

3.5. 地下水研究 50 年史—斜面災害と地下水—(2)

(4) ダルシー式が適用できない地下水の世界—パイプ—

a) はじめに

パイプといっても口にくわえるパイプのことではない。正確にはソイルパイプ (Soil pipe) のことである。日本語では「水みち」がこれに近い意味を表すが、これは地下水とそれを通過させる土層の構造をあわせ持つように使われているようなのでここでは使用しない。すなわちここで言うパイプは飽和しているか、していないかは関係なく、間隙構造の一つである“Macro pore”あるいは“Preferred pass way”として話を進める。

ご存知のように地下水の流れの基本則ともいえるダルシー式は、地層の単位断面積を通過する水量は動水勾配に比例すると言うものであるが、これは地層が等方均質であることを前提としている。パイプのような大間隙が存在していれば、地層全体が飽和状態にあれば当然そこに地下水が集中して流れるので、この式は現実には成り立たなくなる。実際の地層中にはこのような大間隙は普通に存在している。したがってこれをどのように地下水流動の評価の際に考慮するかは重要な問題であるが、その手法は確立されていない。斜面の安定計算などにおいても同様の問題が生じる。しかしここではこれらの問題に迫るつもりはない。パイプとは実際にはどのようなものなのかについてだけお話する。

b) パイプのかたち

さて、パイプはどのようなかたちをしているのであろうか。これを追究した研究者は多い。

総合地球環境学研究所の窪田順平氏はかつて石膏を溶いて地面に浸透させ、それが固まったあとを掘り進み、パイプが地中に縦方向にも横方向にも網の目のように発達していることを確かめた。

筆者も同じような研究を行ったことがある。ここでは簡易貫入試験機により、その貫入抵抗の低いところ (N 値=0~2) を連ねてパイプの 3 次元分布を調べた。パイプの直径は 10cm 以上に達するところがあり、それらは地中水の集中する凹地状の斜面に出来やすいことを示した。

東京農工大学名誉教授の塚本良則氏は斜面末端部に口を開いているパイプ群を観察しながら斜面上方に向かって掘り進み、上述と同じような結果を観察している。ここではパイプの開口部では口径が大きいのが、斜面内部に向かって急速に細くなり、かつ樹枝状に枝分かれしていることを示した。

京都大学名誉教授の丸山利輔氏は土壌試料にバリウムを浸透させたのち、X 線によって立体撮影し、間隙の微細構造を調べた。それは恰も血管のようで、入り組んだ毛管のところどころにリンパ球のような大きな間隙のあることも観察された。

c) パイプの成因と発達

パイプの成因には様々なものがある。地中の小動物の棲家や植物の根、また土壌の乾湿によって出来たひび割れ、異なる透水性の地層の境界部、中には山芋掘りなどの人為的な穴から発達する場合もある。地中水は大降雨時にこのようなところに集中して流れるようになるので、間隙は次第に拡張し、パイプ網が発達する。

地表からは窺い知れない地下でのこのような現象が時々地表にまで及ぶことがある。すなわち陥没である。石灰岩地方で見られるドリーネやシンクホールのようなもので、直径数メートルに達するものもそう珍しくはない。山仕事をしている人がこのような穴に落ちて大怪我をすることもある。(写真 19, 20)



写真 19 多摩丘陵内の谷頭斜面にみる陥没孔
(周りの地層は崩積土)



写真 20 左に同じ場所
(その底にはパイプの開口部がみえる)

なおパイプの発達によってできたこのような地形を偽カルスト (Pseudo karst) と呼ぶことがある。図 9, 10 はこのような地形の発達過程を示した概念図である。図 9 の最後のステージから図 10 の最初のステージに繋がるといった輪廻を重ねつつ、谷が成長してゆくものと考えられる。

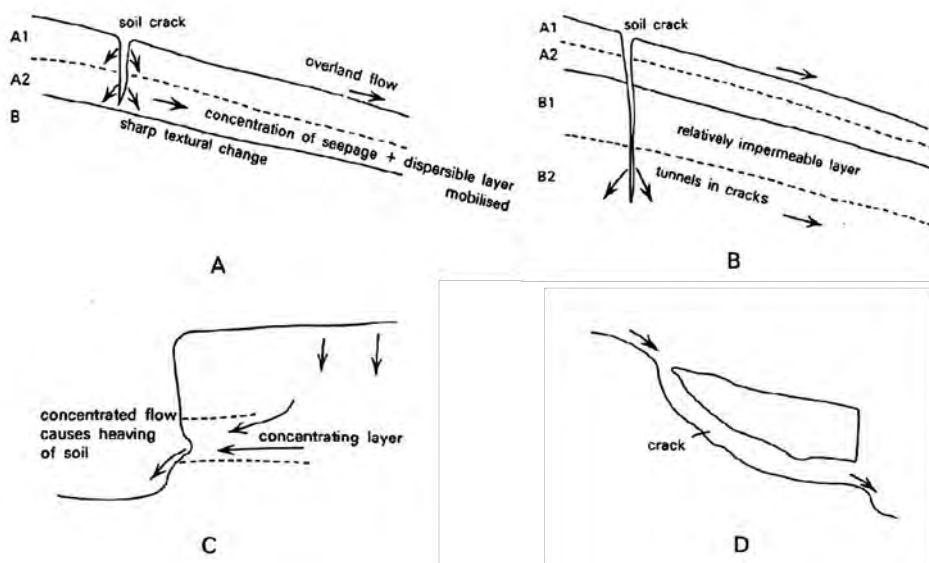


図 9 パイプの発生と地下侵食の進行 (1)

