

水工計画の安全性に関する研究

高瀬 信忠* 鈴木 秀利**

A study on the security in water works design

by

Nobutada TAKASE and Hidetoshi SUZUKI

All the physical variables treated in hydrologic events like the rainfall and the flood are uncertain quantities swayed by physical and probable elements in nature. Although statistical analysis in hydrology is one of the effective methods which give useful data in making the water works design, how we evaluate the generations in hydrologic events such as the rainfall and the flood, we can say that it is a very important and difficult problem for determining the design hydrologic events in the project.

In this paper, we deal with the probability of the security in case that we adopt some probable hydrologic events and also the maximum hydrologic events during a certain period as the design hydrologic events, and moreover we study on the variation of the security when we vary the design hydrologic events and adopt them. The methods of analysis and its results obtained here would contribute much to the rational planning of the actual water works design.

1. はじめに

降雨量や河川洪水流量などの水文諸量は自然現象で不定量であり、そのため河川などの水工計画に際して、これらをどのように推定して計画にとり入れ、そして、どのようにして計画の基準を決定するのが最も合理的であるかは、極めて重要であるが難しい問題であるといわなければならない。一般に水工計画の基礎となる水文諸量は、自然界における多くの物理的因子とこれに付随する確率的因子の、これら諸因子の結合作用によって発生するものであらうと思われる。しかし実際には、これら多くの因子を解明することは不可能であり、したがって、いろいろの仮定のもとに水工計画がなされている現状である。水文諸量の発生に対する評価の手段として統計的解析方法があるが、この方法は現在最も有力な手法とされている。統計的概念が水文諸量の解析に取り入れられたのは、19世紀の終りから20世紀の初期といわれているが¹⁾、今日まで多くの研究がなされ、そして現在では、確率洪水や確率渇水など確率水文量の概念が水工計画に取り入れられて安全性検討の面などにおいて、その果す役割は大きいものがあるといわなければならない²⁾。しかし一般に、その基礎となる水文資料が少なく、このように少なく不確実な水文諸量、そして不十分な観測資料をもとにして立てた水工計画の不備などによる被害も発生している現状である。そこで水工計画による安全性が大いに問題となるのであるが、本論文は水文量発生確率について理論的に解明するとともに、これらの関係を図式

*土木工学科

**元大学院学生、現水資源開発公団試験所

化して研究を加えたものである。これらの研究成果は、水工計画の基礎をなす河川改修工事の規模を決める計画高水流量の決定などに際し、貢献するところが少なくないであろうと思われる。

2. 水流量の発生確率に対する考察

われわれは確率計算によって得られた計算値による水流量、例えば、100年間に1度あるいは1年間の割合（以下、単に1度として解釈しておくものとする）で起こるであろう水流量が比較的短い期間に1度のみならず2度までも起こるといことは度々きかされる場所であるが、それでは、仮に100年間に1度の割合で起こるであろう水流量（100年確率水流量）で計画した場合、その値を超過する確率はどのような安全性をもって評価すべきであるかを考えなければならない。ここでは、 T 年間に1度起こるであろう水流量を計画水流量とした場合、それを超過するであろう確率について検討してみよう。

(1) 計画水流量を超過する確率

計画高水流量などのような計画水流量を Q とし、洪水流量などのような水流量を X とすれば、計画を超過する確率は $P(X > Q)$ 、非超過確率は $P(X \leq Q)$ で表わされる。当然ながら、超過確率と非超過確率との間には次の様な関係がある。

$$P(X > Q) + P(X \leq Q) = 1 \quad (1)$$

計画水流量 Q は再現期間 (Return period) を T 年とすれば、この T 年とは、水流量 Q の洪水などが1度だけ等しいかそれとも超過するまでの期間の長さの平均である。したがって、今後の T 年間に超過する水流量が必ず1度だけ起こるとは限らないのである。すなわち、水流量 Q を超過するような洪水流量などは、決して T 年の時間的に等間隔で現われるものではないので、確率水流量を計画水流量にする場合には、これらの事実を念頭において計画を立てなければならない。

