

## 表面流出に関する研究(その3)

木下武雄\*・富永雅樹\*\*・福園輝旗\*\*

国立防災科学技術センター

益倉克成†・佐々木健一††

土木研究所

### Study on Surface Runoff (Part 3)

—Effects of Storage of Rice Fields and Channel Density—

By

**Takeo Kinoshita, Masaki Tominaga, Teruki Fukuzono**

*National Research Center for Disaster Prevention, Japan*

and

**Katsushige Masukura, Kenichi Sasaki**

*Public Works Research Institute, Japan*

#### Abstract

This is the third report of the study on surface runoff at the experimental plots. The previous reports dealt with the condition of occurrence of surface runoff and increase of runoff ratios with increase of rainfall intensities at the pervious experimental plots. This report summarizes the results of surface runoff at two impervious experimental plots set in the rainfall simulator of the National Research Center for Disaster Prevention. These experiments aimed at making clear the runoff processes under storage effects of rice fields and effects of channel density on the paved plot.

The rice field is an important productive area in Japan. It has a high capacity of retardation of surface runoff. But the recent improvement of rice crop management does not allow long and deep inundation in rice fields. Moreover, residential lands have been rapidly replacing rice fields, especially in suburbs of big cities. It is stressed that adequate drainage systems must be designed in such areas. Runoff characteristics of rice fields were studied by means of the model formed by sandy loam as illustrated in Fig. 1. The step-wave rainfall, which is produced by the rainfall simulator, induces such a discharge hydrograph as in Fig. 2. The rising time, which is defined as the time from the beginning of the hydrograph to the steady state, is found to be about 2 hours though the area of the experimental

\*第1研究部 \*\*第3研究部 †河川部都市河川研究室 ††河川部水文研究室(現建設省北陸地建)

plot is only 880 m<sup>2</sup>. This fact indicates that a rice field has a large retardation effect. Two types of inundation are observed in Figs. 3 and 4. Other interesting phenomena are revealed, namely the movements of the rainfall area produce different patterns of hydrographs as shown in Figs. 5 and 6, dependent on the direction, and the successive pulsative rainfall produces wavy hydrographs as in Fig. 7.

Channel density remarkably increases with the development of drainage systems both in rural and urban areas. While the channel density is important to runoff process in a natural basin, it is also one of the main factors of change of runoff in an urbanizing basin. It is said that dense channel networks bring forth higher peak discharges and their earlier occurrences during storm periods. The experiment has been conducted on the experimental plot paved by mortar as illustrated in Fig. 8 in order to avoid the effect of infiltration into the ground. The rising hydrographs made by various rainfall intensities are compared with each other in Fig. 9 in which the lower curves indicate ratios of runoffs to those of the steady state. The rising times observed in all cases of the experiment are plotted in Fig. 10. The four curves in this figure were obtained by Manning's formula. It is clear that the rising time is dependent upon both rainfall intensity and channel density. Fig. 12 shows discharge hydrographs caused by impulsive rainfalls. The occurrence and the height of the peak are affected by channel density, and the peak height is compared with the value calculated by the rational formula by using the observed time of concentration. It has been also noticed by experience that inundation retards the peak. Fig. 13 shows this fact, that is to say, the heavier rainfall induces the longer rising time in the case of inundation.

This project was carried out as one of the cooperative researches with the Public Works Research Institute.

## 1. ま え が き

これは国立防災科学技術センターにおいて行っている表面流出に関する実験的研究の第3報である。

表面流出は洪水として流れ、また湛水する水の主要な成分で、その実態については必ずしも明らかではないが（岡本芳美, 1978）、とにかく大雨のときには常に目視されるものであり（国立防災科学技術センター, 1976・1977）、試験流域などにおいてもその実測例は多い（青木佑久, 1972）。

正確には表面流出という言葉の定義からかからねばいけないが、ここではおおよそ流出の時定数が、地面の表面を流れて来たと推定されるぐらい短いもの、または目視により観察されるような流出成分を指していて、場合によっては早い中間流出をも含んで呼称する。このような表面流出は洪水による災害の防止のための業務に直接結びつくのでこれまでも数多くの調査・研究がなされて来た。そのうちの大部分は実際の流域（流域面積でいうと100～10,000 km<sup>2</sup>）における雨量と流量との関係であるが、最近では試験流域としてそれより小さい

流域(0.01~10km<sup>2</sup>)における雨量と流量との関係の研究が進歩した。前述の実測例とはこのことである。

しかし、それらの場合、入力としての雨量は自然のものであるから、それは全く任意波形であり、立ち上りの特性もあまり好ましいものはない。防災センターにおいては大型降雨実験施設があって、ここでは建物(50m×75m)の天井のノズルから制御された雨を降らせることができるのでたいへん都合がよい(Kinosita, 1977)。このような施設を用いて2年間放置した盛上の築山に雨を降らせて実験した結果は本報告と同題(その1)で木下武雄・中根和郎(1977)が取扱い、防災センター構内に降った自然降雨による構内の表面流出の結果は同題(その2)で中根和郎・矢崎忍(1978)が取扱った。

