

# 斜面中の水移動

宮崎 毅\*

Water movement in soils on slopes

Tsuyoshi MIYAZAKI

Shikoku National Agricultural Experiment Station

## 1. 斜面中の水移動モデル

日本の国土面積約 37 万 km<sup>2</sup> のうちのおよそ 70% は山地であり、その山地の多くは傾斜地である。すなわち、降雨の 70% 近くは斜面に降り注いでいるとすることができる。斜面に降り注いだ水は、その一部を斜面土中に浸透させ、残りは地表面を流下する。このような斜面における水の循環を理解するためには、大きな循環モデルと小さい循環モデルが有用である。

大きな循環モデルは、河川流域を水循環の場とし、主として降水量や河川流量の測定値に基いてその流域における水収支や流出現象を解明するために用いられる。斜面中の水移動概念は、その様な水収支や流出現象への影響因子として特徴づけられる。

小さな循環モデルは、山腹斜面を水循環の場とし、降水量の他に土壌水分量、地下浸透量、蒸発散量等の土壌物理的測定値に基いて各々の山腹斜面における水分動態を解明するために用いられる。斜面中の水移動概念は、ここでは主要な役割を持つ。

大きな循環モデルが、治山・治水や水資源利用にとって重要であることは論を待たないが、小さな循環モデルの重要性も大きい。例えば山腹斜面に造成される農地、草地における水管理、土壌管理にとっては後者のモデルの必要性の方が大きいであろう。図-1 に、両モデルを

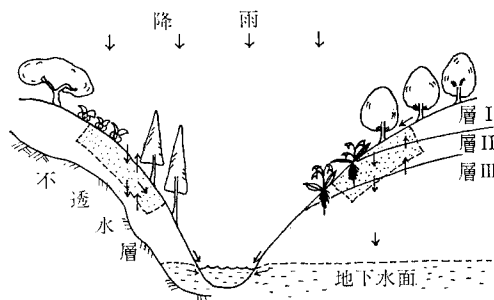


図-1 斜面中の水移動モデル

比較し得る説明を示した。図-1 では中央部に河川があり、左岸には岩盤のような不透水層上に土層がある。右岸では不透水層は河床より低部に位置するが、斜面は物理性の異なる土壌の互層で形成されている。大きな循環モデルはこのような斜面の内部構造を全体的な平均値で捉えるが、小さな循環モデルではこの左岸と右岸の内部構造の相違を反映した水分動態を捉えることを目的としている。

本報告は、以上の意味で、小さな循環モデルに基く斜面中の水移動を解明しようと試みたものである。なお、本研究の直接の動機は、傾斜農地の災害原因調査に端を発しているので、その調査結果を次項で略述する。

## 2. 斜面における造成農地の崩壊と水移動

四国の瀬戸内海側は気候温暖な寡雨地帯であり、斜面を利用した農耕地が多く分布している。この地域において、1976年9月に台風に伴う集中豪雨が発生し、多数の傾斜農地が崩壊等の災害を被った。この災害の実態と原因を調査した結果、概略次のようなことがわかった<sup>1)</sup>。

- ① 傾斜農地における集中豪雨災害は、その造成形態と災害パターンに一定の関係がある。すなわち、
- ② 造成形態が改良山成畑の場合、崩壊規模が最も大きく、斜面畑の場合がこれに次いだ。
- ③ 改良山成畑の崩壊は、造成前に谷部であった位置で、造成時に盛土された部分が被災していた。
- ④ 現地調査の結果、改良山成畑の盛土崩壊は、人為的3層土層（盛土層、植生堆積層、下層土層）において降雨浸透水が異常な流れ方をしたためと推定された。
- ⑤ ④の人為的3層土層は、斜面の力学的強度（せん断抵抗力）も弱めたと推定された。

図-2 に、人為的3層土層の3相分布を、また表-1 にそれらの乾燥密度と透水係数を示した。これらの数値は、植生堆積層の密度が著しく低く、透水性が著しく高いことを示しており、集中豪雨下でこの層が盛土崩壊に

\* 四国農業試験場

第1表 人為的3層土層の乾燥密度 (g/cm<sup>3</sup>) と透水係数 (cm/sec)

盛土層	乾燥密度	1.37	1.26	1.38	1.33	1.43	1.23
	透水係数	$1.0 \times 10^{-2}$	$1.4 \times 10^{-2}$	$1.4 \times 10^{-2}$	$8.8 \times 10^{-3}$	$1.6 \times 10^{-2}$	$3.3 \times 10^{-2}$
植生堆積層	乾燥密度	0.32	0.45	1.08	0.57	1.08	0.45
	透水係数	1.32	$2.0 \times 10^{-2}$	$2.4 \times 10^{-1}$	$1.2 \times 10^{-1}$	$1.7 \times 10^{-1}$	$5.8 \times 10^{-1}$
下層土層	乾燥密度	1.52	1.30	1.47	1.63	1.54	1.34
	透水係数	$8.0 \times 10^{-3}$	$1.9 \times 10^{-2}$	$8.8 \times 10^{-3}$	$1.8 \times 10^{-2}$	$1.1 \times 10^{-2}$	$5.2 \times 10^{-2}$

