

博士論文(要約)

斜面における土壌パイプ流の発生条件と
降雨流出における役割に関する研究

山 崎 琢 平

目次

1 章 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 本研究の目的	4
1.3 本研究の構成	4
2 章 既往の研究のレビュー	5
2.1 土壌パイプとは	5
2.1.1 定義および概要	5
2.1.2 土壌パイプの成因, 形状および分布に関する研究	5
2.2 斜面の水文循環に土壌パイプが与える影響(フィールド観測)	10
2.2.1 斜面からの流出に与える影響	10
2.2.2 土壌パイプ内部の流れ形態に関する研究	13
2.2.3 土壌パイプが斜面崩壊に与える影響	15
2.3 土壌パイプ流のモデル化の試み	16
2.3.1 実験的アプローチ	16
2.3.2 土壌パイプ流のモデル化	19
2.3.3 室内実験, 数値解析の課題	19
2.4 既往の土壌パイプ研究の課題と本研究のアプローチ	20
3 章 土壌パイプ内部の流れ状態を明らかにするための横流入実験	21
4 章 降雨下において土壌パイプが斜面水移動に与える影響の実験的検討	21
5 章 数値実験による土壌パイプへの空気封入に影響を与える因子抽出の試み	21
6 章 総合考察	21
7 章 結論	22
参考文献	24

図表一覧

- 図 1-1 源流域の斜面に生じる基本的な水文プロセス
- 図 2-1 土壌断面や地表面で観測される土壌パイプ
- 図 2-2 土壌パイプの天井崩落跡と内部の土壌パイプ
- 図 2-3 土壌パイプ崩落痕による土壌パイプ形状の調査(Baillie, 1975).
- 図 2-4 連続断面調査によって得られた土壌パイプの形状情報 (Anderson et al., 2009a)
- 表 2-1 土壌パイプからの流出量まとめ
- 図 2-5 降雨中の土壌パイプ内部の流れ(Terajima et al., 2000)
- 図 2-6 流出経路毎のピーク遅れと流域面積の関係(Jones, 2010)
- 図 2-7 土壌パイプの作用を調べる室内実験の一例(Kosugi et al., 2004).
- 図 2-8 定常状態の地下水面と土壌パイプの影響(Kosugi et al., 2004).

1 章 序論

1.1 研究の背景

国土の大半を山地が占める日本では、流域の最上流部に位置する山地斜面からの流出は、我々の生活する下流域における水資源量や災害リスク等を決定する最も基本的な要素である。山地斜面は降雨を下流に流出させる中で一時的に山地に貯留しピーク流出を抑えると共に、降雨終了後には安定した流出量を維持し、水害リスクの低減と水資源量の安定性に寄与している。このような産地の持つ流出特性は流域毎に異なっており、この特性の評価、数式による表現や予測の試みが過去 100 年以上に渡って行われてきた。

ところで、現在進行する気候変動によって全球スケールにおいて平均気温の上昇をはじめとするトレンドの変化や、旱魃や豪雨のような極端気象の増加がほぼ確実となっている(IPCC, 2014)。日本においても、気温の上昇や降水量の微増と雪氷の減少、豪雨の増加が見込まれており(文部科学省他, 2013)、我々の陸水環境は大きく変化する可能性が見込まれている。将来的な気候変動への対策を練るためには将来の気象要素の変化に対する山地斜面の流出応答の変化を予測する必要がある。

しかしながら、山地斜面の流出を再現するモデルはその多くが経験的なものであり、過去のデータを用いてキャリブレーションを行った後に利用されてきた。物理的なメカニズムに基づいた方程式を用いた水文モデルにおいても、モデルの挙動を決定するパラメータは広域に適用される中で、推定されたパラメータの物理的な解釈が難しくなることが多い。このような過去データを用いたキャリブレーションによって得られたパラメータは、その特性上過去データから外れた気象の入力値に対する計算結果の信頼性が保証されず、不確実性が大きくなる。このような経験モデルの持つ不確実性を減少させるためには、山地斜面の流出応答を決定する水文プロセスの特定、およびその水文プロセスに影響を与える因子の抽出が必要である。本研究は山地斜面の流出に対して最小単位である源流域の流出現象を対象とした。

山地の最上流部に位置する源流域の基本的な水文プロセスを図 1-1 に示す。降雨時には地表面に到達した雨水は地中に浸透し、土壌の透水性を超えて浸潤しきれなかった雨水は地表流として斜面を流下する(Horton 流)。地中に浸透した水は土壌を鉛直下方に浸潤し、浸潤しきれない層(多くの場合岩盤)に到達すると宙水地下水面を形成して斜面下流側への側方流を形成する。側方流の一部は地中をそのまま流れて河川に流れ込み地中流として流出するが、斜面下部の勾配の小さな領域(riparian zone)では地表まで地下水面が上昇することで飽和

地表流として河川に流出する。降雨が停止すると、一部の雨水は岩盤を通過して基底流(base flow)を形成し、一部は蒸発散により失われる。

斜面の流出応答をどの斜面水文プロセスが説明するのかは非常に重要なテーマとされ精力的に研究されてきた。斜面の流出応答が非常に速やかであることから、古くは主体的な流出経路を地表面に浸潤しきれない水が直接地表を流下する Horton 流に求めてきたが(Horton, 1933), その後の詳細な現地調査や流出観測によって(田中ら, 1984; Sklash and Farvolden, 1979), 森林流域の持つ高い透水性によって Horton 流の発生頻度は非常に低いことが示されている。斜面に与えられた降雨は斜面の大部分を地中流として流れ、そのまま河道に注がれるか、斜面と河道の間の遷移領域である河岸領域(riparian zone)において飽和地表流となって河道の一部を形成すると考えられている。いずれの場合においても、地中流の実態を掴むことは降雨流出過程を理解する上で必須といえる。

ここで、地中流は土中の飽和不飽和浸透流であるから、基本的に Richards 式を用いて次のように表現される。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x(h) \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y(h) \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z(h) \frac{\partial H}{\partial z} \right) \quad (1)$$

ここで θ は体積含水率、 $K(h)$ は不飽和透水係数、 H は全水頭である。適切な土壌パラメータおよび初期境界条件の下で、数値的に解くことで斜面の水移動を表現することが原理的には可能である。

ところが、地中流が発生している斜面は様々な点で不均一性である。例としては、地表面および地下岩盤の地形、植生の有無や樹種、土壌の層位構造や空間分布、およびマクロポアのようなランダムな粗間隙の存在等がある。そして、このような不均一性によって斜面の流出応答は大きく影響を受けることが知られている。地表面地形は飽和地表流の発生する範囲を左右し、更に乾季雨季といった季節によって地表面地形が与える影響の大小は変動する(Grayson et al., 1997)。地下の岩盤地形は降雨時には斜面に一様ではない地下水面を形成し、この地下水面の地中における連続性の大小が斜面末端の流出量を決定する(van Meerveld and McDonnell, 2006; Ali et al., 2011)。植生の存在によって地表面における降雨強度が樹木周りで空間的に分布する(Liang et al., 2007)。マクロポアやその他の選択流によって土中で Richards 式では表現できない水輸送が生じる(Beven and Germann, 1982; Lin and Zhou, 2008)。このような不均一性の及ぼす影響は現在最も注目される研究テーマのひとつであり、斜面の降雨流出を解明する上で重要な働きをすることは間違いない。

本研究は上記の不均一性の中でマクロポアの影響，特に斜面の側方流に重要とされる土壌パイプと呼ばれる粗間隙に着目した．土壌パイプは斜面に自然に形成される粗間隙で，斜面の水・物質移動，地下侵食や地形形成作用，斜面の崩壊に対する安定性などに影響を及ぼすことが示唆されている．その一方で，パイプ流の実態については未だ不明な点も多く，特にパイプ内部の流れについての情報は非常に限られている．

