

# 水文資料の少ない河川の流出解析例について

正員 高瀬 信 忠\*  
正員 志賀 是 文\*\*

## ON SOME EXAMPLES OF RUN-OFF ANALYSIS FOR RIVER BASINS WITH ONLY A FEW AVAILABLE HYDROLOGICAL DATA

By *Nobutada Takase, C.E. Member and*  
*Tadayoshi Shiga, C.E. Member*

**Synopsis :** In Japan, the run-off phenomena for river basins with many available hydrological data have been researched from many points of view in order to contribute to the rationalization of river plannings, but the run-off analysis for river basins with only a few available hydrological data was so difficult that the satisfactory results have not been obtained so far.

In this paper, the authors first considered a method to make the imperfect hydrological data useful for river basins with relatively many available data, and furthermore analyzed the run-off phenomena for river basins with only a few available data, utilizing the results of recent hydrological researches. The results obtained here would contribute much to the rationalization of river plannings in Japan.

**要旨** わが国では、水文資料が比較的豊富にある河川の流出機構については種々の研究が行われ、河川計画の合理化に多大の貢献をしているが、多くの河川においては水文資料が非常に乏しく、流出解析がきわめて困難なため、ほとんど研究が行われていない。本文では、まず資料が比較的豊富にある場合について、洪水期間中に欠測のある資料をいかに活用して流出機構の解明を行うかを考察するとともに、二、三の中小河川を対象として少ない資料を最大限に活用して流出解析を行う方法を説明した。これらの研究成果は、水文資料の整備されていない河川に対する計画の合理化に寄与するところが少なくないと考えられる。

### 1. 緒言

戦後わが国では相次いで水害に見舞われ、各河川とも合理的な計画を確立すべきことが強調せられ、正確かつ迅速な洪水予報の必要と相まって、降雨と流出との関係を把握することが非常に重要視されるようになった。しかし多くの河川では水文資料が非常に乏しく、流出解析が困難な状態にある。一般に水文資料の整備の状態によつて河川を大別すると、

- (1) 時間雨量記録と水位および流量記録が比較的豊富にある場合
- (2) 時間雨量記録と水位記録が若干ある場合
- (3) 時間雨量記録が若干ある場合
- (4) 日雨量記録が若干あるか、または全く資料のない場合

となるが、わが国では大体(1)に属している直轄河川以外は、いずれも(2)以下に属するといつてよい。(1)のように水文資料が比較的多い河川では、近年急速に水文図学的な流出解析法が發展して、河川計画や洪水予報がかなり合理化されてきたが<sup>(1)(2)</sup>、洪水期間中の水位記録が一部欠測されていたりして、不都合を生じることが多い。また(2)以下の河川では水文資料が乏しいために、満足な流出解析がほとんど行われず、最近ようやく水文資料の蒐集に着手されてきたにすぎない。

本文では、まず水文資料の比較的豊富な場合の例として大淀川の流出解析を行い、洪水期間中に欠測のある資料の活用方法について若干の考察を加えた。ついで有田川や富田川などの中小河川を対象として、乏しい水文資料を最大限に活用して資料の不足を補い、流出解析を合理的に行つた結果を説明した。これらの中小河川では、若干の時間雨量記録と水位記録があるだけで、上述の分類(2)に属するものであるが、最後に(3)および(4)の

\* 建設技官，建設省九州地方建設局

\*\* 京都府技師，京都府大野発電建設事務所（元京都大学助手）

場合についてもある程度の考察を行い、流出解析の指針を与えることにした。

2. 水文資料の比較的豊富な河川の流出解析

(1) 資料の整理

流出解析の基礎となる水文資料は、雨量記録と水位流量記録であるが、前者としては年間降雨量や過去において豪雨を生じた降雨条件、さらに確率計算に必要な年最大流域平均日雨量および2日連続雨量などを整理する。流出解析に特に必要なものは、各洪水ごとの流域平均一連雨量と時間雨量である。われわれは由良川における水文観測にもとづいて、降雨の地理的・時間的分布を考慮した流域平均雨量の算定法を提案し、流出解析に非常に有効なことを確かめている<sup>3)</sup>。

水位流量記録としては、まず水位～流量曲線を慎重に決定し、水位の記録を流量の記録に変換する。この場合一洪水ごとに整理するが、洪水期間中はできるだけ長時間にわたって記録を蒐集しなければならない。こうして整理計算した流域平均時間雨量と時間～流量曲線とを対応させて資料の解析に移るようにする。

(2) 資料の解析

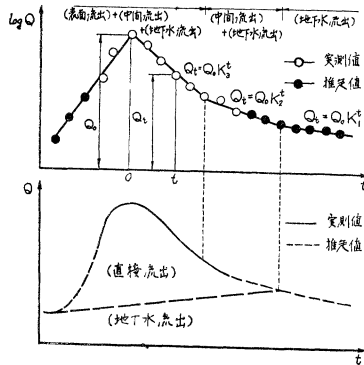
a) 基底流量の分離 雨水はその流出の経路によつて一般に表面流出、中間流出および地下水流出の三成分に分けられるが、流出曲線を正確に解析するには、各成分に相当する部分を明確に分離することが必要である。この流出成分の分離については、有効雨量の決定と関連して種々の方法が提案されているが<sup>4)</sup>、ここではつぎの方法を用いることにする。すなわち、時間～流量曲線の減水部を片対数紙上にプロットすると、一般に三つの直線部分に分かれ、各直線部ごとに流量を  $Q_t$ 、最大流量を  $Q_0$ 、常数を  $K_t$ 、各直線部の起点からの時間を  $t$  とする、

$$Q_t = Q_0 K_t^t \dots \dots \dots (1)$$

で現わされる<sup>5)</sup>。この場合最初の直線部は(表面流出+中間流出+地下水流出)、二番目のものは(中間流出+地下水流出)、最後のものは(地下水流出)の減水部をあらわしており、これらの三直線の勾配はそれぞれの部分の減水係数  $K_3$ 、 $K_2$  および  $K_1$  の値を示している。ここでは(表面流出+中間流出)、すなわち(直接流出)と

図一1 流出成分の分離と欠測部分の推定 (日記記録のある場合)

Fig. 1 Separation of Run-off Components and Presumption of Imperfect Data Observed by Self-Recording Water-Gauge.



(地下水流出)とに分離することにし、図一1に示すように二番目の折曲点で中間流出が終つたと考え、この点と流出量曲線の立上り点とを直線で結んで、これより上の部分を直接流出、下の部分を地下水流出として基底流量を分離した。表一1は以上のようにして求めたわが国諸河川の減水係数  $K$  の値を示したものであるが、大淀川支川の本庄川嵐田地先および同じく岩瀬川名字ヶ瀬地先における  $K_3$  の値は、それぞれ 0.788/day, 0.750/day

表一1 減水係数の値  
Table 1 Values of Recession Constants.

