

芦生演習林トヒノ谷におけるパイプ流出とパイプ網に関する研究

水山 高久・佐藤 一朗・小杉 賢一朗

Pipe flow and pipe distribution at Toinotani Basin
in Ashu Experimental Forest

Takahisa MIZUYAMA, Ichiro SATO and Ken'ichiro KOSUGI

要 旨

山腹斜面中にはパイプ状の水みちがあり、流出過程に大きな影響を与えていると考えられるようになってきた。しかし、その実態については限られた地域でしか明らかにされていない。山腹の表層崩壊について一様な土層構造を仮定した雨水の浸透現象に基づく説明が試みられてきたが、崩壊の発生し易い斜面は判定できるものの、時間的に降雨のピークに対応して発生する現象は説明されていない。筆者らは最終の研究目標を表層斜面崩壊の予測に置き、そのために必要不可欠な研究項目としてパイプフローを取り上げた。かつて谷の出口で流量観測が実施された芦生演習林内のトヒノ谷の中の1つの凹地形（0次谷, hollow）において2つのパイプの流出量を観測するとともにパイプの空間的な分布を調べた。その結果、以下のような項目が明らかになった。

- ・0.64haの0次谷で雨中の調査を行った結果、直径3～8cmの7カ所のパイプの出口が見つかった。その内、下流端の3カ所だけに常時流水が見られる。その他は斜面が先行降雨によって湿潤になって降雨強度が大きい場合にのみ流出が見られた。
- ・パイプ流出量の時間的な変化は降雨波形とよく対応している。しかし、パイプの流量には上限があり頭打ちとなる。観測しているパイプの1つで1リットル程度の土砂流出が発生した。その後、このパイプについては上述の流量の上限が無くなった。
- ・パイプの形状、分布を調べるため掘ってみた。パイプの形をしているのは出口から50cm程度で、その後はマトリクスの流失したと思われる礫層につながっていた。したがって、地表への出口はパイプとなっているが流れとしてはパイプ流というよりも礫間流と呼ぶべきものであった。
- ・パイプからの流出は流量に上限を与えたタンクモデルでうまく説明することができた。

1. 緒 論

山腹斜面の地下には、直径がセンチメートルオーダーのパイプが動植物の活動や、地下水の侵食によって形成され、発達していると考えられている。このパイプを通して流出する雨水は、いわゆる流出特性に影響を与えるだけでなく、表層の斜面崩壊の発生を支配するものと考えられる。表層崩壊については、浸透に関する最近の研究を基礎とする平松らの研究¹⁾があるが、降雨強度が最大の時刻を中心に崩壊が発生するという現象は説明されていない。すなわち、通常の浸透を考えると、崩壊は降雨の終了時頃に発生することになり、降雨のピーク時に崩壊を発生させるように透水係数を調整すると今度は降雨終了時点には実際よりも多くの斜面が崩れることになってしまう。これは、斜面の浸透特性、土質特性を一様と仮定していることに無理があるようであり、

ここで研究するパイプなどの非一様性が鍵となると考えられる。

そこで、京都大学芦生演習林内の小流域（トヒノ谷）の源頭部付近でパイプから流出する流量を観測した。また、雨量と源頭部（凹部）の下流端の流量、さらに、比較のために谷の出口で流量を観測し、総合的に解析することにした。

本論に入る前に、パイプに関する研究を振り返っておく。パイプを通して流出するパイプ流は、マトリックス流に対するものとして古くから認識されてきた²⁾。太田ら³⁾は、愛知県西三河の矢作川流域における花崗岩地帯の崩壊地を調査し、68カ所中94%で穴が見られたと報告している。また、新第三期層林地でパイプからの流量を観測し、崩壊との関係を予察している。安原ら⁴⁾は東京農工大学波丘地利用実験施設を含む多摩丘陵の二つの源流域においてパイプの存在を調査しその形成を考察している。塚本ら⁵⁾や田中ら⁶⁾もパイプ網の観察を同じく波丘地試験地でおこなっている。北原ら⁷⁾⁸⁾⁹⁾は、地質、地形の異なる2カ所のトレンチを使ったパイプ流の観測から、融雪期の土層断面からの流出に占めるパイプ流の割合は72~91%でダルシー則に従う流出はわずかであると報告した。パイプの流れを調べた結果、Manningの粗度係数で評価すると0.4であるとした。

2. 試験流域と観測の概要

2.1 流域の概要

観測を実施した流域は、かつて福島¹⁰⁾らが流出量の観測を行ったことがある京都大学芦生演習林内のトヒノ谷である。図-1にトヒノ谷周辺の地形図を示す。パイプ流を観測したのはその支

