

## 無降雨期間を含む出水への対応方法

### 1. 概説

タンクモデル（菅原，1972）のように，流域の雨水保留機能が内蔵されているモデルを除けば，洪水流出解析（イベント解析）に利用されている流出モデル，具体的に言えば，単位図法，貯留関数法，雨水流法などは，いずれも何らかの方法で有効降雨を求めた後，これを流出モデルに入力して，直接流出量を計算する．有効降雨の計算法には，一次流出率と飽和雨量による方法，雨水保留量曲線（累加雨量－累加保留量曲線）による方法，浸入能方程式による方法， $\phi$ インデックス法，カーブナンバー法など多くの選択肢があり，解析者の判断で選択される．

木村（1975）の貯留関数法では，一次流出率を用いてサブ流域を流出域と浸透域に分け，流出域では全降雨が有効降雨となり，浸透域では累加雨量が飽和雨量に達した後，それ以降の全降雨が有効降雨となるという独特な方法が常用されている．しかしながら，サブ流域を二分せずに一括モデルとし，あらかじめ求めた有効降雨を入力するような適用法（角屋・永井，1980）ならば，有効降雨の計算法を前述の複数方法から選択することが可能である．実際，永井ら（1978，1981，1982），杉山ら（1988a，1988b）は，雨水保留量曲線による方法を常用している．

さて，有効雨量の計算において，一降雨期間内に無降雨期間ないし微降雨の時間が連続して含まれるときには，それに対する配慮が望まれる（角屋，1979）．無降雨期間が続くと，その間に浸入能や保留能の回復が生じるからである．これは貯留関数法に限ったことではなく，有効降雨を入力として直接流出量を計算する流出モデルであれば，どのモデルにも共通した課題である．無降雨期間を含む場合のハイドログラフは，二山（あるいは三山）になることが多い．本稿では，このような無降雨期間を含む出水への対応方法について述べる．

流出解析法には，貯留関数法の適用を考える．ただし，木村（1975）の貯留関数法によれば，流出域と浸透域への分割と有効降雨の扱いが一体となっており，有効降雨の計算法に変更・修正の余地は少ないことから，ここでは貯留関数法を広義に捉えて，角屋らの適用法を前提とする．

### 2. 無降雨期間を含む出水における有効降雨の計算法

一降雨期間内に無降雨期間ないし微降雨期間が続き，ハイドログラフが複峰になる場合において，浸入能ないし保留能の回復を考慮できる有効降雨の計算法としては，以下の方法が考えられる．

#### (1) 飽和・不飽和浸透流解析による方法

地表面から雨水が浸入して，水分が土壌中を降下ないし側方移動する現象は，一次元ないし二次元の飽和・不飽和浸透流によって説明できる．飽和・不飽和浸透流の解析では，連続方程式とダルシー式から導出される偏微分方程式（リチャーズ式）を数値計算によって解くのが一般的である．これは，土壌中の水分移動現象を厳密に扱った方法で，土壌物理学や水文学の分野で多くの研究事例がある．これによれば，無降雨期間や微降雨期間における浸入能の回復を物理的に説明することができる．

この方法の適用に際しては，当該土壌における吸引圧と体積含水率の関係（土壌水分特性曲線），透水係数と体積含水率の関係（不飽和透水係数）を把握する必要がある．これらの土壌物理特性は空間的に大きく変動することに留意しなければならない．

なお，先に述べたリチャーズ式について，特別な条件下での解析解を求めたものが，降雨開始後の時

間と浸入能の関係を表した浸入能方程式であり、Horton 式や Philip 式がよく知られている。これらの式において、無降雨・微降雨期間における浸入能の回復を考慮した適用事例は多くはないが、前半の降雨と後半の降雨を別のイベントとして、それぞれに浸入能方程式を適用することは考えられる。

