

貯留関数法の最近の進歩

The Recent Progresses in Storage Function Method

水管理工学研究所

正会員 木村 俊 晃

1. はじめに

昭和36年に公表した貯留関数法は残流域からの局所流入を無視することのできないわが国の河川に対する洪水流出追跡法としてコンピュータの進歩とともに発展し、その後10数年間、洪水調節概念の導入により洪水ハイドログラフとその変形を取り扱うことが必須の要件となった洪水処理計画のための流量解析手法として広く実用されてきた。

貯留関数法の特徴はつぎのとおりである。

(1) 系統構成

分水嶺に沿って細分された区分流域とそれに附属する区分河道によって水系が構成されるものとし、それらが距離に関する微分階差であるとする^{*}。したがって、コンピュータの進歩により計算コストが低下していけば、できるだけ細分化することによってモデルの精度の向上を計ることが貯留関数法における系統構成の前提である。

(2) 基礎方程式

河道追跡の基礎方程式としては、流入係数を考慮した連続式、運動方程式と流過断面形状の総合特性を表わす貯留関数およびハイドログラフの時差の調整要素である遅滞時間を用い、簡単な手法で洪水の非線型性を表現する。

(3) 流域モデル

微小流域の線型集合で表わされるものとし、微小流域ごとの流量追跡の基礎式としては、流入量として有効雨量を用いることによって河道の場合と同様の式が成立するものとする。すなわち、追跡の基礎式は雨量(r)、単位面積当り流出量(q)および単位面積当り貯留高(θ)に関して記述される。

つぎに、降雨損失の機構としては流出地域と浸透地域の面積率を表わすものとして一次流出率(f_1)を定義し、さらに、浸透地域では飽和現象があるものとして飽和雨量(R_{sat})を定義した。

なお、流出成分については、表面流出への非線型性の導入によって積極的に中間流出の存在を否定し、表面流出と地下流出の2成分からなるものとした。

これらの特徴をもつ貯留関数法のモデルはその後0.5 km²から数100 km²に及ぶ多数の河川流域への適用を通じてその適合性が実証されてきたが、もともと洪水調節施設の規模決定を主目的としたものであったため、近時、

- (i) 都市河川のように将来の流域の変化を取り扱う必要がある場合
- (ii) 洪水予報やダム管理のように中小洪水をも取り扱う必要がある場合
- (iii) 低水流出モデルとの関連が問題となる場合

など、精度の向上と総合化の促進が要望されている。

2. 貯留関数法の改良点

* この結果残流域の流出が系統構成上河道の上流端から流入することになるが、明らかに下流端附近から流入する支川の残流域からの分離やさらに本質的には河道の細区分によって精度を向上できる。

** 流入量をすべて観測することができないことを考慮したものであり、流域モデルの一次流出率とは概念を異にする。

2.1 流域モデル

洪水流出および低水流出の両者に対して図-1のモデルを適用する。ただし、洪水流出については計算コストが十分低下するまで当分の間は表面流出に関する流域の3分化のみを考慮する。したがって、従来と異っているのは不透透流出率(f_0)による不透透地域の設定と流出地域についても飽和雨量($R_{sa,1}$)を考慮したことである。

たとえば、ダムの子備放流のリスク解消のための流域貯留量の推定の場合には流出地域での降雨損失を考慮する方が安全側であり、洪水予報におけるハイドログラフの推算精度の向上も期待できる。

図-2は山口²⁾が林相の良い白坂流域と裸地に近い数成流域について降雨量と直接流出(表面流出)の関係を求めたものであるが、林相の相異にともなう流出量の相異とともに、50mmおよび150mm程度の2点で流出率の変化が認められ、 $R_{sa,1}$ と $R_{sa,2}$ の存在を示している。

図-1のモデルは一見定数が非常に多くてそれらの決定が困難であるように見えるが、実例によると地下流出や蒸発に関する定数は流域ごとの差がほとんどなく、実質的には洪水流出モデルが決ると低水流出モデルはほぼ推定できることが明らかになった。