本報告は第3報として同施設において行った2件の実験結果をまとめて述べる。

表面流出を支配する要素としては第一に浸透があげられる。雨水が100%浸透すれば表面流出はないわけである。浸透は森林や畑において顕著である。第二には表面貯留があげられる。表面貯留は本来いたるところで見られるもので、大は湖沼などから、小は畑のうね、水溜り等、この他にも小規模なものが数多くある。しかし何と言っても水田の貯留効果は大きい。水田は言うまでもなく重要な米の生産の場であって、品種が改良されて生産性の高くなるほど稲は忍容範囲外の湛水に対して弱くなる。そのため水田での長期・大量の雨水の貯留は米の生産に重大な影響を持つ。そののみか、最近水田へ宅地造成が広がり、大雨のとき水田の湛水が家屋の浸水となり、今後もその激化の傾向が憂慮されている。第三には水路網があげられる。利根川を水路とみない人はないだろうが、その源をたどった時、どこまでを水路とみるかは問題である。雨水が平面を流れるよりは、集って水路となって流れた方が速いことは明らかなように(木下, 1967)、水路網密度が高いと流出、特にピーク流量に直接影響する。自然斜面でも、水路網密度は流出にとって重要だが、都市における下水道施設の充実ということはとりもなお

さず水路網密度の増加ということで、そのためのピーク流量の増加が注目されている。これらの要素の関連については都市化という観点から木下(1972)は分類を試みた。ここで必要な範囲でまとめ直したものが表1である。このようなわけで、本報告でとり上げる諸要素としては、流出に対するおくれ効果の著しい水田

表1 表面流出に及ぼす諸要素の重要度についての概略の表

○ 重要 △ やや重  
**Table 1** General Concepts about Contribution of Elements to Runoff Process  
 ○ Very Important, △ Important

Gradient 勾配	Land Use 土地利用	Infiltration 浸透	Surface Runoff 表面流出	
			Storage 貯留	Channel 水路網
steep 傾斜地	Forest 山林	○		○
	Farm Land 畑	○	△	
flat 平地	Rice Field 水田		○	△
	Urban Area 都市			○

の貯留効果と流出を促進させる効果の著しい水路網密度の効果とであって両者は相反する傾向をもつが、ともに最近の洪水の発生のみかたの変化、特に都市化により変化をうける重要な2要素である。これら要素の一段前の過程を支配する要素の研究に浸透性斜面からの流出を実験的に取扱った「表面流出に関する研究(その1)」(前掲)があり、表面流出が降雨強度と共に急激に増すなどの実験結果がえられているので参照されたい。

このような問題に対する研究手法として、ここで用いた大型降雨実験施設がいかに大きいとは言え室内実験的手法を使うことの是非は一言論じなければならない。理想を言えば、水文現象を解析するためには現地で実測すべきであろう。しかし雨量や流量の実測の容易さ、雨量を望む通りの波形で与えられること、流域形状も解析しやすい形に作れること等は室内実験の持つ大きな長所である。しかもここで言う室内実験とは数アールの面積を持つものであるから、実物大に近いということ、さらに数値実験を介してこれらの結果の現地への適用を計ればよいと判断される。実験対象も複雑な実際の流域を相似律で縮めたものという考えはとらないで、あくまでも現象の解明をしやすい形状であり、従って相似律で実物大へ拡大することも考えない。

これらの研究は建設省土木研究所と共同で行われた。大まかな分担は、土木研究所が供試体を作成し、防災センターが大型降雨実験施設を運転し、共同で測定解析を行った。結果の一部はすでに発表している(木下・佐々木・富永, 1980);(木下・益倉・福園, 1979)。防災センター側は両実験とも第3研究部降雨実験室が担当し、土研側は水田の貯留効果に関する実験は河川部水文研究室、水路網密度の効果に関する実験は河川部都市河川研究室が担当した。

## 2. 水田の貯留効果が流出に及ぼす影響

水田の貯留効果が流出に及ぼす影響については、すでに概説したが、さらに続けると、平地の水田の効果は、一枚一枚の水田が水理的に分かれているとき、すなわちあぜの切り欠きよりの流出が完全越流のときと、すべての水田が同一水面になる氾濫とでは水文現象としても著しく異なるものである。前者では、一枚の水田ごとに流出と貯留との水理法則が支配し、それらが直列・並列に数多く集った系と考えられる。実用的な精度で全体の流出推算を行うときのモデルは山地における流出モデルに似たものでよい。なぜなら下流の条件が上流に及ばないという点で在来の流出モデルと軌を一にするわけである。後者では1個の貯水池の流出と貯留の水理法則で近似できる。湛水が深いほどこの近似はよく成立つことは明らかである。これは大洪水のときに観察されるが、実際問題として厄介なのはこの両者の中間つまり遷移状態で、通常下流から後者の状態が発現するが、多くの場合、両者が混在し、しかもこのような遷移状態から後者のような大洪水へかけての状態の対策が洪水防御活動の中心課題となっているので、ここに大きな問題があると言わざるを得ない。この複雑な現象をいかに単純なモデルにおきかえるかは、これまでも研究されているが(木下・和気・梅谷

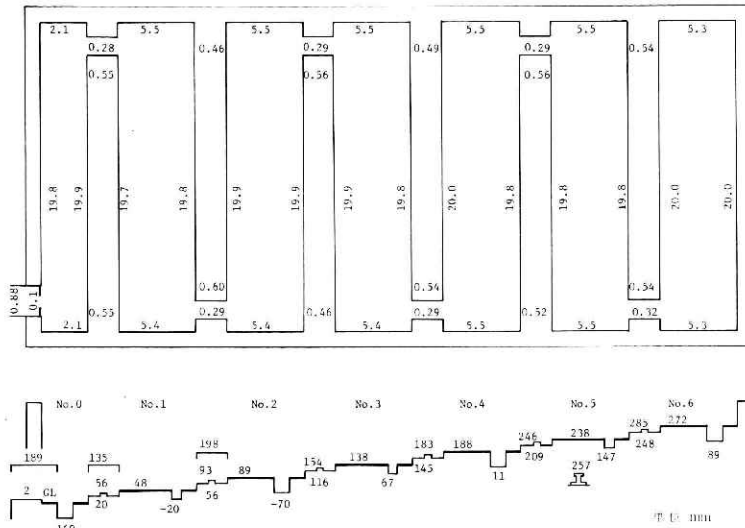


図 1 水田平面図  
Fig. 1 Plan of the experimental plot for storage effects of rice fields.

