

2. 中小河川の洪水予測に適した降雨流出モデルに関する検討

A Study on Rain-Runoff models for Streamflow Prediction of Small River

技術支援課 高崎忠勝、杉原大介、岩屋隆夫

1. はじめに

中小河川では増水が極めて短時間に生じるため、河川溢水時の水防活動や親水整備箇所における避難指示の判断等において洪水予測を活用することが有用であり、こうした活動の支援を可能とする高精度の洪水予測の実用化が望まれている。また、平成13年度の水防法改正により洪水予報が都道府県管理河川でも実施されることとなり、中小河川における洪水予測は以前より重要になっている。

降雨と流出量の間を関係を表す降雨流出モデルは、降雨流出解析において、解析の目的や対象とする現象、流域の土地利用の違いにより様々なモデルが使用されている。しかし、モデルによって河川流量の推定精度、取り扱いの容易さ、計算時間等が大きく異なることから洪水予測の運用において降雨流出モデルの選択は大きな影響を及ぼす。

洪水予測に使用する降雨流出モデルに求められる特性は河川流量をより正確に計算できることに加え、短時間の河川増水に対して少しでもリードタイムを確保するために計算が瞬時に終わることや河川改修や流域の開発に伴う流出特性の変化等に対応するためにモデルパラメータを容易に修正できることが挙げられ、さらに河川によって使用するモデルが異なると取り扱いが煩雑となることから都内の全ての中小河川に適用できることが望ましい。

降雨流出モデルは大きく分けると集中型概念モデルと分布型物理モデルの2種類がある。分布型物理モデルは流域を小さく分割した各要素について物理計

算を行うことで流出現象を表現するモデルであり、近年、GISの整備が進んだことから多くの解析で用いられるようになっているが、計算量が多いため計算時間の制約が少ない解析、例えば、河川施設の評価や土地利用の変化に伴う流出特性の変化を明らかにしたい場合に適している。一方の集中型概念モデルは流域への入力である雨量と流域からの出力である河川流量の入出力の関係を直接に表すものであり、分布型物理モデルと比べて、計算時間が短く、観測流量に適合するパラメータの値を決定することが容易であり、モデル構築において必要となる情報が少ないことから洪水予測に適していると考えられる。

本報告では、合成合理式¹⁾、星らの貯留関数モデル²⁾、都市洪水貯留関数モデル³⁾の3種類の集中型概念モデルについて中小河川への適用性を検証する。合成合理式は時間をずらしながら合理式を用いて流出量を算出するもので、中小河川のハイドログラフの作成において多く用いられている。星らの貯留関数モデルは山地河川を対象としたモデルであり、北海道の河川において実時間予測手法であるカルマンフィルターを組み合わせた洪水予測計算が実用化されている。都市洪水貯留関数モデルは多くの大都市において普及している合流式下水道の雨水排出特性を組み込んだ貯留関数モデルである。

洪水予測は既に降った雨と今後降ると予測される雨を降雨流出モデルに入力することにより、今後の河川流量を計算するものであり、河川流量の予測精度は降雨流出モデルが有する再現精度の他に、既に

降った雨に対する観測精度や今後降る雨に対しての予測精度が大きく影響するが本報では降雨流出モデルに対する検討のみを行うこととする。

2. 降雨流出モデル

以下に本報が対象とする3種類の集中型概念モデルについて説明する。

(1) 合成合理式

合成合理式は直接流出高 q (mm/min)を洪水到達時間 T_c (min)によって表すと式(1)のように表され、決定すべきパラメータの値は f 、 T_c の2個である。

$$q = \frac{fr_t}{T_c} \quad (1)$$

ここに、 f : 流出係数、 r_t : 洪水到達時間 T_c 内の雨量(mm)

(2) 星らの貯留関数モデル

星らの二価関数の貯留関数モデルは、式(2)～式(4)で表され、決定すべきパラメータの値は k_1 、 k_2 、 ρ_1 、 ρ_2 、 α の5個である。

$$s = k_1 q^{\rho_1} + k_2 \frac{d}{dt} q^{\rho_2} \quad (2)$$

$$\frac{ds}{dt} = r_e - q \quad (3)$$

$$r_e = cr \quad (4)$$

ここに、 s : 貯留高(mm)、 q : 直接流出高(mm/min)、 t : 時間(min)、 r_e : 有効雨量(mm)、 k_1 、 k_2 、 ρ_1 、 ρ_2 : モデルパラメータ、 c : 流出率、 r : 観測雨量(mm)

