

中間流および地表流の発生における表層土壌の役割

Role of a Surface Soil Layer on the Generation of Interflow and Overland Flow

東京工業大学工学部 正 員 日 野 幹 雄

東京工業大学工学部 正 員 灘 岡 和 夫

東京工業大学大学院 学生員 ○尾 高 義 夫

1. はじめに

著者らは先に、植生がある場合には表層土壌が透水性の高さと保水性の高さを兼ね備えており、雨水の損失・流出の遅れに大きな影響を及ぼすことを明らかにした。^{1) 2)} 一般に、このような表層土壌の下部には透水性の低い土壌が存在している。表層土壌内を浸透した雨水は、この透水性の低い下層土壌との境界面上に滞留し、表層土壌下部には浸透水が保留される。その結果、自由水面が形成され、重力水となって山腹表層に沿っての側方浸透流、つまり中間流が発生するといわれている。³⁾ またこのような中間流は、洪水ハイドログラフの形成に密接な関連を有するとされている。しかしながら、その中間流の発生については、いくつかの屋外測定がなされてはいるものの、必ずしも十分にその機構が解明されているとは言い難い。そこで本研究では、透水性の異なる土壌を二層に詰めたライシメーターを用いて降雨実験を行い、流出量及び土中の水分量の変化を詳細に測定することによって、中間流出の発生過程における表層土壌の役割について具体的に検討した。⁴⁾

2 実験装置及び測定方法

実験に用いたライシメーターの概略を図 1 に示す。

ライシメーターの下層には飽和透水係数が 6.2 mm/hr の関東ローム土（空隙率 0.789）を、また上層には飽和透水係数が $7,000 \text{ mm/hr}$ と下層より3オーダー大きい赤玉土（関東ローム土の一種、空隙率 0.830、中央粒径 2.0 mm ）を、それぞれ 35 cm の厚さで詰めた。ライシメーターには図に示す位置に流出口が設けられており、それぞれの位置での流出量を測定できるようになっている。土中の水分量を直接モニターすることは難しいので、ここではサクション値を測定し、それによって土

中水分量の分布状態を推定することにした。具体的には、図 1 中に示す 6 地点にテンシオメーターを設置して、サクシオン値の鉛直分布を適当な時間間隔で測定した。降雨としては、自然降雨だけでなく、降雨装置を用いて一定強度の人工降雨を与えることができたようにした。

3 鉛直一次元排水実験

降雨実験を始める前に、ライシメーターの土壌の特性を具体的に把握しておく必要がある。そこで、赤玉土及び関東ローム土の水分移動特性を検討するための鉛直一次元排水実験を行った。

(1) 実験方法

図2に示す円筒容器に、赤玉土と関東ローム土をそれぞれ詰め、異なる

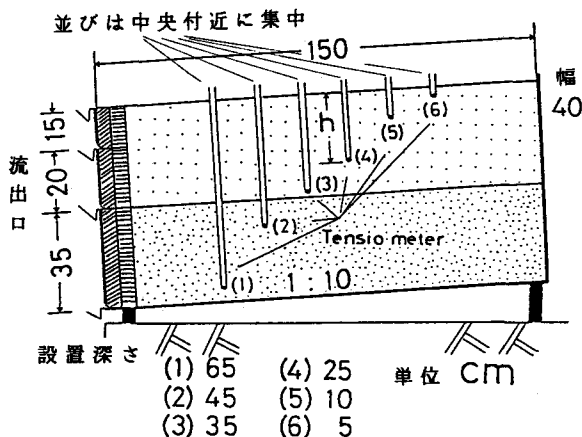


図1 ライシメーター

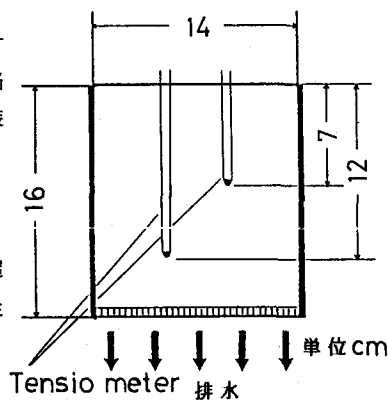


図2 排水実験装置

る深さの2地点にテンシオメーターを設置した。実験は土壌をいったん飽和させた後排水させ、排水量とサクシオン値の時間変化を測定した。実験においては、蒸発を抑えるために容器の上端をビニールで覆った。

