

南九州地域の河川の流出特性

四ヶ所, 四男美
九州大学農学部排水干拓工学教室

田中, 宏平
九州大学農学部排水干拓工学教室

戸原, 義男
九州大学農学部排水干拓工学教室

<https://doi.org/10.15017/23165>

出版情報 : 九州大学農学部学藝雑誌. 28 (4), pp.185-190, 1974-06. 九州大学農学部
バージョン :
権利関係 :

南九州地域の河川の流出特性

四ヶ所四男美・田中宏平・戸原義男

九州大学農学部排水干拓工学教室

(1974年3月30日受理)

Studies on Runoff Characteristics of Rivers in Southern Kyushu

SHIOMI SHIKASHO, KOHEI TANAKA
and YOSHIO TOHARA

Laboratory of Land-Drainage and Reclamation, Faculty
of Agriculture, Kyushu University, Fukuoka

河川の流出特性は、降雨条件（降雨の量・強度および分布等）と流域条件（地形、植生、地質等）によるものと考えてよい。南九州地域の河川の流出特性を論ずる場合、これらの諸要素を論ずることで目的を達することができる。しかし、この方法ではあくまで特性値の羅列と解説になり、他地域との流出特性の比較を行いたい場合、個々の特性要素の比較はできても、それら諸要素が非線型的に作用しあつて生じる総合的な流出特性について比較することは困難である。これにかわる方法として、流出機構の面からみることにしよう。すなわち、対象地域の流出解析を行うことにより流出モデルの各パラメータを求め、このパラメータを流出特性の一指標として他地域と比較する方法である。著者らはこの立場に立つて、降雨一流出系を定常線型系と近似し、その応答函数を求めることによつて、南九州地域の河川の流出特性を論じた（戸原・四ヶ所, 1971）。ところで、降雨流出現象は非線型現象であつて、線型解析では精度に難点があつた。本論文では、さらに進んだ流出解析法によつて南九州地域の流出特性を検討する。なお、本計算には九州大学大型計算機センター FACOM 230-60 を使用した。また、本報告の製図は猪野勝子氏にお願いした。附記して謝意を表する。

流出解析法

降雨流出のような非線型現象の入力と出力の関係を表現する方法に、Volterra 級数がある。入力を降雨量、出力として流量を考えるとつぎのように表わされ

ることが知られている。

$$Q(t) = I(t) + \sum_{n=1}^{\infty} \int_0^t u(n; \tau_1, \dots, \tau_n) \prod_{i=1}^n r(t-\tau_i) d\tau_1 \dots d\tau_n \quad (1)$$

ここに、 $I(t)$ は初期条件によつて現われる出力成分であり、 $u(n; \tau_1, \dots, \tau_n)$ は n 次の核函数である。システムが安定であれば、 $t \rightarrow \infty$ で $I(\infty) \rightarrow 0$ となり、(1) 式は

$$Q(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \int_0^{\infty} u(n; \tau_1, \dots, \tau_n) \prod_{i=1}^n r(t-\tau_i) d\tau_1 \dots d\tau_n \quad (2)$$

となる。Jacoby (1966) の研究は、この非線型核を解析的に求めようとする意欲的なものであつたが、実際の流出解析へ適用するにはまだ困難があつた。その後、Hino *et al.* (1971) は、降雨（ただし日単位）を白色雑音と仮定し、1次および2次の核を求めることに成功した。著者らが対象とした南九州地域における降雨のコレログラムは、いくらか持続性がみられたこと、および、降雨や流量が離散量で与えられることから、(3) 式のような流出モデルにより数値的に非線型核を求めた。

$$Q(t) = Q_0 + \sum_{\tau_1=0}^{m_1} u(1; \tau_1) r(t-\tau_1) + \sum_{\tau_1=0}^{m_2} \sum_{\tau_2=0}^{m_2} u(2; \tau_1, \tau_2) r(t-\tau_1) r(t-\tau_2) \quad (3)$$

第1項は安定した地下水位に対する流量、第2項は線

型に準ずる量、そして第3項は線型近似からはずれる強い雨や連続降雨の影響を表わすものと理解してよい。連続量を離散量としてとりあつかうことにより、変分問題は多変数関数の極値を求める問題となり、(3)式中の未知項 Q_0 , $u(1; \tau_1)$, $u(2; \tau_1, \tau_2)$ を求めることは容易となる。