(3) 都市洪水貯留関数モデル

都市洪水貯留関数モデルは式(5)～式(9)で表され、決定すべきパラメータの値は k_1 、 k_2 、 ρ_1 、 ρ_2 、 c 、 q_{sm} の7個である。

$$q = q_r + q_s \quad (5)$$

$$\begin{cases} q_s = \alpha q & (\alpha q < q_{sm}) \\ q_s = q_{sm} & (\alpha q > q_{sm}) \end{cases} \quad (6)$$

$$s = k_1 (q_r + q_s)^{\rho_1} + k_2 \frac{d}{dt} (q_r + q_s)^{\rho_2} \quad (7)$$

$$\frac{ds}{dt} = cr - q_r - q_s \quad (8)$$

$$r_e = cr \quad (9)$$

ここに、 q : 直接流出高(mm/min)、 q_r : 直接流出高のうち河川へ流出する成分(mm/min)、 q_s : 直接流出高のうち合流式下水道により流域外へ排出される成分(mm/min)、 s : 貯留高(mm)、 t : 時間(min)、 r_e : 有効雨量(mm)、 k_1 、 k_2 、 ρ_1 、 ρ_2 : モデルパラメータ、 α : 下水道排出係数、 q_{sm} : モデルパラメータ、 c : 流出率、 r : 観測雨量(mm)

なお、流域内で下水道整備が行われていない場合や分流式の下水道が整備されている場合には $q_s = 0$ となり、星らの貯留関数モデルと同じものになる。

3. 各モデルの中小河川への適用性

(1) 対象流域

図-1に対象とした神田川の上流域を示した。神田川は三鷹市の井の頭池に源を発し、善福寺川、妙正寺川という支川を合流し、日本橋川を分派して台東区柳橋で隅田川に流入する流域面積105km²、流路延長25kmの荒川水系の河川である。流域は2市13区が位置しており流域内の下水道は合流式下水道が整備されている。

解析対象は流域面積3.4km²の久我山橋水位観測所地点と流域面積7.7km²の向陽橋水位観測所地点の2地

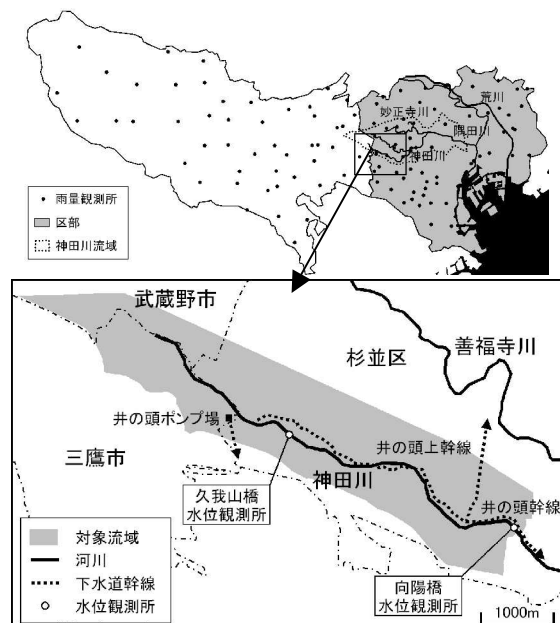


図-1 対象流域

点である。各水位観測所において流量観測を実施し水防災総合情報システム（以下、水防災システム）の水位データと観測流量の関係について式(10)と式(11)を求めた。

$$\text{向陽橋 } Q = 8.054 \times (H / 100 - 4.181) \quad (10)$$

$$\text{久我山橋 } Q = 5.833 \times (H / 100 - 3.964) \quad (11)$$

ここに、 Q ：観測流量(m^3/s)、 H ：水位データ(cm)

解析に用いた観測流量は水防災システムの水位データと式(10)と式(11)により算出した。モデルの適用性を判断するには適切な水位流量曲線によって算出された流量を用いる必要がある。式(10)と式(11)は流量観測時の流量を良好に再現するとともに計画流量に対応する水位が計画高水位と大きく異なることを確認している。流域平均雨量は対象流域周辺に位置する水防災システム雨量観測所のデータからティーセン法により求めた。

(2) 対象洪水

対象とした洪水イベントは、表 - 1 に示したように2003年から2005年の期間に発生した6イベントとした。6イベントの内訳は2イベントが台風であり4イベントが集中豪雨によるものとなっている。

表 - 1 対象洪水

イベント	年月日	摘要
No. 1	2003年6月24日～25日	集中豪雨
No. 2	2003年10月13日	集中豪雨
No. 3	2004年9月29日～30日	集中豪雨
No. 4	2004年10月8日～9日	台風22号
No. 5	2005年8月15日	集中豪雨
No. 6	2005年8月25日～26日	台風11号