(2) 実験結果

排水がほぼ完全に終了するまで、赤玉土は約10分(排水量; 600ml)、関東ローム土は約90分(排水量; 250ml)かかった。これは、赤玉土が関東ローム土に比べて透水性が高いことを示している。一方、図3には赤玉土と関東ローム土のサクシオン値の時間変化が示されているが、これを見ると、排水過程を通じてサクシオン値は、関東ローム土に比べて赤玉土の方が低くなっている。すなわち赤玉土は関東ローム土に比べて保水性が高いことがわかる。

これらのことから、ここで使用した上層の赤玉土は植生がある場合の表層土壌と同様に、透水性の高さと保水性の高さを兼ね備えていることがわかる。

4. 自然降雨に対する水分移動特性

まず最初に、自然降雨の場合の実験結果について述べる。実験は降雨の少ない秋の10日程の間に行ったものである。

(1) 降雨-流出関係

図4には、観測期間中の降雨と流出量の時間変化が示されている。降雨期間中のどのような降雨に対しても表面流出は発生せず、雨水は全て土壌に浸透した。流出は最下端からのみ起こり、中間流出も発生しなかった。

(2) サクシオン値の時間変化

図5には、等サクシオン線図が深さ-時間面に示されている。降雨により生じた湿潤領域が急速にライシメーターの下部にあった湿潤領域と結合し、流出が始まっている。一方、降雨終了時からの重力排水及び乾燥過程において、pF 1.5以下の湿潤領域は、下層の関東ローム土の上部から消滅するが、上層の赤玉土の下部には0.5~1日残存している。これは、赤玉土が関東ローム土に比べて保水性が高いことによって生じるものである。

5. 高強度の人工降雨に対する水分移動特性

降雨装置を用いて、降雨強度 $r = 178 \text{ mm/hr}$ 、継続時間3時間の人工降雨を与え、高強度の降雨に対する

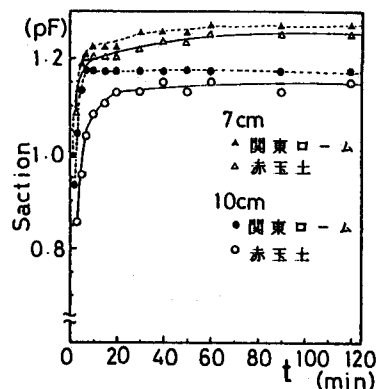


図3 サクシオン値の時間変化

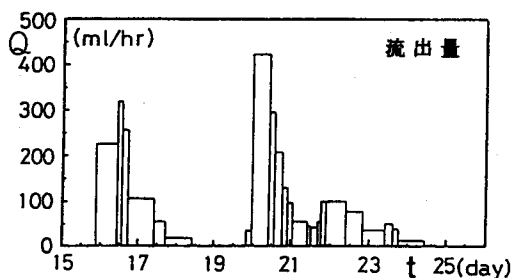
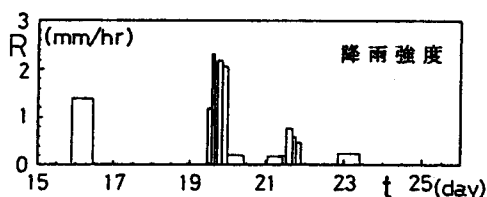


図4 降雨-流出の時間変化(自然降雨)

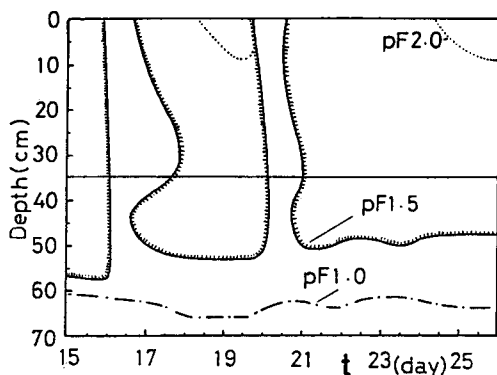


図5 等サクシオン線図(自然降雨)

