

三重大学附属演習林における量水観測と流出特性

細江 一之*・本多 潔・川邊 洋・林 拙郎

Discharge Measurements and Runoff Characteristics
in the Mie University Forests

Kazuyuki HOSOE*, Kiyoshi HONDA Hiroshi KAWABE and Setsuo HAYASHI

1. はじめに

近年、森林水文学をはじめとする水文学の分野は、急速な進歩を遂げつつある。その背景には、森林の水源涵養機能を科学的に明確にすることを、社会から迫られているという状況が存在している。このため、全国各地で水文観測が実施され、貴重なデータを供給して、研究の発展に寄与してきた。

三重大学附属演習林では、紀伊冬温暖夏多雨気候区に属するという特徴を生かし、昭和62年(1987)4月より量水観測を開始した¹⁾。観測が軌道に乗り、データも蓄積されてきたので、ここに観測結果の概要と若干の解析結果について報告する。

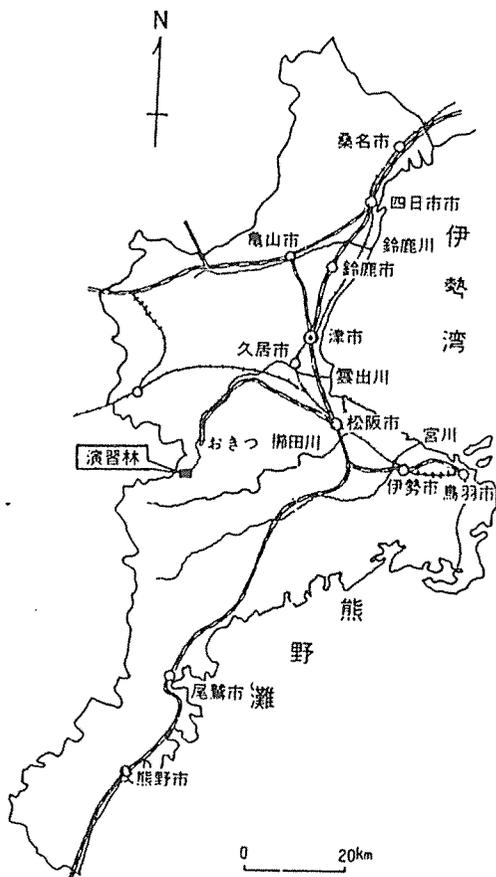
なお、本観測に関して、種々の便宜を図っていただいている、演習林主事島地岩根助教授をはじめとする演習林の職員の方々、および観測システムの整備等に尽力いただいた当時大学院生の鈴木伸彦氏(愛知県庁)に深甚の謝意を表する。

2. 観測流域の概要

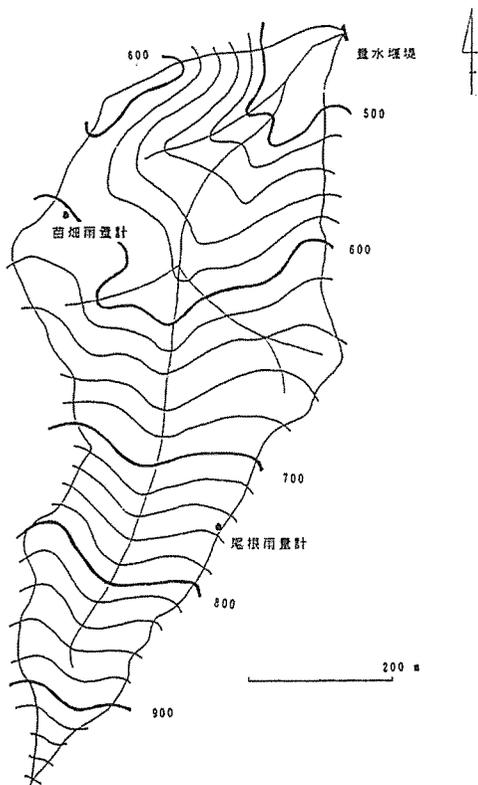
三重大学附属演習林は、三重県中西部、雲出川上流の奈良県境に近い一志郡美杉村川上にある(図-1)。年平均気温は12.4℃、年降水量は2,517mmであり、紀伊冬温暖夏多雨気候区に属している¹⁾。

観測流域である「ぬたの谷」流域(図-2)は、面積30.6ha、標高は480m~990mに広がり、全体として北北東に向いた斜面である。植生は、流域下部にスギやヒノキを中心とする人工林が広がり、流域上部には広葉樹(シデ類・カエデ類やブナ等)を中心として、モミヤツガなどの常緑針葉樹を含む天然林が分布している。これらの割合は、人工林53%、天然林46%で、残り1%が裸地等となっている。地質は、全域にわたって、二疊紀新期~白亜紀の黒雲母角閃石花崗閃緑岩が分布している。

* 現所属：KK阪南コーポレーション



図一．三重大学附属演習林位置図



図二．観測地点および流域地形

流域の平均幅（流域面積を河川の長さで割った値）は0.255km，ホートンの流域形状係数（流域の平均幅を河川の長さで割った値）は0.21となり，比較的細長い形状の流域である²⁾。

観測の開始時期は，量水観測が昭和62年（1987）4月，雨量観測は，苗畑で昭和63年（1988）5月，尾根で平成元年（1989）3月である。

3. 観測方法

水位の観測は，量水堰堤に設置された水位計で行なう。測定範囲0～2 m，分解能1 mmであり，月巻きのチャート紙にペンで記録されるため，回収した後デジタイザーで読み込み，流量を計算する。

一方，雨量の観測は，苗畑と尾根の2箇所に転倒マス型の雨量計を設置し，コーナー・システム社製のKADECを用いて記録している。これにより最大7か月の自動計測が可能であり，記録されたデータは，現地でコンピュータにより回収される。

4. 観測結果

観測された長期（月単位）および短期（日単位）のハイドログラフの代表的なものをいくつか掲げる。なお、本報で使用した雨量は、苗畑のデータである。

図-3(1)～(16)は、昭和63年(1988)9月から平成元年(1989)12月までのハイドログラフとハイトグラフを、月毎に表わしたものである。いずれも、上段がハイドログラフ、下段は1時間雨量のハイトグラフである。この期間の流出率は0.67であった。

図-4(1)～(8)に出水によるハイドログラフ8例を示す。上段が流量、下段は10分間雨量である。ここでは、春2例((5)(6)), 夏2例((7)(8)), 秋2例((1)(2)), 冬2例((3)(4))を取り上げた。

