

森林流域の流出特性を考慮した貯留関数モデル定数の決定手法の検討

豊田晋平・本田尚正 (茨城大院)

Abstract: The storage function method, which was proposed in 1961, is generally used for dam projects in Japan. However, it cannot accurately express the runoff characteristics of the present full-grown forests. Kato and Ueno (2004) proposed a new estimation method of the initial constants of the storage function model that considered the effect of forest. But this method's applicability to the field was only confirmed in one actual basin with the assumed rainfall. The present paper changes part of Kato et al.'s method and estimate its applicability for many actual basins with the observed rainfall and flow discharge. Three dam basins were chosen for the examination: the Sonohara dam basin of the Katashina river in Gunma Prefecture, the Futase dam basin of the Arakawa river in Saitama Prefecture, and the Ohkawa dam basin of the Aga river in Fukushima Prefecture. Based on the analytical results of runoff, the present model can accurately show the outflow phenomenon when previous rainfall has not occurred because the calculated flow discharge corresponds to the observed data. But a wide difference is caused between the calculation value and the observed data when previous rainfall has occurred. These results emphasize that the present model must recover the storage ability of forest soil during non-rainfall periods.

Key words: storage function method, runoff analysis, previous rainfall, non-rainfall periods, storage ability of forest soil

要旨: 日本のダム計画では一般に「貯留関数法」が用いられる。しかし、同法は現代の成熟した森林流域の流出特性を忠実に表現しているとはいえない。加藤・上野 (2004) は貯留関数モデルの初期定数の決定に森林の効果を反映させた新たな手法を提案した。しかし、その検証は一つの実流域を対象に想定降雨に対してしか行われていない。本研究では加藤・上野の手法を一部改変し、複数の実流域と実績水文データを対象に流出解析を実施して当手法の現地への適用性を評価した。検討対象流域は群馬県片品川水系菌原ダム流域、福島県阿賀川水系大川ダム流域、埼玉県荒川水系二瀬ダム流域の3流域である。その結果、先行降雨がない場合には計算値と観測値がほぼ一致し、流出現象を正確に表すことができた。一方、先行降雨がある場合には両者の間に大きな差が生じた。今回の提案モデルには無降雨期間における森林土壌の貯留機能の回復効果を考慮する必要があると考える。

キーワード: 貯留関数法, 流出解析, 先行降雨, 無降雨期間, 森林土壌の貯留機能

I はじめに

日本ではダム計画を有する流域の流出解析法として「貯留関数法」が用いられる。しかし、同法は昭和36年に考案され、当時の流域内の森林は一般的に荒廃状態にあった。そのため、現代の成熟した森林流域に対し、従来の貯留関数法には流出に対する森林の効果を反映されているとはいえない面がある。

加藤・上野 (2004) は貯留関数法の初期定数の決定に森林流域の流出特性を反映させた新たな手法を考案した (3)。それは、貯留関数法に必要な5つの定数 (K, T, p, R_{sa}, f_1) の初期値を対象流域の実測データと土壌分析データをもとに先行降雨の有無に応じてそれぞれ求める方法である。しかし、その検証は一つの実流域を対象に想定降雨に対してしか行われていない。本研究では加藤らの手法を一部改変し、複数の実流域と実績水文データを対象に流出解析を行い、当手法の現地への適用性を評価する。

II 貯留関数法の問題点と加藤・上野による提案

1. 貯留関数法の概要

貯留関数法の基礎式は、次のとおりである。

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

$$\frac{dq}{dt} = \frac{(I-q)^{-p}}{Kp} \quad (2)$$

ここに、 S は流域貯留量、 q および I は流出遅れ時間 T を考慮した流出高および流入高、 K および p は定数である。実用的には計算値と観測値とを適合させるために「 $f_1 - R_{sa}$ 方式」を用いる。まず、流域を降雨開始と同時に流出が始まる「流出域」(f_1 : 一次流出率, 流出域面積の割合) と、累加雨量が土壌飽和量 (R_{sa}) に達した後に流出が始まる「浸透域」に分ける。次に、流出域からの流出高 q_1 と浸透域からの流出高 q_2 を求め、全流出量 Q を次式により求める。

