水文・水資源学会誌
J. Japan Soc. Hydrol. & Water Resour.
Vol. 9, No. 4 (1996) pp. 330-339

パイプ流が斜面安定に与える影響

The Influence of Pipe Flow on Slope Stability

内田太郎*

Taro UCHIDA

(京都大学大学院)

Graduate School, Kyoto University

小杉賢一朗**・大手信人**・水山高久** (京都大学農学部)

Ken'ichiro KOSUGI・Nobuhito OHTE・Takahisa MIZUYAMA

Faculty of Agriculture, Kyoto University.

Well connected macropores running almost parallel to surface, are commonly found in forest soil. It is called "soil pipe" and water flow which go through them are called "pipe flow". This paper reviews the studies on the influence of water flow in soil pipe on slope stability with regard to rainfall intensity, and present a guideline for more practical discussion. In the case of normal rainfall event, soil pipes contribute to quick discharge of rain water which result in slope stability. Soil pipes, however, are a dead-ended pathway, which do not always work for rapid runoff system and induce slope failure. On the other hand, in the case of large rainfall event, soil pipes may not contribute to slope stability through excess infiltration beyond the drainage ability of lateral pipes and they are collapsed by underground erosion. These phenomena bring about high pore water pressure and slope failure. In order to understand and evaluate the influence of pipe flow on slope stability, three aspects should be studied: 1) are these phenomena universal? 2) quantitative evaluation of influence on rain-runoff process, 3) how do they change their structure?

Key ward: Pipe flow, Slope stability, Slope failure, Runoff system

山腹斜面土層内には地表面とほぼ平行にパイプと呼ばれる連続した空洞が存在することが広く確認されている。こうしたパイプによる水移動が斜面安定に与える影響について、研究の現状を検討し、解明すべき問題を提示する。本稿ではパイプ流の斜面安定に与える影響を通常の降雨時の現象と大きな降雨時の現象に分類した。通常の降雨時にはパイプは良好な排水システムとして働き、斜面安定に寄与すると考えられる。しかし、パイプは下流端が閉塞していることも考えられ、このようなパイプは排水システムとしては不完全であるため、崩壊の要因となることが考えられている。一方、大きな降雨時には、浸透水量の排水システムの許容量の超過および地下侵食による排水システムの破壊が水の集中を引き起こし、パイプが崩壊の要因となることが考えられている。パイプが斜面安定に与える影響を解明するために検討すべき事項として、1) 観察される現象が空間的・時間的に普遍的か否かを検討する、2) パイプの降雨流出過程に及ぼす影響を定量的に評価する、3) パイプの構造の動的変化を評価する、の3点が考えられる。

キーワード：パイプ流，斜面安定，崩壊，排水システム

I. はじめに

山腹斜面土層内には鉛直及び地表面とほぼ平行にパイプと呼ばれる連続した空洞が存在することが広く確認されている。このパイプは小動物の活動、植物根の腐朽、地下水による侵食など様々な要因によ

り形成されると考えられている(Beven and Germann, 1982など)。これらパイプが関与する水移動は山腹斜面内の降雨流出過程はもとより、崩壊・地形発達に関与しうる要因であると考えられている(北原, 1995など)。本稿では、このうち斜面に平行に発達するパイプに注目し、こうしたパイプによる水移動

*京都大学大学院 〒606 京都府京都市左京区北白川追分町
Graduate School, Kyoto University, Oiwake-cho, Sakyo-ku, Kyoto 606.

**京都大学農学部
Faculty of Agriculture, Kyoto University

が斜面安定に与える影響について、研究の現状を検討する。

ここではパイプ流の斜面安定に与える影響を図一1に示すとおり通常の降雨時の現象と大きな降雨時の現象に分類し、それぞれについて検討する。なお、‘大きな降雨’の範囲はパイプ網それぞれによって異なることが予想される。

図一1に示すとおり、通常の降雨時にはパイプは良好な排水システムとして働く。このことから、パイプは斜面安定に寄与すると考えられる。しかし、小動物の活動や植物根等により形成されたパイプには下流端が閉塞していることが考えられる。このような、下流端の閉塞したパイプは排水システムとしては不完全であるため、局所的な水の集中を引き起こし、崩壊要因となることが考えられる。一方、大きな降雨時には、図一1に示すとおり、パイプは排水システムの許容量超過による水の集中及び地下侵食による土質強度低下、排水システム破壊による水の集中などの現象により崩壊の要因となることが考えられる。