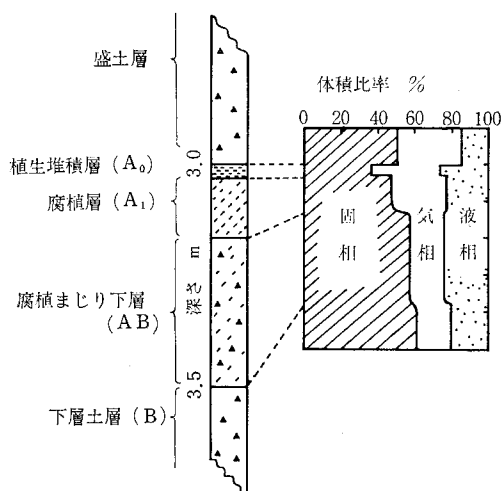


図-2 盛土と原地盤の境界における人為的3層土層における3相分布

影響したと推定させる根拠となっている。

山腹斜面の崩壊は、治山・治水の観点から見れば、大きな循環モデルの問題であるが、崩壊の原因を究明に追跡してみると、むしろ土層の特殊性を反映した小さな循環モデルによって水の挙動を捉えるの必要性があると考えられる。

### 3. 成層斜面における降雨の浸潤実験 1

図-2で示されたような人為的3層土層における降雨浸潤の実態を調べる目的で、図-3のような実験装置を作成した。

実験試料は西日本に広く分布するマサ土(花崗岩風化土)を用い、マサ土の中間に粒径 2~5 mm のレキを層厚 3 cm に挟んだ。この土層に一定強度の人工降雨を降らせ浸潤前線および水分張力を測定した。植生層を挟んだ造成農地の3層土層を、レキを挟んだ実験装置の3層土層で置き換えたのは、植生層もレキ層も粗大な間隙と著しく大きな透水性を有するという共通性があり、かつレキ層であれば何度でも同一条件の土層を再現し得ることを考慮したためである。

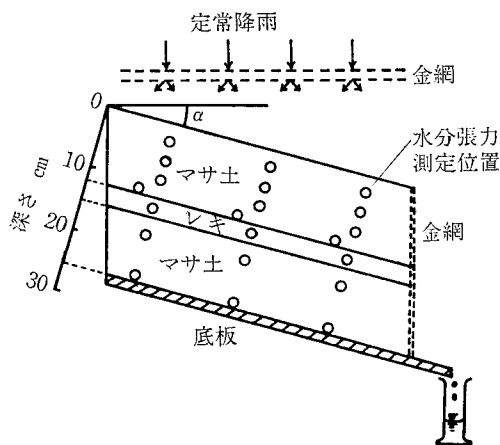


図-3 人為的3層土層のモデル実験装置

図-4に用いた試料の水分特性曲線、図-5に排水過程の非定常法<sup>2)</sup>で測定した不飽和透水係数を示した。

図-6に、浸潤前線の時間的推移を示した。降雨強度は 1.2 cm/hr で、50 cm x 50 cm の平面内に28本のノズルから水滴として落下させた。ノズル直下に水滴が集中するのを防ぐために2枚の金網をノズル下方に設置して水滴を分散させたが、土層表面での水滴の集中は若干残った。

図-6の浸潤前線には次の特徴が現われている。

- ① 水滴の集中に基づく浸潤前線の波形は、浸潤前線の降下に伴い解消してなめらかになる。
- ② 第1層(上層マサ土)内の浸潤前線降下速度はほぼ一定である。
- ③ 第1層と第2層(レキ層)の境界で浸潤前線降下は一度停止する。
- ④ 斜面の下部では浸潤前線は第2層、第3層(下層マサ土)へ浸入するが、斜面の上部では浸潤前線が停止し続ける。

