

小試験地における雨水の流出機構に関する研究

Mechanism of Runoff in Small Test Basins (Plots)

東京工業大学 正会員 山 田 正

東京工業大学 正会員 日 野 幹 雄

東京工業大学 学生員 藤 田 光 一

1. はじめに

物理的、水理学的な観点からの降雨流出機構の検討は従事より数多く行なわれているが、流域を単なる雨水の器としてではなく動的に変化するシステムとしての認識は高棹の中間流理論およびそこから導かれる表面流出の生起場とその変化過程という概念の提唱¹⁾に始まると考えられる。このような考え方は国外においても何人かの研究者らによって独立に提案され、“variable source model”, “partial source area” (これらは必ずしも表面流出の発生を条件としていないが)等の名称がつけられている。しかし今日表面流や中間流あるいは地下水流と呼ばれているものも未だ概念的な性格のものであり、それらの水理学的な流動特性は今後も検討を要するものであると思われる。このような見地に立ち、本研究は流域における各種の流出過程のうち、雨水の土中への鉛直浸透と斜面方向流れの物理機構を明らかにすることを目的としたものである。このなかでは特に土壌および降雨の特性が流出に及ぼす影響について実験的理論的に検討されている。

2 実 験

(i)室内実験および実験装置：一様、均質な特性をもった斜面における雨水の浸透流下過程を調べる目的で、幅12.5cm、長さ4.5mの開水路(勾配1/19)に砂を敷きつめ、その上方より5cmにおきに設けた注射針から散水を行なった。用いた砂はA砂($d_{50}=0.19\text{ mm}$, 変動係数0.36, 空隙率 $\lambda=0.44$, 飽和透水係数 $K_s=570\text{ mm/h}$)とB砂($d_{50}=0.76\text{ mm}$, 変動係数0.25, $\lambda=0.44$, $K_s=960\text{ mm/h}$)の2種類である。実験は以下の三つのケースについて行なわれた。〔CASE I〕B砂を厚さ16cmに敷く。散水強度 $R=25\text{ mm/h}$ 。表面流出の発生はない。〔CASE II〕B砂を8.2cmの厚さに敷く。 $R=588.1, 109\text{ mm/h}$ 。全ての散水強度で表面流出が発生した。〔CASE III〕A砂を厚さ17.2cmに敷き、その上にB砂を8.8cmの厚さに敷く。 $R=185, 53\text{ mm/h}$ 。なお実験は全て砂層を十分に水で浸した後10~24時間程度放置し、その後に散水を行っており、散水開始時点では砂層は流出しない程度に湿潤状態にあった。流量は斜面末端においてメスシリンダーを用いて測定した。

(ii)実験結果と考察：図1はCASE I, 図2, 3はCASE II, 図4, 5, 6はCASE IIIのハイドログラフを示したものである。これらの図から散水開始直後に流出は立ち上がっていることが認められる。これは散水前に毛管力によって砂層中に残っていた水分が、上方の砂層が飽和(近く)になり支持力を失うことにより重力水として

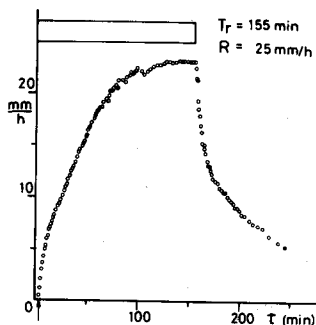


図1 屋内実験で得られたハイドログラフ CASE I

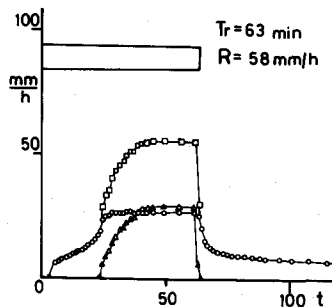


図2 CASE II

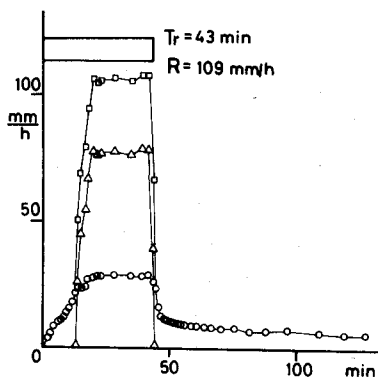


図3 CASE II (図2, 3で○は砂層からの流出量, △表面流出, □全流出量)

