推定され,大小のパイプからの流出は土層断面からの総流量の72.3%を占めた ことになる。

パイプの流速は、支所実験林の試験地の上部トレンチにトレーサーを投入後、下部トレンチのパイプ の流出水にあらわれた電導度の変化から求めた(Fig. 16)。このように電導度計を用いれば、トレーサー 投入後、明確に電導度が上昇し上部トレンチの水が下部へ速やかに流れていることが分かる。なお、ト レーサー投入前のパイプの流出水の電導度は0.55mS/cmで一定な値を示していた。このようにして求 めたパイプ流の流速について Table 3 に示す。パイプ流の流速試験では各パイプに電導度計が必要とさ れるため、すべてのパイプ流速は求められなかったが、いずれのトレンチ間とも流速0.535~ 3.077cm/sで、流速の大きいパイプは約2~3 cm/s程度の近似な値を示した。この値は前年に予備的 に求めた値1.8cm/s(北原, 1986)と近似な値であった。また、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。

一方,定山渓流域試験地のトレンチでも支所実験林と同様に食塩をトレーサーとして流速を測定した が,大流量7本のパイプ流の流速は,いずれも0.733~0.896cm/sであった。パイプの断面積は,下ト レンチ出口での実測流量を実測流速で除して求めたが,トレンチ間のパイプの分岐合流が不明であるた め,この断面積は過大な値である可能性がある。

3 パイプの水理特性

3.1 非攪乱サンプルによる水理実験

支所実験林の試験地とその周辺斜面からパイプを含んだ非攪乱土壌サンプルを採取し透水試験を行い、パイプの水理特性を測定した(北原,1989b)。サンプル採取地点は、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である。A,B斜面とも土層断面などはほとんどT-1付近と変らない。パイプを含んだ土壌サンプルは、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、植物根系によって発生したA型パイプと考えられるものである。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。

Table 3. パイプ流の流速の測定結果

Results of pipe flow velocity measurement

トレンチ区間 Section	距離 Slope distance	傾斜 Slope inclination	バイプNo. Pipe number	直径 Diameter	流速 Velocity	型 Type
	(m)	(Deg.)		(mm)	(cm/s)	
$T-5 \rightarrow T-4$	7.10	14.3	18	5	2.22	В
			22	4	0.95	В
			9	7	0.93	В
$T-4 \rightarrow T-3$	7.20	11.5	8	5	3.08	В
			7	8	2.79	В
			5	22	2.75	В
			4	1	2.42	в
			2	3	2.25	В
			10	3	1.89	В
			13	5	1.87	В
			16	5	1.57	В
			17	14	1.55	Α
			18	2	1.55	В
$T-3 \rightarrow T-2$	6.65	12.7	7	3	2.05	В
			22	3	1.48	В
			10	3	1.45	В
			15	3	1.33	Α
$T-2 \rightarrow T-1$	9.25	10.5	11	1	1.48	В
			9	3	1.36	B
			18	2	0.84	В
			12	91	0.82	А
			1	35	0.73	Α
			10	2	0.70	В
			3	2	0.64	В
			8	22	0.54	A

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トレンチを掘削 し,パイプ流が確認できたものにあらかじめカラー画鋲などで印を付けておく。これは地下水位が低下 した場合に,トレンチ断面に一見パイプと似ているがパイプではない孔(疑似パイプ)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。このような孔は連続ではなく,短い距離で塞がって いるため,パイプ流として機能していない。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、下流側のパイプ孔にビニールチューブを差し込み、たばこの煙を吹込んで行う(Fig. 17)。 疑似パイプ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。すなわち、パイプ孔は連 通しているので、吹込む圧力が極めて小さく、また上流側のトレンチから煙が出るので判別は容易であ 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9.5×9.5cm、 長さ30cm、上面は水平に成型する。上面を水平にして採取した理由は、以後の透水試験の際にサンプ ルを水平に設置するためである。これをサンプラー(長さ30cm、幅10cm、厚さ5mmの透明アクリル板







Fig. 18. 土壌サンプルの採取方法 Method of collecting soil samples

Fig. 19. 透水試験装置の概要 Outline of hydraulic conductivity experimental apparatus

をL字型に接着したもの2個)を使って採取する(Fig. 18)。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,Fig 19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全く異なっている(後述)ため,その採取 は容易であった。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 少ない上に,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。粒径組成は湿式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。石膏を流し込む際は、針金でよく攪拌し気泡 が残らないようにした。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、石膏の透水係数は極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。パイプ状に固まった石膏の体積は,大容量メスシリンダーに沈めて測 定し,また断面形状や延長はノギスと巻尺によって測定した。このほかに,パイプを含まない土壌サン プルの定水位透水試験を行い,その透水係数を求めた。

以上の測定項目によって、非パイプ部分の水理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る Q_scm^3/s とし、その流速を v_scm/s 、非パイプ部分の断面積を S_scm^2 とすると、

$$v_s = Q_s / S_s$$

$$S_s = S - S_p$$

で計算した。ただし、Sはサンプルの断面積で9.5×9.5cm²、S_pcm²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 $Q_p cm^3/s$, 流速を $v_p cm/s$ とすると、

$$v_p = Q_p / S_p$$

$$Q_p = Q - Q_s$$

ただし、Qは1回目の透水試験で求められ、Q_sは2回目の透水試験により動水勾配1との関係が求められている。

ー サンプル No.	採集斜面	傾斜角	サンプル間 の関係	地表面から の深さ	平均断面積	平均長径	平均短径	離心率	径 深	パイプ内団粒 の体積割合	屈曲度 Meander
Sample No.	Collecting point	Slope inclination	Correlation of sample	Depth from ground	Average cross sectional area (S_{1}, T_{2}^{2})	Average max. diameter	Average min. diameter	Eccentricity	Hydraulic radius	Volume percentage of crumbs in the pipe (V = 0)	length (cm/
		(Deg.)		surface(cm)	(S _p ,cm ⁻)	(cm)	(cm)	(e)	(K, cm)	(V _c ,%)	100cm)
1	А	3.1		57	5.85	3.16	2.76	0.487	0.628	5.34	100.7
2	Α	3.1	50cm downstream of No.1	54	5.98	3.94	2.20	0.829	0.601	7.54	100.7
3	A	3.1	2cm downstream of No.1	55	5,72	3.02	2.46	0.576	0.663	9.88	104.3
4	Α	3.1		65	0.82	1.17	0.74	0.775	0.268	small amount	101.8
5	А	3.1		67	5.52	2.92	2.34	0.595	0.667	3.35	103.8
6	А	3.1		48	2.13	1.74	1.60	0.393	0.406	2.08	102.0
7	A	3.1	60cm downstream of No.6	42	4.54	3.40	1.86	0.836	0,531	9.48	100.0
8	А	3.1	Beside No.4	62	-		-	-	-	_	
9	В	5.7		64	4.12	2.48	2.14	0.506	0.569	4.70	104.3
10	В	5.7	Beside No.9	70		_	_		-	-	_
11*	T-1	10.5		85	(0.50)	(0.80)	(0.80)	0	(0.20)	small amount	-
12	T-1	10.5	Beside No.11	78	1.85	1.82	1.40	0.634	0.365	small amount	109.5

Table 4. 非攪乱土壌サンプルより得られたパイプの形状

Shape of pipe obtained from non-disturbed soil sample

・石膏像が不完全。

The plaster mold of the pipe was incomplete.

