

降雨実験による畑地模型の表面流出について

森 脇 寛*

国立防災科学技術センター

An Experimental Study on Surface Runoff from a Farm Model

By

Hiromu Moriwaki

National Research Center for Disaster Prevention, Japan

Abstract

Runoff experiments were carried out to investigate the characteristics of surface runoff from a farm model under different surface conditions, using a rainfall simulator. The farm model, made by loamy soil, had an area of 15 m in length, 4 m in width and a slope of 5 degrees. Its surface conditions were the following three:

- (1) no cultivation and no vegetation,
- (2) with cultivation but without vegetation, and
- (3) with grass cover grown one year after cultivation.

The results obtained are summarized as follows: Surface runoff in case (1) was extremely large in comparison with those in cases (2) and (3); it was approximately twice as large as in cases (2) and (3) at a rainfall intensity of 60 mm/hr. No remarkable difference was observed in case (2) and in case (3). However, surface runoff increased with rainfall intensity in each of the three cases. A linear relationship was also found between peak runoff ratio and rainfall intensity in each. The relationship can be expressed by following functions when the rainfall intensity is between 30 mm/hr and 90 mm/hr:

$$f_p = \frac{1}{3} R_t + 40 \quad \text{for case (1),}$$

$$f_p = \frac{1}{3} R_t \quad \text{for cases (2) and (3),}$$

where, f_p : peak runoff ratio (%), and
 R_t : rainfall intensity (mm/hr).

* 第3研究部降雨実験室

The peak runoff ratios obtained in this experiment and other field studies on farm areas of loamy soil fall within the two functions mentioned above. The final infiltration rates of cases (1), (2), and (3) are 15 mm/hr, 33 mm/hr, and 28 mm/hr, respectively, and the amount of interception of grass coverage is about 1.5 mm.

It is concluded that cultivation gives a serious effect on the retardation of surface runoff.

1. はじめに

近年、都市化に伴い、土地利用形態の人為的改変が急速に進んでいる。著しい改変は自然の調和を破壊し、種々の災害を生じやすくさせている。なかでも水害による被害は著しく増大する傾向にある。これには次のような原因が考えられる。農地や林地を造成して、工場や宅地に転換すると、流域の不浸透面積の増加、凹地貯留機能の低下などにより、降水のうち地表面を流下する水は増え、流下速度は大きくなる。流域末端では洪水到達時間の短縮、ピーク流量の増加となってあらわれ、洪水・はん濫が生じ易くなる。この問題に対処するには土地改変による洪水流出の変化を事前に評価することが大切である。評価の手法にはいろいろあるが、まず第一にそれらの基礎資料となる林地、畑地、水田などの個々の土地利用形態が示す流出特性、特に短期的な水収支に直接影響する表面流出について定量的に把握する必要がある。

ここではそのひとつとして、畑地の流出特性をとり上げた。畑地は水田とならんで雨水の貯留能が大きく、多量の降雨でもなければ表面流出はみられないとされているが、その流出特性についてはあまり明らかにされていないのが現状である。本稿では畑地の流出に関する要因のうち、表面流出と密接な関係にある降雨強度と地表条件を対象をしぼり、これらの要因が表面流出に及ぼす影響について考察することにした。研究手法としては主に現地観測による方法と散水実験による方法があるが、ここでは後者の方法を採用した。散水装置と実験用水の確保さえできれば、任意の降雨条件を再現することができ、長期間の年月を必要とする現地観測に比べて、短期間に数多くの資料が得られるからである。実験は国立防災科学技術センター大型降雨実験施設を利用して行ったもので畑地模型を用いている。畑地の地表条件として裸地（無耕作）、裸地（耕作）、草地の3つのモデルを対象とした。降雨実験の結果からハイドログラフ、ピーク時流出率、浸透能、植生の貯留効果について検討を加え、異った地表条件のもとでの畑地の流出特性を明らかにした。

2. 実験方法

実験の手順は次のようである。国立防災科学技術センター大型降雨実験施設内に関東ロームを用いて畑地模型の斜面を製作し、地表面の状態が異った3ケースについて散水実験を行ったものである。以下では実験斜面と表面流集水部、散水装置、実験条件、計測項目と方法について述べる。

2.1 実験斜面と表面流集水部

本実験の主な作業は表面流の計測である。斜面下端で表面流を消失させることなく、しかも中間流と分離して集水する必要がある。この点に留意しながら実験斜面の製作にあたった。実験斜面の規模・形状は図1に示すとうりである。斜面の水平長15m、幅4mの実験区画をもち、勾配は5°の斜面である。斜面製作に用いた土は国立防災科学技術センター構内で採土した有機質に富む関東ロームで、畑土として使用されていたものである。このロームの粒度分布を図2に示す。比重は2.55である。実験区画以外の斜面表面には侵食による土砂流出や