5. 雨量と流量の相関

(1) 雨量と流量の相互相関

1つのシステムへの入力と出力の関係にある2つの時系列の例として、流域への降雨と河川流出量の間関係を挙げる事ができる³⁾。降雨の大部分は、直接地表面を流れて河川に流入する表面流出成分と、地中に浸透した後、ゆっくりと流出する地下水流出成分となり、ごく一部が大気中への蒸発散などとなる。この降雨が流れ集まって、下流の量水地点に到達するまでにはある時間遅れ(タイムラグ)がある。

本節では、このタイムラグを、降雨と流出の相互相関をとることにより調べた。結果を図-5(1)～(8)に示す。縦軸は相互相関係数、横軸はラグタイム(単位:時間)である。

(2) タイムラグ・ピーク流量と各因子との相関

前節で示されたように、雨量のピークと流量のピークの間にはタイムラグがあるが、それらの値には40～120分の幅がある。そこで、このタイムラグの長短とピーク流量に影響を及ぼす因子として、下記のものを選び、各因子とタイムラグ・ピーク流量との相関を調べた。各統計量を表-1に示す。

- ・ 降雨時間：対象とする流出に直接関係がある降雨の継続時間
- ・ 総雨量：上述の降雨時間内に降った雨量の総和
- ・ 3日前雨量：対象とする降雨より前3日間の先行降雨量
- ・ 7日前雨量：対象とする降雨より前7日間の先行降雨量
- ・ ピーク雨量：前述の降雨時間内でのピーク10分間雨量
- ・ ピーク位置：対象とする降雨中でのピークの位置(降り始めにピークがある場合は0, 降り終わりの場合は1)

