

初期水分量と流出現象
Initial Soil Moisture and Runoff Phenomenon

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 難 岡 和 夫
東京工業大学大学院 学生員 ○尾 高 義 夫
東京工業大学工学部 学生員 佐 藤 昭 人

1. はじめに

流出現象は、流域の初期の湿潤状態と降雨特性に大きく依存している。特に、前者の流域の湿潤状態を把握することは、流出解析における有効降雨や損失量の算定にとって不可欠である。一方、Linsley¹⁾らと岩井・石黒²⁾は、洪水直前流量が流域の初期の湿潤状態を示す指標APIとなることを指摘している。また、日野・長谷部³⁾は、いくつかの流域についてこの洪水直前流量と流出率の間には高い相関があることを示している。しかしながら、初期の湿潤状態が流出現象、すなわち流出率や流出時間の遅れなどにどのように影響するかという点に関する具体的な研究は、著者らの知るところではこれまでになされていない。そこで、本論文では、初期の湿潤状態すなわち初期水分量が流出過程に果たしている役割について論じる。具体的には、前半部分では、鉛直一次元のライシメータを用いて降雨実験を行い、土中のサクシオン値および流出量の時間変化を詳細に測定することによって、初期水分量の違いが流出率や流出時間の遅れなどにどのように影響しているかについて論じる。また、後半部分では、土中の雨水流動に関して不飽和浸透理論に基づく数値シミュレーションを行い、ライシメータによる実験結果の妥当性について検討する。

2. ライシメータによる降雨実験

実験には関東ローム土を一樣に詰めた直径20 cm、高さ25 cm の円筒形の鉛直一次元のライシメータを用いた。なお、ライシメータには、最下端に流出口を設け、土壌中の水分量を推定するために深さ10 cmと18 cmの地点にテンシオメータを埋設してある。

(1) 流出量およびサクシオン値の時間変化

Fig. 1, 2 には、それぞれ流出量およびサクシオン値の時間変化の一例が示されている。この実験は、強度17 mm/hr、継続時間1.5 hrの人工降雨を与えて行っている。ただし、深さ10 cmと18 cmの地点における降雨開始直前のサクシオン値はそれぞれ1.53、1.40であった。これらの図から、降雨による水分上昇が地表面から順に深さ方向に伝播し、サクシオン値がある値まで低下した後流出が生じていることがわかる。これは、土中の水分が重力排水状態になるまでの降雨が主として土中に保水され、流出に直接かわる降雨は重力排水状態以後の降雨であることを示している。

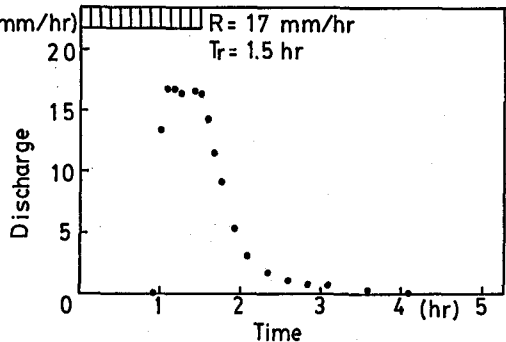


Fig. 1. 流出量の時間変化

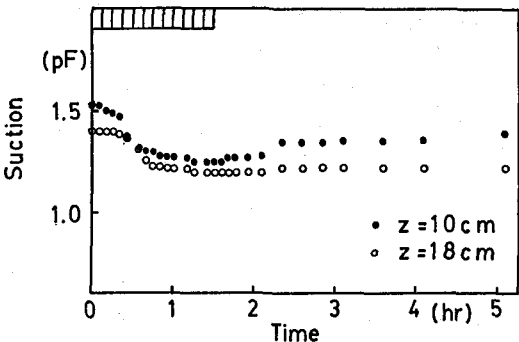


Fig. 2. サクシオン値の時間変化

(2) 初期水分量と流出率および損失量の関係

降雨量と流出量の関係を論ずるときに、しばしば次式で定義される流出率 f という概念が用いられる。

$$f = \frac{\Sigma Q}{\Sigma R}$$

ここで、 ΣR ：総降雨量、 ΣQ ：総流出量。

Fig.3 には、深さ 18 cm の地点における降雨開始直前のサクシオン値と流出率の関係が示されている。また、深さ 10 cm のサクシオン値についても同様なグラフが得られている。これらの図から、総降雨量一定の条件の下では、流出率は降雨強度によらず、降雨開始直前のサクシオン値すなわち初期水分量によって決まってくる事がわかる。

一方、この流出率 f の値は元の定義式の形からも明らかなように総降雨量に大きく依存する。そこで、ここでは次式で定義されるような総降雨量によらない損失量 L を考えることにし、それが初期水分量の違いによってどのように影響されるかを検討する。

$$L = \Sigma R - \Sigma Q$$

Fig.4 には、深さ 18 cm の地点における降雨開始直前のサクシオン値と損失量の関係が示されている。また、深さ 10 cm のサクシオン値についても同様なグラフが得られている。これらの図から損失量は降雨強度によらずに初期水分量によってのみ決まってくる事がわかる。これは土中の水分量が重力排水状態になるまでの降雨が主として土中に保水され、流出に直接かわる降雨は重力排水状態以後の降雨であることを示している。

