

電 算 組 織 に よ る 洪 水 予 報

建設省東北地方建設局 正員 工博 井 田 至 春

〃 正員 木 谷 正

〃 正員 ○佐々木 賢一

1 はじめに

最近の主要河川には多目的ダム等洪水調節を主目的としたダムが多く築造され、下流の洪水被害軽減に役立っている。このような河川における洪水予報は、従来のような水位や雨量～流出の相関を利用した推定法によることはほとんど不可能である。

又最近の水理学水文学の発達により、洪水の流出、河道での洪水波伝播等について実現象にかなり合致した計算法が採られるようになった。ただ難点としてこれらの方法は、その計算に多くの時間を費やし、従来洪水予報の実務にかならずしも普及していなかった。

しかしながら近年エレクトロニクスの発達による電子計算機的能力増大、一般への普及により、前述の複雑且つ多量の時間を要する計算が極く実用化されてきた。

洪水予報という精度と迅速さが要求される業務において電算の利用は極めて有用であるばかりでなく、ダム群を有する水系においては洪水調節能力の増大という面でもその効果は大きい。

北上川ではこのような考えから電算組織利用による洪水予報、ダムコントロール等の水系管理を効果的に行なうべく、その技術を開発し一部はすでに実用化しつつある。そしていくつかの実務例からその有効性が認められたのでここにその概要を述べる。

2 北上川の概要

北上川は図-1に示すごとく岩手県北部に源を発し、奥羽、北上両山系をその流域に含んで宮城県内で海に注ぐ、流域面積は約10,250 Km²、幹川延長約244 Km、内岩手県内それぞれ7,860 Km²、195 Kmである。洪水予報基準点は、盛岡市明治橋～川崎村諏訪前間8ヶ所の延長114 Kmに達する。

北上川の流域特性は、

- 1) 降雨特性、流出特性が東西流域で異なるため洪水予報において単純な相関利用の手法は用いられない。
- 2) 一の関市下流宮城県に至る間に狹窄部があるため、その直上流は小出水でも氾濫現象を生ずる。
- 3) 改修計画の当初からダムによる洪水調節を前提としており(五大ダム計画…表-1)現在河川改修率が30%程度であるのに対し、ダムはすでに4つが完成している。このためダムによる洪水

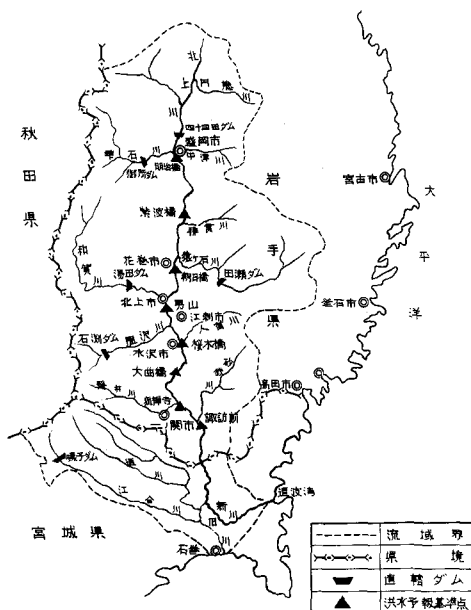


図-1 北上川流域図

調節に期待する面が大きい。

4) 大支川が諸所に合流し合流機構が複雑である。又これらの支川にダムがあるため、洪水調節効果の確認が難しい。しかも洪水予報基準点が相前後しているため予報技術の面からも複雑を持つ。特に一の関地区狭窄部上流の湛水は、現在の改修計画の基礎となっている、昭和22年9月のキャサリン台風による出水の際、上流からの流量 $9,000\text{ m}^3/\text{s}$ に対し狭窄部への流量 $6,300\text{ m}^3/\text{s}$ とされ、この差 $2,700\text{ m}^3/\text{s}$ がこの地区で自然調節されたもの推定される。

3 洪水予報と洪水調節……ハクブリットシステムの開発

洪水予報とは従来降雨資料等より河川の水位又は流量の変動を出来るだけ早く予知し、一般住民に知らせることが主目的であるとされてきた。これは今も変わらないが、前述の如き複数のダムを持つ河川では更に洪水調節効果を計画以上に大きくするための積極的情報提供者としての意味が重要となってくる。