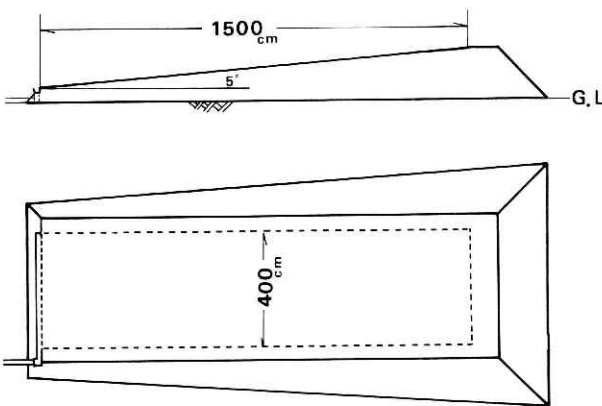


図1 実験斜面
Fig. 1 Farm model

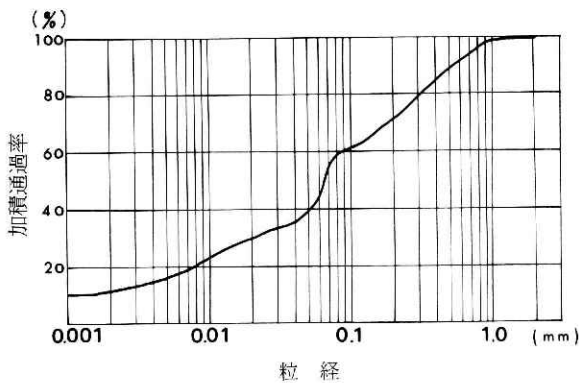


図2 畑土（ローム）の粒度分布
Fig. 2 Grain size distribution of soil

崩壊防止のために張芝を植え込んだ。

斜面の表面流計測に際して工夫した点について述べる。散水によって実験区画内に発生した表面流だけを斜面下端に流下させるために、実験区画の上端と側方に高さ 70 cm の硬質ビニール製波板を地表面から深さ 50 cm まで打ち込み、実験区画の内と外を仕切った。そして斜面下端では表面流を集水するために、幅 40 cm のトタン板を地表面から 5 cm の深さに斜面と平行に、実験区画の幅 4 m にわたって埋設した。さらにこのトタン板の下端側の下に硬質ビニール製雨樋 (12 cm ϕ) を設置し、トタン板より上部土層を通過した雨水をこの樋で集水できるようにした (写真 1)。この雨樋に流下した雨水は、樋の右端から硬質ビニール製パイプ (10 cm ϕ) を通して約 4 m 離れた三角堰 (開角 30°) に流れ込むようになっている。斜面下端で表面流だけをとるには、このトタン板をなるべく地表面近くに埋めるのが良いが、あまり地表面近くに埋めると侵食作用によってトタン板の下側に水みちを生じ、漏水する可能性もある。逆にトタン板を深く埋めれば漏水の心配はないが、中間流成分まで集水することになる。そこで一応の目安として地表面から 5 cm の深さに埋めることにした。この集水システムによって、斜面下端を通過する雨水のうち地表面から 5 cm 以浅の土層を通過する雨水は全て表面流と定義し、それを集水することになる。一方、斜面下端で地表面から 5 cm 以深の土層を通過する雨水は斜面下端の切り取り面から自由に浸出する構造となっている。

2.2 散水装置

散水装置は国立防災科学技術センター大型降雨実験施設を利用した。この施設の概略を以下に記す。詳細については大型降雨実験施設要覧 (1982) を参照して頂きたい。本施設の最



写真 1 斜面下端部の集水部

Photo 1 Water catchment system at the lowest end of the model

大散水面積は $72\text{ m} \times 44\text{ m}$ である。ただし、実験の規模や目的に応じて $1/4$ 区画に分割して使用することもできる。雨滴の粒径は $0.3 \sim 1.0\text{ mm}$ で、 $15 \sim 200\text{ mm/h}$ の範囲ならば任意の降雨強度を選択し、散水することができる。また、散水用ノズルから地上までの高さは 16 m あり、雨滴が終末速度に達するのに必要な高さ(約 10 m) は十分にある。その他、本施設は実験に使用した雨水を再利用する循環方式と所定の実験敷地(5敷地)へ移動できる自走方式をとり入れているので、大規模な実験を効率的、経済的に行える特徴をもっている。

2.3 実験条件

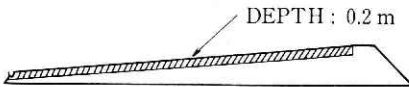
2.3.1 地表条件

ここで使う地表条件は表土および植物などの地上部までを含めてあつかっている。地表の状態は降雨特性とともに表面流出を左右する大きな因子である。林地では、森林伐採後の直接流出量が伐採前に比較して $1.5 \sim 2.0$ 倍に増加した例があり(中野, 1976)、また、ササ生地と裸地では浸透レートの減衰に変化がみられる(村井, 1971)などの報告がある。畑地の場合、農作業により地表面の状態は変化する。耕作すれば土壤の孔隙は増加して保水能は良くなるであろうし、植生の成長によってもその地表状態は異ってくるであろう。本実験ではこのような状況を考慮して、図3に示すような裸地(無耕作)、裸地(耕作)、草地の3つの地表面モデルについて、流出特性を比較することにした。実験は裸地(無耕作)、裸地(耕作)、草地の順に行なった。実験斜面は一つなので、一つの地表面モデルについて一連の散水実験を行い、終了した後に次の地表面モデルの製作にとりかかった。実験はいずれも夏季に行った(写真2)。草地条件の製作については、裸地(無耕作)、裸地(耕作)の実験終了後、大型

裸地(無耕作) $Dr = 0.734$



裸地(耕作) $Dr = 0.555$



草地 $Dr = 0.618$



図3 地表状態 (Dr : 乾燥密度)

Fig. 3 Three surface conditions

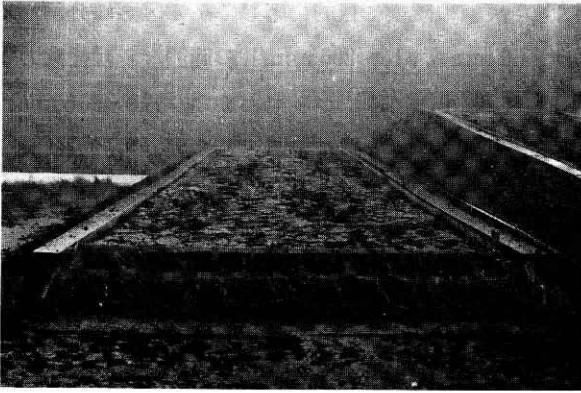


写真2 実験中の裸地(耕作)斜面

Photo 2 Cultivated model under experiment

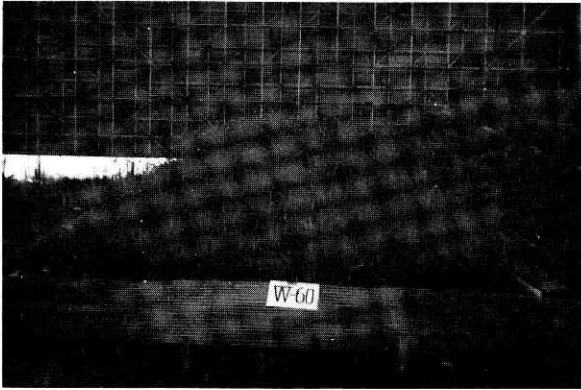


写真3 草地斜面

Photo 3 Grass covered model

表1 地表条件

Table 1 Surface conditions

地表の条件	乾燥密度 (g/cm ³)	間ゲキ率 (%)	飽和透水係数 (cm/sec)	製作方法
(a)裸地 (無耕作)	0.734	71.22	2.7×10^{-3}	地表面をプレート転圧機により同一地点につき2回突き固めた。
(b)裸地 (耕作)	0.555	78.43	2.0×10^{-2}	地表面から深さ20cm程度の土層を実際の農作業と同じように万のうと鋤で耕やした。
(c)草地	0.618	75.76	1.4×10^{-2}	(b)の実験終了後、一年間屋外に放置し、植生の自然侵入をはかった。主な植生はスゲ、ヨモギ類などで、0.7m高さまでうつ閉状態にある(写真3参照)。