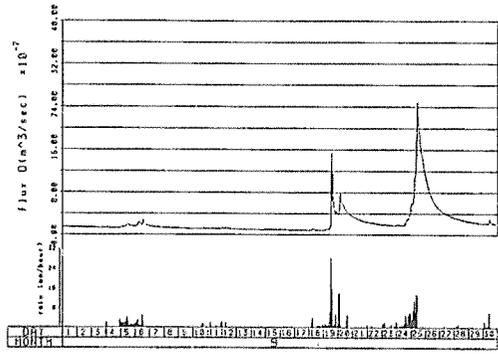


図-3 (1) 昭和63年9月

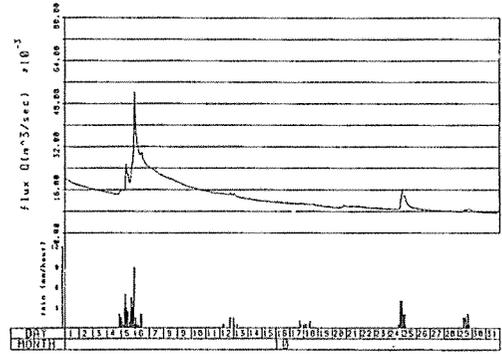


図-3 (2) 昭和63年10月

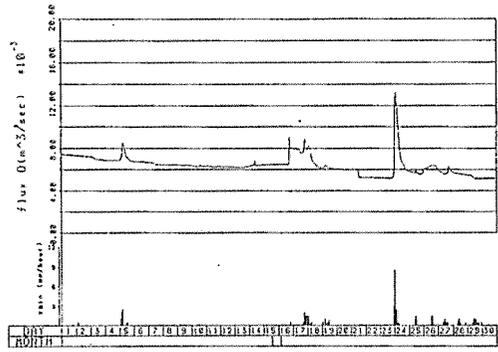


図-3 (3) 昭和63年11月

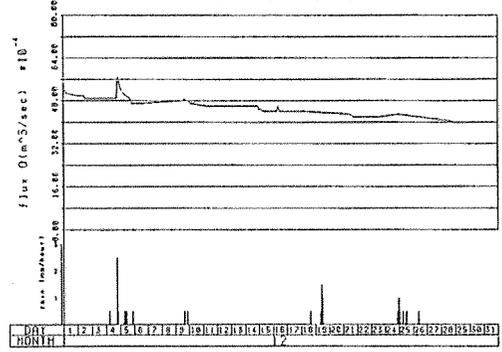


図-3 (4) 昭和63年12月

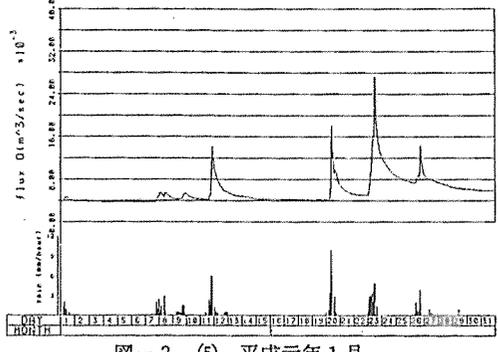


図-3 (5) 平成元年1月

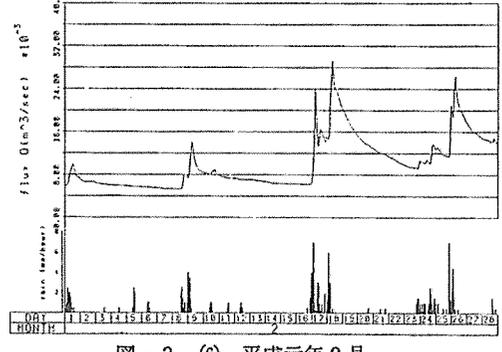


図-3 (6) 平成元年2月

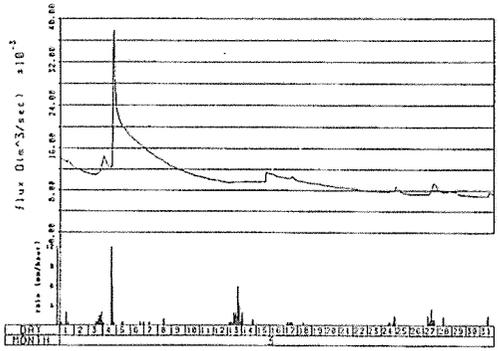


図-3 (7) 平成元年3月

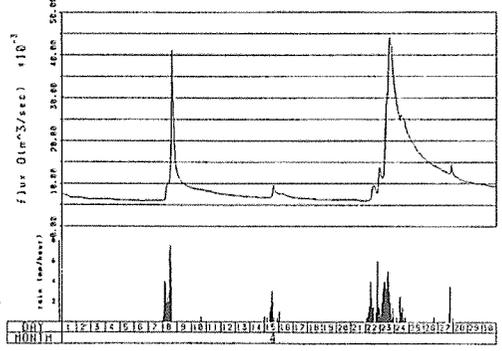


図-3 (8) 平成元年4月

図-3. 長期ハイドログラフ

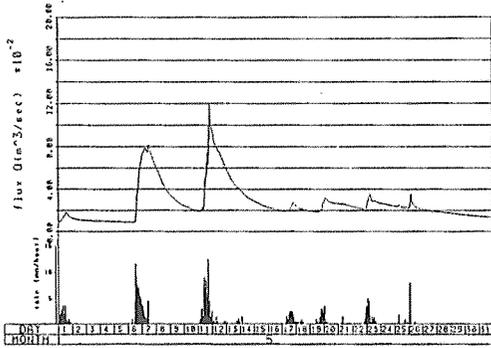


図-3 (9) 平成元年5月

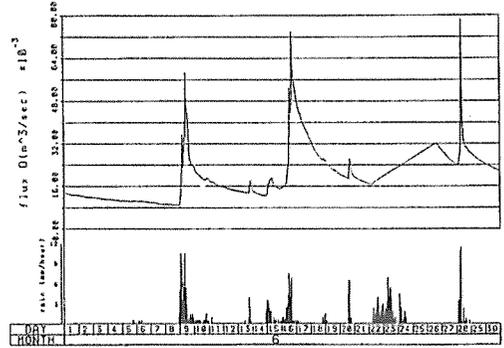


図-3 (10) 平成元年6月

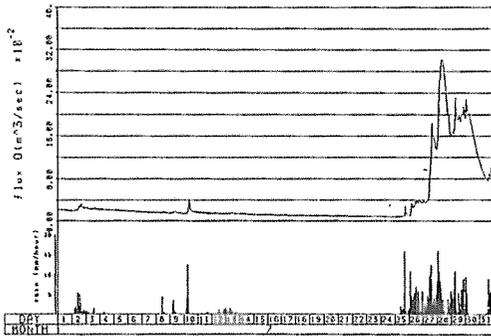


図-3 (11) 平成元年7月

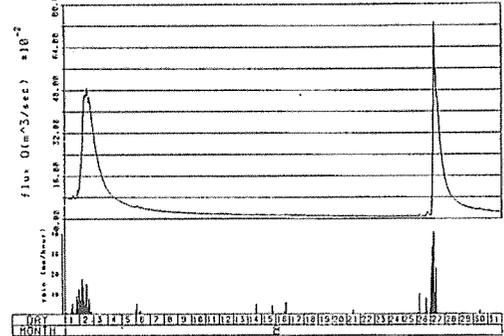


図-3 (12) 平成元年8月

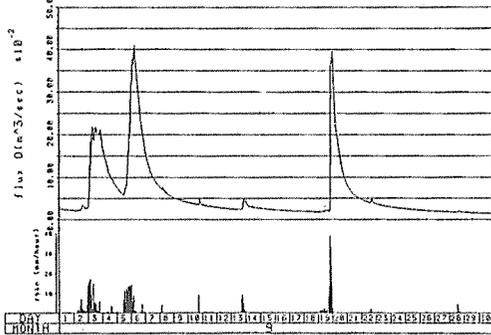


図-3 (13) 平成元年9月

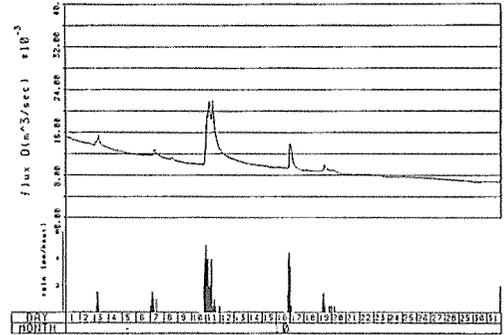


図-3 (14) 平成元年10月

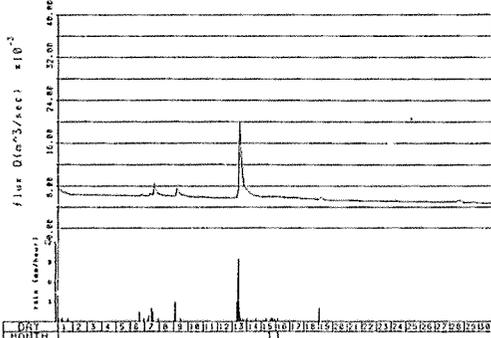


図-3 (15) 平成元年11月

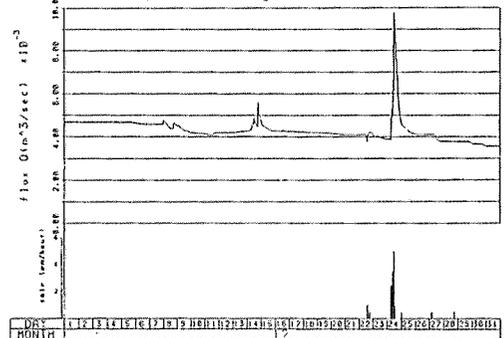


図-3 (16) 平成元年12月

図-3. 長期ハイドログラフ

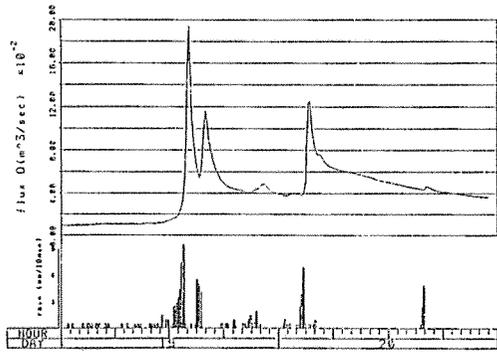


図-4 (1) 昭和63年 9月19~20日

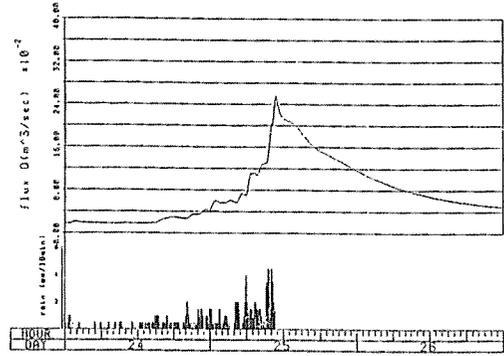


図-4 (2) 昭和63年 9月24~26日

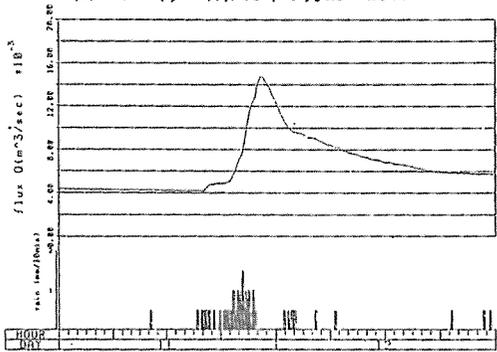


図-4 (3) 平成元年 1月11~12日

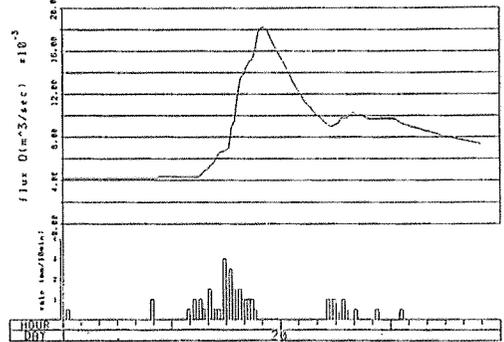


図-4 (4) 平成元年 1月20日