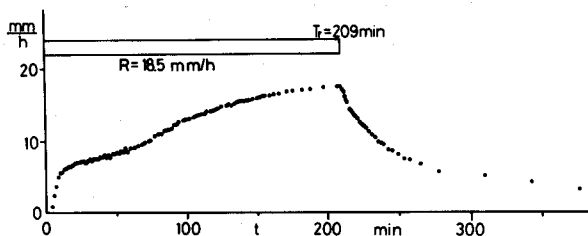


図4. CASE III のハイドログラフ

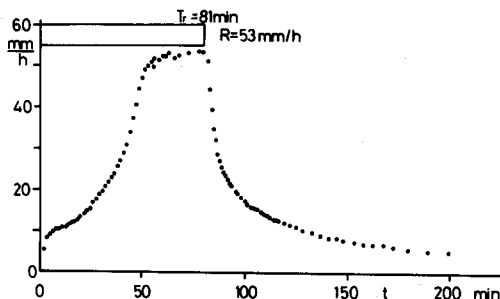


図5. CASE III のハイドログラフ

鉛直に落下し、新たな散水による雨水とともに流出する

からであろう。図2.3のCASE IIでは水路床下流端で分離して測定された浸透層からの流出量と、砂層表面上の流れの流出量および全流出量が示されている。この2図より砂層からの流出量は散水強度にかかわらずほぼ一定値を保っている。よって散水強度の増大に伴い散水量に占める表面流出量の割合は増大することになる。よって散水強度の増大に伴うハイドログラフの形状の違いは主に斜面に沿う最上層の流出成分（ここでは表面流出）の流出波形の変化に起因している。このような流出成分の全体流量に占める割合の変化に関して著者らは実流域における洪水流出の解析から“分離の非線型性”，“時定数スペクトルの降雨強度による変化”として既に見い出している。散水終了後、表面流出は急速に消失し、その後は砂層からの流出が非常に長く続いている。このように長い通減曲線はこれを飽和浸透流（ダルシー則）として解析したときには現われないものであり、流量通減時には不飽和としての浸透特性が効いているものと考えられる。図4.5のCASE IIIで図5は表面流出が無い場合、図6は表面流出が発生している場合であるが、両者の流出波形は全く異なっている。図4の波形はCASE Iの単一砂層の場合の図1と同様の形状をしている。上下二層の透水係数がCASE III程度の違いでは単層の場合と比較して流出波形に大きな差は現われないようである。図6は図7のハイドログラフの通減部を片対数表示したものである。

図中で $t=82\sim 87$ 分までは主に表面流出成分の通減であり、 $t>87$ 分が砂層内流れの通減部である。この図より二層構造をした浸透層からの通減部も exponential形で表わされている部分を有していることがわかる。

(ii)屋外実験および実験装置：上記の散水実験では浸透層として砂を用いていたが、より自然状態に近い浸透層をもった斜面からの流出特性を検討するために図7に示す散水装置を用いて屋外実験を行なった。この斜面（ $1.25\times 1.25\text{m}^2$ 、勾配6/10）は本来の地山である図中の第3層（飽和透水係数23 mm/hの関東ローム層）の上に厚さ25～30 cmの表土層が盛られており、その表面には芝が植えつけてある。芝の直下7～8 cmはスケールの大きい空隙が多く、芝の根が密につまっている（図中第1層）。この層と地山との層（図中第2層）の飽和透水係数は9000 mm/hであり、植物の根はほとんどない。この斜面上方より224本の注射針から一定強度の散水を行なった。本実験の散水強度の範囲（13～187 mm/h）では表面流出は全く発生せず流出はほとんど第2層と第3層の境界面に沿って生じている。本実験では第2層と第3層の地山と境界面に薄い銅板を6 cm程度さし込み、この板をつたって流れ出る雨水を樋に受け、この水をメスシリンダーで測定することにより流量を算出し