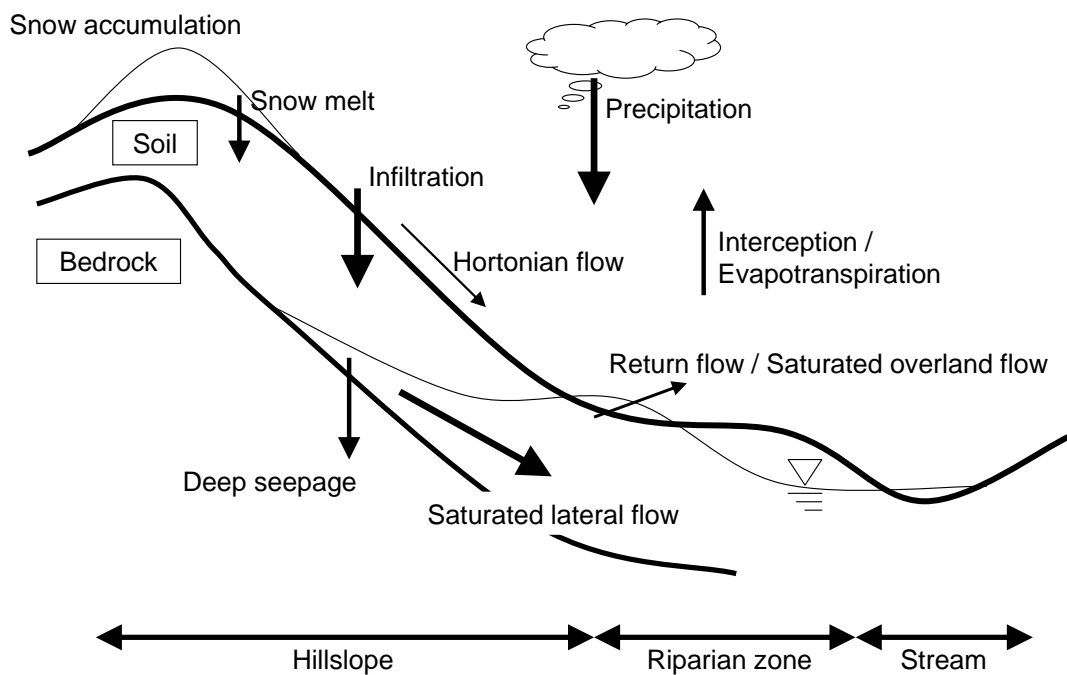


図 1-1 源流域の斜面に生じる基本的な水文プロセス

1.2 本研究の目的

本研究の目的は、土壌パイプが斜面の降雨流出過程に及ぼす影響を明らかにすることとした。特に、土壌パイプ内部の流れ状態の把握を行うことを試み、室内要素実験を行った。

1.3 本研究の構成

本研究は全7章から構成される。1章は序論であり、研究の背景および目的について述べる。2章は既往の研究のレビューであり、土壌パイプの形態学的特性、斜面の降雨流出現象や崩壊現象に与える影響に関するフィールド研究、および室内実験研究についてまとめ、既往の研究の課題について抽出を行う。

3章では砂を充填した直方体の土槽に、アクリル管を元に作成した人工土壌パイプを埋設して作成した模擬土槽に、横流入条件と称した水供給方式を課した室内実験の結果について述べる。人工土壌パイプの内部にセンサーを設置することでパイプ内部の水・空気の状態を測定し、この結果として閉鎖土壌パイプ内部に発生する空気封入現象を初めて観測し、それが土壌パイプ流の発生の有無や、パイプ内部の流路長に与える影響に関して考察した。

4章では3章で発見された土壌パイプへの空気封入現象を軸とし、より現実に近い系として降雨条件を課して空気封入現象が斜面のパイプ流に与える影響を調べた実験について述べる。設定条件として斜面の勾配、および降雨強度が閉鎖土壌パイプ内部の流れに与える影響について検討すると共に、開放土壌パイプの閉塞時にパイプ内部の空気が与える影響についても検討を行った。5章では4章で得られた降雨実験の結果を数値的に再現することにより、Richards式に基づいて土壌パイプの空気封入現象を予測できるかについて検討を行った。

6章では、横流入条件と、降雨条件という斜面流出研究で用いられる二つの水供給方式が土壌パイプ流に与える影響の違いについての考察を述べる。主として、降雨強度もしくは流入強度の大小に対する依存性の違いとパイプ流発生域の違いについて検討すると共に、横流入実験の利用法について簡単な検討を行った。最後、7章において結論とし、本研究で得られた結果をまとめると共に今後の研究の方向性や、課題について述べる。

2 章 既往の研究のレビュー

2.1 土壌パイプとは

2.1.1 定義および概要

土壌パイプ(soil pipe)は土壌中に存在するパイプ状の大間隙を指すが、研究者によって多少異なるが、主として2つの面から定義をしている。1つは形成要因によって定義する方法で、Beven and Germann (1982)のマクロポアに関するレビューでは、地中流の侵食作用(piping)によって形成された粗間隙と定義されている。一方、Uchida et al., (2001)は粗間隙の方向や長さによって定義しており、粗間隙のうち鉛直方向に伸びるものをマクロポア、斜面に平行な方向に伸びある程度の長さを持つものを土壌パイプと呼んで区別している。斜面の飽和地下水流は斜面下向き方向を主体とするため、パイピングによる粗間隙の形成は斜面方向に進むことが多く、両者の定義はある程度同じ粗間隙を表現している。本研究においてはUchida et al., (2001)と同様に伸張方向によって土壌パイプを定義することとする。その理由は、土中の水移動において粗間隙の方向が与える影響は大きく(Nieber et al., 2010)、本研究のテーマである斜面の水移動を考える上では形成作用によらず斜面に平行な粗間隙が重要になってくるためである。

土壌パイプは世界各地で発見されている。例えば熱帯林(Chappell, 2010)、日本の温帯森林(北原, 1994; Uchida et al., 1999 他)、blanket peat と呼ばれるイギリス冷帯の泥炭地(Jones, 1982; Smart et al., 2013)、亜北極圏湿地(Corey and Woo, 2002)などであり、非常に多くの地域にわたっている。ただし、土壌パイプは地下に形成されるものであるため、ある程度詳細な現地調査を行わないと発見することは難しい。そのため、これまでに発見されてきた土壌パイプの分布は大学や研究機関の持つ実験流域のように調査頻度が高い流域が多い。砂漠や山頂付近の岩石地帯のように土壌が構造を持たない斜面では粗間隙は発達しないが、そのような場所を除けば自然斜面に一般に存在すると考えられる。

2.1.2 土壌パイプの成因、形状および分布に関する研究

土壌パイプはそのほとんどの部分が地中に存在しており、地表面からは主に二つの形で確認される。ひとつは川岸や法面、地表面に到達したパイプ出口(図 2-1)、もうひとつはパイプ天井の崩落痕である(図 2-2)。そのため、土壌パイプの形状や分布を調べる方法として、パイプ天井の崩落痕のような地表面から確認できる痕跡を辿ってパイプの位置や形状を推定する方法(図 2-3)(Baillie , 1975; Holden and Burt, 2002; Wilson et al., 2015)、もしくは斜面に連続した土壌断面を作りパイプの位置を特定する(Noguchi et al., 1999; Anderson et al., 2009a)方法である(図 2-4)。前者は簡易ではあるが、地表面から発見できる情報

に限られるという欠点を持つ。後者は染料トレーサーの流入試験などと組み合わせることで、地中の土壌パイプの詳細な位置、形状、分布等の情報が得られるものの、非常に労力がかかり狭い範囲の探索(既往の研究では斜面 30 m 長程度まで)に留まる。また、近年では現場斜面の非破壊探査法として地中レーダ(Holden et al., 2004)や電気抵抗トモグラフィ(Leslie and Heinse, 2013)の利用が検討されている。現在は探知サイズ限界(地中レーダは 10 cm 径)や探知の正確性、精度を上げるための前処理の必要性などに課題は残るものの、斜面を破壊せずに内部の構造を得ることができれば研究の幅が大きく広がるため、今後の技術開発が期待される。

上述した様々な破壊検査、非破壊探査によって得られた土壌パイプの性質を以下に示す。まず大きさについて、長さは流域間の差が非常に大きく、平均 10cm 程度(Noguchi et al., 1999, 常陸太田の森林)から数 m(Anderson et al., 2009a, カナダバンクーバー島の森林; Leslie and Heinse, 2013, アイダホの実験林)と報告される例が多いが、数百 m に渡って連続した土壌パイプが見つかる流域もある(Holden et al., 2004, イギリス泥炭草地; Wilson et al., 2015, アメリカミシシッピの草地斜面)。調査地点数は限定的であるものの、小さな土壌パイプは比較的急勾配の森林斜面に、大きな土壌パイプはなだらかな草地斜面にみられることが多い。直径は数 cm から数十 cm 程度であり、長いパイプは径も大きくなる傾向がある。断面形状は概ね楕円形であるが(Noguchi et al., 1999)、大きく発達した土壌パイプには底面が平らな半円状のものもみられる(Verachtert et al., 2011)。

形成要因については、土壌パイプはマクロポアと同様に動植物の活動や、植物体の枯死および焼失のような生物的作用によるものや、乾湿や冷温による亀裂の発達や内部侵食のような物理的作用によって生成される(Pierson, 1983; Leslie et al., 2014)。特に、土壌パイプが大きく発達する上では地中流の内部侵食作用が大きな働きを担っている(Verachtert et al., 2011; Wilson et al., 2015)。この土壌パイプの発達過程に対応して、土壌パイプは地下水流の発生しやすいところに形成される。斜面では集水面積が大きく、降雨時に流量が大きい地点に生じ(Anderson et al., 2009a)、土壌 - 岩盤間(soil-bedrock interface)や有機物 - 鉱物層のように境界下層の透水性が小さく飽和側方流が発生しやすい深度に多くみられる(Uchida et al., 1999; Anderson et al., 2009a)。

このような土壌パイプは、必ずしも斜面全体に一本の繋がった土壌パイプが存在しているわけではない。多くの土壌パイプは斜面の途中で途切れ、土壌断面を取った際に突然現れることも多い(図 2-4, 10 番目の断面)(Anderson et al., 2009a)。このような不連続な各土壌パイプは土壌マトリクスを通じて互いに繋がったネットワーク構造をとっており、斜面に存在していると考えられている

(Holden et al., 2009; Leslie et al., 2014).