(3) 計算条件

気象庁が発表する洪水ナウキャストが10分間隔で行われることを考慮し、河川流量の計算間隔は10分とした。解析期間は降雨開始時から降雨終了120分経過後までとした。なお、解析対象地点の観測ハイドログラフをみると降雨終了120分経過後の流量は降雨開始前の流量と大きくはかわらないものとなっている。直接流出量の算定は降雨直前の水位に対応する流量を基底流量と考え、解析期間の各時刻における流量からこれを差し引くことによって求めた。

(4) パラメータ値の決定手法

観測流量と計算流量の違いを評価する式(12)の誤差評価関数 E の値を最小とするモデルパラメータの値をSCE-UA法⁴⁾により決定した。

$$E = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{Q_{o_i} - Q_{c_i}}{Q_{op}} \right)^2 \quad \text{式(12)}$$

ここに、 Q_o ：観測流量、 Q_c ：計算流量、 Q_{op} ：ピーク流量、 N ：観測データ数

式(12)は、建設省河川砂防技術基準（案）同解説調査編⁵⁾に示されており、 E の値を0.03以下にするようにパラメータの値を決定することが推奨されている。SCE-UA法によるパラメータの探索範囲は表 - 2 のように設定した。

表 - 2 探索範囲

合成合理式						
f	T_c	-	-	-	-	-
0~1	10~120	-	-	-	-	-
星らの貯留関数モデル						
k_1	k_2	p_1	p_2	c	-	-
0~100	0~1000	0~1	0~1	0~1	-	-
都市洪水貯留関数モデル						
k_1	k_2	p_1	p_2	c	q_{sm}	
0~100	0~1000	0~1	0~1	0~1	0~0.1	0~1

(5) 各モデルのハイドログラフの再現性

1) 合成合理式

合成合理式についてイベント1～6の各イベントのデータを用いてSCE-UA法により1イベント毎に1組、計6組のパラメータの値を決定し（表 - 3）、決定したパラメータの値を用いて対象とした1イベントのハイドログラフを作成した。このようにして作成したイベント1～6のハイドログラフを図 - 2に示した。

表 - 3 パラメータの値（合成合理式）

	向陽橋		久我山橋	
	流出係数	到達時間(分)	流出係数	到達時間(分)
イベント1	0.432	70	0.449	50
イベント2	0.582	60	0.494	50
イベント3	0.242	60	0.285	60
イベント4	0.474	60	0.442	50
イベント5	0.389	60	0.569	50
イベント6	0.280	70	0.393	50