計算流量と実際に生じる流量 $q(t)$ との誤差の二乗和を最小にするように未知項を求めることにすれば、結局、(4)~(6)の連立方程式の解として計算される。

$$\begin{aligned} & \sum_{\tau_1=0}^{m_1} u(1; \tau_1) c_{rr}(i-\tau_1) \\ & + \sum_{\tau_1=0}^{m_2} \sum_{\tau_2=0}^{m_2} u(2; \tau_1, \tau_2) c_{rrr}(i-\tau_1, i-\tau_2) \\ & = c_{rrq}(i) \end{aligned} \quad (4)$$

$i = 0, 1, 2, \dots$

$$\begin{aligned} & \sum_{\tau_1=0}^{m_1} u(1; \tau_1) c_{rrr}(j-k, j-\tau_1) \\ & + \sum_{\tau_1=0}^{m_2} \sum_{\tau_2=0}^{m_2} u(2; \tau_1, \tau_2) c_{rrrr}(j-k, j-\tau_1, j-\tau_2) \\ & = c_{rrq}(j-k, j) \end{aligned} \quad (5)$$

$j, k = 0, 1, 2, \dots$

$$\begin{aligned} Q_0 = \bar{q} - \bar{r} & \sum_{\tau_1=0}^{m_1} u(1; \tau_1) \\ & - \sum_{\tau_1=0}^{m_2} \sum_{\tau_2=0}^{m_2} u(2; \tau_1, \tau_2) \bar{c}_{rr}(\tau_1 - \tau_2) \end{aligned} \quad (6)$$

ただし、 \bar{q} , \bar{r} , \bar{c}_{rr} はそれぞれ、流量、入力降雨量および入力降雨の2重相関の平均値であり、 c_{rr} , c_{rq} , c_{rrr} , c_{rrq} , c_{rrrr} は次式で計算される量である。

$$c_{rr}(\sigma_1) = \sum_{t=1}^N \{r(t)r(t+\sigma_1) - \bar{r}^2\} \quad (7)$$

$$c_{rq}(\sigma_1) = \sum_{t=1}^N \{r(t)q(t+\sigma_1) - \bar{r} \cdot \bar{q}\} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} c_{rrr}(\sigma_1, \sigma_2) = & \sum_{t=1}^N \{r(t)r(t+\sigma_1)r(t+\sigma_2) \\ & - \bar{c}_{rr}(\sigma_1)\bar{r}\} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} c_{rrq}(\sigma_1, \sigma_2) = & \sum_{t=1}^N \{r(t)r(t+\sigma_1)q(t+\sigma_2) \\ & - \bar{c}_{rr}(\sigma_1)\bar{q}\} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} c_{rrrr}(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = & \sum_{t=1}^N \{r(t)r(t+\sigma_1)r(t+\sigma_2)r(t+\sigma_3) \\ & - \bar{c}_{rr}(\sigma_1)\bar{c}_{rr}(\sigma_2 - \sigma_3)\} \end{aligned} \quad (11)$$

本解析法による流出予測の精度が十分満足すべきものであることはすでに報告してある(四ヶ所ら, 1974)。

有効降雨量

流出解析において、流量の時間的配分とともに、流出総量がいくらになるかを知ることは重要なことである。観測された降雨量のうちどれだけの量が河川へ流出してくるか、いわゆる有効降雨量の算定である。この有効降雨量を本解析での入力降雨量とする。

ところで、この有効降雨量という水流量は非常に不確かなものであるから、その算定法においてもこれといった決め手はない。ゆえに、我々が日常体験する事実に照らしてそれほど無理がなければ、有効降雨量の算定法として採用してよからう。

とくに、長期間においては、河川流域における総損失雨量は比較的安定しているといわれる。これは、菅原(1969)が指摘しているように、日本の河川の流域では常に湿潤状態にあり、流域からの蒸発散量は計器蒸発量に近く、数年程度の期間で考えれば比較的一定していると考えられる。このことから考えると、総損失雨量の変化はむしろ降雨日数の多少と関連があるようである。ここでは、流出特性を簡単な数値で表わすため ϕ -index 法によつた。

