

貯留能力の回復による土壌飽和量 R_{sa} の変化を考慮した貯留関数モデルの提案

豊田晋平・本田尚正・安島裕太 (茨城大院)

要旨：流域内に主降雨に先行する降雨（先行降雨）が存在する場合、流出解析では無降雨期間や先行降雨の規模に起因する土壌の流出特性の変化を考慮する必要がある。本研究ではそれらが土壌の貯留能力の回復度に及ぼす影響を調査し、新たな貯留関数モデルを提案する。兵庫県出石川流域、長崎県本明川流域、福岡県遠賀川流域を対象とした流出解析の結果、無降雨期間と土壌の貯留回復量との間には明確な関係性は見いだせなかったが、先行降雨量と土壌の貯留回復量との間には明瞭な相関が見られた。したがって、ここでは先行降雨量と土壌の貯留回復量の関係から土壌飽和量 R_{sa} を決定した。兵庫県大屋川流域を対象とした流出解析の結果、5つの実績降雨に対して計算値と観測値が適合した。一方、適合しなかった計算結果もあったことから、今後、先行降雨の継続時間やピーク降雨量、無降雨期間や一次流出率の変化など、さらなる要素を組み込む必要がある。

キーワード：貯留関数法、先行降雨、土壌飽和量、土壌の貯留能力の回復度

Abstract: When an early rainfall precedes the main rainfall in a river basin, the runoff analysis must consider the change in the soil's runoff characteristics due to non-rainfall periods and the scale of previous rainfall. This paper investigates how these factors influence the recovery level of the soil-storage capability and proposes a new storage-function model. Three basins are chosen for this examination: the Izushi River basin in Hyogo Prefecture, the Honmyo River basin in Nagasaki Prefecture, and the Onga River basin in Fukuoka Prefecture. According to the analytical results, no clear relationship can be found between the non-rainfall periods and the amount of recovery of soil-storage capability, but an obvious interrelation between the scale of previous rainfall and this capability can be found. Therefore, the amount of soil saturation R_{sa} is determined based on the relationship between the amount of previous rainfall and the amount of recovery of soil-storage capability. The analytical results of the Ohya River basin in Hyogo Prefecture show that the calculated flow discharge corresponds to the observed data on five rainfalls. However, some results are not applicable, so the present model must reflect additional elements, such as the duration and peak intensity of previous rainfall, the non-rainfall periods, and the change in runoff coefficient.

Key words: storage-function method, previous rainfall, amount of soil saturation, recovery level of soil-storage capability

I はじめに

流域内に主降雨に先行する降雨（先行降雨）が存在する場合、流出解析ではそれによる土壌の流出特性の変化を考慮する必要がある。加藤・上野（2004）は、貯留関数法に必要な諸定数を先行降雨の有無により評価した。しかし、同手法には無降雨期間や先行降雨の規模による影響は反映されていない（3）。

本研究では、先行降雨の性質の違いが土壌の貯留能力の回復度に及ぼす影響を調査し、それらを考慮した貯留関数モデルを提案する。

II 従来の研究の概要および課題

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 と I は流出遅れ時間 T を考慮した流出高と流入高、 K と p は定数である。

ここでは計算値と観測値を適合させるため「 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（一次流出率 f_1 ）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。5つの定数 (K , T , p , f_1 , R_{sa}) は、計算値と観測値が適合するよう最適な組合せをトライアル計算で決定する。

Shimpei TOYODA, Naomasa HONDA and Yuta AJIMA (Graduate School of Science and Engineering, Ibaraki University, Bunkyo 2-1-1 Mito Ibaraki 310-8512). A storage-function model that considers the influence of the amount of soil saturation R_{sa} on recovery soil-storage capability

2. 加藤・上野によるモデル定数の決定方法

- 1) K, T, p の決定方法：水文観測データをもとに決定する。図-1 のとおり、一つの降雨イベントに対して横軸に直接流出高 (V)、縦軸に貯留高 (S) をとった両対数グラフを描き、 T を変動させて直線近似し、 $V=1$ 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と考えられ、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：現地観測に基づく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、トライアル計算において修正は行わない。
- 3) f_i の決定方法： f_i 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し、両者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評価：図-2 のとおり、計算の主たる降雨（以下、「主降雨」と称する）に対して先行降雨が存在する場合、流域の保水能力は先行降雨によって低下し、主降雨発生時には流出量が大きくなる。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。

