

## 森林流域の貯留能力の回復度と貯留関数モデルとの関係

安島裕太・本田尚正・豊田晋平（茨城大院）

要旨：貯留関数モデル定数の決定過程において、森林流域の流出特性を反映させることはきわめて重要である。本研究は、先行降雨（流出解析において計算の主たる降雨に先行する降雨）と主降雨の間の「無降雨期間」における森林流域の貯留能力の回復度を評価するための基礎データを得ることを目的とした。ここでは福岡県遠賀川流域、長崎県本明川流域、兵庫県出石川流域の3流域で土壌飽和量  $R_{sa}$  を求め、貯留能力の回復度を評価した。その結果、土壌飽和量は先行降雨による森林土壌の飽和の程度と、主降雨量に対する先行降雨量の相対的な大きさの程度の影響を強く受けており、貯留能力の回復度も同様に先行降雨の性質に依存することが明らかとなった。キーワード：貯留関数法、先行降雨、土壌飽和量  $R_{sa}$ 、貯留能力の回復度

**Abstract:** It is very important to establish storage-function model constants that considered the characteristics of a forest's runoff process. The purpose of our study is to obtain sufficient data to evaluate the degree of recovery of the forest basin's storage capability in non-rainfall periods between a previous rainfall and a major rainfall. The amount of soil saturation ( $R_{sa}$ ) is calculated to estimate this recovery degree in three actual basins: the Onga River basin in Fukuoka Prefecture, the Honmyo River basin in Nagasaki Prefecture, and the Izushi River basin in Hyogo Prefecture. According to the results,  $R_{sa}$  influences the saturation degree of forest soil due to the previous rainfall, as does the magnitude of the relation between the previous rainfall and the major rainfall. The recovery degree of the storage capability depends on the characteristics of the previous rainfall.

**Key words:** storage function method, previous rainfall, amount of soil saturation, recovery degree of storage capability

## I はじめに

「貯留関数法」は日本の森林が一般に荒廃状態であった昭和36年に考案され、ダム計画を有する流域の流出解析法として利用されている(4)。しかし、現代の森林は成熟期を迎えており、従来の貯留関数法の考え方では流出に対する森林の効果を十分反映できるとは言い難い。

加藤・上野(2004)は、貯留関数法に必要な5個の定数( $T$ : 流出遅れ時間,  $f_1$ : 一次流出率,  $R_{sa}$ : 土壌飽和量,  $K$  および  $p$ : 定数)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求め、森林流域の流出特性を反映させた。一方、その検証は一流域を対象に想定降雨に対してしか行われていない(3)。

豊田・本田(2011)は水文観測データをもとに  $f_1$  と  $R_{sa}$  を決定し、複数の実流域で流出解析を行った結果、先行降雨（流出解析において計算の主たる降雨に先行する降雨、後出の図-2参照）がない場合には流域の流出特性を十分に反映できたが、先行降雨がある場合には計算流量と観測流量との間に大きな誤差が生じた(5)。その原因として、無降雨期間における土壌貯留能力の回復が考慮されていなかったことが挙げられる。そこで本研究では、森林流域における土壌貯留能力の回復度を定量的に評価するための基礎データを得ることを目的とする。

## II 貯留関数法

1. 貯留関数法の概要 基礎式は次のとおりである。

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

$$\frac{dq}{dt} = \frac{(I-q)^{1-p}}{Kp} \quad (2)$$

ここに、 $S$ は流域貯留量、 $q$ および $I$ は $T$ を考慮した流出高および流入高である。実用的には計算値と観測値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一次流出率 $f_1$ で流出が始まる「流出域」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 $q_2$ から全流出量 $Q$ を次式で求める。

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

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( $K$ ,  $T$ ,  $p$ ,  $f_1$ ,  $R_{sa}$ )について初期値を設定し、各定数をトライアル計算により修正して、計算値と観測値が適合する最適な組合せを選択する。

2. 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：これらの初期値は水文観測データをもとに決定する。具体的には図-1のとおり、一つの降雨イベントに対して直接流出高( $I$ )を横軸、貯留高

(S)を縦軸として両対数グラフを描き、 $T$ を変化させて直線近似し、 $V=1$ 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であり、トライアル計算では最小限の変化にとどめる。

2)  $R_{sa}$ の決定方法：現地観測によって求められる対象流域の有効貯留量を用いる(3)。同値は流域の土壌特性を明確に表しており、トライアル計算では修正しない。

