

河川上流部における水文資料の整備とその適用例

石原藤次郎・高 棹 琢 馬・田 中 雄 作

A STUDY ON COMPILING AND HANDLING OF HYDROLOGIC DATA IN MOUNTAIN DISTRICT AND ITS APPLICATION

By *Tojiro* ISHIHARA, *Takuma* TAKASAO
and *Yusaku* TANAKA

Synopsis

Many studies on river hydrology have been hitherto made in order to contribute the rationalization of water planning. However, these studies which mainly depended on much available hydrological data were not sufficient to plan the practical water project especially in mountain district, because there were only a few available data.

In this paper, the authors proposed a method to classify the states of the existence of the hydrologic data and showed the way to make the insufficient data useful for each cases. As an example of such cases, we tried an analysis for a hypothetical project of pumped storage hydroelectric in a small mountain district and obtained some interesting results. The contents of the analysis are as follows; (1) compiling the effective hydrologic data, (2) predicting the shortest period of required storage by statistical analysis, (3) calculating the peak discharge of design flood by using the decision method of peak flow based on the theory of characteristics.

We hope that this study is the first step to systematize and generalize water planning in mountain district.

1. ま え が き

近年、わが国における国土開発にはめざましいものがあり、河川工学の分野においても例外ではなく、開発はしだいに山岳上流域にまで及んでいる。ひとつの計画を進めるにあたって、立案の基礎となるものは、実際現象の結果としてあらわれた実測資料である。今日までにも多くの研究者が豊富な資料を前提とした種々の解析法を提案し、河川計画の実施にあたって多大の貢献をしてきている。しかしながら、現在および将来の計画を考えると、開発計画の進展に伴って鋭意水文資料観測所が設けられつつあるが、一般に、資料収集の速度よりも開発速度の方が速く、計画が具体化するような時点でも、現地の資料はせいぜい1～2年しか得られないような場合が多い。とくに、山岳上流域における水計画については、そのほとんどがきわめて不十分な資料をもとにして立案しなければならないものと思われる。こうした事情を考えれば、数少ない資料を最大限有効に活用して、計画に必要な水文諸元を精度よく算定し、計画全体の信頼性をいかにして高めるかという方法の開発が、緊急の課題であろう。

本研究は、こうした水文資料の少ない地点を対象とする水計画、とくに、河川上流部における各種水工計画において、その手法、手順の体系化をはかるための第一歩であると同時に、現場技術者へ、観測施設の配

置、資料の収集、企画などの展望を与えることを目的としたものである。

本文では、まず、計画地点において入手可能な資料の状態を知り、さらに、他の地点における資料についても、どのようなものが、どのような方法を用いれば計画に利用できるかを検討した。また、こうして整えられた資料をもとにした計画の具体例として、由良川最上流部における揚水発電計画を想定して二、三の解析を試みた。

2. 水文資料の整備法

2.1. 資料の存在状態

水文資料としては、降水量、流量、水位、気温、湿度、日照時間、風力、風向、さらには蒸発量、浸透量など数多くの要素が考えられるが、ここでは、水計画上もっとも重要である降水量と流量について検討を進める。

水計画に必要な将来における流量系列を正確に推定するためには、降水系列の予測、流出機構の解明が必要であり、現在の水文学ではきわめて困難な問題が多い。したがって、解析にあたってはこれら物理的な機構を考慮しながらも、何らかの形で過去の資料をもとにした統計的な手法によらざるを得ない。統計的な手法は、標本値である観測資料より母集団の性状をとらえようとするものであるから、過去の資料としては、できるだけ長期間にわたり、かつ数多く存在することが望ましい。しかし、先にも述べたように、とくに上流域においてはこのような状態が少ないことを考えれば、計画地点と同流域の他地点、あるいは、他流域でも計画地点の近傍に長期にわたって資料がある場合、できる限りこれを有効に利用すべきである。本研究では、計画地点における過去の十分な資料、あるいはこれにかわるものを得ることを目的とし、必要資料を他地点の資料より推定して補うことを資料整備の方針とする。なお、気象学上という長期的な資料とは、通常数10年にわたるものをさすが、水文資料の場合はこうした例はまれであり、ここでいう長期的とは、10数年から20年程度をいうことにする。

一般に、降水量の観測施設は流量のそれよりも設置しやすいので、観測地点も多く、観測期間も長いのが普通である。したがって、一地点の流量の観測期間が降水量のそれよりも短い場合は少ないものと思われる。このように考えると、ひとつの計画地点における降水量と流量の資料の存在状態を分類すれば Fig. 1 のようになる。ここに、 $Q(L)$, $Q(S)$, $Q(N)$ は、それぞれ長期間にわたる多数の流量資料が存在していること、若干の流量資料が存在していること、流量資料が存在しないことを意味している。降水資料についても、これと同様な意味で、 $R(L)$, $R(S)$, $R(N)$ とあらわす。Fig. 1 を用いれば、たとえば長期間にわたる降水資料と、若干の流量資料が存在する地点は Case II₁ であるというような表現ができ、一般に、ひとつの計画地点はこれら6つの Case のどれかひとつにあてはまる。Fig. 1 において上段かつ左側にある Case はど資料が充実していることになり、精度の高い解析ができるはずである。計画地点の資料が不十分な場合、すなわち Case II₁, II₂, III₁, III₂, III₃ に相当する場合は、他地点の資料をできる限り利用して計画地点の資料を補充しなければならない。このとき、計画地点以外の資料のうち有効なものは、計画地点のものより長期にわたるものでなければならないから、計画地点の資料の存在状態のそれぞれについて、他地点における有効な資料の存在状態の型は限定されるが、このことを明確にするため、つぎのような操作を行なう。

		Discharge		
		$Q(L)$	$Q(S)$	$Q(N)$
Rainfall	$R(L)$	I ₁	II ₁	III ₁
	$R(S)$		II ₂	III ₂
	$R(N)$			III ₃

Fig. 1 Patterns of hydrologic data at object point.

		Discharge		
		$Q(L)$	$Q(S)$	$Q(N)$
Rainfall	$R(L)$	A ₁	B ₁	C ₁
	$R(S)$		B ₂	C ₂
	$R(N)$			C ₃

Fig. 2 Patterns of hydrologic data at neighboring points.