本来洪水調節ダムは下流の河川改修との組合せで計画される。従って各ダムにおいては計画放流量以下の出水については調節の義務はないともいえる。しかしながら前述のように河川改修率の低い河川では、現実の問題として計画以上の洪水調節が期待される。更に計画以上の異常出水に対処することも洪水予報と組合せた洪水調節技術の大きな課題である。

	御所	四田	田瀬	湯田	石測
流域面積	635	1196	740	583	154
湛水面積	69	39	6.0	6.3	1.1
総容量	65000	47000	146500	114160	16150
有効容量	45000	35500	101800	93700	11960
洪水調節量	40000	33900	84500	77810	5600
制限水位	174.0	159.0	196.5	222.0	312.0
常時水位	180.0	170.0	215.0	236.5	318.0
洪水時水位	182.0	171.0	215.0	239.0	318.0
計画放流量	2450	1350	2700	2200	1200
計画放流量	1200	700	500	400	900
最大放流量	55	55	35	60	16
ダム高	—	50.0	81.5	89.5	53.0
ダム頂長	—	480	320	265	345

表-1 五大ダム諸元

洪水予報技術研究の一つとして筆者等は実績雨量のみの情報から後述のアナログ型電子計算機による洪水予報の有意性について検討を行なったが¹⁾ここでは洪水調節の最適解を求めることを目的とした場合の洪水予報の有意性について検討を加える。

洪水を沿川の被害と結びつけて考えたとき、その要素としてピーク流量の大きさ、洪水継続時間、水位の時間的変動等が考えられる。これらの要素を沿川の被害と定量的に関連づけることによって、洪水調節目標決定の条件が与えられる。一方洪水の予測を行なう場合、情報として与えられるものは降雨量であり、その後の手続きは一般の洪水解析計算と全く同様である。従って前述の如き洪水調節機能増大を含めた洪水予報の流水は図-2の如くなるのが解る。すなわち降雨量を入力データとして、与えられた河道条件のもとに流出計算及び河道追跡計算を行ない、一方沿川の被害軽減要素からは、洪水調節目標が求められ、両者を一致させる手続きとして洪水調節計算のダムサイト～目標地点間のくり返し計算と貯水池容量によるチェック等が全体の流れの中に含まれねばならない。

このような計算が実務上可能であるためには、洪水追跡計算を出来るだけ迅速に所要の精度でくり返し計算可能なこと及び、目標値設定とそのチェック機構が完成されねばならない。そのために電子計算機の利用が期待されるが、周知の如く電子計算機にはアナログ型とデジタル型とがあり、特にアナログ型は微分解析機としてすぐれた特長を持っている。

洪水追跡計算はいうまでもなく非線型微分方程式を解くことであり、これを出来るだけ迅速に、しかもくり返し計算を行なうには、アナログ型電子計算機を利用するのが有利と考えられる。

一方調節目標設定、結果の目標値のチェック、フィードバック、及び記憶されるべき条件の変更等

に対処するためには、デジタル要素が必要となる。

最近このようなアナログ型及びデジタル型両方の計算要素を組合せた新しい電算組織としてハイブリット型電子計算組織が利用されつつあるが、前述の如き計算の流れを処理するうえで最も適している電算組織と考えられる。すなわち流出計算及び洪水追跡計算をアナログ型電子計算要素により行ない、このための条件設定、調節目標の決定、チェック機能をデジタル型電子計算要素がコントロールするシステムを利用することとした。

これらのシステムが実務的に可能かどうかを確かめるために、洪水調節目標を本川基準点におけるピーク流量を最小にすることとした場合について計算を行なった。すなわち図-3の如きモデル水系を考え、ダムをA、Bとし、下流基準点を代表してX、Y2地点を考える。今ある洪水においてA、B両ダムの調節0、放流0の2ケースについて仮定の洪水追跡を行なうと、図-4が得られる。この図から直ちに判るように、A、B両ダムによる調節可能の最大は、点M_x、M_yである。従ってピーク流量の低減のみを考えた場合は両地点におけるハイドログラフを調節0の場合のハイドログラフとM_x、又はM_yを通る水平線とによって求められる形とするのが理想的といえる。しかしながらこれは、X、Y両地点間に支川Dが合流する場合には両立しない。