降雨実験施設を隣接する実験敷地に移動させ、実験斜面を翌年の夏まで屋外放置の状態にして、植生の自然侵入をはかった(写真3)。そして実験斜面内に自然侵入した植生が最盛期をむかえた頃、大型降雨実験施設を元の位置に戻して実験を行った。表1は3つの地表条件の概略を示している。表1で乾燥密度、間ゲキ率、飽和透水係数の数値はそれぞれの条件の地表面5ヶ所からサンプリングした試料の結果を平均したものである。裸地(無耕作)の場合は他の2条件に比較して、乾燥密度も高く、飽和透水係数も約1/10程度低い値を示している。草地条件の乾燥密度が裸地(耕作)条件の場合に比べて高いのは、屋外に一年間放置したことによって自然に土層が緊密化したもので、人為的には全く手を加えてはいない。

2.3.2 降雨条件

降雨特性はいろいろな条件が考えられるが、どの程度の降雨強度で何時間継続すれば表面流出が発生するかを調べることを目的としているので、ここでは、複雑な降雨特性を考えないで矩形波、つまり一定降雨強度の雨を与えることにした。表2に実験で用いた降雨条件を示す。散水は表面流出量が定常化するまで継続して行った。実験で設定した雨量を各地表条件と比較し易いように15, 30, 60, 90, 120 mm/hとしたが、ノズルの目づまりなどによって均等に散水しなかったため、実測による雨量では多少のばらつきを生じている。また、3つの地表面モデルによる比較実験であるから、できる限り初期含水比をそろえることが望ましい。そこで各地表条件ごとに予備散水を行ない、その後1週間に1度の割合で散水実験を行うことにした。これにより同一地表条件では表2に示すようにほぼ同じような含水比が得られた。

2.4 計測項目と方法

先にも述べたように、本実験の主な作業は表面流出量の計測にある。この他、土壌水分量、

表2 実験条件

Table 2 Experiment conditions

地 表 条 件	降 雨 強 度	散 水 時 間	初 期 含 水 比	ピーク時流出率	表 面 流 発 生 時 間
裸 地 (無耕地) 乾燥密度 0.734	19(mm/h)	80(min)	85.9(%)	44.7(%)	10(min)
	37	60	74.5	52.9	8.5
	59	21	72.7	63.3	5
	90	20	80.3	74.4	2.5
裸 地 (耕作) 乾燥密度 0.555	20(mm/h)	91(min)	83.6(%)	7.5(%)	11(min)
	35	90	76.0	12.2	9
	73	75	76.3	37.7	4
	103	40	80.0	35.0	2
草 地 乾燥密度 0.618	28(mm/h)	300(min)	75.1(%)	10.7(%)	13.5(min)
	66	151	52.2	30.3	8
	83	121	72.8	39.8	4
	120	90	65.8	44.2	4

降雨量の計測も行っている。以下にそれぞれの項目について説明する。

- (1) 表面流出量：表面流の集水方法については 2.1 実験斜面と表面流集水部の項で説明したので省略する。斜面下端で集水した表面流は三角堰（開角 30°）に流入させ、その水位を計測技研KK製のサーボ式水位計（sw 202, 精度±0.5 mm）を用いて計測し、渡辺測器KK製のペン書きレコーダー（マルチコーダー）で記録した。三角堰の水位—流量曲線は理論的にも計算できるが、小流量の場合、ノッチ部の形状・性質によっても異なり、誤差も大きくでる恐れがあるため、直接に水位—流量曲線を検定したものを使用した。斜面下端で雨樋に集水した表面流が三角堰に到達する時間は、流量の大小によっても異なるが、雨樋の最遠点から約 20～40 秒である。
- (2) 土壌水分量：土壌水分と表面流出の発生は密接な関係にある。本実験では直接、斜面から供試土を採取し、土質試験法 A 1203—1970 にしたがって土中に含まれる水分量を測定した。採取深さは地表面と 10 cm, 15 cm 深さである。
- (3) 降雨量：降雨量は表面流出の入力となる重要な因子である。大型降雨実験施設の流量計で設定した雨量と実際に地表面で計測する雨量とはノズルの目づまりなどから異なる場合がある。広い面積を散水する場合とくに注意を要する。そこで転倒升型自記式雨量計（0.5 mm/転倒）1 台の他に、実験斜面上の 5ヶ所に硬質ビニール製円筒（直径 20 cm, 高さ 30 cm）を配置し、実験終了後各円筒に湛水した深さの平均値を総雨量とした。この総雨量を散水時間で除したものを降雨強度として扱い、自記式雨量計による雨量記録と比較検討した上で用いた。

3. 実験結果および考察

3.1 ハイドログラフの特徴と地表面湛水状況

散水実験で得られたハイドログラフを各地表条件ごとにまとめたものが図 4, 5, 6 である。3 条件とも降雨強度が大きくなるにつれて、ハイドログラフの立ち上がりの勾配は急になり、定常化するまでの時間は短くなってきている。以下では各条件ごとにハイドログラフの特徴と地表面の湛水状況をあわせて述べ、比較検討する。

- (a) 裸地（無耕作）：19, 37 mm/h の降雨時のハイドログラフはいずれも緩やかな単調増加を示しており、定常化するまでの時間はかなり長い。59, 90 mm/h の降雨時にはハイドログラフの立ち上がりの勾配は急激になり、ほぼ直線に近い。地表面の観察によると、59 mm/h の降雨の場合は降雨開始より約 10 分経過後、90 mm/h の降雨では 5 分経過後に斜面全体が湛水状態になっているのに対し、37 mm/h の降雨では 10 分経過後でも斜面下方に水みち程度のわずかな湛水域が生じているだけである。25 分経過後もその面積はわずかしか増えていないようである。図 7 の(a)によれば 37 mm/h の 30 分経過後の土層中の水分量は地表