土壌内の水分移動特性を検討する。

(1) 中間流の発生

図6には、各深さごとの流出量の時間変化が示されている。降雨強度 $r = 178 \text{ mm/hr}$ という高強度の降雨に対しては、前項の場合と異なって、上層と下層との境界面の流出口からの中間流出、及び最下端からの流出が発生している。降雨停止後、最下端からの流出は長い遅延部を示しているが、中間流出は急減している。この中間流出の急減は、上層の赤玉土が透水性が高いことによって起きている。

(2) サクション値の時間変化

図7には、等サクション線図が深さ-時間面に示されている。前項における自然降雨ではほとんど変動しなかった $pF 1.0$ 以下の非常に湿潤した領域が断面全体に拡がり、中間流出が始まっている。また中間流出発生時には、上層の赤玉土下部に飽和領域（図7のアミの部分）、すなわち自由水面が生じている。上層の赤玉土の下部には、前項で述べたような、重力排水及び乾燥過程において、 $pF 1.5$ 以下の湿潤領域が残存する現象が明瞭に現われている。この湿潤領域の水分は徐々に下層の関東ローム土に浸透し、湿潤領域は1日程で消滅している。

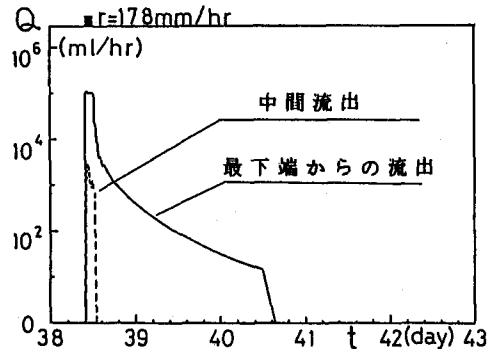


図6 流出量の時間変化（高強度の人工降雨）

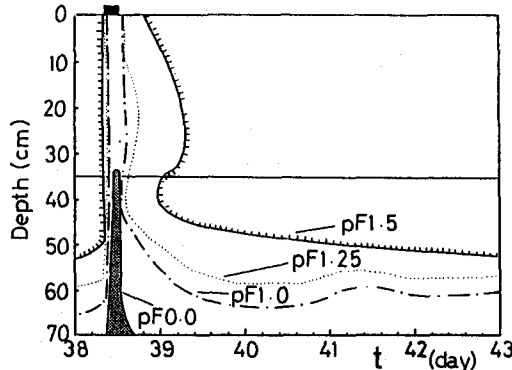


図7 等サクション線図（高強度の人工降雨）

6. 表層土壌がない場合との比較——雨水流動に対する表層土壌の役割

高い透水性と保水性を有する表層土壌が存在する場合には、上述の実験例からわかるように表面流出のみではなく、中間流出も発生しにくくなる。そこで、ここでは表層土壌がない状態での単層の土壌に対する実験結果と比較することによって、雨水流動に対する表層土壌の役割をより明瞭な形で把握することを試みた。

表層土壌のない場合のライシメーターとしては、図1と同形の装置に、二層の場合の下層土壌と同一の関東ローム土を詰めたものを用いた。このような単層での実験を、同一降雨条件で二層での実験と並行して行った。実験には人工降雨装置を用いて、降雨強度 $r = 32 \text{ mm/hr}$ 、継続時間 5.5 時間の降雨を与えた。図8と9には、それぞれ単層及び二層での流出量の時間変化が示されている。図10と11には、それぞれ単層及び二層での等サクション線図と動水勾配ベクトルが示されている。ここで動水勾配ベクトルとは、全水理ポテンシャル $\phi = \Psi + z$ の深さ方向の勾配であり、

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{\partial \Psi}{\partial z} + 1 \quad (\Psi : \text{毛管負圧水頭}, \quad z : \text{位置水頭})$$

で表わされる。水分フラックスは、動水勾配とその水分量での不飽和透水係数の積で示される。

(1) 単層の場合における水分移動の特性

単層の場合には、図8に示すように降雨開始直後に表面流が発生している。その流出量より、地表面の最終浸透能が約 8 mm/hr であることがわかる。また降雨開始後 3.5 時間で最下端からの流出が始まり、降雨終了 0.5 時間後に流出量のピークが現われている。このピークの遅れは、関東ローム土の透水性が低いことによる水分伝播の遅れから生じるものである。