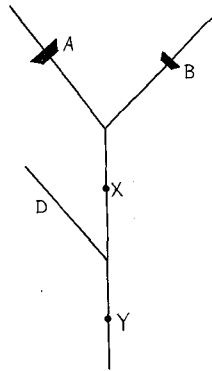


図-3 河道モデル

すなわち、ピーク流量低減のみを考えた場合でも、基準点が複数ある場合はO、R的的手法が必要である。そこで今最も簡単な例としてX地点のみを対象として考えると前述の如くM_xを通る水平線によって、A、B両ダムにより洪水調節されるべきハイドログラフが求められる。

以上図解法によりX地点における調節ハイドログラフは得られたので、これをA、B両ダムサイトへ配分し修正しなければならない。

このような操作の実務例として、昭和22年9月洪水を例に後述のアナログ型電子計算機を用いて計算実験を行なった。モデルとして、図-5の如く男山上流々域とし、田瀬・湯田両ダムの調節のみ

を考えた。その結果図-6に示す如き第1回の試算ではほぼ所要の結果が得られ、2回の試算で理想的ハイドログラフが得られた。このようにくり返し計算を数回迅速に行なうことにより、このような計算が可能であることが解る。しかしながら図-6において時間雨量と対比してみると、ピーク雨量時刻と洪水調節開始時刻との差すなわち余裕時間は-1時間となり、逐次データ入手により修正計算を重ねていくにしても計算作業時間はほとんど0としなければならない。

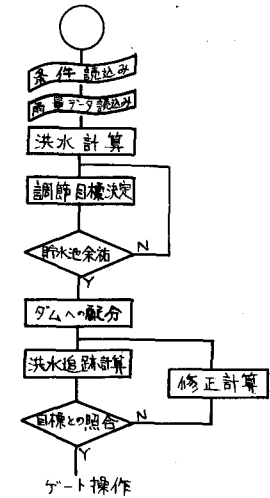


図-2 洪水調節フローチャート

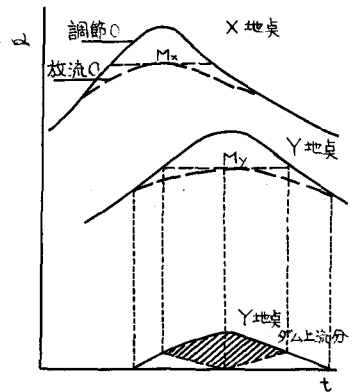


図-4 モデルハイドログラフ

これらの計算のうち、洪水計算部分を受け持つアナログ型洪水計算機についてその概要を述べる。

1) 北上型洪水計算機²⁾

洪水現象における水文の現象と水理的現象の両方を計算機によりシミュレートするもので、インプットデータは流域平均有効時間雨量をデジタル量として与える。

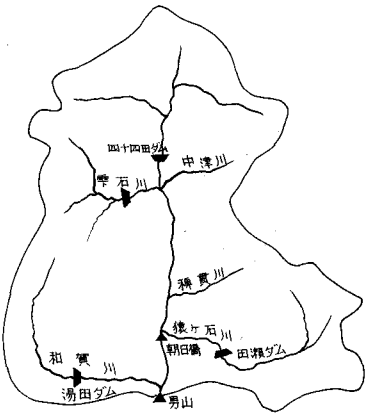


図 - 5 モデル流域図

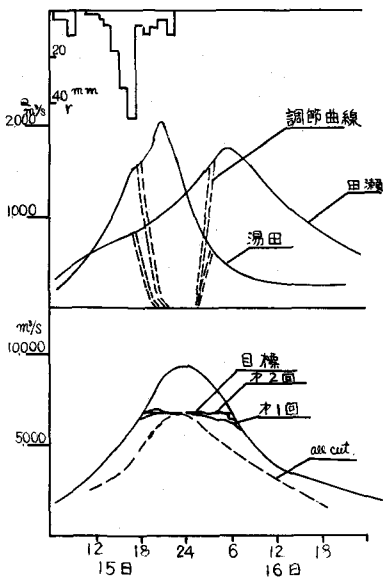


図 - 6 モデル流域計算例

河道を流下する運動の基本式は、

$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{v^2}{2g} \right) + \frac{v^2}{CR} = 0 \tag{1}$$

ここでH：水位、v：流速、R：径深、C：Chézyの平均流速係数、Q：流量、

g：重力加速度、x：河床沿いの長さ、t：時刻

また横流入を考慮した連続の式は

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = p \tag{2}$$

p：河道へ流れ込む横流入強度で水文現象との接続点となる（ $p = q/l$ ）

上式を連立に解く場合、実際の河道が不規則な断面であること等から河道を小区間に分割して数値計算することとなるが、計算機利用上その規模をなるべく小さくしたい。このような理由から(1)式のうち比較的影響の小さい第2、第3項を省略し（図-7）、更にManningの粗度係数で表現すると次式となる。