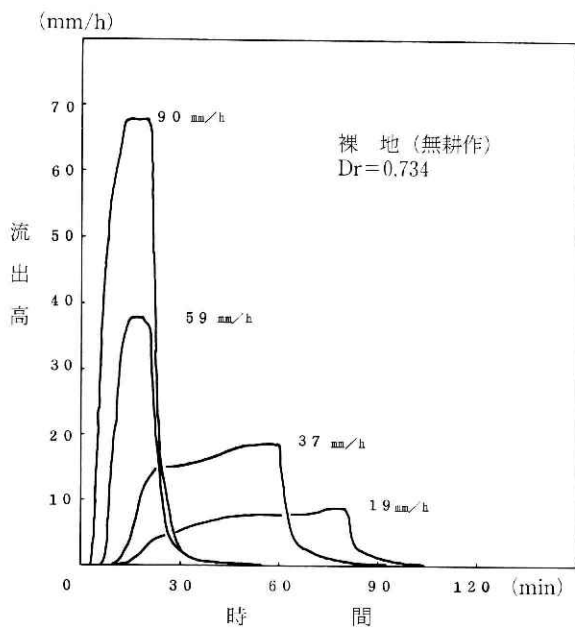


図4 裸地 (無耕作) のハイドログラフ

Fig. 4 Hydrograph in the case of no cultivation

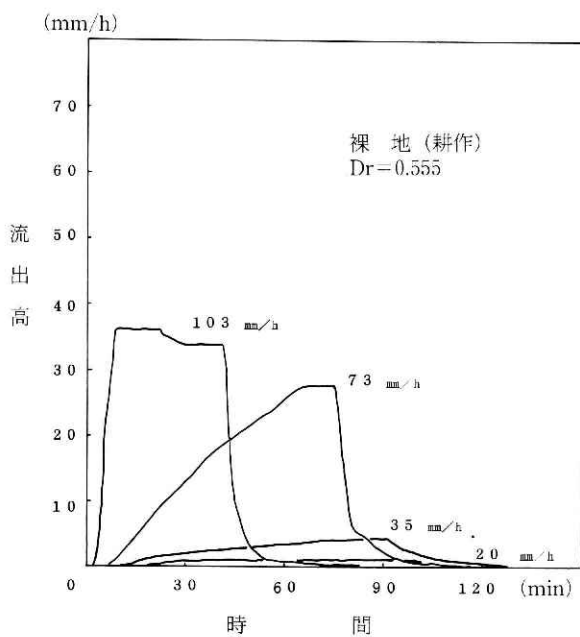


図5 裸地 (耕作) のハイドログラフ

Fig. 5 Hydrograph in the case of cultivation

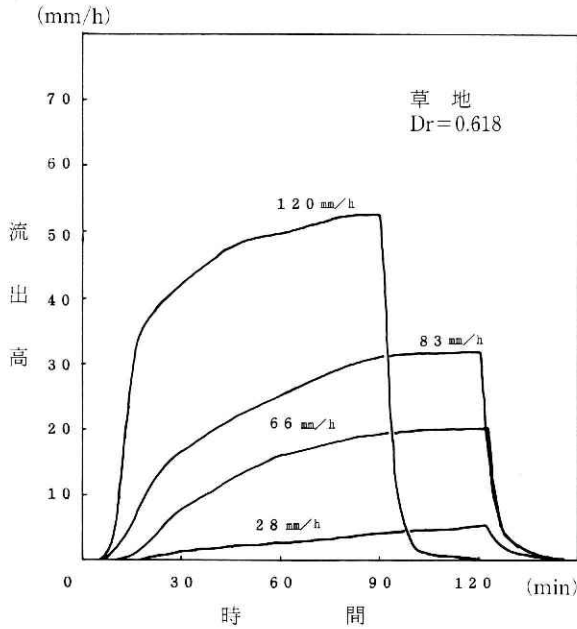
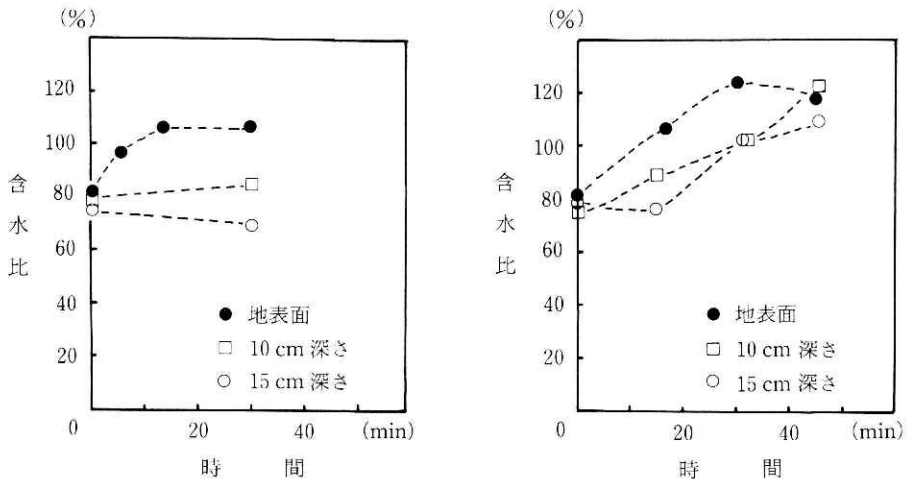


図6 草地のハイドログラフ

Fig. 6 Hydrograph in the case of grass cover



(a) 裸地 (無耕作), 37 mm/h

(b) 裸地 (耕作), 73 mm/h

図7 土層の水分状態の変化 (a)裸地 (無耕作), 37 mm/h (b)裸地 (耕作), 73 mm/h

Fig. 7 Moisture contents of soil: (a) no cultivation, 37 mm/hr, (b) grass cover, 73 mm/hr

面だけが変化しているのに対し、10 cm 深さ、15 cm 深さの土層には変化がなく、まだ浸透水は到達していない。降雨強度が小さい場合には地表面の浸透性の低い部分だけに湛水を生じ、その他の部分ではゆっくりと浸透降下するものと思われる。