いま、流域平均降雨量 $R(j)$ を次式で表わす。

$$R(j) = \frac{\sum_{i=1}^M a_i R_i(j)}{\sum_{i=1}^M a_i} \quad (12)$$

$R_i(j)$: j 時の i 地点降雨量

M : 観測点数

a_i : i 観測値の重み

つぎに、総損失雨量 ϕ と各時刻の最大損失雨量 ϕ_0 をつぎの2式より求める。

$$\phi = \sum_{j=1}^n R(j) - \sum_{j=1}^n q(j) \quad (13)$$

$$\phi = \sum_{j=1}^n \min(R(j), \phi_0) \quad (14)$$

ϕ は(13)式より理解されるように、蒸発散や浸透等により測水点に現われない総量であり、 ϕ_0 はこの総損失雨量を各時刻の降雨量に配分する場合の最大量である。

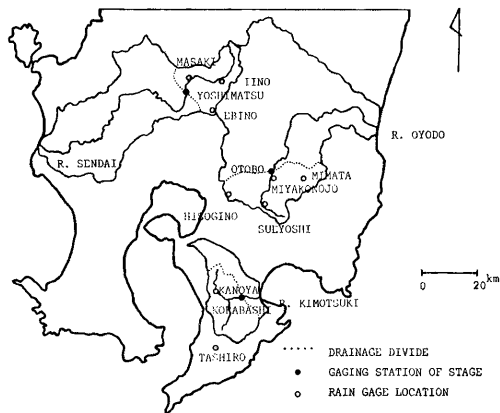
有効降雨量 $r(t)$ はつぎのようになる。

$$r(t) = \begin{cases} 0 & R(t) \leq \phi_0 \\ R(t) - \phi_0 & R(t) > \phi_0 \end{cases} \quad (15)$$

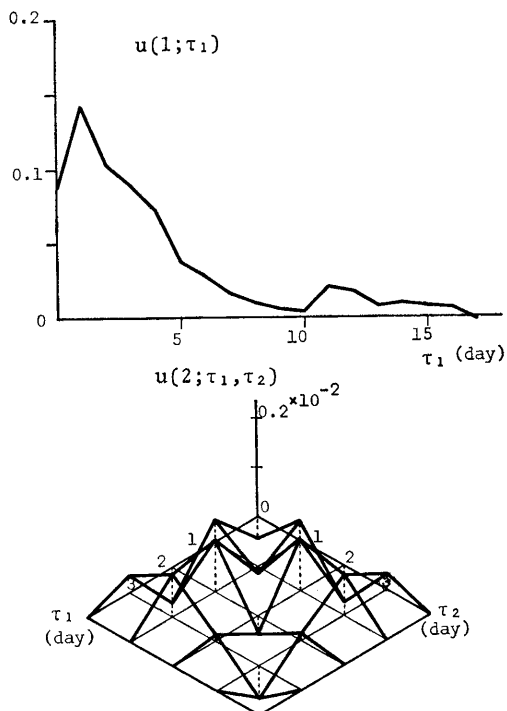
南九州地域の河川の流出特性

南九州地域の代表的3河川(大淀川, 川内川, 肝属

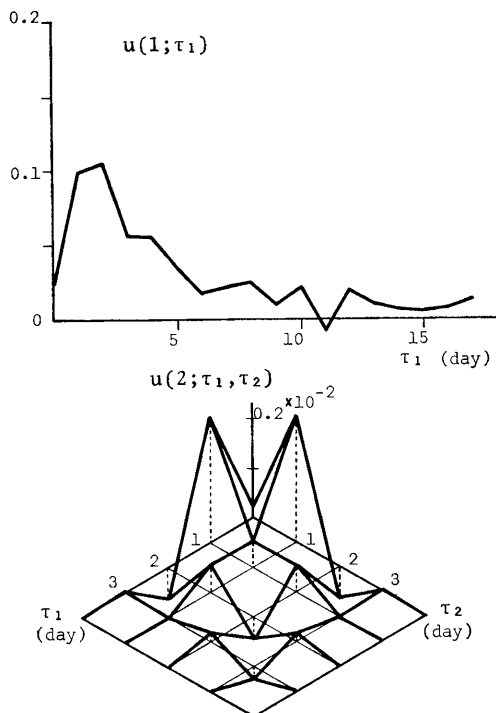
川)の上流域における流出解析を行い、その結果より流出特性を考察しよう。3河川の概要を第1図に、流出解析のための計算条件を第1表に示す。式(4)~(15)より計算した結果が第2~4図および第2表である。また、第5~7図には流出解析例の一部を示しているが、良好な精度が得られている。これらの結果から流出特性を考察するのであるが、その前に、つぎの事項を確認しておきたい。