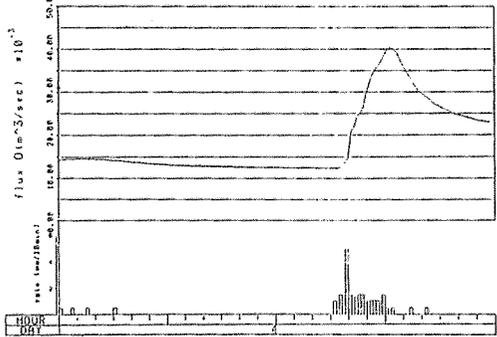


図-4 (5) 平成元年 3月4日

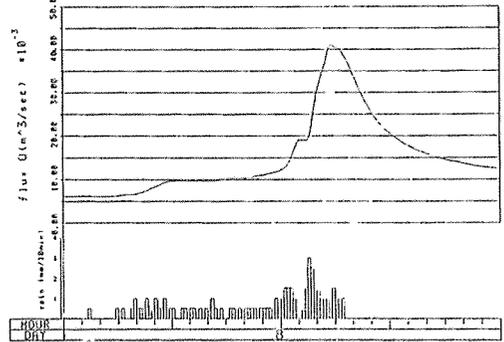


図-4 (6) 平成元年 4月8日

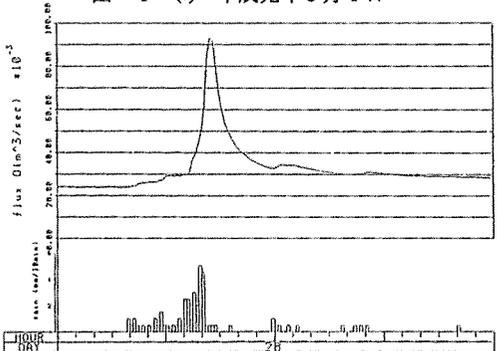


図-4 (7) 平成元年 6月28日

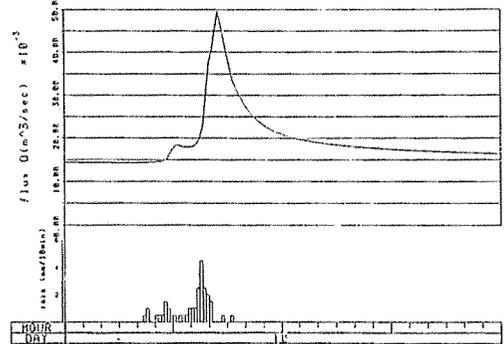


図-4 (8) 平成元年 7月10日

図-4. 短期ハイドログラフ

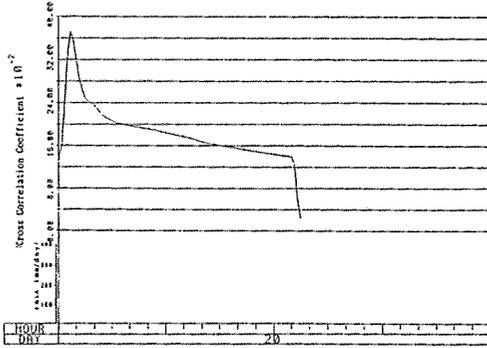


図-5 (1) 昭和63年9月20日

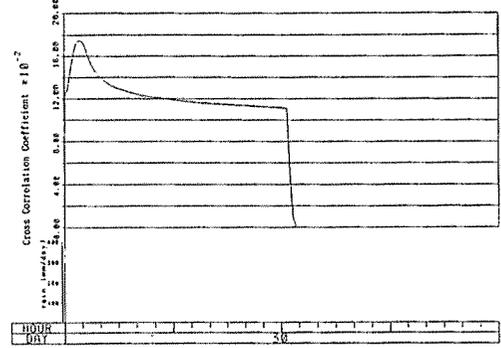


図-5 (2) 昭和63年9月30日

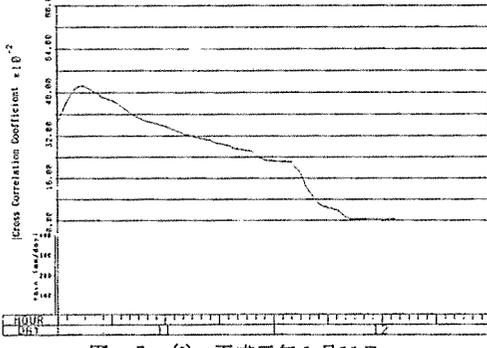


図-5 (3) 平成元年1月11日

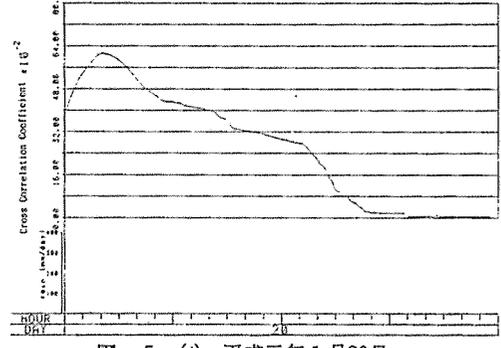


図-5 (4) 平成元年1月20日

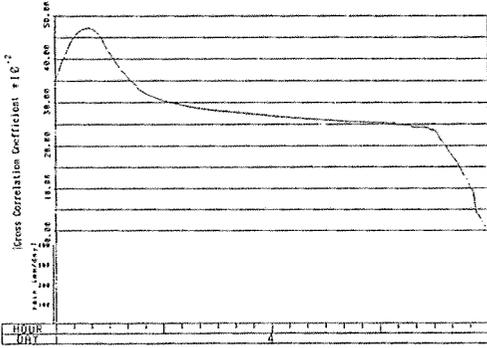


図-5 (5) 平成元年3月4日

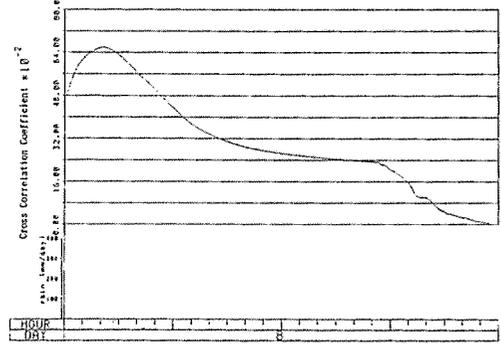


図-5 (6) 平成元年4月8日

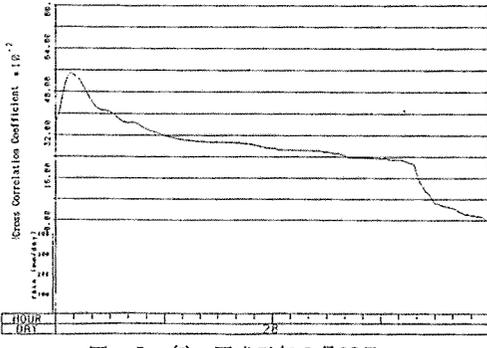


図-5 (7) 平成元年6月28日

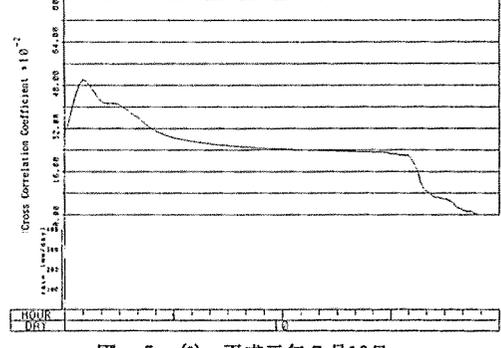


図-5 (8) 平成元年7月10日

図-5. 降雨と流出の相互相関

表一 1. 重回帰分析に用いる各因子

(1) 説明変数

年 月 日	7 日前雨量 (mm)	3 日前雨量 (mm)	ピーク雨量 (mm/10min)	降 雨 時 間 (min)	総 雨 量 (mm)	ピーク位置
88,09,20	92.0	92.0	7.0	110	17.5	0.545
88,09,30	122.0	4.5	3.5	110	8.5	0.545
89,01,11	24.0	19.5	1.5	460	18.0	0.804
89,01,20	3.5	3.0	3.0	230	21.0	0.478
89,03,04	50.5	17.5	5.0	170	25.0	0.294
89,04,08	0	0	3.0	730	46.0	0.890
89,06,28	99.0	0	5.0	300	32.5	0.867
89,07,10	20.0	14.0	4.5	260	23.5	0.769

(2) 目的変数

年 月 日	タイムラグ (min)	ピーク流量 (m^3/sec)
88,09,20	40	0.084
88,09,30	50	0.031