## (2) 連続時間解析モデルを活用する方法

洪水時の有効降雨は、降雨直前の乾湿状態に左右されるが、無降雨時や小降雨時を含めた連続時間解析を実施すれば、流域の乾湿状態を常時把握して、有効降雨の計算に活用できる。欧米では、連続時間解析モデルとして、米国気象局河川予測システム (NWSRFS) が採用している Sacramento Model や飽和域の消長が考慮された TOPMODEL が多用されている。我が国で適用事例が比較的多いのは、長短期流出両用モデル (永井・角屋, 1983; 角屋・永井, 1988) と HYCYMODEL (福嶋・鈴木, 1986) である。菅原 (1972) のタンクモデルも連続時間解析モデルとして適用可能であるが、洪水解析用のタンクモデル (直列 2 段ないし 3 段) と長期解析用のタンクモデル (直列 4 段) を目的に応じて使い分けるのが一般的である。これらは集中型モデルであるが、空間解像度が高い地形情報や気象情報が利用しやすくなった近年は、分布型の連続時間解析モデルも数多く開発されている。

長短期流出両用モデルは、洪水時の有効降雨を自動的に推定でき、かつ洪水と低水を同時に連続して解析できるという特徴があり、ダム管理のための実時間流出予測に利用されている (角屋・田中丸, 1995; 永井ら, 2003)。このモデルの構造は、直列 3 段タンクモデルに類似しているが、最上段タンクが上層と下層に分かれており、上層タンクから下層タンクへの浸入能は、下層タンクの空容量に比例するという仮定が設けられている。この仮定は、低水解析法の補給能モデル (角屋ら, 1967) と同一であり、上層タンクに十分な貯留量があれば、浸入能の時間的变化は Horton の浸入能方程式と一致する。

例えば、長短期流出両用モデルの第 1 段タンク下層の構造を抽出して有効降雨モデルとすれば、無降雨・微降雨期間が続くときの、深部への浸透や蒸発散による浸入能の回復を表現することができる。この方法の適用に際しては、有効降雨モデルのパラメータと、この有効降雨モデルをイベント解析用として運用する場合は、降雨直前の水分量 (貯留水深) を決定する必要があるが、これらは、総直接流出高の観測値と計算値が合致するように、あるいは、観測ハイドログラフと計算ハイドログラフが合致するように、試行錯誤ないしは最適化手法で決定する。

## (3) 雨水保留量曲線の改善法

一降雨の総雨量を  $R$ 、直接流出高を  $D$  とするとき、流域の保留量  $F$  は  $F = R - D$  で求められる。横軸を  $R$ 、縦軸を  $F$  としたグラフに、多数イベントのデータをプロットすると点群はかなりばらつくが、 $F$  が大きい側の包絡線を引くと、流域が乾燥しているときの保留量を表す保留量標準曲線が得られる。

特定の降雨イベントに対する事後解析では、原点から当該降雨のプロット点に至る標準曲線類似の曲線を引き、この曲線に基づいて有効雨量の時系列を計算すればよい。ただし、-1(a) に示すように、既知点は原点 0 と当該降雨のプロット点である c 点のみであって、その間の曲線の引き方にはあいまいさが残る。特に降雨期間内に無降雨時間帯を含むような複雑な降雨では、その曲線がスムーズな一本の曲線になるとは限らない。この問題点を改善する実用法として、角屋 (1980) は、洪水到達時間の概念を応用した以下の手法を推奨している。

まず、洪水到達時間の実用的定義は、-2 における  $t_p = t_2 - t_1$  と表され、洪水到達時間内の平均有効降雨強度 (mm/h) は  $r_E = 3.6Q_p / A$  と表される。ここに、 $Q_p$  はピーク流出量 ( $m^3/s$ )、 $A$  は流域面積 ( $km^2$ )