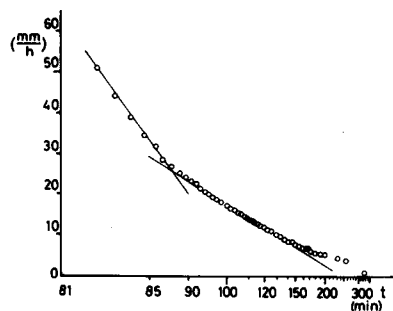


図6. 図5の流出波形の通減部

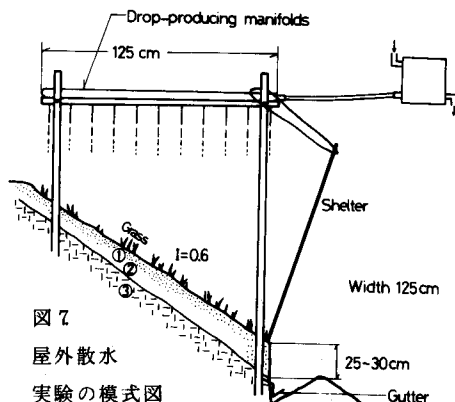


図7

屋外散水
実験の模式図

た。各実験ケースにおける初期水分量を一定にするために本実験を始める前にあらかじめ散水しておき、散水終了1時間後に本実験を開始した。

(iv)実験結果と考察：図8, 9は測定されたハイドログラフの例を示したものである。これらの図より測定されたハイドログラフは基本的には合理式の波形と同じ形状を示している。図10は総散水量と総流出量の関係を示している。この図より総散水量が100 mm以上になると急激に総流出量が増えてくるのがわかる。図11は散水強度に対する定常時の流出高の比(流出係数)を散水強度に関して示したものである。この図から散水強度が50から150 mm/hまでは流出係数はほぼ一定値を示しているが、200 mm/h程度になると急激に大きな値をとるようになる。この時は図7の第1層と第2層の境界面に沿っても流出が出ている。図12は散水開始時から流出開始時までの総散水量(初期損失高)と散水強度の関係を示している。図よりこの小試験地ではほぼ10 mm程度まで散水を行なうと散水強度にかかわらず流出が始まっていることがわかる。図13は散水開始から流出が始まるまでの時間と散水強度の関係を示したものである。この図より散水強度が大きいほど早く流出していることがわかる。流出が始まるためには雨水は盛土を通過し、地山の関東ローム層を十分に潤すことが必要となる。ところで著者らは文献(10)において地山を十分に潤すのに必要とする時間(地層の境界面で湛水が始まる時間、あるいは流出の遅れ時間) t_p を理論的に導いており、

$$t_p = K_s \cdot h_k (\theta_s - \theta_i) / R / (R - K_s) \quad (1)$$

を得ている。ここに K_s は地山の飽和透水係数、 h_k は毛管負圧水頭、 θ_s は飽和時の水分量、 θ_i は初期水分量、 R は地山の上層からの水供給量あるいは降雨強度(一定値)である。

さらに $R \cdot t_p = q_{il}$ は地山に浸透した初期水分量に相当するが(1)式より、

$$q_{il} = K_s \cdot h_k (\theta_s - \theta_i) / (R - K_s) \quad (2)$$

となる。上記(2)式より初期水分量は降雨強度 R に反比例する。図12の初期損失高には図7の第2層の土壌中

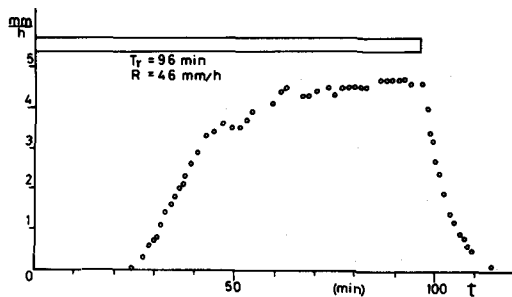


図8 屋外散水実験のハイドログラフ

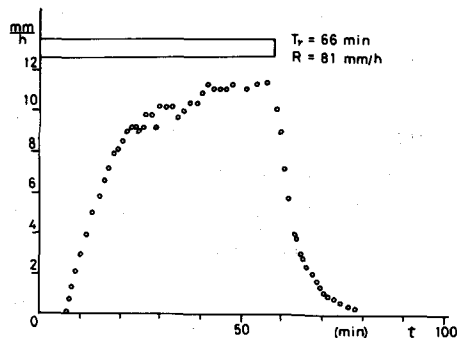


図9 屋外散水実験のハイドログラフ

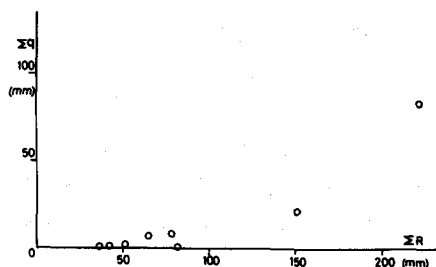


図10 総散水量と総流出量の関係

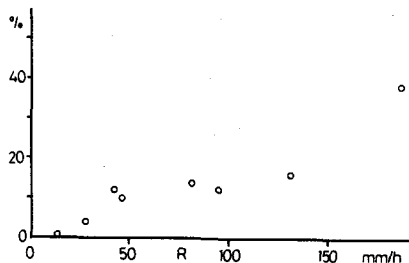


図11 散水強度と流出係数

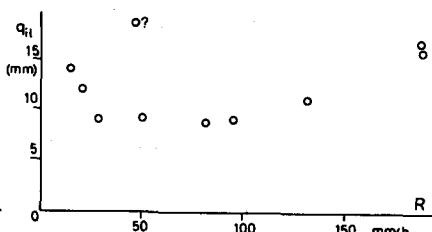


図12 散水強度と初期損失高

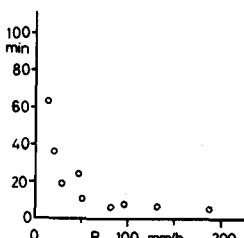


図13 流出の遅れ時間

に滞留している水分量も含まれているために(2)式と図12の結果を直接比較することはできないが、流出の遅れ時間に関しては(1)式と図13の結果はよく一致している。このことから本実験において流出の遅れ時間を支配しているのは表土層の特性よりもむしろ地山の土壌特性と降雨強度であると言えよう。図14は第2層と第3層の境界面に沿う流れを飽和浸透流とみなし、流出波形の立ち上がり部の流量 $q(t)$ に合理式の $q(t)=v'_0 R t$ (v'_0 は第2層の浸透流速)を適用して求めた v'_0 と散水強度との関係を示すものである。この図より斜面方向流速 v'_0 は散水強度にかかわらずくほぼ一定値を示している。

