

山地流域における直接流出の生起過程

石 原 安 雄・小 葉 竹 重 機

OCCURRENCE OF DIRECT RUNOFF IN MOUNTAIN AREA

By *Yasuo* ISHIHARA and *Shigeki* KOBATAKE

Synopsis

This paper describes first the new measuring instruments for synchronized record, and secondly the results observed by using such measuring instruments, and some considerations based on these results, in the research basin of the tributary of the River Yasu.

These results and considerations are as follows:

- 1) As soon as a rain begins to fall, the very small increment of discharge in a channel is observed. This increment seems to be caused by channel precipitation.
- 2) Additional runoff component in initial duration of rainfall is the flow, through the surface layer composed of fallen leaves and organic matter, having the nature of interflow, to which Darcy's law is applicable.
- 3) The hydrograph calculated by method of characteristics shows fairly good accordance with the observed hydrograph. But after a certain time, an appreciable difference between both hydrograph appears, and the difference becomes abruptly large for the heavy rainfall.
- 4) The former seems to be caused by the rainwater running into the channel directly after infiltration, the latter by the change of interception mechanism, the change of mechanism of runoff like as the occurrence of overland flow, the decrease of infiltration rate.

1. ま え が き

■ 雨水の流出機構を解明するには、まず現象の的確な把握が必要であって、こうした観点から防災研究所の琵琶湖流域水文観測特別事業の一環として、琵琶湖に流入する野洲川中流部の左支川である荒川最上流域に雨水流出試験地を設定し、本年度より本格的な観測を開始した。従来の試験流域に関する研究は森林水文学の分野においてはかなり古くから実施されており、とくに森林の理水機能に関しては多大な成果をあげてきたが、その目的からして水流量をある期間内の総量という形でとらえることが多く、雨水の流出過程のように時々刻々に変化する現象を解明することは困難であった。すなわち雨水の流出機構を解明するには時々刻々変化する水文諸量の的確な測定を行なうことが肝要である。本報告はまずこうした観測方法について触れたのち、現在までに得られた観測結果に基づいて、とくに流出の初期における流出成分の特性に検討を加えたものを述べる。

2. 観 測 方 法

流域内で生起している時々刻々の水文事象の的確な測定のためには、各測定要素個々の値の正確なものと、測定要素間の測定時間軸が一致していることが必要である。測定値の正確さに関しては複数の個数また

は箇所で測定することで補遺されるとし、各測定要素間の時間軸の一致に関しては、同一記録紙上に各要素が記録されるように、記録計として12要素の打点式自動平衡記録計を用いた。この記録計の入力は最大10 mVである。以下各測定要素および測器と電圧への変換方法などについて述べる。

(1) 降水観測

試験地は Fig. 1 に示すような形状をした面積 0.84 km² の流域で、この中に面積 0.18 km² の梅ヶ谷と呼ばれる小流域を含んでいる。雨量計は 0.5 mm の転倒枳型雨量計を用い、その受水部が Fig. 1 の○印で示した3地点に設置してあり、さらに別に受水部と記録部とが一体となっている1ヵ月巻自記雨量計を用意し、必要に応じて適当な場所に設置することができるようにした。梅ヶ谷流域に設置した降水量の受水部は上流の植林の最中で高い樹木のない斜面に鉛直に設置されており、全体の流域のほぼ中央の雨量計は盆地状地形の比較的平坦な場所に設置されている。ここは樹木の全くない草地である。試験地末端にある雨量計は水路内水位測定用ボックスの上に設置されている。これらの3つの雨量計の受感部で発生した1転倒ごとのパルス信号はキャプタイヤーコードで Fig. 1 のハッチで示した観測小屋に送られ、そこで電位差に変換され記録されるようになっている。変換の機構としては、パルス信号によって歯車を回転させ、その回転軸

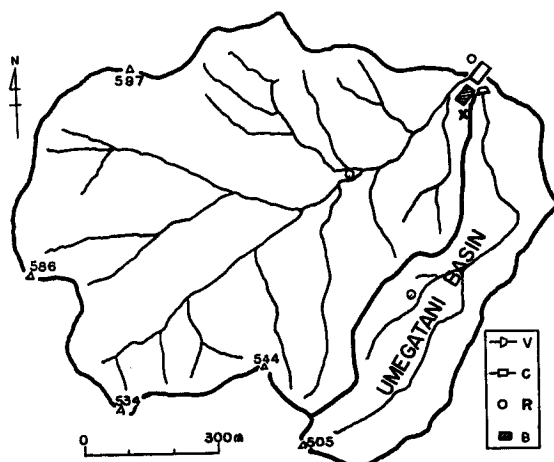


Fig. 1 Topographical outline of the basin, in which numbers show the height in meter above sea level, V shows the V-shaped weir system of water gauge, C the channel system of water gauge, R the tipping-bucket type of rain gauge, B the measuring instrument box, and × the point where runoff from the surface layer is observed.

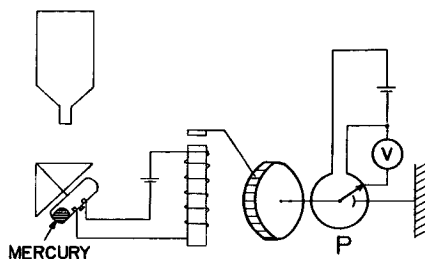


Fig. 2 The conversion mechanism of rainfall-signal to voltage, where P is a potentiometer.

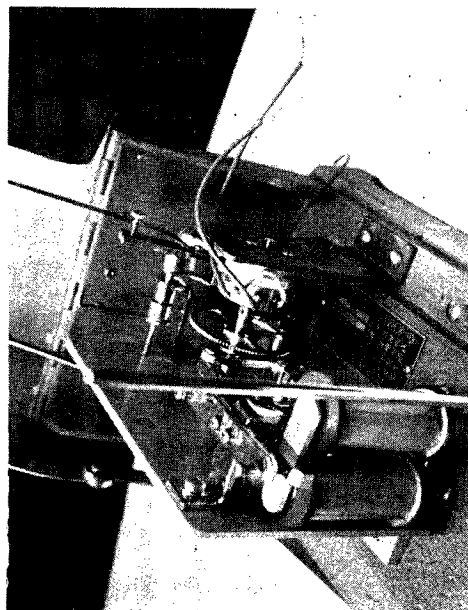


Photo. 1 The converter of rainfall signal to voltage.