- i) Fig. 1 と同様にして、他地点の資料存在状態を Fig. 2 のようにあらわす。
- ii) Fig. 2 を Fig. 1 の上に重ねる。
- iii) Fig. 1 の 6 つの Case について、それぞれその位置より上段、あるいは左側にあるものを Fig. 2 より選ぶ。

このようにして、計画地点の資料存在状態の各 Case に応じて、それを補うための他地点の有効な資料存在状態の型を、機械的な操作で抽出することができる。こうした分類に従えば、ひとつの計画全体における資料の存在状態は、たとえば Case II₁-A₁ であるというような表現ができる。

なお、目的とする問題によって、必要とされる資料の単位時間が異なることに注意しなければならない。長期的な問題には、日単位、月単位、あるいは年単位の資料が、また、洪水などの問題をとり扱う場合には、少なくとも時間単位の資料が必要であろう。月単位、年単位の資料は、日単位の観測値の和として与えられるのがふつうであるから、本文では、長期的な問題については日降水量、日流量を、また、洪水などの問題については、時間雨量、時間流量（水位）の記録を考えることにする。

以上のように、計画にあたってはまず計画対象地点の資料の実態を知り、さらに他の地点の資料の状態を調査して、それぞれの場合に応じてできるだけ精度よく所要の資料を整えることのできる方法を考えなければならないが、實際上、計画地点における長期間の流量資料を得るためには、どこかの地点に何らかの形で長期間の資料の存在が前提となるのは当然であろう。

2.2. 資料整備の一般的手法

さて、計画地点の資料の存在状態がわかり、その不足している部分を補うために有効な資料を抽出できれば、これを用いて計画地点における不足資料を推定、補充できるであろうが、ここではそのための一般的な解析手法の方針を、つぎのような 6 項目に大別しておこう。

- ① 所要地点の十分な降水資料と若干の流量資料より、同地点の十分な流量資料を得る。
- ② 所要地点の若干の流量資料と、他地点の十分な流量資料より、所要地点の十分な流量資料を得る。
- ③ 所要地点の若干の降水資料と、他地点の十分な降水資料より、所要地点の十分な降水資料を得る。
- ④ 所要地点に流量資料がない場合に、降水資料よりこれを得る。
- ⑤ 他地点の資料をそのまま、あるいは若干の操作を加えて、所要地点の資料として用いる範囲を知る。
- ⑥ まったく資料のない地点においても、ある程度の精度で所要の資料を推定する方法を開発する。

それぞれの手法についていえば、番号の小さいものほど推定の精度が高くなるが、対象となる問題と、資料の状態によってそれに適したものを応用し、また、いくつかの手法を組み合わせることによって、できるだけ精度よく資料推定ができるような方法を組み立てていかなければならない。各方針についていますこし説明すれば、

①は、流域の特性を把握し、流出機構を解明して出力である流量資料を算出しようとするもので、もっとも基本的なものであるが、物理的な流出機構の解明は、それ自体長期にわたる多くの資料をもとになされるべきものであるから、短期間の資料からその流域の流出特性を明らかにすることは困難である。しかしながら、地形、地質、植生、気象条件などが似ている流域の流出特性がわかっておれば、これを応用することによって所要の値を推定することができるであろう。比較的少ない資料によって洪水時のピーク流量を推定できる方法として、特性曲線理論による最大流量決定法¹⁾などが、また、降水資料が長期間ある場合に、欠測日流量の補充を目的として有効なものとしては、統計的単位図法²⁾などがある。

②および③は、2 地点間の資料の相関関係をもとにするもので、資料の存在する同一期間内で両者の相関関係を調べ、高い相関が見出されるなら、一方の長期的な資料より、他方の長期間の資料を推定できる。流量は降水の出力であるから、その特性は降水系列の特性に左右されるところが大きいと思われる。したがって、降水系列、とくに日単位以上の資料が、ある地域相関性をもっている³⁾と考えるなら、[あまりはなれていない 2 地点間では、流量系列も比較的高い相関性を示すものと予想できる。とくに、同一流域内の 2 地点では、土質、植生など流出特性に影響を及ぼす条件がよく似ていると考えられるから、高い相関性が認めら

れるであろう。この方法は、手法が簡単で精度も比較的良好なところから、実際上使用するに適した場合が多いものと考えられる。

④は、降水資料だけから流量を推定しようとするもので、たとえば、流出率の時間的、場所的、面積的な変化などを考慮して、月単位程度の流量を推定するには適しているものと思われる。こうした手法は、計画地点に流量資料がなく降水資料が存在するか、あるいはこれを推定できるような場合は応用できるが、流出率は流域のこう配、植生、土質条件、降雨強度、降雨継続時間、流域面積などによって変化するので、これを実際に用いるにあたっては多くの問題があらう。

⑤は、計画地点にまったく資料がない場合に、主として降水量を対象とし適用されるものである。降水を支配する要素は数多くあるが、単位時間を長くとれば、かなり離れた地点間の資料にも、高い相関を期待できる場合があらう。したがって、計画地点にまったく記録がない場合でも、その近傍に豊富な記録をもつ観測所が数点あれば、それを用いることによって計画地点の資料を近似的に推定しえよう。

①から⑤までが一応計画地点あるいはその近傍において、計画地点における流量推定のための手がかりとなるような水文資料の存在を想定した場合の手法であるのに対して、⑥は計画地点近辺にすら資料のない状態を対象としている。この場合は精度の高い推定法を見出すことはとうてい不可能であるが、全国にわたって緯度、経度、標高、こう配、流域面積など、地図上で読みとることのできる要素を調べ、さらには植生、土質条件、土地利用形態などをも考慮することによって、年単位程度の総流量、総降水量などを推定しようとするものである。年総流量の平均値を推定するものとして、重回帰分析による方法⁹⁾などが提案されているが、パラメーターの選択などに問題が残っているようである。

以上、6つの解析方針にしたがって、手法の概略を述べた。計画地点の資料存在状態とそれを補うための有効な資料およびその手法の関係をまとめると Table 1 のようになる。

Table 1 Correspondence of states of existence of hydrologic data and methods of analysis.

Patterns of hydrologic data at object point	Effective patterns of hydrologic data at other points	Effective methods for filling up the necessary data
I ₁		
II ₁	A ₁	① ②
II ₂	A ₁ B ₁ C ₁	① ② ③
III ₁	A ₁ B ₁ B ₂	① ③ ④ ⑤
III ₂	A ₁ B ₁ B ₂ C ₁	③ ④ ⑤
III ₃	A ₁ B ₁ B ₂ C ₁ C ₂	④ ⑤ ⑥

3. 揚水発電計画への適用例

3.1. 揚 水 発 電

山岳上流部を対象とする計画の代表的なものとして揚水発電計画がある。これは、上下2つの貯水池を建設し、日、週または季節間の余剰電力によって下部貯水池の水を上部貯水池へくみ上げておき、ピーク負荷時または緊急時などに下部貯水池へ放流して発電を行なうもので、循環エネルギーとしての水の性質を巧みに利用した、一種のエネルギーの貯留装置と考えられる。電力の供給源として近年急激な発展をみせつつある原子力発電は、経済性、安全性の面から定常的な運転をすることが望ましく、したがって、原子力発電所の増加に応じてその余剰電力は増大するから、これを有効に処理するための揚水発電所の建設が一層重要となってくる。揚水発電所の建設地点は地形的な要素に左右されるところが大きい⁹⁾が、水の位置エネルギーを利用するものであるから、必然的に山岳上流部がその対象とならう。