内, 1977), まだ十分とはいえない. そこでこのような遷移状態の発生しうる水田の模型を作り, 制御された(解析しやすいように制御するの意)降雨波形を与えて表面流出を発生させて, その解析とモデル化を行おうとするものである.

## 2.1 実験の基本方針

このように実験的手法をもって水田の貯留効果を調べるための基本方針としては次の通りである.

- ① 浸透損失は無視できる程度に抑えるため耕うん機で耕盤を作る.
- ② あぜ, 切り欠き等は実物に近い形状を考えたが, 解析の便宜のため切り欠きを木製の堰(せき)とし, 幅も著しくせばめたりした. 切り欠きの位置は水田を流下する水の流れる経路が最も長くなるようにした. 図1参照.
- ③ 下流端でせき止めて湛水状態を作ることもできるようにした.

このような観点から, 図1のように $5.5\text{ m} \times 20\text{ m}$ 長方形を6枚連続させ, さらに補助池を設けて,  $40\text{ m} \times 22\text{ m} = 880\text{ m}^2$ の水田群を作った. 製作は土木研究所が行った. 水田相互の比高は $5\text{ cm}$ とした. 水田番号は補助池から上流へ向けNo. 0, No. 1, ……No. 6とつけた.

与えた降雨波形は, 流出波形の立ち上り・低減の特性を検討するためのステップ波(流出が定常に達する時間以上の継続時間を持つ長方形波), 流出ピークを検討するためのパルス波(上記継続時間より短い長方形波)を基本波形として, それらの合わさった複合波, その他波形で, 強度としては $30 \sim 200\text{ mm/時}$ の雨を降らせた. また上流部・下流部で空間的な分布のある雨も降らせ比較・検討した. 降雨強度の測定には模型内に1台の転倒マス型雨量計

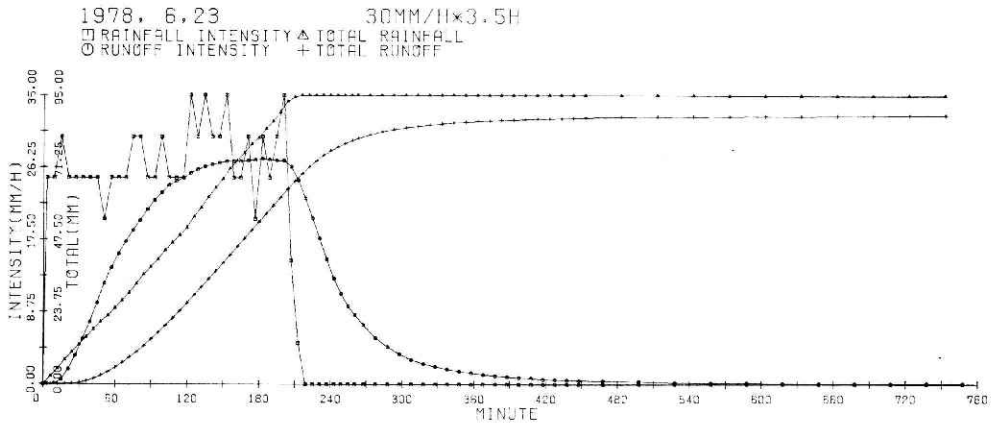


図 2 ステップ波による流出

Fig. 2 An Example of discharge hydrograph of rice fields by a step-wave rainfall.

を設置した。

流出量の測定は補助池下端に直角三角堰をとりつけて測った。堰水位は触針水位計で測定した。

## 2.2 実験結果及び考察

(ア)減水深測定：実物の水田の水文現象でも減水深の考察は必須だが、急造水田であるから減水深が大きいかも知れない。降雨を発生させる建屋の中での状態ではあるが、減水深は2～3時間の程度では無視できる。土が十分に落ちつく前には100mm/日程度の値が測定されたが例外とみていい。減水深は一般に上流で大きく、下流で小さい。

(イ)ステップ波の降雨強度による違い：一定の降雨による流出は図2のように、一次おくれ系のような立ち上り形で定常状態に達する。厳密に定常の判定は困難であるが、約2時間を

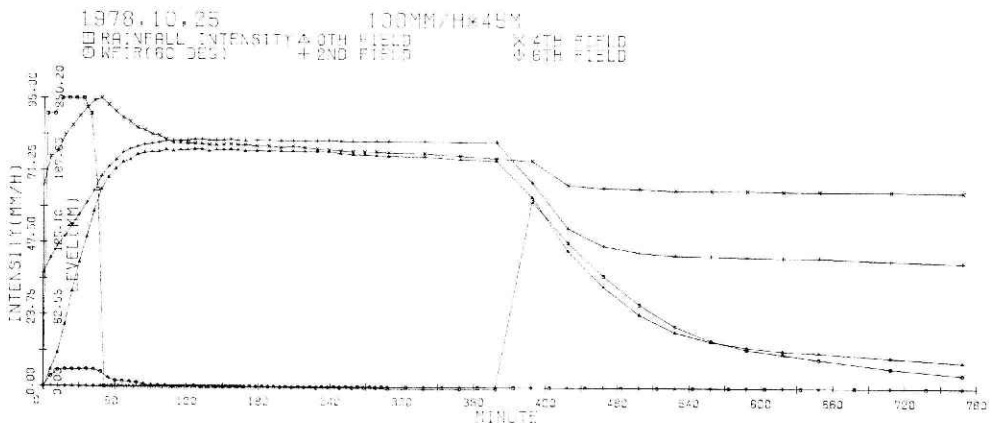


図 3 下流疎通能力不足による洪水

Fig. 3 Hydrograph in the case of inundation caused by the shortage of the drainage capacity downstream.