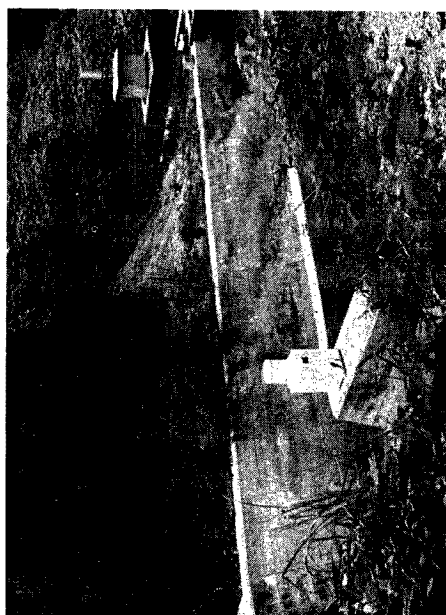


Photo. 2 The channel system for measuring discharge.

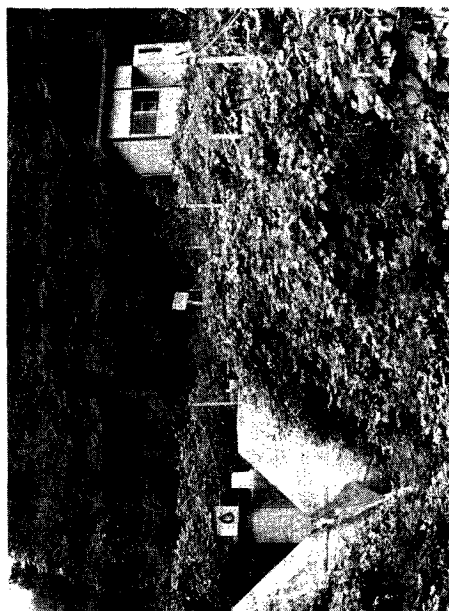


Photo. 3 The V-shaped weir system for measuring discharge and the measuring instrument box.

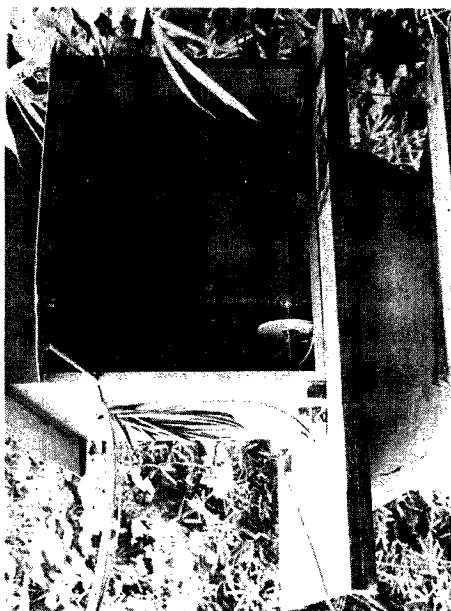


Photo. 4 The measuring instruments for water-level in the V-shaped weir system.

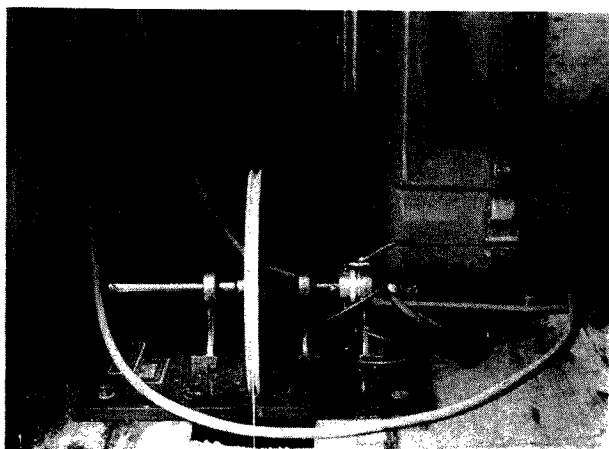


Photo. 5 The detailed photograph of the converter of water-level to voltage in the V-shaped weir system.

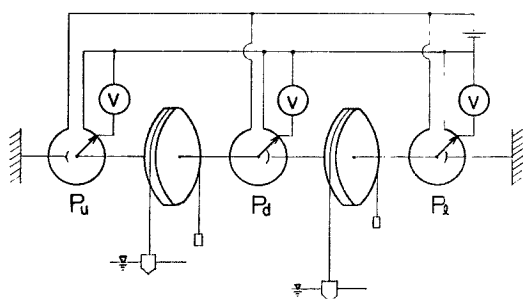


Fig. 3 The conversion mechanism of water-level to voltage, where P_u is a potentiometer for the water-level of upper site of the channel, P_i is for lower site, and P_d is a potentiometer for difference between both waterlevels.

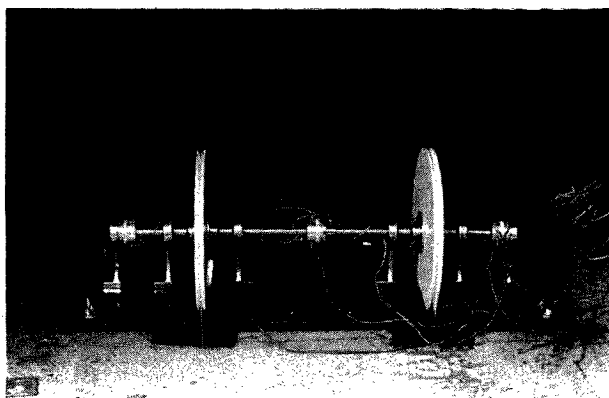


Photo. 6 The converter used in the channel system.