河川名	$Q_{max}$ ( $m^3/s$ )	$K_1^*$	$K_2^*$	$K_3^*$	
有田川 粟生地先	1765	***	0.510	0.056	
	1270		0.079	0.009	
	740		0.292	0.193	
	475		0.214	0.084	
	平均		0.274	0.086	
富田川 庄川地先	576	0.785	0.432	0.084	
	330	0.692	0.350	0.104	
	290	0.729	0.357	0.108	
	225	0.798	0.406	0.215	
	201	0.729	0.440	0.139	
	72	0.755	0.490	0.285	
平均	0.746	0.413	0.156		
由良川 長瀬地先**	562	0.819	0.628	0.205	
	348	0.695	0.404	0.240	
	294	0.750	0.581	0.414	
	222	0.700	0.539	0.295	
	213	0.762	0.521	0.323	
平均	0.745	0.535	0.295		
大淀川支川 本庄川 嵐田地先	2400	***	0.243	0.087	
	1561		0.775	0.479	0.153
	1160		0.253	0.022	
	520		0.814	0.579	0.344
	386		0.779	0.557	0.439
平均	0.788	0.422	0.209		
大淀川支川 岩瀬川 名字ヶ瀬地 先	692	0.742	0.200	0.103	
	621	0.744	0.263	0.025	
	451	0.759	0.383	0.042	
	427	0.756	0.078	0.019	
	平均	0.750	0.231	0.047	

\* 単位は  $day^{-1}$  である。

\*\* 文献 (3), (8), (9), (13) に示すように過去7年間にわたる詳細な水文観測の結果にもとづくものである。

\*\*\*  $K_1$  の値は不明である。

に近く、洪水の種類にかかわらずほとんど一定であつて、洪水期間中における地下水流出の部分のみに対応していることが認められた。

**b) 欠測部分の推定** 最大流量以下の減水部分を片対数紙にプロットすると三つの直線部分に分離できる性質を利用すると、減水部における欠測部分を補うことができる。たとえば図-1においては二番目の直線を中間流出の終点まで延長し、それ以後は地下水流出の減水係数  $K_1$  になるように直線をひけばよい。この場合、中間流出の終点を決定するには、欠測のない既往資料について最大流量と中間流出の終点流量との関係を調べ、類似した最大流量に対する関係を利用すればよい。

つぎに上昇部分に欠測があるときは、前期無降雨日数の類似した既往洪水によつて時間～流量曲線の立上り点の流量を推定し、その立上り点から最大流量までは片対数紙上で直線になるようにして上昇部を決定すればよいが、この場合立上り点の時刻は時間雨量記録を参照して不合理のないように注意しなければならない。

(3) 流出解析

資料の比較的豊富な河川の流出解析については、多くの注目すべき研究が発表されているが、その詳細は文献にゆずり、ここでは概要だけを説明する。米国では1932年 Sherman によつて提唱された単位図法が高く評価せられ、広く実用化されているが<sup>9)</sup>、わが国でも千代川、木曾川および由良川など、多くの河川に適用されてきた<sup>11), 7), 8)</sup>。その結果、わが国のような急流河川では、水文諸条件の変動によつて単位図がいちじるしく変化することが確かめられ、単位図は降雨条件、とくに強雨強度によつて変えるのがよいとされている<sup>9)</sup>。つぎに流出関数法は、流出現象が単位降雨にもとづく単位流出量の累計であるという単位図法の基本仮定に従うものとして、単位図をある種の関数形であらわしたものであり、わが国では狩野川や由良川の流出解析に適用されている<sup>10), 11)</sup>。とくに由良川について行つたわれわれの研究では、流出関数として、Pearson 型類似の複合指数関数を用い、関数型を支配する係数を降雨特性によつて変化させることにしたが、実際の洪水に適用した結果は非常に良好であつた。

一方、岩垣博士らの提案された方法は、流出現象を横から流入のある開水路の不定流と考え、特性曲線法を用いて解析するのであるが、由良川および大戸川に適用せられ、比較的急勾配の河川の流出解析にきわめて有効なことが確かめられている<sup>12), 13)</sup>。さらにわれわれは従来の単位図法的な取扱いを水理学的に検討し、降雨特性および流域特性と流出機構との関連について、種々の注目すべき成果をえている<sup>14), 15)</sup>。なお、近年わが国では洪水追跡用のアナログコンピューターが作製され、淀川などの洪水予報に利用されているが、石原安雄博士の試作された雨水流出用演算器は、由良川の出水解析に適用され、良好な結果をおさめている<sup>16)</sup>。以上の各研究成果を適用することによつて、水文資料の比較的豊富な河川の流出解析が次第に合理的に行われることになり、河川計画の確立に大きい貢献をしている。

3. 時間雨量記録と水位記録が若干ある河川の流出解析

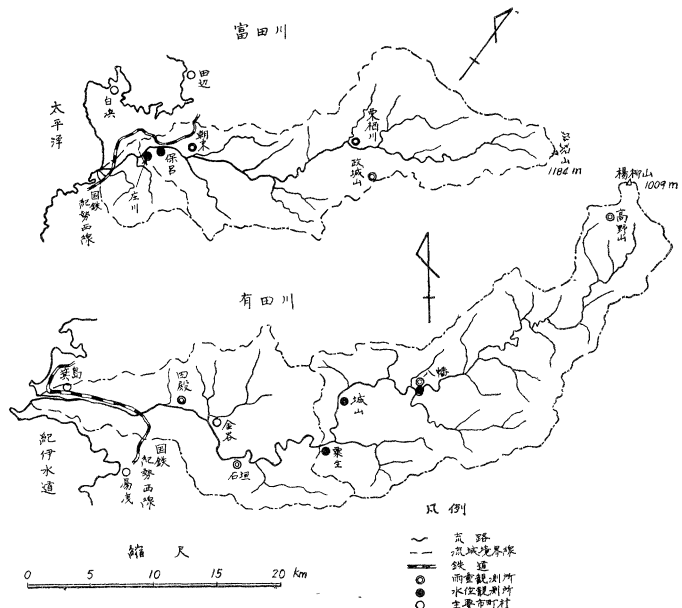
(1) 資料の蒐集と整理

流出解析に必要な資料として、流域特性、主要災害状況および水文資料をできるだけ調査蒐集して、解析に便利のように整理する必要がある。

**a) 流域特性** 流域特性としては、自然的要素と社会的要素の二つがあげられ、地勢、地質および気象などの自然的要素は、地形図や地質図などを利用し、ときには現地踏査を行つて調査しなければならない。研究の対象とした和歌山県の有田川および富田川の概況は図-2のとおりであるが、流域特性として主要なものを列挙すると表-2のようになる。政治、経済、交通運輸および土地利用状況などの社会的要素は、流域の重要度を示す指針であつて、河川計画における確

図-2 有田川および富田川の流域平面図

Fig. 2 Basin Plans of the Arita River and the Tonda River.



