

閉鎖土壌パイプ内に流れが生じるための降雨強度条件 Requirements of rainfall intensity to initiate water flow in a closed soil pipe

○山崎琢平 井本博美 濱本昌一郎 西村拓

○Yamasaki Takuhei, Imoto Hiromi, Hamamoto Shoichiro and Nishimura Taku

1. はじめに 土壌には動植物の活動や内部侵食等によって土壌パイプが不規則に形成され、土中の水・物質移動に大きな影響を及ぼしている。土壌パイプは、末端が地表面に露出しているかどうかによって開放土壌パイプと閉鎖土壌パイプに分かれる。このうち、非破壊で位置が特定できるのは開放土壌パイプだけであるため、パイプ内部の流れを直接観測する試みは開放土壌パイプでしか行われていない(Terajima *et al.*, 2000)。閉鎖土壌パイプは斜面の土壌パイプネットワークの大部分を構成し、降雨流出において重要な役割を果たすことが示唆されているが(Leslie *et al.*, 2014; Anderson *et al.*, 2009)、パイプ内部の流れは依然明らかになっていない。実験条件を制御できる室内要素実験においてもパイプ周囲の土壌水圧の測定から土壌パイプの機能を評価するに留まっている。閉鎖土壌パイプ内部の流れ状態を把握することは斜面の流出観測、室内実験の評価や数値モデル化の際に重要である。

昨年の大会講演会において、閉鎖土壌パイプ内部の空気が外部から孤立することによって、パイプ内部への水の侵入が阻害されることを報告した。土壌空気の移動は土壌水の移動と密接な関係があり、また土壌水の移動は降雨強度により制御されることから、降雨強度の大小に応じて土壌パイプ流の発生が決まると予想される。そこで本研究では、閉鎖土壌パイプにおいて降雨下のパイプ内部の水、空気の状態を把握すると共にパイプ流が発生するための降雨強度条件を明らかにすることを目的とした。

2. 実験条件 実験装置は長さ 60 cm、高さ 35 cm、幅 4 cm のアクリル槽を用い、傾斜角は 10° とした(図 1)。下流端には底面から 5 cm 高さまで流出口を設け、その上部は土壌空気と大気との連続性を保つために 3 cm 間隔で穴を空け、ナイロンメッシュで覆った。

土壌パイプは内径 7 mm、外径 10 mm、長さ 40 cm のアクリル製パイプとした。側面には直径 3 mm の穴を $1.3 \text{ holes cm}^{-2}$ の密度で開け、その周りをナイロンメッシュで覆った。土壌パイプにはパイプ内部の水の有無を探知するために、上端、中央、下端の三箇所に電極を設置した。また、上流端に空気圧測定用の PVC チューブを接続し、パイプ内部の空気圧を測定した。

試料は豊浦砂を用いた。含水比 3 % に調整した後、乾燥密度 1.43 g cm^{-3} で 30 cm 高さまで充填した。土壌パイプは底面から 2.5 cm 高さ、土槽の中央に設置した。試料の充填後、一定強度の降雨を土槽が定常状態に達するまで与えた。降雨強度は 40, 50, 60 mm h^{-1} とした。定常状態に達したことを確認した後、PVC チューブを介して土壌パイプ内の空気を大気に開放した。実験中は土槽内 12 点の土壌水圧、土槽下端からの流出量、パイプ内空気圧、およびパイプ内の電極電圧を測定した。

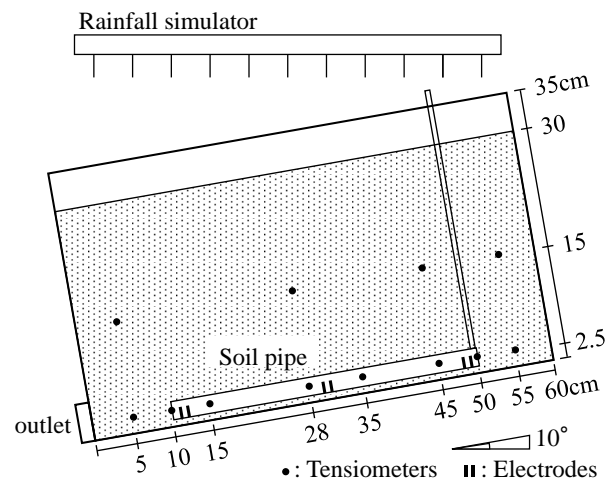


図 1 Experimental setup

3. 結果と考察 図2に降雨強度 60 mm h^{-1} におけるパイプ無し, 有りの土槽の定常状態の地下水面を, 図3に 60 mm h^{-1} パイプ有り実験のパイプ周囲の土壌水圧(下流端から 10, 35, 50 cm), パイプ内空気圧およびパイプ内の電極応答の経時変化を示す. 電極の値は絶縁時に 0.5 をとり, 通電により上昇する.

大気開放前の定常状態では, どの降雨強度でも土壌パイプ有りの土槽はパイプ無しの土槽と同様の形状の地下水面を形成した. パイプ内の電極が応答しなかったことから, 今回の実験条件ではパイプ内の空気を大気開放する前には閉鎖土壌パイプ内には流れが生じなかった.

