

# タンクモデルを用いた流出解析

解析事業部 環境解析部

吉田稔彦

## 1. はじめに

急峻な地形に富んだわが国では河川の勾配が大きく、水の流れが速い。モンスーン気候に属していることもあって、毎年の梅雨時、台風時には大きな洪水被害をうけている。特に市街地化が進む都市部においてはアスファルト・コンクリートからなる不浸透域の面積が増えていることは河川流出を早める結果となっている。降雨 河川流出の関係を明らかにする流出解析は、1933年のHortonの降雨浸透に基づく流出の理論はじまった。現在ではコンピュータの発達に伴い、流出の基礎方程式を直接組み込んだ数値モデルが生み出されている。ここでとりあげるタンクモデルは簡易なモデルイメージでありながら、比較的再現性の高いモデルとして用いられている。今回は、1998年、1999年に起きた新湊川の浸水被害時の河川流量を対象として同モデルの検証を行った。

上段に降雨から蒸発散を差し引かれた量の水位が入力として設定される。最上段に設定された水位は時間とともに下段のタンクへと浸透するか、ある高さのところに設けられた側面孔から流出する。各段のタンクによる側面流出が成分流出（上段は表面流出、中段は中間流出、下段は地下水流出）となり、各段側面流出の合計がその時刻の河川流出となる。各タンク内の水位がその孔の高さに達するまではそのタンクからの側方流出は始まらず、降雨はその下のタンクへ降雨補給される仕組みとなっている。各側面孔や浸透孔の流出高からの $Q_i$ はそれぞれ $L_i \times h_i$ 、 $L_i \times h_i$ （図2）で表される。

図3に降雨強度の違いによる流出イメージを示す<sup>[4],[5]</sup>。

このモデルでは降水量に対して水位や流出量が非線形であり、また降雨の挙動から河川流出変

## 2. 解析モデルの概要

### 2.1 タンクモデル

タンクモデル<sup>[1],[2]</sup>は1972年に国立防災科学技術センターの菅原正巳氏により提案されたモデルで国内だけでなく、海外でも利用されている。現在、気象庁が行っている土砂災害予測での土壌雨量指数の考え方もこのモデルの応用である<sup>[3]</sup>。

図1に示す様に、直列に並べられたタンクの最

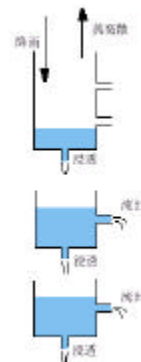


図1 タンクモデル概念図

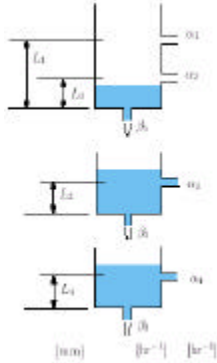


図2 タンクパラメータ対応図

化の遅れを表現できる。ただし、タンク段数などのモデル構造や、流出率、浸透率などのパラメータは、モデル応答値と観測値との比較・検証で思考錯誤的に設定する機会が多く、パラメータの物理的な意味づけに難しい部分がある。

## 2.2 蒸発散量の算定

蒸発散量は可能蒸発散量から次のように推定した<sup>[6]</sup>。月毎の日平均可能蒸発散量を式のThomthwait式を用いて算定し(Thornthwaite, 1948)、日照時間が0でないとき時刻以外は一

に該当日の日平均可能蒸発散量を適用した。

$$E_p = 0.533D_0 \left( \frac{10t_j}{J} \right)^a \quad (1)$$

$$a = 6.75 \times 10^{-7} J^3 - 7.71 \times 10^{-5} J + 1.792 \times 10^{-2} + 0.49239$$

$$J = \sum_{j=1}^{12} \left( \frac{t_j}{5} \right)^{1.514}$$

ここに、 $E_p$ :日平均可能蒸発散量(mm/day)、 $D_0$ :日照時間(12hr/day)、 $t_j$ :j月の平均気温( )である。

## 3. 解析事例

今回は1998年、1999年の2年間に神戸市新湊川の同じ地区で起こった浸水被害時を焦点に解析を行った。1998/9/22に近畿から北陸地方を縦断した台風7号による豪雨は同河川を氾濫させ、床上浸水500戸、床下浸水602戸の被害をもたらした。1999/6/29には梅雨前線の影響で西日本の広い範囲で激しい雨が降り、前年に続いて再び氾濫した<sup>[7]</sup>。