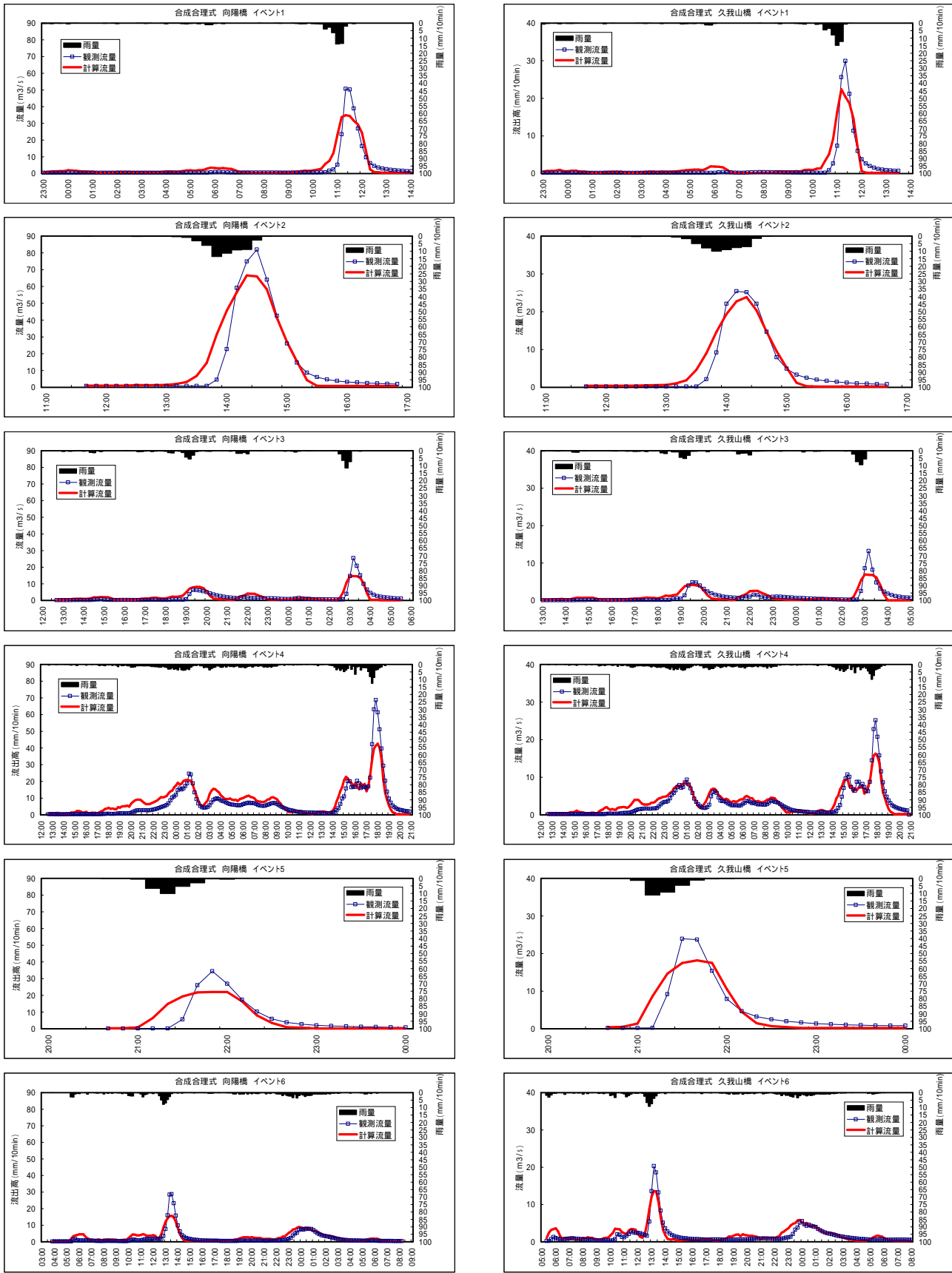


図 - 2 合成合理式によるハイドログラフ

表 - 3に示したパラメータの値によって対象イベントを計算した時の誤差評価関数 E の値は0.0037~0.0270であり、推奨されている0.03以下となっている。

図 - 2について2地点・6イベントの全ての計算ハイドログラフをみると、全てのハイドログラフに共通して、1)計算流量の増加が観測ハイドログラフの流量増加より早い時間に発生している、2)降雨が終了してから短時間で計算流量が降雨開始前と同じ流量まで減少している、3)計算ピーク流量が過小である、4)降雨期間中の計算流量はピーク以外については過大である、といった特徴が見られる。

計算流量の増加が観測ハイドログラフの流量増加より早い時間に発生している点については、実現象では降雨初期における河川流量の増加は非常に小さく観測ハイドログラフでは分からない程度であるが、合成合理式では降雨開始とともに流出量が雨量に比例して増加し、この時の流出量が大きなものとして算出されるため、観測ハイドログラフより早い時間に流量が増加しているように見える。

降雨が終了してから短時間で計算流量が降雨開始前と同じ流量まで減少している点については、実現象では降雨終了後の河川流量は降雨開始前よりは多い流量が長期間継続するが、合成合理式は降雨終了から洪水到達時間が経過すると流出量が0となる。

計算ピーク流量が過小である点や降雨期間中の計算流量はピーク以外については過大である点については、ハイドログラフ全体の再現を考慮して式(12)の誤差評価関数 E が最小となるパラメータの値を用いて流出計算を行っていることが原因である。合理式は本来ピーク流量を算出するものでありハイドログラフ全体の流量を算出するものではない。このためピーク流量に合わせてパラメータの値を決定した場合にはピーク付近の再現性は向上するもののピーク以外の流量がより過大なものとなり、ピーク以外の再現性を向上させる場合にはピーク流量がより過小となる。

以上の合成合理式の特徴は雨量と流出量を線形の関係として表しているために生じている。合成合理式は1イベントの観測ハイドログラフ全体を1組のパラメータの値によって良好に再現することができな

いため、合成合理式を用いて観測ハイドログラフ全体を良好に再現させるためには洪水期間中にパラメータの値を随時変化させることが必要である。洪水予測に合成合理式を使用して高精度の推定を行いたい場合、計算イベント期間を通じてパラメータの値を随時変化させる方法が問題となる。なお、観測ハイドログラフに対する再現性を向上させるにはパラメータ数が増加するものの小流域に細分化することが有用である。

2)星らの貯留関数モデル

星らの貯留関数モデルについて合成合理式と同様に各イベントのデータを用いてイベント毎にパラメータの値を決定し、この値を用いて対象イベントのハイドログラフを作成する(ケース1)。次に、6イベント全てのデータを用いてSCE-UA法により1組のパラメータの値を決定し、この値を用いて6イベントのハイドログラフを作成する(ケース2)。決定したパラメータの値を表 - 4に、イベント毎に作成した2つのハイドログラフを図 - 3に示した。

表 - 4に示したパラメータの値によって対象イベントを計算した時の誤差評価関数 E の値は0.0001~0.0018であり合成合理式における E の値と比べて大幅に小さくなっている。