率年数の決定などの基礎資料となる。なお、治水および利水などの河川事業の現況とその計画についても、詳細な調査をすべきことはいうまでもない。

**b) 災害状況** 主要洪水時の災害状況を気象および水文関係と関連して調査検討し、その出水の規模を推定することは、流出解析の貴重な資料となるだけでなく、計画降雨波型の決定や計画降雨および計画高水流量の妥当性の検討において非常に重要な意味をもっている。昭和 28 年 7 月 18 日の紀州の水害（以下 7.18 水害と略称する）は未曾有のものといわれ、有田川における災害の状況は文献<sup>17)</sup>に詳しく述べられているが、梅雨前線による局地的豪雨によつて山間部の総雨量は 800 mm に達し、上流部では山津波を生じて、流域の河相を全く変えてしまっている。

**c) 水文資料** 水位記録のある期間は水位記録から、ない期間は災害記録から主要出水に対する水文資料を蒐集整理する。このためにまず

出水を生じた降雨の原因を天気図から調べて、台風および低気圧によるものはその中心の通過経路によつて分類し、前線性の降雨は前線の位置とその移動状況によつて分類する。つぎに水位記録のある出水について、時間雨量および日雨量を調べるとともに、確率計算に必要な年最大日雨量および年最大 2 日連続雨量などを調べる。一般には日雨量の記録は入手しやすいが、時間雨量のわかっている観測所は非常に少なく、あつてもその期間が非常に短く、多くは戦後のものに限られている。有田川および富田川における雨量観測所の配置は図-2 のとおりであるが、前者では高野山、八幡および石垣（大正 14 年から田殿に移されている）で明治 26 年から日雨量の記録があり、後者では栗栖川および朝来でそれぞれ明治 26 年および昭和 25 年から日雨量の記録がある。一方高野山、八幡、栗栖川、朝来および政城山では、昭和 29 年から時間雨量の記録がとられている。こうして蒐集された雨量記録から流域平均雨量を求めるには、日雨量および時間雨量の観測所密度が低くても比較的精度が高く個人誤差が入らないという意味で、加重法（Thiessen method）を用いることにした。

水位記録としては、厳密には降雨の開始時からその降雨の流出が終るまでの時間的変化が必要であるが、普通の水位観測所では一日二回の定時観測を除くと、指定水位以上に対し時間観測があるだけで、欠測部分が非常に多い。この欠測部分の推定法は後に述べるが、こうしてえられた水位記録の流域平均時間雨量とを対応させる。また水面勾配が求められるような観測所が懸案地点の近くにある場合には、その観測所の記録も同時に蒐集しなければならぬ。図-2 に示すように、有田川では昭和 16 年から粟生で、昭和 29 年から八幡と城山で定時観測のほか指定水位以上の時間観測が実施されており、また富田川では昭和 25 年から保呂で同様の観測が行われているが、富田川の庄川では昭和 30 年から水位の自記記録がとられている。

**d) 河床変動の推定** 雨水の流出には土砂の輸送をともない、河床は常に変動するが、河川の縦横断形状は水位～流量曲線の基礎資料となるものであるから、実測によつてその実態を把握しなければならない。有田川では、7.18 水害以前は上流部で基岩が露出し、中流部でも河床の堆積物はきわめてうすくて凹凸がいちじるしく、高水敷が発達して草木が生育していた。ところがこの災害以後は、山腹の崩壊や洪水の浸食作用のために運ばれた土砂礫によつて河床が 1～10 m も上昇し、いまなお上昇の傾向を続けており、この災害を境として河相が一変してしまっている。富田川では、明治 22 年の大災害をはじめ相つゞ災害で荒蕪の一途をたどり、その流下土砂によつて河床が上昇し、部分的にはほとんど天井川を形成しているが、われわれが実測の結果近年河床の変動がきわめて少なくほとんど平衡状態に達していることがわかった。

**(2) 資料の解析**

降雨特性の解析と時間～流量曲線の解析にわけて説明する。

**a) 降雨特性の解析** 降雨現象は非常に複雑であるが、流出解析には最初に一連降雨についてその特性を明ら

表-2 有田川および富田川の流域特性

Table 2 Basin Characteristics of the Arita River and the Tonda River.

項目	有田川	富田川	備考
1. 位置	図-2 参照		
2 水原および標高	楊柳山 1 009 m	安堵山 1 184 m	
3 流域面積	471 0 km <sup>2</sup> (河口) 278.5 km <sup>2</sup> (粟生)	252 0 km <sup>2</sup> (河口) 227 8 km <sup>2</sup> (庄川)	
4. 平地山地の比	1・10	1・15	
5. 流路延長	86 km (河口) 60 km (粟生)	44 km (河口) 40 km (庄川)	
6. 流域平均巾	5.5 km	5.7 km	
7 河床勾配 川巾	1/300～1/500; 200 m 1/150～1/200; 70 m 1/80～1/100; 45 m	1/500; 150 m 1/300; 100 m 1/200; 50 m	下流部 中流部 上流部
8 支川の分布	羽状流域		
9 地質	秩父古生層	北部 第四紀中生紀層 南部 第三紀層	
10. 地 被 状 態 森 相	風化土砂が厚く堆積し、各地に崩潰を生じている。		
11 年間雨量	3 000 mm		
12 年平均気温	16°C		

かにしなければならぬ。まず気象資料を整理して最も出水を生じやすい降雨の原因を調べ、原因別にその特性を解析するのが合理的である。富田川の場合は表-3に示すように、出水の原因は大部分台風と梅雨前線であることがわかったので、台風と梅雨前線において解析した。

つぎに降雨の地理的分布については、一般に山間部は平地部に較べて雨量が多く、流域内に雨量記録が1カ所しかないような場合、その点の雨量で流域全体を代表させるとは非常に危険である。そこで流域内の基本となる観測所の雨量とその他の観測所の雨量との相関を、一連降雨について求めておくことが必要である。富田川の場合、栗栖川の雨量  $x$  と朝来の雨量  $y$  の相関を求めると、

$$\left. \begin{aligned} \text{台 風} ; y &= 0.91x, r = 0.89 \\ \text{梅雨前線} ; y &= 0.95x, r = 0.98 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