なお,B型パイプについては,現地の森林土層を30×30×30cmのブロックにしてパイプ下流側から たばこの煙を吹込んでみる試験を数回行ったが,いずれも側面や上流面3~5か所のパイプ出口から煙 が吹きだした。すなわち,B型パイプは分岐合流が激しいと推定される。このような理由で,B型パイ プについてはA型パイプのようにサンプルを採取して水理実験を行っていない。

3.2 形状の水理学的検討

石膏で固められたパイプの形状について Table 4 に示す。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壌サンプルである。まず屈 曲度は、サンプルの長さ30cm 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。これから楕円の離心率を求めると0.39~0.84となり、いずれも同程度の値 を示した。径深(R)は、平均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10YR6/8で明るい黄褐色であ るのに対し、パイプ内の土は7.5YR3/3の暗褐色でA層の土色に相当しており色差は明瞭であった。また、 パイプによっては根系の腐植細片や生根も認められた。石礫は、周囲の土層には多く含まれていたが、 パイプ内の土には全く含まれていなかった。土壌構造と堅さに関しても、パイプ内の土は団粒化が進み、 極めて軟でふわふわした状態であったのに対し、パイプ周囲の土層は無構造、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全く土質が異なり腐植質で、A型パイプが植物根系の 枯死によって発生したという推定を裏付けている。

なおパイプ内の生根については、これらサンプル以外にもよく認められた。この原因は、パイプ内は 周囲の土層に比べて、第一に植物根系の腐植があり生根の養分吸収に適していること、第二に周囲の固

い土層に比べて生根が侵入しやすいこと,などが挙 げられる。A型パイプ形成の一因として,植物根系 が腐植化してパイプのもとになる細長い孔隙が発生 した後に,生根が多数侵入してまたそれが枯死する ことを繰返すことにより,細長い孔隙が次々と連結 しパイプが形成されることが考えられる。

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2.67g/cm³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不明であるが、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



Fig. 20. パイプ内の団粒土の粒径組成 Size distribution of water-stable aggregates of the soil in a pipe

していることも考えられる。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、2.08~9.88%でいずれも10%以下の値を示した。パイプ内の土は、Table 4 のNo.1, 2, 3のように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0.164g/cm³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を求めると6.15%で、先に求めた10サンプルの値と同程度であった。これらの 結果から、パイプ内には5%程度の団粒土が含まれているようである。

パイプ内の団粒土の粒径加積曲線をFig. 20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 dso は1.04mm であった。一方、周囲の非パイプ部分の dso は0.21mm であったので大きな差である。

3.3 水理特性

Fig. 21に1回目の透水試験の結果を示す。図ではNo.2,4,12のサンプルについて示していないが, この理由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である。これ





Table 5. パイプの水理特性

Hydraulic properties of pipe.

サンプル 番号 Sample No.	非パイプ部分 の透水係数 Coefficient of permeability of non-pipe part (k, ×10 ⁻³ cm/s)	摩擦損失 係数 Friction factor (f')	粗度係数 Coefficient of roughness calculated by MANNING's formula (n,s/m ^{1/3})	実際斜面の 推定流速 Estimated velocity of pipe flow in practical slope inclination (v _e , cm/s)	REYNOLDS 数 (中央粒径1.04mm) REYNOLDS number in the case of v _e , d = medium crumb size of soil in pipe	REYNOLDS 数 (パイプ平均直径) REYNOLDS number in the case of v _e , d = average diameter of pipe
1	1.13	4.56	0.207	3.82	24.8	707
2	(1.13)	43.2	0.633	1.21	7.9	232
3	2.18	194	1.36	0.602	3.9	103
4	(8.86)	2.26	0.127	3.54	23.0	211
5	14.42	2.18	0.145	5.69	37.0	935
6	1.74	3.72	0.174	3.40	22.1	355
7	0.653	3.30	0.542	1.31	8.5	215
8	8.86		_	—		
9	3.77	8.52	0.279	3.61	23.4	521
10	2.74	_	_	_	-	
11	5.13	7.36	0.218	3.12	20.3	156
12	(5.13)	0.162	0.0357	28.4	184	2 858

注:括弧内は推定値。No.8と10はパイプを含まないサンプル。

Note: Parenthesized numbers indicate presumed values.

Sample Nos.8 and 10 do not include pipes.

ら3個のサンプルの透水係数については、それぞれの近接地であるNo.1, 8, 11のサンプルの透水係数を援用し、Table 5に括弧で示した。なお、No.8と10はパイプを含まない土層だけのサンプルである。

Fig. 21で明らかなように非パイプ部分の透水性は、原点を通る直線で回帰できDARCY 則がよくあては まった。すなわち、kを透水係数、Iを動水勾配、v。を流速とすると、

となった。(1)式より得られたkは、ほぼ10⁻³cm/sのオーダーであった(Table 5)が、この値は実 態観測で得られた透水係数の値と近似であった。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、前述の400cm³土壌採取円筒で求めた透水係数(Fig.5参照)とほぼ同じ値であった。

次に、パイプ部分の動水勾配1〜パイプ流速vpの関係をFig. 22に示す。図示のようにこの関係は、

$$I = av_{p}^{2}$$
(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。

 $I = f' v_n^2 / (R2g)$

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

$$v_e = \sqrt{I_s} / \sqrt{a}$$

ただし, I_s はサンプル採取地点の斜面傾斜角, として得られた実際斜面の推定流速 v_e を Table 5 に示す。 この値は実態観測で測定された流速0.5~3 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 流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, Table 5の第4列に示したようになる。表のように nの値は0.036~1.36で0.4付近の値が多かった。この値は従来知られている鋼管の0.01~0.02, 自然河 川の0.03~0.10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0.15~5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森林土層中の飽和浸透流でも説明は可能で

— 88 —

森林土層中の水移動におけるパイプ孔隙の特性に関する研究(北原)



Fig. 22. ハイフ部分の水理実験結果 Hydraulic experiment results for pipe

曲線は(2)式を表す Curved lines indicate Eq.2

ある。このnの値が大きい原因は先に述べたパイプ内の団粒土によるものと考えられ,実際にnの値が 大きいパイプはパイプ内の団粒土の占有体積百分率が大きい傾向がある。また,パイプ内の粗度は結果 的にパイプの断面積を小さくしているわけで,nの値はパイプ内の最も粗度の大きい部分に規定される と考えられる。

次にパイプ内の水の運動則を確認するために R_eの検討を行う。まず、パイプ内に団粒化した土が均

- 89 -

等に詰っていたと仮定した場合のReについてTable 5に示す。計算は

 $R_e = v_e d / \nu$

とした。ここで、dは先に求めたパイプ内の土のd₅₀、vは動粘性係数で、融雪期の地下水温が3.5℃で あったので0.0160cm²/sとした。表に示したように、パイプ内に土が均等に100%詰っていたと仮定し た場合、R_eがDARCY 則の適用範囲である10以下になるものがある。従って、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DARCY 則が成立している可能性が ある。または、R_eが20~40程度のパイプも多いので、DARCY 則とDARCY-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考えられる。しかし、先にも述べたようにパイプ内の土は通常 10%以下であるので、DARCY 則による流れが起こる場合はまれであると考えられる。一方、パイプ内に 土が全くない場合の R_eについては、d の値としてパイプの平均直径(Table 4 の短径と長径の平均)を 用いて計算した(Table 5 最右列)。表に示したように、R_eは100~2900程度で、管路におけるDARCY-WEISBACH の式の適合範囲を示していた。