(2) 二層の場合における水分移動の特性

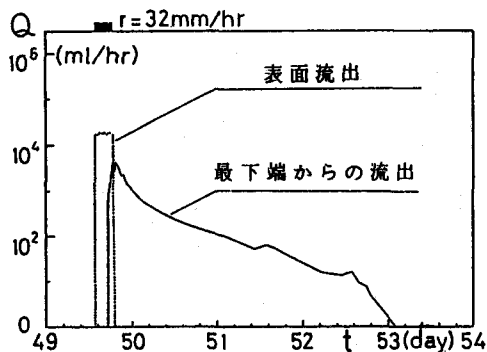


図8 流出量の時間変化(単層)

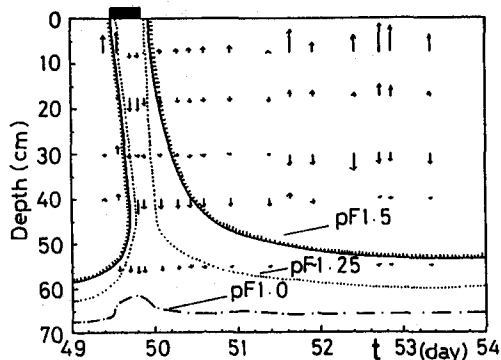


図10 等サクション線図(単層)

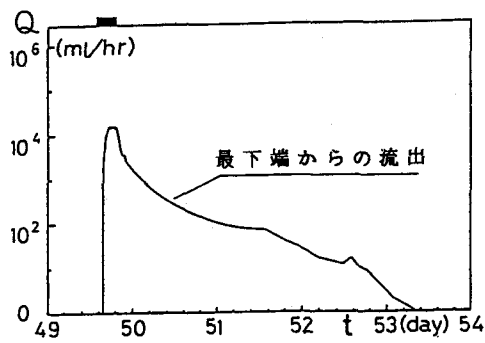


図9 流出量の時間変化(二層)

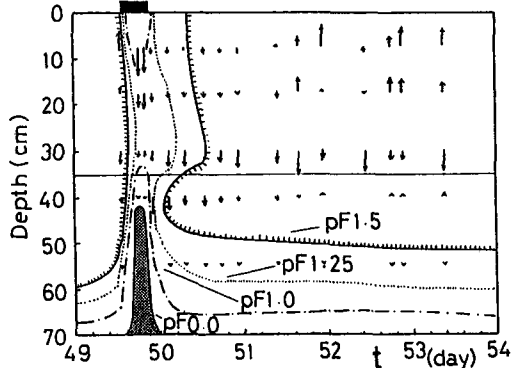


図11 等サクション線図(二層)

表層土壌がある場合には、図9と11に示すように、降雨開始2.5時間でライシメーター底面に地下水面が発生し、最下端からの流出が始まっている。この地下水面は、降雨開始後3時間で深さ45cm付近まで上昇している。pF1.0以下の非常に湿潤した領域は、上層の赤玉土の断面全体には拡がっておらず、上層土壌の下部付近で雨水は不飽和状態で浸透していて、地下水面は形成されていない。これは、このような高強度の降雨に対しても、上層の赤玉土の保水性が高いために、上層土壌の下部に自由水面が形成されて中間流出が発生するまでに至っていないことを示している。また下層の関東ローム土の最終浸透能は、先に述べた単層の最終浸透能から類推すると8mm/hrと考えられる。一方、流出量は降雨終了時点で、単位面積当りに換算すると25mm/hrとなっている。これは最終浸透能を越えた雨水が流出していることを意味している。この流出量の増加は、下層土壌の上部まで上昇した地下水面の作用により、下層土壌の上部においても、流出口に向けて横方向の流れが生じるためであろう。図11に示すように、深さ30cm付近の動水勾配ベクトルは、降雨終了後2日間程、単層の同地点のものに比べて下向きの大きな値をもっている。これは、上層の赤玉土の下部に保留されていた水分が、不飽和状態で下層の関東ローム土に浸透していることを示している。