であつた。ここに、 $r$  は相関係数をあらわし、梅雨前線の場合の関係を例示したのが図-3である。

降雨の時間分布を調べるために、総雨量の多い場合について、横軸に継続時間を取り、縦軸に総雨量に対する累加雨量の百分率をとつて降雨型をあらわすと、一般に台風によるものでは継続時間の中央近くか、または終り近くで最大強度があらわれるのに対し、梅雨前線によるものではピークが2~3回あらわれることが多い。有田川および富田川におけるものを例示すると、図-4のとおりであるが、いずれも継続時間は35~45時間であつて、降雨が2日間にわたつてることがわかる。

最後に確率計算を行うに当つては、観測値の原系列の純偶発性すなわち無作為性を確かめなければならないが、一般に原系列を対数変換することによつて、無作為性を仮定して処理できる場合が非常に多い<sup>18)</sup>。有田川および富田川では、降雨継続時間が2日間にわたつてることから、年最大2日連続雨量について確率計算を行うことにした。この場合、有田川では八幡および高野山の雨量から加重法で流域平均年最大2日連続雨量を求め、富田川では(2)式から安全を見込んで  $y \approx x$  とし、栗栖川の年最大2日連続雨量をもつて流域平均の値を代表させ、確率計算を行つて表-4の結果をえた。この表には日雨量をも示しておいたが、わが国河川の値としては非常に大きく、

表-4 有田川および富田川流域の確率雨量

Table 4 Probable Rainfall Amount in the Arita River and Tonda River Basins.

	有 田 川		富 田 川	
	100年確率 (mm)	60年確率 (mm)	100年確率 (mm)	60年確率 (mm)
日 雨 量	384	351	454	417
2日雨量	470	440	570	531

有田川および富田川が多雨地帯に属することがわかる。

**b) 時間~流量曲線の解析** 縦横断測量その他の結果から河床変動の実態を把握し、流出機構がほぼ一様であつたと推定される期間ごとにおいて解析するが、有田川栗生地先および富田川庄川地先について行つた結果を説明しよう。まず水位~流量曲線を作製するために、水面勾配  $I$  と Manning の粗度係数  $n$  を仮定し、流れを等流として適当な平均流速公式から流速を算定し、これに断面積をかけて各水位に対する流量を推定する。この場合  $I$  の実測値がなければ、上下流の水位観測所の同時水位から近似値を求め、 $n$  は流路断面の状態を検討して慎重に推定する。表-5は有田川および富田川において用いた  $I$  および  $n$  の値を示したものであるが、有田川では前述のように7.18災害後河状を一変していることがわかつたので、この災害を境として別々に水位~流量曲線を作製することにした。この場合災害前については、水面勾配の実測値がなく、関西電力が低水時の流量観測から作

表-3 富田川流域における降雨型の分類

Table 3 Classification of Rainfall Types in the Tonda River Basin.

降雨原因	栗栖川の日雨量が200mm以上の降雨		保呂水位が指定水位を突破した出水	
	回数	百分率(%)	回数	百分率(%)
台 風	14	46	5	55
梅雨前線	8	27	4	45
前 線	6	20	0	0
そ の 他	2	7	0	0
計	30	100	9	100

図-3 富田川流域における梅雨前線による雨量の分布

Fig. 3 Distribution of Rainfall due to Baiu Frontal for the Tonda River Basin.

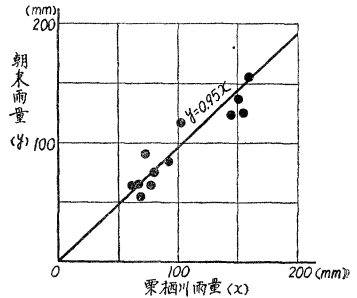
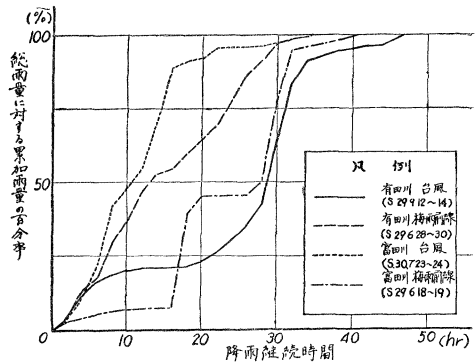


図-4 有田川および富田川流域における降雨累加曲線の数例

Fig. 4 Some Examples of Rainfall Mass Curve for the Arita River and Tonda River Basins.



表一5 有田川および富田川における  $n$  および  $I$  の値

Table 5 Values of  $n$  and  $I$  for the Arita River and Tonda River.

河川名	$n$		$I$
有田川	災害前	0.045	1/154
	災害後	0.035	1/220
富田川	中州の発達した部分	0.035	1/790
	流れの主流となる部分	0.0275	

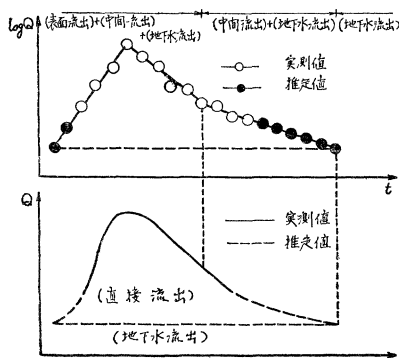
製した水位～流量曲線があるだけであつたから、水位の低いときはできるだけこの曲線に適合するように試算的に  $I$  と  $n$  とを決定した。また富田川では近年河床変動がきわめて少ないことがわかつたので、一つの水位～流量曲線を作製したが、断面の状態を考えると  $n$  を一つの値であらわしにくいようであつたから、中州の発達した部分と主流の部分とで  $n$  の値を変えることにした。なお、富田川における水位と水面勾配の関係は 図一5 のようにループを画くことがわかつたので、厳密には水位によつて勾配を変えて計算すべきであるが、水位による勾配の変化が比較的少ないことから、その平均値をとることにした。

つぎに時間～流量曲線の減水部を片対数紙上にプロットすると、通常三つの直線部分にわかれ、各直線部分の勾配が減水係数  $K$  を与えることは前述のとおりであるが、有田川および富田川における値は表一1 のようであり、有田川では資料不足のために  $K_1$  の値が求められなかつた。表一1 によると、 $K_1$  は河川や出水の程度によつてあまり変わらないが、 $K_2$  および  $K_3$  は河川によつてかなりの差があり、最大流量が大きいほど小さくなる傾向がある。このことは、地下水流出は降雨や流域の特性に関係せずほぼ一様であるが、中間流出や表面流出は降雨条件および流域特性によつて変化し、最大流量が大きいほど減水が早くなることを意味している。ことに有田川の  $K$  の値が他河川の値に較べて非常に小さく、しかも変動がいちじるしいことは、有田川の出水が急激で不安定であることを実証するものといえよう。