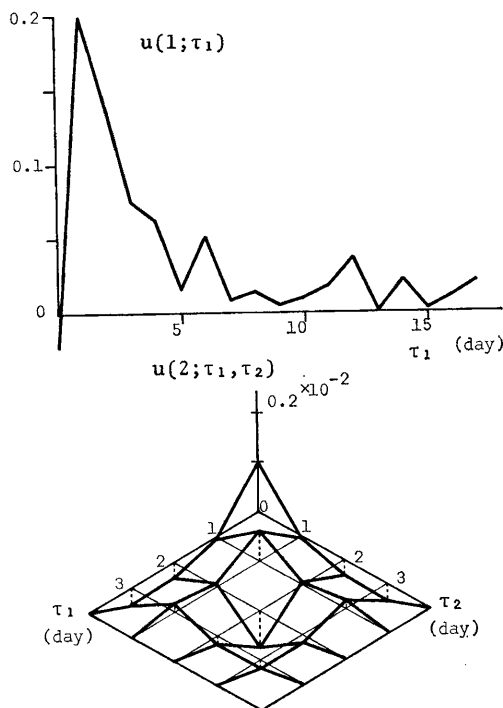
第1図 流域の概要



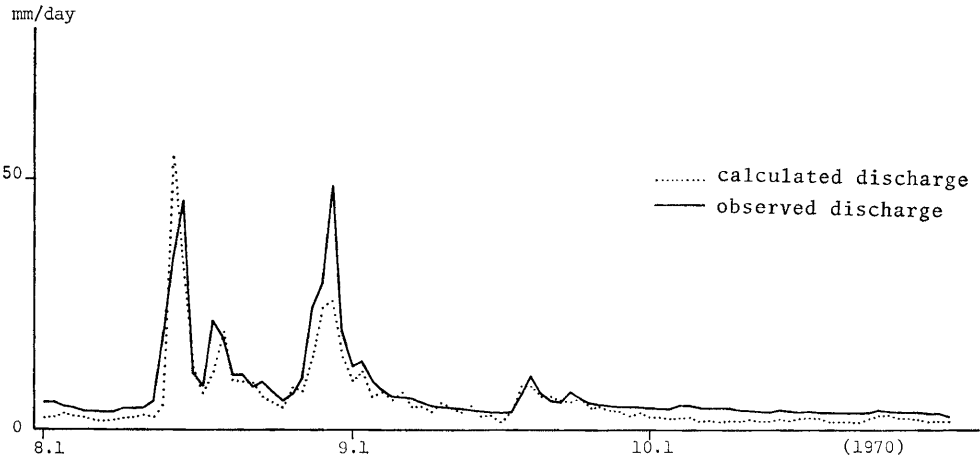
第3図 1次と2次の流出核(川内川)



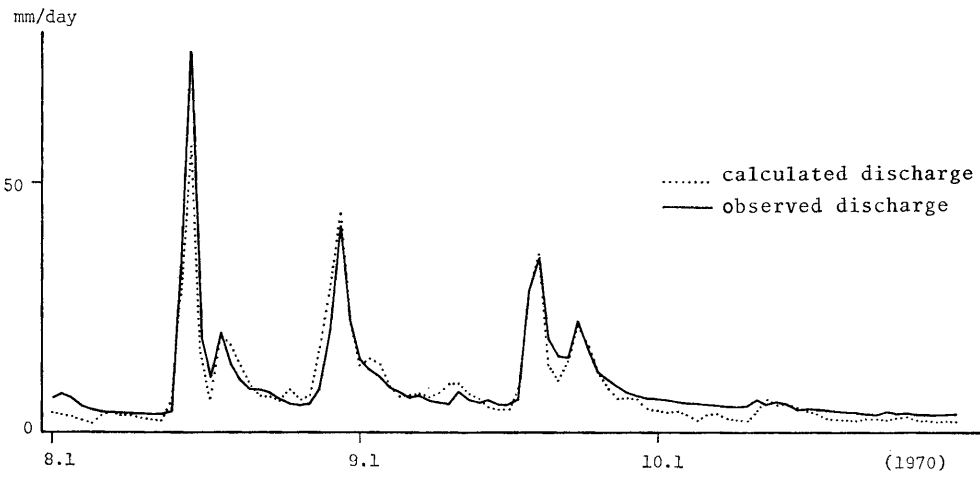
第2図 1次と2次の流出核(大淀川)