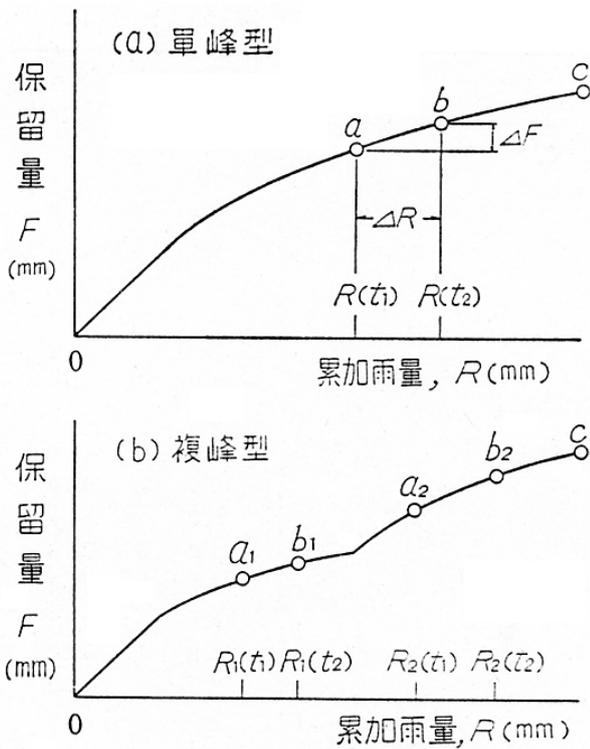


図-1 雨水保留量曲線の改善 (角屋, 1980)

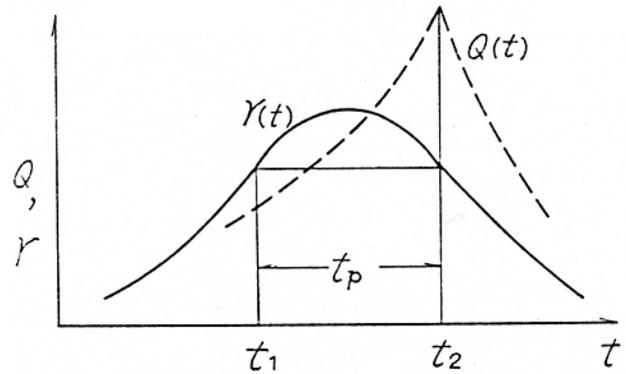


図-2 洪水到達時間の定義 (角屋, 1980)

である。図-2の時刻  $t_1$ ,  $t_2$ における累加雨量  $R(t_1)$ ,  $R(t_2)$ , ないしその差  $\Delta R = R(t_2) - R(t_1)$  は容易に計算できるから、この時刻間の保留量増分  $\Delta F$  あるいはその勾配  $\Delta F / \Delta R$  が次式で計算できる。

$$\Delta F = \Delta R - r_E t_p$$

$$\Delta F / \Delta R = 1 - f_p$$

ここに、 $f_p$  はピーク流出係数で  $f_p = r_E / r$  の関係を持つ。 $r$  は洪水到達時間内の平均降雨強度 (mm/h)。

したがって、対象降雨に対する保留量曲線は、原点 0 と c 点に加えて、上式を満足する点 a, b を通るように描けばよい。一降雨期間中に降雨休止時間帯が含まれていれば、ハイドログラフのピークは 2 個以上となって、点 a, b も 2 組以上存在することになり、図-1(b)に示すように、保留量曲線は 2 本以上の曲線の集合体になる。ただし、角屋は「この方法は洪水到達時間の概念を根底にしたものであるから、この概念に結びつかない小ピーク群まで対象にしてはならない」としている。

図-3 に愛知川流域 (山林) と下狩川流域 (竹林) の保留量曲線を、図-4 に天神川流域 (市街地) の保留量曲線を例示する (永井・角屋, 1981)。下狩川流域の 1971 年 9 月降雨、天神川流域の 1974 年 7 月降雨では、無降雨時間帯を考慮した保留量曲線が適用されている。図-5 は、下狩川流域の 1971 年 9 月降雨に対して、雨水流法 (表面流モデル) と貯留関数法による流出解析が実施された結果である (永井・角屋, 1981)。ハリエトグラフ、ハイドログラフともに三山となっているが、両モデルともにハイドログラフの再現性は大変良好である。この結果は、有効降雨の与え方に配慮すれば、無降雨・微降雨期間を含む出水に対しても、貯留関数法は十分適用可能であることを示している。

#### (4) 総雨量-直接流出高関係の改善法

雨水保留量曲線、すなわち累加雨量-累加保留量の関係は、総雨量-直接流出高関係と表裏の関係にあるから、角屋が推奨する改善法の考え方は、総雨量-直接流出高関係に対しても適用可能であろう。