以上のように、土壌パイプの大きさや形状、位置といった形態特性は流域間の差が非常に大きい。この差は斜面勾配や集水面積、土壌の透水性などに関係があることが示唆されるものの、現状では土壌パイプの形態学的情報を予測するには至っていない。また、詳細な土壌パイプの形態情報を得るためにはその斜面を破壊する必要があるため、土壌パイプの形態情報は観測例が少ない。この観測の不足は後述する土壌パイプが斜面水文現象に与える影響の評価を難しくしている。



図 2-1 土壌断面や地表面で観測される土壌パイプ。

左：Leslie and Heinse (2013), カナダの森林土壌の断面調査写真。

右：Chappell (2010), 東マレーシア熱帯林



図 2-2 土壌パイプの天井崩落跡と内部の土壌パイプ(Verachtert et al., 2009).
 左：草原に点在する土壌パイプの天井崩落后。
 右：崩落痕の地下に存在する土壌パイプ。

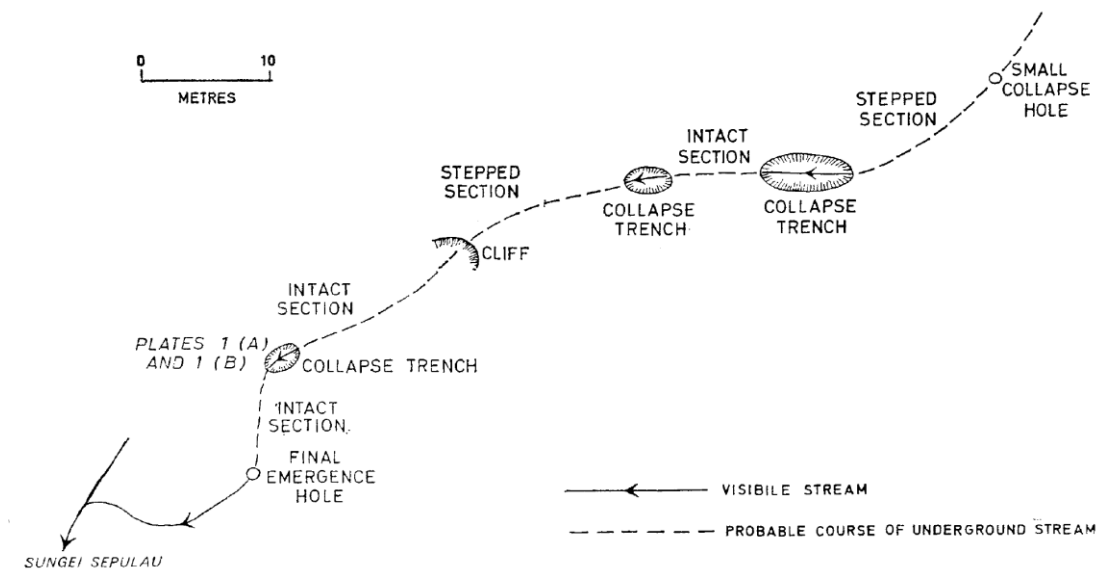


図 2-3 土壌パイプ崩落痕による土壌パイプ形状の調査(Baillie, 1975).

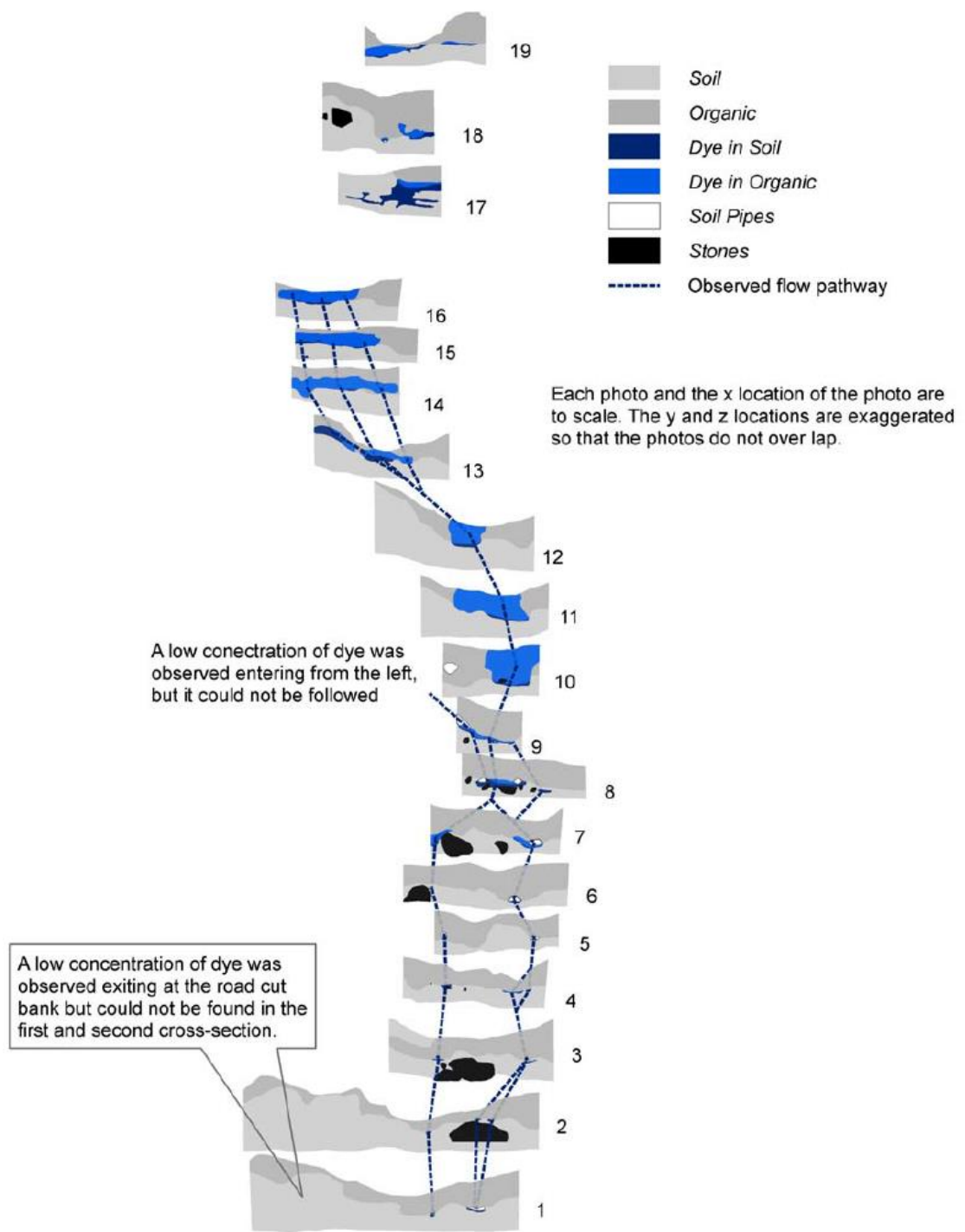


図 2-4 連続断面調査によって得られた土壌パイプの形状情報(Anderson et al., 2009a). 上流側トレンチからの染料の流入試験と組み合わせて、土壌パイプの位置と斜面の流量の把握の両方を行っている。

2.2 斜面の水文循環に土壌パイプが与える影響(フィールド観測)

2.2.1 斜面からの流出に与える影響

様々な流域に対して土壌パイプ出口からの流出観測が行われており、主に土壌断面もしくは法面に露出した土壌パイプからの流出を斜面全体の流出から分離して個別に測定する方法が用いられている。基本的に土壌パイプからの流出は、パイプの断面積が全土壌断面に占める割合に対して、非常に多くの水を流出させ、斜面出口において流水を集め流出に大きく寄与し、**significant contributor**などと形容される。しかしながら、斜面全体の流出量に対するパイプ流出の割合は、表 2-1 に示すように、観測斜面毎に大きく異なっている(Uchida et al., 2001; Jones, 2010 他)。この流出寄与率の違いについて、Anderson et al. (2009b)による流出観測と断面調査を組み合わせた研究は、1 m 程度離れた 2 つの土壌パイプは斜面の全流出量に対してそれぞれ 10%、61%と流量が大きく異なったが、流量の多い土壌パイプにはその上流側に密なパイプネットワークが存在することを報告している。これは、土壌パイプ出口からの流出は、土壌パイプの集水面積と大きく関わっていることが示唆されている。