そこでまず、本稿ではパイプの斜面の排水システムとしての働きをパイプ流量の観測等の結果から明らかにし、パイプの排水効果を定量化するにあたっての課題を検討する。次に、図一1に示す1～14の流れを通常の降雨・大きな降雨に分類し、パイプの斜面安定及び崩壊への関与について検討する。最後に、パイプが斜面安定に与える影響を解明する上で今後の課題について整理する。

II. 降雨流出過程におけるパイプ

地下に連続した大きな孔隙が存在するのであるから、パイプは地下の水の移動に大きな影響を与えることは容易に想像ができる。このため、林地など地表流があまり見られない地域において、降雨に対して応答の早い地下水流出が生じることを説明する機構として、Jones(1971)以来、斜面土層内におけるパイプの存在は注目されてきた。そこで本章では、図一1に示すパイプが良好な排水システムとして働くことに着目した研究をレビューし、その効果の定量化に向けての課題を検討する。

1. パイプ流の流速・流量観測

パイプの降雨流出過程における影響を検討するために、まずトレーサーによる側方流及びパイプ流の流速観測が行われた(Mosely, 1982; 田中ら, 1984な

図一1 パイプ形成と斜面崩壊の關係のダイアグラム

ど)。これらの結果より、斜面内には地表流に匹敵する速い流れが存在することが明らかにされた。

これらの研究に次いで、斜面に掘られたトレンチにおいてパイプ流量の観測が行われてきた。パイプの流出に占める役割を定量的に規定するために、トレンチにおける総流出量とパイプ流量の観測を、Tsukamoto and Ohta (1988)は0次谷出口で、北原・中井(1992)は1次谷側壁斜面でそれぞれおこなった。これらによるといずれの場合においても降雨時には50%以上がパイプ流出により賄われることが示された。

また、Nieber and Waner(1991)は均質な土層をもった斜面に円筒形のパイプが存在する場を想定した浸透流出シミュレーションを行い、パイプからの流出量、マトリックスからの流出量をパイプの直径、長さ、密度等を変化させ、計算した。その結果からもパイプ流が斜面からの総流出量の大部分を占めることが示された。

以上の研究より、図一1に示すとおりパイプ流は、特に降雨時には、流速が地表流に匹敵し、流量が斜面からの総流出量のかなりの部分を占めることが明らかになった。このことから、少なくとも通常の降雨の場合はパイプは良好な排水システムと考えることができる。

2. パイプ流出のモデル化に向けての課題

パイプの降雨流出過程に及ぼす影響をより定量的に表現するために、パイプを含めた流出モデルの構築が望まれる。そのために、今後課題となる点は次の3点と考える。

表－1 日本におけるパイプの観察例

土層内の位置	発達地形	主な要因	研究例	地質
表層土		生物的要因	森林総研北海道支所内林（北原, 1989）	火山灰層
			波丘地（Tsukamoto and Ohta, 1988）	砂質泥岩
			常陸太田（Tsuboyama et al, 1994）	火山灰層
			西三河矢作川流域（太田ら, 1981）	花崗岩（崩壊跡地）
下層土	0 次谷出口	地下水集中による地下侵食	京大芦生演習林（内田ら, 1995）	中古生層（石礫性）
			東大愛知演習林（寺嶋ら, 1993）	花崗岩
			波丘地（安原ら, 1984）	火山灰と泥岩風化物の混合物
			（新藤ら, 1988）	火山灰と泥岩風化物の混合物
			（Tsukamoto and Ohta, 1988）	砂質泥岩
	1 次谷側壁 平衡斜面	地下水集中による地下侵食	常陸太田（Tsuboyama et al, 1993）	火山灰層
			定山溪（北原, 1992）	火成岩を母材とする崩積土
			愛知小原村（恩田ら, 1987）	花崗岩
			鳥大蒜山演習林（小山ら, 1994）	安山岩質の凝灰角礫岩

① パイプの構造，斜面土層内の位置の定量化・一般化

② パイプ内の運動則の解明

③ パイプ流発生機構の解明

それぞれについて検討することにする。

1) パイプの構造の定量化・一般化

パイプは地形，地質，植生，生物の活動，降雨など様々の要因により形成，発達，維持され，破壊される。このためパイプの構造，斜面土層内の位置の定量化・一般化は困難が予想される。

さらに，実際に目に見えるパイプはパイプ網全体のごく一部分である。また，表層土中にはパイプは形成されても側方流の発生頻度が小さいため見た目の構造は不明瞭であるが，依然として透水性の高い「潜在パイプ」(塚本ら, 1988)と呼ばれるものも存在するため，その観察はますます困難となる。そこで完全な定量化・一般化は今後の課題として，現在までに観察された例についてまとめ，構造を検討する。