89,01,11	120	0.015
89,01,20	120	0.018
89,03,04	120	0.041
89,04,08	80	0.041
89,06,28	40	0.093
89,07,10	60	0.050

表一 1 上段に挙げた諸因子を説明変数として、タイムラグ・ピーク流量それぞれについて重回帰分析を行なった^{4), 5)}。この計算において、取り入れる変数が推定に有効かどうかを判断する基準として、変数増減法を採用した。これは、計算の途中で、他の変数との関連で寄与の小さくなった変数を落としていく方法である。その結果、タイムラグに関しては、7 日前雨量、ピーク雨量およびピーク位置が、ピーク流量に関しては、ピーク雨量が採用された。

タイムラグの場合、95%信頼区間における重回帰係数は0.927、自由度2重調整済み寄与率0.820における標準偏回帰係数は、7 日前雨量が-0.515、ピーク雨量が-0.519、ピーク位置が-0.601である。すなわち、流出のタイムラグに影響を及ぼす因子は、流域の湿潤状態の目安となる1週間前からの先行降雨量、ピーク雨量、および降雨のピークの位置の3因子であり、その及ぼす影響の強さは、マイナスの方向にほぼ同程度である。

また、ピーク流量の場合、95%信頼区間における重回帰係数は0.823、自由度2重調整済み寄与率0.763における標準偏回帰係数は、ピーク雨量が0.823となった。

6. フィルター分離AR法による流出特性の推定

本章で使用するフィルター分離AR法(逆探法)⁶⁾は、流量時系列(降雨時系列はなくてもよい)を用いて、流域の流出特性の推定、降雨時系列の逆推定、降雨の流出成分分離則の推定、および流出予測を行なう方法である。同法の詳細については、文献6)を参照されたい。

(1) 流量時系列の成分分離

河川流量逓減部のデータQを時間tに対してプロットすると、 $\log Q_0/Q \sim t$ の関係は勾配変化のはっきりした2つないし3つの直線部分から構成される(Q₀: 適当に選んだ基底流量)。

したがって、 $Q(t)$ は次のように表わされる。

$$\ln Q/Q_0 = -\alpha t \quad \dots\dots (1)$$

$$T_c = 1/\alpha \quad \dots\dots (2)$$

ここに、 α : 通減係数, T_c : 時定数, である。この方法で, 地下水成分の分離時定数 T_c を決定する。

また, 式(3)の増幅率 $|W(f)|$ が $|W(f)| \leq 1$ の条件を満たす範囲で, 減衰係数 δ (非振動条件より $\delta \geq 2$) を選定する。

$$|W(f)|^2 = \frac{1}{\{1 - (f/f_c)^2\}^2 + \delta^2 (f/f_c)^2} \quad \dots\dots (3)$$