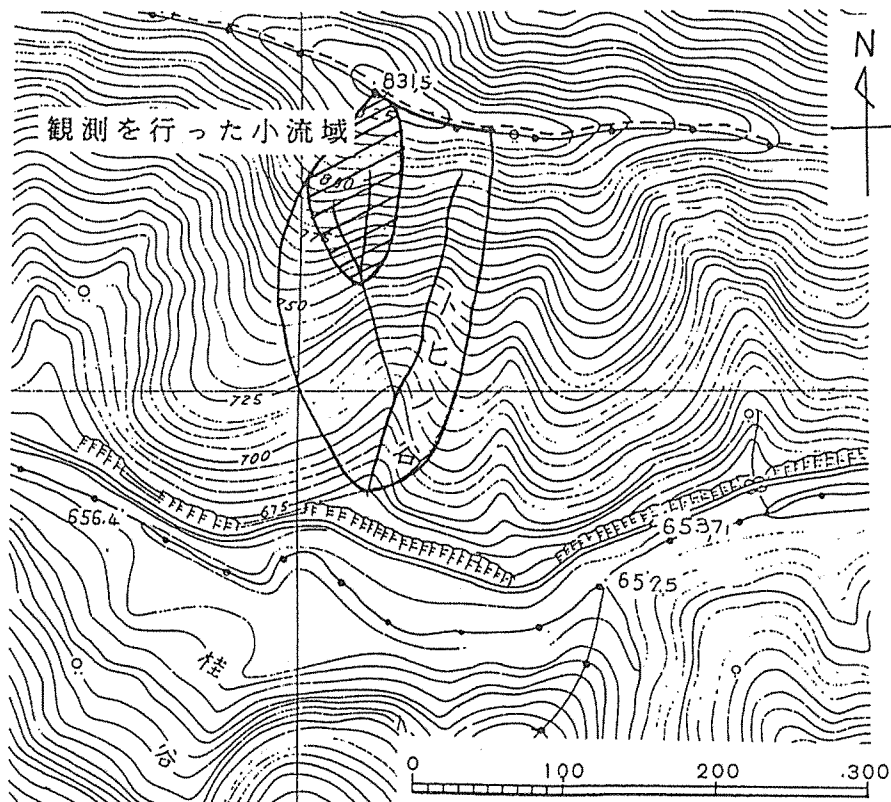


図-1 トヒノ谷周辺の地形図

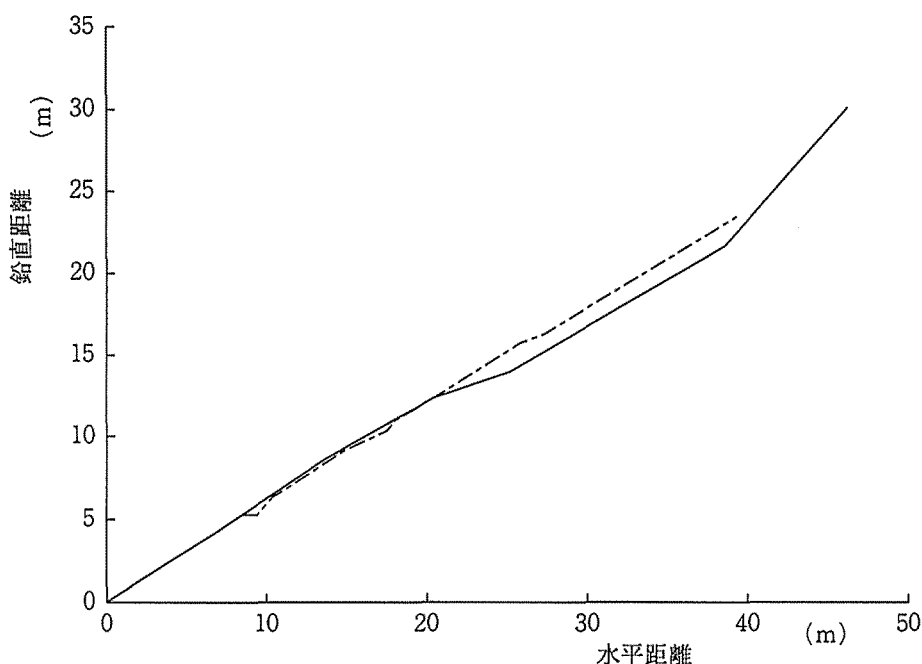


図-2 トヒノ谷の縦断面図

溪の源頭部である。図-2は、縦断面図である。トヒノ谷は、流域面積2.5ha、平均傾斜 33.1° と急峻で、地質は中古生層である¹⁾。植生は約60%がスギを中心とした針葉樹林で、残りはスギを交えた広葉樹林である。上層、中層を占める広葉樹で、個体数が多いのはアカシデであるが小径木が多い。樹冠はうっぺいしている。

パイプ流の観測を行った小流域は、面積が0.64haで平均傾斜は 35.9° と急峻な0次谷である。植生は針葉樹で、谷筋には広葉樹の小径木も見られる。パイプの分布する流域出口付近の谷筋は、腐植層の下は崩壊した土砂が堆積したいわゆる崩積土であり、大小の礫が多く含まれ、透水性は悪い。

2.2 観測方法

パイプ出口の平面的な分布を図-3に示す。パイプは、流域出口から上流へ10mまでの範囲の谷筋にあり、これより上部にはパイプは見られない。小流域下流端の地下水の流出口より上流は、普段、流水は見られず、降雨時にパイプから流出があった時だけ水が流れる。地下水の流出口付近は基岩が露出している。1993年6月の降雨時に集中観測を行ったが、その際、7カ所のパイプ出口を見つけた。その後、2、3の出口の位置が少し変わったり、消滅したり、新たに出現したりしたが、大きな変化はなかった。以下の議論の便宜上、個々のパイプに名前をつけることにし、下流から順に、PA、PB、PC、……、PGとする。7つのパイプの径は、3cm～8cmで、平均は5cmである。写真-1にパイプ出口の例を示す。