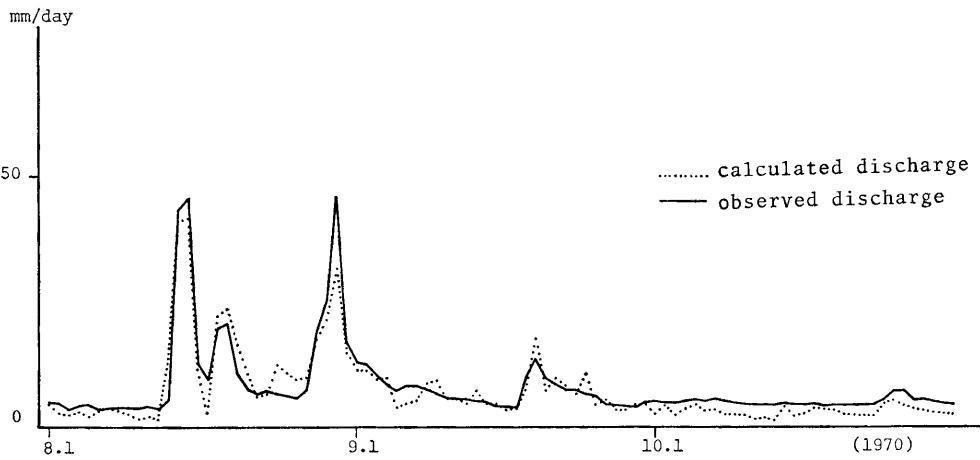
第4図 1次と2次の流出核(肝属川)



第5図 流出解析例(大淀川)



第6図 流出解析例(川内川)



第7図 流出解析例(肝属川)

第1表 解析資料

河川名	測水点 流域面積 (km ²)	雨量地点	重み
大淀川	乙房 359.0	三都末	1.0
		股城	1.0
		比曾	1.0
		木野	1.0
川内川	吉松 284.0	えびの	1.0
		飯野	1.0
		真幸	1.0
肝属川	高良橋 244.0	鹿田	1.0
		屋代	1.0

1) 流出モデルの各パラメータ値は、対象流域では一定であり、 Q_0 は安定した地下水位からの流出成分を、 $u(1; \tau_1)$ は入力降雨量の線型流出成分への寄与の割合を示し、 $u(2; \tau_1, \tau_2)$ は非線型流出成分（表面流出）が線型関係からはずれる降雨強度や連続降雨の影響度を表わすと解釈する。

2) 流出核の数値に負が生じていて、物理的に不自然であるが、これは非負条件と最良解の判定条件を与え、リニアプログラミング問題として解決されよう (Eagleson: *et al.*, 1966)。いま、負の部分はすべて0とし、そのため他のパラメータ値がいくぶんか変化すると考えられるが、流出核の形状（正の部分の）は変化しないと考える。

3) 観測水文諸量は適正な精度の資料である。これらのことを頭に入れて Q_0 , $u(1; \tau_1)$, $u(2; \tau_1, \tau_2)$, ϕ の値をみるとつぎのことがいえる。

(1) 大淀川、川内川では連続降雨の影響がみられるが、肝属川にはみられない。これは、各降雨による流量の合成で流量が求められることを意味し、多重入力の場合として流出解析が可能となる。また、このことは肝属川の初期条件が安定しているという報告 (戸原・四ヶ所, 1971) を支持する。なお、肝属川における総損失雨量が非常に少ないが、それは雨量観測点が適切でなく、流域平均降雨量が小さくなり、相対的に総損失雨量が少なくなったものと考えられる。

(2) 川内川では、降雨強度の影響が負となり、流量の増加が降雨量の1乗より小さいという極端な結果

が生じている。このような結果を生ずることがこの種の流出解析法の問題点である。

(3) 3河川に共通していえることは、低水流量が多いことと、表面流出が生じやすいことである。石原ら (1971) の由良川での研究では、表面流出が生起していると推定される流量として 80 mm/日の値を得ているが、3河川では 50 mm/日程度である。いま、表面流出が生起する条件を考えると、土湿貯留水が飽和水量を超えた時である。ゆえに、表面流出が生起しやすいということは、飽和水量の絶対量が少ないか、あるいは土湿貯留水が常に多量に存在するかが考えられる。南九州地域の河川の場合、 Q_0 の値が大きいくことから考えれば後者をとるのが妥当であろう。