まず，構造を検討する上で有用と思われるパイプの分類を行う。表－1 に示すとおり，パイプは土層内の形成位置から，表層土に存在するパイプと下層土の難透水層直上に存在するパイプとの2タイプに分類することができる。斜面土層は表層土と呼ばれる森林土層(A層及びB層)と下層土と呼ばれるその下部の基岩風化層に大別できる(塚本, 1992)。形成発達の主要因としては，表層土のパイプは生物的要因が，下層土のパイプは飽和側方流による地下侵食がそれぞれ挙げられる。更に，下層土に発達するパイ

プは，地下水流動の影響を受けるため，発達場所の地形から一次谷側壁平衡斜面と0次谷出口集水型斜面に分けられる。

植物根が成因と考えられる表層土のパイプの構造については，北原(1988)が平均勾配12.9度の平衡斜面におけるパイプを石膏で固め観察した。その結果，表層土のパイプはほとんど屈曲が見られず，断面は離心率0.39～0.84の楕円形であることが明らかにされた。

下層土のパイプのうち，一次谷側壁平衡斜面のパイプは難透水層の上縁部に沿ってその出口が観察できる。これらのパイプの流出ハイドログラフは各パイプ間において増水開始及びピークの時間に差がない。このことから，合流分岐を繰り返している一つのパイプ網が平面的に難透水層直上に広がっていると考えられるとされている(北原・中井, 1992)。

次に0次谷出口集水型斜面におけるパイプについて検討する。中古生層の石礫性の地質に発達するパイプを掘り返して観察したところ，出口付近では円筒形の形状(写真－1)を示すが上流に行くに従い平面的な広がりを持つマトリックスが洗脱された礫層(写真－2)に変化した(内田ら, 1995a)。また，新藤ら(1988)はパイプ出口部を石膏で固め観察した結果，図－2 に示すとおり流出口部，管状部，懐部に分類できるとした。さらにこのタイプのパイプは，谷の合流点や難透水層の谷といった水の集中するところに存在することが報告されている(安原ら, 1984; 内田ら, 1995a)。

写真一 パイプの出口の様子
(内田ら 1995aによる)

写真二 マトリックスの洗脱された礫層の様子
(内田ら, 1995aによる)

2) パイプ内の運動則の解明

先に述べたように、パイプ流速は地表流に匹敵することが明らかされたが、モデル化に向けてパイプ内の水の運動則の解明が必要となる。

パイプ内の運動則についてはパイプ内が満水状態で水が移動する場合については、北原(1989)がパイプを含んだサンプルを用いた透水試験を行い、パイプ流量と動水勾配の関係を調べた。その結果、パイプ流は、通常のマトリックス流で考えられている、流速が動水勾配に比例するダルシー則に従う流れではなく、流速が動水勾配の1/2乗に比例する流れであることが示された。この流れはマニングの式で表現でき、マニングの粗度係数はパイプのタイプにより異なることを示した。非流出時には確認できない「潜在パイプ」では4前後、表層土に発達する植物根の跡と思われるパイプで0.4前後であるとした。

今後パイプ内の水流の状態を明らかにし、非満水時等についての検討が必要と考える。

3) パイプ流発生機構の解明

場所によってはパイプからの流出は常に生じているわけではない。そこで、パイプ流の発生機構について解明する必要がある。まずパイプ流の発生機構を考える上で手がかりとなる点を整理する。

a. パイプからの流出は古い水の成分が大部分を占める。

先に述べたMoselyが流速を観測したのと同じ流域で重水素等をトレーサーに用いた流出成分分離を行ったところ古い水が直接流出の大部分を占めてい

図一 谷出口に形成されたパイプの形状
(新藤ら, 1988による)

た(Pearce *et al.*, 1986; Sklash *et al.*, 1986)。

b. パイプからの流出の有無及び量は降雨初期の土壌含水率及び降雨量の影響を受ける。

北原ら(1994)は表一に示す定山渓流域におけるパイプ流出の観測から、図一に示すとおり、パイプ流出の発生の有無は降り始めからの積算降雨量の

図一三 降雨量と側方浸透流にしろる全パイプ流量の割合の関係(北原ら, 1994による)

図一四 積算雨量と下流堰の初期流量によるパイプ流出の有無(水山ら, 1994による)