土壌パイプの降雨時の流出特性は Uchida et al. (2005)が 4 流域の比較を行い、降雨時にのみ流出する **ephemeral pipe** は流出を開始するために一定の降雨量が必要とする(閾値がある)こと、パイプ流が始まった後では全流出にパイプ流出が占める割合は一定であること、パイプから最大流出強度は降雨強度と強く相関することを指摘している。1 点目については土壌パイプのような大間隙は周囲の土壌が飽和するまで内部に水が入れないため、パイプ周囲を十分湿潤にするだけの降雨量が必要であることに対応すると考えられる。斜面上流側の地下水面上昇に対応してパイプ流出量の増加する斜面も観測されている(Uchida et al., 1999)。その一方で、このような斜面流出に対する降雨量の閾値の存在は斜面全体の流出特性でもあることが Detty and McGuire (2010)の観測により示されている。この降雨一流出量関係にみられる閾値について、van Meerveld and McDonnell (2006)や Lehmann et al. (2007)は、複雑な岩盤の起伏によって流出端まで繋がって流出に寄与する飽和帯が一定の降雨量を境に急増することによるものであると説明し、このような宙水地下水の連続性が末端の流出量を左右する現象を水文的連結性(**hydrological connectivity**)という概念として定義し、議論している。

また、土壌パイプからの流出が流出応答に及ぼす影響も検討されている。多数の流域の流出ピーク遅れを流出経路毎にまとめた Jones (2010)は、流出応答は Horton 流、飽和地表流、パイプ流、地中流の順に遅れが大きくなることを示し(図 2-5)、土壌パイプが流出応答に与える影響を論じている。その一方で、Montgomery and Dietrich (2002)は地中流が流出の主体である流出において飽

和側方流成分に関連のある斜面勾配とピーク遅れに相関が見られないことから、流出遅れの原因が降雨浸潤の鉛直流にあると指摘している。谷(2013)も小流域の降雨流出特性のモデル化およびその解釈から流出遅れが不飽和帯の貯留量変化から説明できるとし、延直流成分の寄与を重要視している。

個々の流域の流出応答に対する土壌パイプ流の役割を調べたものとして、Smart et al. (2013)は飽和地表流および浅層地中流による流出を主体とする17.4 haの小流域において土壌パイプ8本の流出観測を行った。末端の河川流量、および土壌パイプからの流出応答は共に **flashy** と表現される早い立ち上がりと逡減を示したが、パイプごとに流出応答は異なり、河川流出に対して早く流出ピークを示すものと遅く示すものの両方が存在していた。また、河川流出に対するパイプ流出量の割合は逡減時に増加する傾向もあることから、必ずしも全ての土壌パイプが流出ピークに貢献しているのではないこと、パイプ流の働きは降雨終了後の逡減時に流量を維持することにあると指摘している。Jones(2010)が示すパイプ流流域の流出応答特性からは、土壌パイプが流出応答を早める機能を持つ、および流出応答の早い流域に土壌パイプが発達しやすい、という流出応答と土壌パイプについて因果の順序の異なる2つの可能性が見出せるが、どちらが正しいのかについては今後も詳細な観測を通じて検討する必要があることに加え、流出応答に影響する要因は多数存在するため、その中からパイプ流の影響分を抽出する手段を考える必要がある。

表 2-1 土壌パイプからの流出量まとめ

国	流域	流出率	論文
日本	多摩丘陵(東京)	47-52%	Tanaka(1982)
	波丘地(東京)	>90%	Uchida et al. (2005)
	トヒノ谷(京都)	<10%	Uchida et al. (2005)
	定山溪(北海道)	<60%	Uchida et al. (2005)
アメリカ	Panola mountain	<40%	Uchida et al. (2005)
イギリス	Maesnant	50% (quick flow)	Jones (1982)
	Cottage Hill Sike	14%	Smart et al. (2013)
カナダ	Subarctic Yukon	21% (snow melt)	Corey and Woo (2002)
	Vancouver Is.	60% (15m trench)	Anderson et al. (2009)

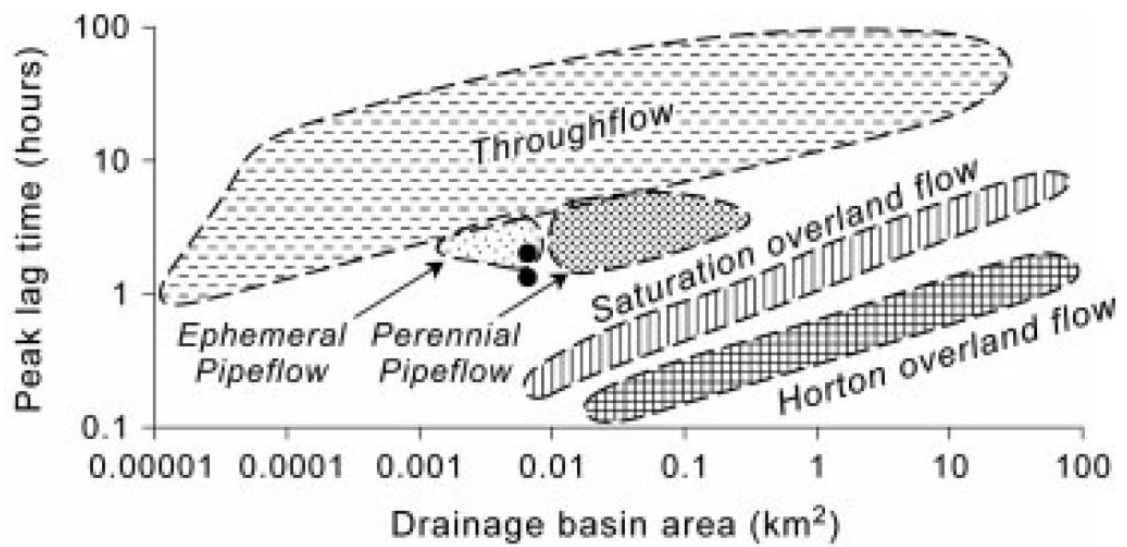


図 2-5 流出経路毎のピーク遅れ(降雨ピークと流出ピークの時間差)流域面積の関係(Jones, 2010). データは Dunne (1978), Kirkby (1985), Anderson and Burt (1990), Burt (1992), および Jones 自身による.

2.2.2 土壌パイプ内部の流れ形態に関する研究

土壌パイプ内部の流れを直接観測できるのは法面に露出したパイプ、もしくは崩落痕のある部分に限られる。そのため、多くの研究ではトレーサーを用いた溶質流入試験を行い、間接的に内部の流れを推定している。土壌パイプ内にトレーサーを流入させた溶質移動実験によると、ブレイクスルーカーブのフィッティングから得られる土壌パイプ内部の流速はパイプ周囲の土壌マトリクスに対して1~2桁大きい(Graham et al., 2010)こと、場合によっては地表流の流速に匹敵すること(Wilson et al., 2015)が示されている。前者は数 cm 径、後者は数十 cm 径の土壌パイプであり、径が大きくなるにつれて通水抵抗が減少し、流速が大きくなるものと思われる。このような径の大きなパイプ内部の流れは開水路流の形式で生じる場合があることが直接観測(Wilson et al., 2015)やトレーサー氏堅固の断面調査(Anderson et al., 2009a)から分かっている。大きく発達した土壌パイプの断面が底の平らな半円状になるのは、流れのあるパイプ底面のみで侵食が進んだためと考えられる。土壌パイプ内部の流れは降雨時には更に複雑となっている。法面に露出した土壌パイプにファイバースコープを挿入して、降雨中にパイプ内部に生じる流れを直接観測した Terajima et al. (2000)は、パイプ内部では開水路流になる部分、断面が水で満たされ円管流になる部分、水は存在するが流速のない部分が一本のパイプ内で共存する状態を観察している(図 2-6)。これら研究から土壌パイプ内部では単純な円管流ではなく、周囲のマトリクスからの水の供給に応じて複雑な流れが形成されていることが示唆されている。

土壌パイプと周囲の土壌との相互作用については滞留時間や流出応答を考える上で重要であるが、直接観察をすることは難しい。そこで、水文観測において頻繁に用いられる水の同位体をトレーサーに用いてパイプ流出水の成分分離を行うことで推定している。これらの研究では降雨時には降雨前から斜面に存在していた水(old water)が主としてパイプ出口から流出していることが分かっている(Sklash et al., 1996; McGlynn et al., 2002)。勝山ら(2000)もパイプ流出水の硝酸濃度の変化から、地中の浅いところに存在する土壌パイプによって地中を降下する降雨浸潤水が途中でショートカットする可能性を指摘している。これらの水質観測は、土壌パイプ内の水は地表面に空いたパイプ崩落跡の様な所から雨水(new water)が直接入るのではなく、一度土壌マトリクスを通過して雨水-地中水の混合作用を受けた水が供給されていることを意味している。Terajima et al. (2000)の直接観測でも、土壌パイプの天井から水滴の形で水が供給される現象を確認している。土壌パイプ内の流れの発生条件や斜面水移動に与える影響等を明らかにするためには、パイプの形状や壁面の粗度のようなパイプ内部の水理特性だけではなく、周囲の土壌マトリクスとの相互作用、つまり