流量を計測したパイプは、図-3のPAとPDである。パイプの直径はPAが8cmで、PDは6cmである。塩化ビニルパイプをパイプ出口に差し込み、粘土で固定した。その塩化ビニルパイ



写真-1 パイプの出口

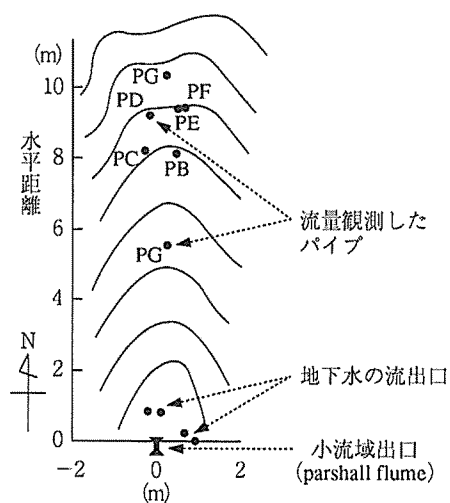


図-3 パイプ出口の分布

ブを500ccの転倒升（写真-2）につないで流量を観測した。

小流域の流量はパーシャルフリュームに水位計を接続して記録した。しかし、このパーシャルフリュームは、落葉落枝や石が断面縮小部につまり、正しいデータが取れないことがよくあった。また、測定可能な流量に上限があって、これを越えたためにデータが取れ



写真-2 転倒升型流量計

ないことも何度かあった。トヒノ谷全流域からの流出量は、既設の直角ノッチをつけた流量堰にフロート式の水位計を設置して計測した。雨量は、流域内では樹木のため測定できないのでパイプ観測地点から約300 m 南の河原で測定した。

3. 観測の結果

92年には1本(PD), 93年には2本のパイプの流量を計測した。93年について全ての観測項目についてデータが得られた例を図-4に示す。なお、93年8月18日のデータ回収時に、PDのパイプから1リットル程の土砂が排出されて、転倒弁の集水口を塞いで水が外に溢れていた。この時の雨量から、土砂を取り除く前の流量はかなり大きかったと考えられた。

図-4で、パイプのPAとPDのハイドログラフの違いが明瞭である。PDはPAよりも標高にして2 m ほど高い位置にある。PDでは、短時間に大きな流出が発生し、鋭い波形となっている。一方、PAはピークまでのハイドログラフの立ち上がりはPDと類似しているが、ピークは余り大きくならず、ゆっくりと減衰する。

PDで土砂が排出されたことを前に述べたが、土砂排出の前と後ではPDのハイドログラフに違いが見られる。土砂が排出される前はPAの波形に似ているが、土砂排出後は波形が鋭くなった。PDの土砂排出前後のハイドログラフをPAと比較してもう少し詳しく示したのが、図-5、図-6である。土砂が出る前は、共に上限があるように見えるが、PDからの土砂排出後は、