ここに, $f_c = \delta / (2\pi \cdot T_c)$ であり, 減衰係数として普通 $\delta = 2.0 \sim 2.5$ の範囲の値が採用されており⁶⁾, 本報では, $\delta = 2.1$ に設定した。

次に, このように決定した T_c と δ から, 式(4)を用いて数値フィルター係数 c_0, c_1 を計算し, これを式(5)に代入して, 片側作用フィルター $w(\tau)$ を求める。

$$\left. \begin{aligned} c_0 &= (\delta/T_c)^2 \\ c_1 &= \delta^2/T_c \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots (4)$$

$$w(\tau) \begin{cases} = c_0 \exp(-c_1 \tau / 2) \sinh(\sqrt{c_1^2/4 - c_0} \tau) / \sqrt{c_1^2/4 - c_0} & (\tau \geq 0) \\ = 0 & (\tau < 0) \end{cases} \quad \dots\dots (5)$$

上式を $\Delta \tau$ 間隔で離散表示して, 片側作用低周波ろ波数値フィルター $w(k)$ ($\equiv w(k \Delta \tau)$) が設定される。

実測の流量時系列 $y (= Q)$ を, 式(6)によりこの数値フィルターに通したろ波後の出力として, まず地下水流出時系列 $y^{(1)}$ を分離する。

$$y^{(1)}(t) = \alpha \sum w(k) y(t-k) \quad \dots\dots (6)$$

ここに, α は重み係数である。

次に, 全流量時系列 y から $y^{(1)}$ を差し引くと, 中間・表面流出時系列 $y^{(2)}$ が求まる。

$$y^{(2)}(t) = y(t) - y^{(1)}(t) \quad (\geq 0) \quad \dots (7)$$

重み係数 α は, 中間・表面流出時系列 (式(7)) が負にならないという条件を満足するように選ぶ。ほとんどの場合, $\alpha \leq 1$ である。

図-6(1)~(9)は, 当流域で観測された降雨一流出のデータをもとに, 流量時系列を成分分離したものである。図中の記号の意味は次の通りである。

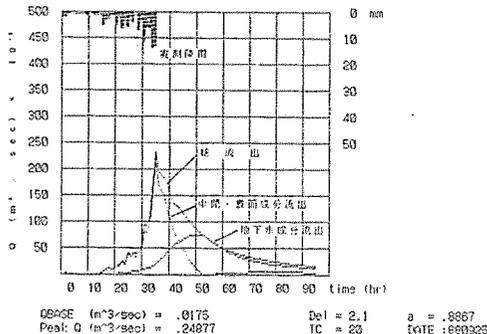


図-6 (1) 昭和63年9月25日

図-6. 流量の成分分離

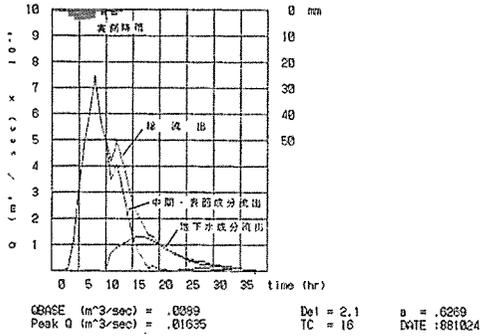


図-6 (2) 昭和63年10月24日

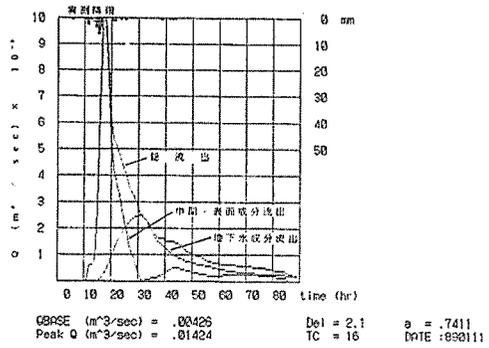


図-6 (3) 平成元年1月11日

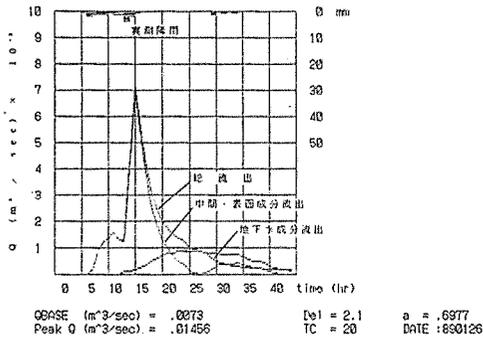


図-6 (4) 平成元年1月26日

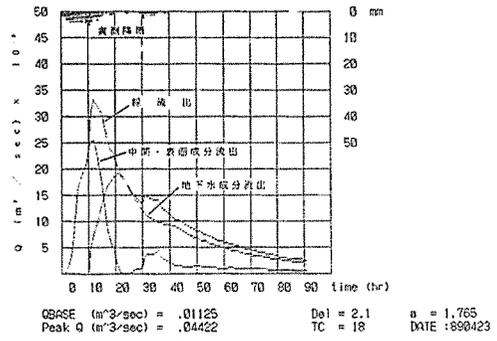


図-6 (5) 平成元年4月23日

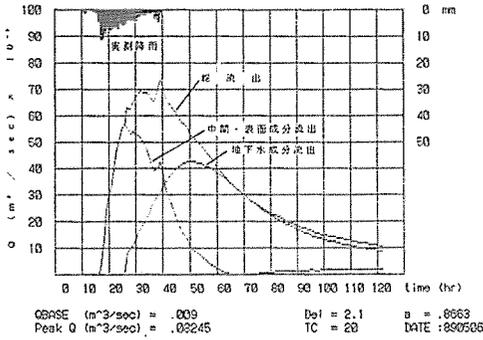


図-6 (6) 平成元年5月6日

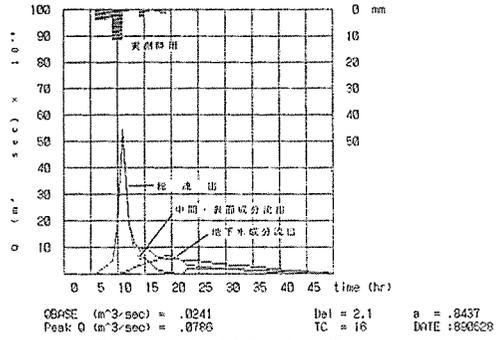


図-6 (7) 平成元年6月28日