ここで定常状態までのパイプ内空気圧変化をみると, パイプ周囲全地点の土壌水圧が負圧の段階で空気圧の上昇が始まった. 上昇を開始した水圧の最小値は, 60 mm h^{-1} では $-20 \text{ cmH}_2\text{O}$ であった. この空気圧の上昇はパイプ内部の空気が外気から孤立したことを表す. このパイプ内に孤立した空気が, 周囲の土壌が飽和したあとも水の侵入を阻害し, パイプ流を発生させなかったと考えられる. 空気圧はパイプ周囲の土壌が不飽和のときはわずかに正圧であったが, パイプ下端の土壌水圧が正になった後は水圧の増加に合わせて大きく変化した. これは飽和した土壌から水が侵入しようとする圧力が働き, 侵入を阻む空気圧が平衡するためである.

パイプ内の空気を大気開放した後は, 土壌水圧および電極電圧が即座に変化し, パイプ流が始まったことが確認された. パイプ流発生により, 下流端から 15 cm 以降の地下水位が低下した. 一方, パイプ下端ではほぼ水位が変化しなかった. 既往の研究(内田ら, 2005)では, 閉鎖土壌パイプの末端は水の集中による水位上昇が生じていたが, 今回の実験ではそのような傾向はほぼみられなかった.

4. まとめ 今回の実験条件ではパイプ下端に水が侵入する前にパイプ内の空気が孤立し, その空気によってパイプ流の発生が阻害された. そのためパイプ内の空気を外気と連結することでパイプ流が発生し水位が低下した. 通気性が失われる土壌水圧が $-10 \text{ cmH}_2\text{O}$ 程度であるため, 静水圧分布から概算するとパイプ上下端には最低 10 cm の高低差が必要であると予想される. 今後, 斜面の勾配等の条件を変えた実験を行い, パイプ流の発生に関係する要因を抽出する.

謝辞 この研究は JSPS 科研費(15H02467)の助成を受けたものです. ここに記して謝意を表します.

参考文献 Terajima et al., 2000, *Hydrological Processes* 14: 713-726; Leslie et al., 2014, *Soil Science Society of America Journal* 78: 1448-1457; Anderson et al., 2009, *Hydrology and Earth System Sciences* 13: 935-944; 内田ら, 1995, 日林論 106, 505-508

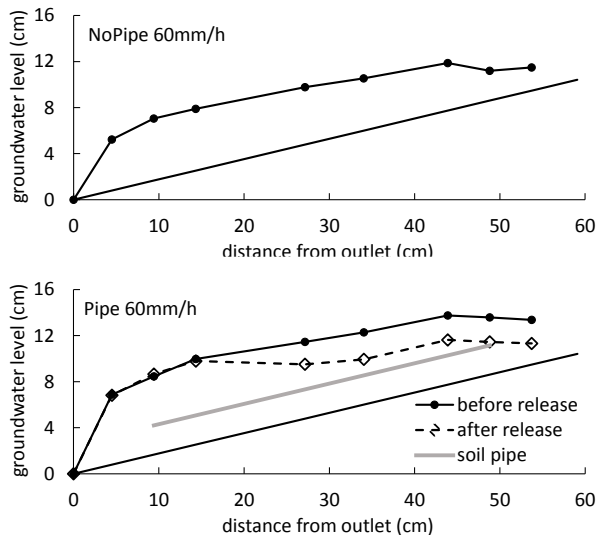


図2 steady-state groundwater table

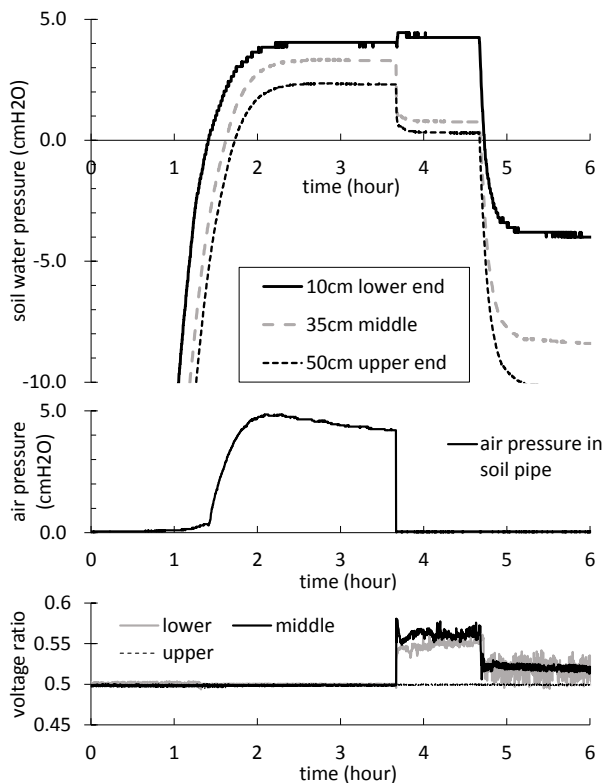


図3 Changes in soil water pressure, air pressure and electrode response