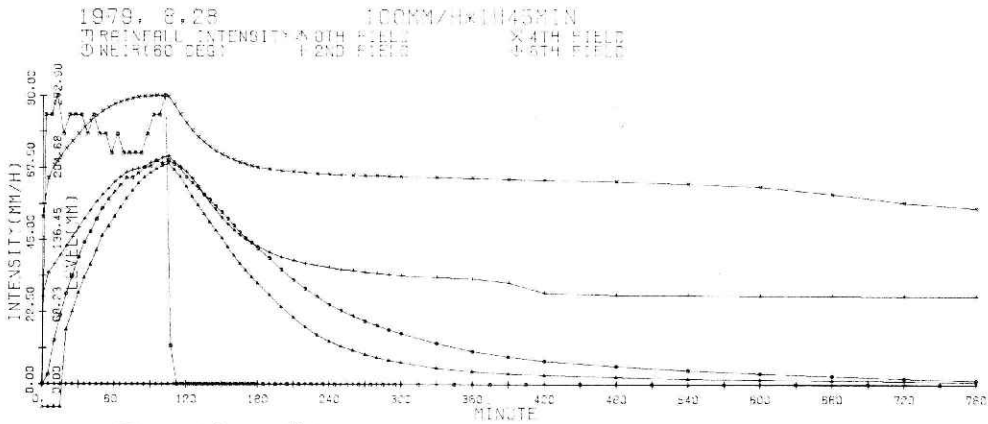


図 4 大雨による湛水  
 Fig. 4 Hydrograph in the case of inundation caused by the heavy rainfall.

要する。降雨が強いほどこの時間は短くなる傾向を持つが、必ずしもはっきりはしない。と言うのは水田が直列につながっているために上流の流出が大へん遅れてあらわれるためである。この程度の水田1枚の時定数は線型化して単純にみると（付録1参照）30分～1時間であるからであろう。切り欠き幅が狭いほど立ち上がりの時間は長くはなるが、付録1で示したように切り欠き幅に時定数が反比例するというような関係にはならない。

減水は降雨終了と同時に始まるが、立ち上り部を上下逆にしたようにはならず、尾を引く形で時間がかかる。水深が浅くなると時定数がのびるからであろうか。

(㉑)氾濫状態：ここで言う氾濫とはあぜを越えて上下の水田水面が一続きになった状態を言う。この状態は下流の水路の疎通能力が十分でないとき、又は上流から多量の水が流れて来たために発生する。前者の場合は図3のように、水田の水位は初めすべて上昇するが、降雨終了とともに上流の水田水位は下がり、下流の水田水位はあまり変わらないか、やや上昇するため、水田水位は上下同じになる。後者の場合は図4のように各水田間にいくらかの水位差をもちつつ水位は変化し、最高水位は降雨終了時である。

減水部は直線的になる。これは付録1からわかるように、広い氾濫（A：大）では時定数が大きい、水が減って氾濫域が狭く（A：小）になると時定数も小さくなるため、指数関数的な減水ほどには下部で勾配がゆるくならないためと考えられる。十分水位が下がって氾濫でなくなれば、指数関数的に減水する。

(㉒)雨域の移動：雨域の移動が流出に影響を持つことは各方面で指摘されているので、実験的に調べた。ここでは6枚の水田を上流3枚、下流3枚に分けて、上流で1時間降らせてから下流で1時間降らせた例と、上下流逆の順序で降らせた例とを図5、図6に示す。雨が流域の半分にはしか降っていないため図中の TOTAL RUNOFF が50%までしか上がっていない。前者は立ち上がりが約1時間おくれ、ピークが降雨終了時に現れている。上流からの流出と下流からの流出が重畳しているわけで、流域平均雨量 50 mm/時に対し、ピーク流出高

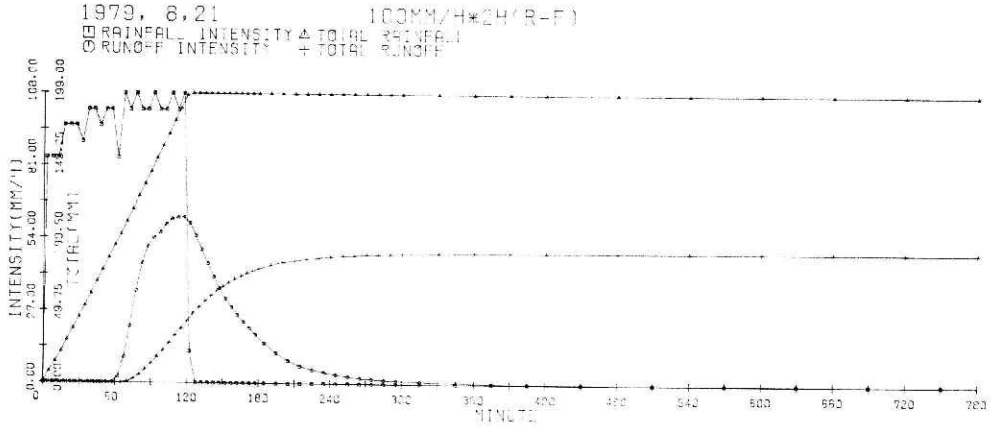


図 5 雨域移動 (上流より下流へ)  
 Fig. 5 Discharge hydrograph induced by the rainfall moving from the upstream to the downstream.