さて、計画水流量 Q に等しいか超過する水流量の起こるであろう確率 $P(X \geq Q)$ は

$$P(X \geq Q) = \frac{1}{T} \quad (2)$$

ここで、水文現象において、洪水流量などの水流量 X は連続的であるから、 $X = Q$ となる確率は非常に小さく無視すると、 $P(X \geq Q) + P(X \leq Q) = 1$ となる。非超過確率 $P(X \leq Q)$ は各々の年において、次の様に表わされる。

$$P(X \leq Q) = 1 - \frac{1}{T} \quad (3)$$

水流量 X の発生は各年において独立であるから、 N 年間全く計画水流量を超過しない確率は

$$P^v(X \leq Q) = \left(1 - \frac{1}{T}\right)^N \quad (4)$$

したがって、(1)、(3)および(4)式より N 年間に計画水流量を超過する確率 $P(X > Q)$ は

$$1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^N \quad (5)$$

(2) 耐用安全値の概念

計画降雨量や計画高水流量など計画水流量を決める場合には、建造物の耐用年限内にこれ以上の値が現われないような水流量を基準として採用することが望ましいわけである。いま、耐用年限 a 年間に、それ以下の水流量しか現われない確率が P % であるような場合には、耐用年限 a 年で安全率が P % の耐用安全値と定義した文献もあるが³⁾、ここでも同じく耐用年限 N 年間に計画水流量 Q を超過しない確率が P % とすると、耐用年限 N 年、すなわち寿命 N 年で安全率が P % の耐用安全値

であると解釈しよう。

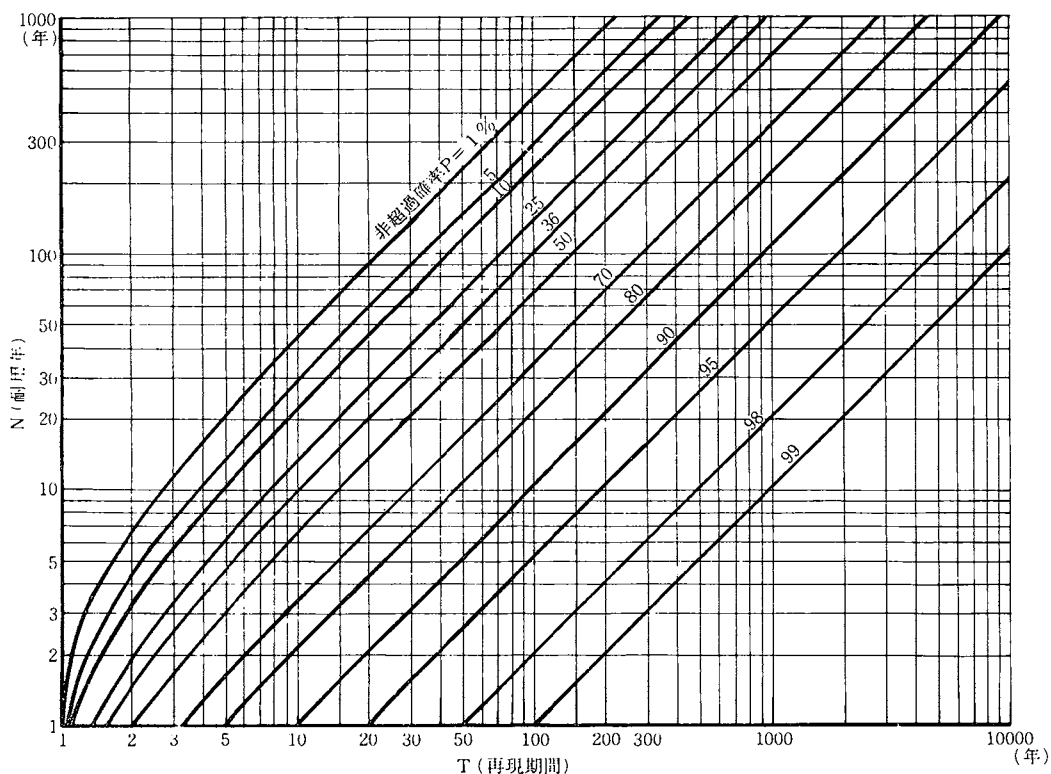
いま、年最大洪水流量などのような年最大水流量 q の分布関数を $f(q)$ とすると、年最大水流量は年ごとに独立であるから、ある任意の年の q が計画水流量 Q を超過しない確率は $f(Q)$ となる。 Q が耐用年限 N 年で安全率 P %の耐用安全値とすれば、 $P/100$ は水流量 q が N 年間計画水流量 Q を超過しない確率である。よって次の通りの関係式が成立するであろう。