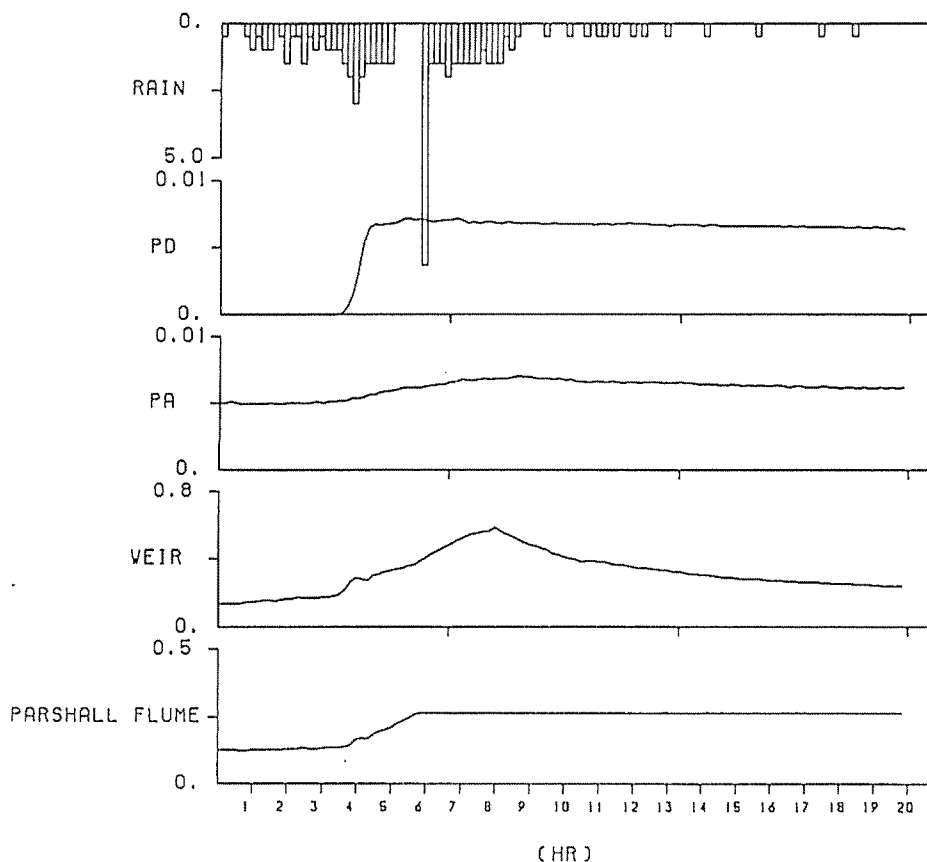


図-5 土砂排出前のハイドログラフ

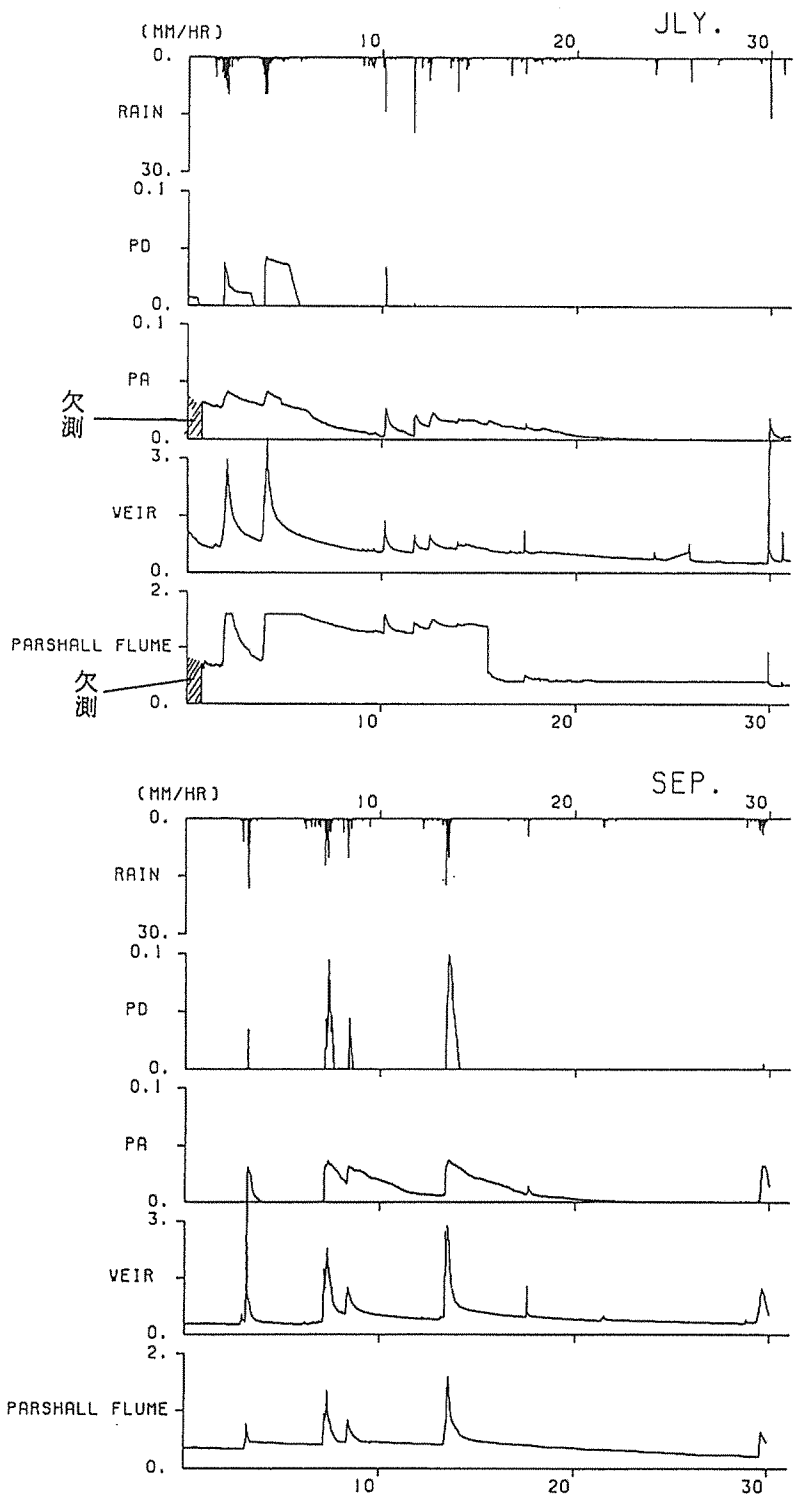


図-4 観測結果の例 (1993年)