以上のように、パイプ流は管路における DARCY-WEISBACH の式がよく適用できるものと考えられる。

3.4 パイプ流の諸特性の比較

ここでは、定山渓流域試験地のトレンチにおけるパイプ流に、これまで得られたパイプの水理特性を 適用してみた。まず、パイプ流にはDARCY-WEISBACHの式が適用でき、流路断面を円形と仮定した場合 のMANNINGの粗度係数n(m-s系)を以下の式で求めると、

Table 6. 定山渓流域試験地のトレンチにおけるパイプの水理特性

Hydraulic properties of the pipe (C type) in the simple trench at Jozankei experimental watershed

パイプ Pipe No	流量 Discharge	流速 Velocity	推定断面積 Estimated cross	径深* Hydraulic	粗度係数 Coefficient of	Reynolds 数* Reynolds' number
N0.	(cm ³ /s)	sectional area radius roughn .) v _p (cm/s) (cm ²) R(cm) n(s/i		$n(s/m^{1/3})$	R _e	
1	1	0.733	1 0 00	0.505		100
2	4.56	0.733	6.22	0.705	3.96	129
3	8.43	0.733	11.50	0,955	4.85	175
4	7.11	0.788	9.02	0,845	4.15	166
5	9.43	0.896	10.52	0.915	3.85	205
6	10.05	0.733	13.71	1.05	5.16	191
7	1.58	0.733	2.16	0.415	2.78	76
平均	5.88	0.764				

・断面を円形と仮定した場合の値

Cross sectional shape is presumed to be a circle.

Table 7. 地形・地質の異なる2か所におけるパイプの諸特性の比較

Comparison of pipe characteristics between two sites with differing topography and geology

	平均直径 Average diameter (mm)	一本当たりの流量 Average discharge per pipe (cm ³ /s)	本数密度 Number of pipes per 1m (/m)	流量割合 Ratio of total pipe flow discharge (%)	流速 Velocity (cm/s)	粗度係数 Coefficient of roughness (n,s/m ^{1/3})
支所実験林 [*] Experimental Forest of Hokkaido Res.Ctr.	A Type 21.7 B Type 3.5	1.84	6.95	91	0.535~3.077	0.036~1.364
定山渓流域試験地 ^{**} Jozankei Experimental Watershed	8.3~20.9	5.88	2.7, 6.3	72	0.733-0.896	2.78~5.16

・A, B両型を総合。ただし、粗度係数はA型の値。

The values are A and B type combined. Coefficient of roughness is the value for A type. "流量割合は大小のパイプ流量の合計値。他は大流量のパイプ流のみの値。

Ratio of discharge is the total discharge of small and large pipes in throughflow. The others are values of large discharge pipes

 $n = R^{2/3} I^{1/2} / v_p$

である。この式に Table 6の R と v_p を,またI に斜面勾配を代入すると Table 6の n の値となった。表 に示したように,n の値は2.78~5.16で4前後となったが,この値はこれまで雨水流法で山地斜面の等 価粗度として使われてきた値0.15~5の上限に近い。

次に、トレンチのパイプ流の REYNOLDS 数を検討する。前述したように

$$R_e = v_p d / \nu$$

である。この式に、測定時の水温が3.5℃であったので ν を0.0160cm²/s, d をパイプの断面形を円形と した場合の直径として代入すると、 R_e は76~205程度となり明らかに DARCY 則の適用範囲 $R_e < 10$ を超 えている。従って、本流域試験地のパイプ流も DARCY-WEISBACH の式が適用できることになる。

以上の地形・地質の異なる2か所におけるパイプ流の実態と諸特性をまとめたものがTable 7であ る。観測斜面では2か所ともその流出機構にパイプ流が卓越していた。支所実験林のように、未固結な 粘土質が土壌母材であるような第四紀丘陵地では、森林土層中に地下水位が発生、上昇しやすく、顕在 パイプがよく発達している可能性がある。一方、定山渓流域試験地のように、粒径が大きいマサ土など 火成岩を土壌母材とする場所は一般に急峻な山岳地帯であり、地下水位の上昇はわずかであるため、基 岩直上に潜在パイプが発達すると考えられる。いずれにしても、斜面の森林土層中では地下水位の動水 勾配にもよるが、非常に速い流速で流出するものと考えられる。このように型の違いはあるが、パイプ 流は土壌母材や傾斜など地形地質が大きく異なっていても認められ、平均直径、1本当たりの流量、本 数密度,断面からの総流量に占める割合,流速などかなりの共通点が認められた。また,nの値は通常の管路内のnよりはるかに大きかった。パイプ流速 vnは,

$$v_{p} = R^{2/3} I^{1/2} / n$$

で表されるから,パイプの径深Rや動水勾配Iがこれまで観測された程度の値であれば,パイプ流速は nに反比例して大きく変化する。すなわち,パイプ流速は粗度によって大きく影響される。nの値は両 試験地間で大きな差が認められたが,この原因は,トレンチのパイプのnをサンプルを用いた水理実験 から求めたのではなく,トレンチ断面のパイプの断面積を流速と流量から算出したことにより過大な値 となったためとも考えられる。いずれにしても,今後nの値については測定例を増やし,その差が地形 地質によるものなのか,それとも測定方法にあるのかを明らかにしていくべきである。



Fig. 23. 集水トレンチの概略図 Outline of trench for measuring throughflow: pipe flow and matrix flow

以上のように、パイプの諸特性は地形や地質が異なっても共通点が多く、河川やリル流路網における ホートン則のような規則性があることが推定される。また、水理学的にはパイプ流速は動水勾配の平方 根に比例するという DARCY-WEISBACH の式が成立すること、パイプ内の粗度は非常に高いことが判明し た。これらの特性は、河川やリル流路網の特性とは不一致点もあるが共通点も多くあり、パイプ流が河 川やリル流路網と同様に扱える可能性を示している。

4 パイプ流出の時系列的変化

4.1 集水トレンチによる観測

降雨に対するパイプ流の反応を時系列的に観測するために,前述したトレンチ断面の測定の翌年1989 年に,それより30m下流にコンクリート製の集水トレンチを作成し,パイプ流量の継続的な測定を行っ た(北原ほか,1991b)。また本試験地の谷頭湧水点には量水堰を設置し(Photo.3),流末量水堰(Photo. 4)の流量と同時観測している(北原ほか,1992)。

集水トレンチの概略はFig. 23に示したように,急峻な斜面の最下端の河道に沿って作設した。集水 トレンチの長さは5mで,降雨が入らないように屋根をつけてある(Photo.5)。この斜面の側面(Fig. 24)は非集水平衡斜面形で,平均傾斜41.5度,斜面長37.6mである。なお本斜面の斜面長は,側壁斜 面の平均斜面長59.2mの64%ほどでやや短い。しかし本斜面は平衡型であり,森林土層中の水が集中 あるいは分散するといった影響が比較的少ないと考えられたので,河道両岸の側壁斜面からの流出の代 表性を考慮して本斜面を選定した。本斜面の土層厚は下部で38cm,中部で57cm,上部で103cmである。

