

## 貯留関数式の最適パラメーターから評価する直接流出の分離について

明星大学理工学部 正会員 ○藤村 和正  
 東京工業大学大学院 正会員 井芹 慶彦  
 東京工業大学大学院 正会員 鼎 信次郎  
 高知工業高等専門学校 正会員 岡田 将治  
 高知工科大学名誉教授 フェロー 村上 雅博

### 1. はじめに

河川流出は、表面流出、中間流出、地下水流出の3成分から構成され、表面流出と中間流出は河川に直接流出する成分(直接流出)であるとされている。洪水流出解析では、有効降雨から直接流出を計算するため、直接流出量を実測ハイドログラフからの確に分離することが肝要となる。流出成分の分離方法には、勾配急変点法と水平分離法がある。しかし、勾配急変点法は片対数グラフに折れ線が出現せず分離点の判別が困難な場合があり、水平分離法は規模の大きい流域や火山性地質の流域では減水が長引き、両者とも実用において問題を残している。従って、本研究では、より信頼性ある直接流出の分離方法の提案を念頭に置き、直接流出の分離の差異が解析結果に及ぼす影響について貯留関数式の最適パラメーターにより評価し、さらに、直接流出の特性について考察することを目的とする。具体的には、早明浦ダム流域を対象流域として1991年から2010年の期間で規模の大きい単峰性の5洪水を選定し、ハイドログラフのピークから裾までの間を大よそ6等分して6つの直接流出に生成し、各直接流出に対して貯留関数式を用いた流出解析を行い、貯留関数式の最適パラメーターを探索する。そして、直接流出の分離の違いと解析精度との関係及び最適パラメーターとの関係を表し、考察することを目的とする。

### 2. 対象流域とデータ

対象流域は、四国地方の吉野川上流の早明浦ダム流域とする(図1)。その流域面積は472 km<sup>2</sup>であり、その中には、最大流量65,000 m<sup>3</sup>/sを発電用水として流域変更される汗見川取水堰までの流域55 km<sup>2</sup>を含んでいる。また、瀬戸川取水堰では最大4.4 m<sup>3</sup>/sの低

水流量を鏡川流域に流域変更している。ただし、洪水時には導水路の取水口が遮断され、洪水流は早明浦ダムに流入する。

水文データは、早明浦ダム流域内の7地点の降水量及びダム流入量の1時間単位のデータを使用する。対象洪水は、1991年から2010年までの20年間から規模の大きい単峰性の洪水5つを選定した(表1)。

### 3. 直接流出の分離

本研究では、ハイドログラフにおいて直接流出の分離位置を変化させて解析精度を評価する。従って、直接流出の分離について以下に記す。

直接流出の分離の一例として、図2にFL1洪水の場合を示す。直接流出の開始点、ハイドログラフの起点(O点)は片対数グラフにおいて目視で容易に

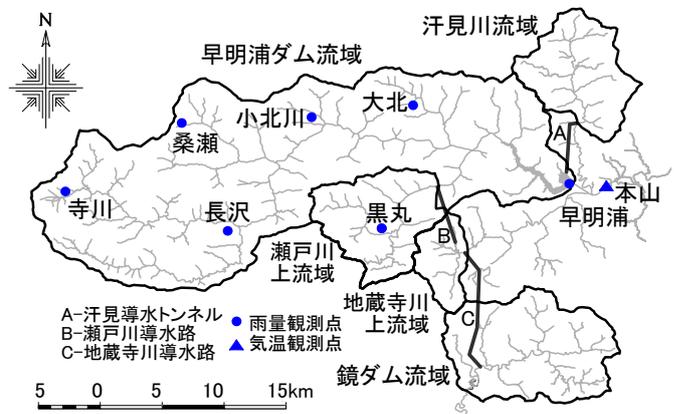


図1 早明浦ダム流域の概要図

表1 対象洪水

記号	年月日	時間	総雨量 (mm)	総流出量 (mm)
FL1	1997年 9月 15日 - 18日	96	420.1	314.7
FL2	2004年 8月 30日 - 31日	48	388.0	337.5
FL3	2004年 10月 19日 - 21日	72	430.8	288.8
FL4	2005年 9月 5日 - 8日	96	707.8	631.5
FL5	2007年 7月 13日 - 16日	96	508.2	457.0