3)  $f_i$ の決定方法： $f_i$ はトライアル計算時に計算流量と観測流量を一致させるフィッティングパラメータとする。 $f_i$ の初期値の目安には流域の平均流入係数を用い、 $f_i$ を適宜修正し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のとおり、主たる降雨に対して先行する降雨がある場合、流域の保水能力は先行降雨によって低下し、主降雨の発生時には流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。(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。

### 3. 豊田・本田による $R_{sa}$ および $f_i$ の決定方法

1)  $R_{sa}$  および  $f_i$  の初期値の選定方法： $K$ 、 $T$ 、 $p$ と同様に、水文観測データをもとに推定する。具体的には図-3のとおり、横軸に降雨イベント毎の総雨量、縦軸に同じく総

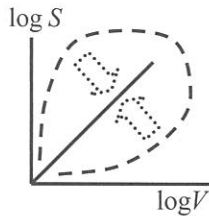


図-1.  $K$ 、 $T$ 、 $p$ の決定方法

Fig.1 Determination of  $K$ ,  $T$  and  $p$

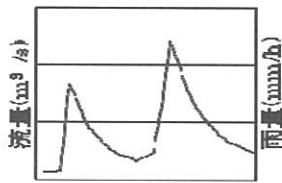
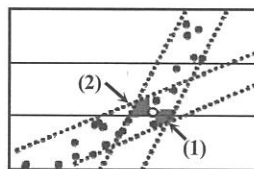
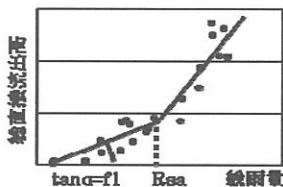


図-2. 先行降雨が存在する降雨パターンの例

Fig.2 The rainfall pattern in which previous precipitation exists



(1) :  $R_{sa}$ が大きく  $f_i$ が小さい領域  
(2) :  $R_{sa}$ が小さく  $f_i$ が大きい領域

図-3.  $R_{sa}$  および  $f_i$  の決定方法  
Fig.3 Determination of  $R_{sa}$  and  $f_i$

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  $f_i$  とする。なお、この方法によれば  $R_{sa}$  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、 $R_{sa}$  も  $f_i$  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  $f_i$  の有効範囲：初期定数による計算流量が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  $f_i$  の値を変化させる必要がある。具体的には、図-3中の(1)のような  $R_{sa}$  が大きく  $f_i$  が小さい領域で両値を変化させる。一方、計算流量が観測流量よりも小さい場合には、流域の貯留能力は過大に評価されており、図-3中の(2)のような  $R_{sa}$  が小さく  $f_i$  が大きい領域で両値を変化させる。

### III 研究手法および解析条件

#### 1. 研究手法および解析手順

本研究では、豊田・本田の手法を一部改変し、複数の実流域で流出解析を行う。まず、豊田・本田で用いられた計算手法で先行降雨のない降雨パターンに対して流域を代表する5個のモデル定数を定める(5)。求めた定数を先行降雨と無降雨期間を有する降雨に用いて流出解析を行う。その結果から、先行降雨および無降雨期間が定数の変化にどのような影響を与えているのかを評価する。

#### 2. 豊田・本田の手法との変更点

1) 先行降雨と主降雨の分割：豊田・本田は、先行降雨のある降雨パターンでも、先行降雨と主降雨をまとめて流出計算している(5)。しかし、主降雨時の流出は先行降雨の影響を受けており、先行降雨時とは異なる流出特性を有すると考えられるため、そのままでは計算に齟齬が生じる。また、無降雨期間における時間ごとの詳細な土壌の回復も考慮することができない。そこで、先行降雨と無降雨期間の影響を調査するため、図-4のように先行降雨と主降雨に分けて主降雨のみを計算対象とする。

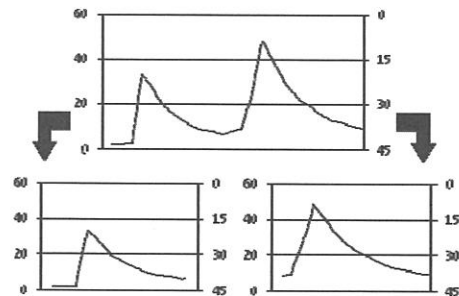


図-4. 先行降雨と主降雨の分割

Fig.4 Separation of previous rainfall and major rainfall

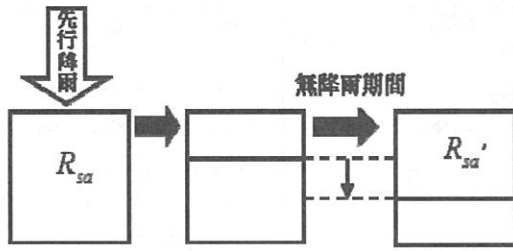


図-5. 貯留回復量の考え方

Fig.5 Concept of recovery of soil-storage capability

2) トライアル計算におけるモデル定数の取り扱い:  $K$ ,  $T$ ,  $p$  は流域の特性を表わすものとして変化させない。豊田・本田ではトライアル計算によって  $f_i$  と  $R_{sa}$  を変化させて計算しているが (5), ここでは土壌内に貯留された降雨の量的変化に注目するため,  $f_i$  は変化させずに  $R_{sa}$  だけを変化させ, 変化後の  $R_{sa}$  を  $R'_{sa}$  とする。