に直結したポテンシオメーターを通して電圧変化としてとり出すという方式を用いているが、その機構図が Fig. 2, 写真が Photo. 1 である。

(2) 流量観測

流量は全体の流域に対しては下流端に設けた水路によって (Photo. 2), また梅ヶ谷の小流域に対しては 90° 三角堰によって測定を行なった。 (Photo. 3)

三角堰の水位測定には通常の3カ月巻自記水位計と、電圧変換機構を備えたフロート式水位計とを併用した。 (Photo. 4) その変換の機構はフロートを吊したプーリーにポテンシオメーターの軸を直結してプーリーの回転がそのまま電圧変化としてとり出せるようになっており、その写真が Photo. 5 である。水路における水位測定は2つのプーリーと3つのポテンシオメーターを用いて上流側水位、下流側水位、上、下流の水位差が同時に電圧変化としてとり出せるようになっている。その機構図を Fig. 3 に、写真を Photo. 6 に示す。上記の電圧変化はいづれも観測小屋にキャプタイヤーコードで送られ、記録紙上に記録される。

(3) 表層水観測

ここでいう表層水とは山腹斜面上に巾1mのブリキ板を約10cm程の深さに挿入し、その板上に集まってくる雨水である。集まった雨水は0.5mmの転倒樹型雨量計に導かれ、降水量と同じ機構によって電圧変化として記録される。この表層水観測を同じ斜面上の峰線から10mと20mの地点で行なった。Fig. 1中×印がその位置である。これらの観測装置の様子が Photo. 7 である。

(4) その他

電気伝導計、水温計を若干改造して同一記録紙上に記録させた。

(5) 電源および記録時間間隔

以上各観測項目について述べたわけであるが、ここで一番大きな問題は山奥のため現地に商用電源がないことである。



Photo. 7 The measuring equipment for runoff from the surface layer.

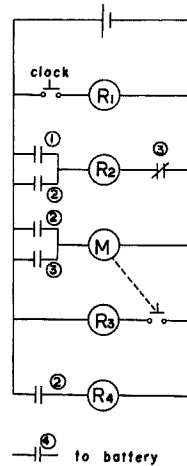


Fig. 4 Sequence circuit diagram for switching at fifteen minutes interval.

すなわち記録計などの電源はすべて電池からとらねばならず、水文観測の特質からいって、いかに小容量の電池で長期間記録をとるかということである。そこで通常は15分ごとに3分間の記録をとり、雨が降り始め、雨量計からの信号が入るとそれからある一定の期間連続して記録がとれる装置を考案したが、雨の信号で働く装置は種々の問題があることがわかったので、今年度は使用できなかった。今年度は普通は15分間隔の装置だけを用いたが、かなりの雨量が予想されるような場合にはあらかじめ連続記録がとれるよう、別のスイッチを入れておくようにした。上述の装置のシーケンス回路図は Fig. 4 に示すとおりである。図中R

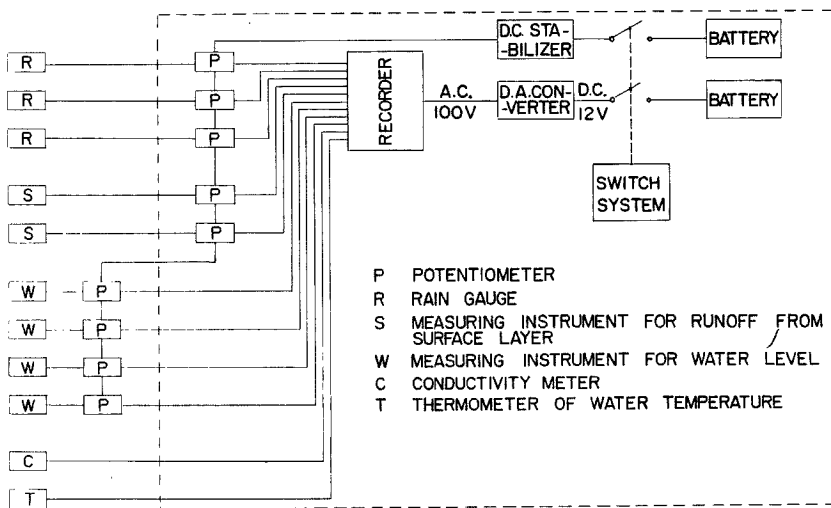


Fig. 5 Block diagram of the measuring-instrument system.

はリレー、数字はその数字のリレーに関連したスイッチを表わし、 M は3分間で1回転する電動機構を表わす。観測装置全体のブロックダイアグラムは Fig. 5 に示すとおりである。

3. 観測結果とその考察

全流域を対象とした水路を用いる流量測定は取水管の不備により今年度は行なえなかったもので、以下における流量の測定結果は梅ヶ谷流域の三角堰におけるものだけである。梅ヶ谷流域は流域面積約 0.18 km^2 で