以上の特徴は、成層を持つ斜面における浸潤現象に特有のものと考えられるので、以下にやや詳しく解析する。

#### 1) 浸潤前線の波形解消

土中で浸潤前線が進行している時、前線の形がなめら

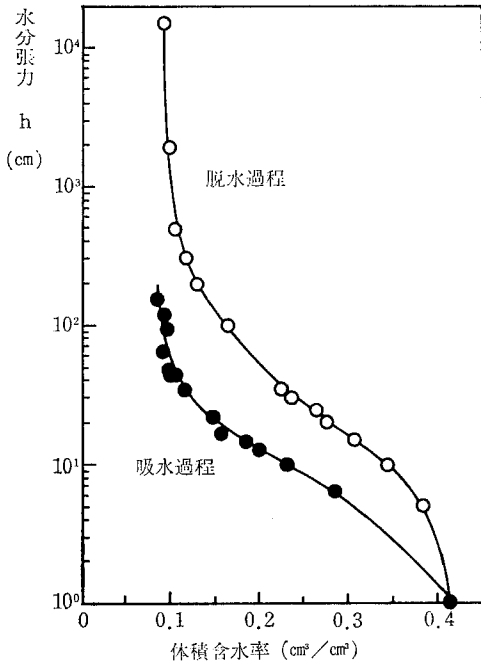


図-4 マサ土の水分特性曲線

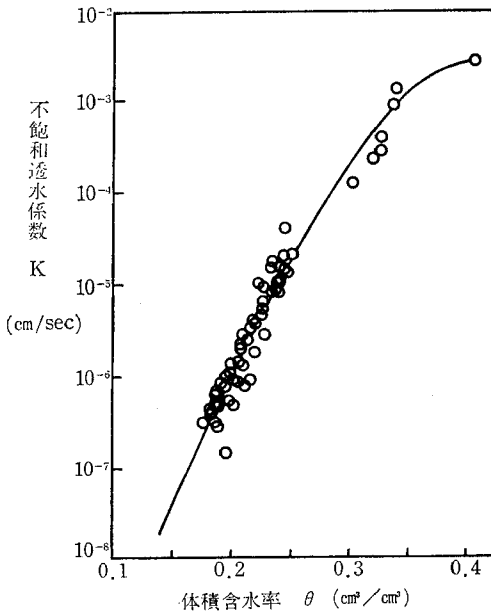


図-5 マサ土の不飽和透水係数

かだけでなく凹凸がある場合、時間が進むにつれてその凹凸は発達するであろうか、それとも消滅するであろうか。図-7は、浸潤前線の凹凸が消滅することを説明している。すなわち、長さの等しい円弧A、Bが反対方向に曲率半径を持って、図-7のように降下しているとす。浸潤前線では大きさの等しい前進毛管力が支配的に働

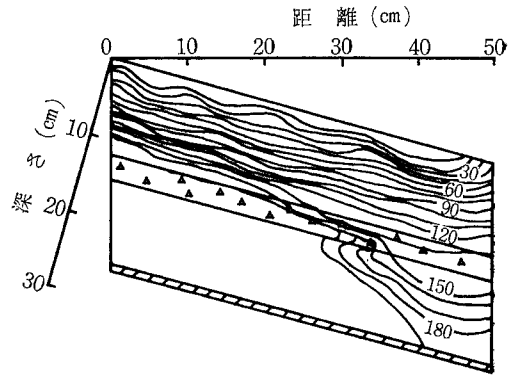


図-6 3層土層における浸潤前線 (图中数字は降雨開始後の時間;分)

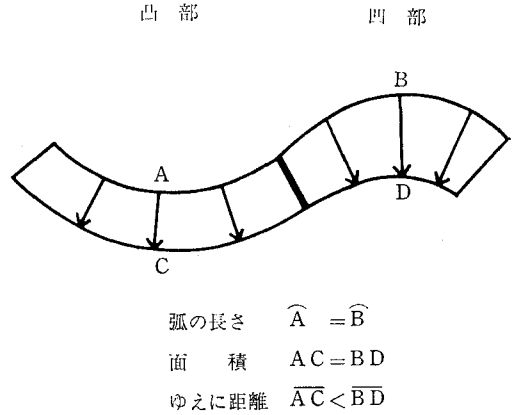


図-7 浸潤前線の波形模式図

き、浸潤前線に対して直角方向に作用する。微小時間後の浸潤前線をC、Dで表わすと、その時間内にA、Bを通過する水のフラックスは等しくなければならないので、図-7の面積ACはBDと等しくなければならない。この時の浸潤前線移動距離は  $\overline{AC} < \overline{BD}$  が必要条件である。

以上の理由により、前線の凹凸は徐々に消滅すると予測され、図-6の水滴の集中に起因する浸潤前線の波形も、そのようにして解消されたと考えられる。

2) 浸潤前線の定速降下

浸潤前線に物理的意義を与え、これによって浸潤現象を定量的に解析するには、Green and Ampt<sup>3)</sup>の方法が適している。この方法は、当初たん水条件下の浸潤現象の理論として用いられたが、ブダゴフスキー<sup>4)</sup>、Swartzendruber<sup>5)</sup>らが降雨浸潤現象にも適用できるような拡張を行って来た。

図-6の斜面における浸潤は、明瞭な浸潤前線を示しているので、Green and Amptの方法をブダゴフスキー等の方法に従って降雨浸潤現象に拡張し、かつ斜面に適

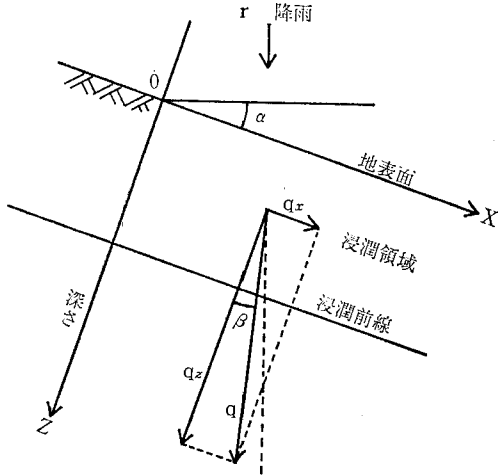


図-8 斜面浸潤における座標軸及び水分フラックス

用できるように変形して解析に用いることにした。

すなわち、図-8のように座標軸を傾けた場合フラックスは、

$$q_x = k \sin \alpha \quad \dots\dots(1)$$

$$q_z = k \left( \cos \alpha + \frac{h_2 - h_1}{Z} \right) = k (\cos \alpha + m) \quad \dots\dots(2)$$