なお、富田川のように自記記録のある場合の欠測部分の推定は、資料が比較的豊富にある場合に準じて行えばよい。有田川のように指定水位以下に時間記録がないときは、図一6 に示すようにピーク流量以前は片対数紙上で一つの直線になるように指定水位以下まで延長し、立上り点の流量としては、それ以前の定時観測の値をとるが、時間雨量記録や前期無降雨日数などを参照して、立上り時刻に不合理を生じないように注意する。また減水部分は指定水位以下の資料がないため、片対数紙上では通常二つの直線部分にしか分離できず、地下水流出の部分は不明であるから、二番目の直線部分を指定水位以下まで延長して、欠測部分を推定しなければならない。

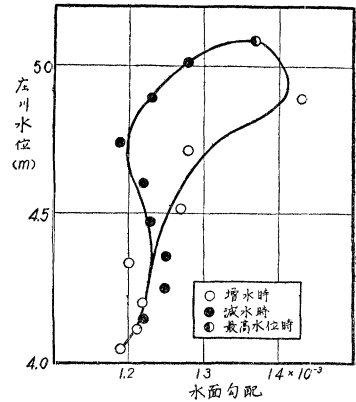
図一六 流出成分の分離と欠測部分の推定 (自記記録のない場合)

Fig. 6 Separation of Run-off Components and Presumption of Imperfect Data Observed by Ordinary Water Gauge.



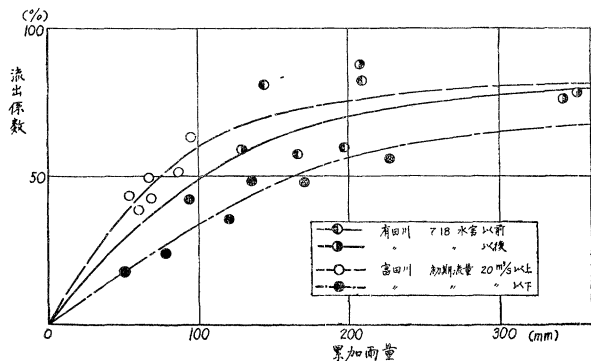
図一五 富田川における水位と水面勾配の関係

Fig. 5 Relation between Water Stage and Slope of Water Surface for the Tonda River.



図一七 有田川および富田川流域における累加雨量と流出係数の関係

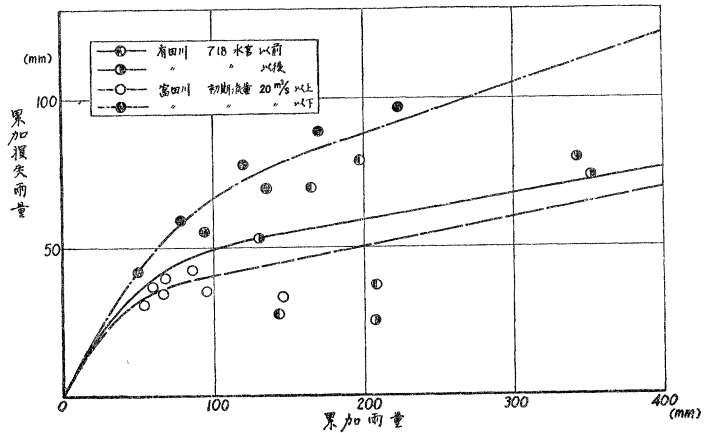
Fig. 7 Relation between Mass Rainfall and Run-off Coefficient for the Arita River and Tonda River Basins.



最後に資料が比較的豊富な場合と同様に、流出量を直接流出と地下水流出の二成分に分離することになると、自記記録のあるときは図-1に準じて行えばよく、指定水位以下の時間記録がないときは、図-6のように欠測部分を推定してから、立上り点を通じて水平分離を行うようにする。こうして基底流出を分離して有田川および富田川における総雨量と流出係数または損失雨量との関係を求めると、図-7および図-8のようになる。この場合、有田川では7.18 水害の前後ではつきりした差異が認められなかつたので、全測点の平均位置を通るような一つの曲線で代表せしめることにしたが、富田

図-8 有田川および富田川流域における累加雨量と累加損失雨量の関係

Fig. 8 Relation between Mass Rainfall and Lost Rainfall for the Arita River and Tonda River Basins.



川では比較的資料が整っており、降雨前の土湿状態を考へ初期流量 20 m<sup>3</sup>/s を境として二つの曲線で示すことにした。これらの関係は、淀川や千代川などで求められたものと比較して大体妥当と考えられ、われわれの水位～流量曲線の推定がほぼ満足すべきものであつたことを示している。

(3) 流出解析

単位図法は出水解析法として工学的に非常にすぐれたものであつて、わが国では降雨強度によつて単位図を変換するのがよいとされている。ここでは資料が少ないので、前項の資料の解析結果にもとづいて、以下に述べるような流出解析を行った。

a) 単位時間、単位雨量および有効雨量の決定 単位時間の決定基準としては出水の遅れの時間が採用され、普通はその 1/2 をとれば十分といわれており、また単位雨量は流域の降雨状態を考へて決定される。有田川および富田川では以上の関係を考慮して、単位時間は 2 時間とし、単位雨量は 20 mm とした。つぎに有効雨量の分離法としては、資料の豊富な由良川などでは Horton の浸透能曲線による方法が用いられているが<sup>9)</sup>、ここでは資料が少ない関係上、図-8 の関係を用いて各時間までの累加雨量から累加損失雨量を差し引いて求められる累加有効雨量によつて計算した。

b) 単位図の算定とその適用 単位図の最も重要な二つの要素は、最大縦距  $q_m$  と最大縦距までの時間  $t_m$  である。まず  $t_m$  が出水の遅れの時間に等しいとし、近似的に最大強度の降雨が最大流量に対応するものとして両者の時間的な差をとる。こうして求めた  $t_m$  と有効最大降雨強度  $r_p$  との関係は、図-9 に示すように片対数紙で一つの直線であらわされるようである。つぎに  $q_m$  は幾何学的近似法により次式から求められる<sup>9)</sup>。

$$q_m \approx \left[ Q_m + \frac{S_n' t}{\bar{r}} (n-1)r_1 + (n-2)r_2 + \dots + r_{n-1} \right] / \bar{r}, \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $S_n'$  は流出量曲線上の最大流量  $Q_m$  の点と単位時間後の点とを結ぶ直線の勾配、 $r_i = R_i/R_0$ 、 $\bar{r} = \sum_{i=1}^n R_i/R_0$ 、 $R_i$  は単位時間ごとの雨量、 $R_0$  は単位雨量、 $t$  は単位時間である。こうして求めた  $q_m$  と  $t_m$  との関係は

図-9  $t_m$  と  $r_p$  の関係

Fig. 9 Relation between  $t_m$  and  $r_p$ .