周囲土壌の水移動が重要であり，よく検討する必要がある．

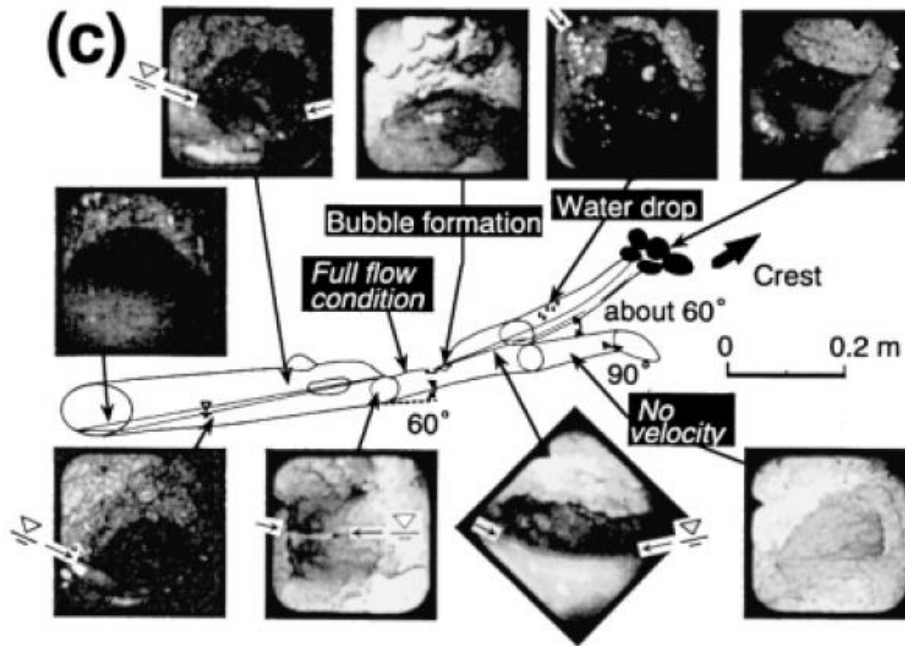


図 2-6 降雨中の土壌パイプ内部の流れ(Terajima et al., 2000).

降雨中にはパイプ最下流が開水路流，中央に満流した管流が観測された．分岐の片側は開水路流でかつ水滴による水の供給があり，もう片側は水面の形成はみられたものの流れは発生していなかった．

2.2.3 土壌パイプが斜面崩壊に与える影響

土壌パイプは斜面の水移動現象に影響するだけでなく、侵食作用を通じて土砂の移動や斜面崩壊に対する安定性にも影響を与える。土壌パイプの痕跡は斜面崩壊地点の上流側にしばしば観測されることから、斜面崩壊と土壌パイプの関わりについて検討されてきた(Pierson, 1983; McDonnell, 1990)。

Uchida et al. (2001)が現地観測や、室内実験(室内実験の詳細は2.3.1節で述べる)の結果を整理したところでは、通常の降雨条件においては土壌パイプは土壌パイプへの集水効果と大きな排水能力によって、斜面を安定化させる方向に働く。しかし、土壌パイプの出口が閉塞した場合には、斜面外への排水能力が失われるため、閉塞地点に集まった水によって局所的に地下水位が上昇し、斜面安定性が損なわれる。また、パイプ出口が閉塞しない場合でも、豪雨時にパイプ内を通過する水量が土壌パイプの排水能力を超えると、周囲のマトリクスへの流れによって同様に地下水位が上昇し、斜面を不安定にさせる。このように、土壌パイプはその構造や降雨条件によって斜面安定性に対し正負それぞれの影響を持つとされる。

更に、土壌パイプは侵食作用によってその形状を変化させる。土壌パイプからの侵食量は正確な見積もりが難しいが、Verachtert et al (2011)が行った研究では年間 3 t ha^{-1} 程度であり、同流域(草地)の地表面侵食(面状侵食とリル侵食)より1桁程度大きいことを示し、地中において活発な侵食とそれによるパイプの形状変化が生じていることを示唆されている。このようなパイプ形状の変化は土壌パイプの持つ排水能力を向上させる働きもあるものの(Uchida et al., 1999), 地中の空洞化による斜面構造の不安定さも同時に増加させる(新藤, 1993)。

2.2.4 土壌パイプのフィールド観測の課題

土壌パイプの形態特性と流出特性について、それぞれの側面から精力的な研究が行われているが、形態特性と流出特性を結びつける研究は非常に限られている(Anderson et al., 2009b)。その大きな原因は形態情報の取得と流出特性の観測の両方を同時に行うことが困難なことにある。土壌パイプの形態は斜面を破壊することによってしか得られないため、詳細な土壌パイプの情報を明らかにした斜面では流出観測が出来ない。斜面末端で得られる流出特性は斜面内部の水文プロセスによって決まっているため、パイプ位置の特定できない現在の流出観測では、土壌パイプの存在によって流出特性がどのように変化していくのかについてはっきりしたことはいえない。

2.3 土壌パイプ流のモデル化の試み

2.3.1 実験的アプローチ

フィールドでは土壌パイプの位置が分からず，内部のパイプ流の特徴を観測することは難しいため，土壌パイプを持つ斜面を人工的に作製した室内実験によって斜面のパイプ流の働きを明らかにする試みが行われてきた(図 2-7).

最初期の検討は Hele-Shaw セルを用いた Pierson (1983)の実験であり，ここではセルの厚みを一部分だけ大きくすることで通水性のよい部分を作り，これを土壌パイプに見立てて定常流形成時の水圧分布を検討した．その後の研究は人工的に土壌パイプを埋設した斜面を用いる方向に移っている．人工土壌パイプとしては，様々な材質で作製した人工土壌パイプを用いているもの(プラスチックパイプ：Sidle et al., 1995; 内田ら, 1995; Kosugi et al., 2004, ステンレスメッシュ：多田ら, 2002, ジオテキスタイル製パイプ：Sharma, 2015)と，無垢棒を埋設した斜面から棒を取り除くことによって直接穴を開けた実験(Wilson, 2009; Wilson, 2011)が行われている．前者の人工土壌パイプは使用した人工パイプ壁面の影響が表れること，パイプマトリクス間の相互作用が若干異なる可能性を持つこと，パイプ径上が一定で地下侵食現象を扱えない欠点はあるものの，構造が安定しているためパイプ内の流れ現象の把握やそのモデル化は容易である．後者はパイプ壁面が実際の土壌であり現実の系に近いものの，侵食作用による構造変化が生じるため，パイプ内部の観測が不十分であれば現象の把握そのものが難しくなる．既往の研究では両形式の土壌パイプは目的によって使い分けられており，人工土壌パイプは主として定常状態の地下水面に与える影響や，斜面全体の安定性に及ぼす影響が調べられている．土壌に直接空けた土壌パイプは，パイプ内侵食現象の解明が試みられている．

土壌パイプが定常状態の地下水面に及ぼす影響は，土壌パイプ出口の形状によって異なることが分かっている．土壌パイプは流出口まで貫通した開放土壌パイプ(open soil pipe)と流出口手前で土中に閉塞した閉鎖土壌パイプ(closed soil pipe)が存在する．室内実験の結果から，開放土壌パイプは定常状態の地下水面をパイプなし条件に対して大きく低下させ，斜面の安定性を増加させるのに対し，閉鎖土壌パイプでは閉塞したパイプ出口に水を集中させるためにパイプ出口周辺の地下水面が上昇し，斜面全体では地下水位が低下するものの局所的に安定性が低下することが明らかになっている(図 2-8)(内田ら, 1995; 多田ら, 2002; Kosugi et al., 2004; 堤ら, 2005).

パイプ内部の侵食については，パイプに直接水を供給して強制的にパイプ流を発生させることで，パイプ内部の侵食量とパイプ周囲の土壌水圧の変化などが検討されている．土壌パイプが内部侵食によって発達するためには初期にある程度の径が必要であること(Wilson, 2011)，パイプ内部で侵食に伴う土石流

(debris flow)が突然生じてても、パイプ近傍の土壌水圧にはほとんど変化が観られないこと(Wilson, 2009)が示されている。ただし、Wilson (2009)ではパイプ流と同時に降雨を与えているものの、降雨前後で土壌水圧の値はほぼ変化していない。Wilson (2009)や同(2011)はパイプ内部に非常に大きな圧力(30 cmH₂O), もしくは流量(150 L h⁻¹, 1 cm 径の土壌パイプ内部に 50 cm s⁻¹のフラックス)を与えており、パイプ内部の水が境界条件のように働いて周囲の土壌水圧の値を規定している可能性があり、これらの結果が斜面で生じる土壌—パイプの相互作用を表しているのかについては疑問が残る。