と表わされる。ここで、 $q_x$ 、 $q_z$  は各方向のフラックス、 $k$  は不飽和透水係数、 $h_2$  は浸潤前線における有効水分張力、 $h_1$  は斜面の土壌面における水分張力である。Green and Ampt の方法を用いているので、浸潤領域内では含水率は一定、 $k$  の値も一定という仮定が前提となる。

ここで、浸潤前線が定速降下する場合、有効水分張力  $h_2$  はどのような値をとるかを調べてみる。そのため、(2)式の  $q_z$  および  $m$  の値を次のようにして求める。図-5に示したように、試料の飽和透水係数  $K_s$  は約 10 cm/hr なので、実験条件として設定した降雨強度  $r$  との関係は常に

$$r < K_s \quad \dots\dots(3)$$

であり、降雨は全て土中に浸潤する。この場合、斜面勾配が  $\alpha$  の時の連続条件は<sup>6)</sup>

$$r \cos \alpha = q \cos \beta \quad \dots\dots(4)$$

ただし、

$$q^2 = q_x^2 + q_z^2 \quad \dots\dots(5)$$

$$\tan \beta = \frac{q_x}{q_z} \quad \dots\dots(6)$$

である。ここに、 $q$  は全フラックス、 $\beta$  は  $q$  が斜面に垂直に交わる直線に対してなす角度である。 $\beta$  が  $\alpha$  と等しくないことは、(1)、(2)式を(6)式に代入すれば明らかである。すなわち、

$$\tan \beta = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha + m} \quad \dots\dots(7)$$

であり、 $m=0$  すなわち  $h_2=h_1$  の時に限って  $\alpha=\beta$  とな

る。乾燥土中の浸潤では、一般に  $h_2 > h_1$  であるから、(7)式より  $\alpha > \beta$  が成立つ。以上は、Green and Ampt の方法を斜面に適用したための必然的な帰結である。しかし、浸潤中の水移動の実態はこれと異なり、浸潤前線が図-8のようであれば、浸潤領域内の全フラックス  $q$  は  $\alpha=\beta$  で鉛直下向きであり、浸潤前線に位置する水のみが有効水分張力  $h_2$  の影響を受けて屈折した流れとなるだろう<sup>6)</sup>。従って、(1)、(2)式で浸潤中の水移動を表現するのは、あくまでも Green and Ampt モデルを適用する限りにおいて成立つ方法である。

さて、式(4)、(5)、(6)より  $\beta$  を消去すると、

$$q_z = r \cos \alpha \quad \dots\dots(8)$$

を得る。式(8)を(2)に代入すると

$$r \cos \alpha = k (\cos \alpha + m) \quad \dots\dots(9)$$

すなわち

$$m = \left( \frac{r}{k} - 1 \right) \cos \alpha \quad \dots\dots(10)$$

となり、(2)式より

$$h_2 = h_1 + Z \left( \frac{r}{k} - 1 \right) \cos \alpha \quad \dots\dots(11)$$

を得る。(11)式において、 $h_1$ 、 $r$ 、 $k$ 、 $\alpha$  は一定なので、 $h_2$  は  $Z$  の1次関数、また  $m > 0$  なので(9)式より  $r/k > 1$  である。すなわち、 $h_2$  は  $Z$  に関する単調増加関数であり、これが Green and Ampt の方法を斜面における浸潤に適用した場合の浸潤前線定速降下の必要条件となる。

斜面において、浸潤前線が降下するに従い前線に働く有効水分張力  $h_2$  が増加し続けるということは、浸潤前線の含水率が減少し続けることに等しい。一般に、Green and Ampt の方法の降雨浸潤現象への拡張は、降雨強度  $r$  と土の最大許容浸潤強度  $I_m$  に対し、

$$r > I_m \text{ の場合}$$

$$I_m > r > K_s \text{ の場合}$$

が主に研究されて来たが<sup>5,7)</sup>、

$$K_s > r$$

の場合についての研究は著しく乏しい。ここで問題にしている斜面浸潤はこの第3の場合に相当するため、準拠すべき理論が十分に確立しておらず、斜面、平地に関わらず導出される(11)の妥当性も今後検討すべき研究課題と言える。