3) 貯留回復量: 先行降雨によって低下した土壌貯留能力は無降雨期間を経ることによって回復する。本研究ではこの回復量を貯留回復量と呼ぶ。貯留回復量は, 主降雨のみを計算して得られた土壌飽和量 ( $R'_{sa}$ ) から, 先行降雨による貯留能力低下後の土壌飽和量 ( $R_{sa}$ ) を引くことによって求めることができる。つまり, 先行降雨によって減少した  $R_{sa}$  の無降雨期間における変化量から貯留回復量を見積もる。

貯留回復量は, 図-5 をもとに式(4)により求める。

$$\text{貯留回復量} = R'_{sa} - (R_{sa} - \text{先行降雨量}) \quad (4)$$

3. 検討対象流域の概要 観測データが豊富な福岡県遠賀川流域, 長崎県本明川流域, 兵庫県出石川流域の3流域を検討対象流域とした。図-6 および表-1 に各流域のデータを示す。

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・流出観測結果を用いた。直接流出量と基底流量の分離は図-6 の方法によった (1)。

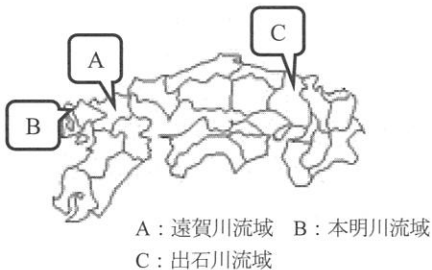


図-6. 検討対象流域

Fig.6 Location of study river basins

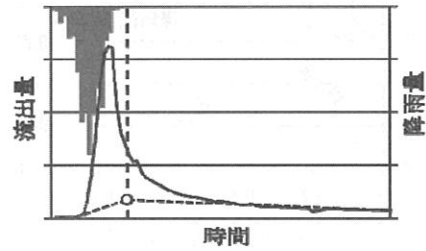


図-7. 直接流出と基底流出の分離

Fig.7 Separation of direct runoff and base flow

数値計算はルンゲ・クッター法によった。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, 精度も良いことから実務計算にも多用されている (2)。

IV 結果および考察

ここでは, 流出解析によって得られた  $R'_{sa}$  および(4)式から得た貯留回復量と, 先行降雨量, 総雨量, 無降雨期間などを比較する。

まず, 図-8 は縦軸を  $R'_{sa}$ , 横軸を先行降雨量とし, ともに総雨量で除して無次元化した。同図では先行降雨が大きくなるほど  $R'_{sa}$  が  $R_{sa}$  に比べて減少する傾向がみられた。これは先行降雨により土壌貯留能力が低下し, その後, 無降雨期間を経たとしても土壌貯留能力は完全に回復されず,  $R_{sa}$  が減少したと考えられる。

次に, 図-9 では, 縦軸を貯留回復量, 横軸を先行降雨量とし, ともに総雨量で除して無次元化した。ここでは先行降雨が大きくなるほど貯留回復量が増加する傾向がみられた。これは(4)式より, 先行降雨量は貯留回復量に正に働き, 無降雨期間中に, 先行降雨で減少した分だけ貯留能力が回復できるためと考えられる。

図-10 の縦軸は先行降雨を考慮した  $R'_{sa}$ ; 横軸は無降雨期間である。ここでは, 無降雨期間が長くなるにつれて  $R'_{sa}$  が増加する傾向がみられた。これは, 無降雨期間が長いほど, 先行降雨によって低下した  $R_{sa}$  が大きく回復したためと考えられる。

表-1. 流出解析に用いた水文観測データ

Table 1 Hydrological observation data used for runoff analyses

| 流域名 | 先行降雨がない降雨パターン | 先行降雨がある降雨パターン   |
|-----|---------------|---|
| 遠賀川 | 1983/7/4~6    | 1981/7/7~10, 1987/7/27~29, 1991/7/27~29<br>1991/6/10~13, 1996/6/18~20   |
| 本明川 | 1999/8/26     | 1980/7/28~30, 1982/7/20~23, 1985/6/27<br>1993/8/16~17, 1993/6/19~23, 1997/7/10~11<br>1998/6/22~24, 1999/9/22~24, 2006/7/2~4 |
| 出石川 | 1975/10/17    | 1982/7, 1998/9, 1990/9, 2004/9, 2004/10   |