$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{n^2 Q^2}{R^{4/3} A} = 0 \tag{4} \quad \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = p \tag{5}$$

尚上式において河道は流水の通路として働くほか、流水の貯留効果にも影響を与えることから、A'を流下断面、Aを貯留効果を含めた断面として区別した。（図-8）

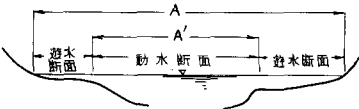


図 - 8 断面区分図

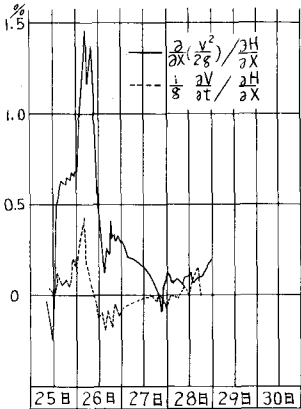


図 - 7 昭和80年6月洪水時例

4)5)式について数値積分するため、河道を図-9の如く Δx 区間に分割し、階差化すると、

$$tF_n \sqrt{\frac{tH_{n+1} - tH_{n-1}}{\Delta x_n + \Delta x_{n-1}}} = tQ_n \dots\dots\dots 4-1)$$

又は連続の式を Δx 方向に積分して

$$tA_n = {}_0A_n - \int_0^t \left(\frac{tQ_{n+1} - tQ_{n-1}}{\Delta x_n + \Delta x_{n-1}} - tP_n \right) dt \dots\dots\dots 4-2) \quad \left(\frac{\Delta V}{\Delta t} \right)_{n-1} = (tQ_{n-1} - tQ_n) + tQ_{n-1} \dots\dots\dots 4-3)$$

ここでV：区間貯留量、q：区間横流入量、F： $(R^{\frac{3}{2}}A')/n = F(H)$

以上4-1)と4-2)又は4-3)式を連立に解くことにより、横流入を含んだ洪水追跡計算ができ、各区間分割点すなわち洪水予報基準点毎の $Q-t$ 、 $H-t$ が同時に求められる。ここで与えるべき境界条件は、1) 上流端条件として最上流端の $Q-t$ 又は $H-t$ を与えるか、流出計算による $Q-t$ を与える。2) 横流入量は支川流出としてユニットグラフ法により求めた $q-t$ を連続の式に接続することにより与えられる。

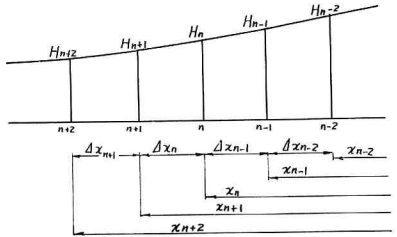


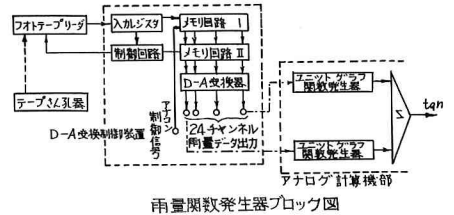
図-9 河道分割図

3) 下流端においては、4-1)式が適用出来ないため前方階差として $tF_{n+1} \sqrt{-(tH_{n+1} - tH_n / \Delta x_{n+1})} = tQ_{n-1}$ により計算することとし、これにより精度が劣るのを防ぐため下流端を一区間捨区間として設けた。

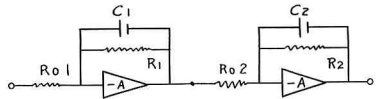
特に横流入量は流域と河道の接続点として重要な意味を持つことが判るが、これは図-10の如き雨量関数発生器とユニットグラフ発生器の組合せ、又はダム放流量を折線近似出来る任意関数発生器により接続されている。

更に河道条件として、区間貯留量、 $H-F$ 等が与えられねばならないが、これらは実際の河道において幾何学的に求めることが出来ないため、実際の洪水例より試算的に求めた。