影響を受ける。さらに流出に占めるパイプ流の割合は降り始めからの積算降雨量と相関があり、経験的に次の式で表すことができるとした。

$$R_a = 0 \quad (P_a \leq P_{ac})$$

$$R_a = 100 \{ 1 - (P_{ac}/P_a)^A \} \quad (P_a > P_{ac})$$

R_a ; パイプ流量の側方浸透流に占めるパーセント, P_{ac} ; パイプ流の発生しない降雨量, P_a ; 降雨量, A ; 係数

また、パイプ流の発生の有無、パイプ流量は降雨量のみならず、降雨初期の土壤水分条件の影響も受ける。降雨初期の土壤水分条件を反映するインデックスとして流域の初期流量が考えられる。水山ら(1994)は、図一四に示すとおり0次谷出口のパイプ流出の発生の有無が、降雨初期の流量と降雨量の影響を受けることを示した。また、谷(1987)は、直接流出が主としてパイプ流出から賄われる流域における直接流出率は、降雨初期の流量及び総降雨量の影響を受けることを示した。このことからパイプ流量は降雨量及び降雨初期の土壤水分条件の影響を受ける

図一五 パイプとして機能する部位の拡大の概念図 (Tsuboyama *et al.*, 1993による)

と考えられる。

さらに、同じ断面内のパイプにおいても流出の有無がある。降雨強度の小さいときは表一に示した下層土に発達するパイプからのみ流出が見られるが、降雨強度が大きくなるにつれ、表一における表層土のパイプからも流出が見られることが観察されている(Tsukamoto and Ohta, 1988)。また、パイプが排水システムとして働く部分は土壤の含水率及び降雨強度の影響を受ける。Tsuboyama *et al.*(1994)、Navar *et al.*(1995)は、図一五に概念モデルを示すとおり、含水率が上昇するに従いパイプとして働く部分は大きくなることを示している。

a, bの現象をふまえて、ここでこれまで考えられているパイプ流発生メカニズムについて検討する。谷(1987)は表一における表層土パイプを想定し地下水面が上昇しパイプの層に達すると流出が開始するとした。更にその際パイプには、古い水が押し出し流的に供給されるとした。McDonnell(1990. a)は表一における下層土パイプを想定し、基岩面上に達した雨水が貯留されていた古い水と混じり、飽和帯を形成し、パイプ内に水が浸透しパイプ流出が生じるとした。

これらの考えをもとに現在予想されるパイプ流発生メカニズムについて筆者の考えを以下にまとめる。概念図を図一六に示す。降雨が地表に達し土層内を鉛直に浸透する。難透水層(中生層等においては基岩面を特定することは困難である。そこで、ここでは降雨時に飽和帯が形成しうる面以下を難透水層とする。)上に達した雨水は貯留されていた水と混じり飽和に達する。図一六(a)に示すとおり、パイプのある下層土が飽和に達することによりパイプ内に水が浸透し、パイプ流が発生する。パイプ内に浸透した水はパイプ

図-6 パイプ流発生概念図

により速やかに排水されるが、図-6(b)に示すとおり、鉛直浸透流量がパイプ流量を上回ると地下水面は上昇拡大し、より土層上部の表層土のパイプ、斜面上部のパイプも排水システムとして働くようになる。

パイプの存在する部位が飽和に達する条件は、降雨初期の土壌の含水率と降雨量の影響を受ける。すなわち、初期の含水率が大きい場合、降雨強度が小さくともパイプの層は飽和に達しパイプ流が発生する。降雨量が大きい場合は、パイプの層はいたる所で飽和に達し直接流出率は大きくなる。また、図-6(c)に示すとおり、降雨強度がある一定値(北原ら(1994b)の式で言う P_{ac})に達しない限り難透水層下への鉛直浸透または不飽和側方流として流下し、パイプの層が飽和に達することなくパイプ流は発生しない。

しかしこれらは、パイプ内への周囲の土層からの水の浸透量を定量的に表現できるものではない。

3. パイプ流出のモデル化

現在までに幾つかモデルが提案されている。まず、降水量から流出量を算出するモデルとして、キネマティックウェーブ法を用い流出量を再現したものがある。谷(1987)は、直接流出が主としてパイプからの流出で賄われていると考えられる流域からの流量をキ

図-7 パイプモデルの概念図(北原, 1995による)