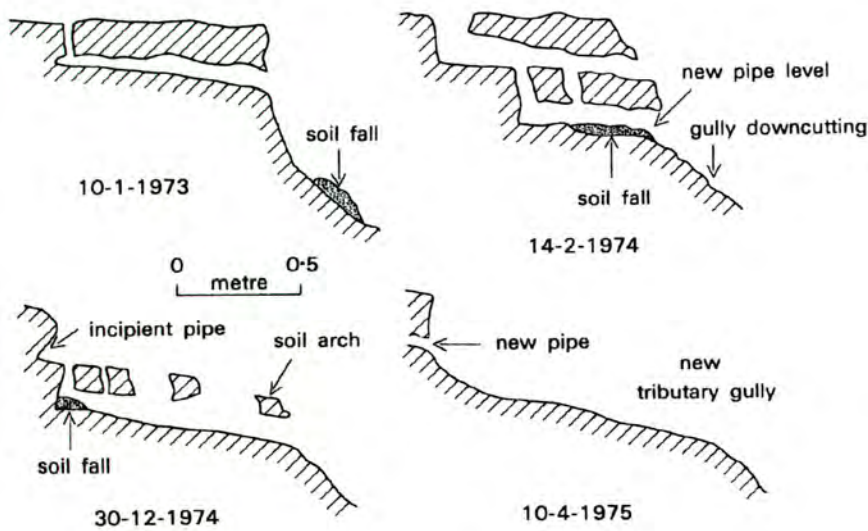


図10 パイプの発生と地下侵食の進行(2)

図11はこのような過程を経て谷が発達してゆく様子を示したものである。なおこの図にみるような一列に並んだ陥没孔を千葉県南部の地すべり地帯では“ボラ穴”と称し、谷が形成される前の前駆現象と捉えている。

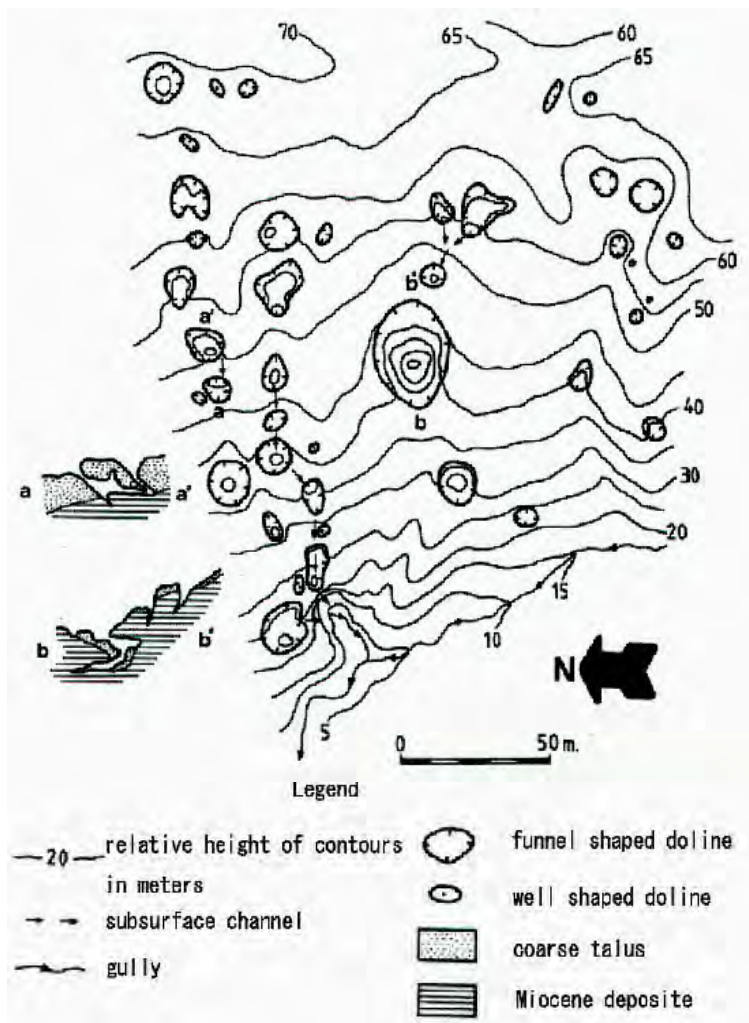


図11 崖錐堆積物に発達した陥没孔

(矢印は地下のネットワーク)

パイプはわが国のような多雨地域のみに限らず、年間降水量が 500mm に満たないような半乾燥地域にも出来る。中国の黄土高原もその一つで、ここにも巨大なパイプが観察される。(写真 21,22,23) また地下侵食が谷の形成に先行して行われていることを示唆する現象も観察される(写真 24)。なお、参考までに南アフリカの悪地地形 (badland) におけるパイプ形成と地下侵食のモデルを図 12 に引用しておく。