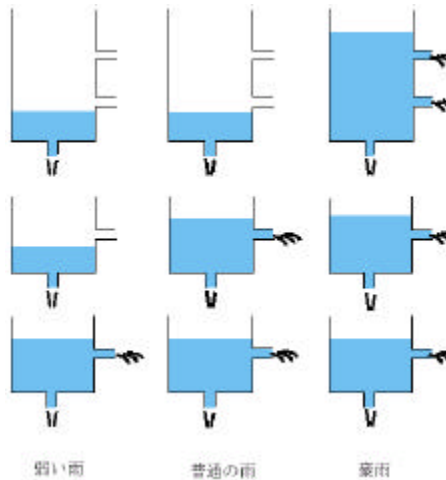


図3 降雨による流出の違い

本解析についての諸条件は以下の通りである。

対象地域	神戸市新湊川流域 (図4)
流域面積	2323.17 [ha] (図4)
	A流域 ... 429.91[ha]
	B流域 ... 846.62[ha]
	C流域 ... 1046.64[ha]
計算期間	1997/1 ~ 1999/8
再現期間	1998/9/22 , 1999/6/29
パラメータ	

新湊川は六甲山系に端を発し、神戸市兵庫区の市街地を流れる二級河川である。同河川は上流部で大きな集水域をかかえ、中流部でかなり急峻な地形を有しているため非常に流出応答が敏感な

表1 使用パラメータ

	A流域	B流域
L <sub>1</sub>	15.0	30.0
L <sub>2</sub>		
1		
2		
1		
L <sub>3</sub>		
3		
2		
L <sub>4</sub>		
4		
3		



図4 解析対象範囲

河川である。また、図 5 のように川幅が狭いことも流出を早めている。図 6 に今回の解析に利用した流域区分を示す。解析対象とする範囲は浸水被害のあった神戸市兵庫区新湊川の洗心橋付近を流末点とし、A、B、C の 3 つの流域を設定した。A 流域は大半が市街地を占め、中流部に勾配大きい傾斜地を含むため、タンク形状パラメータは流出応答の大きいものを設定した。B、C 流域についてはまとまった住宅地が存在するものの山林面積の方が上回っていると考え、タンク形状パラメータは A 流域よりは応答が小さいものとした。なお、今回の計算ではダム、貯水池等的人為的操作を考慮にいれなかった。

入力元となる気象データは気象庁の 1.時間値アメダスデータ(神戸)を用いた。また、今回再現に用いた実測値は 10 分刻み値であるが、アメダス値に合わせ、時間平均した。