ネマティックウェーブ法を用いて再現した。パラメータの同定結果をもとにパイプ流がかなり速い流れであることを示した。北原ら(1994b)は流量と流速から算出した等価粗度を用いてパイプからの流出を再現したところ波形は比較的良好な一致を見た。しかし、算出結果のピーク時間、増水開始時間は実際より早く、これについて北原らは鉛直浸透による時間遅れを考慮する必要があると指摘した。また、小原ら(1993)は樹幹流を水分供給源とする速い鉛直浸透と通常のマトリックスによる遅い鉛直浸透とを考え、キネマティックウェーブ法とフィックの拡散方程式を用いると流出水の流量及び水質変化が再現できるとした。

また、北原(1995)は地下水位からパイプの流出量を算出するモデルを提案している。パイプからの流出量はパイプ壁面からの浸透で賄われ、パイプ壁面からの浸透量は透水係数と地下水位により決まると仮定しモデル化を試みた。パイプの構造は合流分岐のない円錐と仮定した。概念図を図-7に示す。前述の通り、パイプ内の水の流れは、流速が動水勾配の $1/2$ 乗に比例するとし、地下水位を一定として次の式を導いた。

$$Qp = 4.15K^{8/5}n^{3/5}I^{-3/10}d^{8/5}x^{8/5}$$

Qp : パイプ流量, K : 透水係数, n : マニングの粗度係数, I : 動水勾配, d : 地下水深, x : パイプの発生点からの距離

マニングの粗度係数は実測値を用い算出した結果と実測のパイプ流量と地下水位の関係とは比較的良好な一致を見せるとした。

しかしこれらのモデルは必ずしも前項で検討した課題を説明・再現するものではない。またパイプ流の斜面安定及び崩壊への関与を検討するために、最終的には降水量から斜面内の地下水面形、さらに流

出量の再現が可能な流出モデルの構築が必要となってくる。

最後にパイプの降雨流出過程に及ぼす影響を定性的ではあるがまとめる。

パイプには地下水を集中させる効果と通常のマトリックスの流れ以上の速度で流下させる効果がある。これら2つの効果からパイプは良好な排水システムを形成しうる。またパイプの働きは土壤の水分条件の影響を受け土壤の含水率が高いほどその効果は大きく、逆に土壤の含水率が小さいときは効果は小さく、パイプ流が発生しないこともある。

Ⅲ. 崩壊要因としてのパイプ

前章で既に述べたように、パイプは、特に降雨時において、良好な排水システムとして働くと考えられる。しかし、愛知県矢作川流域における68箇所の崩壊跡地の観察から94%の崩壊跡地でパイプが確認され、特に崩壊跡地上縁部に多くのパイプが確認された(太田ら, 1981)。また、多摩丘陵における崩壊直後の観察では、未崩壊部分のパイプから地下水の流出が観測された(新藤, 1983)。これらの観察結果はパイプが良好な排水システムとして斜面安定に寄与せず、パイプによる水移動が斜面崩壊に関与する可能性があることを示唆している。

そこで、通常、排水システムとして斜面安定に寄与するパイプが崩壊に関与するメカニズムを明らかにする必要がある。本章では、図-1に示すとおり通常の降雨時に生じると思われる現象と大きな降雨時に生じると思われる現象とに分け、パイプによる水移動の斜面安定に及ぼす影響について検討する。

1. 通常の降雨時におけるパイプ流の斜面安定に与える影響

通常の降雨時におけるパイプの斜面土層に与える影響は、地下水帯形成にパイプが与える効果から次の2点が考えられる。

① 良好な排水システムとしての地下水面低下効果

② 不完全な排水システムによる水の集中

パイプ網は下流端が排水路に開放されており良好な排水システムとして働くものとパイプ網下流端が閉塞している排水システムとしては不完全なものがある。

1) 排水システムとしての地下水面低下効果

図-1における4→11の過程に示すとおり、パイ

図-8 一定流量時におけるパイプ下流端の条件の違いによる水面形の違い(内田ら, 1995bより作成)

* 下流端の開放したパイプは土層下流端とパイプ下流端が一致

** 下流層の閉塞したパイプは土層下流端から15cmの地点の土層内にパイプ下流端が存在。

プは斜面内の水を効果的に排水しうるため、地下水面の上昇を抑制する効果がある。この効果は、間隙水圧の上昇を抑制し、側方流の地表面への復帰を防ぎ、斜面安定に寄与すると考えられる。谷ら(1987), Sidle *et al.* (1995), 内田ら(1995b)は、人工パイプ、透水性のよいレキ層を用いた室内実験によりその効果を検討している。図-8に示すとおり人工パイプ及びレキ層といった透水性の良いものを斜面内に設置することで地下水面は低下する。また、特にパイプ等の上流部で低下の効果が大きい。