3.2. 想定計画の概要

Fig. 3 は由良川の福知山上流域、および福井県若狭湾に流れる南川の支川、久田川の最上流部を示した

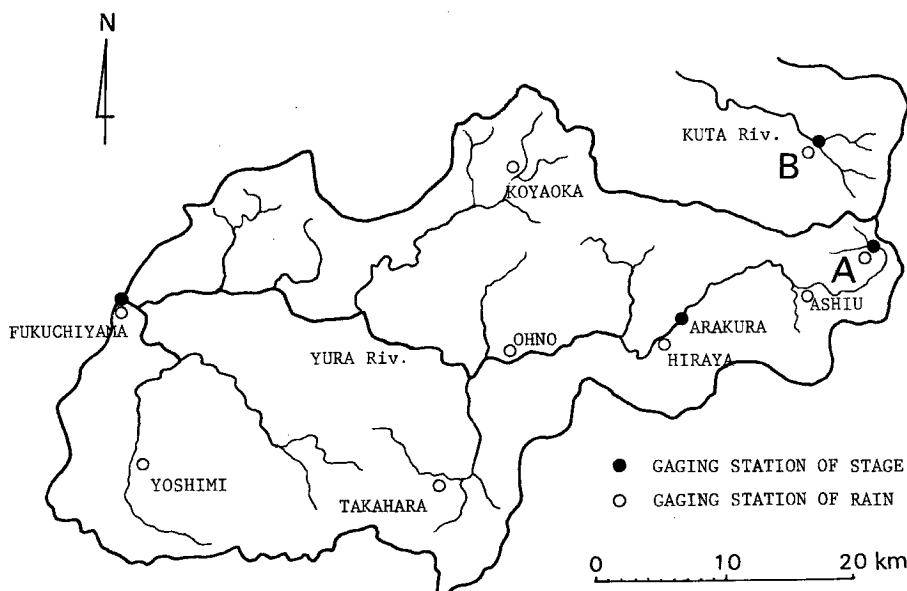


Fig. 3 Map of the YURA river basin.

ものである。想定計画は、由良川最上流部の起伏の少ない高原地帯と、その北方が急斜面となって福井県側に下降している地形上の特徴を、揚水発電の構想と結びつけようとするもので、上部は由良川流域 A 地点（流域面積約 5 km²）、下部は久田川流域 B 地点（流域面積約 20 km²）にダムを建設して貯水池を設け、上下貯水池を連絡して貯留水を反復使用することによって発電を行なう循環式純揚水発電計画である。

こうした純揚水発電専用の貯水池を建設する際の重要な要素として、必要貯水量を確保するに要する湛水期間の推定、および構造物設計に適用される計画高水流量の算定の 2 つがあげられる。ほかにも重要な要素があろうが、この 2 つはとくに貯水池の経済性、安全性、工程計画などに大きな影響を与えるものである。すなわち、開発の進行にしたがって、計画地点がしだいに奥地化する傾向にあることを考えるならば、流域面積は小さくなり自流が少なくなることから、湛水期間の推定はますます重要性を増すであろう。また、ダムサイトとして条件のよい地点は、その多くがすでに開発されており、とくにコンクリートダムを考えた場合、地形、地質などについて整った条件を備えているところは数少ない。したがって、今後はコンクリートダムにくらべると築造可能な高さに制限をうけることが少なく、材料も現地で入手しやすいフィルタイプダムがダム形式として採用される場合が多くなるものと思われる。フィルタイプダムは、コンクリートダムの場合にくらべて洪水処理の問題がとくに重要であり、さらに、これが河川上流部に建設されることを考え合わせるならば、万一破堤した場合の洪水エネルギーはきわめて大きい。したがって、計画高水流量の算定にも十分な考慮がはらわれなければならない。

こうした意味で、以下では湛水期間の推定と計画高水流量の算定のそれぞれについて考察を進める。

3.3. 湛水期間の推定

(1) 資料の存在状態と整備

湛水期間を推定するには、貯水池への入力である流量と、その時間的な変動を知らなければならないが、このためには計画地点における長期間の流量資料が必要である。

水文資料としては、A、B 両地点ともに約 1 年半程度の日降水量、日平均流量の資料があるにすぎないが、A 地点の下流に位置する荒倉（流域面積約 159 km²）には約 17 年間の日流量の資料、また芦生には約 18 年間の日降水資料がある。これらの資料の一覧を Table 2 に示す。これから、2・1 で述べた分類に従えば、

Table 2 List of the observed records.

Station	Data	Duration	Shortage
A	Daily rainfall	1967. 4. 1~1968. 8. 31	1967. 10, 1968. 7
	Daily discharge	1967. 1. 1~1968. 8. 31	
B	Daily rainfall	1967. 1. 1~1968. 9. 30	1967. 8. 9. 12 1968. 1. 5
	Daily discharge	1967. 1. 1~1968. 9. 30	
Arakura	Daily discharge	1952. 1. 1~1968. 9. 30	
Ashiu	Daily rainfall	1951. 1. 1~1968. 8. 31	

湛水期間推定に関する資料の存在状態は、**A**、**B** 両地点ともに Case II₂-A₁ に属する。ここでは2・2で述べた解析方針の②に従って、**A**、**B** 両地点と荒倉の資料の間に直線回帰を仮定して、相関分析によって、**A**、**B** 両地点の17年間の日流量資料を算出する。

一般に、2 地点間の水文量の標本の組 $(x_i, y_i) \ i=1, 2, \dots, n$ があるとき、2 変数 x, y の標本相関係数 r は次式であらわされる。

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{ここに、} \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i,$$

さらに、 x, y が定直線

$$y = \alpha + \beta x \quad \dots\dots\dots (2)$$

上にあるとすれば、Gauss の最小2 乗法によって α, β の推定値 a, b はつぎのようになる。

$$a = \bar{y} - b\bar{x}$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

(2), (3) 式より推定直線は

$$y = a + bx \quad \dots\dots\dots (4)$$

となり、これを標本回帰直線とよんでいる⁶⁾。

A、**B** 両地点と荒倉の対応する日流量について上の方法をあてはめた結果は **Table 3** のようになる。また、この回帰直線を用いて算出した流量と、実測流量との比較を**A**地点について示したものが **Fig. 4** である。**B**地点についてもほぼ同様であり、大きなピークでは両者の間にズレがあるが、相関係数 r は大きく、このようにして求められた日流量資料は、湛水期間推定のための資料として十分有効であろう。

Table 3 Correlation coefficients and parameters in Eq. (4) between points **A**, **B** and ARAKURA.