2.2 流域粗度

流域における表面流出の水理学的特性は当初単純に想定したように乱流ではなく、層流が卓越していると推定される。

すなわち、貯留関数法の提案当時においても貯留関数の指数(p)が1/3に近い例が上流部のダム流

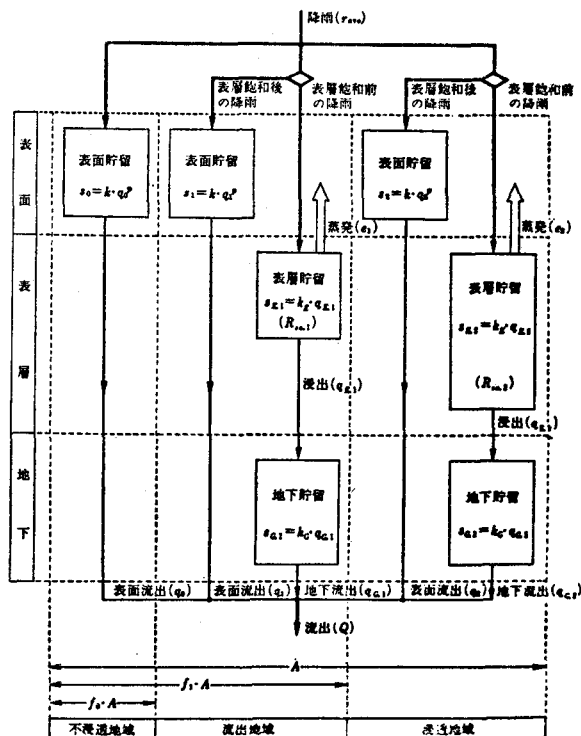


図-1 貯留関数法の流域モデル

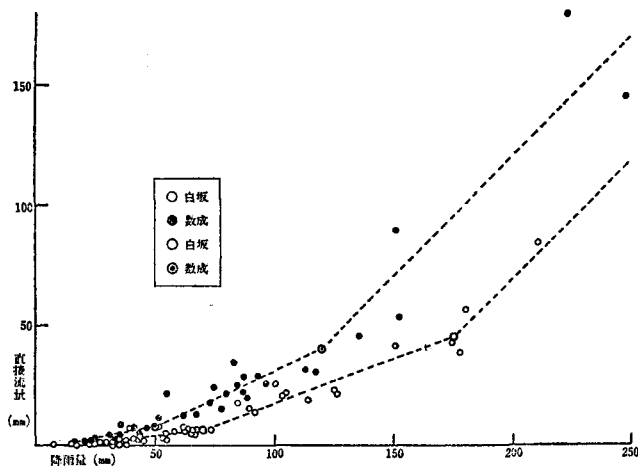


図-2 試験流域における降雨量と表面流出量の関係 (山口による)

域について認められたが、その後小流域についての解析例が増加するにつれて、この事実がほぼ確定的となった*。

したがって、表面流出を層流として $p = 1/3$ とするとともに、貯留関数の係数 k について次式を誘導した。

$$k = 4.34 C I^{-1/3} L^{1/3} \dots\dots\dots (1)$$

- k : 貯留関数の係数 (mm, hr 単位)
- 4.3.4 : 単位の換算係数
- C : 流域粗度 (Izzard 係数)
- I : 流域こう配 (下記流路の上下流端の高度差と延長の比)
- L : 流域延長 (流出地点からもっとも長い流路に沿って流域界までの距離 - km)

C. F. Izzard (1946)³⁾ が行なった実験結果と比較して流域粗度(C)の解析結果を示すと表-1のとおりであり、両者はよく整合している。

この結果から、簡単に、自然流出： $C = 0.12$ ，都市流出： $C = 0.012$ を提案しているが、都市流出のように、 $C = 0.012$ 程度に小さい粗度の場合には、一般的な時間分布パターンの降雨に対してピーク流出量は降雨強度にほとんど一致する。もともと都市化にともなう流出の変化は自然状態からの相対的变化が問題となるわけであるから、地形・地物による粗度の変化について上述のような評価手法以上に詳細に取り扱うことは工学的にあまり意味がないと判断される。

表-1 流域粗度(C)の解析結果

Izzard		木 村	
表 面 材 料	C	対 象 流 域 (地 被 状 態)	C
滑らかなアスファルト舗装	0.007	** 石 神 井 川 (一戸建市街地)	0.012
コンクリート舗装	0.012		
砂利・タール舗装	0.017		
短かく刈りこまれた芝生 密生した牧草地	0.046 0.060	島松演習場茂漁川(裸地)	0.033
		浜松演習場伊佐地川(畑地)	0.038
		然別演習場ベンケチン川(灌木林)	0.085
		利根川上流部ダム流域(山林)	0.120