写真 21 中国陝西省長武の黄土高原にみる巨大陥没孔
(傍らの人間の大きさと比べるとその大きさが分かる)



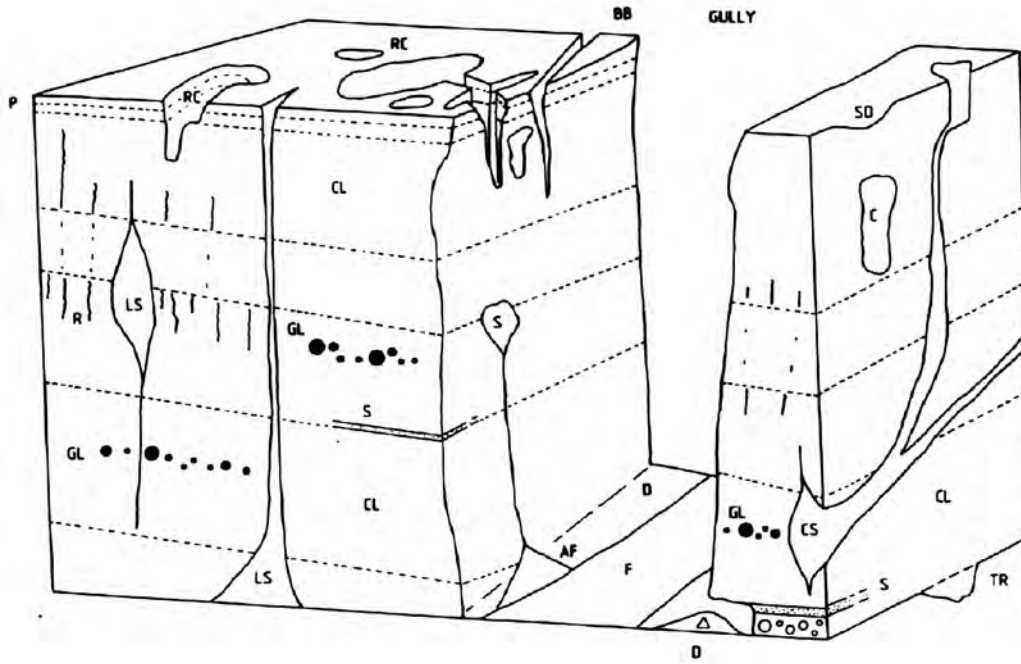
写真 22 中国山西省離石の黄土高
みる巨大陥没孔
(直径数 10 メートルに達する)



写真 23 中国山西省離石の黄土高原にみる巨大陥没孔
(農地のど真ん中にポックリあいている。下の写真はその接近)



写真 24 中国陝西省富県の黄土高原にみる地下侵食

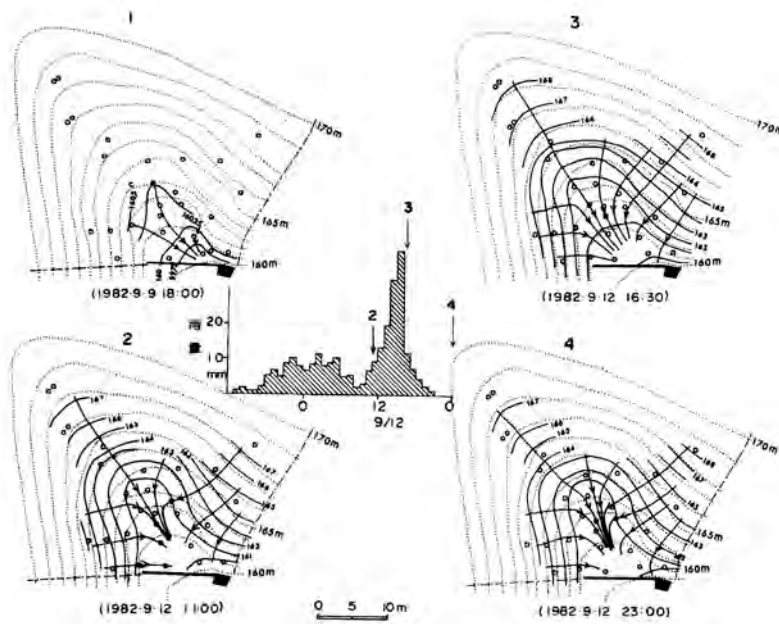


CL: Colluvium, S: Soil pipe, LS: Soil pipe associated with linear cracking, CS: Composite soil pipe network, BB: block breakage associated with surface cracking and gulying, TR: Tunnel erosion in bedrock, associated with piping, C: Cavity, RC: Roof collapse features, SD: Surface depression, R: Rills, P: Palacosol, GL: Boulder lag, S: Sand layer, D: Debris, with mud balls, AF: Alluvial cone, F: Fluvial erosion and deposition.