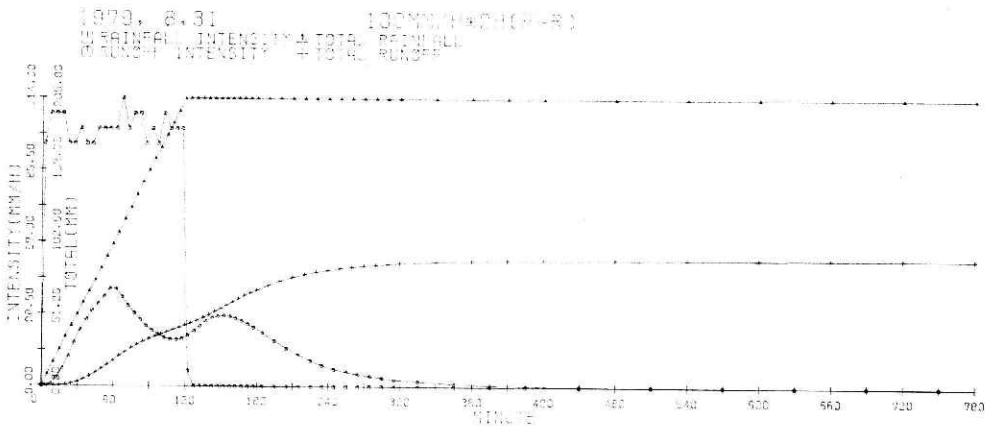


図 6 雨域移動 (下流より上流へ)  
 Fig. 6 Discharge hydrograph induced by the rainfall moving from the downstream to the upstream.

62 mm/時と、合理式で言う流出係数では1.2となっている。明瞭な雨域の移動があると合理式の解釈を変えねばならないことを示している。後者では降雨開始と共に流出が始まるが、上流からのピークが遅れるため、ピークは2分され、第1波(下流からの流出)が40 mm/時であり、第2波(上流から)が28 mm/時で著しい扁平化をうけているのが特徴である。

(オ)連続3波: 図7のような水位変動をする。水田 No. 6は最上段であるため、3波に対して同様の応答をしているが、水田 No. 4, 水田 No. 2と下がるにつれ、上流側の流出の影響をうけ第1波, 第2波, 第3波の順でピークが高くなる。

### 3. 水路網密度が流出に及ぼす影響

水路網密度が流出に及ぼす影響については、すでに概説したが、さらに続けると、自然斜



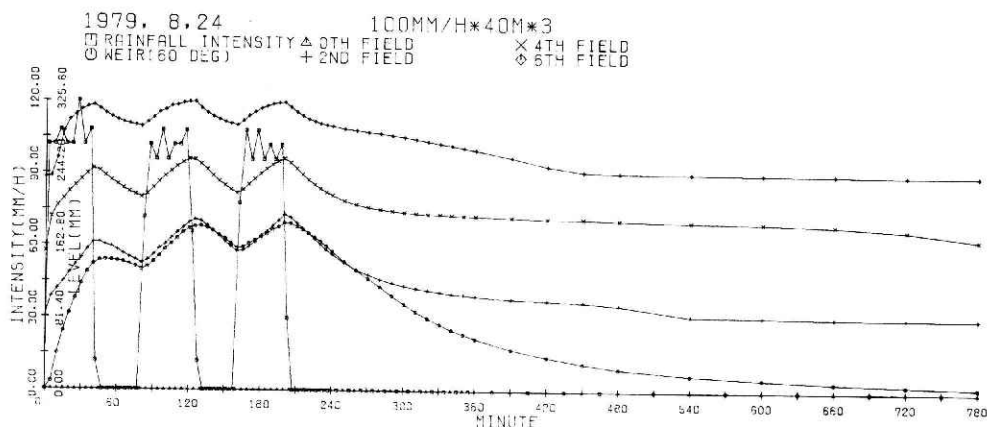


図 7 連続3波の応答

Fig. 7 Hydrograph induced by three successive pulsative rainfalls.

面でも水路網が密にはいっているところでは流出が早く現れるもので、その効果は合理式の計算などでは到達時間が短いという表現でなされている。その効果が顕著な差として現れるのは都市が発展して行き、道路側溝、公共下水路が整備されて行く段階である。これまでそのような水路のなかった畑や田に家が建つと、それだけでも浸透面積の減少という意味で表面流出は増すわけだが、一般に著しい大雨でない限り、家の周辺に水溜りができる程度で下流地点での流量増には結びつかない、しかし側溝などができるとその水溜りの水を有効に導き排除する結果、下流地点では流量増、精しく言えば流出波形の変化をもたらす。それは特にピーク流量の増加となって現われる。実際の流域ではこれらの過程が他の要素と複雑にからみ合って発現するため、水路網密度の影響だけをとり上げて論ずることは不可能である。そのために、まず単純化された状況で実験を行って基礎的な現象を解明し、その結果を現場に適用して行くように検討して行く。

この現象は次のように単純化して実験をするので、それ自身としては水理的に理解しやすい。すなわち開水路の不定流の式で近似できる範囲の現象なので水理的数値シミュレーションが可能である。それは別に報告するが、とにかく敢えて、数値シミュレーションが可能なような実験条件を選んで、この問題の結論の拡張に意味づけをしようというものである。