* 著者の総合貯留関数 $s = 4.03 q^{0.5}$ によれば、 $q = 10 \text{ mm/hr}$ 、すなわち、比流量 $2.7 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ 程度の中洪水で流域の貯留高 $s \approx 100 \text{ mm}$ にも達することになるが、これが層流であることは単なる表面流としては理解しにくい。

青木⁴⁾が示したように、1m厚の砂層中に200~300mmの附着水が残り、これが一般の非火山岩質流域の飽和雨量とほぼ一致することは興味ある事実であり、表面流出は表土層中に浸透した水のうちの重力水が層流状態で流下するのではないとも考えられる。

** 人工流出成分に着目した。

2.3 降雨損失

降雨損失はたかだか1～1.5 mの表層土中で生じ、結局は蒸発となる。したがって、地下流出とは直接の関係はなく、基底流量から降雨損失を推定することはできない。

降雨損失は降雨開始前の表層土の乾燥状態によって洪水ごとに異なり、ゼロから最大飽和雨量の間でランダムに分布する。

図-3は洪水ごとの先行降雨指数(API)と飽和雨量(R_{sa})の関係の1例を示したものであり、ほぼ

$API + R_{sa} = \text{一定}$ (2)
の関係が認められる。すなわち、この一定値は最大飽和雨量($R_{sa,max}$)と考えられる。

従来最大飽和雨量($R_{sa,max}$)を求めるには洪水流出解析を行なう外に方法はなく、とくに浸透性が大きいかまたは降雨の少ない地域では飽和の認められる洪水が少なく、観測に長期間を要する欠点があった。

図-4は表層土厚および表層土中の粘土含有率と最大飽和雨量の関係を求めたものであり、これによって土質調査によって最大飽和雨量を推定し、飽和雨量の地域分布を詳細に取り扱うことが可能となった。

2.4 特異現象

地質が第四紀火山岩質の場合には非第四紀火山岩質の場合に比較して一次流出率が小さく、飽和雨量が大きいなどの特異性があることは従来からわかっていたが、流出成分についても特異成分がある場合があることが明らかになった。すなわち、表面流出および地下流出(120日遅れ)の2成分の外に遅れが10時間および10日程度の浸透流出成分がある例が認められている。このような河川流域では洪水の流出率がいちじるしく小さいのはもちろんであるが、地下流出の流出率も小さく、低水流量の涵養状態もよくない。

ダムの貯水池上流流域については単流域ではなく、 $K=10\sim20$ 、 $P=0.60$ 程度の河道を附加する必要があるようである。

融雪流出については、降雨の外に流入として融雪モデルを附加することになるが、研究中である。

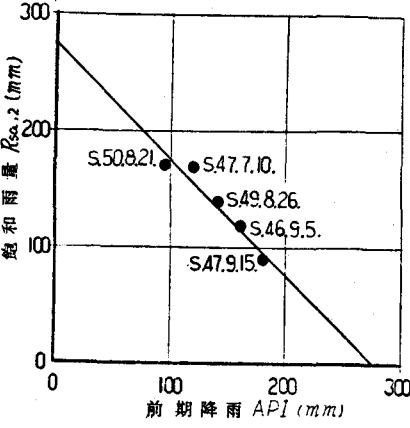


図-3 APIと飽和雨量の関係
(九頭竜ダム)

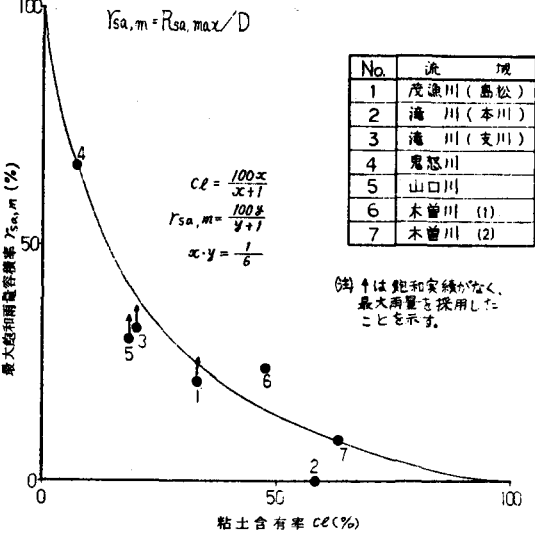


図-4 表層土厚(D)および粘土含有率(C_l)と最大飽和雨量($R_{sa,max}$)の関係

2.5 河道モデル

河道モデルについては、とくに、遅滞時間(T_L)が問題となっている。

すなわち、現状では背水効果の及ばない非常に長い河道を1つの貯留域として取り扱う場合が多いため、とくに、貯留効果に比して流下効果の大きいこう配の急な河道が連続する場合に、 ds_L/dO_L に対して T_L の値が相対的に大きくなり、 T_L を一定としたのでは、極端な場合、定流の貯留関数から洪水流の貯留関数を求める式