キーワード 直接流出 成分分離 ハイドログラフ 貯留関数式 最適パラメーター

連絡先 〒191-8506 東京都日野市程久保 2-1-1 明星大学理工学部 TEL. 042-591-5111

判別できる。しかし、直接流出の終点の判別は困難である。そこでヒドログラフのピークから裾 (F 点) までの間を大よそ6等分し、分離点を A 点から F 点とし、起点 O 点とそれぞれの分離点を直線で結び直接流出と基底流出を分離する。片対数グラフ上で分離線となる直線は、図 2 中の  $BF_A$  式から  $BF_F$  式の指数関数式で表した。図 3 には普通軸グラフ上に同様の FL1 洪水の分離線を表した。片対数グラフ上の直線の分離線は普通軸グラフ上では曲線となり、逆に普通軸グラフ上の直線の分離線は片対数グラフ上では曲線となる。図 2 において一次関数の分離線  $BF_N$  式は明らかに実測ヒドログラフを上回っており、直接流出は片対数グラフ上の直線 (指数関数式) で分離する方が好ましいと言える。図 3 の普通軸のヒドログラフにおいて裾部分の分離 (D 点、E 点、F 点) では流出高に大きな差異はなく、分離線がほ

とんど重なっている。表 2 にはこのことを数量的に表した。総流出量 314.7 mm に対する減少率と裾先端の分離点 F 点の直接流出量 290.3 mm に対する減少率を表した。D 点、E 点、F 点の範囲の減少率はどちらも 5%程度であり、裾部分の分離点の違いが直接流出量の多寡として及ぼす影響は小さい。他の 4 洪水についても同様の方法で直接流出を分離し、1つの洪水に対して6つの直接流出を生成した。

4. 洪水流出解析と最適パラメーターの探索

洪水流出解析の方法は、流域をグリッド分割し、グリッド点において逆距離加重法を用いて降水量を推定し、さらに、Diskin-Nazimov の雨水浸透モデルにより有効降雨量を算定する。流域全体のグリッド点の有効降雨量は平均化し、貯留関数式の貯留量に入力値として与えられ、出力値として流出量を得る。

(1) グリッド点の降水量の推定

500 m 間隔で流域をグリッド分割し、逆距離加重法を用いて7地点の降水量データからグリッド点の降水量を推定する。この際、各観測点の降水量と標高との相関を求め、降水量の標高依存特性を考慮する。

(2) 有効降雨量の算定

推定されたグリッド点の降水量を基に浸透能計算を行い、有効降雨量と浸透量を算定する。浸透能計算には Diskin-Nazimov の雨水浸透モデルを用いる。このモデルの特徴は、土壌表層の貯留量と降雨強度との関係に応じて浸透能を逐次的に算定できることである。モデルパラメーターには、初期浸透能 ( $f_0$ )、終期浸透能 ( $f_c$ ) 及び表層土壌の貯留量の最大値 ( $S_m$ ) の3つがある。これらのパラメーターは、本来は流域固有の値として設定することが望ましいが、長期的解析の必要性や複数流域での検証を通して最適化する必要がある、現段階では困難であるため、個々の洪水イベントの固有の値とする。パラメーターの設定は、有効降雨量と成分分離した直接流出量がほぼ等しくなることを条件とし、試算により決定する。

(3) 貯留関数式による流出量計算

貯留関数式は、貯留量  $S$  を流出量  $Q$  の関数とし、パラメーター指数  $p$  と係数  $k$  により次式で表される。

$$S = kQ^p \quad (1)$$

流出量  $Q$  は貯留量  $S$  に有効降雨量を与えて求められる。この場合、貯留量  $S$  から流出量  $Q$  を代数的には求められないため Newton 法を用いる。貯留関数式に

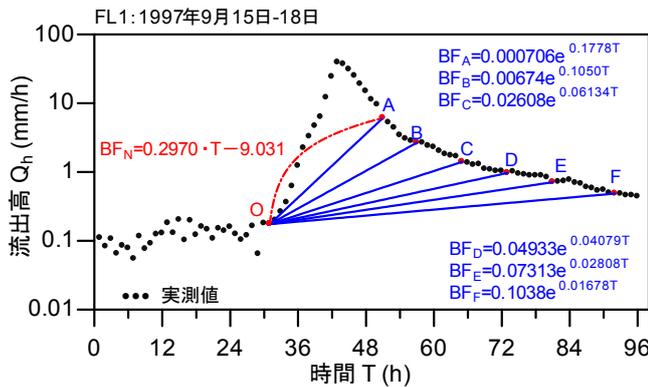


図2 FL1洪水の成分分離 (片対数グラフ)