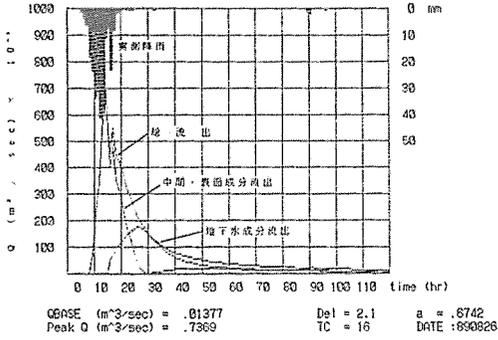


図-6 (8) 平成元年8月26日

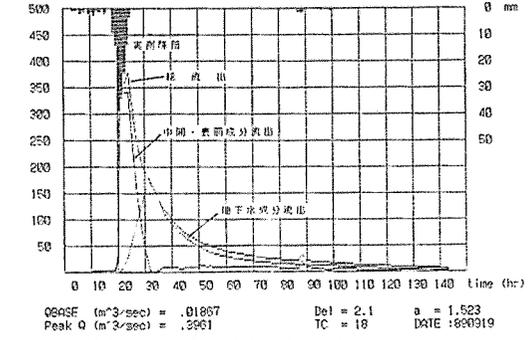


図-6 (9) 平成元年9月19日

図-6. 流量の成分分離

- QBASE : 式(1)のQ。(基底流出)
- Peak Q : ピーク流量
- Del : 式(3)の減衰係数 δ (=2.1)
- TC : 式(2)の時定数T。
- a : 式(6)の重み係数 α
- DATA : 観測月日 (例: 890101→1989年1月1日)

(2) 成分流量再現性の検討

前節で分離された流出成分時系列から, Burg法により降雨-流出系の各サブシステムの応答特性 (AR係数) が求まる。また, 各成分系についてAR係数が推定できると, 流出成分システムからの出力である成分流量時系列から, 各サブシステムへの入力である成分降雨時系列が逆推定できる。そこで, 記録された実流量が, このモデルと逆推定降雨により再現されるかどうかを検証する。

逆推定した各成分の降雨時系列 $\hat{x}_i^{(l)}$ と先に求めたAR係数を用いて, 第1成分の流量時系列 $\hat{y}_i^{(1)}$ を次式によって発生させ, 実測成分流量 $y_i^{(1)}$ と比較すれば, 各流出成分系のARMA式による表現の精度を検討できる。

$$\hat{y}_i^{(1)} = a_1^{(1)}\hat{y}_{i-1}^{(1)} + a_2^{(1)}\hat{y}_{i-2}^{(1)} + a_3^{(1)}\hat{y}_{i-3}^{(1)} + \dots + a_p^{(1)}\hat{y}_{i-p}^{(1)} + \lambda b^{(1)}\hat{x}_{i-1}^{(1)} \dots (8)$$

ここで, 右辺最終項は現時点での入力, より正確にいうとラグだけ前の時点での入力である。また, λ は降雨から流量への単位変換係数, l は次のように各成分を表わしている。

- $\left\{ \begin{array}{l} l = 1 \text{ 地下水流出成分} \\ l = 2 \text{ 中間流出成分} \\ l = 3 \text{ 表面流出成分} \end{array} \right.$

白色雑音部分 $\varepsilon_{i-1}^{(1)}$ は右辺最終項に含めて考えている。また, 上式のAR最適次数 p は, 流量成分時系列の推定誤差 $\Delta y_i^{(1)} = y_i^{(1)} - \hat{y}_i^{(1)}$ の二乗平均を最小にするように決定する。

図-7(1)~(5)は, 観測流域について, 逆推定した降雨 $\hat{x}^{(1)}$ を用いて, ARMA式(8)により流量を計算して, 実測流量と比較したものである。同図の(1), (2)と(3)~(5)の a は中間・表面流出成分, (3)~(5)の b は地下水流出成分である。なお, 図中の記号の意味は次の通りである。

- AR (#) : AR係数 (# : ARモデルの次数)
- Area : 観測流域の面積 (=30.6ha)

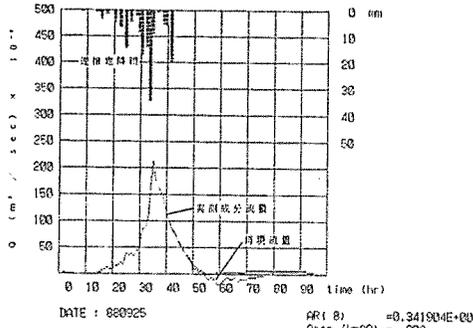


図-7 (1) 昭和63年9月25日 (中間・表面流成分)

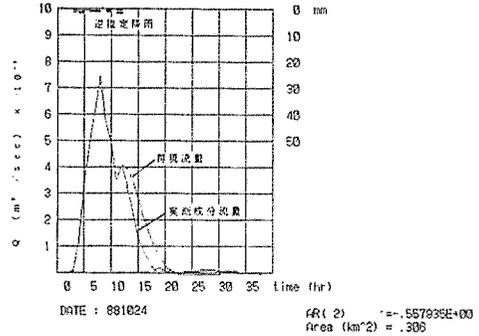


図-7 (2) 昭和63年10月24日 (中間・表面流成分)