図 - 3について1イベントのデータによるパラメータの値を用いたハイドログラフ(ケース1)をみると、図 - 2に示した合成合理式のハイドログラフと比べて

表 - 4 パラメータの値(星らの貯留関数モデル)

向陽橋	k_1	k_2	ρ_1	ρ_2	c
ケース1					
イベント1	12.9	30.3	0.275	0.211	0.481
イベント2	6.4	20.8	0.579	0.363	0.566
イベント3	7.6	14.0	0.240	0.232	0.293
イベント4	22.2	23.2	0.162	0.313	0.490
イベント5	4.6	16.5	0.514	0.202	0.424
イベント6	4.7	148.3	0.420	0.041	0.195
ケース2	6.1	13.8	0.449	0.457	0.433
久我山橋	k_1	k_2	ρ_1	ρ_2	c
ケース1					
イベント1	12.0	20.6	0.283	0.218	0.496
イベント2	4.6	15.0	0.667	0.276	0.490
イベント3	6.7	41.2	0.263	0.063	0.325
イベント4	16.7	16.5	0.163	0.298	0.457
イベント5	7.6	9.0	0.378	0.328	0.698
イベント6	10.8	56.6	0.200	0.082	0.401
ケース2	4.7	8.6	0.544	0.461	0.441

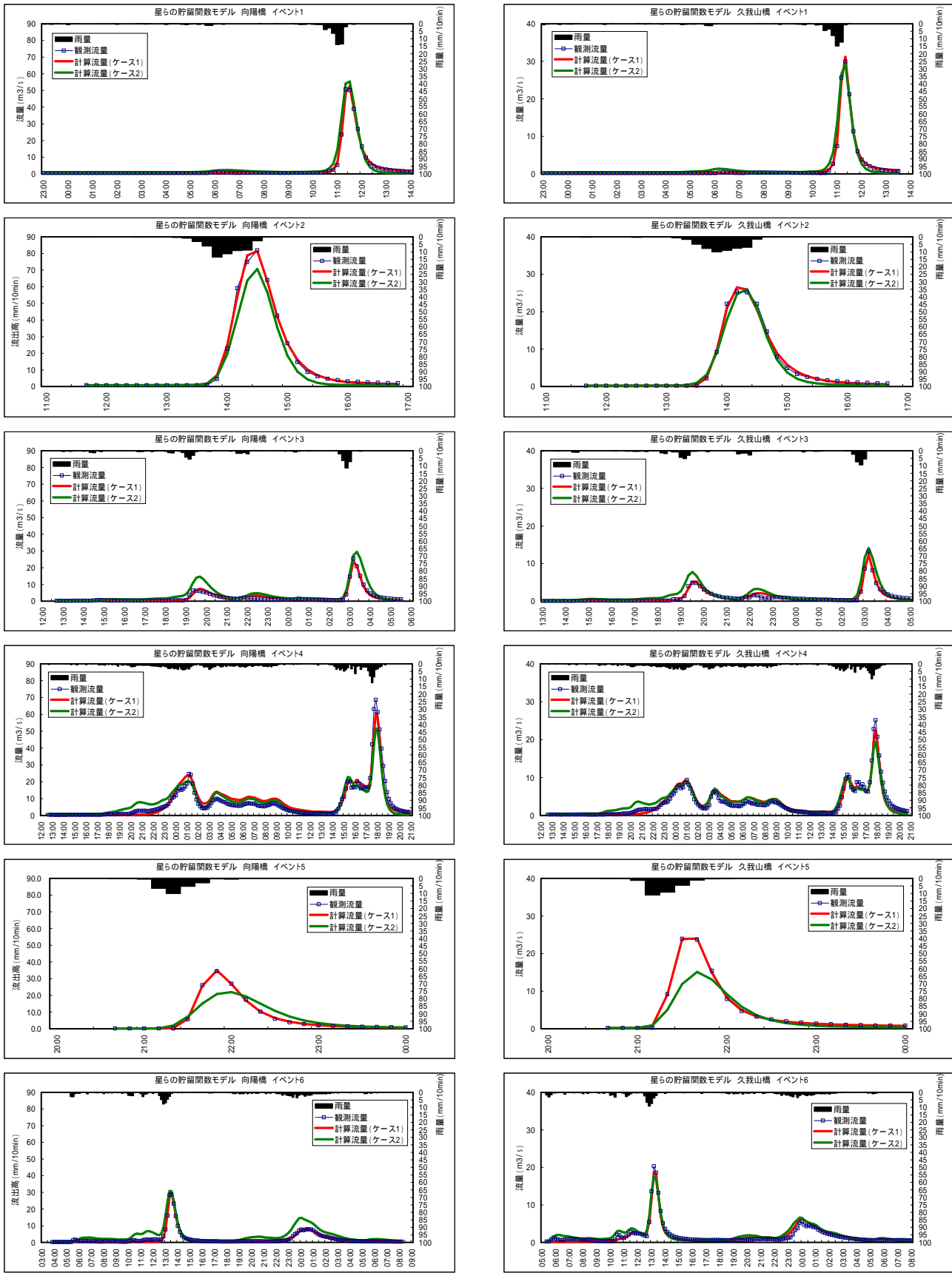


図 - 3 星らの貯留関数モデルによるハイドログラフ

観測ハイドログラフに対する再現性が大幅に改善されている。貯留関数モデルは流出過程における非線形性を表現できることが合成合理式との大きな違いであり計算ハイドログラフと観測ハイドログラフの形状の違いが小さくなっている。複数のピークがみられるハイドログラフについてはピーク流量がやや小さくなっている（向陽橋のイベント3, 4、久我山橋のイベント3, 4, 6）が、概ね観測ハイドログラフを再現できている。

図 - 3について6イベント全てのデータによるパラメータの値を用いたハイドログラフ（ケース2）をみると、図 - 2に示した合成合理式のハイドログラフと比べると観測ハイドログラフに対する再現性が改善されているが、ケース1の計算ハイドログラフと比べると再現性が低下している。ケース2のハイドログラフをケース1のものと比較すると、向陽橋のイベント2, 4, 5と久我山橋のイベント4, 5ではピーク流量が大幅に小さくなっている。また、2地点に共通して複数のピークがみられるハイドログラフ（イベント3, 4, 6）については流量が大きく異なるピークがみられる。

星らの貯留関数モデルは1組のパラメータの値によって複数のイベントにおける観測ハイドログラフを再現した場合、ピーク流量を良好に再現できないイベントがあることや複数のピークがあるハイドログラフについては再現性が低下する。洪水予測において星らの貯留関数モデルを使用する場合、事前に1組のパラメータ値を設定し、全ての洪水時の流量変化をこのパラメータ値によって推定することが考えられるが、この場合、洪水によっては推定精度が低くなることもある。計算イベント発生之都度、雨量予測等をもとにイベントに適合するパラメータの値を設定することができれば流量変化の推定精度を向上させることができる。また、複数のピークがある洪水における流量変化を高精度に推定するためにはイベント期間を通じてパラメータの値を随時変化させる必要があり、パラメータの値を変化させる方法が問題となる。