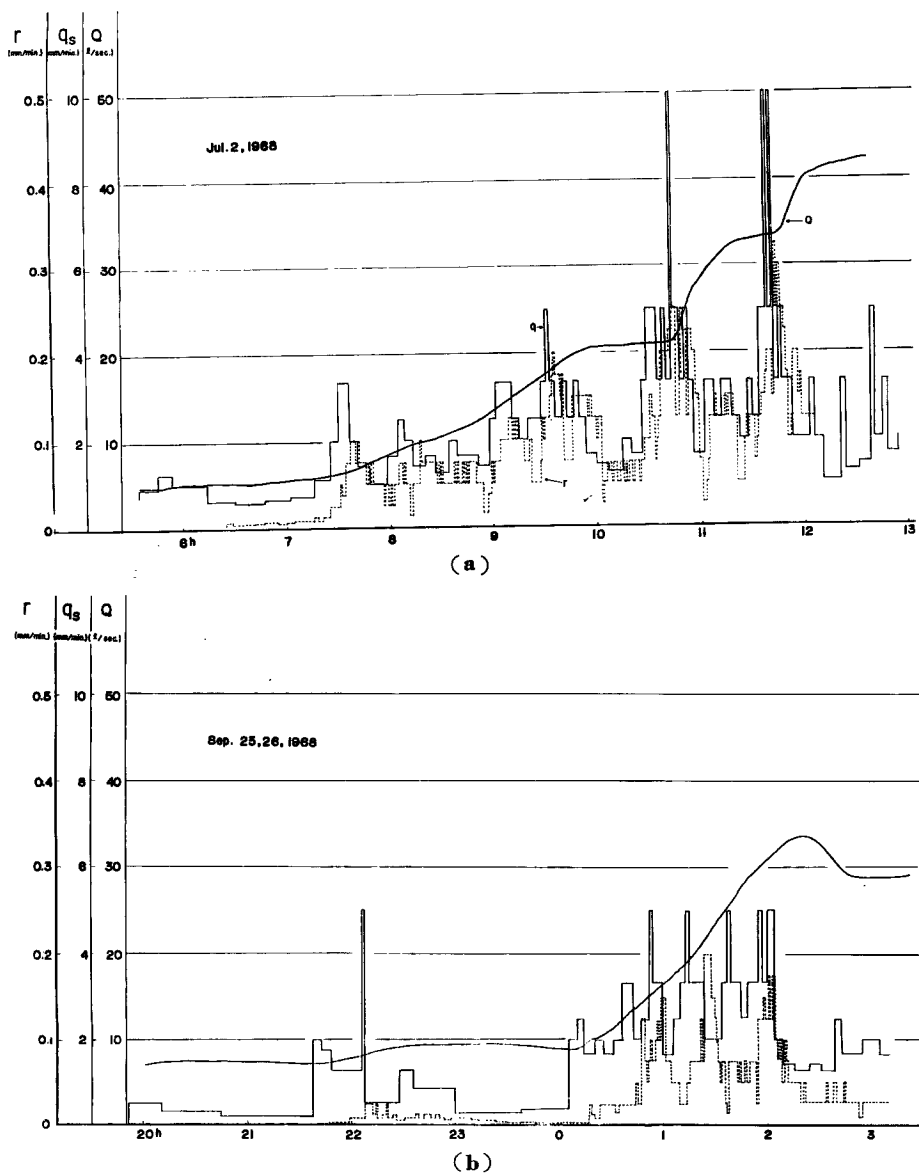


Fig. 6 The example of observation of runoff and rainfall, where Q shows the outflow from Ume gatani basin, r the rainfall intensity, and q_s the runoff rate from surface layer at the lower site of slope.

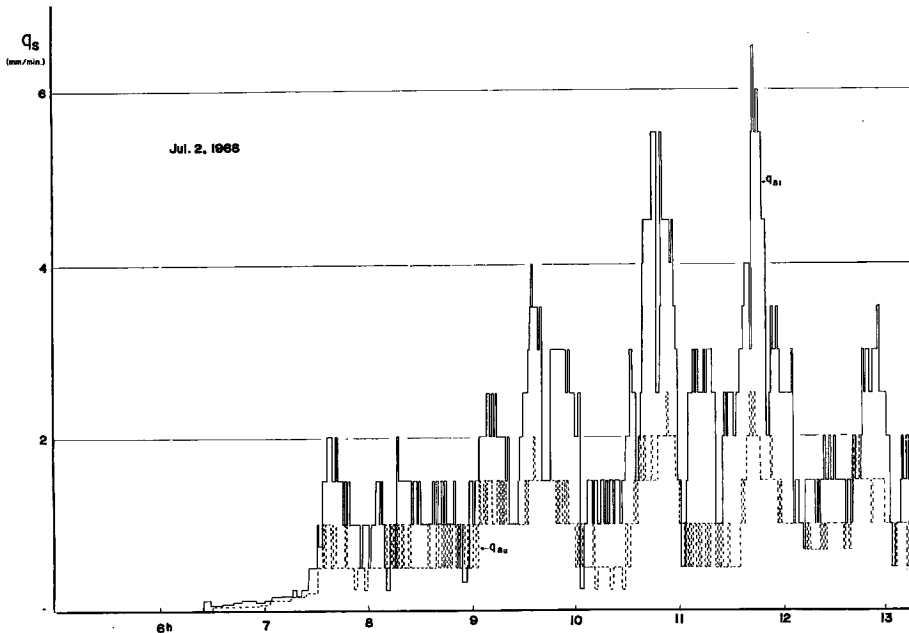


Fig. 7 The observed runoff rate from surface layer, where q_{su} shows the runoff at the upper site of a slope and q_{sl} the runoff at the lower site of the same slope.

あって上流は二本に分れているが全体として細長い形状をしており、流路長は約 1.5 km である。地質は花崗岩で表層は花崗岩の風化したマサ土でおおわれている。植生は上流部の植林最中の地域を除けば、針葉樹のかなりよい林相を示しており、夏には高さ 1 m 程の下草がほぼ全域に生育する¹⁾。表層水の観測を行なった場所も Photo. 7 でわかるようにはほぼ梅ヶ谷流域の平均的な斜面である。

Fig. 6 (a) は 43 年 7 月 2 日に降った総降水量 118 mm の降雨に対する観測結果で、始めの 7 時間の部分を 1 分間隔で示したものである。Fig. 6 (b) は 9 月 25 日の降雨に対するものであるが、前半 18 mm、後半 46 mm 無降雨間隔が 4 時間の 2 つの連続した降雨の例で、そのうち後半の雨に対して初期の 7 時間分を示したものである。図中実線の曲線は梅ヶ谷流量 Q 、実線の棒グラフは梅ヶ谷における降雨強度 r 、点線の棒グラフは降線下 20 m の位置（以下下流側とよぶ）の表層水流出強度 q_s である。また Fig. 7 は 7 月 2 日の降雨時の上流側表層水と下流側表層水を示したものである。これらの図および他の降雨に対する結果からわかることは