いま、(11)式が成立すると仮定して、 $h_2$  を以下に計算してみる。図-3の装置に均一なマサ土斜面を作成し、1.14 cm/hr の降雨強度のもとで浸潤領域の水分張力を16点測定し、平均 10.8 cm、標準偏差 0.8 cm を得た。そこで、浸潤中の土壌面の水分張力を浸潤領域の平均水分張力に等しいと見做して  $h_1=11$  cm とし、 $r=3.17 \times 10^{-4}$  cm/sec、 $\alpha=15^\circ$ 、 $k=2.0 \times 10^{-4}$  cm/sec ( $h_1$  に対して図-4と図-5から  $k$  を読み取る) を各々(11)式に代入

すれば,

$$h_2 = 11 + 0.57 Z \quad \dots\dots(12)$$

となる。すなわち、Green and Ampt の方法によれば、浸潤前線の降下速度は、浸潤前線の有効水分張力  $h_2$  が(12)式に従って増大することによって一定に保たれたと結論される。

### 3) 境界面における浸潤前線の停止

図-6の斜面上部では、浸潤前線が第1層(上層マサ土)と第2層(レキ層)の境界で停止し、それ以上進まなくなった。この現象は「土中水は、その圧力が外気圧以上にならなければ外気に排出されない」という排水の法則<sup>8)</sup>、または流れの第2法則<sup>9)</sup>と呼ばれている原理に基づいて生じたものである。この場合、レキ層では事実上土中水に対する吸引圧が働かず、第1層中の水がその境界面に達して外気にさらされたのと同様の状態に到ったものと考えられる。

浸潤前線が第1層と第2層の境界面で停止するか通過するかを予測するには、再び Green and Ampt の方法を適用することができる。すなわち、浸潤前線が停止するとき、(2)式は  $q_z = 0$  より、

$$h_2 = h_1 - Z \cos \alpha \quad \dots\dots(13)$$

でなければならない。前述の排水の法則により、レキ層中の水分張力をほぼ大気圧に等しいと仮定すれば、第1層から第2層への浸潤前線の侵入は  $h_2$  が減少して0に近づいた時に発生しうる。いま、 $h_1 = 11 \text{ cm H}_2\text{O}$ 、 $\alpha = 15^\circ$  の数値を(13)式に代入すれば、 $h_2 = 0$  のとき  $Z = 11.4 \text{ cm}$  となる。すなわち、第1層(マサ土層)の厚さが  $11.4 \text{ cm}$  以下の斜面であれば浸潤前線は停止し、それ以上の厚さであれば浸潤前線は境界面を通過するものと考えられる。本実験では第1層の厚さを  $12 \text{ cm}$  としたため浸潤前線は境界面を通過すると予想されたが、実際には図-6のように停止した。これは、第1層から第2層への浸潤前線侵入のためには  $h_2 = 0$  でも不十分で、 $h_2$  が少し負の値<sup>注)</sup>へ片寄る必要があることを示していると考えられる。

図-9に、(11)式と(13)式の関係を示した。すなわち、勾配  $\alpha$ 、厚さ  $L$  の土層がレキ層上にあるとき、浸潤は有効水分張力  $h_2$  を(11)式に従って増加させながら進むが、境界面に達した場合、 $h_2$  はゼロに向かって図の点線に沿って低下し、(13)式と交わる。(13)式と  $Z$  軸との交点を  $Z_0$  とすると、

$$L > Z_0$$

の場合は境界面での  $h_2$  の値が負<sup>注)</sup>になるので浸潤前線は境界面を突破し、

$$L \leq Z_0$$

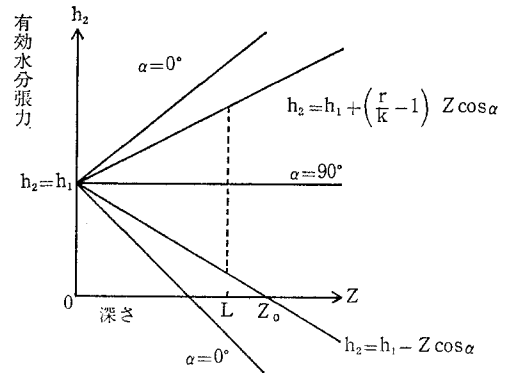


図-9 一定降雨強度  $r$  のもとの浸潤前線における有効水分張力変化の概念図

の場合は境界面での  $h_2$  の値が正またはゼロとなるので浸潤前線は境界面で停止すると予測される。図-9には、(11)式と(13)式で、斜面勾配  $\alpha$  の変化に従って直線勾配が変化することを示している。また、有効水分張力  $h_2$  が(13)式と交わって静止した後、土層境界面上に浸潤水が滞留し、増加し続ければ  $h_2$  は低下し続け、やがては  $h_2$  が負の値となって浸潤前線は土層の境界面を突破するであろう。また、斜面勾配が大きい程、土層境界面上の滞留浸潤水は斜面勾配に沿って横流れを生じるので、 $h_2$  は正の値を維持し続け、浸潤前線は土層の境界面で停止し続けるであろう。