$$\frac{P}{100} = \{f(Q)\}^N \quad (6)$$

この式の $f(Q)$ は(3)式と全く同じものであるから、

$$f(Q) = 1 - \frac{1}{T} \quad (7)$$

(7)式を(6)式に代入して対数をとれば



第 1 図 $T \sim N \sim P$ 関係図

$$\log P - 2 = N \log \left(1 - \frac{1}{T} \right) \quad (8)$$

この(8)式の関係を両対数紙上に図化したものが第1図である。この図から再現期間 $T=100$ 年に相当する縦線と、耐用年 $N=100$ 年に相当する横線での安全率を斜線から読みとると、37%となる。これは100年確率の水流量を計画水流量とした場合、100年間に1度も計画水流量を超過しない確率は37%であるということの意味している。耐用年限10年で安全率を90%とするならば、計画水流量を再現期間100年の確率水流量としなければならないことが第1図より読みとれるわけである。

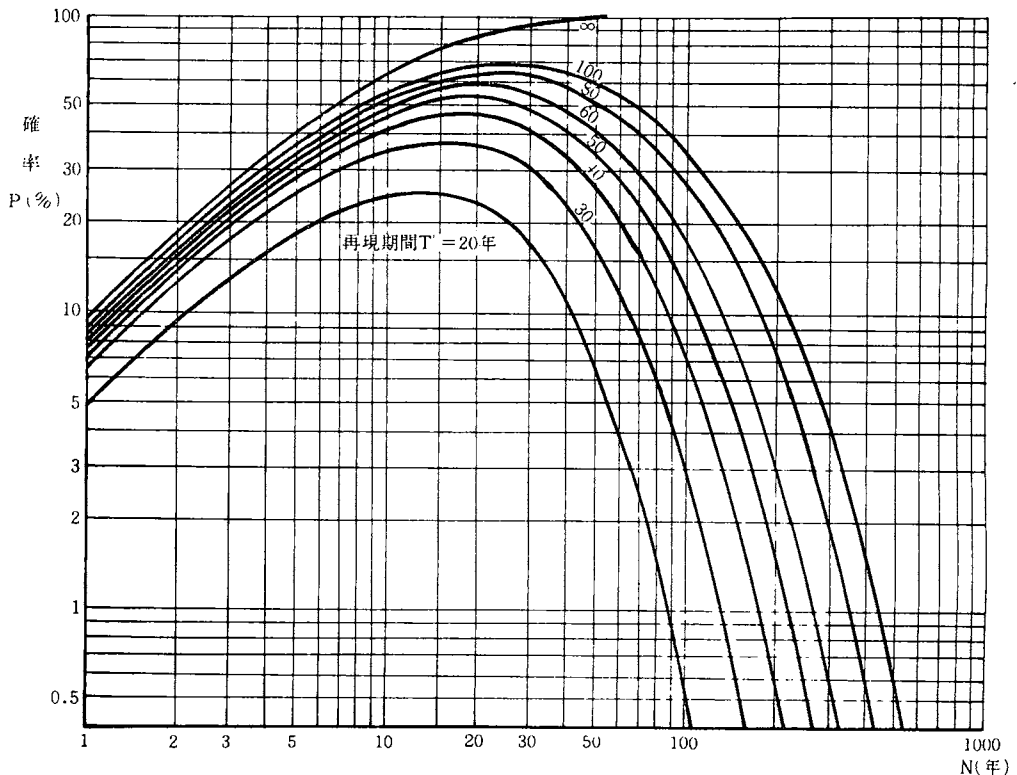
3. N 年間に T 年水文量を超過し、 T' 年水文量を超過しない確率

われわれは単に、計画高水流量などの計画水文量を超過すると一口にいても、その超過の大きさには色々な違いがあり、そして、その違いが問題になるのであるが計画水文量の決定に際し、いかなる確率水文量を用いるのが適当であるのか。