### 3.1 シミュレーション結果と検証

1998/9/22 に起こった浸水被害時の河川流量をもちいてタンクパラメータの同定を行い、1999/6/29 の被災時に同じパラメータを適用した。

1998/09/22 の実測値流量と計算値流量の比較グラフを図 6 に、計算値流量の流出成分別グラフを図 7 に示す。

1998/9/22 9:00 頃から降り始めた雨は豪雨へと



図 5 洗心橋からみる新湊川-写真奥が上流

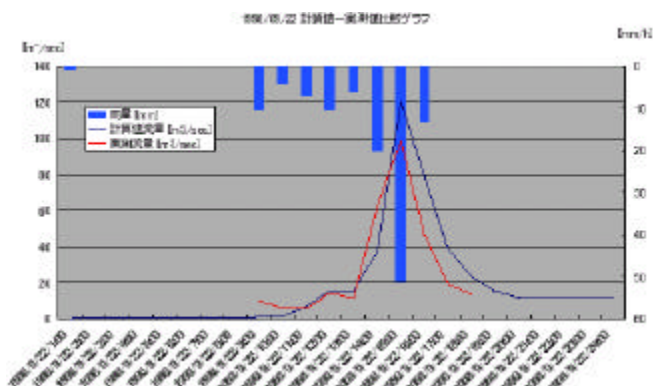


図 6 流量比較グラフ 1998/9/22

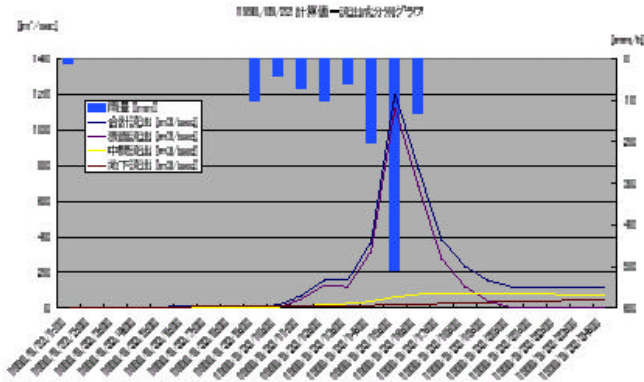


図 7 流出成分組成グラフ 1998/9/22

変わり 11:10 に大雨洪水暴風波浪高潮警報が発令された。14:10 頃に出水が始まったが、流量の実測値は 10 分値データで 130 ~ 140m³/sec を示しており、計算値もよく追隨した形のグラフとなっている。図 7 に示した流出組成をみると流出応答の早い表面流出が大きいことがわかる。

実測流量  $Q_a$  と計算値流量  $Q_s$  との間の定量的評価の指標として合致率<sup>[8]</sup>と相関係数を算出した。合致率  $E$  の算出法を (2) 式に、相関係数  $r$  の算出法を (3) 式示す。

$$E = 1 - \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Q_s - Q_a)^2}}{Q_{total}} \quad (2)$$

$Q_{total}$  実測負荷量の総合計

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (Q_s - \bar{Q}_s)(Q_a - \bar{Q}_a)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Q_s - \bar{Q}_s)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (Q_a - \bar{Q}_a)^2}} \quad (3)$$

合致率は計算流量と実測流量の収支合致をみる目安となる。(2) 式からわかるように各時刻で計算値と実測値の差が小さいほど 1 に近づく。相関係数については、実測値、計算値の両データをト

レンド合致の指標と考えた。1998/9/22 の計算値では合致率 0.819, 相関係数 0.911 と比較的高い値が得られた。ここで用いたタンクパラメータを用いて 1999/06/29 についても計算を行った。

1999/06/29 の実測流量と計算値流量の比較グラフを図 8 に、計算値流量の流出成分別グラフを図 9 に示す。

表 2 検証結果

	1998/9/22	1999/6/29
合致率 $E$	0.819	0.907
相関係数 $r$	0.911	0.933

1999/6/29 の計算でも、合致率 0.907 と比較的高い値が得られた。相関係数についても 0.933 と計算結果は実測値に追隨していると言える。合致率、相関係数の両指標の結果からみて今回の計算は再現がとれていると考える。図 9 に示した流出組成をみると流出応答の早い表面流出が合計流出の大半を占め、流出応答の同河川での流出挙動をよく表現していると考えられる。