3. 不飽和浸透理論による雨水の鉛直浸透の解析

前述の2節では主に散水量と流出量の入出力量だけを用いて小試験地の流出特性を論じているため、土壌中での雨水の挙動については何も触れられていない。一般に土中での雨水の挙動を散水中に調べることは実験的に非常に困難である。特に土中のある断面をよぎる流量フラックスを直接測定することは不可能に近い。よってここでは不飽和浸透理論を用い、これを数値的に解くことにより土中を鉛直浸透する雨水の挙動を検討した。

(i)不飽和浸透理論と初期、境界条件：本研究では鉛直一次元浸透を考え、土壌特性は鉛直方向に一樣な場合を扱う。また本実験のように土壌表面では湛水が生じない程度の降雨強度 ($R \ll K_s$) を用いて計算している。このとき不飽和浸透の基礎式はつぎのようである²⁾。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right\} - \frac{dK(\theta)}{d\theta} \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad (3)$$

ここに θ は水分量、 z は鉛直座標(向きを正とし、 $z=0$ が土壌表面)、 $D(\theta)$ は水分拡散係数、 $K(\theta)$ は不飽和透水係数である。ここでは毛管ポテンシャルに及ぼす土中水分 θ の履歴効果は無視されている。土中の単位断面積をよぎる流量フラックスを $q(t, z)$ とすると $q(t, z) = -D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} + K(\theta) \dots \dots \dots (4)$ が成立している。このとき(3)式の境界条件は $z=0$ で $q(t, 0) = R$ (降雨強度)である。一方初期条件としては全断面で一定値の θ_i を用いる。(3)式の差分計算には非線型Crank-Nicolson法を用いている。つぎに得られた θ を(4)式に代入することにより、各断面をよぎる流量 $q(t, z)$ を求める。

(ii)計算結果と考察：計算に用いた土壌はその飽和透水係数 K_s が林地斜面の土壌の K_s のオーダーであるRehovot sand¹³⁾を用いた。この土壌の $\theta-K(\theta)$ 、 $D(\theta)$ 、 ψ (毛管ポテンシャル)の関係は表-1に示されている。

なおこの土壌の空隙率は0.387である。以下に初期水分量、降雨の特性等の違いによる各深さ Z での $q(t, z)$ の変化が調べられている。(a)降雨継続時間 Tr の効果：図15は降雨の継続時間 Tr をさまざまに変えたときの土中各深さでの流量波形 $q(t, z)$ の変化を示している。この図より土中の各深さまでの飽和水分量の到達時間と降雨継続時間 Tr の大小により、 $q(t, z)$ の形状は大きく違っていることがわかる。この関係は合理式における雨水の集中時間と Tr の関係と同じものである。降雨終了後の $q(t, z)$ は立ち上がり部に比べて非常に長い逓減部をもっている。これは後に示す線型飽和理論では現われない現象であり、不飽和浸透の特性の一つとしての水分量低下にともなう水分移動速度の減少に起因している。このことは流出問題を考えるときに、非常に遅い流出成分が存在することになり、これは従来の流出解析の中で遅い中間流出成分や地下水流成分とした考えられてきたものへの入力量となり得る。(b)降雨強度 R の効果：本研究の数値計算では降雨強度は時間によって変化しない場合が扱われている。図16, 17は $R=30$ および 60 mm/h の場合の

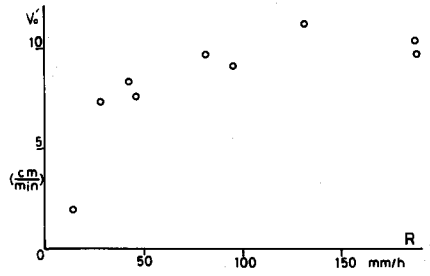


図14. 散水強度と斜面方向流れの流速

表 1. Rehovot sandの不飽和特性¹³⁾

θ	ψ (cm)	$K(\theta)$ (cm/s)	$D(\theta)$ (cm ² /s)
0.01	-282×10^5	2.95×10^{-13}	3.12×10^{-5}
0.05	-75	6.12×10^{-6}	7.61×10^{-3}
0.10	-43	6.39×10^{-5}	2.06×10^{-2}
0.15	-32	1.65×10^{-4}	2.45×10^{-2}
0.20	-26	4.18×10^{-4}	3.83×10^{-2}
0.25	-22	1.06×10^{-4}	7.49×10^{-2}
0.30	-19	2.69×10^{-3}	1.82×10^{-1}
0.35	-15	6.81×10^{-2}	5.40×10^{-1}
0.38	-13	1.19×10^{-2}	1.12
0.387	-12	1.33×10^{-2}	1.13