そして計画に用いる確率水文量の違いによる安全率はどうに変化するのであろうか。ここでは計画水文量と実際の水文量の差の大きさを求めるのに、次の様な考え方をした。すなわち、水工計画においては各河川により計画高水流量などは違っており、その規模は千差万別であるので、単なる洪水流量と計画高水流量など水文量の差では一般的にいろいろな河川の比較ができない。そこで一般的にするためには、確率洪水流量のような確率水文量を用いなければならないのであるが、以下わかり易くするために、水文量を河川の洪水流量として具体的に考察してみよう。いま各河川の確率洪水流量は決まっているものとみなし、計画高水流量を T 年洪水とすると、 T' 年洪水との差はその河川の T' 年洪水に相当する洪水流量と T 年洪水の計画高水流量の差となり、具体的な流量として表わすことができる。したがって、ここでは計画高水流量と洪水流量との差の大きさを表わすのに、洪水流量を相当する T' 年洪水の T' 年に変換して論ずることにしたい。

T' 年洪水と T 年洪水の間の大きさの洪水が N 年間に起きるであろう確率 P は、次式で求めることができる。

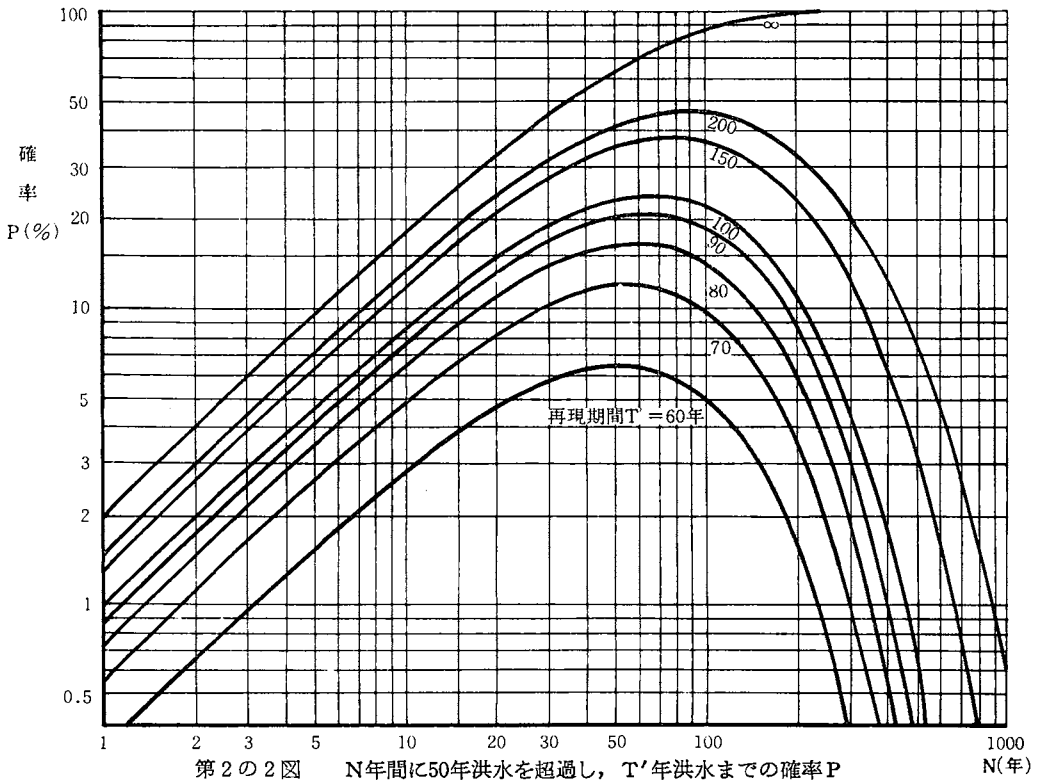
$$P = \left(1 - \frac{1}{T'}\right)^N - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^N \quad (9)$$