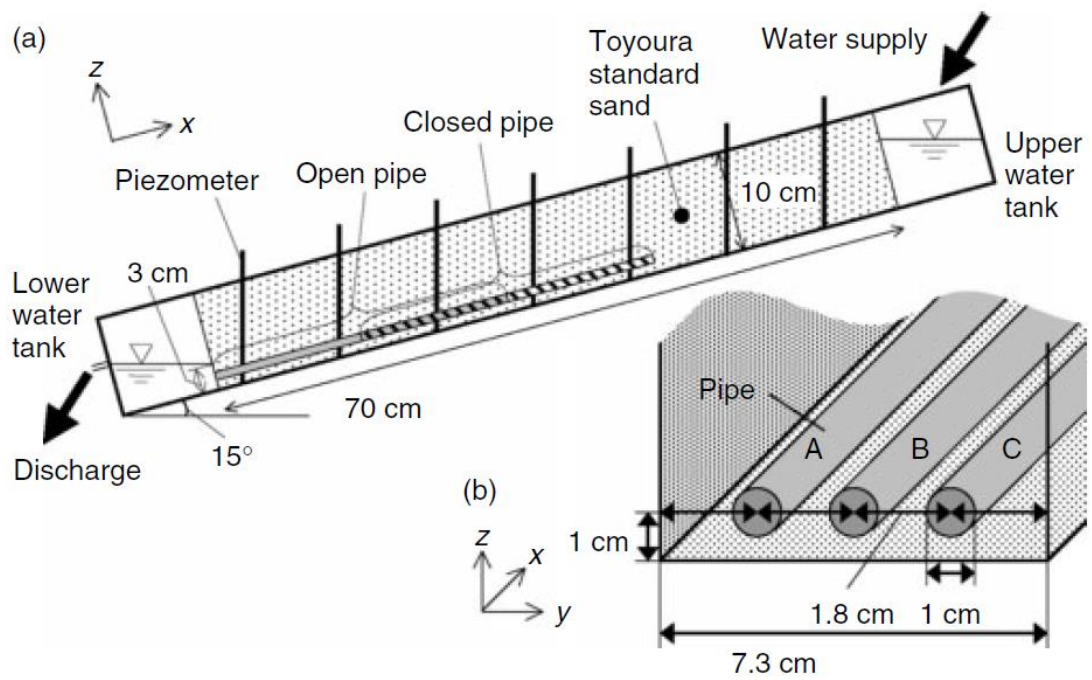


図 2-7 土壌パイプの作用を調べる室内実験の一例(Kosugi et al., 2004).

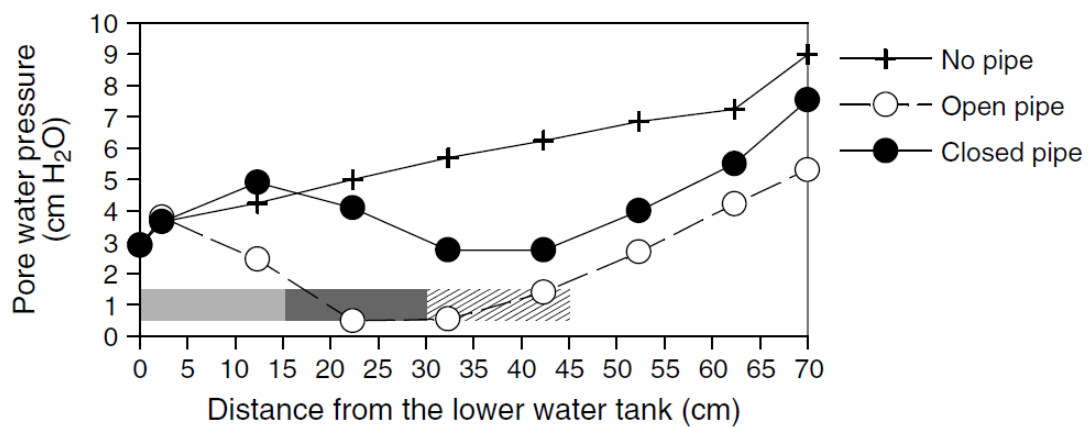


図 2-8 定常状態の地下水面と土壌パイプの影響(Kosugi et al., 2004).

2.3.2 土壌パイプ流のモデル化

土壌パイプ流のモデル化は主として 2 通りの手法が用いられる。ひとつは土壌パイプ内の流れを個別にモデル化する方法である。Jones (2002)は詳細な水文観測がなされた土壌パイプに対して、パイプ内を開水路流としてパイプ内外の水位に応じた周囲土壌からの滲出量、パイプの上流側流域からパイプへの水の流入、パイプ内部の開水路流れ等をそれぞれ計算するモデルを構築し、キャリブレーションを行った上で降雨イベント時の流出をよく再現することを示した。堤ら(2005)はパイプ内の流れが流量に応じて円管流と開水路流の両方の形式を持つとして Manning 式で表現し、周囲の土壌との水の出入りによって水面を決定し、パイプ内部の流れを計算するモデルを構築し、室内実験の定常地下水面をよく再現することを示した。このようなパイプ内部の流れを個別に計算する手法は、内部の流れが重要な侵食現象や溶質異動などを考える上ではじゅうようであるものの、土壌パイプの形態情報や現地水文観測によるデータの蓄積が必要で、多くの斜面では土壌パイプの形状や分布が得られない現状では、実用上問題になる点もある。

一方、土壌パイプが存在する深さの土壌を透水性の高い多孔質体として扱い、斜面の地中流を 2 次元の Richards 式によって表現する試みもなされている (Kosugi et al., 2004; Wilson and Fox, 2013)。高透水性の層がもつ水移動パラメータはフィッティングによって実験の定常状態の地下水面をよく再現するように与えられ、数値実験によって土壌パイプ長や土中のパイプ閉塞位置が斜面の水移動に与える影響 (Kosugi et al., 2004)、パイプ閉塞時の土壌水圧分布の瞬間的な変化 (Wilson and Fox, 2013) が検討されている。しかしながら、Richards 式は円管層流に基づいた理論体系である。開水路流で流れていることも多い土壌パイプ内部の流れを多孔質体、特に 2 次元土槽として近似する場合、内部の流れ状態は同一のものとはならない。Wilson and Fox (2013)の数値実験ではパイプ閉塞の瞬間に閉塞地点の土壌水圧が 50 mH₂O まで増加するという、著者自身が指摘してはいるものの、非現実的な結果になってしまう恐れもある。

2.3.3 室内実験、数値解析の課題

既往の室内実験についても課題は残っている。そのひとつは室内実験において測定しているのはあくまで土壌パイプの外側であるという点である。土壌パイプが斜面の水移動に与える影響は、パイプ周囲の土壌に設置したテンシオメータにより土壌の水圧によって評価されたものであって、土壌パイプ内部の流れを直接測定していない。既往の研究が明らかにした土壌パイプの役割はあくまで周囲の応答から読み取ったものということである。そのため、パイプ内部の流れが開水路流なのか管流なのか、パイプ内水位はどの程度か、パイプ全体のど

の部分に流れが形成されているかなどといったパイプ内部の流れの詳細は現時点ではわかっていない。

2点目は、斜面水移動に関する室内実験の多くは定常状態の地下水面や侵食量(パイプ形状が変化するため準定常状態)について検討しており、流出応答のような斜面の動的な反応に土壌パイプが及ぼす影響に関する検討は少ない。斜面崩壊を扱った多田ら(2002)や Sharma (2015)が斜面崩壊までの斜面の地下水面、土壌水圧等の変化を検討しているが、彼らの実験結果は土壌パイプの有無の条件が影響を及ぼさないであろう鉛直浸潤の部分においても違いがみられており、崩壊タイミングやそれまでの斜面の土壌水圧分布の変化に土壌パイプが何処まで説明因子となっているかは解釈が難しい。断続的な降雨を与えた Wilson (2009)では、土壌パイプ内部の流れは斜面上流端の境界によってほぼ決定されて周囲の土壌との相互作用がみられないため、この結果をもとに降雨中の土壌パイプの流れを検討することは出来ない。

このような実験場の課題はモデル化に際しても影響を及ぼす。堤ら(2005)のようなパイプ内部の流れを表現する詳細なモデル化を行おうとしても、パイプ内部の流れ状態をみた観測データが現状存在しないため、モデルで計算されたパイプ内部の流れが斜面に実際に生じていた流れを再現していたかは保証されていない。Richards 式を用いた近似にしても、定常状態の地下水面は再現するとして、フラックスと実流速の関係をどのように得るかはパイプ内部の流れ状態を理解しなければ困難である。これは内部侵食現象を扱う上ではパイプ壁面の流速および潤辺を考慮しなければならないため大きな問題となる。また、時間変化のデータがなければRichards 式によるパイプ流の近似が定常状態にのみ有効であるのか、降水量変化に対する動的な斜面の水分状態の変化まで対応しているのか、といった適用限界について考えることが出来ない状態にある。

2.4 既往の土壌パイプ研究の課題と本研究のアプローチ

フィールドにおける土壌パイプ研究のネックは斜面内部の土壌パイプ内部の流れを直接観測し把握できない点にあり、それが末端の流出観測結果の解釈や、逆に流出観測から斜面の状態を予測することを難しくしている。これを解決するために土壌パイプを埋設した人工斜面を用いた実験やその数値解析によって内部の土壌パイプの働きを明らかにする試みが行われてきたが、それらの実験でも土壌パイプの内部の流れ状態を直接観測したものは見られない。そのため、本研究においては土壌パイプ内部の流れを“可視化”することをひとつの目的とし、これにより土壌パイプが斜面の降雨流出に与える影響を明らかにすることを試みた。