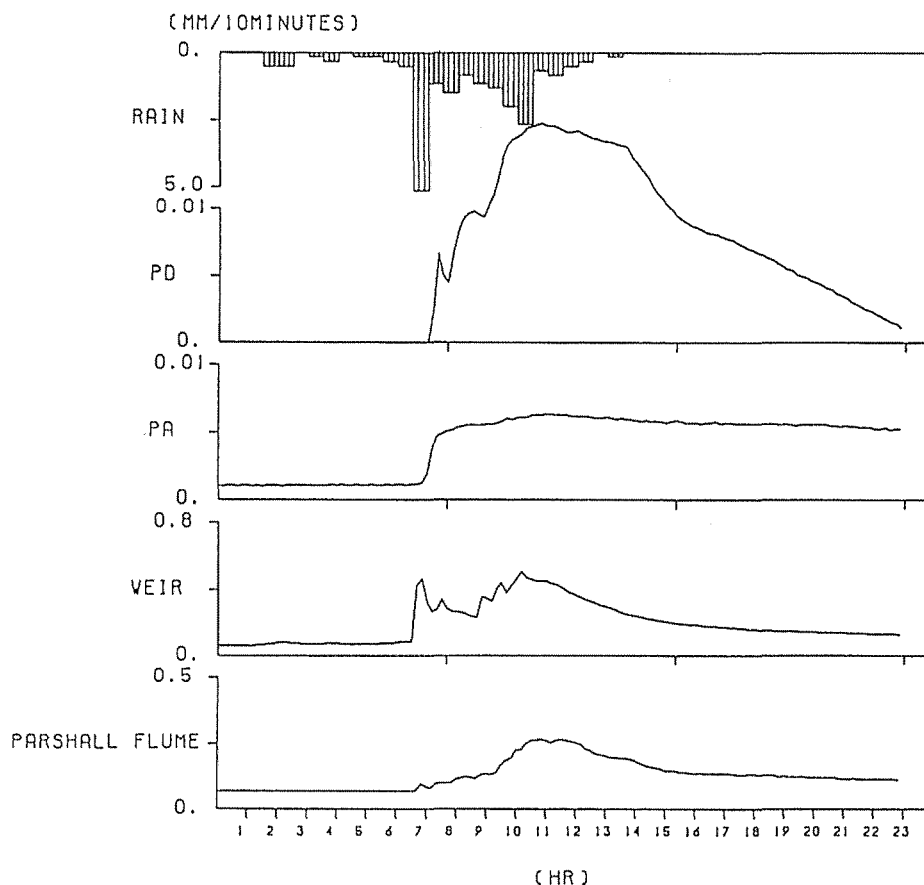


図-6 土砂排出後のハイドログラフ

PA に変化が見られないのに対して、PD は波形が鋭くなり同程度の雨量に対して2倍以上の流量に達している。パイプ流量の上限は、パイプの最小断面によって決まると考えられる。上述の応答の変化は、その最小断面部分に落盤が発生し疎通能力が大きくなったためと想像される。

4. パイプ網の現地調査

地中のパイプの分布を調べるために、流出量の観測が一応終わったところで掘ってみることにした。PD と PG の2本のパイプについて、位置を測量しながら掘り進んだ。どちらも地上に出るところでは直径3～6cmのパイプとなっていて、出口から数十cmまではパイプ状であるが、その後は礫層につながる。出口から侵食が進んだ結果と考えられる。礫層は土砂（マトリクス）が水で洗い流されていて、礫を充填したパイプという表現が適当である。（写真-3）測量結果を図-7に示すが、地表から深さ50cm程度のところにあり、過去に発生した崩壊による崩積土の下部の面に対応していると考えられる。なお、深さ20cm付近には、樹皮が残っていて明らかに根の跡がパイプになったものが見られた。



写真-3 パイプ (PG) の内部

5. 流出量の集中観測

パイプからの流出はある程度以上の降雨時にしか発生しないので、降雨中に現地でパイプの様子や流出量を観測することにした。観測は93年6月29日の午前10時頃から降り始めた降雨に対して行った。前述のPA, PB, PC, PD, PGのパイプについて、流出が始まってから10分おきにメスシリンダーで流量を計った。さらに2日後の7月1日に、降雨終了後のパイプ流の減衰過程について、同様の計測を行った。

6月29日の観測では、降雨強度が大きい時だけ、流域出口付近の谷筋に表面流が見られたが、その他は地表面に流れは見られなかった。図-8に各パイプの流量の変化を示す。パイプからの流出開始時刻は正確には把握されていないが、標高的に下位に位置するパイプから流出が始まった。各パイプの流量は、かなりばらついている。

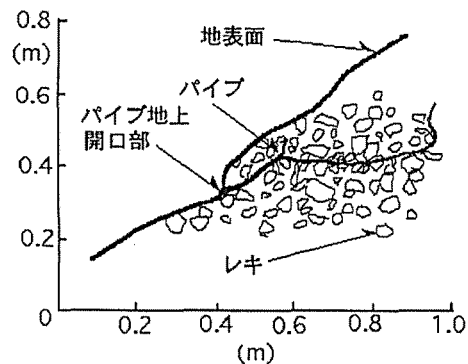


図-7 パイプ網の測量結果 (PD)

6. 観測結果の分析

6.1 ハイドログラフの解析

降雨を単位として、約30資料について、流域の湿潤状態の指標として降雨開始時点の下流の流量堰の流量を取り、これに対して降雨開始からPDの流出が始まるまでの積算雨量をプロットした。(図-9) この図は、初期流量、すなわち初期の土壌水分状況と積算雨量によって、パイプからの流出が起こる場合と、起こらない場合を区分することができることを示している。図-9の◎のハイドログラフを図-10に示す。弱い雨が長く続いてもパイプからの流出は発生せず、あ