(3) 初期水分量と流出時間の遅れの関係

Fig.5 には、深さ 18 cm の地点における降雨開始直前のサクシオン値と降雨開始から流出開始までの時間の遅れの関係が示されている。また深さ 10 cm のサクシオン値についても同様なグラフが得られている。これらの図より、初期水分量が小さくなるほど水分の伝播速度は小さくなり⁴⁾、その結果、流出開始時間の遅れが大きくなっていることがわかる。すなわち、これは降雨強度一定の条件の下では、流出開始時間の遅れは初期水分量によって決まってくることを示している。

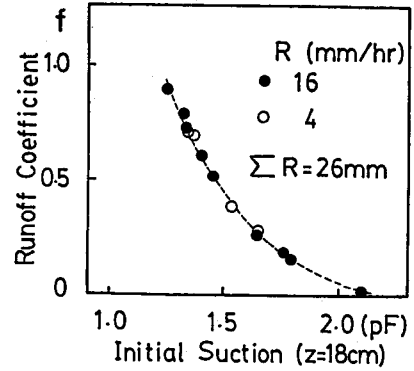


Fig. 3 降雨開始直前のサクシオン値と流出率の関係

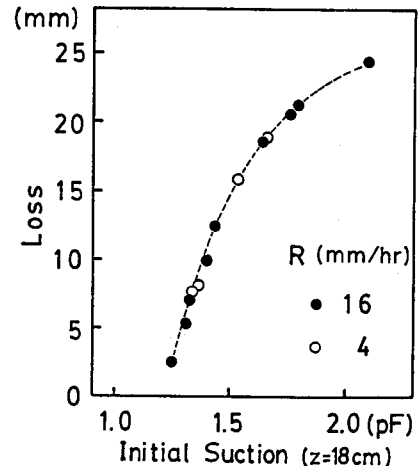


Fig. 4 降雨開始直前のサクシオン値と損失量の関係

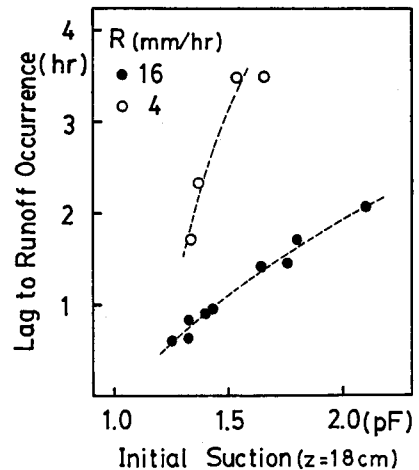


Fig. 5 降雨開始直前のサクシオン値と流出開始時間の遅れ

3. 不飽和浸透理論による雨水流動の解析

前項のライシメータを用いた実験結果からわかるように、流出率や流出開始時間の遅れには、初期水分量の違いが大きく影響している。そこで、ここでは不飽和浸透理論を用いて土壌内の雨水流動のシミュレーションを行い、実験結果の妥当性を検討している。

(1) 基礎方程式および境界条件式

解析は Fig.6 に示すような座標系を用いて鉛直次元で行っている。基礎方程式としては、次式に示す Richards の不飽和浸透式を用いる。

$$C(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ K(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} - 1 \right) \right\} \quad (1)$$

ここで、

ψ : 圧力水頭,

$K(\psi)$: 不飽和透水係数,

$C(\psi)$: 比水分容量.

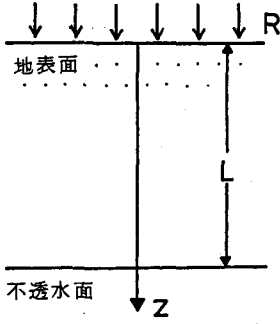


Fig. 6. 座標系

解析においては、飽和透水係数以下の強度の降雨を与えるものとする。また、深さ L の地点に不透水面をおく。この点が飽和に達すれば流出が開始するものとする。このような仮定の下で、地表面と最下端での境界条件を設定する。

(2) 土壌物理条件式および解析対象土層

土壌物理条件式としては、谷によって提案されているものを用いる。また解析は飽和透水係数 36mm/hr のロームからなる 24cm の表層土壌を対象とする。

(3) 解析結果

まず、地表面から一定量 ($q=3\text{ mm/day}$) の蒸発散が起るものとして、基礎方程式 (1) から 5 つの初期状態 (Case 1~5) を設定する。この 5 つの初期状態に対して、強度 10mm/hr および 5mm/hr の降雨を総降雨量一定 ($\Sigma R=20\text{ mm}$) の下で与え、土中の雨水流動についての数値シミュレーションを行った。