	r	a	b
A ~ ARAKURA	0.882	0.025	0.040
B ~ ARAKURA	0.893	0.462	0.093

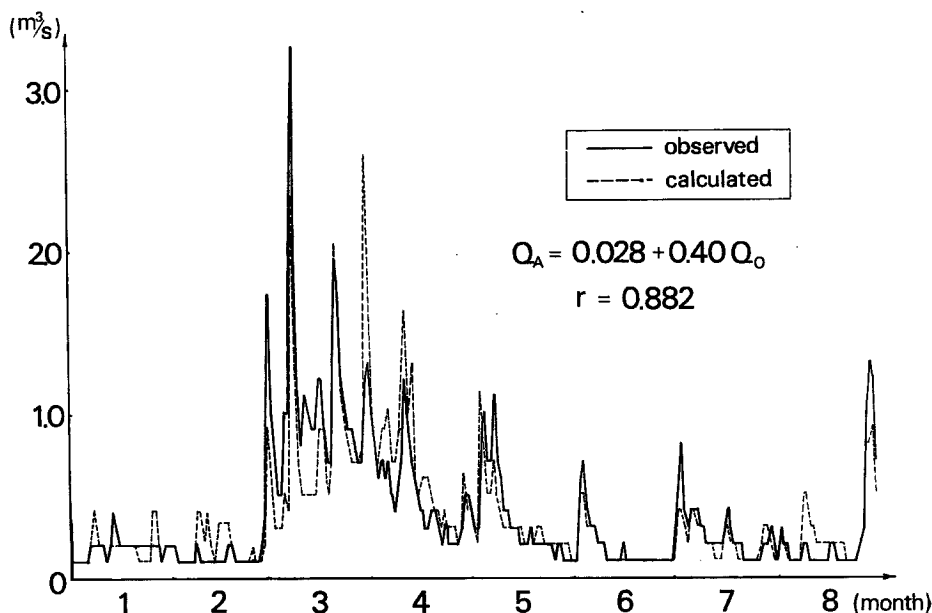


Fig. 4 Comparison with observed and calculated river discharge at point A.

(2) 累加曲線による湛水期間の推定

前節で求めたA, B両地点の17年間の日流量資料より湛水期間 T (日)を次式によって求める。

$$\sum_{i=N_1}^{N_2} Q(i) \geq V \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$T = \min(N_2 - N_1) \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに, $Q(i)$; i 日の流入量 (m^3)

V ; 確保すべき貯水量 (m^3)

N_1 ; 湛水閉止日

N_2 ; 湛水終了日

T ; 湛水期間 (日)

流量は季節的な変動をするから、湛水期間もその開始日によって変動を示すであろうことは容易に推測できる。したがって、迅速で無駄のない計画をするために、湛水期間の季節的な変動を知り、計画にもっとも適した湛水開始の期日を定めることが必要である。ここではこのような意味での手がかりになるものとして、月別の湛水期間の平均値について考察する。

資料より算出された月別の湛水期間 T の分布をもとにして、各月の T の母平均の信頼区間を調べておけば、計画をすすめる上でのひとつの基準となるであろう。17年間にわたる資料が得られたということは、ある月をとり出せば、その月の初日を湛水開始日とする T の値は16~17個得られるということである。これらを適当な日数で区切り、その頻度を確率紙上に描いて分布型を推定する。もしこれが正規分布とみなせるか、あるいはこれに変換できる場合には、つぎのようにして母平均 μ の信頼区間を推定することができる。

母平均 μ が信頼係数 $(1-\alpha)$ で偶然変動する区間は、統計量 $t = (\bar{T} - \mu) \sqrt{n} / s$ が自由度 $(n-1)$ の t 分布に従うことを用いて次式で表わされる⁷⁾。

$$\bar{T} - t_{1-\frac{1}{2}\alpha} \frac{S}{\sqrt{n}} < \mu < \bar{T} + t_{1-\frac{1}{2}\alpha} \frac{S}{\sqrt{n}} \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここに n ; 標本数 (年)

$$\bar{T} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n T_j$$

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (T_j - \bar{T})^2$$

t_α ; 自由度 $(n-1)$ の t 分布において $P_r(t \leq t_\alpha) = \alpha$ となる t_α の値

下部B地点の流域面積が、上部A地点の流域面積の約4倍あることを考えて、つぎのような場合について計算した。

⑤ 上部貯水池の総貯水量(約2200万 m^3)をA地点への流入量で湛水する場合

各月の初日を湛水開始日とする湛水期間 T を(5)および(6)式によって計算し、その分布を正規確率紙上に表わしたものを Fig. 5 (1-a) に示す。これらをすべて正規分布であるとして(7)式によって母平均の90%信頼区間の推定を行なった結果が Fig. 5 (1-b) である。以下つぎのような場合について同様の計算を行なった結果を示す。

② 上部貯水池の死水量(約750万 m^3)をA地点への流入量で湛水する場合 Fig. 5 (2-a)(2-b)

③ 下部貯水池の総貯水量(約2000万 m^3)をB地点への流入量で湛水する場合 Fig. 5 (3-a)(3-b)

これらの結果からつぎのようなことがいえる。

- i) いずれの場合も1, 2, 3月といった月からの開始が最短期間で湛水し、この計画地点が山岳上流域で、春期融雪水量が多いことを示している。
- ii) 季節変動は貯水量が少なくなり、湛水期間が短くなるほどその影響が大きい。なお②の場合には、正規分布のあてはめがこのままでは十分ではないと思われるので、さらに検討しなければならないが、平均値の変動のみに着目するならば考察は可能であろう。
- iii) 上部貯水池を独立に湛水するときは、総貯水量を湛水するには2年近くかかり、死水量までも半年以上かかる。また、②と③をくらべた場合、どの月をとってみても③の方が短い。このことは、上下同時に独立に湛水を開始した場合、下部貯水池が満水になっても上部貯水池は死水量にもいたらないことを意味している。

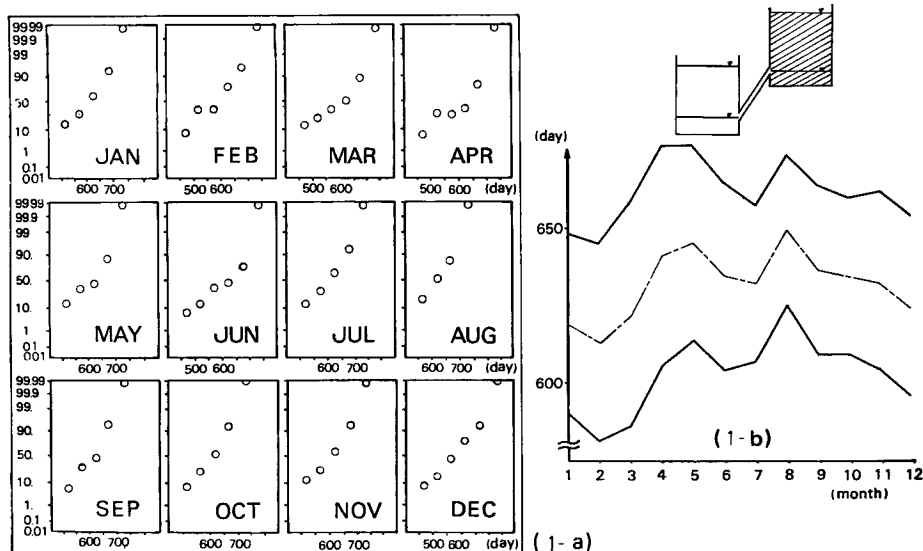


Fig. 5 Monthly variation of storage periods by natural inflow.