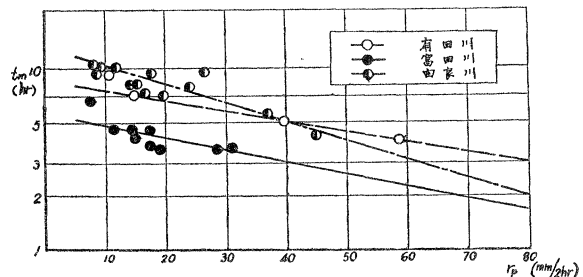


図-10 に示すように両対数紙上でほぼ一つの直線であらわされている。図-9 および 図-10 には由良川における関係も書き加えたが、 $r_p$  と  $t_m$  および  $t_m$  と  $q_m$  の関係がそれぞれ片対数および両対数紙上でほぼ直線関係にあることは<sup>7), 11)</sup>、出水解析上注目すべきことであつて、ここではこの直線関係が資料のない  $r_p$  の大きい部分までも成立するものとして、種々の  $r_p$  に対応する  $t_m$  および  $q_m$  を求めた。このように降雨強度によつて異なる  $t_m$  および  $q_m$  を与えて、総流出量が単位

雨量と等しくなるように試算的に単位図を決定したが、その結果は 図-11 のとおりである。この単位図を実際の出水に適用すると 図-12 のようになり、計算値と実測値とがかなりよく一致することがわかる。

(4) 確率高水流量に対する考察

a) 計画対象降雨 有田川や富田川では 図-4 に示したように、降雨継続時間が2日間にわたっていたから、年最大2日連続雨量について確率計算を行って計画降雨を求めた。この場合その降雨波型としては、流域内の降雨特性を解析して原因別にいくつかの型にわけるのが合理的であるが、有田川や富田川では資料が少なかったため、大洪水時には局地的豪雨の多いことを考えて、大洪水時のもので降雨の時間的変動のいちじるしい特定の降雨を選び、その降雨波型に対応して計画降雨を配分し計画対象降雨とした。なお、こうして求めた有効時間雨量の最大は過去の主要災害時の実績と比較し、実際に生じうる可能性のある値であるかどうかを検討しなければならないが、有田川および富田川の有効時間雨量の最大は、60年確率で約90mm/2hrであったから、大体において妥当なものといえよう。

b) 確率高水流量 計画対象降雨に 図-11 の単位図を適用し、最後に基底流量を加えると、確率高水の時間～流量曲線を求めることができる。図-

図-10  $t_m$  と  $q_m$  の関係  
Fig. 10 Relation between  $t_m$  and  $q_m$ .

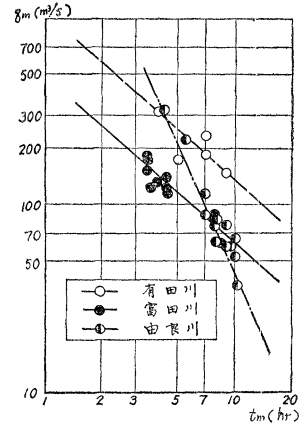


図-11 有田川および富田川の単位図

Fig. 11 Unit Hydrographs for the Arita River and the Tonda River.

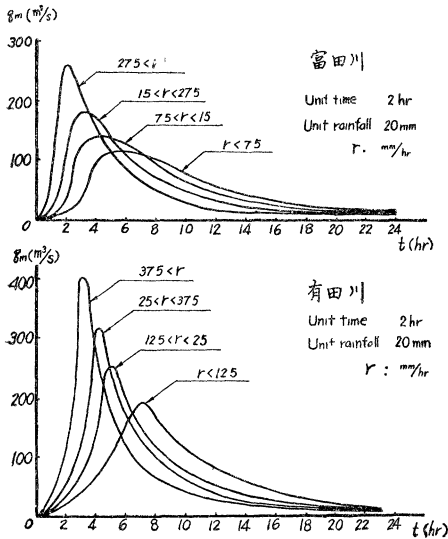
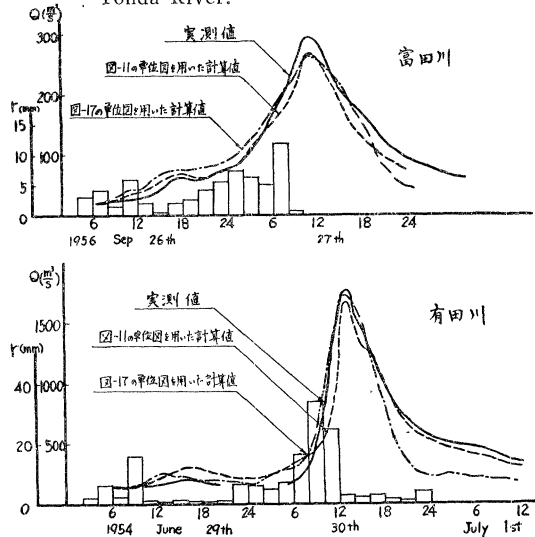


図-12 有田川および富田川における単位図による流出解析例

Fig. 12 Examples of Run-off Analysis by Unit Hydrograph for the Arita River and the Tonda River.



13 是有田川および富田川の60年確率高水を求めた結果であるが、60年および100年確率高水の最大流量を示すと表-6のとおりである。以上のようにして、最大流量のみでなく流出量曲線全体の形を求めると、計画高水流量の決定はもちろん、河川計画上の諸問題を合理的に解決するのにきわめて好都合である。なお、計画高水流量は治水工事の規模を決定するものであり、河川の重要性や氾濫地の性質その他によつて慎重にきめるべきものであるが、社会的環境や財政経済的条件に相応し、十分実施できる工事を対象として考えていかねばならない<sup>19)</sup>。こうした意味から、有田川および富田川の計画高水流量については、十分な資料を蒐集して改めて検討することにした。

4. 時間雨量記録のみ若干ある河川の流出解析

前2章で述べた解析法はある程度の水文資料が整っている場合のみ適用できるものであつて、本章のように水位記録が全くない場合には、厳密には流出解析を行うことができず、次章のように総合単位図の立場から考察する必要があるが、ここではわれわれの若干の研究結果にもとづいて行つた解析法を略述

表-6 有田川および富田川の確率高水流量

Table 6 Probable Flood Discharge for the Arita River and the Tonda River.