- 1) ごくわずかではあるが、雨の降り始めとほぼ同時に流量の増加がみとめられること。
- 2) 表層水が現われるまでには 2~3 mm の雨量が必要であり、降雨期間中では降雨強度が 3 mm/hr 以上のとき表層水の現われ方が顕著であること。
- 3) 降雨強度が増加しはじめるとほぼ同時に表層水も増加するが、両者のピークでは 5~7 分程度の時差を生じ、上流側がややはやい傾向があり、降雨減少時には下流側では約 10 分の時差を生じること、などである。

1) の降雨開始直後の流量増加は河道降雨による流量増加と考えられる。2), 3) の降雨と表層水との関係について更に考察を進める必要がある。降雨と表層水のピークの時差が約 5 分であることを考慮して、両者とも 5 分間の積分した量で横軸に降雨、縦軸に表層水をとってプロットしたのが Fig. 8 である。図中黒丸は降雨の増加期、白丸は減少期、半黒丸は定常期を表わす。これらの図を概観すると、比例関係がある

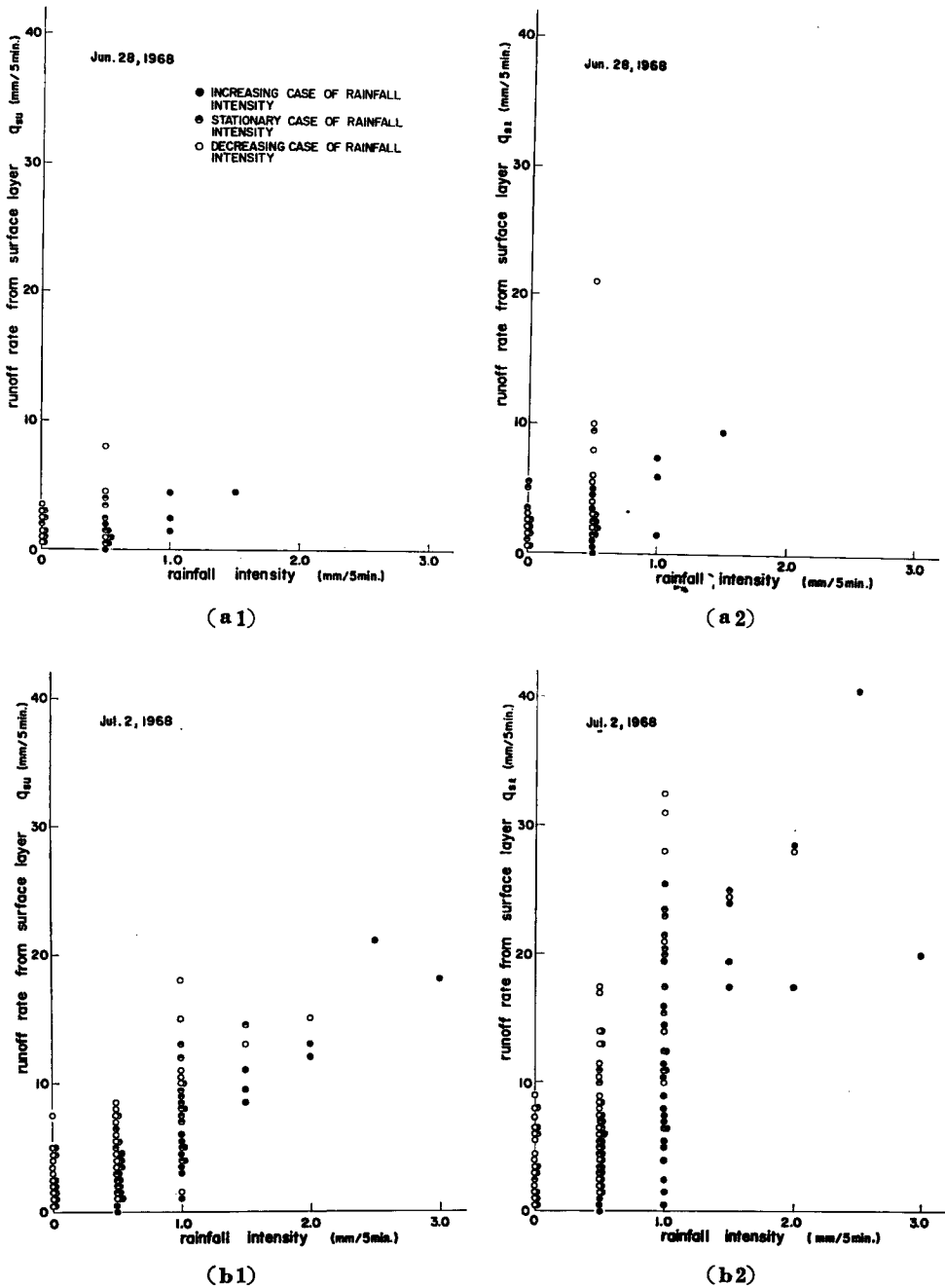


Fig. 8 The relation between the rainfall amount and the runoff amount from surface layer, during a period of five minutes.