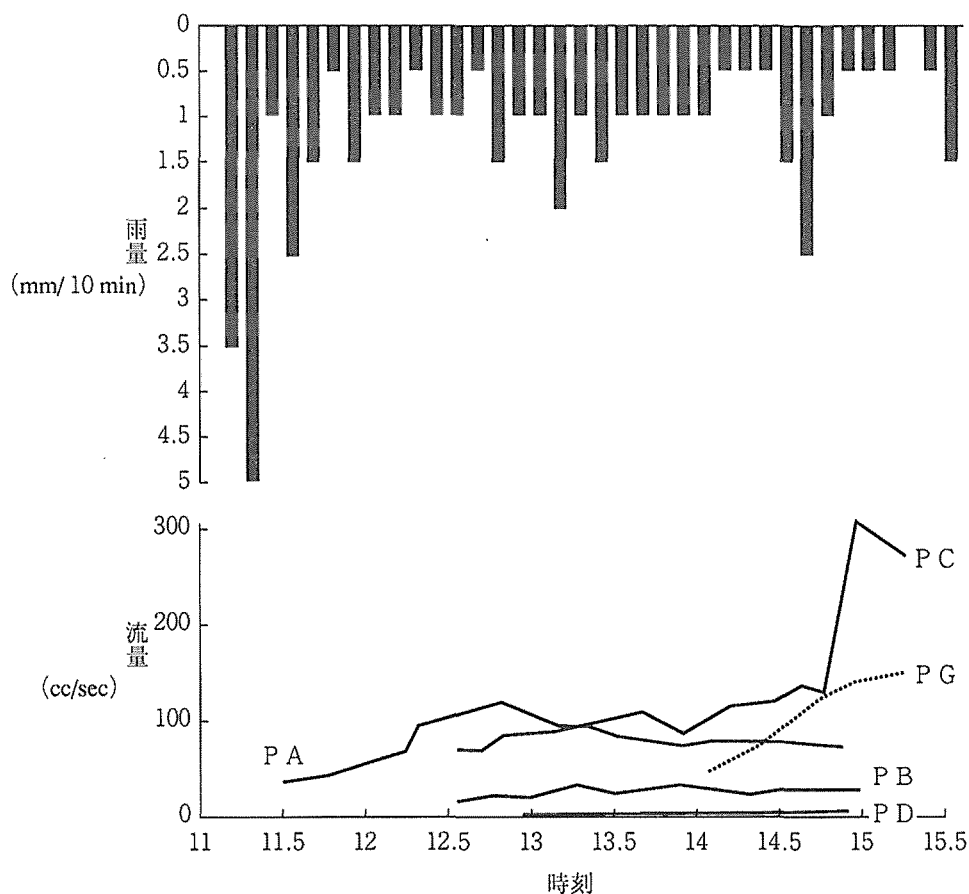


図-8 パイプの流量の変化

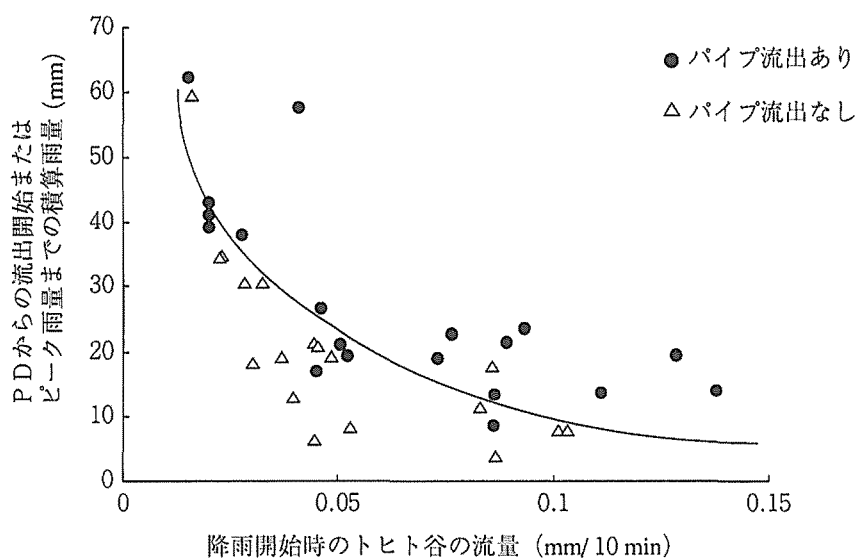


図-9 積算雨量と下流堰の初期流量によるパイプ流発生の有無

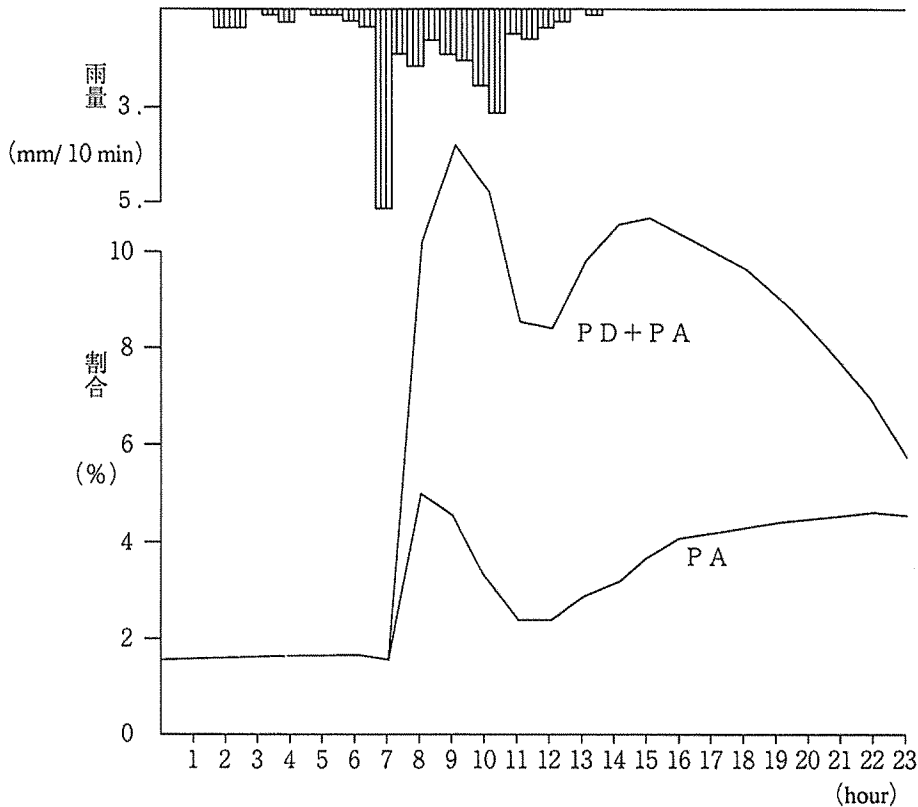


図-10 パイプからの流量が全流量に占める割合

る程度以上の降雨強度があつて初めてパイプからの流出が生じている。このように、パイプからの流出は、初期の土壤水分と積算雨量、降雨強度によって決まっているようである。

6.2 パイプ流出の全流出量に対する割合

パイプからの流出が流域からの全流出量のどの程度の割合を占めているのか調べてみよう。図-10にパーシャルフリュウムの流量に対する、PA、PD流量の割合を示す。2つのパイプからの流量は、合わせて約10%になる。前述したように、パイプはこの他5本確認されており、PCやPGのようにかなり流量の多いパイプもあるので、全て合わせると直接流出量のほとんどを占めることになる。同様の結果が、最近、北原らによって北海道での観測結果から報告されている¹¹⁾。

6.3 タンクモデルによる説明

ここまでの研究では、パイプ網の空間的な分布などは不明でパイプらしいモデル化はむづかしい。一方、6.1で述べたように、パイプの流量はいわゆる直接流出量と似た挙動をすることがわかった。そこで、パイプからの流出量をタンクモデルで説明することを試みる。試行錯誤から、図-11のタンクモデルを採用する。モデルのQ0と基底流出、Q1とPA、Q2とPD、Q3とPA、PD以外の直接流出の合計を対応させて考えた。