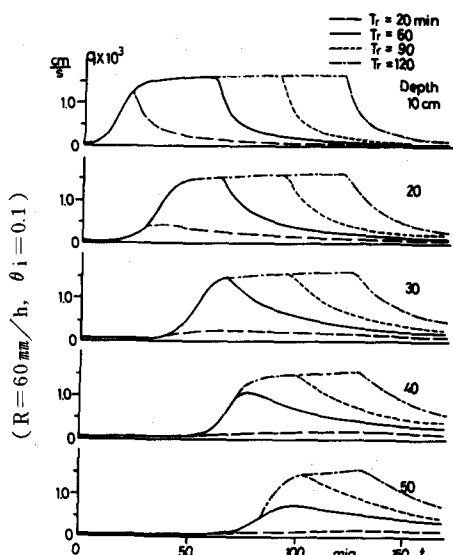


図 15 降雨継続時間 T_r の $q(t, z)$ に与える影響

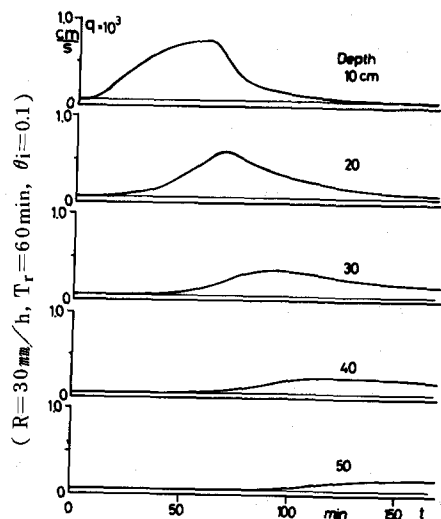


図 16 降雨強度 R の $q(t, z)$ に与える影響

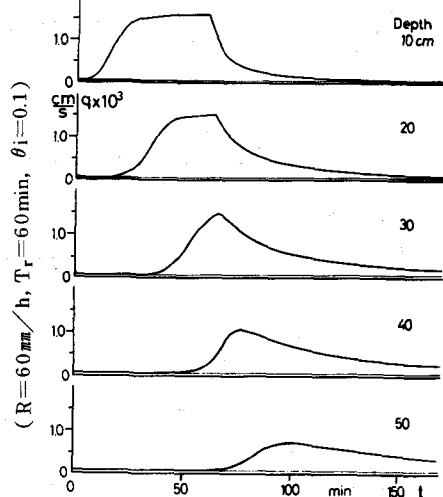


図 17 降雨強度 R の $q(t, z)$ に与える影響

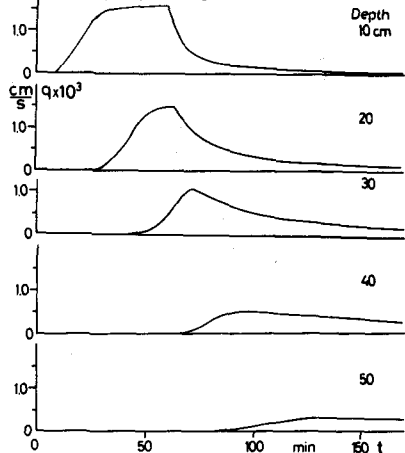


図 18 降雨強度とピーク水分量の 10% 値が現れる時刻

図 19 初期水分量の影響 ($\theta_i = 0.05$)

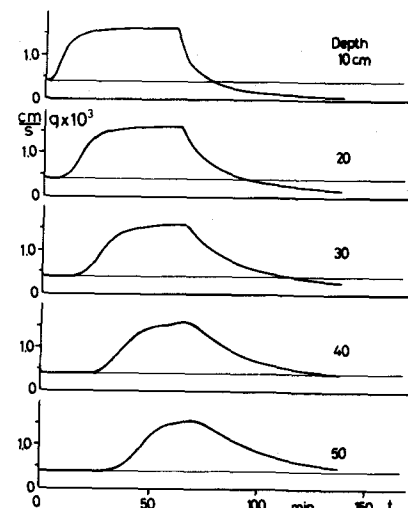


図 20 初期水分量の影響 ($\theta_i = 0.2$)