Fig.7a には、5 つの初期状態に対して、強度 10mm/hr の降雨を与えたときの流出量の時間変化が示されている。また、Fig.7b には強度 5mm/hr を与えたときの流出量の時間変化が示されている。

Fig.8 には、深さ 12cm の地点における降雨開始直前の圧力水頭と流出率の関係が示されている。この図より、実験結果と同様に、総降雨量一定の条件の下では、流出率は降雨強度によらずに初期水分量によって決まることがわかる。

Fig.9 には、深さ 12cm の地点における降雨開始直前の圧力水頭と流出開始時間の遅れの関係が示されている。この図より、実験結果と同様に降雨強度一定の条件の下では、流出開始時間の遅れは初期水分量によって決まることがわかる。

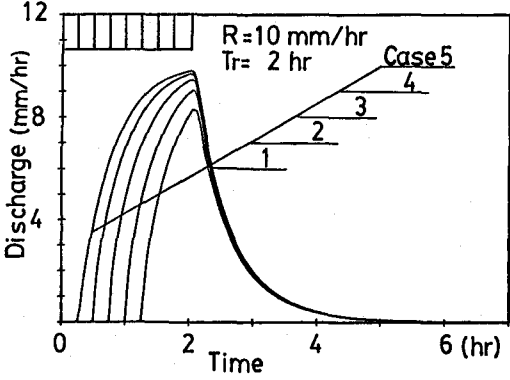


Fig.7a. 流出量の時間変化 ($R=10\text{ mm/hr}$)

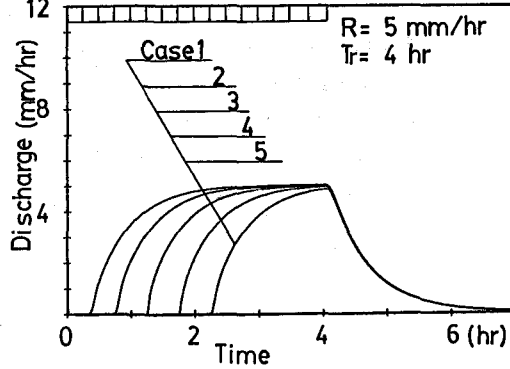


Fig.7b. 流出量の時間変化 ($R=5\text{ mm/hr}$)

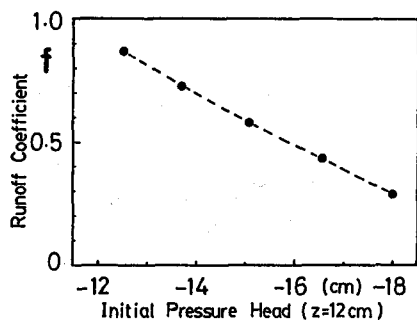


Fig. 8. 降雨開始直前の圧力水頭と

流出率の関係

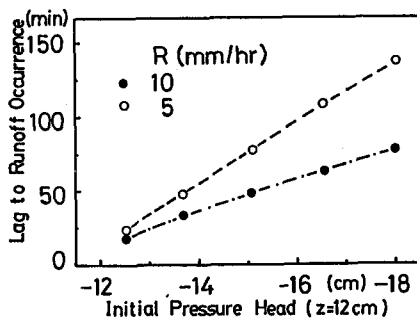


Fig. 9. 降雨開始直前の圧力水頭と

流出開始時間の遅れの関係

4. おわりに

本研究では、初期水分量の違いが流出現象にどのように影響しているかを具体的に把握するために、鉛直一次元のライシメータを用いて降雨実験を行うとともに、不飽和浸透理論を用いて土壌内の雨水流動の数値シミュレーションを行った。それらの結果より以下のことが明らかになった。

- (1) 土中の水分量が重力排水状態になるまでの降雨が主として土中に保水され、流出に直接かかわる降雨は重力排水状態以後の降雨である。その結果、流出率は総降雨量一定の条件の下では降雨強度によらずに初期水分量によって決まってくる。同様に、損失量は降雨強度によらずに初期水分量によって決まってくる。
- (2) 水分の伝播速度は初期水分量に大きく依存しており、初期水分量が小さいほど水分の伝播速度も小さくなる。その結果、流出開始時間の遅れは降雨強度一定の条件の下では初期水分量によって決まってくる。

本研究は昭和59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)、および総合研究(A)「流出率および流出解析モデルの評価と定式化に関する総合的研究」(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) Linsley, R. K., M. A. Kohler and J. L. H. Paulhus: Applied Hydrology, McGraw-Hill, PP. 412-427, 1949.
- 2) 岩井重久・石黒政義: 応用水文統計学, 森北出版, PP. 340-343, 1970.
- 3) 日野幹雄・長谷部正彦: 流出率と湿潤指標としての洪水直前流量, 土木学会論文報告集, No. 328, PP. 41-46, 1982.
- 4) 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効果, 第27回水理講演会論文集, PP. 415-418, 1983.
- 5) 谷 誠: 一次元鉛直不飽和浸透によって生じる水面上昇の特性, 日本林学会誌, 64(11), PP. 409-418, 1982.