3章 土壌パイプ内部の流れ状態を明らかにするための横流入実験

本章の内容は、学術雑誌論文として掲載される可能性があるため公表できない。5年以内に出版予定である

4章 降雨下において土壌パイプが斜面水移動に与える影響の実験的検討

本章の内容は、学術雑誌論文として掲載される可能性があるため公表できない。5年以内に出版予定である

5章 数値実験による土壌パイプへの空気封入に影響を与える因子抽出の試み

本章の内容は、学術雑誌論文として掲載される可能性があるため公表できない。5年以内に出版予定である。

6章 総合考察

本章の内容は、学術雑誌論文として掲載される可能性があるため公表できない。5年以内に出版予定である。

7章 結論

本研究は斜面に形成される土壌パイプが斜面の水移動，および流出現象に与える影響について扱ってきた．1章においては土壌パイプが存在する斜面流域の研究の必要性と現在精力的に行われる不均一性の影響を取り上げ，土壌パイプ研究の位置づけについて述べた．2章において行った既往のレビューでは土壌パイプに関する研究がフィールド，室内実験の双方で精力的に行われ，斜面からの水・物質の流出に対して大きな影響を及ぼすことが指摘されていることを示した．また，土壌パイプ研究の課題として，パイプ内部の観測が難しくパイプ内部で生じる流れの実態を観測する研究の不足によって，多くが入出力解析となっているフィールド試験結果の解釈が難しくなっていること，室内実験においても結果の解釈やその後のモデル化の取り組みに対して障壁となっていることを示した．

3章では，レビューから得られた課題を解決するために閉鎖土壌パイプ内部の水・空気の動態を直接測定することによって土槽内における土壌パイプ流の働きを調べる実験を行った．土壌パイプとしてアクリル管を用いた人工土壌パイプを作成し，センサーを取り付けることで内部の水流の有無および空気圧の測定を可能とした．給水はフィールド試験，室内実験でしばしば用いられる上流側からの一方的な給水法(横流入実験)を課し，土壌パイプ内部の通気性の有無，給水流量の大小の影響を調べた．その結果，土壌パイプの内部に水が侵入しパイプ流の通水機能が発揮されるためには，従来から指摘されていたパイプ周囲の土壌が飽和するだけでは充分ではなく，同時に閉鎖土壌パイプ内部の空気がパイプ外部に移動できる状態であることが必要であることが示され，これが満たされない場合には内部に封入された空気によって水の侵入が阻害された．この土壌パイプへの空気封入現象は，土壌パイプ周囲の土壌の水分条件および横流入条件下の水移動の特徴から，土壌マトリクス部分の通気性によって制御されていることが明らかとなった．また，土壌パイプ内部に封入された空気の圧力や噴出の可能性についても検討し，既往の研究が示した封入空気の性質と実験データが良く一致することも示した．

4章では，実際に斜面に与えられる降雨条件下において3章と同様の閉鎖土壌パイプへの空気封入現象がどのような条件下で生じるのかについて検討すると共に，通常時には空気封入が生じない開放土壌パイプについてパイプ出口閉塞時の斜面の挙動と空気現象のかかわりについて検討を行った．その結果として，降雨条件下でも空気封入現象によって土壌パイプ流の発生および内部の通水量が制限を受けることを明らかにし，空気封入現象が特定の給水条件下に生じる特殊な現象ではないことを示した．開放土壌パイプにおいても出口が閉塞

した際にはパイプ内外の空気の連続性の有無によって閉塞パイプ内部の水流の変化に大きく影響し、結果として土槽全体の土壌水圧分布が影響を受けることを示した。

5章では、4章で行った降雨実験を Richards 式に基づいた土中水移動の数値解析によって再現することで室内実験の妥当性を検証すると共に、数値実験によって土壌パイプ流の発生にとって有利な条件の探索を行った。再現性の確認では、実測の水分特性曲線から得た水分特性パラメータ、および試行錯誤によって得た透水性パラメータを用いて、同一のパラメータセットによって複数の実験結果が概ね再現でき、Richards 式によって土中の水移動と土壌パイプへの空気封入現象を説明できることを示した。数値実験においては降雨実験では降雨強度の減少、斜面勾配の増加によって空気封入が発生しにくくなってパイプ流の発生が妨げられにくくなることが示された。この結果は、室内実験の結果とも整合的であった。

6章では、土壌パイプ流と空気封入現象に対する影響が水供給条件によって異なる点、およびここから導かれる横流入実験の利用法について考察を行った。降雨条件下と横流入条件下では土中の水移動特性が異なるため、①水供給速度(降雨強度、もしくは上端の流入流量)の大小に対する応答が異なること、②土壌パイプ流の発生地点および空気封入が生じる地点がそれぞれ逆になっていることの2点から降雨条件と横流入条件が斜面に異なるパイプ流特性を生じさせる可能性を指摘した。これを受けて、横流入条件を利用した土壌パイプ特性の推定法について検討を行った。

本研究は、詳細な室内実験を通して土壌パイプ内外に生じる水移動の実態を明らかにすることを試みたもので、その課程において土壌パイプへの空気封入現象を初めて観測すると共に、内部のパイプ流の観測と合わせることによって土壌パイプ流の発生、内部の流れの大小に対する空気封入の影響に加えて、空気封入現象のメカニズムと制御要因を既往の知見と合わせて明らかにした。

今後の課題について、土壌パイプへの空気封入現象はその存在自体がほとんど認知されていない。実際の斜面に存在する土壌パイプにおいて空気封入現象は未だ確認されておらず、フィールドにおいて直接観測による証拠を得ることは今後の重要な課題のひとつである。また、空気封入現象には土壌パイプと大気の連続性の有無が重要であるが、土壌パイプの形態学的な調査は土壌パイプ間の横のつながりに着目しており、大気との連続性について知見を得ていく必要がある。室内実験の側では様々な実験条件による検証が必要であり、特に土壌の影響、および複数の土壌パイプがネットワークを構築した際の相互作用の影響を明らかにする必要があると考える。今後、自然斜面の土壌パイプ研究だけでなく、暗渠排水のような人工物の水理解析等応用が広げられることを目指したい。

参考文献

- Ali GA, CL Heureux, AG Roy, M-C Turmel and F Courchesne. 2011. Linking spatial patterns of perched groundwater storage and stormflow generation processes in a headwater forested catchment. *Hydrological Processes* **25**: 3843-3857
- Anderson AE, M Weiler, Y Alila and RO Hudson. 2009a. Dye staining and excavation of a lateral preferential flow network. *Hydrology and Earth System Sciences* **13**: 935-944
- Anderson AE, M Weiler, Y Alila and RO Hudson. 2009b. Subsurface flow velocities in a hillslope with lateral preferential flow. *Water Resources Research* **45**: W11407
- Baillie IC. 1975. Piping as an erosion process in the uplands of Sarawak. *Journal of Tropical Geography* **41**: 9-15
- Beven K and P Germann. 1982. Macropores and water flow in soils. *Water Resources Research* **18**(5): 1311-1325
- Chapell NA. 2010. Soil pipe distribution and hydrological functioning within the humid tropics: a synthesis. *Hydrological Processes* **24**: 1567-1581
- Corey SK and M-k Woo. 2002. Hydrogeomorphic relations among soil pipes, flow pathways, and soil detachments within a permafrost hillslope. *Physical Geography* **23**: 95-114
- Detty JM and KJ McGuire. 2010. Threshold changes in storm runoff generation at a till-mantled headwater catchment. *Water Resources Research* **46**: W07525
- Fujimoto M, N Ohte and M Tani. Effects of hillslope topography on hydrological responses in a weathered granite mountain, Japan: comparison of the runoff response between the valley-head and the side slope. *Hydrological Processes* **22**: 2581-2594
- Graham CB, RA Woods and JJ McDonnell. 2010. Hillslope threshold response to rainfall: (1) A field based forensic approach. *Journal of Hydrology* **393**: 65-76
- Grayson RB, AW Western, FHS Chiew and G Bloeschl. 1997. Preferred states in spatial soil moisture patterns: Local and nonlocal controls. *Water Resources Research* **33**(12): 2897-2908
- Hassnizadeh SM, MA Celia and HK Dahle. 2002. Dynamic effect in the capillary pressure-saturation relationship and its impacts on unsaturated