計算結果を観測結果を比較して図-12に示す。流域出口の流量堰の流量とはあまり一致していないが、パイプの流量とは良く一致している。

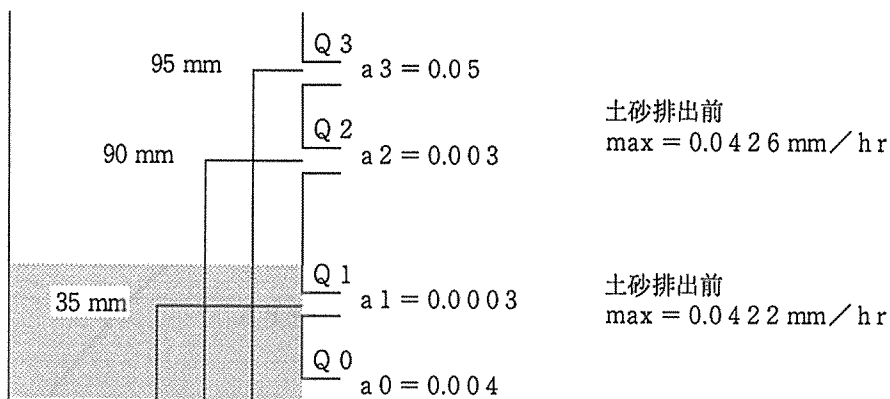


図-11 タンクモデル

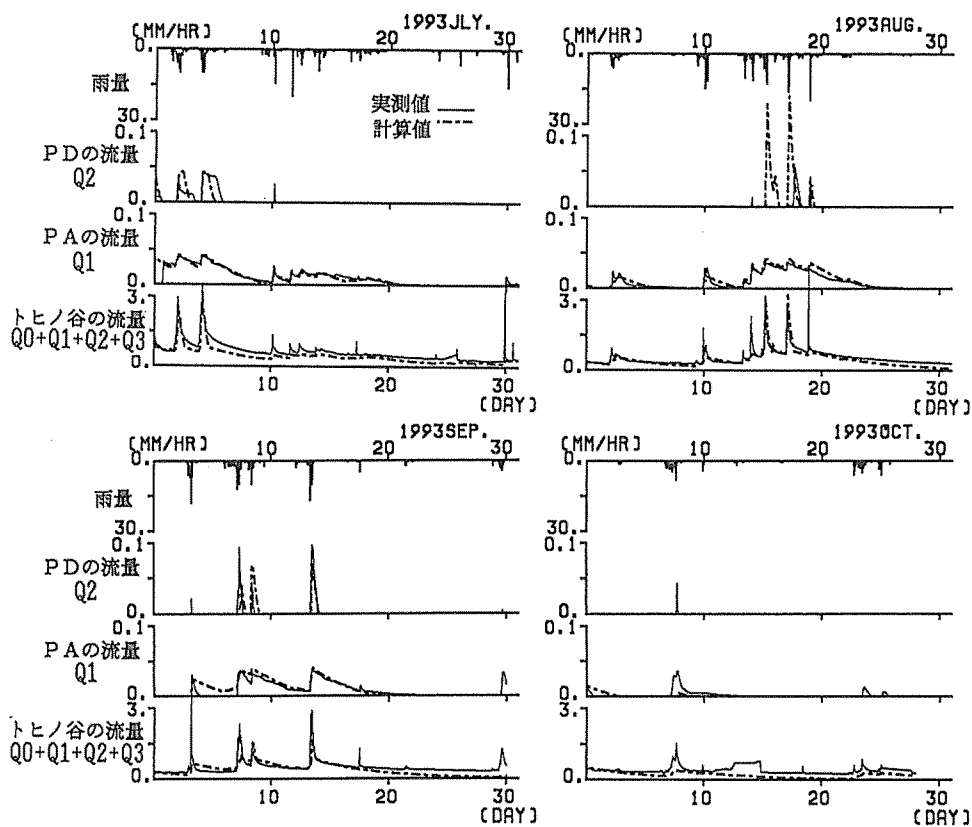


図-12 タンクモデルによる計算値と実測された流量の比較

7. 結 論

本研究期間中のパイプフローに関する観測から分かったこと、考えられることを整理すると次のようになる。

琵琶湖の南の田上山地では長年に渡って種々の水文観測が行われているが、そこではパイプが見られない。この地質は風化した花崗岩である。花崗岩の場合、深い部分には多くのクラックがあり、表層は比較的一様な砂質土で透水性が高い。言い換えれば、マトリックスの疎通能力が高く排水のためにパイプが形成される必要がない。一方、今回観測した芦生演習林は中古世層の堆積岩で林床以外、たとえば降雨時に水が流れるようなところでは粘着性の高い土砂が存在しマトリックスの流量は少ない。観測期間中、地表面からの浸透状況の観察を試みたがほとんど浸透しなかった。したがって、排水のためにパイプが必要となる。この場合には古い崩積土の下部を長年に渡って水が流れた結果、パイプが発達していったと考えられる。ただし、いわゆるパイプの形を呈しているのは、地表に現れるごく近くの部分だけで、あとはパイプ流というよりは礫間流というべき状況である。

パイプからの流出が直接流出のほとんどの部分を占めており、ある程度以上の降雨強度によって降雨波形と時間的にもよく対応していることがわかった。これは、これまで一様な浸透流を仮定して説明できなかった表層崩壊や土石流発生の生起時間が説明できる可能性を示唆している。しかし、スムーズに排水が続けば崩壊は発生しない。崩壊の説明には、さらに別のメカニズムを考える必要がある。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、農学部林学科砂防学研究室小橋澄治教授の指導を受けた。京都大学芦生演習林の中島 皇助手には観測について種々ご配慮頂いた。また、名古屋大学大気水圏科学研究所福嶋義宏教授には既往観測資料を提供していただき、観測についてご指導頂いた。平成5年の卒業生である今城克啓君をはじめとして多くの学生、大学院生には観測装置の設置、観測に協力してもらった。記して謝意を表します。

なお、本研究は平成3～5年度科学研究費補助金（一般研究B）「山腹斜面のパイプフローが表層崩壊発生に与える影響に関する研究」、（研究代表者、京都大学農学部、水山高久）の補助を受けて行った。

参 考 文 献

- 1) 平松晋也, 水山高久, 石川芳治 (1990) 雨水の浸透流下過程を考慮した表層崩壊発生予測手法に関する研究. 砂防学会誌. 43-1. pp. 5-15
- 2) 日野幹雄ら訳 (1983) カークビー新しい水文学. 朝倉書店. pp. 63
- 3) 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年砂防学会研究発表会概要集. pp. 92-93
- 4) 安原正也, 田中 正, 丸井敦尚 (1984) 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. pp. 125-137
- 5) 塚本良則, 峰松浩彦, 丹下 薫 (1988) 斜面の表層に発達する地中パイプ. 波丘地研究. 第6号. pp. 268-280
- 6) 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. 地理学評論. 57-1. pp. 1-19

- 7) 北原 曜 (1992) 森林土壌におけるパイプ流の特性. 水文・水資源学会誌. 5-1. pp. 15-25