集水トレンチで集められた土層断面全体からの流量を浸透流と呼称することにする。すなわち,浸透 流はパイプ流とマトリックス流の合計である。浸透流の総流量は転倒ますを用いて10分間隔で測定した。 転倒ますは二段がまえとし,集水トレンチからの水をまず15.7cm³の転倒ますで測定し,次いでそれよ り排出した水をさらに1000cm³の転倒ますで測定する仕組みにした(Photo.6)。この仕組みにより, 流量の大小にかかわらず精度よく測定することができた。特に大雨の際は大流量となり,15.7cm³の転 倒ますではまれに欠測が生じることもあったが,1000cm³の転倒ますでそれを補うことができ た。

集水トレンチの土層断面には、降雨時に18本のパイプが認められた(Fig. 25)。ほとんどのパイプは 風化層の基岩直上に沿って存在したが、No.3だけは基岩中の裂け目であった。パイプの分布をI&指数 を用いて検定したところ、大集団を持つ集中分布型であった。このパイプ本数密度(3.6本/m)及び分 布型は、これまで焼山川及び本試験地のトレンチ断面で観察された結果と同様な傾向である。パイプ流 量の測定は1990年に18本のうちの3本のパイプで行った。3本のパイプの選定は、目視による観察で代 表性がありそうなものを選んだ。集水トレンチ内のパイプには下流側から番号を付けたが、そのうち測 定したパイプ3本は、No.3、12、15であった。パイプの型は前述のトレンチと同様の潜在パイプである。 なお、集水トレンチについては、トレンチの幅以上あるいは以下に集水する可能性があるなどの問題点 が指摘されている(KIRKBY、1978)。しかし、本トレンチの場合は、トレンチの長さが5mと長いこと、 斜面が急傾斜であること、設置場所が斜面末端で基岩の露出した河岸であることから、それらの問題点 の影響は極めて小さいと考えられる。

パイプ流量の測定方法は、パイプ孔の出口に水中ボンドで受け皿を作成し、1転倒15.7cm³の転倒ま すに引水し各10分間の転倒数を集計した。また、パイプ流の測定と並行して斜面各部5か所に、直読式 テンシオメータを設置した(Fig. 24参照)。その深度はほぼ10cm 間隔とし、最深のものは基岩表面に達 している。基岩表面の土壌水分の測定が必要な理由は、本斜面のように急峻な斜面では地下水位が上昇



Fig. 24.集水トレンチの斜面側面図Cross-section of sideslope above the trench



Fig. 25.集水トレンチ土層断面のパイプ分布Distribution of soil pipes in trench

— 94 —

しにくいと推定され、雨水は基岩表面の風化土層中を流下すると考えられたからである。

以上の集水トレンチなどによる測定と同時に,谷頭の湧水点及び流末の既設の量水堰流量も測定し対 比した。本論文では,流末量水堰での流量を河川流量と呼称することにする。湧水点の流域面積は 1.098haで,流末の量水堰の流域面積の54.6%に当たる。地面融雪量(0.3mm/day程度)だけが長期間 定常的に供給される冬期に,河川流量に占める湧水点の流量割合は60%となり(北原ほか,1989a),先

の流域面積割合とほぼ同じである。従って湧水点の 量水堰では、流量の漏れはほとんどないと考えられ る。本流域は典型的な1次谷で、Fig.26に示したよ うに斜面は地形的に、谷頭より上部の集水斜面と河 道の左右にある側壁斜面に大別される。また、前述 したように集水斜面のうち谷頭上部には堆積地が認 められる。側壁斜面の面積は0.899ha(流域面積の 44.7%)、河道面積は0.017ha(同じく0.8%)であ る。



Fig. 26. 定山渓流域試験地(1の沢)の 地形区分

Topographic division of Jozankei experimental watershed (Ichinosawa)



Fig. 27. 1990年 5 ~10月の河川流量(実線)と湧水点流量(点線) Discharges of stream (solid line) and spring (dotted line) from May to October in 1990

- 95 -

以上のように流量測定は, 湧水点流量, 河川流量, 浸透流量, パイプNo.3, 12, 15の各流量につい て行った。ただし, 浸透流量は, 18本のパイプ流量と森林土層断面からのマトリックス流量を含めた土 層断面全体からの総流量である。

4.2 例壁流量

本試験流域の流出を概観するため、Fig. 27に1990年の無積雪期間における日単位の河川流量と湧水点 流量のハイドログラフを示す。まず河川流量のハイドログラフを見ると、1990年は流域から完全に積雪 が消えたのが5月3日であり、5月上旬は融雪水の供給により日流量が大きいが、5~7月は降雨量が 少なかったので長期的には減水した。その後8~10月は日降雨量30mm以上の日がたびたびあり激しい 上昇下降を繰り返した。湧水点流量も同様な変化を示すが、河川流量の変化に比べると20mm程度以下 の日降雨量に対する変化が小さい。また、6~8月上旬にかけてはしばしば湧水点流量が河川流量より 上回り、約1m³/d程度大きくなるときがあるが、これは河道蒸発による影響と考えられる。以上のよ うな1990年無積雪期の日流量ハイドログラフの傾向は、平年のそれと変わらない。

Fig. 28に, 1990年9月15日の降雨量39.0mmに対する湧水点流量,河川流量,及び各時刻の河川流量 からその時刻の湧水点流量を差し引いた側壁流量を示す。河川流量,湧水点流量とも,直接河道あるい は湧水点に加わった降雨によって弱いながらも流量増加する。しかし,ここではその量的な分離はせず に、単に両者の差から側壁流量を求めた。本河川では、湧水点から流末の量水堰まで95.1m,河床勾配 16度で,湧水点からの流水が河道を流下するのに要する時間はわずかであるため,両地点のハイドログ ラフのタイムラグは考慮しなくてよいと考えられる。

図示のようにこの降雨では、河川流量と湧水点流量のハイドログラフは全く異なり、前者は降雨開始 後30分で上昇しているのに対し、後者は3時間遅く上昇する。また、ピークは前者では5時50分と11時



Fig. 28. 1990年9月15日の降雨39.0mmに対する河川流量, 湧水点流量, 側壁流量の時間変化 Changes in stream discharge, spring discharge, and discharge from sideslope with a rainfall of 39.0mm on Sept. 15, 1990



Fig. 29. 河川流量に占める側壁流量の割合と浸透流量に占めるパイプ3本の合計流量の割合 The ratio of the discharge from the sideslope in the stream discharge, and the ratio of the total discharge of three pipes in the throughflow discharge of the trench



Fig. 30. 浸透流量とパイプ流量の時間変化 Change in throughflow discharge and total discharge of three pipes

00分の2回あったのに対し,後者では1回目のピークはなく,2回目のピークも前者より1時間30分遅 く発生している。降雨強度によって河川流量はすぐに反応するが,その変化量は小さく,森林土層中を 経由してきたと考えられる水による本格的な河川流量の増加とは判別できる。12時30分以降の減水部分 については,河川流量に占める湧水点流量の割合が徐々に増加し(Fig. 29),降雨終了直後の15時の57% から24時間後の79%,48時間後の82%になった。無降雨日が続くとこの割合は95%以上に達し,時には 逆転することもあるが,このような場合はほとんど側壁からの流出がないことになる。つまり,この流 域の無降雨日の流出は,谷頭の湧水がほとんどで側壁の浸透流がごく少ない。