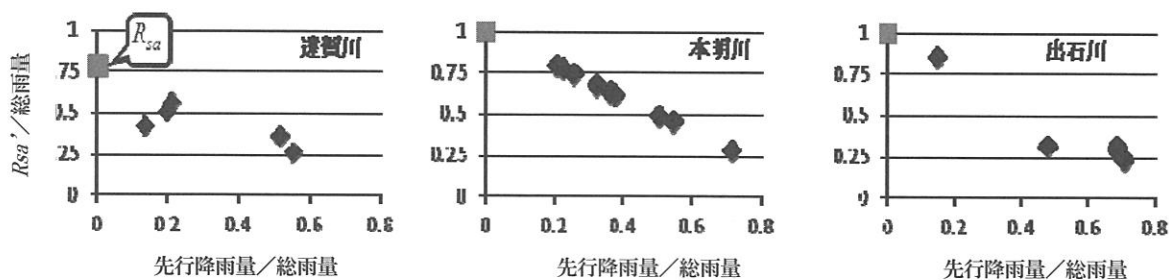


図-8.  $R_{sa}'$  と先行降雨量との関係  
Fig.8 Relationship between  $R_{sa}'$  and amount of previous rainfall

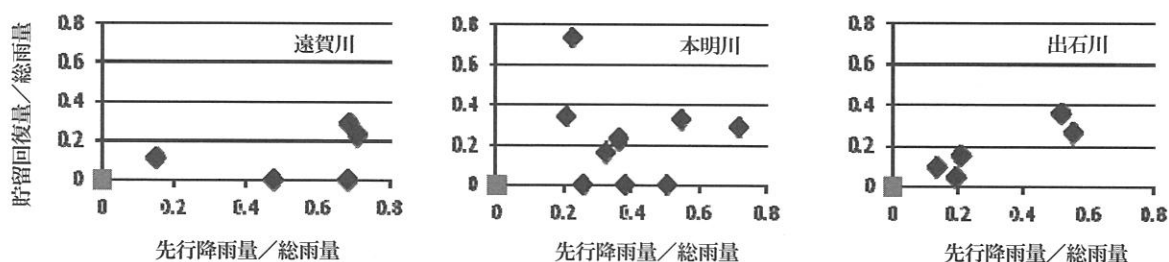


図-9. 貯留回復量と先行降雨量との関係  
Fig.9 Relationship between amount of a recovery of soil-storage capability and amount of previous rainfall

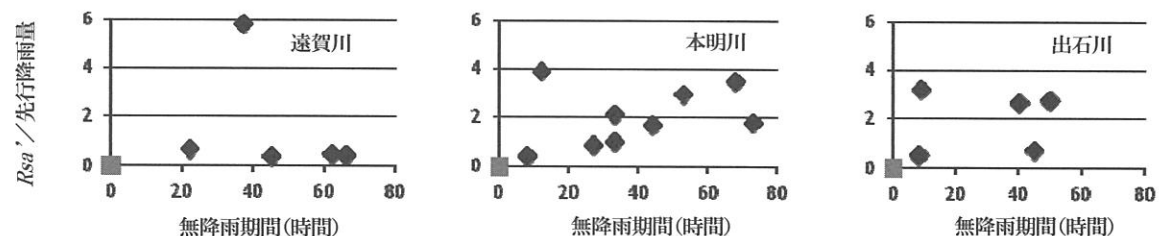


図-10.  $R_{sa}'$  と無降雨期間との関係  
Fig.10 Relationship between  $R_{sa}'$  and non-rainfall period

## V おわりに

土壌飽和量は先行降雨による森林土壌の飽和の程度、主降雨量に対する先行降雨量の相対的な大きさの程度、無降雨時間の長さの影響を強く受けている。貯留能力の回復度も、先行降雨の性質と無降雨時間の長さに依存することが明らかとなった。それらの結果を豊田・本田(5)に考慮することにより、先行降雨のある降雨パターンに対して精度よく流出解析を行うことが可能となる。解析データ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) : pp.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) : pp.747-754
- (3) 加藤英朗・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) : pp.26-32
- (4) 木村俊晃 (1975) 貯留関数法, 57pp., 河鍋書店, 東京
- (5) 豊田晋平・本田尚正 (2011) 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, 関東森林研究, 62 : pp.215-218