河川名	60年確率 (m³/s)	100年確率
有田川	3 150	3 600
富田川	1 970	2 230



し、詳細は文献<sup>9),20)</sup>にゆずることとする。

まず 図-14 に示すように、流域を下流端までの距離が等しくなるように多くの地帯に分割して、各地帯からの流出を合成するという方法を採用し、各地帯の単位面積 (1 km<sup>2</sup>) に降つた単位降雨 (1 mm/hr) による流出量曲線は降雨強度によつて変化させることにし、その単位流出量曲線が速水博士の洪水流の理論に従うものとした。その結果を具体的に示すと、単位流出量曲線のピーク流量  $q_m$  とその遅れの時間  $t_m$  との関係は 図-15 となり、単位流出量曲線の立上り点の時刻  $t_0$  は 図-16 のようになる。図中の  $x$  は流域下流端からの距離であり、 $\alpha$  は

$$\alpha = k_1 \beta, \text{ ただし } \beta = r/r_0 \dots \dots \dots (4)$$

であらわれ、基準雨量  $r_0$  としては 10 mm/hr にとつている。また  $k_1$  は常数であつて、降雨強度  $r$  の変化による  $\alpha$  の変化割合は、 $k_1$  の値の大小に支配されるから、この  $k_1$  が地形に関する流域特性の指標になる。われわれが由良川、大分川および小矢部川などについて解析した結果によると、

$$k_1 = 435(\sqrt{i})^3, \dots \dots \dots (5)$$

ここに、 $i$  は河川の縦断勾配であつて、

$$\sqrt{i} = \frac{1}{\sum A_n} \sum \left\{ A_n \left( x_n / \sum \frac{dx}{\sqrt{i_n}} \right) \right\} \dots \dots \dots (6)$$

として計算される。上式で  $A_n$  は各分割地帯の面積、 $x$  は流域下流端からの距離、 $dx$  は各分割地帯の長さである。したがつて地形図から河川の縦断勾配  $i$  を求めると、図-15 および 図-16 によつて各分割地帯からの単位流出量曲線の  $q_m, t_m$  および  $t_0$  が各降雨強度ごとにかまり、この流出量曲線を近似的に三角形と仮定して各地帯からのものを合成すれば、所要の単位図が決定される。図-17 は  $dx=5$  km として求めた有田川および富田川の単位図であるが、実際の出水に適用すると 図-12 のよくなつて、図-11 の単位図を適用した場合よりも精度は劣るが、実測値とかなりよく一致することがわかる。なお、確率高水流量も 図-13 のよくなつて、図-11 の単位図を用いた場合に比較してかなりよく一致している。この解析法を水位記録のない一般河川に適用するには、流域特性の類似した河川の流出解析の結果を用いて有効雨量をきめることが必要である。

5. 日雨量記録のみ若干あるか、または全く資料のない河川の流出解析

前述した種々の解析法では少なくともある程度の水文資料が必要であつて、水位および流量の記録が全くない場

図-14 流域の分割

Fig. 14 Subdivision of a Region of River Basin into Several Zones.

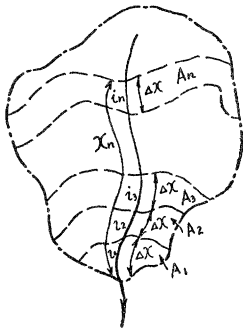


図-15 単位流出量曲線のピーク流量  $q_m$  とその遅れの時間  $t_m$  との関係

Fig. 15 Relation between the Peak Discharge  $q_m$  and its Lag Time  $t_m$  of Unit Run-off Curve.

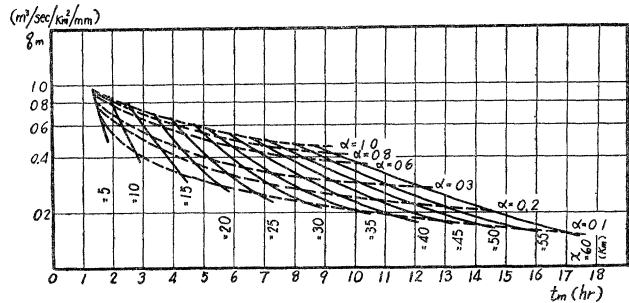
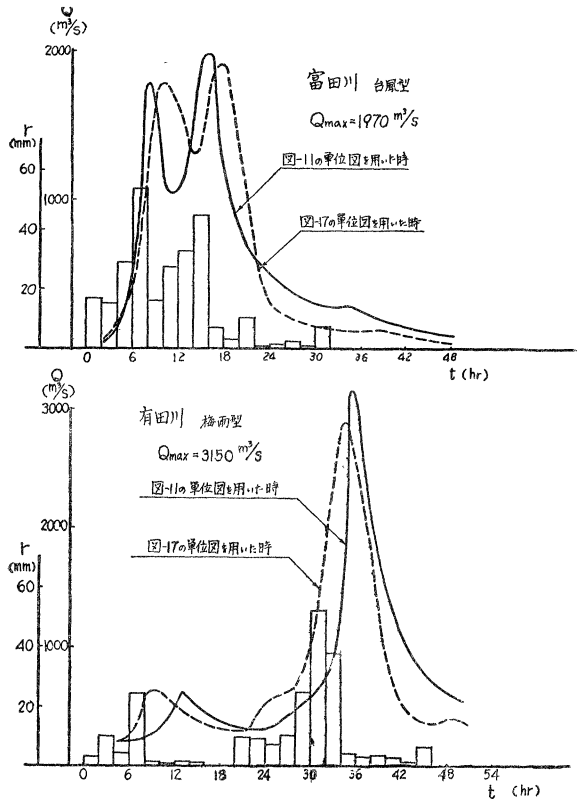


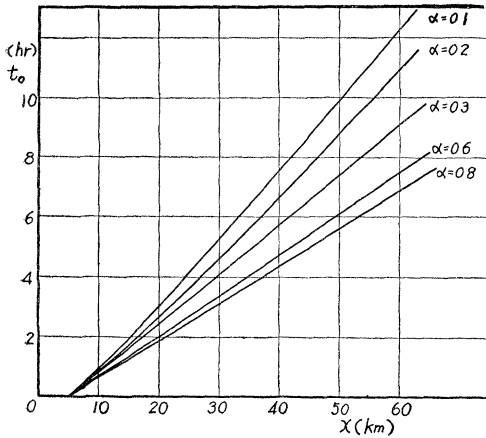
図-13 有田川および富田川の 60 年確率高水曲線

Fig. 13 Hydrographs of 60 Years Probable Flood for the Arita River and the Tonda River



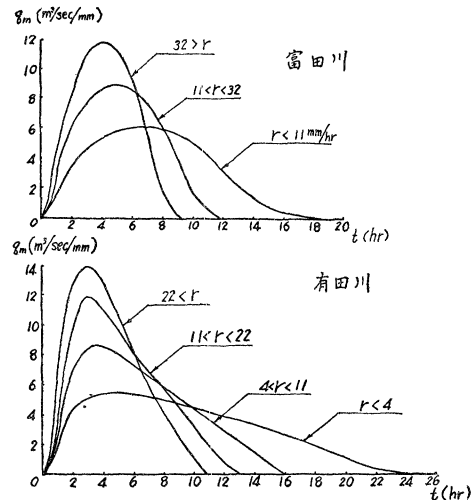
図一16 単位流出量曲線の立上り点の時刻  $t_0$  と 流下距離  $x$  との関係

Fig. 16 Relation between the Time  $t_0$  of Rising Point of Unit Run-off Curve and the Flowing Distance  $x$ .