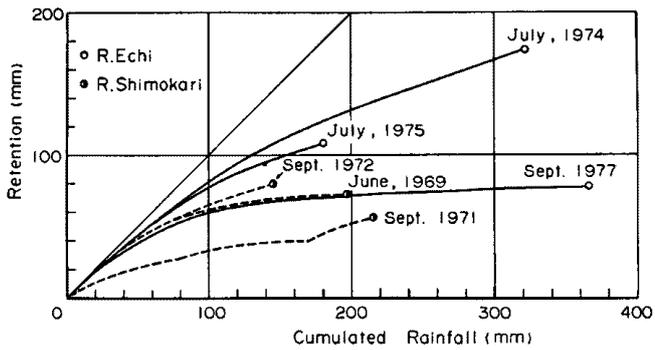


図-3 愛知川流域，下狩川流域の雨水保留量曲線  
(永井・角屋，1981)

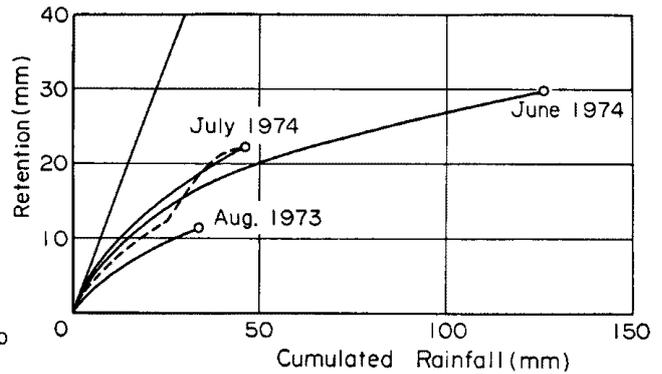


図-4 天神川流域の雨水保留量曲線  
(永井・角屋，1981)

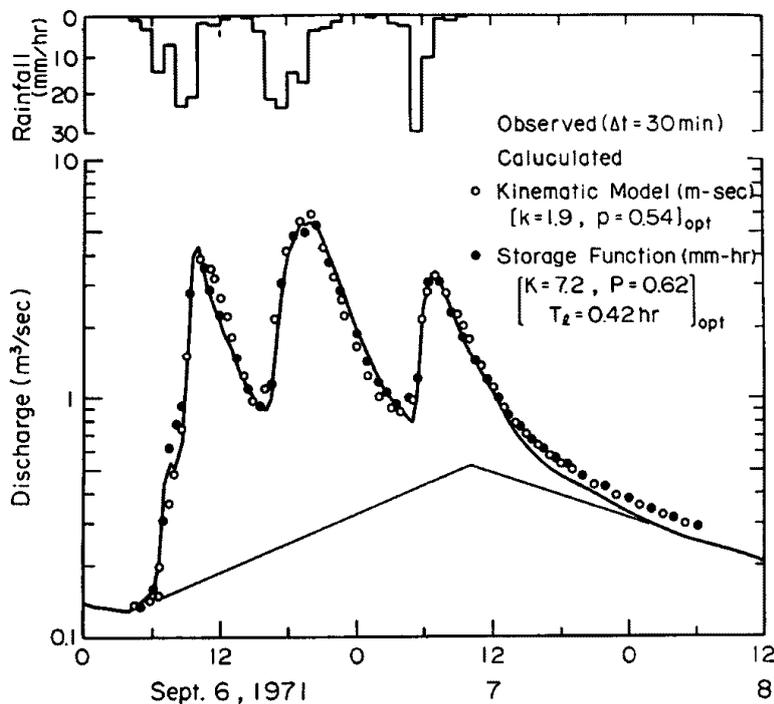


図-5 下狩川流域への雨水流法と貯留関数法の適用結果 (永井・角屋，1981)

総雨量－直接流出高関係を折線近似した「一次流出率と飽和雨量による方法」であれば，例えば，前半降雨に対する折線と後半降雨に対する折線を連結した階段状の折線群を適用すれば，無降雨・微降雨期間が続くことによる浸入能ないし保留能の回復を考慮することは一応可能である。