3) 都市洪水貯留関数モデル

星らの貯留関数モデルと同様に各イベントのデータによるパラメータの値を用いたハイドログラフ（ケース1）と6イベント全てのデータによるパラメータの値を用いたハイドログラフ（ケース2）を作成した。決定したパラメータの値を表 - 5に、イベント毎に作成した2つのハイドログラフを図 - 4に示した。

表 - 4に示したパラメータの値によって対象イベントを計算した時の誤差評価関数 E の値は0.000004 ~ 0.0009であり、合成合理式に対して大幅に小さな値であった星らの貯留関数モデルと比べてさらに小さくなっている。

図 - 4について1イベントによるパラメータの値を用いたハイドログラフ（ケース1）をみると、全てのイベントについて観測ハイドログラフを良好に再現しており、星らの貯留関数モデルではピーク流量をやや小さく算出していた向陽橋のイベント3, 4、久我山橋のイベント3, 4, 6についてもピーク流量を含めて観測ハイドログラフ全体を良好に再現している。

図 - 4について6イベント全てのデータによるパラメータの値を用いたハイドログラフ（ケース2）をみると、イベント5を除く全てのイベントについて観測ハイドログラフを概ね再現している。ケース2とケース1の計算ハイドログラフの形状の違いについては、図 - 3に示した星らの貯留関数モデルと比べて非常に小さなものとなっている。

都市洪水貯留関数モデルは1組のパラメータの値によって複数イベントの観測ハイドログラフを概ね再現している。このことから洪水予測において都市貯

表 - 5 パラメータの値（都市洪水貯留関数モデル）

向陽橋	k_1	k_2	p_1	p_2	c	Q_{sm}	
ケース1							
イベント1	16.4	61.2	0.414	0.173	0.804	1.000	0.705
イベント2	7.5	22.1	0.661	0.403	0.794	1.000	0.610
イベント3	11.2	34.8	0.411	0.164	0.586	0.598	0.629
イベント4	13.3	20.4	0.498	0.400	0.849	1.000	0.671
イベント5	6.3	18.7	0.473	0.216	0.545	0.210	0.390
イベント6	17.0	62.9	0.274	0.166	0.622	0.750	0.725
ケース2	8.5	21.0	0.658	0.418	0.817	1.000	0.723
久我山橋	k_1	k_2	p_1	p_2	c	Q_{sm}	
ケース1							
イベント1	14.5	23.1	0.385	0.259	0.756	1.000	0.610
イベント2	5.0	19.3	0.795	0.255	0.706	1.000	0.565
イベント3	10.5	107.1	0.343	0.046	0.630	1.000	0.532
イベント4	13.4	34.1	0.364	0.193	0.709	0.671	0.545
イベント5	8.8	9.7	0.432	0.361	0.898	0.570	0.395
イベント6	11.5	38.6	0.410	0.167	0.705	0.658	0.599
ケース2	5.6	10.2	0.727	0.465	0.714	0.741	0.612