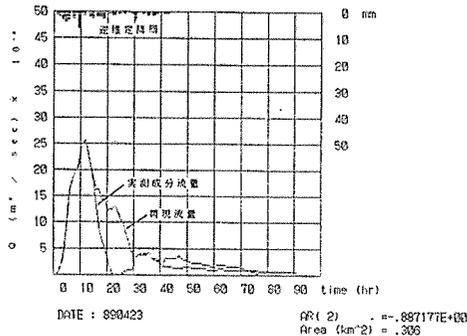


図-7 (3) 平成元年4月23日 a. 中間・表面流成分

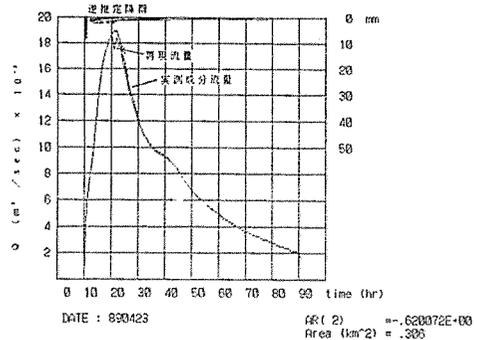


図-7 (3) 平成元年4月23日 b. 地下水成分

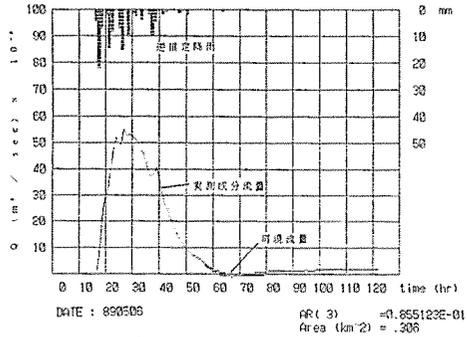


図-7 (4) 平成元年5月6日 a. 中間・表面流成分

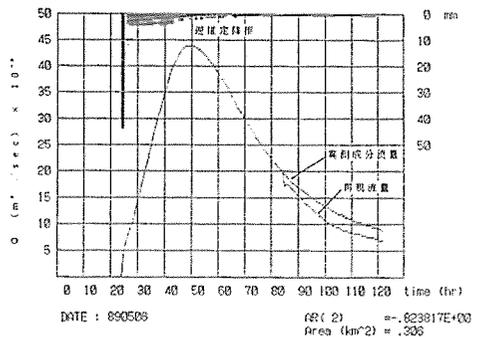


図-7 (4) 平成元年5月6日 b. 地下水成分

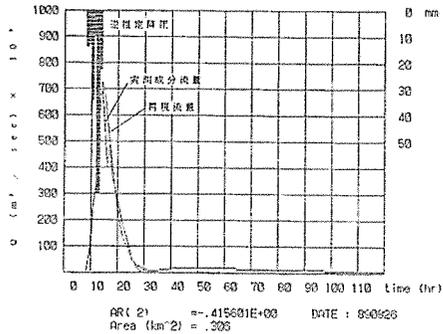


図-7 (5) 平成元年8月26日 a. 中間・表面流成分

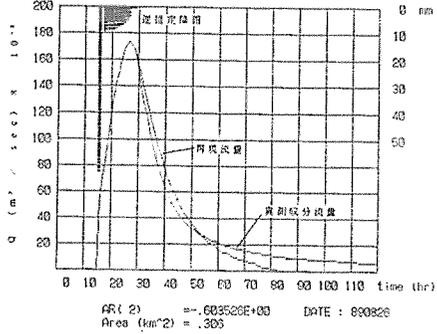


図-7 (5) 平成元年8月26日 b. 地下水成分

図-7. 実測流量と再現流量の比較

(3) 考 察

図-6の成分分離の結果をみると、小出水（ピーク流量： $0.016\text{m}^3/\text{s}$ ）から大出水（ピーク流量： $0.737\text{m}^3/\text{s}$ ）まで、それほどの不自然さもなく分離できているようである。また、逆推定降雨をもとに再現した流出は、実際に分離した成分流出と比較しても、逓減部で若干ずれることがあるものの、かなりの精度で再現できることが図-7よりわかる。

ところで、降雨時系列を逆推定する過程で、中間・表面流流出と地下水流出に寄与する降雨について、次のような性質が認められる。

中間・表面流流出に寄与する降雨

- ① 降雨継続時間は実測降雨時系列の継続時間とほぼ同じ長さである。
- ② 単位図法や貯留関数法等のように水文系を集中定数系として取り扱う際に共通して現われる遅延効果がみられる。これにより降雨の開始時刻をある時間だけ後ろにずらして定義しなければならぬ。このラグ・ステップは1～3時間程度である。
- ③ 伸長効果はみられない。
- ④ 降雨強度が実際の降雨より強めに現われる。

地下水流出に寄与する降雨

- ① 逆推定降雨の継続時間が実際の降雨継続時間の数倍（2～3倍）に引き伸ばされている。これは、降雨が浸透層を降下し、地下滞水層に達して地下水成分降雨となる間に、（遅延＋伸長）の2つの作用を受けるためであろう。
- ② 地下水流出開始時に逆推定降雨がある程度の降雨量（実測降雨の数倍）を示す。

7. おわりに

三重大学附属演習林内の一小流域で得られた水文データのいくつかを紹介し、それらをもとに若干の解析を試みた。

まず、重回帰分析より、流出のタイムラグには1週間前からの先行降雨、ピーク雨量および雨量のピークの位置が寄与していること、また、ピーク流量はピーク雨量に大きく影響されていることが明らかにされた。

次いで、フィルター分離AR法を用いて降雨を逆推定する過程で、中間・表面流流出や地下水流出に寄与する降雨にいくつかの特徴が見い出され、さらにそれらより再現された流量の精度は比較的よいものであった。

今後、さらにデータの蓄積と解析を継続し、これらの解析結果の詳細な検討、例えば季節による流出特性の変化や、当該流域における降雨の非線型分離則などの流域の流出特性を明らかにしていきたい。

参考文献

- 1) 本多 潔・林 拙郎・駒村富士弥・岡田直樹：三重大学附属演習林における量水堰堤の建設，三重大学農学部演習林報告，第16号，97-103，1988
- 2) 山本荘毅（編）：陸水（地球科学講座9），122，共立出版，東京，1971
- 3) 日野幹雄：スペクトル解析，52-55，朝倉書店，東京，1989
- 4) 奥野忠一ほか：統多変量解析，17-66，日科技連，東京，1976
- 5) 芳賀敏郎・橋本茂司：回帰分析と主成分分析，31-95，日科技連，東京，1984
- 6) 日野幹雄・長谷部正彦：水文流出解析，86-108，森北出版，東京，1985

Summary

This paper attempts to analyse some hydrological data from the small-scaled drainage area in the Mie University Forests, and to propose a simple system of quantitative description of runoff characteristics.

The main points of discussion are summarized as follows:

Results of the multiple regression analysis on several runoff variables show that time lags of the runoff procedure correlate more highly with an antecedent precipitation accumulated through a pre-week, a maximum precipitation and its peak position within the duration. It is also pointed out that a peak discharge is remarkably affected by a maximum precipitation.

In the application of filter-separation autoregressive method (AR-method) to inverse estimates for precipitation, some important properties of precipitation for identifying a subsurface-surface and a ground-water runoff could be fairly explained.

In conclusion, it appears that for recognizing runoff components and for assessing the discharge, the proposed techniques seem to be valid and useful.