要 約

南九州地域の代表的3河川（大淀川、川内川、肝属川）について、非線型流出解析を行い、流出特性を考察した。この研究で理解されたことを要約するとつぎのとおりである。

1) 表面流出が比較的小さな雨量でも生起すること、および地下水流出量が多い。このことが、南九州地域の河川の流出特性であつて、その原因を考察すれば、土湿貯留水が多く（すなわち、地下貯水に有効な地質である）、また、土壌は飽和されるに必要な水量が少なくよい（表層土が湿潤状態にあるか、あるいは飽和になるのに必要な絶対量が少ない）と考えられる。

2) 年総損失雨量は、肝属川を除けば 600~800 mm であつて、全国平均とほぼ一致する。流域からの蒸発散量は、植生、表層土、地質等といった流域条件の影響はあまり受けず、流域の湿潤状態と降雨日数に支配されるものと推定される。

記号説明

- a_i : 観測値の重み
- $c_{rr}(\sigma_1)$: 降雨量の自己相関関数 (mm/日)²
- $c_{rrr}(\sigma_1, \sigma_2)$: 降雨量の3次の相関関数 (mm/日)³

第2表 解析結果の一部

河川名	期 間	平均年雨量 (mm/年)	平均年流量 (mm/年)	平均年損失量 (mm/年)	ϕ_0 (mm/日)	Q_0 (mm/日)
大淀川 川内川 肝属川	1968-70	2,512	1,891	621	5.5	1.525
	1968-70	3,193	2,396	797	6.5	1.702
	1968-70	2,492	2,261	231	1.7	2.083

$c_{rrrr}(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$: 降雨量の4次の相関関数 (mm/日) ⁴
$c_{rq}(\sigma_1)$: 降雨量と流量の相互相関関数 (mm/日) ²
$c_{rrq}(\sigma_1, \sigma_2)$: 降雨量と流量の3次の相関関数 (mm/日) ³
$I(t)$: 初期流出成分 (mm/日)
m_1, m_2	: 降雨が流量に影響を及ぼす期間 (日)
M	: 観測点数
n, N	: 計算対象期間数 (日)
$q(t)$: 観測流量 (mm/日)
$Q(t)$: 計算流量 (mm/日)
Q_0	: 定数 (mm/日)
$r(t)$: 有効降雨量 (mm/日)
$R(t)$: 流域平均降雨量 (mm/日)
$R_i(t)$: 観測降雨量 (mm/日)
$u(n; \tau_1, \dots, \tau_n)$: n 次の核関数
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$: 時間遅れ変数
$\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$: 時間および時間遅れ変数
ϕ	: 総損失雨量 (mm/対象期間数)
ϕ_0	: 最大損失雨量 (mm/日)

文 献

- Eagleson, P. S., R. Mejia-R and F. March 1966 Computation of optimum realizable unit hydrographs. *Water Resources Res.*, **2**: 755-764
- Hino, M., T. Sukigara and H. Kikkawa 1971 Nonlinear runoff kernels of hydrologic system. Proceedings of the First Bilateral U. S.-Japan Seminar in Hydrology: 102-112
- 石原藤次郎・高村琢馬・池淵周一 1971 長期間流出解析法に関する2, 3の考察. 土木学会論文報告集, 196: 49-52
- Jacoby, S. L. S. 1966 A mathematical model for nonlinear hydrologic systems. *J. Geophys. Res.*, **71**: 4811-4824
- 四ヶ所四男美・田中宏平・戸原義男 1974 非線型システムモデルによる流出解析. 農業土木学会論文集, 50: 25-28
- 菅原正己 1969 水資源の循環機構に関する調査報告. 科学技術庁資源調査会報告第47号: 72-74
- 戸原義男・四ヶ所四男美 1971 単位図よりみた南九州地域の河川の流出特性. 九大農芸誌, **25**: 233-242

Summary

This paper expresses the study of runoff characteristics of typical rivers (Oyodo, Sendai, Kimotsuki) in Southern Kyushu. The non-linear analysis is used specially for the study of runoff. The basic equation can be expressed by Eq(3) for the runoff model. The linear and non-linear kernels are obtained by numerical calculation. The unknown terms are derived so that the squared sum of error between calculated discharge and observed one may be the least.

From the results of analysis, it is found that even if it rains a little, the surface runoff occurs, and much groundwater runoff are expected at all times. The above is the runoff characteristic in Southern Kyushu.

It is a reason that the surface soil always has much moisture content. Then, the annual total water losses show 600-800 mm except the Kimotsuki river. Those values nearly coincide with the national mean value.

The evapotranspiration from river basin is not much affected by plant features, surface soil, geology and such conditions of it, but affected by water content in the subsurface stratum and the number of rain days.