ここで、 T 年洪水を計画高水流量とすれば、 P は計画高水流量を超過し、 T' 年洪水に相当する大き

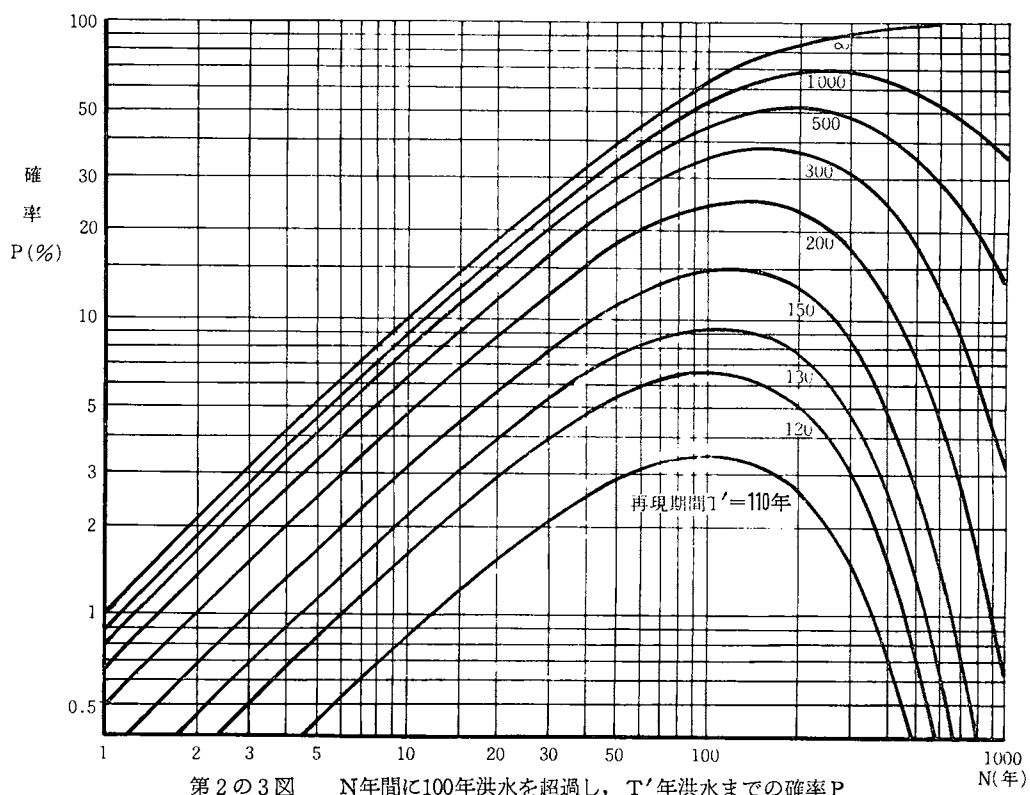


第2の1図 N 年間に10年洪水を超過し、 T' 年洪水までの確率 P

きの洪水までの洪水が N 年間に起きるであろう確率となる。第2の1図、第2の2図および第2の3図はそれぞれ $T=10, 50, 100$ 年洪水とし、(9)式を両対数紙上に図化したものである。例えば、計画高水流量として再現期間100年の確率洪水を用いた場合、超過する T' 年洪水の発生確率を求めるものであるが、この第2の3図についての読み方、そして意味について述べると、 $T'=130$ の曲線は100年洪水を超過し、130年洪水までの間に入る大きさの洪水が発生する確率を示すものである。例えば10年間に100年洪水を超過し、130年洪水を超過しない確率を求めるには、横軸が10の所と $T'=130$ の曲線の交点を縦軸で読みとると、2.1%となる。この2.1%が100年洪水を超過し、130年洪水を超過しない確率である。同様にして読んでゆくと10年間に100年洪水を超過し、200年洪水を超過しない確率は4.7%となっていることから、 $4.7 - 2.1 = 2.6\%$ の安全率が増加していることになる。他の曲線の読み方も同様であるが、 $T'=\infty$ の曲線は N 年間に100年洪水を超過し、 ∞ 年洪水を超過しない確率、すなわち、 N 年間に100年洪水を超過する確率を示している。例えば、10年間に100年洪水を超過しない確率は、第1図より90%と読むことができるので、超過する確率は10%となる。この値を第2の3図で読みとるには、横軸が10で $T'=\infty$ の曲線の交点を縦軸で読むと10%となる。第2の1図、第2の2図および第2の3図の読み方は以上の通りであるが、次に読みとった値の意味について考えてみると、10年間に100年洪水を超過し130年洪水を超過しない確率を2.1%と読んだが、このことは計画高水流量として100年洪水を用いる代わりに130年洪水を用いたとすれば、10年間に超過しない確率が2.1%増すことになる。そして10年間に100年洪水を超過する確率の9.6%から2.1%を減じた7.5%が130年洪水で計画したものが10年間で超過する確率となる。この7.5%を第2の3図において求めるには、横軸が10で $T'=130$ と $T'=\infty$ の交点の間の値を読みとればよい。また、100年洪水の代わりに200年洪水を用いたとすれば、10年間、100年間でそれぞれ超過する確率が4.7%、24.0%となって