$$Q = f_1 A q_1 + (1 - f_1) A q_2 + Q_b \quad (3)$$

ここに、 A は流域面積、 Q_b は基底流量である。

上記の5つの定数 (K, T, p, R_{sa}, f_1) について初期値を設定し、各定数の修正 (トライアル計算) により計算値と観測値が適合する最適な組合せを選択する。適合度の判定には次式が用いられる。

$$E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{Q_o(i) - Q_c(i)}{Q_{op}} \right)^2 \quad (4)$$

ここに、 E は誤差 ($E \leq 0.03$ であれば適当とする)、 $Q_o(i)$ は*i*時の実測流量、 $Q_c(i)$ は*i*時の計算流量、 Q_{op} は実測の最大流量、 n は計算時間数である。

2. 貯留関数法の問題点

従来の貯留関数法では、モデル定数の初期値の選定方法に問題があるとされている。まず、定数 K および T の初期値には、それぞれ次式が用いられる。

$$K = 43.4C \times L^{1/3} \times i^{-1/3} \quad (5)$$

$$T = 0.047L - 0.56 \quad (6)$$

ここに、 C はリザーブ定数 (自然流域 0.012, 都市流域 0.12)、 L は流域主流路長 (km)、 i は主流路の平均河床勾配である。式(5)中の C には森林の状態や土地利用状況による細分化はなされていない。また、上記の両式において L および i は地形条件であるが、森林の状態や土地利用状況は反映されていない。

次に、 R_{sa} および f_1 の初期値を一義的に決定する方法はなく、試算によるか、他流域で経験的に得られた値を用いるなどとされている。さらに、トライアル計算に関しても、定数修正の優先順位や範囲等が具体的に示されたものはなく、同等の適合度を有する定数の組合せはいくつか存在し得ることになる。

以上より、従来のモデル定数の初期値の選定方法やトライアル計算に関しては、森林流域の流出特性が十分に反映されているとはいえない。

3. 加藤・上野によるモデル定数の決定方法と課題

1) K, T, p の決定方法: K, T および p の初期値は、流域の観測データをもとに決定する。具体的には図-1に示すとおり、一つの降雨イベントに対して直接流出高 (V)を横軸に、貯留高 (S)を縦軸にとった両対数グラフを描き、遅れ時間 T の値を変動させてグラフを直線近似し、 $V=1$ に対応する S から K を、近似直線の勾配から p をそれぞれ求める。それらは流域固有の値と考えられるため、その後のトライアル計算では必要最小限の変化にとどめる。

2) R_{sa} の決定方法: R_{sa} の初期値には、対象流域の有効貯留量を用いる。ここで有効貯留量とは、土壌型および土壌層位別の有効孔隙量に層厚と土壌型別分布面積をそれぞれ乗じたものを土壌型別の土壌水分貯留量とし、これに流域の樹冠遮断量を加えたものである。同値は流域の土壌特性を明確に表しており、トライアル計算において修正は行わない。

3) f_1 の決定方法: f_1 は、トライアル計算において計算流量と観測流量の波形を一致させるフィッティングパラメータとする。 f_1 の初期値の目安としては流域の平均流入係数を用い、 f_1 を適宜修正することによってハイドログラフの波形の適合度を調整する。

4) 先行降雨の有無によるモデル定数の使い分け:

図-2に示すように、主たる降雨に対して先行降雨がある場合、流域の保水能力は先行降雨によって低下し、その影響を受けて主たる降雨の発生時には流

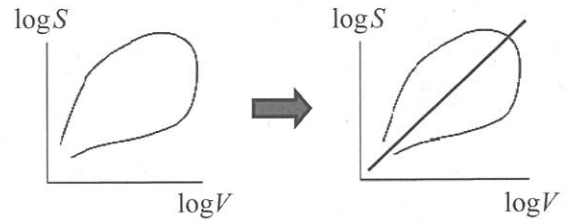


図-1. 初期定数 K, T, p の決定方法

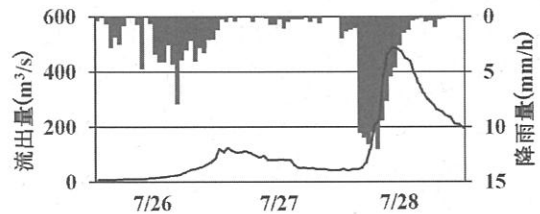


図-2. 先行降雨がある降雨パターン例

出量が大きくなると考えられる。そのため、モデル定数は先行降雨の有無によってそれぞれ求め、 R_{sa} は有効貯留量の最大値と最小値とを使い分ける。

5) 上記手法の課題: (1) R_{sa} は、土壌の初期含水率の空間分布等の複数の影響を受ける定数と考えられ、「 R_{sa} = 有効貯留量」と一義的に決まらない可能性がある (4)。 (2) 有効貯留量の推定に必要な土壌分析データ等の入手は、実際には非常に困難な場合が多い。 (3) 上記手法を実流域に適用した検証は、一つの実流域を対象に想定降雨に対してしか行われていない。

III 研究手法および解析条件

1. 研究手法および解析手順

ここでは、加藤・上野による手法を一部改変し、複数の実流域で流出解析を行う。まず、実績水文データをもとに貯留関数モデル定数を決定する。このとき、実績降雨データは先行降雨がない場合 (無降雨期間1日間以上) とある場合 (同じく1日間未満) とで区別する。次に、それらの定数を用いて、モデル定数決定時とは別の実績降雨を対象に流出解析を行い、計算流量と観測流量の波形の適合度によって、今回の提案手法の現地への適用性を評価する。

2. 加藤・上野の手法との変更点

1) R_{sa} および f_1 の初期値の選定方法

K, T, p と同様に流域の観測データをもとに推定する。具体的には図-3(a)に示すとおり、横軸に

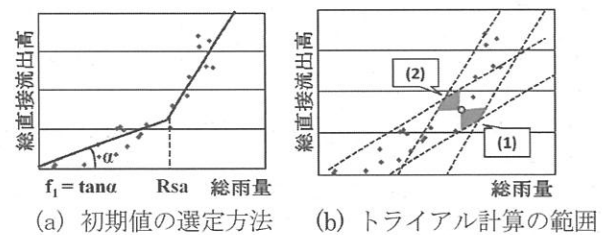


図-3. 本研究における R_{sa} および f_1 の考え方

降雨イベント毎の総雨量，縦軸に同じく総直接流出高をプロットし，それらの近似直線の勾配変化点の総雨量を R_{sa} ，原点からの勾配を f_1 とする。なお，上記の方法では， R_{sa} は先行降雨の有無に関係なく定まるが，値自体は近似値である。よって，本研究では R_{sa} も f_1 と同様にトライアル計算の対象とする。

2) トライアル計算時の R_{sa} および f_1 の有効範囲

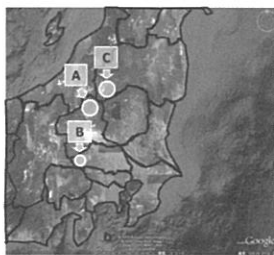
たとえば，初期定数による総計算流量が総観測流量よりも大きい場合，初期定数で表された流域は実際の流域よりも貯留能力が小さいといえる。よって，トライアル計算ではより大きな貯留能力を有するように R_{sa} および f_1 の値を変化させる必要がある。具体的には図-3 (b) 中の (1) のとおり， R_{sa} が大きく f_1 が小さい範囲で両値を変化させる。一方，総計算流量が総観測流量よりも小さい場合，流域の貯留能力は過大に評価されており，図-3 (b) 中の (2) のとおり， R_{sa} が小さく f_1 が大きい範囲で両値を変化させる。