図 12 パイプ形成と地下侵食のモデル

d) 集中流とパイプ

パイプの初期形態の如何に関わらず、ある程度の間隙構造が形成されたあとは基本的には地中水の集中流に支配されて発達を続けることになる。集中流とはある特定の部分



に地中水が集まって流れる現象で、これは大降雨時に顕著となる。図 13 は谷頭部の集水地形のところで発生する集中流であり、図 14 は斜面末端部の地中水の流出部に見られる集中流である。この集中流は地中水と共に地中物質を溶流、あるいは浮流といったかたちで斜面外に吐き出し、さらにパイプは拡張する。

図 13 谷頭部斜面に発生する地中水の集中流 (多摩丘陵)

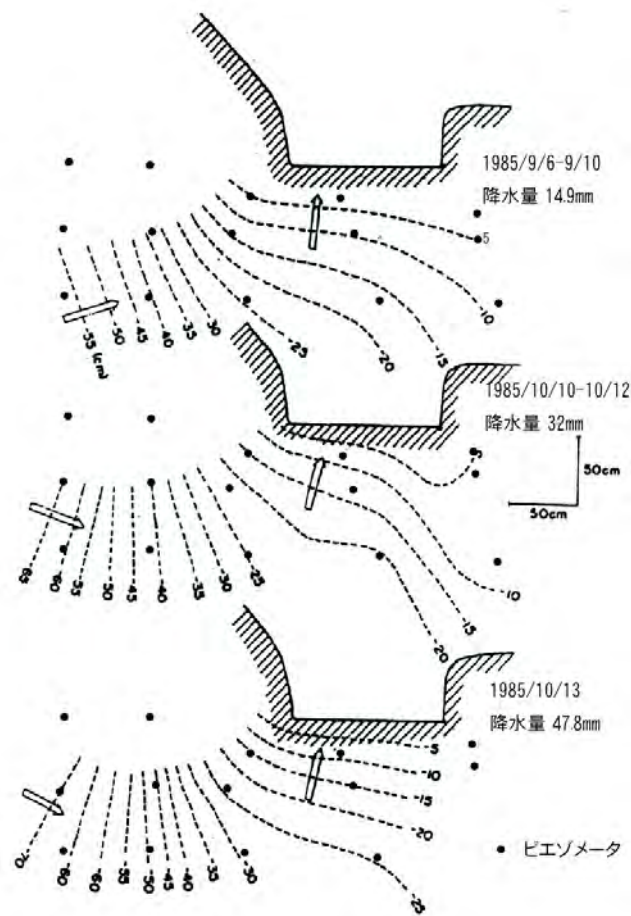


図 14 斜面末端部における集中流の挙動

(多摩丘陵：降水量の大きさによる矢印の方向と動水勾配の変化に注目)

集中流は水が集まりやすい凹地形のところに発生する傾向があるので、このあたりにはパイプが存在することが多い。写真 25 はそのような地形の典型例であるが、そこには写真 26 のような陥没孔が一行に並んでいるのがみられる。

図 14 のタイプの集中流はこのような凸型斜面の末端部に普通に見られる現象で、特に大降雨時には顕著な上向きの流れが発生し、時には多量の土砂を吐き出すことがある。

写真 27 は愛知県瀬戸市の花崗岩地帯のマサ土が豪雨時に一気に噴出したもので、数箇所のを合わせて一夜にして軽トラック一台分の量に達した。



写真 25 多摩丘陵に見られる典型的な谷頭凹地



写真 26 左の拡大写真

〔ポールの立ててある場所が陥没孔で
凹地の中央部に一行に並んでいる〕



写真 27 斜面末端部に発生したマサ土の噴出
(瀬戸市赤津 東大演習林)

パイプ流がこのような威力を発揮するに至る過程を詳しくみるため、写真 28 のように斜面末端部にトレンチを掘り、そこにテンシオメータを水平方向に挿入して斜面が不飽和状態から飽和状態にいたり、遂には崩壊に至る過程を追ってみた。

テンシオメータとは土壌間隙水の圧力水頭を計るもので、写真のビニールホースの先端にはポーラスカップが埋められていて、

地表部分に立てられた水銀柱との間の圧力伝達は水を介して行われる。飽和面での土壌水分の圧力水頭は大気圧と釣り合っているのでゼロであり、飽和面の位置がポーラスカップより上であれば正圧、逆に飽和面の位置がポーラスカップの位置より下にある場合は負圧ということになる。土壌が乾き、また飽和面が下がるにしたがって負圧が大きくなる。写真 28 のトレンチ面の下半分では漏出面 (Seepage face) からの地中水の滴り落ちる様子が観察され、この位置に飽和面があることが推察される。

図 15 は測定された圧力水頭に基準面からポーラスカップの位置までの高さ (位置水頭) を加えて得た全水頭 (水理水頭とも言う) の等値線 (等水頭線) で、地中水は図中の矢印のようにその高いところから低いところに向かって流れている。