側壁流量のハイドログラフは、上昇部分では河川流量と同様急速に上昇し、ピーク部分が河川流量ハ イドログラフよりも早くなる。また減水部分では、河川流量ハイドログラフより急減する。これをFig. 29より見ると、河川流量の上昇時はほとんど側壁流量が占め、下降時は徐々に湧水点流量の割合が増す のが分かる。換言すると、急激な増水と減水の側壁流量ハイドログラフと緩慢な谷頭湧水点のハイドロ グラフの合成によって本河川のハイドログラフができ上がっていることになる。以上のような現象がど の程度一般的であるのか不明であるが、Fig. 26に示したように湿潤温暖地域の1次谷の谷頭上部には崩 積土の厚い堆積地が見られることが多く(田村、1974)、本流域のような流出機構は例外的ではないと 考えられる。このようなことから1次谷の流出機構については、集水地形下部に堆積地を持つ谷頭部分 と、非集水地形で堆積地を持たない斜面で構成される側壁部分に分離して考える必要があると考えられ る。

4.3 河川流量に占めるパイプ流の割合

Fig. 30に,前述と同じ降雨時の浸透流量と3本のパイプの各流量変化を示す。図示のように,浸透流 ハイドログラフと各パイプ流ハイドログラフは非常に近似した波形を示した。すなわち,浸透流と3本 の各パイプ流とも,上昇,ピーク,減水の時刻の差は0~20分以内でほとんど同時であった。また,浸 透流量に占める3本のパイプの合計流量の割合は,Fig.29に示すように8時までの上昇部分と15時以降 の減水部分で0~27%,ピーク時付近で30~37%とやや異なるが全体では30%程度であった。すなわち, 浸透流量の変化より,パイプ流量の変化のほうがより激しい傾向があるが,両者のハイドログラフは近 似な波形をしていた。なお,30mm程度の降雨では,降雨終了後,浸透流は4日で,パイプ流は1日で 流出が終わる。

浸透流とパイプ流が近似のハイドログラフを示す原因は、これまでのトレンチでの報告に示したよう に、浸透流の大部分がパイプ流であり DARCY 則による森林土層からの流出はわずかであるためと考え られる。また、各パイプのハイドログラフが互いに近似している原因として、各パイプが土中で網状に 分岐合流を繰り返し水頭の時間変化が同様となるために、流量では差があっても近似な波形になること が考えられる。本集水トレンチでは実際にパイプの分岐合流を調査したわけではないが、種々の条件が 同じ前述のトレンチ斜面でパイプの流速が7本とも0.733~0.896cm/s と極めて近い値を示したことか らも、パイプはお互いに連結し分岐合流を繰り返していると考えられる。

パイプNo.3のハイドログラフは、全般的には他のパイプのハイドログラフと近似しているが、減水時に pulsating 状の変動が認められた。No.3 は集水トレンチの森林土層断面に分布する18本のパイプ



Fig. 31. 1990年10月18日の降雨16.5mm に対する各流量の時間変化 Changes in each discharge with 16.5mm of rainfall on Oct. 18, 1990

の中で,唯一基岩中の裂け目に分布しているため,他のパイプとやや流出機構が異なることが考えられる。

降雨終了48時間後では、浸透流量は0.065cm³/sで、3本のパイプからの流出は終了していた。また 降雨開始から降雨終了48時間後までの浸透流の総量は594.01で、これは集水トレンチの幅5mが分水 界まで続くと仮定して求めた面積における総降雨量の11.5%であった。このように浸透流量が降雨量の 10%程度しか認められない傾向はどの降雨でも認められ、1990年の降雨では最大でも12.4%であった。 この原因は、降雨量の90%近くが土壌水分として貯留されたか、集水トレンチ以外へ流出したものと考 えられるが、浸透流量の割合が降雨量の多寡にかかわらずどの降雨でも10%程度以下であることから、 後者の可能性が高い。

側壁流量ハイドログラフと浸透流量ハイドログラフを比較する(Figs. 28, 30)と、前者は後者より 上昇開始が30分、1回目のピークが20分それぞれ早いが、逆に2回目のピークは60分、3回目のピーク は30分それぞれ遅れた。しかし、急な上昇とピークや減水の波形はよく近似していた。また側壁流量に 対する浸透流量の割合は、初期の2.95%からピーク時の1.73~1.28%、降雨終了6時間後の0.67%、同 24時間後の0.45%と減少していくが、降雨開始から終了後48時間までの側壁からの総流量に対する浸透 流の総流量の割合は1.12%を占めた。側壁斜面の面積は0.899haで、これに対する集水トレンチの面積 割合は1.63%であるので、先に述べた波形の近似を含めて考慮すると、集水トレンチで測定された浸透 流は、側壁斜面からの流出をほぼ代表していると考えられる。

側壁流量に対する浸透流量の割合が時間とともに減少していく原因は,トレンチ上部の斜面長が側壁



Fig. 32. ハイノのモラル病念述 Outline of soil pipe model

斜面の平均斜面長より短いため、流出がより早く終了するためと考えられる。

側壁流量と浸透流量のハイドログラフが近似な波形を示すことは、他の降雨でも全く同様であった。 例えば先に述べた降雨量の約半分である16.5mmの降雨(Fig. 31)でも、側壁流量、浸透流量、パイプ 流量のハイドログラフはお互いに極めて近似な波形を示した。

以上をまとめると、パイプ流は浸透流に近似し、浸透流は側壁斜面からの流出に近似していることか ら、側壁斜面からの流出は大部分がパイプ流であると考えられる。これまでパイプ流は地表流やマトリッ クス流と同様、降雨や融雪水が河川へ流出する経路の一つとされてきたが、その重要性については明ら かではなかった。近年、地表流は山地森林流域においては通常の降雨では量的に少ないこと(太田、1982)、 マトリックス流では降雨に対するハイドログラフの早い応答の説明が難しいことなどが明らかとされつ つあり、パイプ流の重要性が徐々に注目されてきているが、パイプ流の河川流量に対する具体的な割合 は全く未解明であった。本観測で、1次谷の河川流量のうち少なくとも側壁斜面からの流出は大部分が パイプ流量であることが明らかとなったが、これは河川の降雨に対する極めて早い応答や水質形成機構 を考える上で、パイプ流の水文学的な重要性を示すもので、極めて注目すべき結果と考えられる。また、 各パイプからの流出ハイドログラフが近似な波形を示すことから、側壁斜面土層内のパイプの流出機構 には共通の物理性があると考えられ、その集水機構や立体構造を解明する上で注目される。

5 森林土層とパイプ流

5.1 パイプ流のモデル化と検証

次にこれまでの実態観測と水理実験による成果をもとに、パイプ流の簡単なモデルを示してみる。以 下の仮定でパイプ流量の推定を行う。

①パイプの分岐合流及び屈曲は考えない。

②パイプ断面は円形とし粗度は一様とする。

③パイプ流量は壁面からの浸出量でまかなわれる。

④壁面の単位面積当たりの浸出量は透水係数と地下水深により決まる。

⑤地下水深はどこも一定とする。

パイプのモデルの概念図をFig. 32に示し、以上の条件下で1本のパイプのモデルを考えてみる。まず、 1本のパイプ流量をQ。(m-s系、以下同様)、パイプ半径をr、パイプ流速をv。とするとQ。は、

$$Q_p = \pi r^2 v_p$$

で表される。

ここで,パイプ壁面からの浸透量をQ_s,地下水深をd,透水係数をk,xをパイプの発生点からの距離とし,パイプの形を円錐形で近似すると,

 $Q_s = k d_{\pi} r (x^2 + r^2)^{1/2}$

ただし, dに比べてrは充分に小さいとした。

③の仮定より $Q_p = Q_s$ だから,

$$r = kd(v_n^2 - k^2d^2)^{-1/2}x$$

なお,パイプ壁面のkは,その他の土壌のkとはかなり異なることが考えられる。

ところで、これまでのパイプ流速の観測結果では vp は0.5~3.1cm/s 程度であるので、一般に vp≫kd である。従って,

> $r = k dx v_p^{-1}$

一方, vp は MANNING 式が適用できるので,

$$v_p = n^{-1} (r/2)^{2/3} I^{1/2}$$
(4)