### 3.1 実験の基本方針

このように実験的手法をもって水路網密度の影響を調べるための基本方針としては次の通りである。

- ① 浸透損失はない。全体をモルタル張りとする。
- ② 流域は斜面で構成され、これに水路網の増加として加わる従水路（都市化の問題をモデル化しているため道路・側溝を指す）は斜面を横断して設ける。横断して水を集めた従水路は、斜面の右端にとりつけられた集水路へ水を注ぐ。

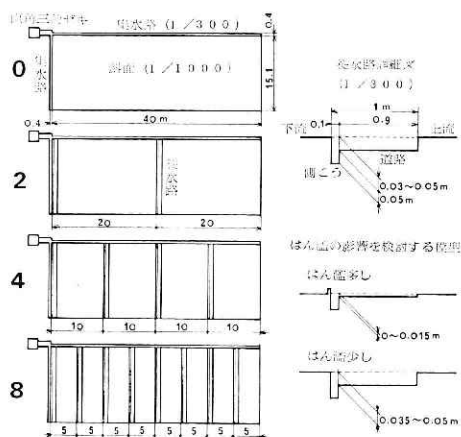


図 8 水路網平面図  
Fig. 8 Plan of the experimental plot for effects of channel density.

③ 都市を想定して、従水路の面積率を最高で20%とする。

④ 各水路は水理的になるべく単純な構造とする。すなわち長方形断面とする。

このような観点から、図8のように下流側及び側方に集水路を持つ幅15.1m、長さ40mの長方形のモルタル張り斜面（勾配1/1000）を上木研究所が製作した。この斜面に自然状態から最高に都市化された状態の水路網を想定して、従水路（勾配1/300）を0、2、4、8本の4段階設置し、比較・解析した。又、従水路・集水路の勾配を1/1000とし従水路から斜面上まで氾濫した場合の影響を検討する

模型も製作し、実験した。

与えた降雨波形は、流出波形の立ち上り・低減の特性を検討するためのステップ波、流出ピークを検討するためのパルス波を基本波形として、それらの合わさった複合波、その他波形で、強度としては20~200mm/時の雨を降らせ比較・検討した。降雨強度の測定には模型内に3台の転倒マス型雨量計を設置した。しかし数分~数十分の現象に対しては雨量計の応答速度および降雨装置のノズル散水方法から来る問題点のために、必ずしも有効なデータとはなり得なかった。

流出量の測定は集水路末端で直角三角堰を用いて行った。堰水位は触針水位計で測定した。堰の貯留効果による時間おくれが問題になる場合にはこれを補正した。

### 3.2 実験結果及び考察

(ア)降雨強度による違い：図9に、従水路0本の模型に20,50,100,200mm/時のステップ波を予定して散水した例を示す。上の図では縦軸に流出高、横軸に時間を取り、下の図では縦軸に、流出が平衡になった時の流出高に対する各時点の流出高の比（%）、横軸に時間をとったが、立ち上りの曲線では流出高の比が10%になった時、低減の曲線では流出高の比が90%になった時で流出高の曲線を揃えた。降雨強度により流出波形が異なるのは流出の非線型性を表わしている。降雨強度が強いほど、立ち上り・低減共に急で、つまり急激に増水し減水する。雨水の流れが水深の関数であることに起因する。平面を流れ下る雨水の定常流の流下時間は、降雨強度の0.3~0.4乗に反比例する（付録2参照）が、傾向としてはほぼ一致している。この点は次項で詳しく述べる。

(イ)立ち上り時間：各模型にステップ波を加えた場合の立ち上り部において、定常状態に対する10%の流出高から90%の流出高まで上昇する時間を図10に示す。合理式の洪水到達時間

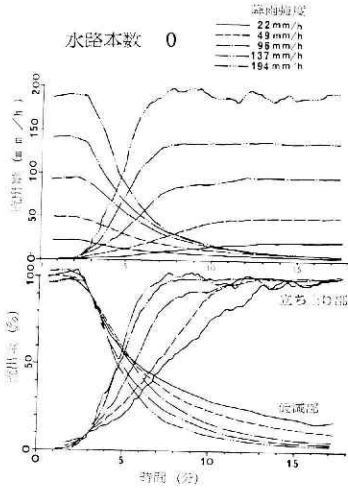


図9 ステップ波の降雨強度によるちがひ

Fig. 9 Comparison of the rising hydrographs induced by various rainfall intensities.

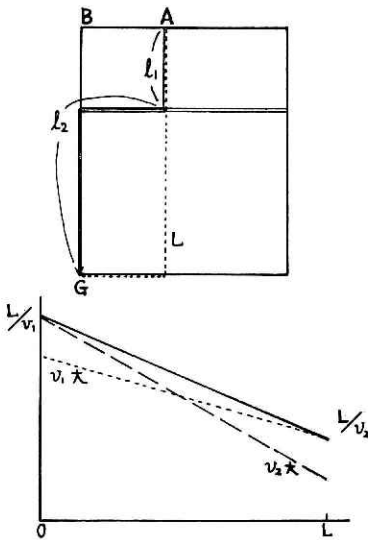


図11 水路網密度の増加による影響の説明図

Fig. 11 Schematic picture of the influence of channel density to the rising time.

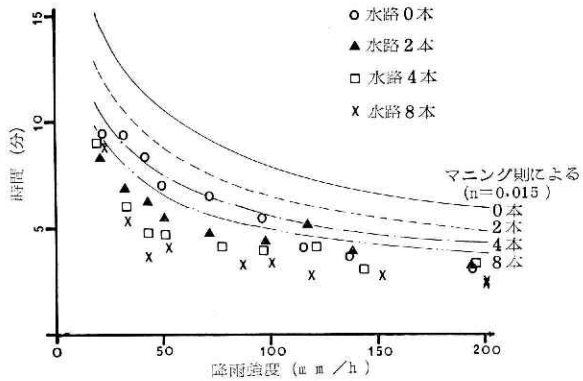


図10 立ち上がり時間

Fig. 10 Rising times of hydrographs dependent upon rainfall intensity and channel density.