ようにみえ、これは奥西の結果²⁾と同じ傾向である。しかし、図に示したように、降雨強度の増加期と減少期では、両者の関係に明らかな差が認められ、このことは表層水の流出機構を暗示しているように思われる。こうした関係をさらに詳細に検討するため、上流側の5分間流出量と、同時における下流側の5分間流出量をとって図示したものが Fig. 9 である。Fig. 7 では両者のピークの発生時刻には2～3分程度の差が認められ、また Fig. 9 が5分間流量であるにもかかわらず、ループを描くという事実から、表層水流出機構が、少なくともある種の伝播過程を含むことを示しているように考えられる。さらに、Fig. 6 (a) (b) および Fig. 7 のところで説明したように、降雨ピークと表層水流出ピークとの時差がたとえば下流側表層水に対して5～7分ではほぼ一定であり、また降雨減少時の時差が約10分で、これも一定であることを考慮すると、上の伝播過程は線型特性をもつと考えることができる。また実際にも、地表には厚さ数 cm 程度以上の落葉層とか、腐植土層の存在が確認されているので、以下では表層水の流れをダルシー則に従うものと考えた。そこで降雨減少期に下流側表層水は10分間の時差を生ずることから、流下距離を 20 m として流速を計算すると $10/3$ (cm/sec) となりかなり早い、落葉層ないしは腐植層上層中の流速としては考えられる値である。

なお電気伝導度は流量に比例して増加し、水温の変化は微小であったが、使用した測定器が本来連続記録のできるものではなかったもので、良好な結果が得られなかった。これについては今後改良する予定である。

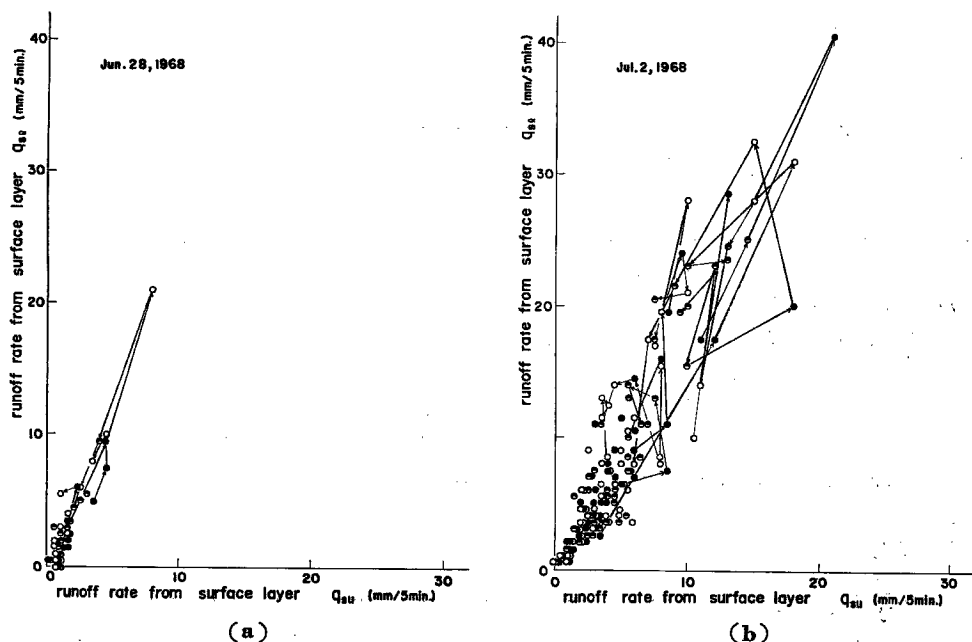


Fig. 9 The relation between the runoff amount from surface layer at the upper site and that at the lower site during a period of five minutes.

4. 初期流出成分の解析

以上の結果にもとづき、従来からいわれているように流出過程を山腹斜面と河道との2段の伝播過程をもつものと考えることができる。

(1) 山腹斜面における流出

山腹斜面における流れを1次元流的に取り扱うこととすると連続方程式および運動方程式はそれぞれ、

$$\gamma \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_s}{\partial x} = r_e \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$q_s = V_s h \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 q_s は斜面における単位巾流量、 h は水深、 r_e は表層水流出に対する有効降雨強度、 V_s は斜面における流速を表わし、 V_s は前項の考察から一定値であって、10/3 (cm/sec) である。(1)、(2) 式より特性方程式は

$$\frac{dx}{1} = \frac{V_s dt}{\gamma} = \frac{dq_s}{r_e} \quad \dots\dots\dots (3)$$

となる。したがって、特性曲線 $dx/dt = V_s$ 上で

$$q_s = \frac{V_s}{\gamma} \int_{t_1}^{t_2} r_e dt \quad \dots\dots\dots (4)$$

いま流域をモデル化して考えると、梅ヶ谷流域は上流で2本に分れてはいるが全体として細長い形状をしているから、簡単のためにこれを長方形の流域と考えると、流路長が 1.5 km 面積が 0.18 km² であることから、斜面長は片側 60 m となる。60 m の斜面長を 10/3 cm/sec の流速で流下するから、流下時間は30分となる。したがって (4) 式から $\bar{r}_e$ を30分間の有効降雨量とすれば、

$$q_s = V_s \bar{r}_e \quad \dots\dots\dots (5)$$

によって、斜面下流端での表層水流出強度が計算できる。

(2) 河道降雨

一般に河道降雨を受ける巾を b とし、降雨強度を r とすると、河道の単位長当りの降水供給量 q_e は、

$$q_e = b \cdot r \quad \dots\dots\dots (6)$$

である。しかし、巾 b は平均的なもので測量によってある程度の精度で求めることができようが、ここでは以下の方法によって推定を試みた。

Fig. 6 (a) において降雨開始後1時間程度で流出量がほぼ一定となっており、その間の平均降雨強度は 2.5 mm/hr、そのときの流量の増分は 1 l/sec である。この流量増分が河道降雨によるものであると考え、 $Q = r \cdot (\alpha A)$ を用いて河道部面積の全面積に対する割合 α を計算すると $\alpha = 1/125$ という値がえられる。したがって全面積の 1/125 が河道部の面積ということになるから、河道長 1.5 km に対する河道降雨を受ける巾は 120/125 m ということになる。

一方、前に斜面長を 60 m と仮定したが、計算上の有効長は $60 \times \frac{124}{125}$ m となる。したがって流速 10/3 cm/sec は必ずしも正確な値ではないので流下時間を30分に固定して考えると、(5) 式中の V_s としては、有効長を流下時間で除した値 3.31 cm/sec を使用しなければならない。

(3) 河道における流出

河道における連続と運動の方程式は

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$Q = V_e A \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 Q は梅ヶ谷下流端における流量、 q は河道への流入量 ($q = 2q_s + q_e$)、 A は流水断面積、 V_e は河道における流速である。