写真 28 トレンチ面とテンシオメータの設置状況

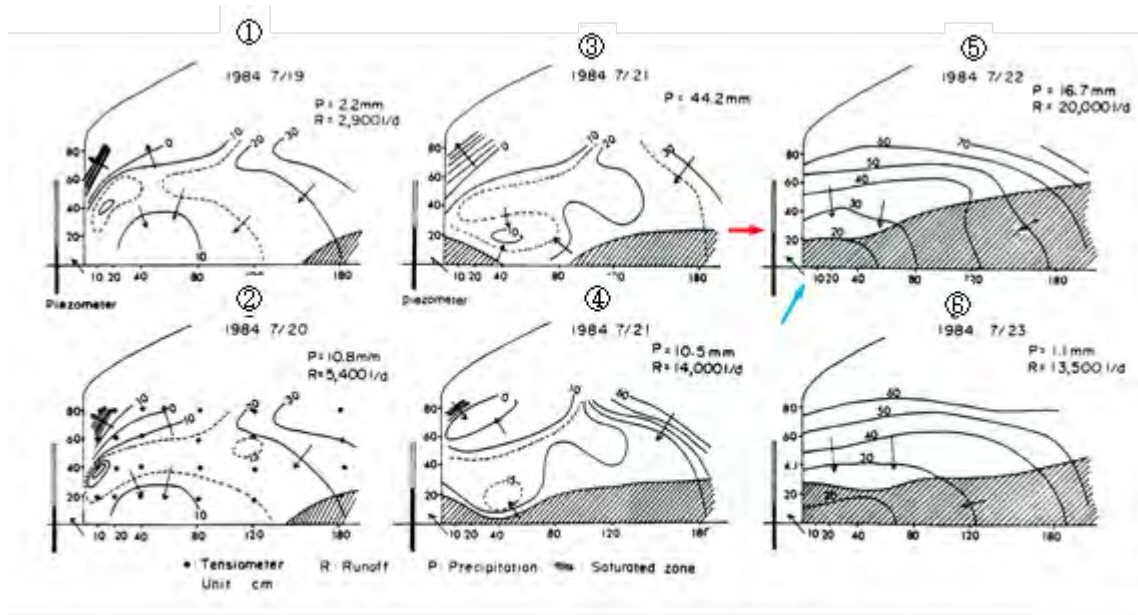


図 15 降雨時におけるトレンチ面での地中水の動き
(図中 2 の●印はポーラスカップの埋設位置)

図の①から⑥にいたる各図は降雨開始から終了にいたる過程に対応し、⑤がそのピークにあたる。また斜線の部分は飽和部分である。降雨が始まる前は地中水の動きはそれまでの土壤の乾湿状態の影響を受けて複雑な動きをしているが、降雨浸透が始まり、飽和帯が成長してくるにしたがって、地中水の流れは一様になる。またこの時、図の左側のトレンチ底に設置してある観測孔（ピエゾメータ）の圧力水頭（赤矢印）は降雨ピーク時にほぼ対応して高い値を示す。なおトレンチ壁の底部にある小さな矢印（青矢印）は地中水が湧き出している状況を示しているが、この部分からの地中水の噴出も降雨ピーク時に最大となる。

さてこのような地中での水の動きの繰り返しは、先にも述べたように徐々に地中物質を斜面外に排出して間隙が増大し、パイプ網が発達する。このパイプ網は降雨時における地中水の素早い排出には都合がよく、むしろ斜面の安定には寄与しているといえる。しかしこれが過度になれば逆の効果をもたらすことになる。つまり斜面崩壊である。写真 29 はこの観測斜面で発生した崩壊で、斜面の脚部に発達したパイプ群が原因となったものである。

なおついでにこの部分のパイプの形態を調べるため、その開口部からセメントモルタルを注入し、固化した後これを取り出してみたのが図 16 である。かたちは千差万別であるが基本的には開口部、導管部、懐部の 3 つの部分からなっているようである。面白いことに導管部の傾斜はこの部分での地中水の流線方向と一致しているようにみえる。