$q(t, z)$ を示している。図18は各深さでの水分量がピーク流量の10%値に達する時刻と降雨強度との関係を示している。これらの図より各深さでのピーク流量(の10%値)の出現時刻は降雨強度とともに早くなっていることがわかる。この浸潤前線の移動速度を V_f とすると、次に述べる初期水分量の効果と合わせて次のように近似し得る。 $V_f \doteq R/(\theta_R - \theta_i)$ ……………(5) ここに θ_R は $R = K(\theta_R)$ で与えられる水分量である。(5)式は R と土中での流量フラックスの連続関係を示しているが、この式より雨水の土中での鉛直浸透速度は降雨強度に比例し、土壌が満たし得る水分量 $\theta_R - \theta_i$ に反比例することがわかる。これは実流域の降雨流出において出水開始時刻は降雨強度に比例して早くなり、初期水分量が小さい(よく乾いている)ほど遅くなるという現象に対応しているものと考えられる。(c)初期水分量の効果: 図19, 20は図16, 17の場合の Tr, R を用いて、初期水分量がそれぞれ0.05と0.2の場合の $q(t, z)$ を計算したものである。この2図より初期水分量の違いによる $q(t, z)$ の変化は深さが増すとともに顕著になっている。すなわち θ_i が大きいときは各深さごとの $q(t, z)$ の波形の変形は小さく、かつ大きい移動速度をもっているのに対して、 θ_i が小さい場合には降雨波形は大きく引き伸ばされ、かつその移動速度も小さい。図21は降雨強度を変えたときの土中の各深さごとの流量逓減部の挙動を示したものである。この図より降雨強度の大小にかかわらず $q(t, z)$ は1つの逓減曲線に漸近していることがわかる。これは実流域における標準逓減曲線の存在に対する一つの理論的根拠を与えるものであろう(上記の結果は雨水の土中での鉛直浸透に関するものではあるが)。

4. 線型理論による雨水の土中での飽和浸透解析

(i)線型理論とその解: 不飽和浸透理論は不飽和としての特性と非線型性の両者が混入しており、雨水の浸透過程を定性的に議論することは困難である。よってここでは(3)式のもつ基本的な特性と保持した飽和線型理論式を構成し、その解の挙動を検討することにより、逆に不飽和としての雨水の浸透現象を考察した。(3)式で $D(\theta) = B = \text{const.}$, $dK(\theta)/d\theta = A = \text{const.}$ とし、水分量 θ でなく流量フラックス $q(t, z)$ に関する方程式をつくると、

$$\frac{\partial q}{\partial t} + A \frac{\partial q}{\partial z} = B \frac{\partial^2 q}{\partial z^2} \quad (6)$$

となる。この式を $t=0$ で $q(0, z)=0$, $z=0$ で $q(t, 0)=R$, $z \rightarrow \infty$ で $q \rightarrow 0$ の初期および境界条件のもとに解くと、

$$q(t, z) = \int_0^t R(\tau) \varphi(t-\tau, z) d\tau \quad (7)$$

$$\varphi(t, z) = \frac{z}{2\sqrt{\pi B t^3}} \exp\left(\frac{Az}{2B}\right) \exp\left(-\frac{A^2 t}{4B} - \frac{z^2}{4Bt}\right) \quad (8)$$

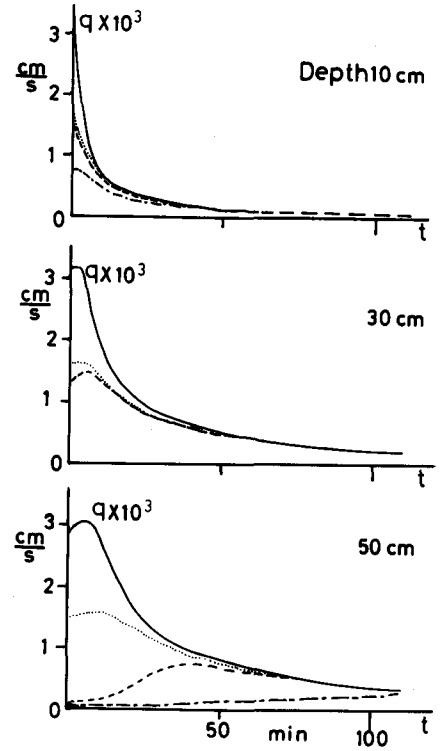


図21. $q(t, z)$ の逓減部の深さによる変化

となる。降雨としてその強度を R (一定値), 継続時間を Tr とする矩形波で与えると、

$$q(t, z) = H(t, z) - H(t - Tr, z) \quad (9)$$

$$H(t, z) = R \cdot \exp\left(-\frac{Az}{2B}\right) \cdot \left\{ \cosh\left(\frac{Az}{2B}\right) - \frac{1}{2} \left\{ \exp\left(-\frac{Az}{2B}\right) \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{A\sqrt{Bt}}{2B} + \frac{z}{2\sqrt{Bt}}\right) - \exp\left(-\frac{Az}{2B}\right) \operatorname{erf}\left(\frac{A\sqrt{Bt}}{2B} - \frac{z}{2\sqrt{Bt}}\right) \right\} \right\} \quad (10)$$