で表される。ここでnは粗度係数,Iは動水勾配である。(3)と(4)式より,

$$v_{z} = 0.758k^{2/5}d^{2/5}n^{-3/5}l^{3/10}x^{2/5}$$







Fig. 34. 浸透流の観測値(黒丸)とモデ ル計算結果 (実線)

Observed throughflow values (dots) and values calculated using the pipe model (real line)

 $\dots (5)$

vpを先のQpの式に代入して,

$$Q_{n} = 4.15k^{8/5} n^{3/5} I^{-3/10} d^{8/5} x^{8/5}$$
(7)

で表される。

Fig. 33は, (5)~(7)式を用いたパイプの流速, 半径, 流量の計算例である。計算条件は, これまでの試験地の資料を参考にして k = 1×10⁻³ cm/s, I = 0.5, n = 1, d = 50 cm とした。モデル計算の結果, 流速, 半径, 流量ともこれまでの実態調査などで得た値と同じ範囲であった。



Fig. 35. パイプの諸特性 Pipe characteristics

-103-

次に、以上のパイプのモデル式の検証を集水トレンチの浸透流量を用いて検証する。 Fig. 34に集水トレンチでの実測値と(7)式にパイプ本数Nを乗じた次式

$$Q_{\rm p} = 4.15 {\rm Nk}^{8/5} {\rm n}^{3/5} {\rm I}^{-3/10} {\rm d}^{8/5} {\rm x}^{8/5}$$

の計算例を示す。計算条件はトレンチで得られた値を参考にして、 $k = 3.3 \times 10^{-3}$ cm/s, I = 0.662, n = 4.13, N = 18本とした。またパイプ発生点からの距離 x は不明であるので、斜面各点の最深のテンシ オメータの値が飽和のとき、それらを平均して d を求め、それより x = 200d² とした。このように種々 の仮定を入れてあるが、両者は比較的よい一致を示した。図の地下水深 5 cm 以下の場合は、計算結果 の適合性がややよくないが、この原因は浸透流量には一部マトリックス流が含まれているため、浸透流 に占めるパイプ流量の割合が相対的に小さくなる小流量の場合には、マトリックス流がその比重を増す ためと推定される。本モデルには仮定が多く含まれること、解明すべきファクターがまだ数多くあるこ となどから、今後はその検討を充分に行うべきであろう。

5.2 森林土層の発達過程に及ぼすパイプ流の影響

これまでの結果の主な点をまとめると以下のとおりである。また, Fig. 35に諸特性をまとめた概略図 を示す。

①パイブ流は、地形や地質の全く異なる場所でも認められ、その諸特性は共通点が多かった。

②森林土層断面全体からの総流量に占めるパイプ流の割合は72~91%で, DARCY 則による流出はわずかであった。

③森林土層断面におけるパイプの分布は、小集団または大集団を持つ集中分布型であった。

④パイプ流速は、0.5~3.1cm/sであった。

- ⑤パイプの成因は,顕在パイプのA型では生物起源である植物根系の腐植化が考えられた。顕在パイ プのB型と潜在パイプの成因については不明であるが,非生物起源である化学的あるいは物理的な 成因が考えられた。
- ⑥パイプ内の水理特性は、管路における DARCY-WEISBACH の式が成立した。
- ⑦非攪乱サンプルを用いて水理実験で求めたパイプ内の MANNING の粗度係数は0.4程度で、トレンチの 野外実験から求めた値4.1とは差があったが、いずれも極めて高い粗度であった。
- ⑧パイプの分布型や、各パイプの流出ハイドログラフの近似から、パイプは分岐合流を繰り返している ことが推定された。
- ⑨1次谷の流出のうち、少なくとも側壁斜面からの流出はパイプ流が主であった。

以上の諸特性のうち,植物根系起源のパイプの成因について考察する。Fig. 36に北海道の代表的な樹 種であるトドマツとミズナラの根系図(苅住,1979より転写)を示す。根系は水平方向や鉛直方向,あ るいは斜め下方向などに広がっていることが分かる。このような樹木が枯死し根系が腐植化すると,そ の腐植化した根系に生きた樹木の根系が侵入してくる。さらにその生根がまた枯死して,最終的にはパ イプは次々と連結していくことになる。このようにして形成されるパイプについて,模式的に示したの がFig. 37である。

-104 -104

以上のパイプの特性が,森林土層に及ぼす影響について考察してみる。まず,森林土層中の水の移動の結果としての流出の機構について,次いで森林土層中の水の移動によって発生する崩壊現象と地形発達について考察してみる。Fig. 38にパイプ流と流出,崩壊,地形発達の関係を示す。



Fig. 36. トドマツ(上段)とミズナラ(下段)の根系例(苅住, 1979より転写) Examples of *Abies sachalinensis* (upper) and *Quercus grosserrata* (lower) roots (Transcription from KARIZUMI, 1979)



Fig. 37. 植物根系枯死の繰り返しによるパイプ形成の模式図 Model of soil pipe formation by repeated plant root deaths

まず,流出機構との関係では,パイプ流は流速が非常に大きく,降雨に対する反応が極めて速いため, 河川流量ハイドログラフの敏感な降雨応答はパイプ流に起因していると考えられる。また,各種条件が 同一とした場合, DARCY 則では地下水位の増加に比例して流出が増加するが, DARCY-WEISBACHの流れ を用いた土中パイプモデルでは,地下水位の1.6乗に比例して流量が増すので,河川流量ハイドログラ フの急上昇や急下降の説明が可能であろう。

最近の研究で,一般の山地森林地帯では地表流はほとんど起きないことが知られている。ところが, 雨水流法のように地表流を仮定すると現実のハイドログラフによく適合する。この点,パイプ流は地表 流を起こさないで,粗度の高い地表流があるようなふるまいをするので,パイプ流のモデルは実際に起 きている流出現象をよく説明できるものと考えられる。









次に、崩壊機構との関係を考察してみる。一般に、崩壊にパイプが関与していることはよく指摘され ているが、パイプのどのような特性が崩壊と関係しているのかは明らかにされていない。しかし、本研 究で明らかとなったように、パイプ内の粗度についてみると、パイプの各部分で粗度係数が異なってい た。これは、例えば地下水位が上昇してパイプ内の流速が増加した場合に、パイプの粗度が高い部分で 水圧が増すことが考えられる。また、この部分の水は一部パイプから逆に周囲の土の中に浸透し、地下 水位が上昇すると考えられる。従って粗度の高い部分では、高水圧で高い地下水位となり、崩壊の際の 弱点となりうる。また、パイプ内の流速が大きくなると、パイプ内の団粒土などが移動、ある部分に集 中的に詰まることが推定され、やはり崩壊の際の弱点となると考えられる。今後、崩壊に関与するパイ プ流の影響を解明するために、粗度係数を様々に変えたパイプを土層中に埋めて崩壊実験などを行う必 要があろう。