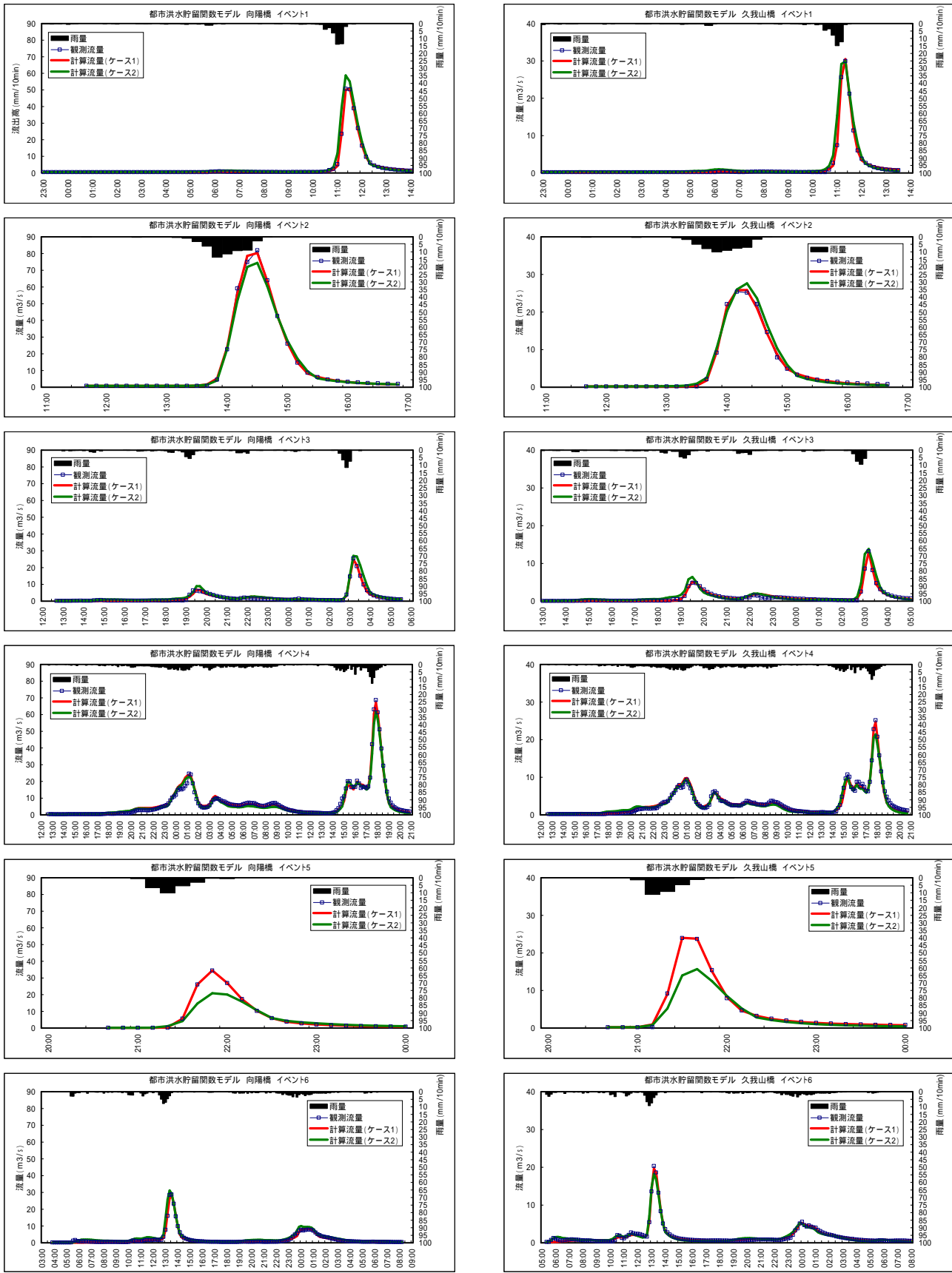


図 - 4 都市洪水貯留関数モデルによるハイドログラフ

留関数モデルを使用する場合、事前に1組のパラメータ値を適切に設定することができれば計算イベントの流量変化を精度良く推定することが可能である。さらに計算イベント発生の都度、雨量予測等をもとに計算イベントに適合するパラメータの値を設定することができれば流量変化をより高精度に推定することが可能となる。この場合、イベントに適合するパラメータの値を設定する方法が問題となる。