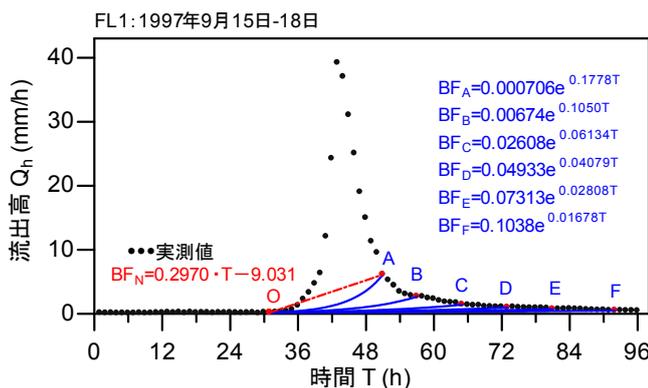


図3 FL1洪水の成分分離 (正規軸グラフ)

表 2 分離点の違いによる直接流出量の比較

分離点	A 点	B 点	C 点	D 点	E 点	F 点
直接流出量(mm)	212.0	244.9	265.3	275.3	282.8	290.3
減少率 I (%)	67.4	77.8	84.3	87.5	89.9	92.2
減少率 II (%)	73.0	84.4	91.4	94.8	97.4	100.0
減少率 I : 総流出量 314.7 mm に対する減少率(%)						
減少率 II : 裾先 F 点直接流出量 290.3 mm に対する減少率(%)						

よる流出計算では遅滞時間を考慮する必要がある。遅滞時間は、単峰性の洪水を対象とする場合、貯留量  $S$  と流出量  $Q$  のピーク時刻の時間差であり、降雨のピークと流出のピークの時間差ではない。遅滞時間は洪水毎に異なる。早明浦ダム流域では、時間差無しから1時間程度であった。本研究の計算では、ハイドログラフの実測値と解析値の波形の適合性から判断して遅滞時間は無しとした。

(4) 誤差評価式

誤差評価式には次式に示す Nash-Sutcliffe 係数 (以下、Nash 係数と呼ぶ) を用いる。

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (qo_i - qc_i)^2}{\sum_{i=1}^N (qo_i - qm)^2} \quad (2)$$

ここで、 $qo_i$ :  $i$  番目の実測流出高、 $qc_i$ :  $i$  番目の計算流出高、 $qm$ : 実測流出高の平均値である。

(5) 繰り返し計算による最適パラメーターの探索

貯留関数式に含まれる指数  $p$  と係数  $k$  の最適値を特定するため、 $p$  と  $k$  の探索範囲を定め、その範囲内においてパラメーターを移動させて流出解析を繰り返し、Nash 係数が最も1に近づいた指数  $p$  と係数  $k$  の値を最適値とした。本研究では、1つの直接流出

の最適パラメーターの探索に必要な繰り返し計算数は、指数  $p$  は 40 ステップ、係数  $k$  は 60 ステップであることから 2,400 回となる。

5. 解析結果

解析結果の一例として、図4にFL1洪水のA点分離 (左図) とF点分離 (右図) のハイトグラフとハイドログラフを示す。ハイトグラフでは、浸透能パラメーターを変化させて、分離した直接流出量に有効降雨量がほぼ等しくなるように算定している。ハイドログラフでは、解析値は実測値を概ね再現できているが、ハイドログラフの立ち上がり部分と裾部分に着目すると、F点分離の波形の方が適合性が良い。表3にはFL1洪水のA点分離からF点分離までの6つの直接流出の解析結果を示す。Nash 係数はいずれも 0.98 以上となっており、高い再現性が示されている。他のFL2洪水からFL5洪水の4つの洪水の解析結果もほぼ同様であり、Nash 係数は 0.9 以上を示す良好な結果を得た。