図12には、単層及び二層における土壌面からの雨水の浸透量の累積値から流出量の累積値を差し引いた貯留量の時間変化が示されている。土壌面からの雨水の浸透量は単層と二層で異なっているが、二層土壌の方が貯留量が相対的に多くなっている。このことは、上層の赤玉土が保水性が高く雨水を貯留する役割を果たし降雨波形を時間的に大きく引き伸ばす作用をもっていることを意味する。

(3) 雨水流動に対する表層土壌の役割

表層土壌が存在せず透水性の低い下層土壌に直接雨水が

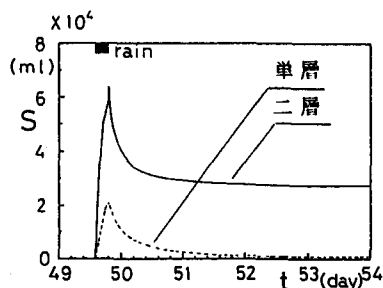


図12 貯留量の時間変化の比較

入力される場合には、その浸透能を越えた雨水は表面流を発生させる。これに対して、下層土壌の上部に透水性の高さと保水性の高さを兼ね備えた表層土壌が存在する場合には、表面流出のみならず中間流出も発生しにくくなる。すなわち表層土壌は透水性が高いために、雨水を土壌内に浸透させやすく、したがって表面流出は発生しにくくなる。一方、保水性の高さも兼ね備えているため、表層土壌は雨水を貯留し、下層土壌への実質的な降雨波形を時間的に大きく引き伸ばす作用をもって^{5), 6)}いる。この作用により、かなりの高強度の降雨に対してでも、表層土壌の下部付近において、雨水は不飽和状態で浸透し中間流出は発生しにくくなる。

7. おわりに

本研究では、降雨-流出過程における表層土壌の役割を具体的に把握する目的で、高い透水性と高い保水性という表層土壌の基本的物理特性を有している赤玉土を、透水性の低い関東ローム土上に置いた形のライシメーターを用いていくつかの実験を行った。それらの結果より以下のことが明らかになった。

- ①透水性の低い下層土壌に直接、高強度の降雨を与えると表面流出が発生するが、下層土壌の上部に透水性の高さと保水性の高さを兼ね備えた表層土壌が存在する場合には、表面流出のみならず中間流出も発生しにくくなる。
- ②表層土壌は、その高い透水性によって表面流出の発生を抑える働きを持つだけではなく、その高い保水性により下層土壌への実質的な入力降雨波形を時間的に引き伸ばす作用を有している。この作用により、高強度の降雨に対してでも、表層土壌の下部付近において雨水は不飽和状態で浸透して、中間流出は発生しにくくなる。
- ③また表層土壌内に貯留された雨水は、降雨終了後のある期間、表層土壌の下部に湿潤領域として残り、不飽和状態で下層土壌に徐々に浸透するため、ハイドログラフの通減部は表層土壌の存在によって大きく影響を受けるものと考えられる。

本研究は昭和58年度文部省科学研究費一般研究(B)「フィルター分離AR法と室内実験によるパーシャル・ソース・エイリア概念の実証的研究」(代表者:日野幹雄)の補助により行われたことを付記し、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日野幹雄・藤田光一・出雲秀治:表層土壌中の水分移動特性とその特性に及ぼす植生の効果、第27回水理講演会論文集、1983。
- 2) 藤田光一・日野幹雄・出雲秀治:表層土壌の雨水流動に関する実験と解析、第38回土木学会年次講演会講演概要集、1983。
- 3) Kirkby, M.J.(editor):Hillslope Hydrology, John Wiley, 1978(日野幹雄、他訳、新しい水文学、朝倉書店、1983)。
- 4) たとえば、塚本良則:山地流域内に起る水文現象の解析、東京農工大学演習林報告、6、1961。
- 5) 山田正・日野幹雄・藤田光一:小試験地における雨水の流出機構に関する研究、第26回水理講演会論文集、1982。
- 6) 日野幹雄・長谷部正彦:フィルター分離AR法による非線形流出系の同定と予測(時間単位)、土木学会論文報告集、No.324、1982。