(b) 裸地（耕作）：裸地（無耕作）と同じように降雨強度が大きくなる程、表面流の発生時間は早くなり、ハイドログラフの立ち上がりの勾配も急になる。立ち上がりの形状はいずれも直線状を示している。35 mm/h の降雨では降雨開始後 20 分経過してもわずかに表面が湿っているだけで、雨水のほとんどは浸透している。降雨開始後 70 分に行った土層のサンプリング結果によると、15 cm 深さの土層は浸透水により飽和しているのが見られた。73 mm/h の降雨では降雨開始後 20 分には斜面全域にわたって表面湛水していた。15 cm 深さの土層もすでに飽和していた。土層の水分量変化を示す図 7 の(b)によれば、15 cm 深さの土層の水分量は地表面の土層が変化し始めてから約 20 分程度遅れて変化している。103 mm/h の降雨ではハイドログラフの立ち上がりは急勾配を示している。降雨開始後わずか 2 分で斜面全域にわたって湛水し始めている。裸地（無耕作）の場合と異なり、本実験ではピーク流量も少なく、土層のサンプリングの際に 10 cm 深さ、15 cm 深さの土層の飽和状態が観察された。これは耕作によって土層の孔隙が大きくなり、透水性が高くなった結果を表わしている。

(c) 草地：裸地 2 条件と同様に降雨強度が大きいか程、表面流の発生時間は早くなり、ハイド

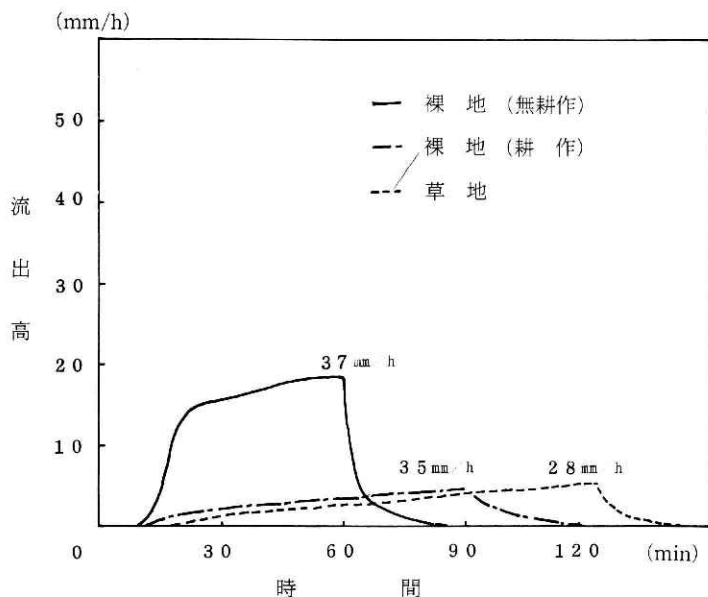


図 8 各地表条件のハイドログラフ
Fig. 8 Comparison of hydrographs

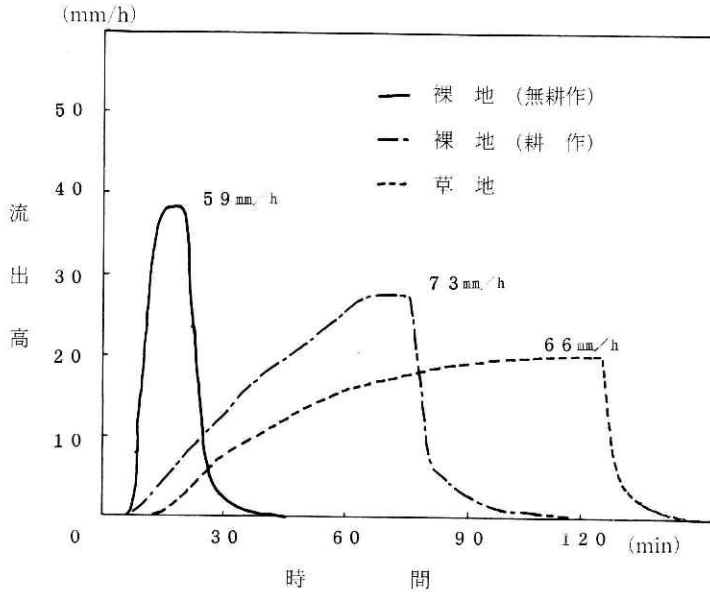


図9 各地表条件のハイドログラフ

Fig. 9 Comparison of hydrographs

ログラフの立ち上がりの勾配も急になる。しかし、表面流の発生時間は他の2条件に比べて少し遅いようである(表2参照)。28 mm/hの降雨では降雨開始から40分経過後に斜面下端付近に一部湛水域が見られるようになっただけで、75分経過しても斜面上方は表面が湿っている状態を示し、湛水域は見られない。66 mm/hの降雨では降雨開始から15分経過した後一部湛水域があらわれ始め、30分経過後には斜面全域にわたって湛水している。83 mm/hの降雨では30分経過後には斜面下端から5m付近まで湛水し始め、表面流となって流下するのがみられた。また、120 mm/hの降雨では10分経過後には斜面全体にわたって湛水し、流下し始めている。

図8, 9は降雨強度が30 mm/h前後, 60 mm/h前後の3条件のハイドログラフを示したものである。同一降雨強度でないため正確な議論はできないが、両図とも裸地(無耕作)のハイドログラフの形状は他の2条件とは明瞭な差異を示している。つまり、ハイドログラフの立ち上がり部の形状は他の2条件と比較してかなり急な勾配を示している。ピーク時流出量もかなり多い。一方、裸地(耕作)と草地の間にはハイドログラフの形状、ピーク時流出高とも明らかな差は見られない。裸地(無耕作)におけるハイドログラフの立ち上がりの急勾配やピーク時流出高の多さは土層の浸透性の低さを反映しているわけで、畑地の表面を踏み固めたりして、表土層が固く締るようなことにもなれば、実験でみられたように表面流出量が急激に増加するようになろう。それゆえ、畑地を宅地にすると不浸透面積が増大してピー