6. 考察

FL1洪水からFL5洪水についてハイドログラフの直接流出の分離点の違いによる Nash 係数の変化を図5に表した。直接流出の分離点がハイドログラフ

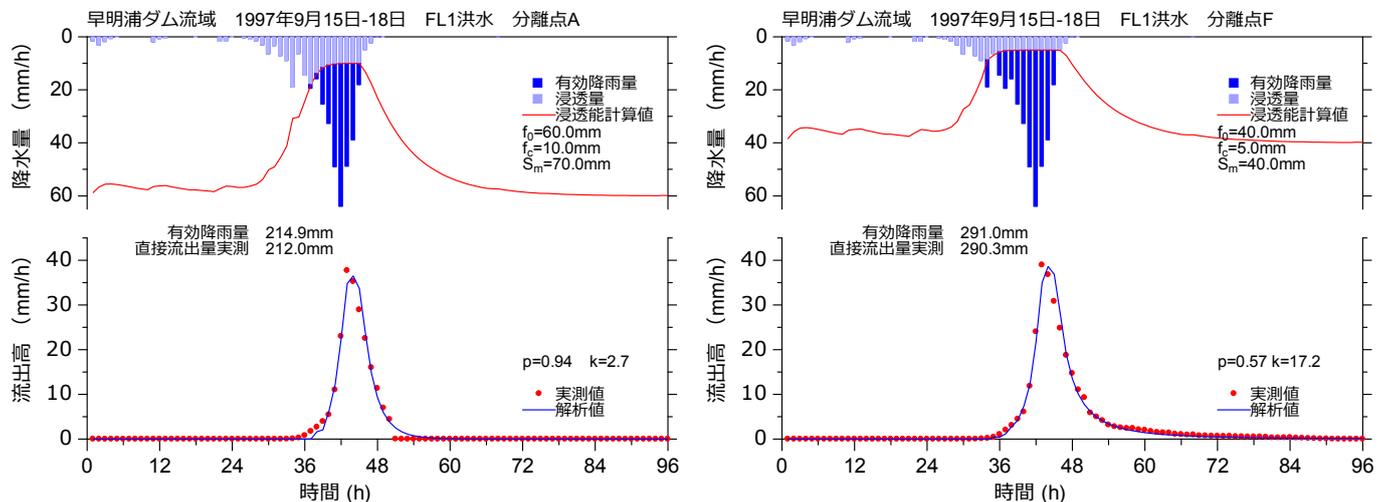


図4 解析ハイドログラフの例: FL1洪水のA点分離 (左) とF点分離 (右) の比較

表3 FL1洪水の解析条件及び解析結果

記号	有効降雨量 (mm) (総雨量 420.5mm)	直接流出量 (mm)		浸透パラメーター (mm)			解析結果			最適パラメーターの探索条件			
							最適パラメーター		Nash 係数	指数 $p$		係数 $k$	
		合計	平均値	$f_0$	$f_c$	$S_m$	$p$	$k$		探索範囲	ステップ	探索範囲	ステップ
FL1A	214.9	212.0	11.78	60	10.0	70	0.94	2.7	0.9800	0.81 - 1.20	0.01	0.1 - 6.0	0.1
FL1B	247.9	244.9	9.798	55	8.0	50	0.77	6.4	0.9812	0.61 - 1.00	0.01	3.1 - 9.0	0.1
FL1C	266.8	265.3	8.041	50	6.5	50	0.67	10.4	0.9815	0.51 - 0.90	0.01	7.1 - 13.0	0.1
FL1D	279.5	275.3	6.714	50	5.5	50	0.62	13.4	0.9814	0.41 - 0.80	0.01	10.1 - 16.0	0.1
FL1E	284.5	282.8	5.772	40	5.5	40	0.59	15.4	0.9825	0.51 - 0.90	0.01	11.1 - 17.0	0.1
FL1F	291.0	290.3	4.839	40	5.0	40	0.57	17.2	0.9824	0.31 - 0.70	0.01	15.1 - 21.0	0.1

の裾 (F 点) に向かうほど Nash 係数の値は僅かではあるが大きくなり 1 に近づいている。つまり、解析誤差に大きな差はないが、ハイドログラフの裾部分で直接流出を分離する方が解析誤差は小さくなり、解析が実際の流出現象を表現する確かさを表している。なお、FL2 洪水の A 点分離で Nash 係数の値が大きいのは、実測と解析のハイドログラフの波形が特異的に一致したものである。