写真 29 トレンチの下部に発生した崩壊

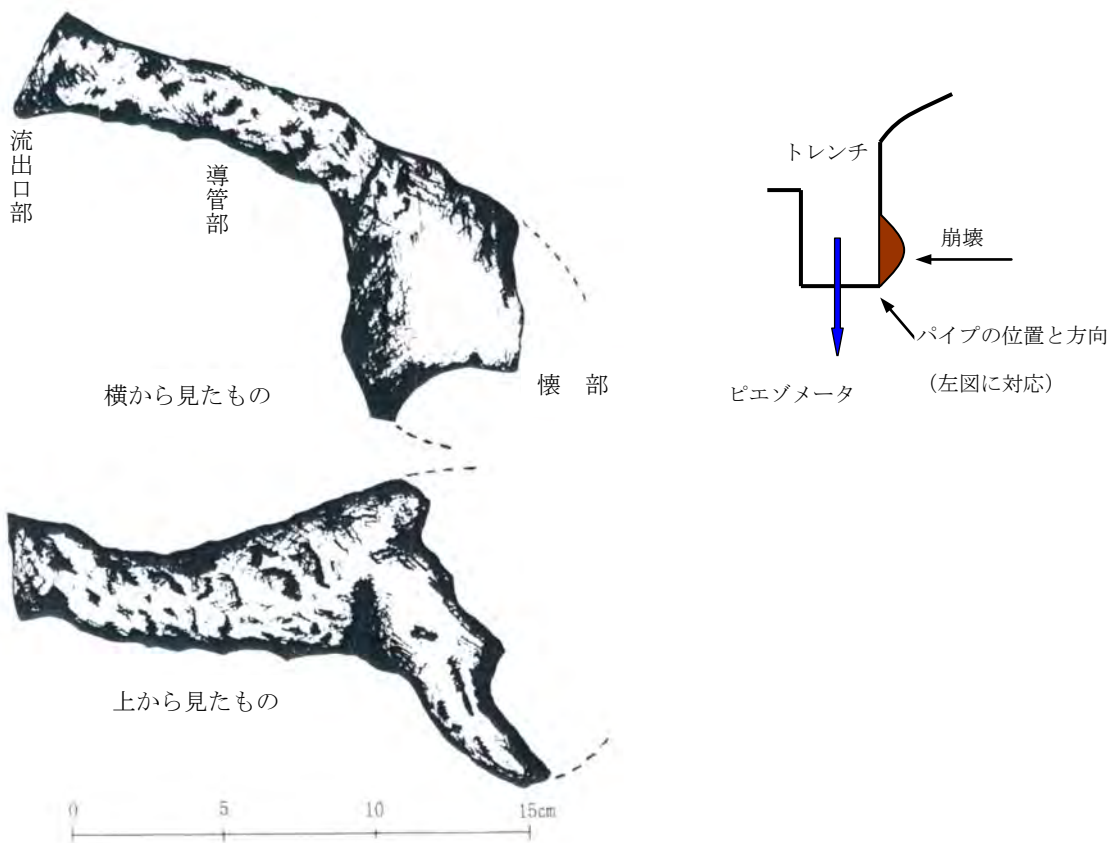


図 16 パイプの形状スケッチ

e) パイプ流と斜面の疲労

パイプ流現象をさらに詳しく調べるため、写真 30 , 31 , 32 に示したような実験装置を多摩丘陵の西部に位置する東京農工大学の圃場をお借りしてつくり、降雨実験を行

った。ここでは実験目的の一つである降雨流出の繰り返しによるパイプ流成分の増加現象、間隙構造の変化、さらに言い換えれば“斜面土層の疲労”について述べる。

図 17 は降雨実験の繰り返し経過とともに、地中水の斜面外部への流出開始時間が短縮されることを示し、その時間はパイプ流を主体とする上部土層部分のものがマトリックス流を主体とする基盤の地層（連光寺互層）からのものに比べて常に早い。時間とともに流出開始時間が早くなるということは後に述べるように、流出とともに細粒物質が排出されて間隙が増加、あるいは拡大したことを示唆する。



写真 30 降雨装置

向かって右下は急崖になっており、そこに地山の地質が露出している。足場パイプの上部には灌漑用のビニールホース（エバーフロー＝商品名）が吊り下げられており、そこから霧状の雨がほぼ均一に降らせられるようになっている。



写真 31 降雨装置下の露頭

斜面下部には連光寺互層と呼ばれる半固結の礫層が露出している。その上部は森林土壌およびローム層からなる。



写真 32 地質露頭面での集水装置

左の写真と同じ場所。基盤の連光寺互層の上面部分に桶を設置してパイプ流を主体とする森林土壌とローム層からの流出、またマトリックス流を主体とする連光寺互層からの流出を分離観測した。

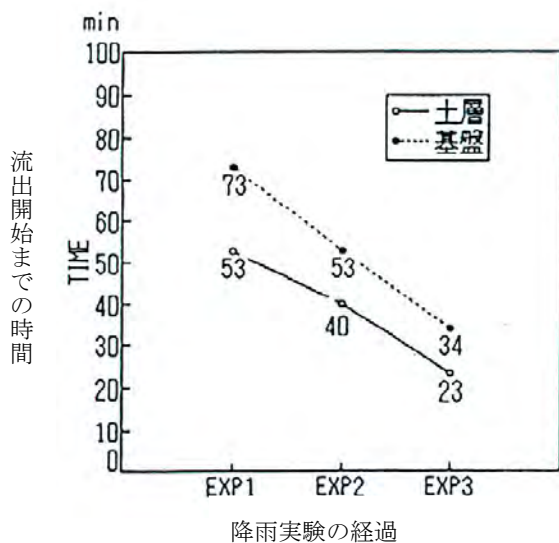


図 17 実験の繰り返しによる流出開始までの時間の短縮

ここで土層部分はパイプ流を主体とし、基盤の連光寺互層はマトリクス流を主体としている。

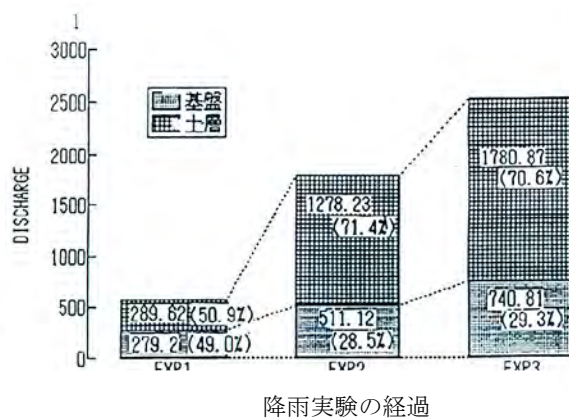


図 18 実験の繰り返しによる流出量の変化

降雨実験の繰り返しとともに土層部分からの流出量が増加する

図 18 も同じような現象とのかかわりを示しているといえる。すなわち斜面からの流出量は実験を重ねるに従って増大するが、それはパイプ流を主体とする土層部分からのものが顕著である。なお云うまでもないが、降雨実験は別に観測しているテンシオメータの記録から土壌水分状態がほぼ安定状態になるのを待ってから開始している。