ク流量が大きくなるといえよう。

3.2 ピーク時流出率について

ピーク時流出率は洪水時のピーク流量を推算する際に欠かすことのできない数値である。実験結果から各地表条件ごとのピーク時流出率について考察する。散水実験はいずれも一定の降雨強度で流出量が定常化するまで行っている。この定常化した時の流出量を散水面積で除した値をピーク時流出高 H_p と呼び、またピーク時流出高 H_p をその時の降雨強度 R_t で除した値をピーク時流出率 f_p とする。すなわち、その関係は次式で表わせる。

$$f_p = \frac{H_p}{R_t} \dots (1)$$

総散水量に対する総流出量の比、いわゆる総流出率は散水時間、計測時間の長短によって異なり、本実験の目的からはずれるため、ここでは議論しない。各地表条件ごとのピーク時流出高と降雨強度の関係を図 10 に示す。各地表条件とも降雨強度が大きくなるにつれて、ピーク時流出高は大きくなる傾向がみられるが、裸地（無耕作）の場合、他の 2 条件に比較して著しく大きい結果となっている。例えば、60 mm/h の降雨強度の場合、裸地（無耕作）のピーク時流出高は他の約 2 倍である。一方、裸地（耕作）と草地条件とはわずかに草地条件の場合の方が多いが、それほど明瞭な差異はみられない。これらの結果は表 1 に示した飽和透水係数値の差から判断できるように土層の孔隙率が小さい、すなわち透水性が低いことに因るものと考えられる。

図 11 はピーク時流出率と降雨強度の関係を示している。3 条件ともそれらの関係はほぼ 1 次式で表わされ、それらの勾配はおおよそ同一で定数項のみが異なる。勾配は約 1/3 である。降雨強度の増加分に対して、その 1/3 倍分だけピーク時流出率が増加することになる。この

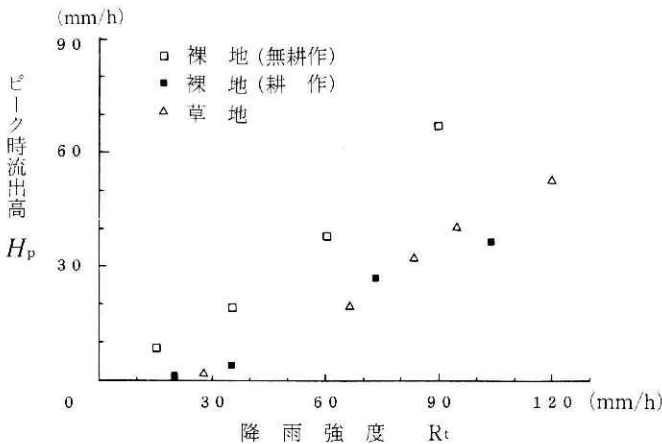


図 10 ピーク時流出高と降雨強度の関係

Fig. 10 Correlation between peak runoff and rainfall intensity

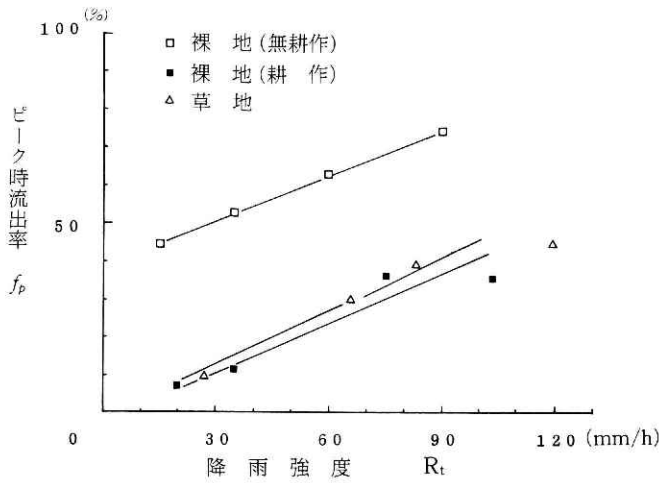


図11 ピーク時流出率と降雨強度の関係

Fig. Correlation between peak runoff ratio and rainfall intensity

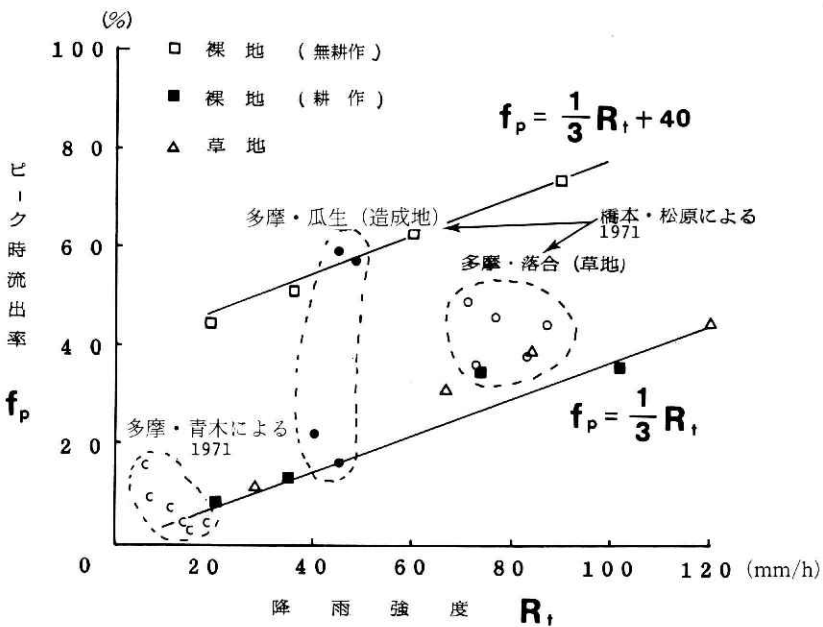


図12 ピーク時流出率と降雨強度の関係(現地資料を含む)

Fig. 12 Correlation between peak runoff ratio and rainfall intensity, including field data (S. Aoki, 1971; S. Matsubara and K. Hashimoto, 1971)