以上のように、浸潤前線の定速降下や境界面での降下停止について、Green and Ampt の方法は明快な説明を与えてくれるが、他方では仮定されたモデルが流れの実態と一致しない問題が残る。(13)式の導出で用いた  $q_z = 0$  の条件も、実際には浸潤前線が停止した後も浸潤領域内では浸潤水の降下を生じているので、ミクロに考えれば  $q_z = 0$  は浸潤前線でのみ成立つ条件である。これらの点は、Green and Ampt の方法が近似理論であることを十分認識した上で、実測値と比較対照して行く必要があることを示している。

### 4) 浸潤前線の下層への浸入

図-6の斜面下部では、第1層と第2層の境界において、浸潤前線が一時停滞したが、すぐに第2層のレキ層、第3層のマサ土層へと降下した。これは、斜面上部の境界面で停止した浸潤前線上で斜面に沿った横流れが生じ、斜面下部で土中水が累積して降下したためである。

## 4. 成層斜面における降雨の浸潤実験 2

図-6の実験結果は、斜面が四方を囲まれた容器内に

注) 正の水分張力は圧力水頭では負圧を、また負の水分張力は正圧を各々意味する。

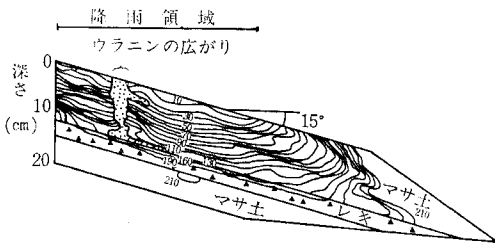


図-10 斜面下部の壁面の影響を除去した場合の3層土層における浸潤前線とウランの広がり  
(図中数字は降雨開始後の時間;分)

作られたため、壁面の影響を強く受けている。そこで、斜面下方の壁面の影響を除去した場合、浸潤前線はどのような挙動を示すか確かめるため、図-10のような浸潤実験を行った。すなわち、長さ約100cmの容器に図-10のような3層土層を作り、斜面上部の50cm×50cmの面積部分のみに人工降雨を与えた。斜面内にはウラン粉末を埋め込んで水の動きのトレーサーとした。

210分間の定常降雨のもとで、浸潤前線とウランの広がりには図-10のようになった。約130分で第1層(マサ土層)と第2層(レキ層)の境界に達した浸潤前線は降下をほぼ停止し、一部でわずかに第3層に達した。しかし、ウランの広がりには第1層と第2層の境界面に著しく多く、第2層へは全く侵入が見られなかった。

図-10の結果は、壁面の影響の無い成層斜面の場合、浸潤前線の降下停止と境界面に沿う横流れの発生は、第1層と第2層の全面にわたって生ずる可能性があることを示している。

### 5. 成層斜面における降雨の定常浸透

斜面の内部構造を反映した小さい水循環モデルに基づく斜面中の水移動を解明するため、浸潤に続く浸透について、アプローチの1つの方法を以下に述べる。斜面としては、浸潤実験と同様の3層土層を想定する。また、定常浸透においては浸潤前線が存在しないので、Green and Amptの方法は役に立たない。従って、通常用いられるDarcyタイプの流れの式を適用する。

斜面において、地下水面が深く、降雨の浸透が定常状態である時のフラックスの式を

$$q_x = k \left( -\frac{\partial h}{\partial X} + \sin \alpha \right) \quad \dots\dots(14)$$

$$q_z = k \left( -\frac{\partial h}{\partial Z} + \cos \alpha \right) \quad \dots\dots(15)$$

と表わす。hは水分張力である。連続の条件(4)、(5)、(6)(8)式はここでも成立するから、(15)式は

$$q_z = r \cos \alpha = k \left( -\frac{\partial h}{\partial Z} + \cos \alpha \right) \quad \dots\dots(16)$$

となる。任意の深さZ<sub>0</sub>において水分張力h<sub>0</sub>が与えられている時、(16)式を積分すれば、

$$\int_{h_0}^z dZ = \int_{h_0}^z \frac{k}{(r-k) \cos \alpha} dh \quad \dots\dots(17)$$

となる。斜面深部に不透水層または地下水面が存在すれば、適当な深さZ<sub>0</sub>に対してh<sub>0</sub>=0を選ぶことができる。

(17)式の積分は次のように行った。マサ土とレキの吸水過程の水分特性曲線を各々

$$h = 1.49 \left( \frac{\theta}{0.52} \right)^{-2.24} \text{ cm} \quad \dots\dots(18)$$

$$h = 0.0252 \left( \frac{\theta}{0.52} \right)^{-2.09} \text{ cm} \quad \dots\dots(19)$$

で近似し、不飽和透水係数を各々

$$k = \frac{4.29 \times 10^{-2}}{h^2 + 42.9} \text{ cm/sec} \quad \dots\dots(20)$$

$$k = \frac{1.56 \times 10^{-4}}{h^4 + 1.56 \times 10^{-4}} \text{ cm/sec} \quad \dots\dots(21)$$