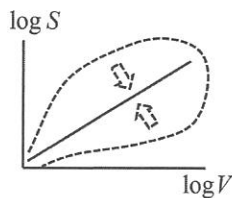


図-1. K, T, p の決定

Fig.1 Determination of K, T and p

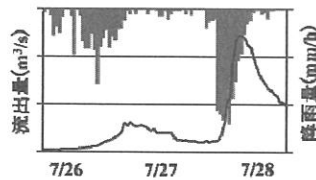


図-2. 先行降雨が存在する降雨パターン例

Fig.2 The rainfall pattern in which previous precipitation exists

3. 豊田・本田によるモデル定数の決定方法

- 1) 加藤・上野との変更点：豊田・本田 (2011) は、有効貯留量の算定に必要な土壌分析データの入手が現実的には非常に困難なことから、 R_{sa} と f_i の初期値を次のように推定した。

図-3 のとおり、降雨イベント毎に横軸に総雨量、縦軸に総直接流出高をプロットし、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 (4)。

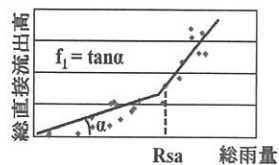
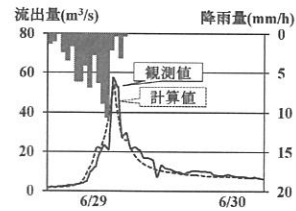


図-3. R_{sa}, f_i の初期値の決定

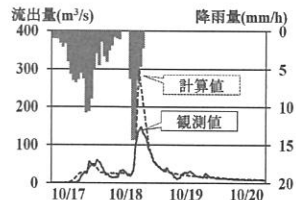
Fig.3 Determination of initial condition of R_{sa} and f_i

- 2) 当手法の評価と課題：図-4 に、1) による解析結果の一例 (埼玉県荒川水系二瀬ダム流域) を示す。



	初期値	最終値
K	15.0	18.0
T	1.0	1.5
p	0.29	0.29
R_{sa}	89.8	79.7
f_i	0.1	0.2

(a) 先行降雨が存在しない場合



	初期値	最終値
K	9.6	9.6
T	2.0	2.0
p	0.26	0.26
R_{sa}	89.8	106.0
f_i	0.1	0.14

(b) 先行降雨が存在する場合

図-4. 豊田・本田 (2011) の解析結果の一例
Fig.4 Example of an analytical result by Toyota and Honda (2011)

先行降雨が存在しない場合、トライアル計算において K と p は初期値が維持され、 R_{sa} と f_i の値も最小限の範囲で変化した。また、計算流量と観測流量の波形はほぼ一致した。一方、先行降雨が存在する場合、 K, T, p の初期値を維持した状態で R_{sa} と f_i を変化させて流出計算を行うと、計算ピーク流量は観測ピーク流量を大きく上回った。原因として、当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いことが挙げられる。この回復効果とは、具体的には R_{sa} と f_i の変化であり、先行降雨の性質の違いによる影響を強く受けると考えられる。

III 研究手法および解析条件

1. 研究手法および解析手順 まず、先行降雨が存在する降雨パターン（無降雨期間 4 日以内）を対象に先行降雨の規模と無降雨期間が貯留能力の回復度に与える影響を調査する。次にそれらを考慮した貯留関数モデルを提案し、現地への適用性を評価する。

2. 貯留能力の回復度の算定方法 まず、先行降雨が存在しない場合の初期モデル定数を豊田・本田により設定する。次にそれらの定数を先行降雨が存在する場合の「主降雨部分」に適用する。このとき、流域の土壌は先行降雨の影響を受けており、そのままでは計算流量と観測流量は一致しない (4)。そこで、先行降雨の影響を最も強く受けられていると考えられる R_{sa} を主降雨部分の計算流量と観測流量が一致するように変化させ、変化後の R_{sa} の値を R_{sa}' とする。

なお、先行降雨の影響は f_i も同様に受けられていると考えられるが、ここではとくに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 は変化させない。

この R_{sa}' は、先行降雨による貯留能力の低下と無降雨期間中の貯留能力の回復を反映したものであり、(4)式のように表すことができる。(4)式および R_{sa}' の値から、土壌の貯留能力の回復量（以下、「貯留回復量」と称する）は(5)式のとおり求められる。

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

$$\text{貯留回復量} = \text{先行降雨量} - (R_{sa} - R_{sa}') \quad (5)$$

以上の検討を複数の観測降雨に対して行い、先行降雨の規模および無降雨期間を横軸に、貯留回復量の値を縦軸にとってグラフを描き、その傾向を見る。

3. 検討対象流域の概要 ここでは、観測データが豊富であること、十分に貯留能力を有する流域であること、を念頭に、兵庫県出石川流域、長崎県本明川流域、福岡県遠賀川流域の3流域を対象に貯留回復量の傾向を調べた。それらの結果を考慮した新しい貯留関数モデルの適用性の評価には、兵庫県大屋川流域の観測データを利用した。図-5に各流域の位置を、表-1に各流域の流域面積をそれぞれ示す。