最後に,地形発達機構に及ぼすパイプ流の影響を考察してみよう。本研究で,1次谷の中の側壁斜面 部分と谷頭部分のハイドログラフは明確に異なっていることが明らかとなったが,流域の各部分の流出 機構は大きく異なることが考えられる。また,側壁斜面はパイプ流が主であり,パイプにより地下水は 直接河道へ流出するため,地表面まで地下水位が上がることはまれと思われる。従って,側壁斜面の地 形発達は,河道の下刻による斜面下部の不安定化と,パイプ流による地下侵食が大きな要因と推定され る。とりわけ,固結した岩石が基岩を成す場合は,下刻よりパイプ流の地下侵食がより大きく地形発達 に影響するものと考えられる。

一方,谷頭部分は集水斜面からの地下水がいったんは崩積土中に貯留されるため,地下水位が地表面 に到達することがあり,この場合には地表流による表面侵食あるいは崩壊が発生することがあると推定 される。谷頭に崩積土堆積地が存在することが一般的であるとすると,流域内で最も地表流が発生しや すい場所は谷頭と考えられ,地形発達の面から注目される。

以上のような流域内で引き起こされる諸機構に及ぼすパイプ流の影響に対して、裸地から森林の成立、 森林土層の発達という側面からパイプ流の位置付けを考えてみよう(Fig. 39)。図に示したように、森 林の成立に伴う根系網の発達とその一部枯死によって、地下部ではパイプ網が発達すると考えられる。 これは、地表部の落葉落枝の蓄積とあいまって地表流の発生を減少させ、森林土層の流亡を防ぐことに なる。この結果、さらに森林の成立が促進され、また森林土層が発達していくものと推測される。パイ プの形成時間は不明であるが、根系の発達と枯死という経過をたどることを考えれば、数十年程度は必 要と推定される。また、人為によって攪乱された土層の透水係数は1オーダー程度低くなることが知ら れているが、森林土層中をDARCY 則で流れる水においても、長期間に微細な水みちが形成されて(成岡、 1990)、透水係数を大きくしているものと推定される。

パイプ流は地表流を発生させずに、しかも高い粗度で水を適度な流速にして河川に流出させる。仮に、 パイプ流が森林土層中に存在しなかった場合、降雨水は斜面下部方向へ排水されることが少ないため、 一気に地下水位の上昇を招く。その結果、地表流が発生し侵食により森林土層は急速に失われるはずで ある。また、地表流が発生することにより河川ハイドログラフは急激な上昇を引き起こす。これとは逆 に、水道ホースのような粗度が極めて小さいパイプを考えてみよう。この場合、パイプ内に浸透した水 は、斜面下部に向かって極めて速い流速で流下する。これもまた河川ハイドログラフの急激な上昇を招 く。これらに対して、パイプ流は地表流を発生させず、かつその内部の粗度により急激な流出を緩和し ている。換言すれば、通常の降雨ではパイプは森林土層の発達をうながし、河川の急激な増水を防いで いると考えてよかろう。しかし、パイプの排水能力を超えるような降雨の場合には、パイプは崩壊など の災害をもたらすことになる。

結 言

森林土層中のパイプ孔隙は、森林土層が長い時間をかけて作り上げてきた最も合理的な水移動の形と 考えられるものである。パイプ孔隙の研究は、この合理的な水移動の特性を明らかにすることであり、 その成果は水資源の確保や災害防止などの水土保全技術の開発に極めて有効と考えられる。このように、 森林土層中のパイプ孔隙の特性に関する研究は、単に地形発達や水移動などの自然現象の解明や流出予 測にとどまらず、森林土層の保全対策上からも極めて重要である。本研究でパイプが崩壊や侵食などを 通じて森林土層の成立と密接な関係があることが指摘されたが、今後はより定量的にこれらとの関係を 明らかにしていくべきであろう。また、本研究から得られた成果を森林土層の保全に活用するために、 パイプの特性を生かした浸透促進工や崩壊防止工技術の開発を行っていくべきであろう。

本研究によって、パイプ孔隙中に水移動が起こるのは渇水期ではなく降雨中あるいはその直後の出水 期であること、河川流量のハイドログラフの急上昇はパイプ流によるものであることなどが判明した。 一般に中下流域に生活する都市あるいは農山村の人々にとって、パイプ流は河川流量ハイドログラフの ピーク部分を担う重要な水移動形態である。先にも述べたように、パイプ流が存在しなかったならば大 規模な地表流が発生し河川流量ハイドログラフはより急上昇すると予測される。地表流の発生は侵食を 伴い、森林は破壊され水質汚濁が甚だしくなると推定される。パイプ流はこれらを最小限に抑えている と言っても過言ではない。一方、パイプ流は崩壊などの災害を引き起こす注意すべき水移動形態でもあ る。これらはすべてパイプの特性によって決定されているはずで、パイプ流の研究の今後の発展深化が 大いに期待される。さらに、上流域での機械を用いた森林施業や森林土層を除去するゴルフ場開発は、 パイプ孔隙など森林土層中の大孔隙を破壊し河川流量ハイドログラフを急上昇させている可能性がある が、どのようなメカニズムで影響してくるのか定量的な研究が必要であろう。

パイプの研究は現在始められたばかりで得られた成果はわずかであるが、次第にその姿が明らかにされつつある。パイプの立体構造や形成過程などは特に不明な点が数多くあるが、これらを含めてパイプ 孔隙の実態について今後も測定方法を開発しながら解明する必要がある。

引用文献

- FREEZE, R.A.: The mechanism of natural ground-water rechargeand discharge (1) One-dimensional,vertical, unsteady, unsaturated flow above a recharging or discharging groundwater flow system, Water Resources Research, 5, 153-171 (1969)
 - —: Three dimensional, transient, saturated-unsaturated flow in a groundwater basin, Water Resources Research, 7, 347-366 (1971)

JONES, J.A.A.: Soil piping and stream channel initiation, Water Resources Research, 7, 602-610 (1971)

- -------: Soil pipe networks, distribution and discharge, Cambria, 6, 1-21 (1978)
- ------: The Nature of Soil Piping, A review of research, BGRG Research Monograph, 3, Geo Book, Norwich, 301pp. (1981)
- **苅住** 昇:樹木根系図説, 誠文堂新光社, 1121pp. (1979)
- KIRKBY, MJ.: Hillslope Hydrology; 新しい水文学, 日野幹雄ほか訳, 朝倉, 東京 330pp. (1978)
- 北原 曜ほか: 飽和側方流の流速について,日林北支論,35,202~204 (1986)
- ――――ほか:山地小流域からの流出(I)流量,渓流水温,地下水位,土壌水分の測定結果,98回日 林論,549~550(1987)
- -----ほか:山地小流域からの流出(Ⅱ)無積雪期の損失量,99回日林論,561~562(1988)
- ------ほか: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)
- -----ほか:冬期における小流域からの流出,日林北支論,37,180~182(1989)

- -----ほか:山地小流域における水収支,日林北支論,39,168~170(1991)
- -----ほか:降雨に対するパイプの応答,102回日林論,603~604(1991)
- ------ほか: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(1992)
- MORISITA, M.: I δ -index, a measure of dispersion of individuals, Res. Popul. Ecol. 4, 1-7 (1962)
- 成岡 市:土壌の粗孔隙の計測法とその物理的機能に関する研究,東京農大総合研究所紀要,1,1~ 58 (1990)
- 太田猛彦ほか: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)
- 太田岳史ほか:一次元鉛直不飽和浸透を用いた雨水流出特性の検討,日林誌,65,125~134(1983)
 - ───:一次元鉛直不飽和浸透を用いた雨水流出特性の検討(Ⅱ)初期水分条件と直接流出,日林誌,