4. 考察・まとめ

中小河川における高精度の洪水予測の実現化に向けて、合成合理式、星らの貯留関数モデル、都市洪水貯留関数モデルの3種類の集中型概念モデルを神田川上流域における洪水イベントに対するハイドログラフの再現性をもとに各降雨流出モデルの特徴を確認した。

合成合理式は1組のパラメータの値によって1イベントの観測ハイドログラフ全体を良好に再現することができないことから、ハイドログラフ全体の再現性を考慮したパラメータの値を用いた計算ではピーク流量を過小に算出し、ピーク流量の再現性を考慮したパラメータの値を用いた計算ではハイドログラフ全体の流量を過大に算出する。このため、観測ハイドログラフ全体を良好に再現するためにはイベント期間中にパラメータの値を随時変化させることが必要となる。

星らの貯留関数モデルは1組のパラメータの値によってピークがひとつの観測ハイドログラフに対しては良好に再現することが可能であるが、複数のピークがみられる観測ハイドログラフに対しては再現性が低下する。このため、複数のピークがある観測ハイドログラフ全体を良好に再現するためにはイベント期間中にパラメータを随時変化させることが必要となる。

都市洪水貯留関数モデルは1組のパラメータの値によって観測ハイドログラフを良好に再現することが可能であり複数のピークがみられるハイドログラフについても再現性は低下しない。都市洪水貯留関数モデルは下水道に関するパラメータの値を0とすると星らの貯留関数モデルと等しくなり、開発があまり

行われていない山地流域においては星らの貯留関数モデルについて多くの検証がなされている。このことから都市洪水貯留関数モデルは東京の中小河川全般に適用できるものと考えられる。

降雨流出モデルによって観測ハイドログラフに対する再現性が大きく異なるため、洪水予測において中小河川の流量変化を高精度に予測するためには各モデルの特性を考慮して適切なパラメータを随時設定する必要がある。観測ハイドログラフをより良好に再現できるモデルを用いることで同じパラメータの値を適用できる範囲を広くすることができパラメータの値を適切に設定することが容易になる。なお洪水予測以外の洪水流出解析においても解析目的とする流量を適確に推定するためには使用する降雨流出モデルの特性を十分に把握する必要があり、さらに、洪水流出解析によって得られた結果から各種の判断を行うには使用された降雨流出モデルの特性を理解しておく必要がある。

本報告では建設省河川砂防技術基準（案）同解説調査編に示されている誤差評価関数 E を最小化するパラメータの値をSCE-UA法を用いて自動的に決定している。従来、モデルパラメータの値は試算を繰り返して決定しており、適切なパラメータを設定するには経験が必要としていたが、本報告の方法では経験が無くても適切なパラメータの値を設定でき、かつ、主観的な判断を除外できる利点がある。さらに、イベント発生の度に観測データをもとに自動的にパラメータの値を更新することも考えられる。

観測ハイドログラフに対する再現性が低い合成合理式による計算においても誤差評価関数 E の値は建設省河川砂防技術基準（案）同解説調査編で推奨されている0.03以下となっており、中小河川の流量変化を良好に再現するためには誤差評価関数 E をより小さな値に設定する必要があると考える。

本報告が取り上げた3種類のモデルは降雨のうち短時間に河川に流出する成分である直接流出を対象として計算を行うものであるが、流出計算の前に直接流出成分の分離作業が必要であり、成分分離の方法によってパラメータの値が変わることや主観的な判断が入ることから洪水予測の精度を確保する上で問

題となる。直接流出成分の分離を必要とせずに中小モデルの開発が今後の課題である。
河川の流量変化を良好に表すことができる降雨流出

参 考 文 献

- 1) 谷岡康、福岡捷二(2003)：都市中小河川・下水道の連携した治水計画 台地部既成市街地を対象として、土木学会論文集 No.733/ -63、21-35
- 2) 星清、山岡勲(1982)：雨水流法と貯留関数法との相互関係、第26回水理講演会論文集、273-278
- 3) 高崎忠勝、河村明、天口英雄(2008)：合流式下水道の流出特性を考慮した都市洪水貯留関数モデルの構築、水文・水資源学会誌、Vol.21, No.3、228-241
- 4) 田中丸治哉(1995)：タンクモデル定数の大域的探索、農業土木学会論文集No.178、103-112
- 5) 建設省河川局(1997)：建設省河川砂防技術基準(案)同解説調査編、山海堂、85-86