ただし，ハイドログラフやハイトグラフが複峰となる出水の全てにこうした配慮が必須という訳ではない。前述のような改善法が必要となるのは，「ハイトグラフ及びハイドログラフから見て，降雨前半と降雨後半を別のイベントとしては扱い難く，かつ，無降雨期間ないし微降雨期間の継続時間から見て，浸入能ないし保留能の回復が無視できないケース」だけに限定されるものと思われる。例えば，ハイトグラフが二山であっても，一山目と二山目の間に弱雨が継続していて，流域表層への雨水供給が止まっていないと判断される場合は，浸入能ないし保留能の回復は見込めない，あるいは小さいと考えられるので，一山洪水と同様の扱いが適当である。

### 3. まとめ

本稿では、一降雨期間内に無降雨期間ないし微降雨期間が連続し、浸入能ないし保留能の回復が見込まれる場合の有効降雨推定法として、現時点で考えられる方法を論じた。なお、既に述べた通り、無降雨・微降雨期間での浸入能ないし保留能の回復は、有効降雨を入力として直接流出量を計算する流出モデルであれば、どのモデルにも共通した課題であって、流出モデルの問題というよりは、有効降雨推定法の問題である点に注意されたい。さらに、対応方法についての議論では、流出域と浸透域への分割と有効降雨の扱いが一体となった木村オリジナルの貯留関数法（1975）に限定せず、貯留関数法を広義に捉えて、同法への入力となる有効降雨の推定法を論じている点にも注意されたい。

(流出解析レビューワーキンググループ 田中丸治哉)

### 引用文献

- 福嶋義宏・鈴木雅一（1986）：山地流域を対象とした水循環モデルの提示と桐生流域の10年連続日・時間記録への適用，京都大学農学部附属演習林報告，第57号，pp.162-185
- 角屋 睦・豊國永次・丈達俊夫（1967）：山地小流域河川の低水解析(2)，京都大学防災研究所年報，第10号B，pp.147-154
- 角屋 睦（1979）：流出解析手法（その1）－1. 雨水流出現象とその計測・解析－，農業土木学会誌，第47巻10号，pp.63-73
- 角屋 睦（1980）：流出解析手法（その8）－洪水到達時間と合理式－，農業土木学会誌，第48巻8号，pp.39-44
- 角屋 睦・永井明博（1980）：流出解析手法（その10）－4. 貯留法－貯留関数法による洪水流出解析－，農業土木学会誌，第48巻10号，pp.43-50
- 角屋 睦・永井明博（1988）：長短期流出両用モデルの開発改良研究，農業土木学会論文集，第136号，pp.31-38
- 角屋 睦・田中丸治哉（1995）：長短期流出両用モデルによる実時間洪水予測，農業土木学会論文集，第177号，pp.31-41
- 木村俊晃（1975）：貯留関数法，河鍋書店
- 永井明博・角屋 睦（1978）：洪水流出モデルの適用比較－丘陵山地流域及び市街地流域を対象として－，京都大学防災研究所年報，第21号B-2，pp.235-249
- 永井明博・角屋 睦（1981）：洪水流出モデルの最適定数，京都大学防災研究所年報，第24号B-2，pp.183-196
- 永井明博・角屋 睦・杉山博信・鈴木克英（1982）：貯留関数法の総合化，京都大学防災研究所年報，第25号B-2，pp.207-220
- 永井明博・角屋 睦（1983）：長短期両用貯留型流出モデルとその最適同定，京都大学防災研究所年報，第26号B-2，pp.261-272
- 永井明博・田中丸治哉・角屋 睦（2003）：ダム管理の水文学－河川流域の洪水予測を中心として－，森北出版
- 菅原正巳（1972）：流出解析法（水文学講座7），共立出版

杉山博信・角屋 睦 (1988a) : 貯留関数モデル定数に関する一考察, 農業土木学会論文集, 第 133 号, pp.11-18

杉山博信・角屋 睦・永井明博 (1988b) : 総合貯留関数モデルに関する研究, 農業土木学会論文集, 第 134 号, pp.69-75