2) 不完全な排水システムによる水の集中

図-1における5, 9→12の過程に示すとおり、下流端の閉塞したパイプは下流端付近において水の集中が生じる。この効果は、飽和度上昇、間隙水圧の増加による土質強度の低下をもたらす、崩壊の要因となると考えられる。

崩壊多発地域におけるピエゾ水頭は降雨に対し上昇の応答は早く、減衰は緩慢である。このことは、下流端の閉塞したパイプによる地下水の早い集中及び下流端の閉塞による緩慢な排水によると考えられるとされている(Sidle, 1984; Brand *et al.*, 1986)。

閉塞パイプの下流端の地下水位については人工パイプを用いた室内実験、数値シミュレーションにより検討されている。図-8に示すとおり、人工パイプを用いた室内実験によると下流端の閉塞したパイプの下流端部では他の位置に比べ水面の位置が高く、パイプのない時と比較しても地下水面の位置が高くなる。また、パイプの下流端部における地下水面の上昇は給水に対して極めて応答が早いことを示した

図-9 土砂排出前後におけるパイプ流出の変化(水山ら, 1994より作成)

(Pierson, 1983; 内田らb, 1995). また, 透水性の大きな水みちを有したモデル斜面内の飽和不飽和の地下水の流れを3次元有限要素法でシミュレーションした結果からも, 閉塞したパイプの下流端部においては高ポテンシャルが生じることが明らかにされている(渡辺・今井, 1984).

2. 大きな降雨時のパイプの斜面安定に与える影響

大きな降雨時のパイプの斜面安定に与える影響として図-1の「大きな降雨」の欄に示すとおり次の2点が考えられる.

① 大きな降雨時における排水システムの許容量超過

② パイプによる地下侵食

パイプによる地下侵食は大きな降雨時にのみ起こっているわけではない. しかし, 急激な土砂生産は豪雨時に観測される(寺嶋・佐倉, 1993)ことから, パイプの構造の急激な変化は大きな降雨時に起きると考えられる.

1) 排水システムの許容量超過

パイプ流量は観測結果から, 図-9に示すとおり, 上限値を持つことがある(水山ら, 1994). このことから, パイプの流下可能量は決まっていることが考えられる. 図-1における8→14の過程に示すと

り, 大きな降雨があり, 流下可能量を超える水がパイプの地下水集中効果によりパイプ内に集中したとき, パイプは集中した水を速やかに流下することができなくなり, パイプ内に急激な水圧の上昇が生じ, 斜面を不安定にする要因となると考えられる. そのとき水圧の上昇の生じる場所として, パイプの断面積が一番小さい所(McDonnell, 1990b), パイプ内の粗度の一番大きい所(北原, 1995)などが考えられる.

このことは, パイプは前項で述べた下流端の閉塞したパイプでなくとも, 大きな降雨時には斜面を不安定にする側に働くことがあり得ることを示唆している.

2) パイプによる地下侵食

図-1に示す通り地下侵食が斜面に与える影響として以下の3点が挙げられる.

a. 排水システムの形成・発達

パイプからの土砂の排出は, パイプからの流出量に影響を与える. 図-9に示す通り土砂排出後は同程度の雨量であっても流出量に変化する. 土砂排出後はパイプ流出のハイドログラフのピーク流量は大きくなり, ピークの波形は鋭くなる(水山ら, 1994). このことから, 図-1における2→1→4→11の過程に示すとおり, 地下侵食により良好な排水システムが構築され, 斜面安定に地下侵食が寄与したと考えられる.

b. 排水システムの破壊

一方, パイプ内の落盤・目詰まりが生じ, パイプが急激な閉塞を起こす可能性もある. 図-1における7→10→14の過程に示すとおり, 地下侵食によるパイプの閉塞は, 排水システムを破壊しパイプ内に水圧の急激な上昇を引き起こす. パイプ内の急激な水圧の上昇により, 周囲の土層の間隙水圧の上昇も引き起こされることが予想されている(太田ら, 1981; 新藤, 1993). これによる急激な間隙水圧の増加・飽和度上昇は, 土質強度の低下をもたらす.