となる。ここに $\text{erf}(\)$ は誤差関数である。(7)式は鉛直浸透における流量フラックスの瞬間単位図(応答関数)となっている。

(ii)計算結果と考察: 以下の計算では土壌として前述の Rehovot sand が用いられている。(6)式中の A は水分量の移動速度であるので(5)式の V_f を用いている。 $B(=D(\theta))$ は $q(t, z)$ の波形の立ち上がり部が3の数値計算結果と最もよく合うように選ばれ、ここでは $50 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{s}$ が用いられている。図22, 23は降雨強度として 60mm/h と 90mm/h の2種類につき(9), (10)式にもとづき計算した線型理論解 $q(t, z)$ を示している。この2図より(6)式にもとづく計算結果は基本的には合理式に若干の補正((6)式では拡散項)が加わった形状を示しているのに対して、(3)式の結果は波形の非対称性が著しく、特に通減部における長いすそが特徴的である。両者の違いはこのように通減部において現われるが、これは流量通減部における土中水分量の低下にともなう水分移動速度の低下、および水分拡散係数の減少にもとづくものであり、既述のように不飽和としての特性である。このように(6)式にもとづく雨水の鉛直浸透は必ずしも不飽和浸透の特性を現わさないが、現象を支配するパラメータが明確であり、解析解を得ることができるなど定性的な議論を行なう場合には適しているように思われる。

5. 線型理論による斜面からの雨水流出の解析

ここでは厚さ h 、長さ ℓ の一様土質の浸透場(基岩の上にある)の上方に降雨が与えられたときの斜面末端からの流出量が解析的に導かれる。流れは全て浸透流の場合のみを扱う。本節の目的は降雨と流出量の関係を定量的に与えることではなく、降雨流出の関係に占める斜面の土壌厚 h や、斜面長 ℓ および降雨特性の効果を定性的に検討することである。

理論構成と結果: 斜面に沿う浸透場に鉛直上方より $q(t)$ の入力(ここでは厚さ ℓ の土壌中を鉛直に浸透してきた雨水の流量フラックス)が与えられたとき、長さ ℓ の斜面末端における単位幅当りの流出量 $Q(t, \ell)$ は著者の一人によって理論的に導かれている。この $Q(t, \ell)$ 中の $q(t)$ に上記の解(9)式を代入すると、土質等の特性のわかっている斜面に降雨が与えられたときの流出量 $Q(t, \ell)$ は解析的に得られ、

$$Q(t, \ell) = \int_0^t R(\tau) \phi(t-\tau) d\tau \quad (11)$$

$$\phi(t) = \int_0^t \varphi(t, h) K(t-\tau, \ell) d\tau \quad (12)$$

となる。ここに $K(t, \ell)$ は斜面に沿う飽和流れの鉛直方向流量フラックス $q(t, h)$ に対する応答関数である。(11)式より $\phi(t)$ は考えている斜面における降雨 $R(t)$ に対する流量 $Q(t, \ell)$ の応答関数(瞬間単位図)になっていることがわかる。(12)式の具体的な形式は非常に長くなるのでここでは省略する。(12)式の $\phi(t)$ は A , B , a , b , h , ℓ を用いて無次元化することができ、このとき無次元パラメータとしては Ah/B , $b\ell/a$, $Bh/\ell A$ の三つが得られる。ここに a , b はそれぞれ斜面に沿う流れの拡散係数および真の流速である。三つのパラメータのうちの前二者はそれぞれ雨水の鉛直浸透および斜面方向流れにおける移流項と拡散項の比になっている。一方最後のパラメータは雨水が鉛直および斜面に平行に流れ下るときに要する到達時間の比になっている。この三つのパラメータは水理学、流体力学におけるフルード数やレイノルズ数と同様に均一土質の斜面に降雨が与えられたときの流出現象を支配する相似パラメータとなっている。図24は(12)式の瞬間単位図

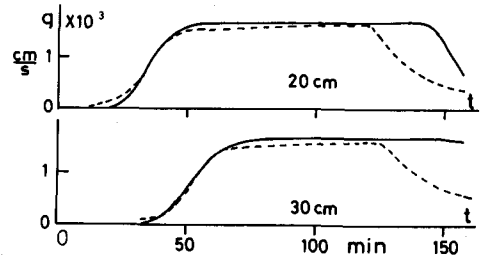


図22. 線型理論による $q(t, z)$ (—; 線型解, ----; (3)式による。 $R=60 \text{mm/h}$, $T_r=120 \text{min}$, $\theta_i=0.1$)

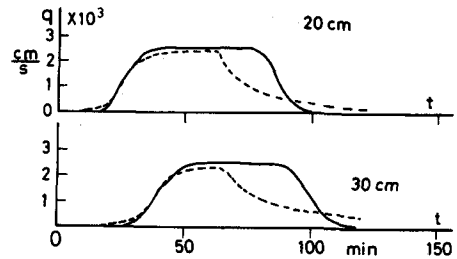


図23. 図22に同じ ($R=60 \text{mm/h}$, $T_r=120 \text{min}$, $\theta_i=0.1$)