- flow. *Vadose Zone Journal* **1**: 38-57
- Holden J and TP Burt. 2002. Piping and pipeflow in a deep peat catchment. *Catena* **48**: 163-199
- Holden J. 2004. Hydrological connectivity of soil pipes determined by ground-penetrating radar tracer detection. *Earth Surface Processes and Landforms* **29**: 437-442
- Holden J, RP Smart, PJ Chapman and AJ Baird and MF Billett. 2009. The role of natural soil pipes in water and carbon transfer in and from peatlands. In *Carbon Cycling in Northern Peatlands*. American Geographical Union. 251-264
- Horton RE. 1993. The role of infiltration in the hydrologic cycle. *American Geographical Union, Transaction* **14**: 446-460.
- IPCC. 2014. 気候変動 2014 統合報告書, 政策決定者向け要約
- Jones JAA. 1982. Experimental studies of pipe hydrology. In *Badlands Geomorphology and Piping*, Bryan RB, Yair A (eds). GeoBooks: Norwich; 355–370
- Jones JAA and LJ Connelly. 2002. A semi-distributed simulation model for natural pipeflow. *Journal of Hydrology* **262**: 28-49
- Jones JAA. 2010. Soil piping and catchment response. *Hydrological Processes* **24**: 1548-1566
- Kosugi K, T Uchida and T Mizuyama. 2004. Numerical calculation of soil pipe flow and its effect on water dynamics in a slope. *Hydrological Processes* **18**: 777-789
- Lehmann P, C Hinzm G McGrath, HJT van Meerveld and JJ McDonnell. 2007. Rainfall threshold for hillslope outflow: and emergent property of flow pathway connectivity. *Hydrology and Earth System Science* **11**: 1047-1063
- Leslie IN and R Heinse. 2013. Characterizing soil–pipe networks with pseudo-three-dimensional resistivity tomography on forested hillslopes with restrictive horizons. *Vadose Zone Journal* **12**(4)
DOI:10.2136/vzj2012.0200
- Leslie IN, R Heinse, AMS Smith and PA McDaniel. 2014. Root decay and fire affect soil pipe formation and morphology in forested hillslopes with restrictive horizons. *Soil Science Society of America Journal* **78**: 1448-1457
- Liang W-L, K Kosugi and T Mizuyama. 2007. Heterogeneous soil water

- dynamics around a tree growing on a steep hillslope. *Vadose Zone Journal* **6**: 879-889
- Lin H and X Thou. 2008. Evidence of subsurface preferential flow using soil hydrologic monitoring in the Shale Hills catchment. *European Journal of Soil Science* **59**: 34-49
- Linden DR and RM Dixon. 1975. Water table position as affected by soil air pressure. *Water Resources Research* **11**(1): 139-143
- Locus A and MC Quick. 1993. Hydrologic behavior off a mountainous watershed. *Canadian Journal of Civil Engineering* **20**: 1-8
- McDonnell JJ. 1990. The influence of macropores on debris flow initiation. *Quarterly Journal of Engineering Geology, London* **23**: 325-331
- McGlynn BL, JJ McDonnell and DD Brammer. 2002. A review of the evolving perceptual model of hillslope flowpaths at the Maimai catchments, New Zealand. *Journal of Hydrology* **257**: 1-26
- Midgley TL, GA Fox, GV Wilson, RM Felice and DM Heeren. 2013. In situ soil pipeflow experiments on contrasting streambank soils. *Transactions of the ASABE* **56**(2): 479-488
- Montgomery DR and WE Dietrich. 2002. Runoff generation in a steep, soil-mantled landscape. *Water Resources Research* **38**(9): 1168
- Nieber JL and RC Sidle. 2010. How do disconnected macropores in sloping soils facilitate preferential flow?. *Hydrological Processes* **24**: 1582-1594
- Noguchi S, Y Tsuboyama, RC Sidle and I Hosoda. 1999. Morphological characteristics of macropores and the distribution of preferential flow pathways in a forested slope segment. *Soil Science Society of America Journal* **63**: 1413-1423
- Pierson TC. 1983. Soil pipes and slope stability. *Quarterly Journal of Engineering Geology, London*. **16**(1): 1-11
- Rahardjo H, TT Lee, EC Leong and RB Rezaur. 2005. Response of a residual soil slope to rainfall. *Canadian Geotechnical Journal* **42**: 340-351
- Sakaguchi A, T Nishimura and M Kato. 2005. The effect of entrapped air on the quasi-saturated soil hydraulic conductivity and comparison with the unsaturated hydraulic conductivity. *Vadose Zone Journal* **4**(1): 139-144
- Seibert J, K Bishop, A Rodhe and JJ McDonnell. 2003. Groundwater dynamics along a hillslope: A test of the steady state hypothesis. *Water Resources Research* **39**(1): 1014
- Sharma RH. 2015. Laboratory experiments on the influence of soil pipes on

- slope failure. *Landslides* **12**(2): 345-353
- Sidle RC, H Kitahara, T Terajima and Y Nakai. 1995. Experimental studies on the effects of pipeflow on throughflow partitioning. *Journal of Hydrology* **165**: 207-219
- Simunek J, M. Sejna and MTh van Genuchten. 1999. The Hydrus-2D software package for simulating two-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media, Version 2.0, *IGWMC - TPS - 53*, International Ground Water Modeling Center, Colorado School of Mines, Golden, Colorado, 251
- Sklash MG and RM Farvolden. 1979. The role of groundwater in storm runoff. *Journal of Hydrology* **43**: 45-65
- Sklash MG, KJ Beven, K Gilman and WG Darling. 1996. Isotope studies of pipeflow at Plynlimon, Wales, UK. *Hydrological Processes* **10**: 921-944
- Smart RP, J Holden, KJ Dinsmore, AJ Baird, MF Billett, PJ Chapman and R Grayson. The dynamics of natural pipe hydrological behavior in blanket peat. *Hydrological Processes* **27**: 1523-1534
- Stonestrom DA and J Rubin. 1989. Air permeability and trapped-air content in two soils. *Water Resources Research* **25**(9): 1959-1969
- Terajima T, T Sakamoto and T Shirai. 2000. Morphology, structure and flow phases in soil pipes developing in forested hillslopes underlain by a Quaternary sand-gravel formation, Hokkaido, northern main island in Japan. *Hydrological Processes* **14**: 713-726
- Uchida T, K Kosugi and T Mizuyama. 1999. Runoff characteristics of pipeflow and effects of pipeflow on rainfall-runoff phenomena in a mountainous watershed. *Journal of Hydrology* **222**: 18-36
- Uchida T, K Kosugi and T Mizuyama. 2001. Effects of pipeflow on hydrological process and its relation to landslide: a review of pipeflow studies in forested headwater catchments. *Hydrological Processes* **15**: 2151-2174
- Uchida T, Y Asano, T Mituyama, JJ McDonnell. 2004. Role of upslope soil pore pressure on lateral subsurface storm flow dynamics. *Water Resources Research* **40**: W12401
- Uchida T, van Meerveld HJT, and JJ McDonnell. 2005. The role of lateral pipe flow in hillslope runoff response: an intercomparison of non-linear hillslope response. *Journal of Hydrology* **311**: 117-133
- van Meerveld HJT and JJ McDonnell. 2006. Threshold relations in subsurface stormflow: 2. The fill and spill hypothesis. *Water Resources*

Research **42** W02411

- Verachtert E, W Maetens, MVD Eeckhaut, J Poesen and J Deckers. 2011. Soil loss rates due to piping erosion. *Earth Surface Processes and Landforms* **36**: 1715-1725
- Wang Z, J Feyen, MT van Genuchten, DR Nielsen. 1998. Air entrapment effects on infiltration rate and flow instability. *Water Resources Research* **34**(2): 213-222
- Wienhöfer J and E Zehe. 2014. Predicting subsurface stormflow response of a forested hillslope – the role of connected flow paths. *Hydrology and Earth System Sciences* **18**: 121-138
- Wilson GV. 2009. Mechanisms of ephemeral gully erosion caused by constant flow through a continuous soil-pipe. *Earth Surface Processes and Landforms* **34**: 1858-1866
- Wilson GV. 2011. Understanding soil-pipe flow and its role in ephemeral gully erosion. *Hydrological processes* **25**: 2354-2364
- Wilson GV and GA Fox. 2013. Pore-water pressures associated with clogging of soil pipes: numerical analysis and laboratory experiments. *Soil Science Society of America Journal* **77**(4): 1168-1181
- Wilson GV, JR Rigby, M Ursic and SM Dabney. 2015. Soil pipe flow tracer experiments: 1. Connectivity and transport characteristics. *Hydrological Processes* DOI: 10.1002/hyp.10713
- 内田太郎, 小杉賢一朗, 大手信人, 水山高久. 1995. 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検討. *日本森林学会誌* **106**: 505-508
- 勝山正則, 大手信人, 内田太郎, 浅野友子, 木本秋津. 2000. 降雨流出過程の相違が渓流水質形成機構に与える影響. *水文・水資源学会誌* **13**(3): 227-239
- 神谷浩二, R Bakrie, 本城勇介. 2006. 保水性を制御した不飽和土の透気係数の測定. *土木学会論文集C* **62**(3): 679-688
- 北原曜. 1994. 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**: 63-115
- 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**(5): 315-4322
- 多田泰之, 奥村武信, 久保田哲也. 2002. パイプの存在が斜面崩壊に与える影響の実験的検討. *砂防学会誌* **55**(3): 12-20
- 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): 1-19
- 谷誠. 2013. 洪水流出のモデル化を圧力伝播の観点から捉え直す. *水文・水資源*

学会誌 **26(5)**: 245-257

堤大三, 宮寄俊彦, 藤田正治, RC Sidle. 2005. パイプ流に関する数値計算モデルと人工斜面実験による検証. *砂防学会誌* **58(1)**: 20-30

文部科学省, 気象庁, 環境省. 2013. 気候変動の観測・予測及び影響評価統合レポート『日本の気候変動とその影響』.

安池慎治. 1996. 土壌中のマクロポアと間隙空気圧の影響を考慮した降雨浸透実験と数値解析. *地理学評論* **69A(10)**: 832-846