等とは異なるが、定常状態の判定に個人差がはいるのでこの方法によった。なお横軸は定常状態の流出高としての降雨強度である。降雨強度が大なる程立ち上がり時間が短い。この傾向はいずれの水路網密度でも同様な傾向を示す。水路本数が多い程、すなわち水路網密度が高い程立ち上がり時間は短い。これは低減部においても同様である。水路網密度が増すことは斜面上の距離が短くなることであるが、この短くなった分に対応して水路の長さは長くなる。水路は勾配・水深などにより斜面より流速を速くする働きがあるので、立ち上がり時間が短くなる。図中の実線・破線等は定常状態でマンニングの等流を仮定して斜面・水路の90%遠点から10%遠点まで流下するに要する時間を計算したものである。計算の前提が異なるため、実験値と計算値とは一致しないが、傾向は一致している。

さらに雑な議論にはなるが、図11のような流域でAからGへ流出してくる時間 $T$ は斜面上の距離 $l_1$ 、水路の距離 $l_2$ 、斜面の流下速度 $v_1$ 、水路の流下速度 $v_2$  ( $v_1, v_2$ はそれぞれ一定)とすると

$$T = \frac{l_1}{v_1} + \frac{l_2}{v_2}$$

但し $l_1 + l_2 = L$  (この実験の場合、水路網密度を増しても一定)であるから、横軸に $l_2$ 、縦軸に $T$ をとると

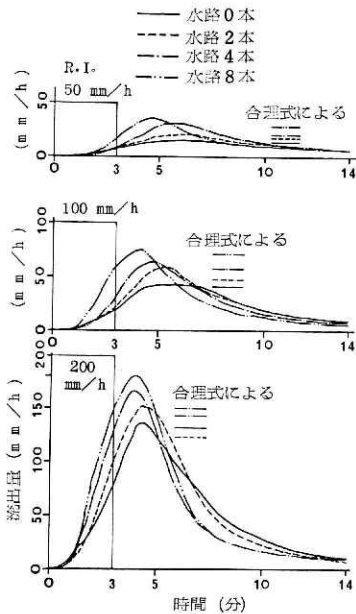


図12 パルス降雨の流出  
 Fig.12 Discharge hydrographs induced by various impulsive rainfalls.

一般に  $v_1 < v_2$  であるため図11のようになる。AをBに近づければ考えやすいが、横軸は水路網密度に相当する座標で、0は水路網が皆無、Lは水路が100%完備した状態に対応していることから、都市化が水路網密度の増加をもたらすとTが短くなる様子が概念的に理解できる。さらに、整地等で  $v_1$  を大きくすると点線のようになり、河道改修等で  $v_2$  を大きくすると破線のようになる。この実験も  $v_2$  を大きくするよう水路条件をとれば、図10の水路網密度による立ち上り時間の差は著しく現れたであろう。

(ウ)パルス降雨の流出：50, 100, 200 mm/時のパルス降雨を加えた場合のハイドログラフの比較を図12に示す。ただしこの例では降雨装置の応答の限界付近なので、時間に関しては若干の誤差を含んでいる。水路密度が増すとピーク発生時刻が早くなり、ピーク流出高が高くなる。到達時間の短縮とともに、従水路からの洪水流が集水路にて重ね合わされるために起こるものである。流出率は1であっても

水路網密度の増加によってピーク流出高が増す有様を視覚的に表わしている。降雨ピークから流出ピークまでの時間の2倍を洪水到達時間とし、合理式でピーク流出を求めると図12右に示したような流出高になる。いくらか実験ピークより低くなっている。

(エ)氾濫の影響：図13に水路勾配1/1000、従水路2本で斜面から従水路底までの深さのみが異なる2種の模型で、ステップ降雨を加えた場合の立ち上り時間の比較を示す。20, 50mm/時では両者にはほとんど差がないが、100 mm/時以上では明瞭な差が出ている。斜面から従水路底までの深さの浅い模型では、100 mm/時以上の雨量を加えると従水路から斜面上まで顕著に氾濫するため、斜面上の貯留量が多くなり、流速が見かけ上遅くなり、立ち上りが遅れる。これは古くより洪水時に定性的に指摘されているこ

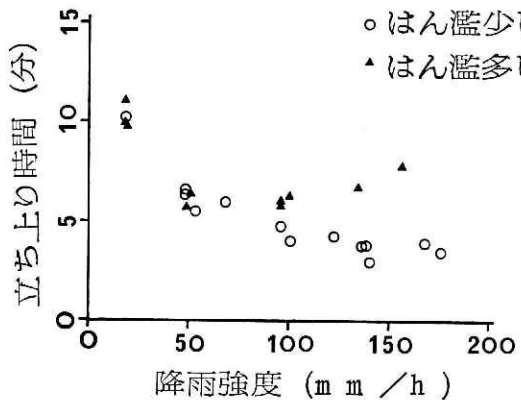


図13 氾濫の影響  
 Fig.13 Increase of the rising time due to inundation.