しかしながら, 斜面方向のパイプの閉塞メカニズム, 閉塞条件については実証的に明らかにされているとはいえない.

c. 斜面内に「緩み」の発生(図-1における6→13の過程)

大きな降雨時にパイプからの土砂生産が観測された斜面の上部には陥没, 崩壊が見られることがある. このような現象は急傾斜な谷の側壁斜面及び谷頭部において見られる. このことから, パイプ流による地下侵食は舟底型谷地形の形成及び0次谷の成長に

寄与すると考えられる(恩田・新藤, 1987; 寺嶋・佐倉, 1993)。

新藤(1993)はこれらの現象も含めて「繰り返し発生する集中流によって進行する地下侵食に起因する現象で、斜面の緩みをきたしたり、空洞が陥没することによる斜面の不安定化」を「斜面の疲労現象」とした。

IV. おわりに

パイプ流が斜面土層に与える影響についての研究についてレビューした。最後に今後の課題について整理する。パイプが斜面安定に与える影響の中で一番大きいものは降雨時における地下水面形成に与える影響であると考えられる。パイプが地下水面形成に与える影響を検討するにあたっての課題は

1. 普遍的な現象なのか検証する
2. 定量的に評価する
3. 動的変化を評価する

の3点が考えられる。

既に述べてきたこれまで行われてきた研究成果が、他の流域、他のパイプに適用可能か否かを検討する必要がある。その上で、可能であればパイプを一定の基準(例えば表-1に示した分類)により分類し、これまでの研究結果をどの範囲のパイプにおいて適用できる結果であるかを検証する必要がある。

パイプの地下水面形成に与える影響を定量的に評価するためにパイプを含めた流出モデルの構築が必要である。最終的に望まれる流出モデルは単に流出量を再現するのみでなく、地下水面形をも再現できる必要がある。そのための課題として、①パイプの構造の定量化、②パイプ内の運動則の解明、③パイプ流発生機構の解明をあげた。パイプ内の運動則は北原(1989)においてかなり解明されてきている。しかしながら①については、それぞれのパイプにより構造が異なるため、多くのパイプを観察する必要がある。解明には時間がかかると思われる。一方、パイプ流の発生機構についてはほとんど実証的に解明されておらず、想像の域をでていない。まず解明すべき問題と考える。

崩壊、斜面安定を考えるためには、地下水面形の時間変化を考える必要がある。既に指摘したとおり、降雨時においてパイプ内に水が集中し、かなりの流速、流量で流下しているとき、パイプ内では土砂の生産・輸送が生じていることがある。このことはパイプの構造が変化することを示しており、地下水面

形成に影響を与える可能性が高い。そこで、パイプ内の土砂生産・輸送のメカニズムを明らかにし、パイプの構造の時間変化と流出形態の時間変化を検討する必要がある。

謝辞：本稿をまとめるにあたって京都大学農学部小橋澄治教授の指導を受けた。記して謝意を表します。

参考文献

- Beven, K., P. Germann (1982): Macropores and Water Flow in Soils, *Water Resour. Res.*, **18**, pp. 1311-1325
- Brand, E.W., M.J. Dale, J.M. Nash (1986): Soil pipes and slope stability in Hong Kong, *Q. J. Eng. Geol.*, **19**, pp. 301-303
- Jones, J.A.A (1971): Soil piping and stream channel initiation, *Water Resour. Res.*, **7**, pp. 602-610
- 北原 曜(1988): 林地緩斜面土層中のパイプフローの特性, *日林誌*, **70**, pp. 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**, pp. 317-322
- 北原 曜, 中井裕一郎(1992): 一次谷流域における河川流量とパイプ流の関係, *日林誌*, **74**, pp. 49-54
- 北原 曜, 寺嶋智巳, 中井裕一郎(1994a): 側方浸透流量に占めるパイプ流量の割合, *日林誌*, **76**, pp. 10-17
- 北原 曜, 三森利昭, 寺嶋智巳, 中井裕一郎(1994b): 降雨に対するパイプ流とマトリックス流の応答, *水・水学会1994年要旨集*, pp. 12-13
- 北原 曜(1995): 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, *森林総研研報*, **367**, pp. 63-115
- 小山 敢, 奥村武信, 中島 剛, 衣川和幸, 黒木道代, (1994): 火山性堆積物小流域でのパイプ流に関する観測研究, *水文・水資源学会1994年要旨集*, pp. 306-309
- McDonnell, J.J. (1990a): A rational for old water discharge through macropores in a steep, humid catchment, *Water Resour. Res.*, **26**, pp. 2821-2832
- McDonnell, J.J. (1990b): The influence of macropores on debris flow initiation, *Q.J. Eng. Geol.*, **23**, pp. 325-331