ところで、一般には (8) 式の V_e は河道内の流れを対象としているので水深とともに変化する。しかしながら、**Fig. 6 (a)** において6時と7時の間で流量がほぼ一定値を示す時刻と降雨の開始時の時差はほぼ1時間であり、また、11時と12時の間で一定値を示す時刻とそれに対応すると思われる降雨の開始時の時差もほぼ1時間である。さらに、いま対象としている流出の初期においては流量そのものの値がそんなに大きくはなく、かつ現地の河床には玉石や岩が存在していて、普通の開水路流れというような流れ方をしていない。いわば岩や玉石の間をぬって流れるといった状態の流れ方をしている。これらを堪案して、いま対象と

している流量範囲内では、流れの速度 V_e を一定値と仮定してよいと思われる。したがって (8) 式は特性方程式により斜面における流出と同様、特性曲線に沿って

$$Q = V_e \int_{t_1}^{t_2} q \, dt \dots\dots\dots (9)$$

となる。さらに、一定強度の降雨が続いたとき 1 時間程度で流量が定常になることから、河道の最上流端から下流端までの間の伝播時間を 1 時間と仮定すると、 $(2q_e + q_c)$ を 1 時間積分した量 $\bar{q}$ を用いることによって、下流端での流出量は (9) 式より次式で与えられることになる。

$$Q = V_e \bar{q} \dots\dots\dots (10)$$

上式中、 V_e は 1.5 km を 1 時間で流下するとして計算すると $V_e = 41.7 \text{ cm/sec}$ である。

(4) 山腹斜面における有効降雨 r_e の算定

以上、流出過程を山腹斜面と河道との 2 段の伝播過程をもつものと考えて、降雨の比較的初期における流出時の性質について検討を加えてきたが、ここで問題となるのは、植生による降雨遮断および山腹斜面上における浸透などを考慮した、表層水に対する有効降雨 r_e をどのように考えるかということである。表層水の流出が現われたのちのそれに対する有効降雨 r_e に関係する大きな要素は、植生による遮断量と浸透量である。まず遮断量については、表層水を観測した場所で行なった林間雨量の測定結果 (約 50%) と、従来数多く行なわれているこの種の研究成果⁹⁾ (約 20%) とから、樹木のない地域も含めた全地域の平均的な量として試算の結果、降雨の 30% と仮定した。つぎに浸透量であるが、通常の浸透能の考えに従えば、浸透能より小さい降雨強度の場合は表面流出は起らず、浸透能より大きい降雨強度の場合はその越える部分が表面流として発生するはずである。事実、観測された表層水は梅ヶ谷雨量計による降雨強度 (林外降雨強度) が 3 mm/hr のとき顕著に現われている。したがって表層水の発生する限界を定める浸透強度が存在すると思われる。しかしながらこの浸透強度を越える降雨があった場合、その越えた部分すべてが表層水となることは、観測された水量が極端に少ないという結果から、さらに、上述の方法による計算結果と実測流量との比較において、考えることが困難である。そこで、いまの場合林内降雨強度が 2 mm/hr 以下については全部浸透するものとし、残部の降雨量の何%かが表層水の流出に直接関与し有効降雨となると仮定して試算を行なった。その結果、5%として計算したときが実測値との適合性をもっともよかった。実際の現象として、現在のところ上の比率のもつ意味を厳密に理解するまでには至っていないが、下草があったり、落葉があったりすること、また平面的にみても地表および地質の条件が一様でないこと、などを考慮すると、表層水に対する有効降雨の算定に対して、こうした比率を考えることが許されるように思われる。

5. 解析結果とその考察

(1) 解析の結果

Fig. 10 (a), (b), (c), (d), は計算結果と実測流量を比較して示したものであり、実線は実測流量、破線は計算流量を表わす。これらの図からわかることは、次のようである。

- 1) 降雨の初期においては実測値と計算値とはかなりよく一致している。
- 2) いづれも降雨開始後、ほぼ一定の時間、4～5 時間たつと実測値と計算値との間にあきらかな差が生じてくる。
- 3) さらに降雨強度が大きくなると実測値と計算値とは比較にならない程の差が生ずる。

(2) 解析結果の考察

さて Fig. 10 (d) は 4 時間程の無降雨期間をはさんで二つの降雨があった場合の結果であり、前半の降雨前の無降雨期間は約 3 日である。4 時間程度の無降雨期間があったとしても、樹葉や草、地層が乾燥するというようなことは考えられず、かなりの湿潤状態に保たれていたことが容易に想像される。前半の降雨に対しては、その前の無降雨期間が 3 日もあるので、前半の降雨の開始時と、後半の降雨の開始時の地表付近の湿潤状態にはかなりの差異があったと考えてよい。しかるに、計算値と実測値とを比較した場合、両者とも