3. 検討対象流域の概要

本研究では主として，(1) 地理的に近接していること，(2) 観測データが豊富であること，の2つの観点から，群馬県片品川水系菌原ダム流域，埼玉県荒川水系二瀬ダム流域，福島県阿賀川水系大川ダム流域の3流域を検討対象流域とした。図-4に各流域の位置を，表-1に各流域の地形データをそれぞれ示す。

4. 流出解析に必要な条件

流出解析に必要な水文観測データは，国土交通省が公表している降雨・流量観測結果の中から，図-3の総雨量-総直接流出量関係の変曲点付近の降雨イベントを選定した。表-2に使用データの一覧を示す。



A: 菌原ダム流域
B: 二瀬ダム流域
C: 大川ダム流域

図-4. 検討対象流域

表-1. 各流域の地形データ

	流域面積 (km ²)	主流路長 (km)	平均勾配
A	406.16	35.6	0.033
B	98.9	12.7	0.101
C	261.8	15.5	0.039

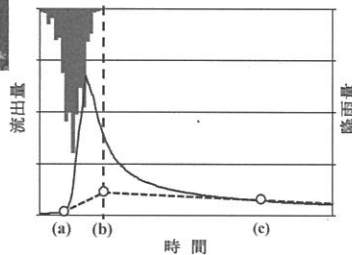


図-5. 直接流出量と基底流出量の分離方法 (模式図)

直接流出量と基底流出量の分離は図-5の方法に拠った (1)。同図中の (a)~(c) に対応する各流域の具体的な時期は表-2中に掲載した。数値計算はルンゲ・クッター法に拠った。同法は1階微分方程式の代表的な解法であり，計算の安定性が高く，計算精度も良いことから実務計算にも多用されている (2)。

IV 結果及び考察

1. 先行降雨がない降雨パターンの場合

図-6には，今次提案手法による計算結果とともに従来の方法による計算結果も載せている。まず，従来の方法による流出計算では，いずれの流域も5つの定数がトライアル計算によって変動しており，とくに流域固有の値と考えられる K , T および p にも変動がみられた。また，いずれの流域も計算流量と観測流量の波形の適合度は概して悪い。

一方，今次提案手法による流出計算では，二瀬ダム流域および大川ダム流域における僅かな変化を除いて K , T および p は初期値が維持された。また， R_{sa} および f_1 の最終値は，いずれの流域も前述の有効範囲内で決定された。その一例として，二瀬ダム流域の例を図-6 (d) に示す。さらに，計算流量と観測流量の波形はほぼ一致した。以上より，今次提案手法は，先行降雨がない降雨パターンの場合には従来の方法よりも計算値と観測値の適合度が高く，現地への適用は十分可能であると判断できる。

2. 先行降雨がある降雨パターンの場合

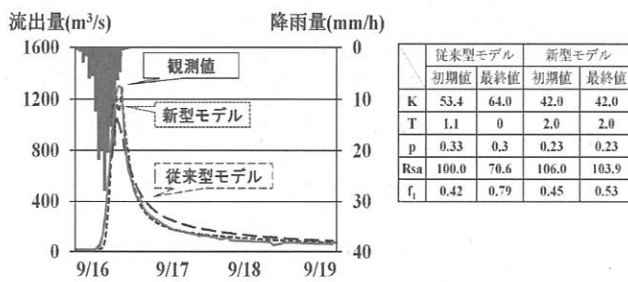
図-7に今次提案手法による計算結果を示す。いずれの流域も K , T および p の初期値を維持した状態で R_{sa} および f_1 を変化させて流出計算を行ったが，計算流量と観測流量の波形の適合度は悪かった。とくに二瀬ダム流域では，図-7 (d) に示すとおり， R_{sa} および f_1 の最終値はトライアル計算の有効範囲として設定した範囲から大きく外れる結果となった。