図一17 (4)~(6) 式から導かれた有田川および富田川の単位図

Fig. 17 Unit Hydrographs Derived by Eq. (4)~(6) for the Arita River and the Tonda River



合は、解析結果がどれほどの妥当性を有しているかを評価することがむづかしく、推定の域を脱することができない。しかしわが国の河川ではこれらの基礎資料がきわめて少なく、満足な流出解析を行うことができない場合が非常に多い。このように水文資料が不足しているときは、実測可能な流域特性さえ与えれば、任意降雨に対する流出量を推定できるような普遍的計算法を導くことが望ましい。そうすれば資料の不備のある程度克服することができるわけであつて、降雨と流域特性などの関係を詳細に把握して普遍的総合的關係を見出し、これを資料のない一般河川に拡張しようとする、いわゆる総合単位図の研究が熱心に続けられている。Snyder は時間～流量曲線の形が降雨重心から最大流量までの時間、すなわち出水の遅れの時間  $t_m$  に深い関係があるとし、アパラチア山脈地方の多くの河川について、 $t_m$  と流出の時間的分布とをあらわす総合配分図を作製した<sup>21)</sup>。わが国では中安博士が多くの河川について単位図の一般的特性を調べた結果、流出の時間的分布がやはり  $t_m$  に支配されることを確かめ、 $t_m$  と流域の長さ(最大流路延長)との関係を求めて、わが国河川の総合単位図を作つた<sup>22)</sup>。われわれは河川の縦断勾配を流域の支配的因子と考え、この勾配と河川流出量との関係を研究して良好な結果をえていることは<sup>20)</sup>、前章で説明したとおりである。水位および流量の資料がない場合の流出解析は、こうした総合単位図に関する諸問題が解決されなければ、満足な結果をえられないはずであつて、今後に残された重要な課題といえよう。

なお雨量記録については、日雨量記録のみ若干ある場合には、隣接流域の時間雨量記録から降雨分布を考慮して各洪水時の降雨波型を推定し、日雨量記録を配分する。つぎに全く資料のない場合には、隣接流域の時間雨量記録より降雨分布を考慮して時間雨量を決定するが、その詳細については省略する。

## 6. 結 言

本文では、水文資料の少ない河川の流出解析法について考察を加え、最近の水文学の研究成果を縦横に駆使して最も妥当と思われる解析法を例示したが、今後さらに多くの河川について流出解析を行い、一貫した体系を樹立したいと考えている。しかし小流域河川の流出機構はここで対象とした中程度以上の流域河川のそれとは趣を異にすると考えられ、水位記録の全くない場合の流出解析とともに、総合単位図の研究を進展せしめて満足な成果をえるつもりである。

最後に本研究に対し資料を提供された和歌山県土木部ならびに計算に全面的な協力をされた稲津信之および梅田貞夫の両君に深謝の意を表する。

## 参 考 文 献

- 1) 中安米蔵：治水計画における洪水流量について、昭 25. 6
- 2) 米田正文：流川計画論水論、建設省近畿地方建設局、昭 27. 3
- 3) 志賀是文：降雨特性に関する二、三の考察、土木学会論文集、第 59 号、昭 33. 11, pp. 43~48.
- 4) R.K. Linsley, Jr., M.A. Kohler and J.L.H. Paulhus : Applied Hydrology, McGraw Hill Co. Inc., New York, 1949,

- pp. 400~404.
- 5) 前出 4), pp. 395~397
  - 6) L.K. Sherman : Stream Flow from Rainfall by Unit Graph Method, ENR, Vol. 108, April, 1932, pp. 501~505
  - 7) 立神弘洋：木曾川洪水の水文学的研究，建設省中部地方建設局，昭 29. 3
  - 8) 石原藤次郎，田中要三，金丸昭治：わが国における単位図の特性について，土木学会誌，第 41 巻，第 3 号，昭 31. 3，pp. 102~107
  - 9) 石原藤次郎，金丸昭治：降雨条件の変動による単位図の変化について，土木学会論文集，第 32 号，昭 31. 3，pp. 50~56
  - 10) 佐藤清一，吉川秀夫，木村俊晃：降雨から流出量を推定する一方法，建設省土木研究所報告，第 87 号，昭 29. 1，pp. 27~42
  - 11) 石原藤次郎，高瀬信忠：流出関数による由良川洪水の解析，土木学会論文集，第 57 号，昭 33.7，pp. 1~6
  - 12) 末石倉太郎：特性曲線法による出水解析について，土木学会論文集，第 29 号，昭 30. 12，pp. 74~87
  - 13) 岩垣雄一：特性曲線法による流出の解析について，第 12 回土木学会年次学術講演会講演概要，昭 32. 6，pp. 293~294
  - 14) 岩垣雄一，高埴琢馬：降雨および流域特性か流出関係に及ぼす効果について，京大防災研究所創立 5 周年記念論文集，昭 31.11，pp.191~200
  - 15) 石原藤次郎，高埴琢馬：単位図法とその適用に関する基礎的研究，土木学会論文集，第 60 号・別冊 3-3，昭 34.3
  - 16) 石原安雄：洪水演算器による出水とその調節に関する研究，昭 33. 10
  - 17) 近畿各大学連合水害科学調査団：和歌山水害報告書，昭 28. 10
  - 18) 高瀬信忠：時系列論よりみたわが国水文諸量の性格について，土木学会論文集，第 43 号，昭 32. 2，pp. 38~42
  - 19) 石原藤次郎，上山惟康：忠別川の計画高水流量について，全国災害復旧促進連盟，昭 28. 1
  - 20) 石原藤次郎，金丸昭治，中川博次：わが国河川の総合単位図の研究，京大防災研究所創立 5 周年記念論文集，昭 31.11，pp. 181~190
  - 21) F.F. Snyder : Synthetic Unit Graph, Trans. AGU, Part 1, 1938, pp. 447~454
  - 22) 中安米蔵：本邦河川洪水の Unit Graph について，建設省直轄工事第 7 回技術研究報告，昭 31. 3 pp. 333~346

(昭 34. 2.12)