で近似した。(18)、(19)式は、吸水過程で実測した水分特性曲線を最小自乗法で求めたものである。浸潤過程ではレキ層内に吸引圧は発生しないと仮定したが、定常浸透においてはレキ層中でも水が移動するので、この層に流れる方程式を適用するために(19式が必要となる。(20)、(21)式は、Gardnerの実験式<sup>9)</sup>

$$k = \frac{a}{h^m + b} \quad \dots\dots(22)$$

において、nの値をマサ土は2、レキは4とし、経験に基づいて飽和透水係数K<sub>s</sub>を各々10<sup>-3</sup>cm/secおよび1cm/secとし、土壌面蒸発法による実測値としてマサ土はk=3×10<sup>-4</sup>cm/sec(h=10cm H<sub>2</sub>O)、レキはk=1.7×10<sup>-7</sup>cm/sec(h=5.5cm H<sub>2</sub>O)を各々代入することによって求めた。nとK<sub>s</sub>は天下り的に与えた数値である。

これらを(17)式に代入し、広義積分になる場合も吟味した結果、マサ土の場合の積分は

$$Z - Z_0 = \frac{154}{r \cos \alpha} \left[ \ln \frac{h + \sqrt{\frac{154}{r} - 42.9}}{h - \sqrt{\frac{154}{r} - 42.9}} \right]_{h_0}^h \quad \dots\dots(23)$$

レキでは、

$$Z - Z_0 = \frac{0.562}{r \cos \alpha} \frac{1}{2 \left( \frac{0.562}{r} - 1.56 \times 10^{-4} \right)^{3/4}} \times \left[ \tan^{-1} \frac{h}{\left( \frac{0.562}{r} - 1.56 \times 10^{-4} \right)^{1/4}} + \frac{1}{2} \ln \left| \frac{\frac{0.562}{r} - 1.56 \times 10^{-4} + h}{\frac{0.562}{r} - 1.56 \times 10^{-4} - h} \right| \right]_{h_0}^h \quad \dots\dots(24)$$

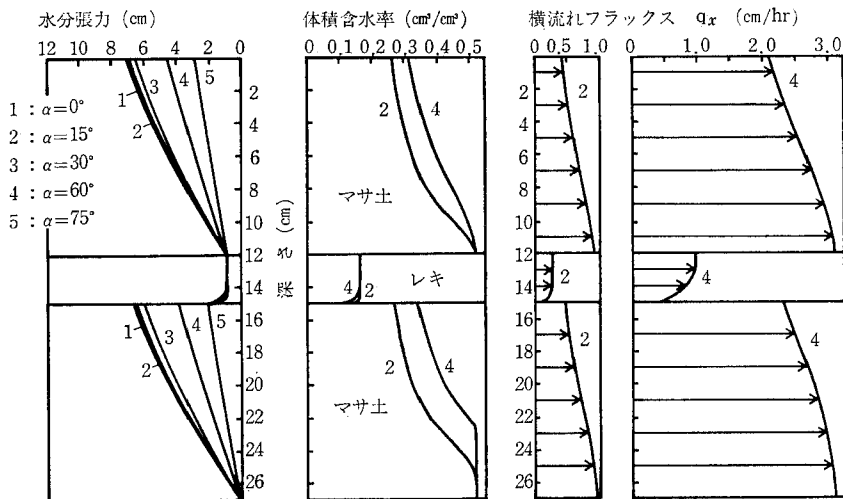


図-11 降雨強度 11.4 mm/hr のもとでの成層斜面内水分張力分布、体積含水率分布及び斜面方向水分フラックス( $q_x$ )分布予測図

となる。降雨強度を  $r=1.14 \text{ cm/hr}$  とし、 $Z_0=27 \text{ cm}$  において  $h_0=0$  なる境界条件を与えた場合の計算結果を 図-11 に示す。

次に、 $x$  方向の流れについては境界条件によって  $h$  の分布が異なるが、最も単純化した場合として無限に続く均一な斜面を考え、 $x$  方向に水分張力勾配が無いと仮定すれば、

$$\frac{\partial h}{\partial x} = 0 \quad \dots\dots(2)$$

である。すなわち、(1)式は、

$$q_x = k \sin \alpha \quad \dots\dots(2)$$

となる。斜面中の横流れフラックスは(2)式で計算した。

図-11には、斜面勾配を変えた場合の水分張力分布、含水率分布、斜面方向の横流れフラックスを角度別に示した。斜面勾配が大きい程マサ土内の含水率が高くなることは、意外な結果である。なぜなら、傾斜角度  $\alpha$  の斜面上で同一強度の降雨を受ける場合、斜面表面積は  $1/\cos \alpha$  に比例して大きくなるので、単純に考えれば斜面内の含水率は急勾配な程低くなると予想されるからである。同じ降雨条件下でも平地は低含水率、斜面は高含水率になるという傾向は、初めに述べた斜面の崩壊災害にとっても重要な因子である。