(a) Distributions showed on normal probability paper for each months.

(b) 90% confidence interval of population mean.

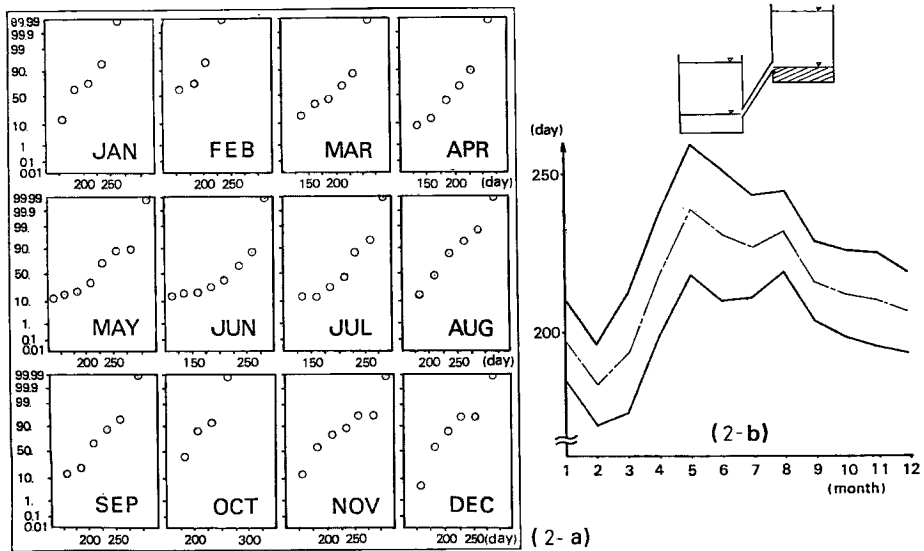


Fig. 5 Monthly variation of storage periods by natural inflow.
 (a) Distributions showed on normal probability paper for each months.
 (b) 90% confidence interval of population mean.

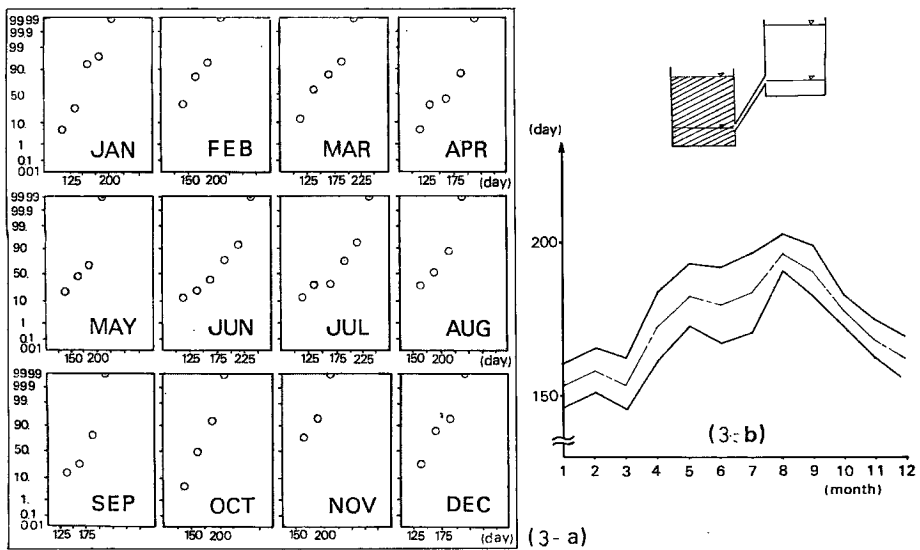


Fig. 5 Monthly variation of storage periods by natural inflow.
 (a) Distributions showed on normal probability paper for each months.
 (b) 90% confidence interval of population mean.

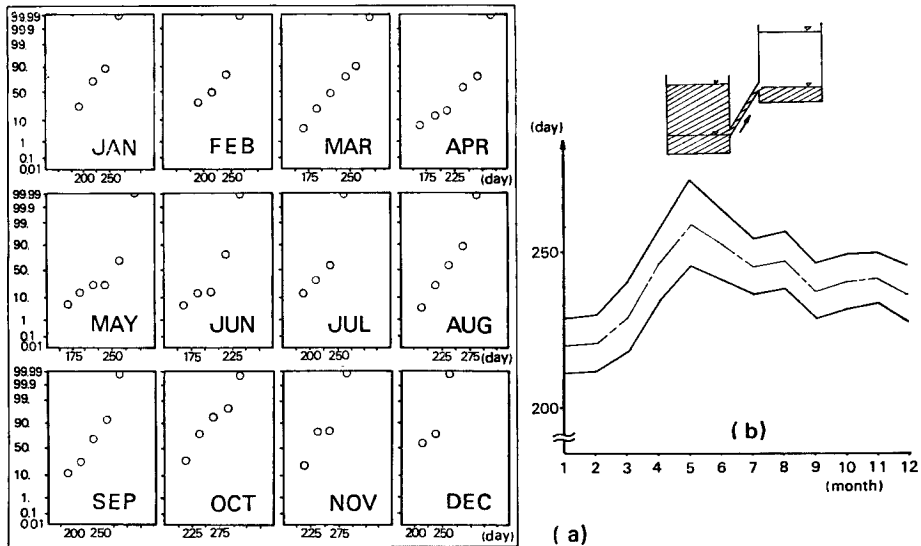


Fig. 6 Monthly variation of storage duration with pumping up.