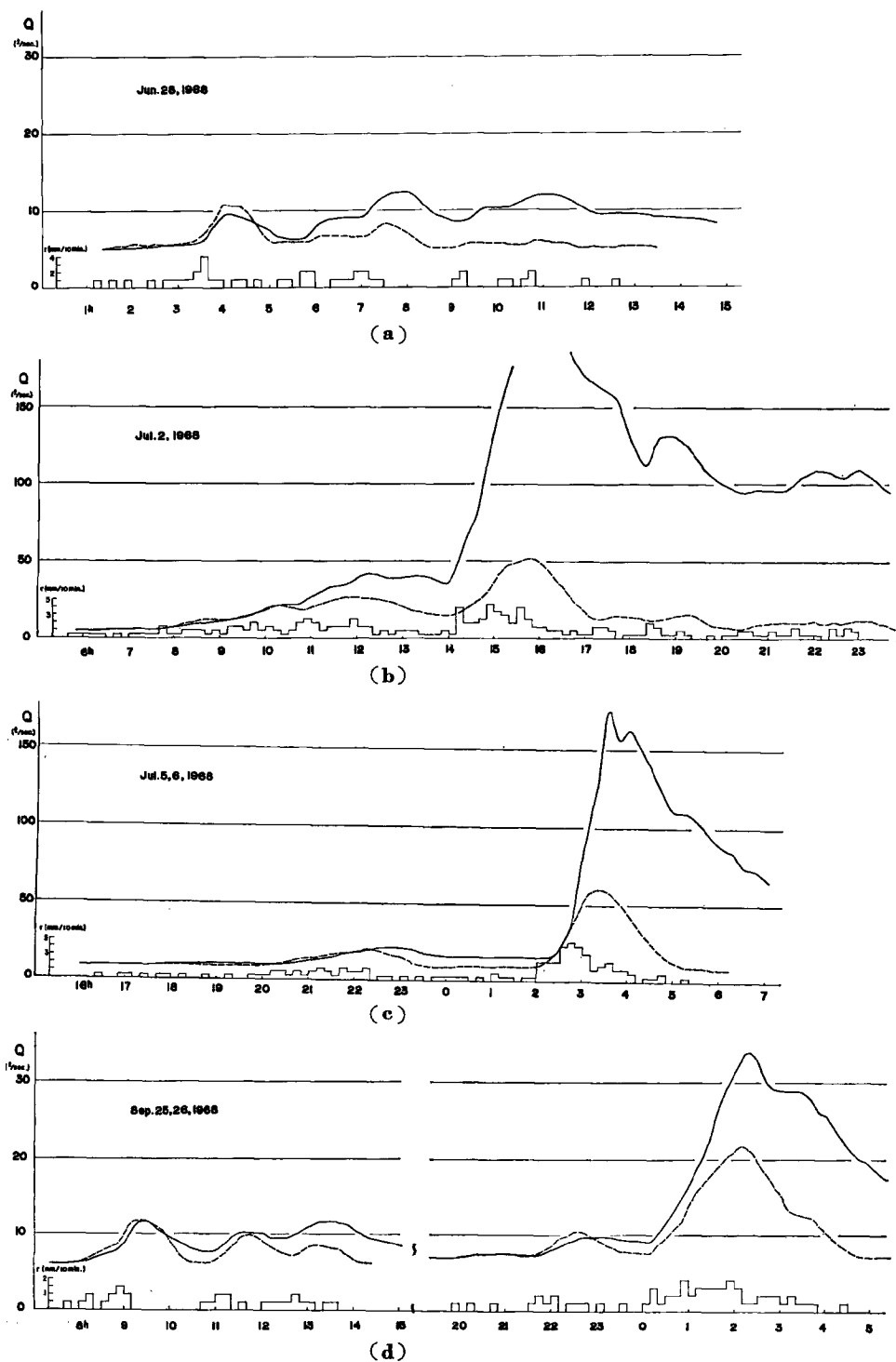


Fig. 10 The comparison of the observed and calculated hydrographs, where full-line shows observed hydrograph and broken-line calculated hydrograph.

降雨開始後5時間程度で顕著な差異が現われている。他の降雨の場合も同様に降雨開始後4～5時間で差が現われているということを考えると、少なくともここで取り扱った降雨初期における表層水というのは、常に上述したような機構によって流出するものとしてよいと思われる。

つぎに、4～5時間後に現われる差の原因について考えてみるに、その差が現われる時点においてとくに降雨強度が大きくなるということがなく、しかもその差の時間的な変化はあまり急激ではない。こうした差を上で考えた表層水のような地表のごく近傍で生ずる流出成分の流出機構の変化や、降雨遮断機構の変化によって説明することは困難であろう。むしろ、地中へ浸透した雨水が、比較的浅いところに存在する境界（上層と下層とで透水性に差がある場合）に沿って斜面下流方向に流れ、それが直接河道へ流出するような成分の発生によって適切に説明することができる。

また、Fig. 10 (b), (c) および (d) に示されているように、さらには降雨強度が大となって、計算値と実測値との間に極端な差が無ずる原因は、地下を通る流出成分の増大だけでは説明することができず、降雨遮断の完了、表層水の流出機構の変化、浸透能の減少、さらには地面流の発生などがあげられ、いわゆる洪水流出の状態へ移行したと考えるのが妥当であろう。

このように、いま本文で取扱った流出成分以外の流出成分の存在とその機構、ならびにいわゆる洪水流出状態への移行などについてはさらに研究すべき多くの課題があり、われわれは、今後はこの流域を対象としてこれらの現象を究明していくための観測研究と理論的研究を進めていくつもりである。

6. む す び

雨水流出機構を解明する目的で荒川流出試験地において種々の改良した観測機器を用いての観測と、その解析結果について述べたが、得られた成果を要約するとつぎのようである。

- 1) 降雨開始後ただちに流量の増加がみとめられるがこれは河道降雨による流量増加である。
- 2) 降雨初期における山腹斜面上からの流出（表層水流出）はダルシー則に従う中間流的な性格をもつものである。
- 3) 特性曲線法で計算した流量と実測流量は降雨の初期においてはよく一致するが、ある期間を過ぎると差が大きくなり、降雨強度が非常に大きい場合は比較にならない程の差を生ずる。
- 4) 前者は一度浸透した雨水が再び直接河道に流出するという成分の存在によるものと思われる。後者は降雨遮断機構の変化、表層水流出機構の変化、浸透能の減少、地面流の発生などいわゆる洪水流出の状態への変化を示すと考えられる。しかしながら、これらについては観測による実証が必要なことはいうまでもない。

最後に、本試験地の設置と観測の仕事に対して、絶大な御支援と御協力を賜った滋賀県庁の関係者、並びに地元の甲西町の方々に深甚の謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 石原安雄，長尾正志，小葉竹重機：荒川流出試験地の流域特性について，京大防災研究所年報，第11号B，昭43.3.
- 2) 奥西一夫：山地試験地における降雨流出の観測，京大防災研究所年報，第6号，昭38.7.
- 3) たとえば R. K. Linsley: Applied Hydrology 1949. pp.264～268.