ところで上記の現象はまさに“地山に鬆(す)が入る”という表現がピッタリで、筆者はこれを“斜面の疲労”と呼ぶことにしている。いろいろ観測を重ねてみると斜面から細粒物質が運び出されるのは、どうやら雨水浸透が進んで地中水分の圧力水頭が急上昇を始める時点がもっとも顕著のようで、流出量のピークとは必ずしも一致しない。図 19 は土砂濃度と流出量の関係を示したもので、このようなヒステリシス現象はどの場合でも必ず認められる。

f) 降雨流出時におけるパイプ流の占める位置

降雨時における斜面からの地中水の流出において、パイプ流が如何に重要な位置を占めているかを把握するため、約 1m 四方の切り取り面でのパイプ部分からの流出とマトリクス部分からの流出を分離して観測した(写真 33)。その一例を図 20 に示す。両者の断面積の比はパイプ部分の方が桁違いに小さいにもかかわらず、図のように流出量は逆に圧倒的に大きい。



写真 33 パイプ流の観測

パイプごとにホースを取り付けて固定し、マトリクス流と分離して計測

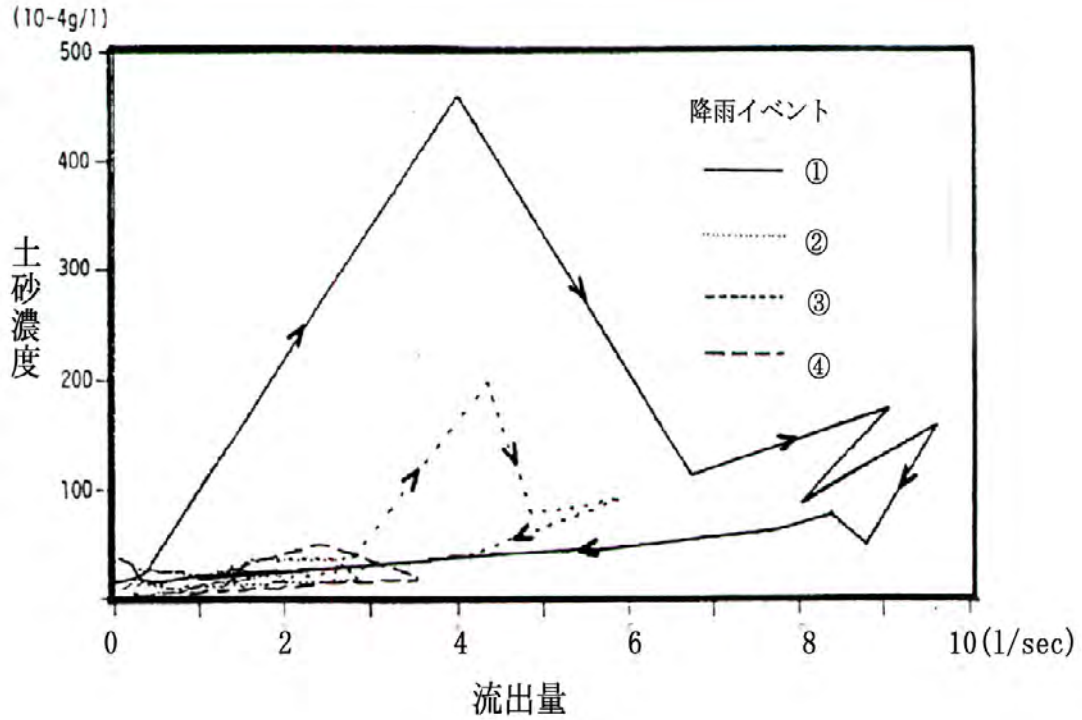


図 19 パイプ流出量と土砂濃度の関係

図は多摩丘陵西部にある東京農工大学実験地で観測したもので、幾つかの降雨イベントを重ねて示してある。降雨量の大小に拘わらず土砂濃度のピークは流出量のピークに先行する。

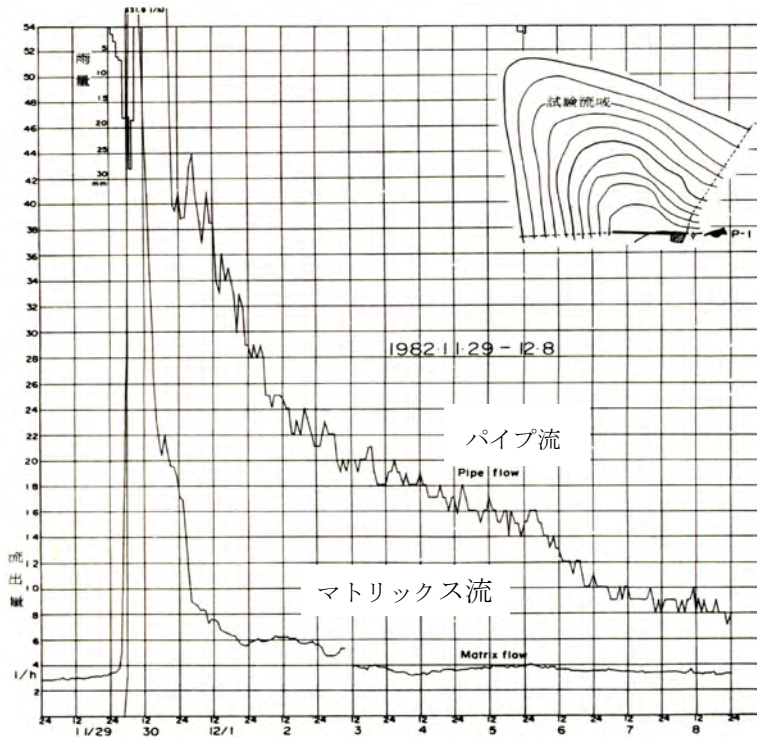


図 20 同一切り取り面でのパイプ流とマトリックス流 (多摩丘陵)