また、斜面方向の横流れフラックス  $q_x$  が深さによって異なり、土層境界で不連続的に変化するのも興味深い。深さ  $Z$  方向のフラックス  $q_z$  は  $r$  と  $\alpha$  によって決まり、 $Z$  によらない量なので、全フラックス  $q=q_x+q_z$  は深さによって徐々に曲折し、土層境界では屈折を起こしていることになる。地下水の屈折は、水理学的にしばしば論議されるが、不飽和土中の水分フラックスの曲折や屈折は、筆者の知る限り論議された例が無く、今後検討

を要する課題である。

以上に例示した降雨の定常浸透は、土の透水性、流れの境界条件に適当な仮定を用いて計算したシミュレーション結果であるため、得られた数値自体は条件によって変化するであろうが、降雨強度  $r$ 、斜面勾配  $\alpha$ 、水分張力  $h$ 、不飽和透水係数  $k$  並びに各フラックス  $q$ 、 $q_x$ 、 $q_z$  の相互関係が示されたことは、斜面中の水移動を理解する上で重要と考えられる。

### 6. 斜面中の水移動研究の課題と展望

斜面における水の大きな循環モデルが水文学を中心として長く研究されて来たことに比較すると、小さな循環モデルの研究蓄積が乏しいことは冒頭に述べた。その理由は、小さな循環モデルで扱われる水移動現象が、大きな循環モデルを得意とする水文学と、土壌の理化学的性質を扱うのを得意とする土壌物理学との境界領域に位置していることによるのであろう。

最近、水文学と土壌物理学の両側から斜面中の水移動を研究しようという欧米での努力が集成されて、“Hillslope hydrology”<sup>9)</sup> と称する本が出版された。我が国ではこれを“新しい水文学”と意識したが<sup>11)</sup>、これは斜面中の水移動を水文学の中に新しく位置づけようとする時代の要請によるものであろう。

土壌物理学的側面からの研究は、主として小さい系で成立していると考えられる土中水の移動方程式を、実際の斜面における地形の影響、土層の影響、土の不均一性(土中のクラックや粗大孔隙)の影響等を考慮して適用しなければならぬ<sup>9)</sup>。こうした方向も、“新しい水文学”と並んで“新しい土壌物理学”と称することはできないだろうか。少くとも、現代の土壌物理学が、実験室系か

ら、本質的に不均一な圃場、野外へとその活躍の場を求めているとするならば、この呼称もあながち的はずれではあるまい。

#### 引用文献

- 1) 宮崎 毅・井上久義・福岡喜弘 (1981) : 傾斜地の農地防災に関する研究 第1報, 集中豪雨による造成農地災害の実態, 四国農業試験場報告, 36, 97—112.
- 2) 宮崎毅: マサ土の保水性・透水性について, 四国農業試験場報告, 44 (印刷中)
- 3) Green, W.H. and G.A. Ampt (1911) : Studies of soil physics: I. The flow of air and water through soils., J. Agr. Sci., 4, 1—24.
- 4) アー・イー. ブダゴフスキー (1959) : 土壌中への水の浸潤, 研究の資料と記録第9集, 東京大学農学部土地改良研究室.
- 5) Swartzendruber, D. (1974) : Infiltration of constant-flux rainfall into soil as analyzed by the approach of Green and Ampt., Soil Sci. 117, 5, 272—281.
- 6) 宮崎 毅 (1982) : 土中水の不飽和流動 7. 斜面における不飽和流, 土と基礎, 30, 2, 55—62.
- 7) Mein, R.G. and C.L. Larson (1973) : Modeling infiltration during a steady rain., Water Resour. Res., 9, 384—394.
- 8) Taylor, S.A. and G.L. Ashcroft (1972) : Physical edaphology., W.H. Freeman and Company, 199—201.
- 9) Gardner, W.R. (1958) : Some steady state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a watertable., Soil Sci. 85, 4, 228—232.
- 10) Kirkby, M.J. (1978) : Hillslope hydrology., John Wiley and Sons.
- 11) 日野幹雄等 (訳) (1983) : 新しい水文学, 朝倉書店

#### 質疑応答

中村 (愛媛大) 単純に言う和一軸方向の浸潤なり浸透の流れがあって、成層条件が斜めになっているという理解の仕方で良いのか。

宮崎 その通りだ。

塩沢 (山形大) 浸潤前線が斜面に侵入する時に、屈折するということだが、浸潤前線の部分については、圧力勾配 (サクション勾配) が傾いているのはわかるけれども、その上の浸潤した層については、水分状態がほとんど均一になるので、圧力勾配は水平方向に働かない。故に、フラックスの方向としては、鉛直方向になる。今の曲がるということは、浸潤前線の部分に限定された話と理解して良いのか。

宮崎 水移動の実態としては、浸潤前線で曲がるだけで、他の所は曲がると困る。しかし今のモデル (Green and Ampt モデル) では浸潤した層が全体として曲がっているということです。最後に問題にしたのは、浸潤の段階は終って、定常浸透になると、全然様相が変わってしまうということだ。含水率も分布するし、層よっての透水性が全然違うので不飽和浸透の中では、全部曲がっている。どの深さでも曲がっていると考える。