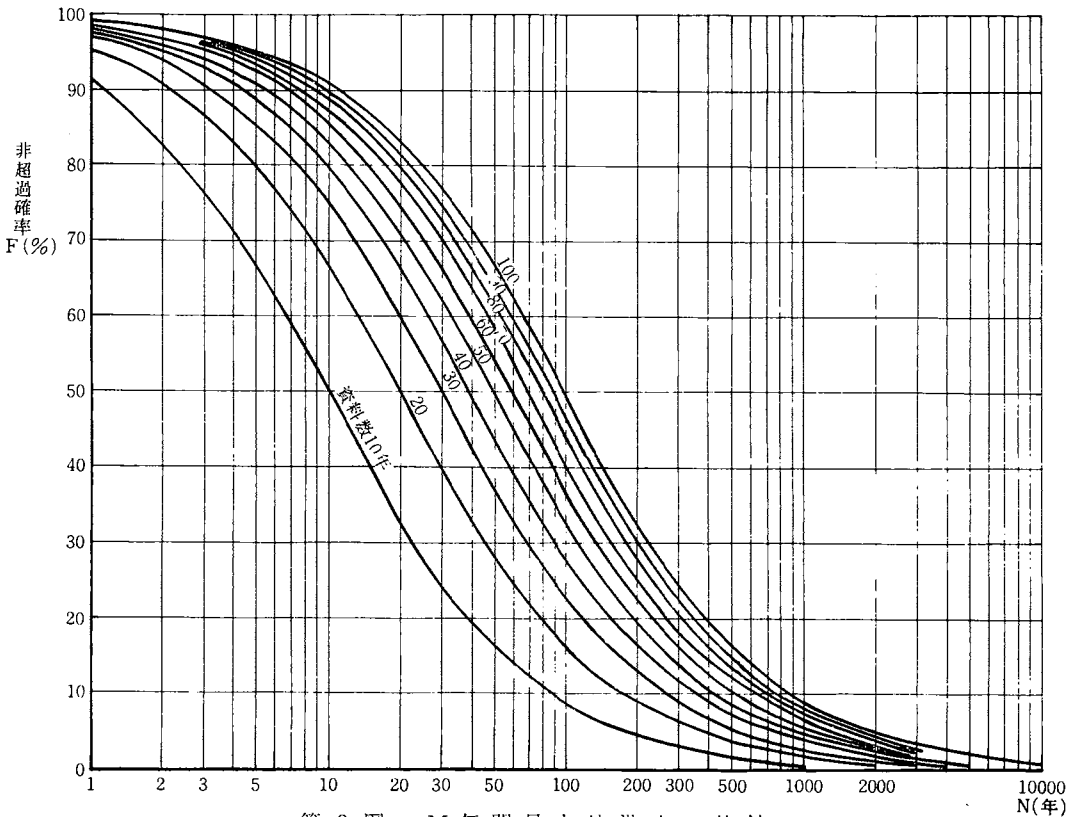


いる。このとき、 $T'=\infty$ の曲線より100年洪水を超過する確率が10年間,100年間ではそれぞれ9.6%,63.4%であるから,200年洪水と100年洪水を比較すれば,例えば100年間では200年洪水の方が大体4割ほど($63.4-24.0=39.4\% \Rightarrow 40\%$)超過する確率が少なく,したがって,それだけ安全率が増加していることになるわけである。しかし,この値を $T'=200$ 年を過ぎるとその安全率増加の割合はだんだん減少してゆくことを第2の3図は示している。以上のことより安全性を増すためには計画高水流量として,確率洪水をある程度以上増さなければ,その効果が薄いことを理解できるものと思われる。