- 8) 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70-7. pp. 318-323
- 9) 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71-8. pp. 317-322
- 10) 福嶋義宏, 鈴木雅一, 谷 誠, 加藤博之, 太田岳史 (1979) 芦生演習林内の2つの小流域における水文観測報告. 京都大学演習林報告. pp. 152-163
- 11) 北原 曜, 寺嶋智巳, 中井裕一郎 (1994) 側方浸透流量に占めるパイプ流量の割合. 日林誌. 76-1. pp. 10-17

Résumé

Two-year observation of the discharge from underground pipes made following things clear. First, ten pipes were found in a small hollow. Three pipes of the seven, that locate at the downstream end of the hollow always discharge water. Others drain during only heavy rains. Most volume of direct discharge is covered by the pipe flow. Second, the pipe flow can only be seen when antecedent rain is enough and rainfall intensity is enough. Third, the patterns of pipe flow rate well correspond to rainfall patterns. Fourth, the discharge rate from pipes has the upper limits in volume. The limit may be controlled by the dimensions of the pipes. Fifth, digging out pipes revealed that pipes long only 50 cm and they lead to the layer of gravel. It means that the flow comes out from pipes should be called not pipe flow but gravel layer flow in this case. Sixth, the outflow rates from pipes are well explained with a tank model. These facts have possibility to explain the coincidence between the peak of rainfalls and the occurrence time of debris flows and/or landslides that have not been able to be explained by the theories developed assuming homogeneous soil layers. Smooth outflow through pipes, however, does not explain the occurrence of debris flow. Collapse happened inside of pipes, which was once observed during the observation period, increases hydraulic pressure and may trigger landslides.