$$ds_L/dO_L = ds_S/dO_L - T_L \quad \dots \dots \dots (3)$$

において、 $ds_L/dO_L < 0$ となるケースすら現れている。

このことから生ずる流量の推定誤差は洪水計画に安全側ではあるが、このような極端な場合はそのままでの適用はもちろん、単に数値計算技術上の問題だけを解決するような便宜の方法は不適當である。

もともと(3)式は定流の貯留関数から洪水流の貯留関数を推定するために提案した近似式であり、同式中の T_L がハイドログラフの遅れ時間 T_L と同じでなければならないということはないから、青木が提案しているように、(3)式においては

$$T_L = aO_L^{b^*} \quad \dots \dots \dots (4)$$

として、 O_L の増加とともに T_L が小さくなる効果を導入し、ハイドログラフの遅滞時間 T_L としては、安全側の小さい値として、取り扱うべき O_L の最大値に対応する(4)式の値を採用する方法が考えられる。

また、流域の貯留関数を(1)式によって推定した場合、河道の貯留関数を本川筋のみについて不等流計算などによって推定したのでは、貯留量が30%程度不足するケースが認められている。これは支川筋の河道貯留量を見積っていないことが原因とも考えられるが、上記の T_L に関する近似誤差との関係も考えられるので、さらに検討が必要である。

3. 今後の課題

(1) 流域平均雨量の観測精度およびコンピュータの計算スピードの向上に見合ったモデルの精度の向上^{**}

(i) 流域・河道の細分化

(ii) $\Delta t = 1 \text{ hr}$ への統一を含む洪水・低水流出モデルの総合化

このためには、流量実測地点を増加することなしで、地域特性を有効に導入するために、地形・地質・土質・地被データによる定数推定法の開発が不可欠であり、つぎの諸点の解明が課題である。

(i) $R_{sa, \max}$ と地質の関係

(ii) f_1 と土質・地質・地被の関係

(iii) f_0 , $R_{sa, 1}$ の解析法

(2) 土壌水分計などの検知器による洪水ごとの R_{sa} 推定法の開発

降雨とともに主要な条件の1つである降雨損失の直接観測データは洪水予報や渇水予報のためにぜひとも必要であり、これは計画解析の精度の向上にも貢献する。

(3) 融雪モデル・河道水収支モデル・地下水モデルの開発

* 青木が示した例では $b = -0.153 \sim -0.412$ となっているが、 $b = P - 1$ が成立すれば取り扱い易い。

** コンピュータは進歩したが、計画解析へのシミュレーション手法の導入にともなう計算量の増大、洪水予報などのリアルタイム処理のための時間制約のため、現用程度の貯留関数法のモデルよりも10倍以上の計算量の増大を伴うモデルは当分実用の見込がなく、さらに、雨量観測網の精度は現用の貯留関数法モデルにとっても満足でないほど十分ではない。

すなわち、観測・解析システムのトータルな改良なしには計算法のみの高精度化は工学的には意味がないことに留意しなければならない。

(4) 特異現象モデルの一般化

(5) コンピュータプログラムのパッケージ化

底辺における技術水準の向上のために有効である。

参考文献

- 1) 木村 俊晃：「貯留関数による洪水流出追跡法」，建設省土木研究所，昭和36年8月
- 2) 山口伊佐夫：「森林と自然災害および水資源」，河川，No. 357，昭和51年4月
- 3) C. F. Izzard：「Hydraulics of Runoff from Developed Surfaces」，Proc. Highway Research Bd.，Vol. 26，PP. 129~150，1946.
- 4) 青木 佑久：「山地流域における洪水流出の追跡」，土木研究所報告，143号の2，昭和46年10月
- 5) 青木 佑久：「貯留関数法における遅滞時間 T_L の一推定法」，土木技術資料，18巻6号，昭和51年6月