4. M 年間最大値水流量の特性

水工計画,とくに河川の計画高水流量などを決めるに際して,以前は観測資料中の最大値をそのまま用いていたのであるが,最大値は何か一つの重要な基準値となることは明らかである。しかし,この既往最大値は非常に重要な因子であるにもかかわらず十分な説明がなされていなかったので,われわれは既往最大値のもっている特性について,観測資料 M 年間の最大値を計画高水流量などのような計画水流量として採用した場合,計画水流量を超過せずに安全であるのはどれ位であるのか。この安全である年数を寿命であると解釈して研究考察した⁴⁾。いま,これらの研究成果に基づいて,ある観測期間の最大値を計画水流量とした場合, N 年間は安全である非超過確率 F を資料数に変化させて片対数紙上に図化したものが第3図である。この第3図より50年間の最大値を計画水流量とした場合,50年に1度もこれを超過する洪水が発生せずに安全である確率を求めるのには,資料数50年の曲線と横軸が50の交点を縦軸で読みとると50%と読み,この50%が求める確率である。また同様に50年間の最大値を計画水流量とし,10年間は1度も洪水などの水流量が発生しないであろう確率は,資料数50



第3図 M年間最大値洪水の特性

年の曲線と横軸が10の交点を縦軸で読むと83%となる。ここで M 年間最大値水流量を計画水流量としたものと、 T 年水流量を計画水流量にしたものを比較してみると、 $M=5N$ において N 年間に計画水流量を超過しないであろう確率はそれぞれ第3図より83%、そして第1図より82%となり、 N 年間の安全率はほぼ等しくなっている。また $M=10N$ および $20N$ 、そして前述の $T=10N$ および $20N$ において、前者はそれぞれ91%、95%となり、後者は90%、95%となって N 年間の安全は、ほぼ等しくなっていることが第1図と第3図より理解できるであろうと思われる。

5. おわりに

水流量の統計的解析方法は、水工計画に有用な資料を提供するための一つの有力な手段であるが、統計による洪水流量などの水流量に関する研究は、洪水などを起こす多くの因子の結合が全くの自然現象で偶然の事象であり、それゆえに確率論で解析できるという仮定が基礎となっている。そして現在では、確率降雨や確率洪水など確率水流量の概念は広く普及し、水工計画の合理化に大きな役割を果たすに至っている。しかし実際問題として、われわれは降雨や洪水の発生と確率降雨や確率洪水などをいかに評価するか、それは水工計画、とくに治水計画における計画高水流量などを決定する際に、非常に難しいが極めて重要な問題であるといわなければならない。

本研究は、ある大きさの確率水流量、そしてまた、ある期間の最大値水流量を計画水流量とした場合の安全性について考察するとともに、計画水流量を変化させて採用した場合の安全性の変化に関して研究したものである。これらの研究成果は合理的な水工計画、とくに計画水流量などを決定する実

際の見地において貢献するところが大きいものと思われる。

最後に本研究は、文部省特定研究費による研究成果の一部であり、資料の整理や計算などに御協力願った当時学生の谷口利重（福井県庁）君に対し、深甚の謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) Chow, V. T. : Handbook of Applied Hydrology, McGraw-Hill, New York, 1964.
- 2) Yen, B. C. : Risks in Hydrologic Design of Engineering Projects, Proc. ASCE., Vol. 96, No. HY 4, 1970.
- 3) 川畑幸夫：水文気象学，応用気象学大系，第1巻，地人書館，1968.
- 4) 高瀬信忠，鈴木秀利：水文学発生確率論的特性に関する研究，土木学会論文報告集，第204号，1972.

（昭和48年5月17日受理）