ここで、この計画が揚水発電計画であることを考えれば、有効貯水量は上下両貯水池ともほぼ同じであるから、確保すべき貯水量は、上部貯水池の死水量と下部貯水池の総貯水量の和であると考えてよい。したがって、湛水期間中に揚水を行なうことを前提とすれば、つぎのような方法が考えられる。

- ④ 上部貯水池の死水量と、下部貯水池の総貯水量の和（約 2800万 m^3 ）をB地点への流入量で湛水させる場合 Fig. 6 (a) (b)

この場合も1月開始の場合がもっとも短く約220日で湛水する。

③と④を比較するとき、もっとも短い1月開始の場合をみると約60日の差がある。これはB地点への流入量で上部貯水池の死水量を湛水するに要する日数であると考えられる。したがって、上部ダム建設がはかばかしく、上部貯水池の流入量がほとんど期待できないような場合には、下部貯水池湛水終了時よりほぼ2カ月の余裕をみておく必要がある。なお、(7)式より n が大きくなるほど同一信頼係数での信頼区間が短くなるから、資料は長期間にわたるものほど精度のよい推定ができることはいうまでもない。

3.4. 計画高水流量の算定

(1) 資料の存在状態

出水に関する記録については、A、B両地点ともこれまでの観測期間中には大きな出水はない。ただ、中、小規模ながらいくつかの出水があって、それぞれ日記録計による降雨、水位の記録が存在する。由良川の下流にはいくつかの測水所があり、また由良川流域全体には数点の降雨観測所があって、それぞれ過去数回の大出水時における時間水位、およびかなり数多くの時間降雨の記録がある。以上から2.1.で述べた分類に従えば、出水時の資料の存在状態は、両地点とも Case II₂-B₁であるといえる。

水文資料の少ない場合にもいろいろな出水解析法が提案されている⁸⁾が、ここではこれらの資料を有効に利用して計画高水流量を算定できる方法として、先に述べた特性曲線理論にもとづく最大流量決定法を用いることにする。

(2) 最大流量決定法による確率高水流量の算定

この方法は、Fig. 7 に示すような最大流量を発生する降雨部分の到達時間 t_{pc} (hr.) と、 t_{pc} 内への平均有効降雨強度 r_{mp} (mm/hr.) が

$$t_{pc} = \frac{K}{r_{mp}^{0.4}} \dots\dots\dots (8)$$

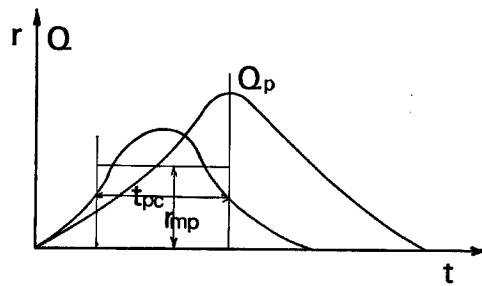


Fig. 7 Schematic diagram illustrating the relation between the occurring time of maximum discharge, the propagation time of peak flow and the mean intensity of effective rainfall.

となる⁹⁾ことより、実測の資料から流域の特性を表わす K の値を求めて、 t_{pc} と r_{mp} の関係を定め、これを用いることによって最大流量を次式のように算定しようとするものである。

$$Q_p = r_{mp} \cdot \frac{A}{3.6} \dots\dots\dots (9)$$

ここに Q_p : 最大流量 (m^3/s)

A : 流域面積 (km^2)

この方法では、わずかな出水記録さえあれば、その流域における任意の降雨による最大流量が算出できるので、資料の少ない計画地点への適用には都合がよい。この方法を用いるためには、 t_{pc} と r_{mp} の関係を定めるための、計画地点における、少なくとも1つの大出水時の時間降雨とそれに対応する時間流量(水位)の記録、および確率降雨量を算出するための長期にわたる年最大一連降雨の記録と、これを配分するための時間降雨波形が必要である。つぎにそれぞれの項目にわけて、この計画への適用例を示す。

1) $t_{pc} \sim r_{mp}$ の関係

r_{mp} は t_{pc} 内への平均有効降雨強度であるが、最大流量推定の対象となる降雨においては、有効降雨と観測降雨はほぼ等しく、とくにピーク付近では両者はほとんど一致しているものと考えられるので、ここでは実測資料より r_{mp} を算出した。Table 4 はA、B両地点における出水記録より求めた t_{pc} と r_{mp} の値

Table 4 Observed records according with propagation time of peak flow and mean intensity of effective rainfall.

Observation point	Date	$t_{pc}(hr.)$	$r_{mp}(mm/hr.)$
A	1967.6.28	2.2	18.2
	7. 9	3.0	7.6
	7. 9	3.7	12.8
	9.12	2.0	7.7
	1968.6. 3	4.3	7.0
B	1967.4. 4	5.0	10.0
	6.18	3.0	13.5
	6.28	4.0	10.0
	7. 9	2.0	35.5
	10.27	4.0	9.8
	10.27	6.0	11.0

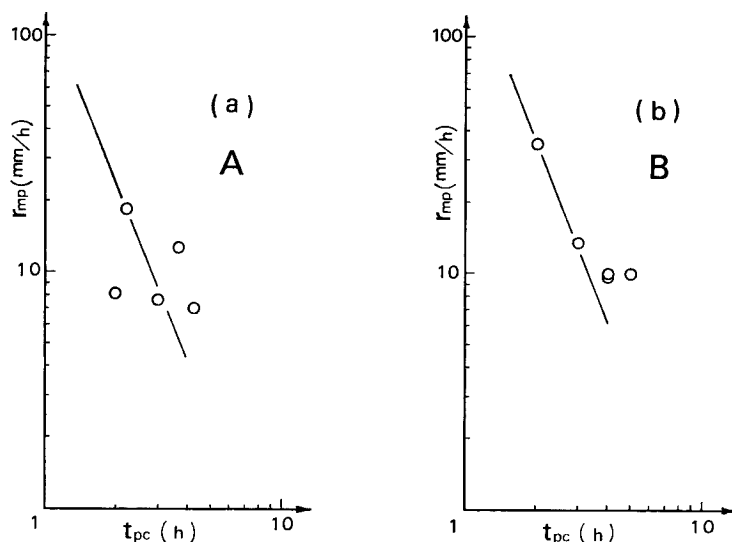


Fig. 8 Relation between the propagation time of peak flow and the mean intensity of effective rainfall.

である。また、これを両対数紙上に表わしたものが Fig. 8 (a) (b) であるが、これらはほぼ (8) 式の理論線の上にとっているとみてよいであろう。なお、ここでは実測値のうち、もっとも大きな r_{mp} をもつ点を通る直線を用いた。

2) 降雨量率確の算定

計画地点には長期にわたる降水資料はなく、芦生において17年間の日降水記録があるが、これだけできわめて生起確率の小さな確率降雨量を算定することは危険である。長期間にわたる降水資料が存在する観測所のうち、計画地点にもっとも近いものは、84年間の日降水資料をもつ京都地方気象台 (A地点との水平距離約 36 km, 標高差約 600 m) である。大出水をひきおこすような大雨は、その原因、地形などにより非常に複雑な様相を示し¹⁰⁾、その地域的、時間的分布、地点間の相関関係などに法則性を見出すことはきわめて困難である。少なくとも種々の降雨の原因別にこれらの点について考察することが必要で、今後さらに研究を進めていくが、近畿地方における数例の大雨の実測値をみたかぎりでは、大雨の総降雨量は場所的には偶発性がみられるので、ここでは計画地点における確率降雨の算定を京都地方気象台の記録にもとづいて行なうことにする。

Fig. 9 は、京都地方気象台における一連降雨の総降雨量と継続時間の関係を示すものである。これで見ると、台風、梅雨前線などの原因に関係なく、一連の大雨は2日以内に終了するものが多いことがわかる。

Table 5 Annual maximum of 2 days rainfall-frequency at Kyoto.