65, 448~457 (1983)

- RICHARDS,L.A.: Capillary conduction of liquids through porous mediums, Physics, 1, 318-333 (1931)
- 新藤静夫ほか:谷頭部斜面に発生する崩壊と地中水の挙動,文部省科学研究費自然災害特別研究成果報告書,47~51(1983)
 - ―――ほか:斜面末端部における地中水の挙動,波丘地研究,**6**,124~145(1988)
- 鈴木雅一:山地小流域の基底流出逓減特性、日林誌、66,174~182(1984)
- 田村俊和:谷頭部の微地形構成,東北地理,26,189~199(1974)
- 田中 正ほか:多摩丘陵源流域における流出機構,地理学評論,57(1),1~19(1984)
- ------: 降雨流出過程における地中水の流動経路についての一考察, 波丘地研究, 6, 146~164 (1988)
- 谷 誠: 一次元鉛直不飽和浸透によって生じる水面上昇の特性,日林誌, 64,409~418 (1982)
- -------:山地流域の流出特性を考慮した一次元鉛直不飽和浸透流の解析,日林誌,**67**,449~460 (1985)
- 塚本良則ほか:斜面の表層に発達する地中パイプ,波丘地研究,6,268~280(1988)
- 安原正也ほか:多摩丘陵の二つの源流域におけるパイプの形成とその水文学的環境,地形,5(2),125 ~137(1984)

A Study on the Characteristics of Soil Pipes Influencing Water Movement in Forested Slopes

KITAHARA, Hikaru⁽¹⁾

Summary

It is well known that pipe flow in the soil layers of forested slopes has a great influence upon runoff, landslides and erosion, etc. However, its characteristics, for example, distribution, velocity and hydraulic properties have not yet been clarified, and no soil pipe model based on pipe flow characteristics has been proposed. Until now, saturated -unsaturated flow based on DARCY's Law has been commonly used for analysis of soil water movement, but this is not appropriate when using the coefficient of permeability of practical soil. In order to estimate runoff from the watershed, the real movement of soil water must be clarified in detail. Therefore, pipe flow characteristics were investigated and a soil pipe model was proposed.

Two study sites (H, J) of pipe flow with different bed rock and topography were examined. Site H was a gentle hillside (13 deg.) of quaternary accumulation layers in the experimental forest of Hokkaido Res. Ctr., while site J was a steep slope (38 deg.) of quarz-porphyry layers on the side slope of the Jozankei experimental watershed (Ichinosawa, 2.01ha, natural forest). Five trenches 5m in length and 1.2m in depth were along the sideslope in H during the snowmelt season when the groundwater level was high, and pipe distribution, diameter, discharge and flow velocity were observed. The velocities of many pipe flows were measured using salt and an EC sensor. Non-disturbance soil samples ($9.5 \times 9.5 \times 30$ cm) including soil pipes on these slopes, were collected and the hydraulic properties measured by means of a saturated hydraulic conductivity experiment, as follows: 1) hydraulic experiment with several hydraulic gradients, 5) measuring of volume and diameter of the plaster molds of the pipes. Ten samples were subjected to this treatment.

A trench 5m in length was constructed at the bottom of the slope in J. The throughflow and each pipe flow were measured by tipping buckets. In this paper, the throughflow was defined as all of the discharge from the soil profile of this trench, in other words, the total of matrix and pipe flows. Eighteen pipes were found along the bottom of the weathered rock in this trench during periods of heavy rainfall. Among these, 11 pipe flows were measured in total, with 7 being measured individually. The measuring interval was 10 minutes. The pipe distribution and pipe flow velocity were measured in the same way as site H.

Results of observations at site H were as follows. There were two types of pipes (A, B) with differ-

Received February 3, 1993

⁽¹⁾ Hokkaido Research Center

ing in distribution, diameter and number. The A type, centered in the B-layer was large in diameter (21.7mm) and few in number (0.60/m). It was considered that the reason for this was in related to plant root. In the lower part of the slope, there were large-diameter pipes of the A type. The B type was centered in the C-layer, with a 3.5mm average diameter and was numerous (6.35/m), with an aggregated distribution of small groups. The discharges of both pipes were 12.9ml/s per 1 m of trench width. This made up 91% of the total discharge of the entire soil section. The pipe flow velocity was 0.535-3.08 cm/s. There was no difference between types. The vertical sections of the pipes were approximately elliptical, and their eccentricities were 0.39-0.84. The soil in the pipes made up 10% of their volume, and contained much humus. Pipe flows matched the DARCY-WEISBACH Equation well and matrix flows from the non-pipe parts were in accordance with DARCY'S Law. The coefficient of roughness(n) calculated using MANNING'S Formula was 0.036-1.364 with the REYNOLDS' Numbers being over 10.

Using the results obtained, the following soil pipe model was proposed:

$$Q_{2} = 4.15 \text{Nn}^{3/5} \text{k}^{8/5} \text{d}^{8/5} \text{x}^{8/5} \text{I}^{-3/10}$$
⁽¹⁾

where Q_p was the pipe discharge per unit width from the bottom of the slope, N was the number of pipes per unit width, n was the coefficient of roughness in the pipe obtained with MANNING's Formula, k was the coefficient of permeability of soil, d was the depth of groundwater over the pipe, x was the distance of the groundwater from the bottom of the slope, and I was the slope inclination.

Response of the pipe flow to rainfall in site J was as follows. At this site, there was another type of pipe(C), which was invisible. The boundary of the outlet zone of this type was indistinct, thus, the pipe could be seen only in outlet periods. The C type was distributed along the bottom of weathered rock with an aggregated distribution of large groups. The average number per 1 m of trench width was 3.6 and the average diameter was 16.0mm. The velocities were 0.733-0.896 cm/s. These characteristics were similar to types A and B. MANNING's n calculated from the velocity and discharge of each pipe was 2.8-5.2. REYNOLDS' Numbers were over 10. The shape of the pipe hydrograph was similar for each in spite of the difference in discharge, and was similar to that of the total pipe flow from each pipe.

The following considerations about the effects of pipe flow on runoff and landslides were noted. Pipe flow has a great velocity and shows a rapid response to rainfall, therefore it is considered that it causes a sudden change in streamflow discharge. Although pipe flow does not produce a surface runoff, it behaves like a surface runoff of high roughness. The coefficient of roughness in the pipe indicates that an equivalent roughness (0.15-5) of the kinematic wave method has a high value. During the rising period and that of large streamflow discharge, pipe flow is important. Since the coefficient of roughness in a pipe differs for each section, the pipe flow velocity increases and water pressure increases greatly at parts with high roughness when the groundwater level is high. On the other hand, the high velocity flow in the pipe may transport soil to a certain part. Therefore, these high roughness sections of the pipe will be susceptible to landslides.

- 113 -







Photo.2. パイプからの流出状況 Pipe flow



Photo.3. 定山渓流域試験地の湧水点量水堰 Weir at spring point of Jozankei experimental watershed



Photo.4. 定山渓流域試験地の流末量水堰 Weir at stream end of Jozankei experimental watershed



Photo.5. 集水トレンチ Trench for measuring throughflow (pipe flow and matrix flow) at the bottom of the sideslope



 Photo.6.
 側方浸透流量の測定のための転倒

 ます

Tipping bucket for measuring throughflow