- 水山高久, 佐藤一朗, 小杉賢一朗(1994): 芦生演習林内トヒノ谷におけるパイプ流出とパイプ網に関する研究, 京大演報, **66**, pp. 48-60
- Mosely, M.P. (1982): Subsurface flow velocities through selected forest soil, South Island, New Zealand, *J. Hydrol.*, **55**, pp. 65-92
- Nieber, J.L., G.S. Warner (1991): Soil pipe contribution to steady subsurface stormflow, *Hydro. Process.*, **5**, pp. 329-344
- Navar, J., D.J. Turton, E.L. Miller (1995): Estimating macropore and matrix flow using the hydrograph separation procedure in an experimental forest plot, *Hydro. Process.*, **9**, pp. 743-753
- 小原裕博, 松林宇一郎, 高木不折(1993): 山腹斜面における雨水流出経路に関する研究, 土木学会年次講演会要旨集, pp. 212-213
- 太田猛彦, 塚本良則, 野口晴彦(1981): パイプフローと山崩れについての一考察, 昭和56年砂防学会発表会概要集, pp. 92-93
- 恩田裕一, 新藤静夫(1988): いわゆる舟底型地形の形成におけるパイプ流侵食の意味, 地形, **9**, p. 58
- Pearce, A.J., M.K. Stewart, M.G. Sklash (1986): Storm runoff generation in humid headwater catchments, 1, *Water Resour. Res.*, **22**, pp. 1263-1272
- Pierson, T.C. (1983): Soil pipes and slope stability, *Q.J. Eng. Geol.*, **16**, pp. 1-11
- 新藤静夫(1983): 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
- 新藤静夫, 丹下 勲, 寺島治男(1988): 斜面末端部における地中水の挙動, 波丘地研究, **6**, pp. 124-145
- 新藤静夫(1993): 斜面災害における地中水の集中流現象, 第四紀研究, **32**, pp. 315-322
- Sklash, M.G., M.K. Stewart, A.J. Pearce (1986): Storm runoff generation in humid headwater catchments, 2, *Water Resour. Res.*, **22**, pp. 1273-1282
- Sidle, R.C. (1984): Shallow groundwater fluctuation in unstable hillslope of Alaska, *Z. Gletscherkunde und Glazialgeol.*, **20**, pp. 79-95
- Sidle, R.C., H. Kitahara, T. Terajima, Y. Nakai (1995): Experimental studies on the effects of pipeflow on throughflow partitioning, *J. Hydro.*, **165**, 207-219
- 田中 正, 安原正也, 丸井敦尚 (1984): 多摩丘陵源流域における流出機構, 地理評, **57**, pp. 1-19
- 谷 誠(1987): 森林土壌の水源涵養効果の解明に向けて, 水利科学, **177**, pp. 35-61
- 谷 誠, 阿部敏夫, 小林忠一, 服部重昭(1987): 斜面土層内の暗渠が雨水流出に及ぼす影響, 日林論, **98**, pp. 751-752
- 寺嶋智巳, 佐倉保夫(1993): 花崗岩山地谷頭部の地形変化に及ぼす斜面浸透流の作用, 地形, **14**, pp. 365-384
- Tsuboyama, Y., R.C. Sidle, S. Noguchi, I. Hosoda (1994): Flow and solute transport through the soil matrix and macropores of a hillslope segment, *Water Resour. Res.*, **30**, pp. 879-890
- 塚本良則, 峰松浩彦, 丹下 勲(1988): 斜面表層に発達する地中パイプ, 波丘地研究, **6**, pp. 286-180
- Tsukamoto, Y., T. Ohta (1988): Runoff processes on a steep forested slope, *J. Hydro.*, **102**, pp. 165-178
- 塚本良則(1992): 森林水文学, p. 136, 文永堂出版
- 内田太郎, 小杉賢一朗, 小橋澄治, 水山高久(1995 a): 芦生演習林内トヒノ谷のパイプ網の観測, 京大演報, **67**, pp. 58-67
- 内田太郎, 小杉賢一朗, 大手信人, 水山高久(1995 b): 斜面土層内のパイプが地下水面形に及ぼす影響に関する実験的研究, 日林論, **106**, pp. 505-508
- 安原正也, 田中 正, 丸井敦尚(1984): 多摩丘陵の二つの現流域におけるパイプの形成とその水文学的環境, 地形, **5**, pp. 125-137
- 渡辺邦夫・今井 久(1984): 水みちを持つ斜面内の非定常地下水流れの性質, 応用地質, **25**, pp. 1-8
- (1996年2月13日受付, 1996年4月18日受理)