Recurrence interval (years)	2 days rainfall (mm)
50	270
100	300
150	320
200	330
250	340
300	350

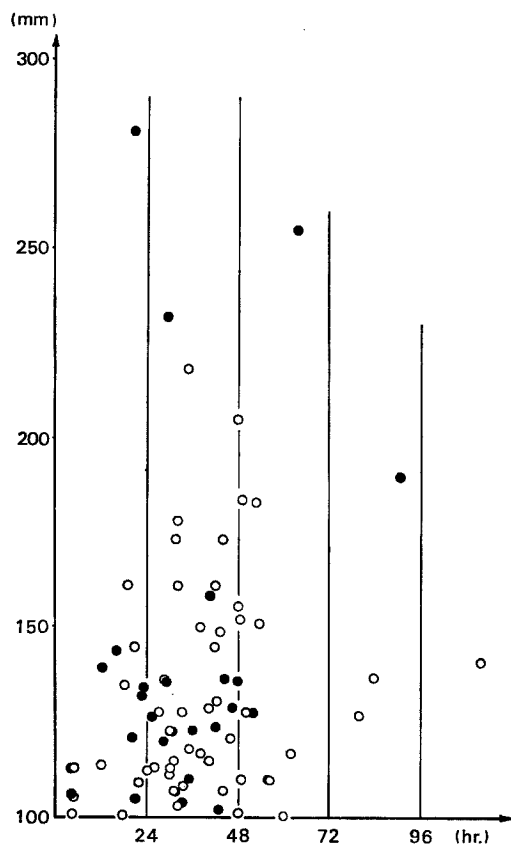


Fig. 9 Relation between the amount of rainfall and the time of duration at Kyoto. (● : Baiu, ○ : Typhoon)

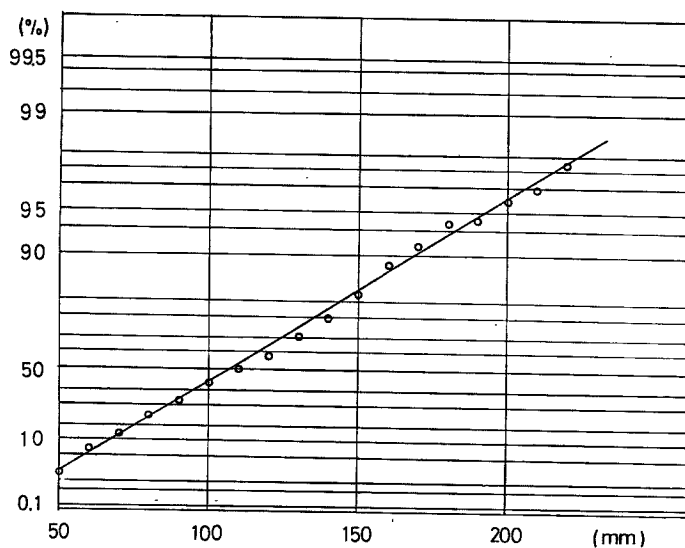


Fig. 10 Distribution of annual maximum of 2 days rainfall at Kyoto showed on extremal probability paper.

したがって、年最大一連降雨のかわりに年最大2日雨量について考察することにする。これは、多くの場合、年最大一連降雨といった記録は入手しにくく、一般には日降水量という形で記録されている場合が多いからである。京都地方気象台における年最大2日降水量の非超過確率を極値確率紙上にプロットすると Fig. 10 のようになる。これは、ほぼ直線上にのっているから、この分布は Gumbel 分布であるとみなすことができる¹¹⁾。京都地方気象台の年最大2日降水量が Gumbel 分布に従うとして、確率2日降水量を算出した結果を Table 5 に示す。

3) 確率降雨の時間配分

確率降水量がきまれば、つぎにこれを配分するための降雨波形を定めなければならない。ただし、Fig. 9 からわかるように、梅雨前線による降雨は大きなピークがなくて継続時間が長く、台風による降雨は急激なピークをもつであろうといった想定波形は、かならずしも実際現象として現われない。したがって、今後は実際に大きな出水をもたらした降雨について考察し、確率降雨波形といった概念を導入する必要があるが、ここでは過去においてとくに大きな出水をもたらした昭和34年9月の伊勢湾台風の降雨波形を利用することにする。

A, B両地点とも伊勢湾台風時の記録がないので、他の地点の記録からつぎのような手順でこれを作成する。

- i) 伊勢湾台風時の時間降雨曲線をできるだけ多くの地点から集める。
- ii) 各観測地点について、それぞれの時間雨量の百分率をもとめる。
- iii) 3点移動平均法により、波形を平滑化する。
- iv) 以上の手順に従って得られた各観測地点の波形をピーク時刻を一致させて重ね合わせて比較検討する。

通常、大雨の記録は1時間ごとの値で示されているので、降雨時間のズレによる波形の変動を除くために iii) の手順を加えたが、これによって急激なピークをもつものは、極端に平滑化されるという欠点があるが、特性曲線理論による最大流量決定法では、 t_{pc} 内への平均有効降雨強度を問題にするので、この点はそれほど大きな難点とはならない。Fig. 3 に示した由良川流域のいくつかの観測所における伊勢湾台風時の降雨波形について、上記の方法を用いた結果を Fig. 11 に示す。これから、ピーク生起時刻、総降水量にかなりの差があっても、基本的な波形はきわめてよく似ているということがいえるであろう。このような手法によれば、計画地点に時間降雨量曲線がなくても、総降水量と、計画地点の近くのいくつかの時間降雨曲線があれば、これを作成することができる。ここでは、計画地点にもっとも近くて資料の完全な平屋におけ

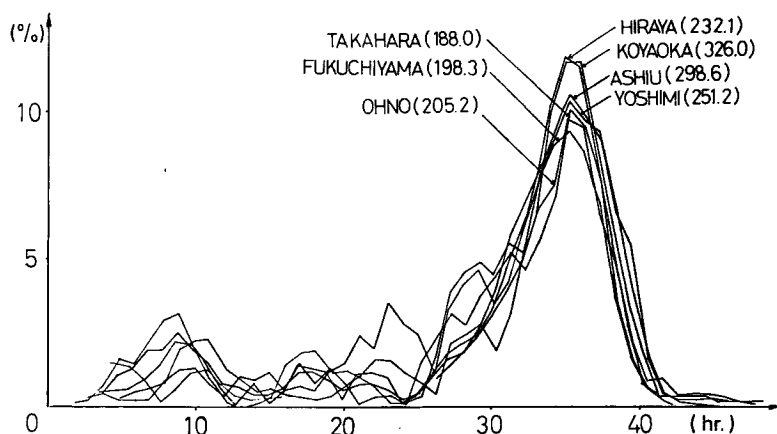


Fig. 11 Hyetograph of the ISEWAN typhoon showed in %.
() ; total amount of rainfall in mm.