の一例として降雨強度に対する $\phi(t)$ の変化を示すものである。この図より $\phi(t)$ は降雨強度の増大とともに立ち上がりは早くなり、降雨強度に対する $\phi(t)$ の非線型性を示している。さらにこの応答関数の全体形状はガンマ分布と同様の単峰形としている。著者の一人(山田)は文献(9)において流域全体からの流出をさまざまな時定数をもった応答関数の集合としてとらえる時定数スペクトルの考え方を提案しており、応答関数としてはガンマ分布の関数形を用いている。上記の結果はこれに対して物理的な根拠を与えるものになっていると言えよう。

6. 結 論

本研究においてははじめに屋内散水実験を行ない、理想化された浸透場における降雨と流出の基本的な特性を検討した。この結果①矩形ハイトグラフに対して合理式に拡散項の補正が加わった形のハイドログラフを得た。②散水前に砂層中に残っていた水分は散水開始直後にす早く流出する。③砂層の鉛直二層構造は(本実験の範囲では)流出波形に大きな変化を与えない。④流出波形に大きな変化を与えるのは表面流出の存在である。⑤表面流出成分の大小にかかわりなく浸透流出成分はほぼ一定の波形を示す、等の特性が明らかになった。つぎにより自然状態に近い斜面において屋外散水実験が行なわれた。この結果①流出は透水係数の非常に異なった二つの土壌の境界面において斜面に沿って流出する。②散水強度の増大に伴い流出係数は増大する。③流出を開始するためにはある一定(10 mm)の流量の累積を必要とする。よって散水強度が大きいほど早く流出は開始する。以上の特性が明らかになった。これらの実験に対して特に雨水の鉛直浸透を明らかにする目的で不飽和浸透理論の数値計算を行なった。このとき得られた結論は、①土中の単位断面をよぎる流量フラックスは通減部において非常に長いすそをもっている。これは遅い中間流出成分への入力量となり得る。②雨水の鉛直浸透速度は降雨強度に比例し、初期水分量に反比例する。③通減部は降雨の強度やその継続時間、初期水分量の大小にかかわりなく一本の曲線に漸近する。以上である。最後に一つの斜面における降雨と流出量の関係を線型理論を用いて解析的に導いた。この結果①瞬間単位図は降雨強度の増大とともに早く立ち上がる。②その全体形状はガンマ分布形を示す等の特性が明らかになった。以上である。

おわりに 本研究の遂行にあたり著者の一人(山田)は東京工業大学土木工学科より奨学金の補助を受けた。ここに記して感謝の意を表わす。

参 考 文 献

- 1) 高棹琢馬：出水現象の生起場とその変化過程，京大防災研究所年報，第6号，1963.
- 2) Kirkby, M.J.(ed): Hillslope Hydrology, John Wiley.
- 3) 吉川・山田：浸透流に関する水理学的研究，Ⅰ，Ⅱ，Ⅲ，Ⅳ，東京工業大学土木工学科研究報告 № 25, 1979.
- 4) 山田：山地小流域における瞬間単位図と時定数スペクトルについて第35回年次学術講演会概要集第2部門, 1980.
- 5) 日野・山田・田所：砂層内の降雨鉛直浸透に関する実験的研究，第35回年次学術講演会概要集第2部門, 1980.
- 6) 日野・山田・藤田：小試験地における雨水の流出過程に関する研究，第36回年次学術講演会概要集第2部門, 1981.
- 7) 日野・山田・藤田：降雨鉛直浸透とその流出特性に及ぼす影響について，第36回年次学術講演会概要集第2部門, 1981.
- 8) 山田：山地小流域における瞬間単位図と斜面長分布の関係，土木学会論文報告集，№ 306, 1981.
- 9) 山田：時定数スペクトルを用いた山地小流域の洪水流出解析，土木学会論文報告集，№ 314, 1981.
- 10) 藤田・日野・山田：ダルシー則に基づく降雨鉛直浸透の解析，水理講演会論文集，1982.
- 11) 吉川・砂田・フン：洪水流量通減曲線の特性を考慮した流出モデルに関する研究，土木学会論文報告集，№ 283, 1979.
- 12) 日野・長谷部：流量時系列のみによる流出解析について，土木学会論文報告集，№ 300, 1980.
- 13) Rubin, J., R.Steinhardt and P.Reiniger: Soil Soc. Am. Proc., Vol. 28, 1964.

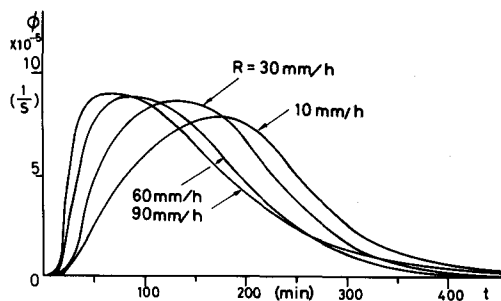


図 24. 斜面における瞬間単位図の一例
($\ell = 200\text{cm}$, $h = 20\text{cm}$, $\lambda = 0.25$,
 $i = 0.3$, $K_s = 0.015\text{cm/s}$)