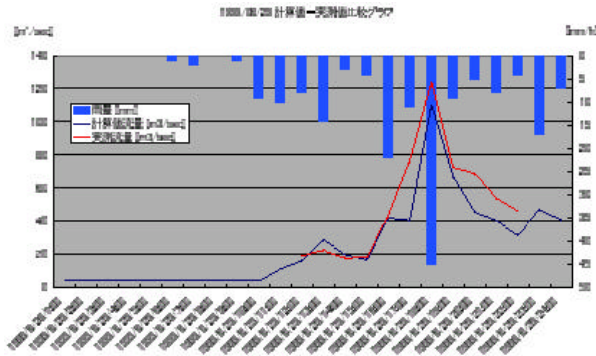


図8 流量比較グラフ 1999/6/29

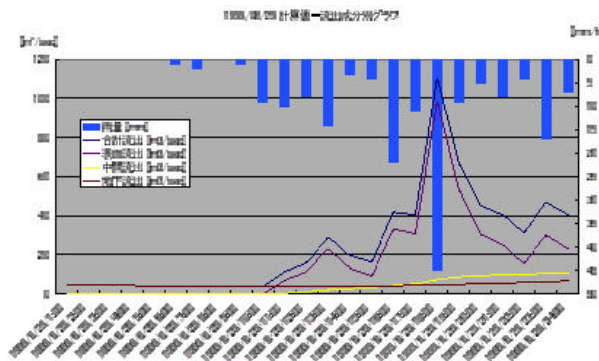


図9 流出成分組成グラフ 1999/6/29

#### 4. おわりに

今回の解析では 1998/9/22, 1999/6/29 の流量合致率が 0.819, 0.907, 相関係数が 0.911, 0.933 と短期間ではあるが、よい再現がとれたと言える。また、1 回のあたりの計算時間も数分ほどで実時間流出予測に耐えうるほどであった。

実際、対象流域にはダム 貯水池があり、下流部の市街地については下水道整備されているため雨水・下水管などの管路網を考慮する必要がある。今後、それらの GIS データベースに加えて地形等のメッシュデータを組み合わせた分布型流出モデル (今回の解析は集中型モデル) へ応用したときにも、充分に実予測 (再現性、即時性) に耐え

得ると考える。また、タンク水位から土砂災害、浸水被害への予測指標<sup>[10], [3]</sup>を得られるとすれば、流量予測だけでなく降雨による総合的な災害予測システムに利用可能なモデルであると考えられる。

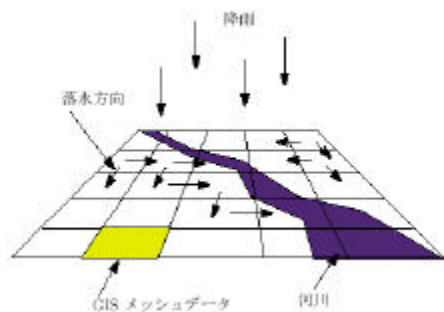


図10: GISデータベースへの応用イメージ  
個々のメッシュデータに土地利用、気象情報、インフラ情報を用意しそれぞれのメッシュで流出モデルを適用

参考文献

- [1] 菅原正巳著 『水文学講座流出解析法』(共立出版1972年)
- [2] 菅原正巳著 『水文学講座別巻続 流出解析法』(共立出版1979年)
- [3] 気象庁広報室編集 『土砂災害の軽減に向けた『土壌雨量指数』の開発』<http://www.kishou.go.jp/> 『気象庁キャンペーン資料12-9』
- [4] 土木学会編 『水理公式集平成11年版』(丸善1999年)
- [5] 日野幹雄・長谷部雅彦共著 『水文流出解析法』(森北出版1993年)
- [6] 杉尾 哲・衛藤美佳・今山 清・出口近士・A.SUHARGANTO 『宮崎市における地表面の被覆状況変化に伴う不圧地下水位の低下』日本地下水学会 『地下水学会誌第41巻第4号253～262 1999』
- [7] 『災害復旧工事の失敗に学ぶ兵庫県 新湊川の改修工事』日経BP社 『日経コンストラクション 2000.6.9 p52』
- [8] 國松孝男 村岡浩爾編著 『河川汚濁のモデル解析』(技報堂出版1989年)
- [9] 鈴木俊朗 寺川陽 松浦達郎 『実時間洪水予測のための分布型流出モデルの開発』土木技術研究所 『土木技術資料1996 38-10』
- [10] 阿部清明 塩月善晴 『山口県の都市浸水害発生予測に関する研究』土木学会 『土木学会論文集No.628/-48, 55-1999.8』