このようにして出来上った北上型洪水計算機のブロック図を図-11に示し、全体の構成を写真-1に示す。



雨量関数発生器ブロック図



ユニットグラフ回路図

図-10 横流入機構説明図

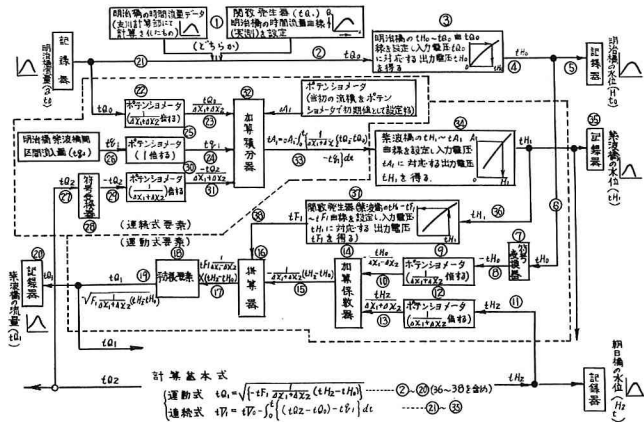


図-11 本川河道計算ブロック図

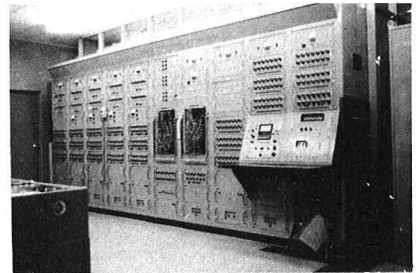


写真-1 北上型洪水計算機

その他本計算機開発に際して考慮した点は、1)H-F、H-Vを任意に設定することにより河道条件の変化に対応出来ること。2)洪水計算の際、情報として雨量が与えられるが、河道での任意点の水位、流量が与えられても計算出来ること。3)結果として各地点の水位、流量をペン書で同時記録し、読み取り精度は水位10 cm、流量50 m³/s以下とする。4)演算速度は実時間の3,600倍とする。

本計算機は、前述のハイブリットシステムの一部としてすでに実務上も効果を発揮しているが(図-12)更にテレメーターによる雨量データ収集の自動化、流域平均有効雨量の整理、等のためのデジタルコンピューター導入も昭和41年に実現した。(写真-2)現在は、テレメータ観測所の数がまだ充分揃っていないこと、欠測に対する処置等のため、テープアウトによるオフラインシステムとして利用しているが、上述の条件の改善に伴って順次オンラインシステムとし、デジタルコンピューターによる、アナログコンピューターのコントロール、すなわちハイブリットシステムの完成を目標に検討中である。



写真-2 デジタルコンピュータ

基準点	茶臼橋	朝日橋	男山	杉木橋	入曲橋	狐禅寺	御所
初水位	0 cm	25	20	40	30	55	40
果時	0 hr	2	(4)	2	2	3	3

水位の効果はピーク水位低減量。
 時間は警戒水位(指定水位)より上の継続時間短縮。
 ※四田、御所両ダム未完成のため茶臼橋より上流の効果は0

表-2 昭和41年6月洪水効果表

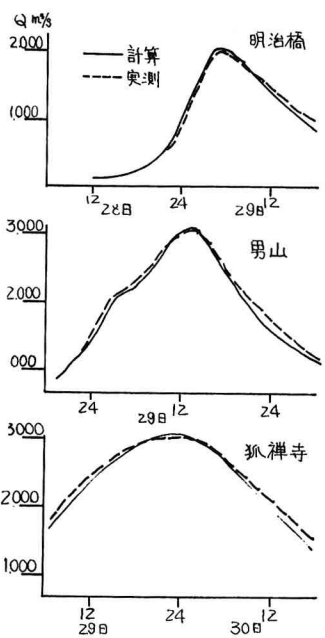


図-12 昭和41年6月洪水例

4 おわりに

上述のフローチャートを完成させるには、多くのサブプログラムが完成されねばならない。

例えば洪水調節目標設定をO、R的手法により行なう場合においても、単に土木工学的問題ばかりでなく、経済的社会的評価と水文量を結びつける条件式又は関数関係が解明されなければならない。これは最近注目されている情報時代における、M.I.S、P.P.B.S.等と全く同性質の手法であり、水系管理における適用例である。

参 考 文 献

- 例えば 技術研究発表会講演概要 土木学会東北支部(昭和37年3月)
井田至春、佐々木賢一 「洪水予報の有意性」
- 例えば 技術者のための最近の水工学 土木学会東北支部(昭和36年11月)
井田至春 「北上川の洪水解析について」