以上の原因として，今次提案手法には無降雨期間における流域の貯留能力の回復効果が考慮されていなかったことが挙げられる。先行降雨を有する降雨イベントをもとに貯留関数モデル定数を決定し，それらを別の降雨イベントに適用して流出解析を実施する場合，無降雨期間の長さによって森林土壌の貯留能力の回復度に違いが生じるため，その影響を考慮して R_{sa} および f_1 を補正しなければならない。

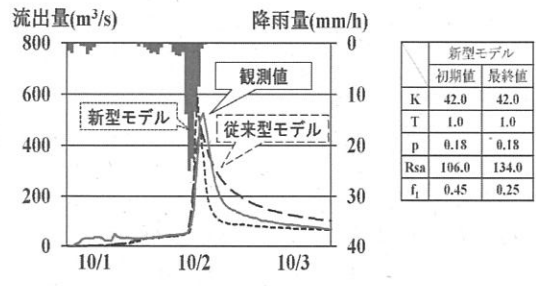
そのためには，水文観測資料が豊富な流域を対象にさまざまな降雨パターンに対して流出解析を行い，

表-2. 流出解析に用いた水文観測データ

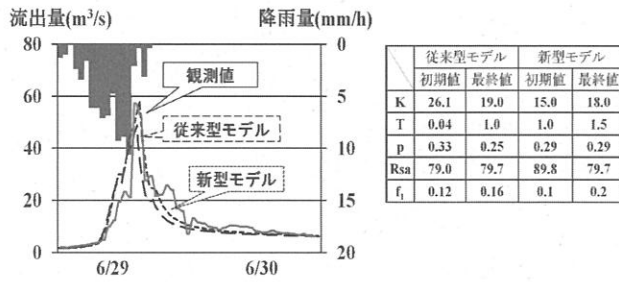
流域名	「先行降雨なし」の場合				「先行降雨あり」の場合			
	モデル作成に用いた観測データ		モデル作成に用いた観測データ		モデル作成に用いた観測データ		モデル作成に用いた観測データ	
	計算期間	基底流量期間	計算期間	基底流量期間	計算期間	基底流量期間	計算期間	基底流量期間
A: 菌原ダム	1982/7/31~8/4	(a) 8/1/5:00 (b) 8/2/9:00 (c) 8/6/6:00	1998/9/15~9/19	(a) 9/16/1:00 (b) 9/16/14:00 (c) 9/17/1:00	1983/7/25~7/28	(a) 7/25/4:00 (b) 7/28/10:00 (c) 7/30/10:00	2002/9/30~10/3	(a) 9/30/5:00 (b) 10/1/2:00 (c) 10/3/18:00
B: 二瀬ダム	1997/6/20~6/21	(a) 6/20/6:00 (b) 6/20/16:00 (c) 6/22/20:00	1997/6/28~6/30	(a) 6/28/12:00 (b) 6/29/4:00 (c) 6/30/13:00	1998/5/24~5/28	(a) 5/24/16:00 (b) 5/26/16:00 (c) 5/28/15:00	1998/10/16~10/20	(a) 10/16/22:00 (b) 10/18/8:00 (c) 10/19/21:00
C: 大川ダム	2002/10/1~10/3	(a) 10/1/16:00 (b) 10/1/23:00 (c) 10/3/20:00	2007/9/5~9/9	(a) 9/5/23:00 (b) 9/7/13:00 (c) 9/8/18:00	2004/7/16~7/20	(a) 7/17/16:00 (b) 7/19/3:00 (c) 7/21/1:00	2003/8/17~8/20	(a) 8/17/12:00 (b) 8/20/2:00 (c) 8/22/20:00