る波形を用いることにする。

4) 確率高水流量の算定

以上のようにして求めた $t_{pc} \sim r_{mp}$ の関係、確率雨量、および降雨波形を用いて、計画地点における確率高水流量を算定することができる。その手順はつぎのようである。

- ① 2) で算定した確率2日雨量を、3) で求めた降雨波形に応じて配分し、それぞれの確率雨量に対するモデル降雨を作成する。ピーク部分に対する実際例は Fig. 12 のようである。
- ② ①におけるモデル上で、ピークをはさんで任意の t_{pc} を仮定すれば、これに対応する r_{mp} が定まる。
- ③ ②で定まった r_{mp} に対する t_{pc} を Fig. 8 に示す $t_{pc} \sim r_{mp}$ の関係より求める。
- ④ ③で求めた t_{pc} に対する r_{mp} をモデル降雨より求める。
- ⑤ ③、④の手順をくり返し、 r_{mp} の収束値を求める。実際には、最初の t_{pc} を適当にとることによつ

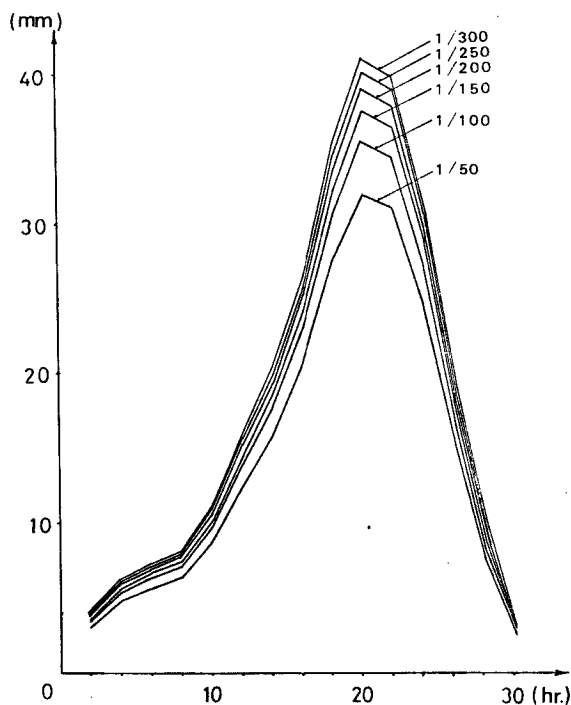


Fig. 12 Model hyetograph based on Table 5 and Fig. 11.

Table 6 Peak flow of design flood.

Recurrence interval (year)	A (C. A. 5 km ²)			B (C. A. 20 km ²)		
	t_{pc} (hr.)	r_{mp} (mm/hr.)	Q_p (m ³ /s)	t_{pc} (hr.)	r_{mp} (mm/hr.)	Q_p (m ³ /s)
50	1.83	30.2	41.9	2.13	30.0	166.7
100	1.73	34.0	47.2	2.05	33.7	187.2
150	1.68	36.0	50.0	1.97	35.6	197.8
200	1.65	37.5	52.1	1.92	37.0	205.6
250	1.62	38.4	53.3	1.91	38.0	211.1
300	1.61	39.3	54.4	1.90	38.8	215.6

て、2～3回のくり返しで収束する。

⑥ このようにして求めた r_{mp} と (9) 式から確率高水流量を定める。

以上の手順に従って算定したA、B両地点の確率高水流量を Table 6 に示す。両地点の流域面積、およびこの地方の年間総降水量から考えると、これらの値はやや小さいと考えられるが、これは京都地方気象台における確率降水量を用いたためであろう。この点については、大雨の地域特性をさらに検討する必要があるが、この点を配慮すればこうした方法は資料の少ない地点における確率高水流量の一般的な算定法として有効であると考えられる。

4. あ と が き

水計画を進めるにあたって、水文学の立場から考えなければならない問題は非常に多く、また、個々の問題はそれぞれきわめて重要な意義をもっている。これらの問題を解析するにあたっては、実測資料がその基礎となるが、とくに山岳上流域にあっては、きわめて不十分な資料をもってこれを行なわれなければならない場合が多いと考えられる。この場合、入手可能な資料を最大限有効に活用して、迅速で無駄のない計画をたてる必要がある。本研究は、このような要求に応えるための第一歩としての役割をなすものと考えている。

本研究では、いろいろな資料の存在状態のうちのひとつの Case として、河川最上流部における揚水発電計画について、とくに湛水期間の推定と計画高水流量の算定という2つの問題をとり上げ、実際的な方法論を述べ、上述のような結果を得た。このような Case は今後とも多くなると考えられるから、ここで述べたような方法は、実際的な方法として応用できる場合が多いものと考えられる。

今後は、本研究において残された問題点を解明していくとともに、気象学的、地形学的な観点からの接近も十分考慮して、さらに他の Case についても研究を進めたいと考えている。その主要な目的が、今後ますます複雑化する水計画の、普遍的、実際的な手順の確立と同時に、計画全体の精度のバランスとその表現を考えていくことにより、水計画のルーチン化、システム化をはかることにあるのはいうまでもない。

参 考 文 献

- 1) 石原藤次郎・高棹琢馬：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50号，昭34.
- 2) 高棹琢馬：流出機構，水工学シリーズ，67—03，土木学会水理委員会，1967.
- 3) 石原藤次郎・池淵周一：降水量の空間的，時間的性状，土木学会関西支部年次学術講演会概要，昭44.
- 4) Julian, R. W., Vujicayevich & Morel-Seytoux, H. J.: Prediction of Watershed Based on Physiography, Colorado State Univ., 1967.
- 5) Salzman, M. G.: Site Investigation of Pumped Storage Facilities, Symposium on Pumped Storage, Proc. A. S. C. E. PO, Vol. 88, 1962.
- 6) 東京工業大学統計工学研究会：統計工学ハンドブック，技報堂，昭28.10.
- 7) 宮沢光一：近代統計概論，培風館，昭41.4.
- 8) 高瀬信忠・志賀是文：水文資料の少ない河川の流出解析例について，土木学会論文集，第64号，昭34.9.
- 9) 前出1).
- 10) 川畑幸夫：水文気象学，地人書館，昭36.3.
- 11) 角屋睦：水文統計論，水工学シリーズ，64—02，土木学会水理委員会，1964.