次に、直接流出の分離点と最適パラメーター、 $p-k$  の関係を片対数グラフ上に表した (図 6)。各洪水とも分離点 A 点は右下にあり、左上に向かって分離点がハイドログラフの裾に向かい、分離点 F 点は左上にある。この図から、直接流出の分離の違いにより貯留関数式の最適パラメーターが異なり、そして、指数  $p$  と係数  $k$  の関係が片対数グラフ上に直線として現れることが言える。つまり、 $p-k$  関係は、 $a$  と  $b$  を定数とした次の指数関数式で表される。

$$k = a \exp(b)^p \quad (3)$$

貯留関数式(1)式において、指数  $p$  の範囲は理論的に

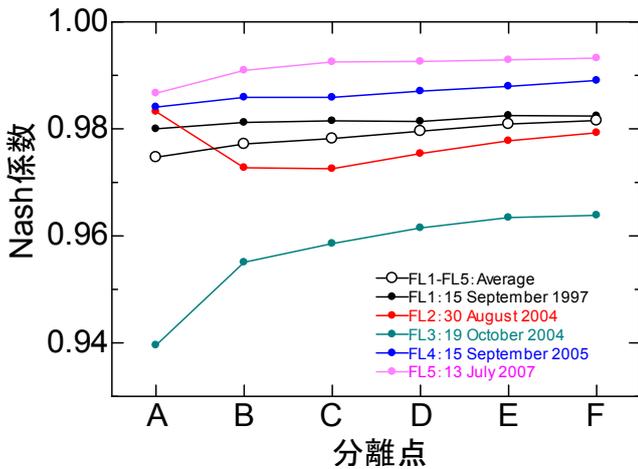


図5 分離点の違いによるNash係数の変化

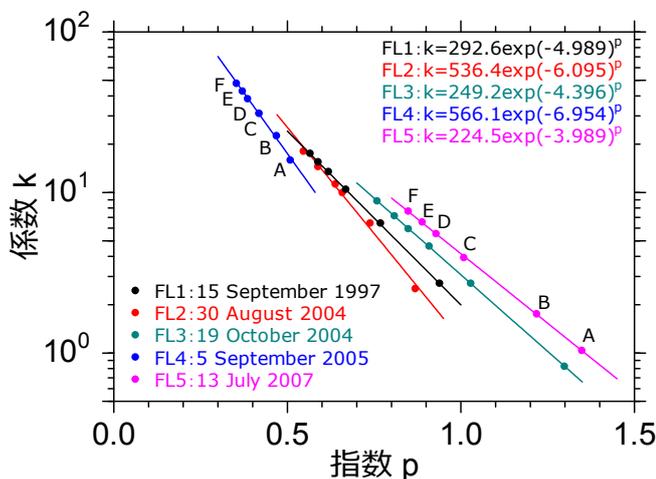


図6 最適パラメーターk-p関係 (片対数グラフ)

$$0 \leq p \leq 1 \quad (4)$$

とされている<sup>1)</sup>。しかし、本研究による解析では、指数  $p$  は 1 を超える場合があり、必ずしも 1 以下とはならず、指数  $p$  が 1 を超える場合には係数  $k$  の値は(3)式に従って小さくなる。良好な解析結果を得るハイドログラフの裾部分で分離する直接流出の場合には指数  $p$  は 1 以下の値になっている。最後に洪水流出の非線形性について考察すると、貯留関数式(3)式では、指数  $p$  が 1 より小さくなるほど流出の非線形性は高くなり、1 に近いほど線形性が増す。ハイドログラフの裾部分、F 点で直接流出を分離する場合、A 点で分離するより Nash 係数は良好な値となり現象をよく再現し、指数  $p$  は小さくなり非線形性が高まる。つまり、流出の減水時間を長くすれば流出特性は非線形性が高まるということが示唆される。これは、近年の研究で、低水流出の非線形性が高いことが示されており<sup>2)</sup>、その内容と共通するところがある。

7. おわりに

本研究により次のことが明らかとなった。①直接流出の分離を片対数グラフにおいてハイドログラフの裾部分で行う方がピークに近い部分で行うよりも良好な解析結果が得られる。②直接流出に対する貯留関数式の最適パラメーター、指数  $p$  と係数  $k$  の関係は指数関数式により表現できる。③ハイドログラフの裾部分で直接流出の分離を行うと、直接流出は非線形性が高くなる。

謝辞

本研究は、独立行政法人水資源機構吉野川局池田総合管理所に貴重なデータの提供を受けた。また、日本学術振興会の科学研究費補助金基盤研究(C)(一般) (15K06241) の支援により実施された。ここに記して関係各位に謝意を表する。

参考文献

- 1) 建設省水文研究会編：貯留関数の理論的展開、流出計算例題集 2、(社) 全日本建設技術協会、pp.83-84、1971。
- 2) 藤村和正・井芹慶彦・鼎信次郎・村上雅博：低水流出に適用する貯留関数式の定数の特性、土木学会論文集 B1(水工学)、Vol.71、No.4、pp.361-366、2015。