関係が成立するとすれば、ピーク時流出高は降雨強度を変数とする 2 次式で表わされる。図 10 の結果では降雨強度の大きい場合がないため、明確ではないが 2 次曲線を示している。また、降雨強度が大きくなるとピーク時流出率は 100 % を越える場合が生じるから、これらの関係を使うには降雨強度の適用範囲が問題となる。さらに多くのデータとの検証が必要であるが、著者が実験に用いた降雨強度の範囲 (30~90 mm/h) では近似的に降雨強度とピーク時流出率の関係は直線で表わせるといえよう。以上の結果はローム畑地における洪水時のピーク流量を計算する場合にはピーク時流出率を降雨強度の関数として扱かわねばならないことを指摘している。

図 12 は、図 11 に東京都多摩丘陵で行った散水実験 (松原, 橋本, 1971) および同試験地の観測 (青木, 1971) のデータを加えたものである。散水実験のデータは瓜生試験地 (造成地) と落合試験地 (草地) のものを使った。試験地の観測データは南大沢流域のものを使った。いずれも表上層はロームである。図 12 によるとローム斜面のピーク時流出率と降雨強度の関係はある幅をもった直線関係で表わされる。本実験で行った裸地 (耕作), 草地条件の場合はその下限の直線上に位置し, 裸地 (無耕作) の場合は上限の直線上に位置する。ピーク時流出率を f_p (%), 降雨強度を R_t (mm/h) としてこれらの関係を数式で示すと上限の直線関係および下限の直線関係はそれぞれ(2)および(3)式で表わされる。

$$f_p = \frac{1}{3} R_t + 40 \dots\dots\dots (2) \quad f_p = \frac{1}{3} R_t \dots\dots\dots (3)$$

ただし、この式の適用できる降雨強度の範囲は次の理由から限定される。降雨強度が小さい時には表面流は発生しないし、降雨強度があまりにも大きくなるとピーク時流出率は 100 % を越えることもある。表面流発生の限界雨量については次の節で述べることにするが、著者が行った実験の降雨強度およびその他の現地のデータの降雨強度の範囲を考慮すると、適用範囲として 30 mm/h から 90 mm/h 程度が考えられる。また、ここで得られた結果から判断すると、ローム斜面では少なくとも降雨強度の約 1/3 に値する表面流出量がピーク時流出量となって流れるといえる。図 12 で示す関係は今後ローム斜面から流出するピーク時の表面流出量を推定する上での貴重な資料になるものと思われる。

3.3 最終浸透能について

前節で表面流が発生するしきい値についてふれた。ここではこの問題と関係の深い浸透能について検討する。浸透能は土層内を雨水が浸透する容量をあらわす概念で、Horton, R. E. (1939) によって提唱された。Horton によれば、浸透能は一定強度の降雨が続くと時間の経過とともに指数関数的に減少し、最終的にはある一定値に近づくとしている。この値を最終浸透能と呼んでおり、この値より小さい降雨強度をもつ降雨ならば表面流は発生しないことになる。この浸透能は単位時間当りの降雨量から単位時間あたりの表面流出高を引いた値として求められる。図 13 は裸地 (無耕作) の場合の浸透能曲線を描いたものである。Horton の

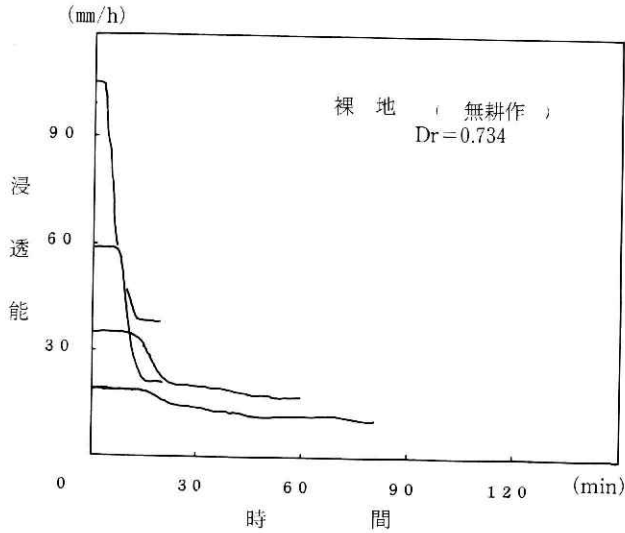


図 13 浸透能曲線 (裸地；無耕作)

Fig. 13 Infiltration curve (no cultivation and no vegetation)

のように各種の降雨強度を与えても最終的には一定値に近づく傾向を示している。この時の最終浸透能は 15 mm/h である。他の 2 条件はともにバラツキがあつて、明瞭な一定値を決定できないが、最小の浸透能を求めると裸地 (耕作) では約 33 mm/h、草地では 28 mm/h である。

松原・橋本 (1971) が多摩丘陵で行った散水実験によると、落合試験地 (草地) では 40 mm/h、瓜生試験地 (造成地) では 20 mm/h である。本実験の結果もほぼ近い数値を示している。したがってローム斜面では、大体 30 mm/h 以上の雨が降れば表面流出がみられると考えて良いであろう。

3.4 植生の繁茂が表面流出に与える影響について

斜面に植生が繁茂するようになると一般に次のような変化が考えられる。根系の発達に伴う土層の孔隙の増加と葉、茎などの地上物による雨水の貯留 (遮断) 効果の増大である。土層の孔隙の増加はいうまでもなく雨水の通水性・保水性の増加を意味する。この問題について比較的表土層の条件に近い裸地 (耕作) と草地の実験結果から検討する。

土層の孔隙の増加：草地条件では、裸地 (耕作) の実験終了後、一年間屋外に放置して植生の自然侵入をはかっている。その間に表 1 に示すように表土層の乾燥密度は 0.555 から 0.618 に変化している。つまり表土層は自然に緊密化している。実際の畑地でも期間は短かいが同じような現象が考えられる。耕作した後に植物が成長するまで数ヶ月間を要するだろう。その結果、耕作した表土層の孔隙が著しく大きいため、ある程度の降雨を受けると根系の発達による孔隙の増加よりもむしろ減少すると考えた方が説明しやすい。つまり耕作した後放