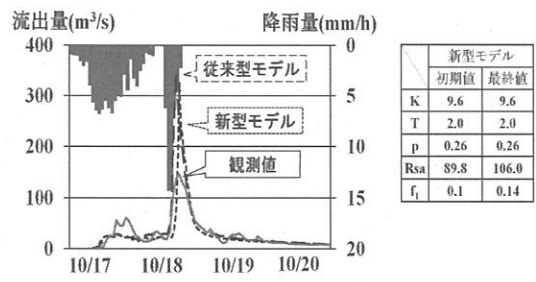
(a) 菌原ダム流域の場合



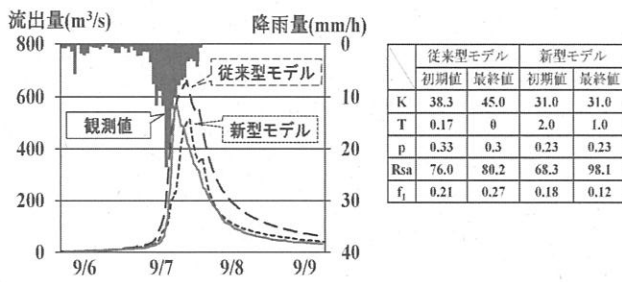
(a) 菌原ダム流域の場合



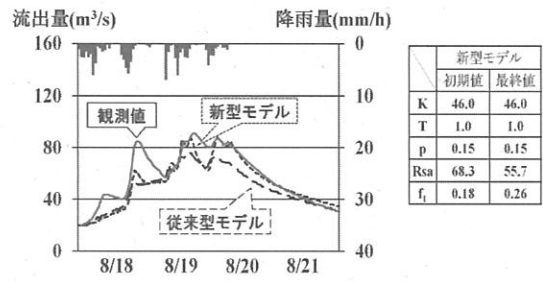
(b) 二瀬ダム流域の場合



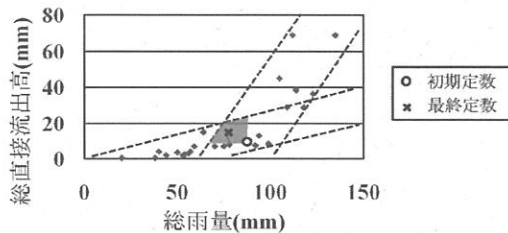
(b) 二瀬ダム流域の場合



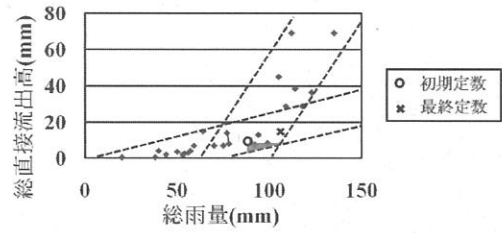
(c) 大川ダム流域の場合



(c) 大川ダム流域の場合



(d) 初期定数および最終定数(二瀬ダム流域の場合)



(d) 初期定数および最終定数(二瀬ダム流域の場合)

図-6. 先行降雨がない場合の解析結果

図-7. 先行降雨がある場合の解析結果

無降雨期間の長さの違いによる流出波形の違いから R_{sa} および f_1 と貯留能力の回復度との関係を導出する必要がある。

V おわりに

今回の提案手法は、先行降雨がない場合には実流域への適用は十分可能であるが、先行降雨がある場合には無降雨期間における流域の貯留能力の回復度と R_{sa} および f_1 との関係を考える必要があることが示唆された。計算事例の蓄積が今後の課題である。

引用文献

- (1) 角屋 睦 (1979) 流出解析手法 (その1) 雨水流出現象とその計測・解析. 農業土木学会誌 47(10): 811~821.
- (2) 角屋 睦・永井明博 (1980) 流出解析手法 (その10) 貯留法-貯留関数法による洪水流出解析-. 農業土木学会誌 48(10): 747~754.
- (3) 加藤英郎・上野亮介 (2004) 洪水流出に対する森林の効果を考慮した流出解析の一手法-貯留関数法の適用事例-. 砂防学会誌 57(4): 26-32.
- (4) 内田太郎・加藤英郎 (2005) 質疑応答「洪水流出に対する森林の効果を考慮した流出解析の一手法-貯留関数法の適用事例-」. 砂防学会誌 58(3): 51-54.