とで、今の場合には都市内氾濫が下流の洪水波形の低減効果をもたらす説明的な実験例である。

#### 4. おわりに

水田の貯留効果と水路網密度との二つの効果を大型降雨実験施設において実験的に明らかにした。この結果を数値シミュレーションで解析し、モデル化して実用的な流出推算方式を立てるまでにはまだ多くの研究が必要であるが、その第一歩として実験内容を報告し、読者のご批判を仰ぐ次第である。

これら実験には著者ら以外にも防災センター、土研の多くの職員の協力によってなされたもので、水路網密度の効果の実験の初期の段階では中根和郎氏（現建設省）が担当したものであるし、特に大型降雨実験施設の運転に当たった防災センター施設課も含め、厚く感謝の意を述べたい。

#### 付録 1.

貯留面積  $A$  で、切り欠き幅  $B$  を、越流深  $H$  で越流する流量  $Q$  は、越流係数を  $C$  とおいて

$$Q = CBH^{3/2} \quad \text{堰の公式}$$

$$A \frac{dH}{dt} = -Q \quad \text{貯留の式}$$

と書けるから、 $Q = Q_0 + q$ 、 $H = H_0 + h$  と微小変動分を分離して線型化すれば

$$\frac{dh}{dt} = -\frac{3}{2} \frac{CBH_0^{1/2} h}{A}$$

この解は

$$h = h_0 \exp(-t/t_0)$$

となる。この場合の  $t_0$  は

$$t_0 = \frac{A}{\frac{3}{2} \cdot C \cdot B \cdot H_0^{1/2}}$$

で、これを時定数と呼んだ。  $C$  は  $2$  (  $\text{m} \cdot \text{秒系}$  ) 程度の値である。  $A = 5.5 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ 、  $B = 0.1 \text{ m}$ 、  $H_0 = 0.05 \text{ m}$  と仮定すると、  $t_0 = 27$  分；  $H_0$  のみを  $0.01 \text{ m}$  と仮定すると  $61$  分となる。

#### 付録 2.

シェジの式：  $v = Ch^{1/2}i^{1/2}$ 、  $Q = CBh^{3/2}i^{1/2}$

マンングの式：  $v = \frac{1}{n}h^{2/3}i^{1/2}$ 、  $Q = \frac{1}{n}Bh^{5/3}i^{1/2}$

ここで  $v$ ：流速、  $h$ ：水深、  $i$ ：勾配、  $Q$ ：流量、但し  $Q = Bhv$ 、  $B$ ：水路幅（但し以下の説明で  $1$  とおく）、  $C$ ：シェジの係数、  $n$ ：マンングの係数である。シェジの式について説明すれば、  $v$  及び  $Q$  の式から  $h$  を消去して

$$v = Q^{1/3}(Ci^{1/2})^{2/3}$$

上流端  $0$  から下流端  $L$  までの定常状態の流下時間  $T$  は

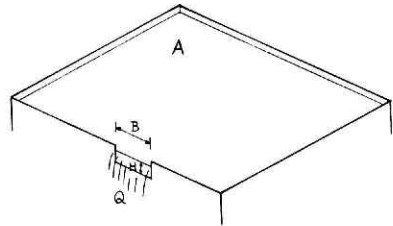


図14 水田の貯留応答説明図  
Fig.14 Notations of the storage computation of a rice field.

$$T = \int_0^L dx/v$$

とおけるから、これに $Q$ を代入し、さらに上流端から $x$ における雨水流量 $Q$ は $rx$ とおけること利用すると、( $r$ : 降雨強度)

$$T = \frac{1}{r^{1/3}(Ci^{1/2})^{2/3}} \int_0^L \frac{dx}{x^{1/3}}$$

となる。同様にマニングの式については

$$T = \frac{1}{r^{2/5}(i^{1/2}/n)^{3/5}} \int_0^L \frac{dx}{x^{2/5}}$$

となる。蛇足ながら $r$ と $v$ とは同じ単位でなければいけない。

よって流下時間は降雨強度の0.3~0.4乗に反比例する。

#### 参 考 文 献

- 1) 青木佑久 (1972): 山地流域における洪水流出の追跡・土木研究所報告, 第143号, pp. 27-58.
- 2) 木下武雄 (1967): 都市化による流出の変化. 土木技術資料, 第9巻第9号, pp. 11-15.
- 3) 木下武雄 (1972): 都市開発に伴う流出の変化に関する研究. 防災科学技術総合研究報告, 第29号, pp. 3-6.
- 4) Kinoshita, T. (1977): Introducing to National Research Center for Disaster Prevention, Science and Technology Agency. *Civil Engineering in Japan*, 1977, Vol. 16, 土木学会, pp. 136-148.
- 5) 木下・益倉・福園 (1980): 水路網密度が流出波形に及ぼす影響について. 第24回水理講演会論文集, 土木学会, pp. 411-416.
- 6) 木下武雄・中根和郎 (1977): 表面流出に関する研究(その1). 国立防災科学技術センター研究報告, 第18号, pp. 35-49.
- 7) 木下・佐々木・富永 (1980): 水田よりの雨水流出に関する実験. 第35回年次学術講演会講演概要集(第2部), 土木学会.
- 8) 木下・和氣・梅谷内 (1977): 木曾川内水排除システムの検討. 第32回年次学術講演会講演概要集(第2部), 土木学会, pp. 215-216.
- 9) 中根和郎・矢崎忍 (1978): 表面流出に関する研究(その2). 国立防災科学技術センター研究報告, 第20号, pp. 137-155.
- 10) 国立防災科学技術センター (1976): 1975年8月17日台風第5号による高知県中部の災害現地調査報告. 主要災害調査第9号.
- 11) 国立防災科学技術センター (1977): 1976年台風第17号による長良川地域水害調査報告. 主要災害調査第12号.
- 12) 岡本芳美 (1978): 日本列島の山林地流域における降雨の流出現象に関する総合研究. 土木学会論文報告集, 第280号.

(1980年6月13日 原稿受理)