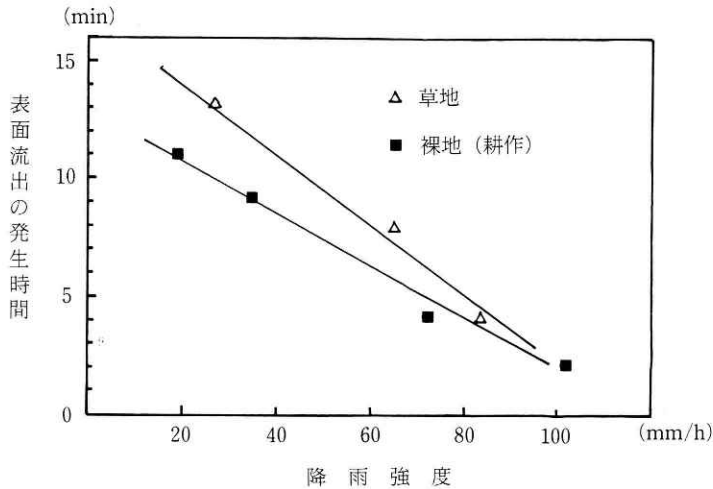


図 14 表面流出の発生時間と降雨強度の関係

Fig. 14 Rising time of surface runoff depends on rainfall intensity and surface condition

置すれば土層の通水性・保水性は低下する。このことは両者のピーク時流出率の比較結果にも表われており(図11)、草地の場合の方がわずかだが裸地(耕作)よりも高いということからも説明できる。

葉・茎などの貯留効果：植生の貯留効果に関する研究はいくつかある(小橋・坂崎, 1974, 村井, 1970)。いずれも植生の貯留量は植生の地上部の生重量または乾重量の1次式という形で表わせるとしている。村井(1970)はヒカゲスゲを使った実験から植生の貯留量は地上部の乾重量の2.82倍という関係を見出している。ヨモギの場合は2.80倍としている。また林地内の植生による遮断量を調べた結果、1mm以下であると報告している。著者の行った実験の植生も主に同じスゲ科の植物で占められているから、村井の関係式を使って本実験の植生による貯留量を推定してみる。草地条件の実験終了後、実験区画の中央付近1m²の面積に繁茂している植生を採取して地上部の乾重量を計測したところ530gであった。したがって1m²当りの植生の地上部の貯留量は1,495cc、全面積は60m²であるから、総貯留量は約90ℓになる。雨量に換算すれば約1.5mmである。この貯留量が影響する表面流発生時間の遅れは表土層の状態が同じ場合、30mm/hの降雨では約3分、90mm/hでは約1分である。降雨強度が小さい程、その影響は大きい。図14は表面流出の発生時間と降雨強度の関係を示している。両実験とも初期含水比、乾燥密度が異なるので植生の影響について細かく議論できないが、草地条件の場合、表面流出の発生時間は裸地(耕作)条件に比べて、明瞭な遅れを示している。降雨強度が小さい程、その遅れは大きい。表土層の孔隙だけが影響しているものとするれば裸地(耕作)よりも草地の場合の方がこの時間は早くなるはずである。図14は逆の結果を示しているからやはり植生の貯留効果がでているものといえよう。

4. まとめ

地表状態の異なるローム畑地の表面流出特性を明らかにするため、国立防災科学技術センター大型降雨実験施設内に畑地模型の斜面を製作し、地表面の状態が裸地(無耕作)、裸地(耕作)、草地の3モデルについて散水実験を行った。その結果、次のようなことが明らかになった。

- (1) 裸地(無耕作)の表面流出量は他の2条件に比較して極めて大きい。例えば、60 mm/hの降雨では他の2条件の場合の約2倍の表面流の流出がみられた。草地と裸地(耕作)とでは著しい差異は見出せなかった。
- (2) 3条件とも降雨強度が大きい程、ハイドログラフの立ち上がりは急勾配になり、表面流出量も多くなる。
- (3) また、3条件ともピーク時流出率は降雨強度とともに増加する。その関係はいずれも直線関係を示す。
- (4) ここで得られたデータと東京都下多摩丘陵で行われた観測・実験値と比較した結果、ローム斜面におけるピーク時流出率 $f_p(\%)$ と降雨強度 $R_t(\text{mm/h})$ の関係はある幅をもった直線で表わされる。その上限および下限の直線は、それぞれ(a)、(b)式で表わされる。ただし、適用範囲は30~90 mm/hである。

$$f_p = \frac{1}{3} R_t + 40 \dots\dots\dots(a) \quad f_p = \frac{1}{3} R_t \dots\dots\dots(b)$$

本実験の草地と裸地(耕作)条件の場合はその下限に位置し、裸地(無耕作)条件の場合は上限に位置している。

- (5) 裸地(無耕作)、裸地(耕作)、草地の最終浸透能は約15, 33, 28 mm/hである。
- (6) 自然侵入をはかった植生の貯留高を推算した結果、約1.5 mmとなった。これは30 mm/hの降雨では約3分、90 mm/hの降雨では約1分、雨滴が地表面に降下する時間を遅らすことになる。

以上から、結論として表土層を耕作した畑地は表面流出量を減少させる役割が極めて大きく、実流域において畑地が宅地化されると洪水のピーク流量が増大すると考えられる。

最後に、本稿をまとめるにあたり数々の有益な助言を頂いた第3研究部長 植原茂次氏および実験の計測に協力して頂いた第3研究部降雨実験室 井口 隆、佐藤照子の両氏に深く感謝します。

参 考 文 献

- 1) 青木佑久(1971):洪水の流出率とラショナル式の流出係数。土木技術資料, 13-2, 12-17.
- 2) 国立防災科学技術センター(1982):大型降雨実験施設要覧。

- 3) 小橋澄治・坂崎和夫 (1974) : 表層崩壊の実験 (V) —地被条件が降雨水の水収支に及ぼす影響—, 新砂防 **91**, vol.26, No4, 20-23.
- 4) Horton, R. E. (1939) : Analysis of runoff-plat experiments with various infiltration capacity, Trans. Amer. Geophys. Union, **20**, 693-711.
- 5) 松原重昭・橋本健 (1971) : 表面流についての現地実験とその解析, 土木技術資料, **13-2**, 18-25.
- 6) 村井宏 (1970) : 森林植生による降水のしゃ断についての研究, 林業試験場研究報告, 第**232**号, 25-64.
- 7) 村井宏 (1971) : 森林と地表流下・浸透・土砂流出・侵食との関係(1), 水利科学, No**79**, 1-34.
- 8) 中野秀章 (1976) : 森林水文学, 共立出版, 228.

(1982年12月6日 原稿受理)