一旦地中に浸透した雨水が再び地表に出て地表面を流れる現象を復帰流と称しているが、その殆どはパイプ流として流出したものである。大雨の後などに谷頭部や谷底部を歩き回ると、いたるところから水が噴出している場面に遭遇する。図 21 はそのような例の一つで、図中小さな黒丸は地中水の噴出し口であり、斜線部分は復帰流が発生している地区である。

最後にこの復帰流とそのもととなっているパイプ流現象を動画として紹介しておく。なおこの映像は写真 25 にある斜面末端部に発生したもので、1～2年に1回といった豪雨時にのみ見られる現象である。

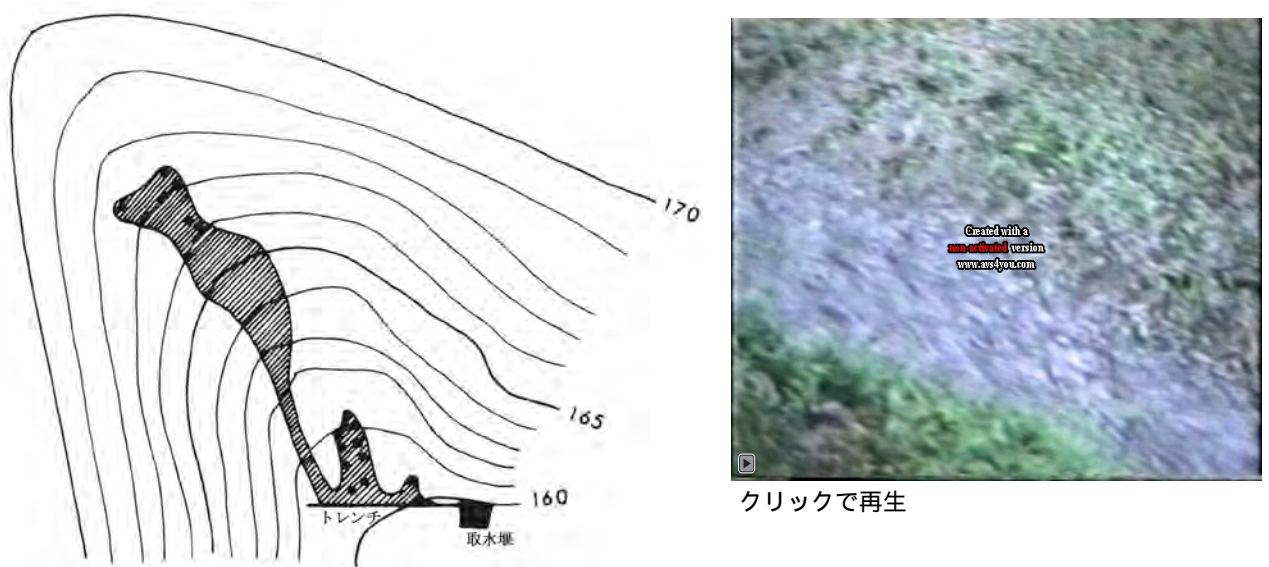


図 21 谷頭部における降雨後のパイプ流出孔と復帰流（多摩丘陵）

●は噴出し孔（パイプ）

g) おわりに

かつて小出 博氏が「山崩れ」という著書の中で「山地災害の免疫性」という考えを述べられたことがある。例えば崩壊が発生し、不安定部分が取り除かれたことは、つまり斜面が免疫性を得たということになり、その後風化帯などの不安定材料が蓄積されて斜面地質が劣化する過程は免疫性が次第に失われていくことを意味している。したがってこの免疫性の程度が把握できれば崩壊発生危険度判定への道を開くことが出来るというような主旨である。問題はその免疫性の程度をどうやって把握することが出来るかである。勿論これにはいろいろな手段があると思われるが、パイプ流出はその有力な一手段になると考えている。パイプ網の発達途路にある段階では流出にともなう土砂濃度は一般に高く、パイプ網が十分に発達した段階では反対に低くなるといった特長が見られる。降雨時に斜面をよく観察し、このような特徴を含めてパイプの発達状態が把握できれば、崩壊の危険性がある程度までは診断できると考えている。

最後に 1991 年 10 月に多摩丘陵西部の都立長沼自然公園で発生した崩壊とその跡に姿を現した直径 1m 以上に達する巨大パイプの例をあげておく (写真 34 矢印)。このようなものがどのようなプロセスを経てつくられてきたのであろうか? 分からないことはまだいっぱいある。



写真 34 崩壊地に出現した巨大パイプ