図-5. 検討対象流域
Fig.5 Location of study river basins

表-1. 流域面積
Table 1 Catchment area

	流域面積(km ²)
出石川流域	199.1
本明川流域	35.8
遠賀川流域	40.0
大屋川流域	217.9

4. 解析に必要な条件

流出解析に必要な水文資料は国土交通省の公表データを用いた。直接流出量と基底流出量の分離は、図-6の方法によった(1)。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)。

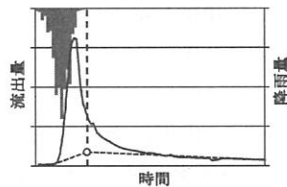


図-6. 直接流出と基底流出の分離
Fig.6 Separation of direct runoff and base flow

IV 結果および考察

1. 先行降雨量、無降雨期間と貯留回復量の関係

図-7に、各流域の先行降雨量および無降雨期間と貯留回復量との関係を示す。どの流域でも先行降雨の規模が大きくなるにつれ貯留回復量が大きくなる傾向が見られた。降雨は土壌内にいったん貯留され、

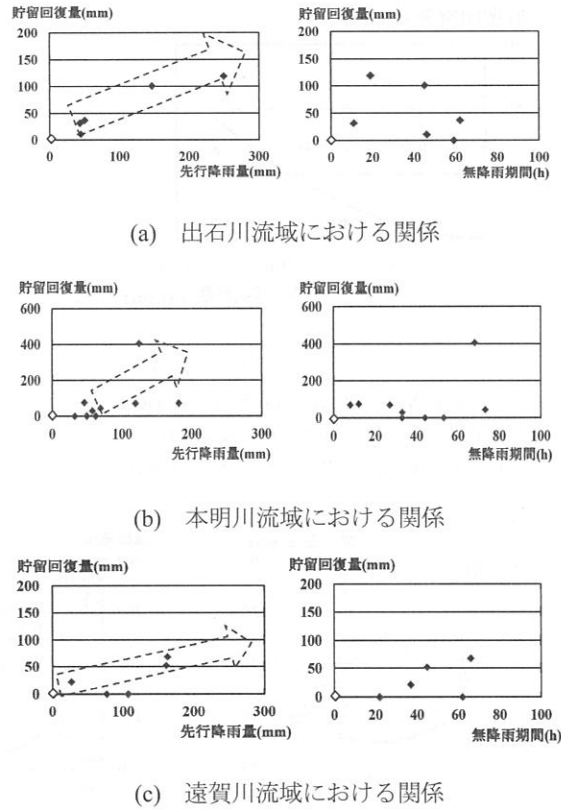


図-7. 先行降雨量・無降雨期間と貯留回復量の関係
Fig.7 Relationship between amount of previous rainfall, non-rainfall period and amount of recovery of soil-storage capability

その後流出するが、降雨の規模に関わらず、一定量は流出せずに土壌内に保持される。したがって、降雨量と土壌内に保持される一定量の差すなわち貯留回復量は、降雨規模が大きいくほど大きくなる。

一方、無降雨期間との関係では、どの流域でも貯留回復量との間に明確な関係性は見いだせなかった。これは本来、無降雨期間が長いほど貯留能力の回復度も大きいと考えられるが、それ以上に先行降雨の規模の影響が大きかったと推察される。

2. 貯留能力の回復による R_{sa} の変化を考慮した貯留関数モデルの提案

1) モデル定数の設定方法：図-7から、貯留回復量に影響を及ぼす要因は主として先行降雨量であると判断できる。したがって、本研究では先行降雨に続く主降雨発生時の流出計算に必要な R_{sa} ($=R_{sa}'$) を先行降雨量と貯留回復量の間で決定する。後出の図-8のとおり、図-7の先行降雨量と貯留回復量との関係図に近似線を描き、それを用いて計算対象とする降雨パターンの先行降雨量に対応する貯留回復量を求める。これを(4)式に代入して R_{sa}' を求める。

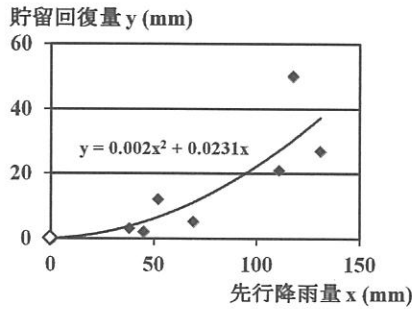


図-8. 大屋川流域における
先行降雨量と貯留回復量の関係
Fig.8 Relationship between amount of previous
rainfall and amount of recovery of
soil-storage capability in Ohya River basin

表-2. 大屋川流域の貯留関数モデル定数

Table 2 Storage-function model constants of
Ohya River basin

(a) 初期モデル定数

計算期間	K	T	p	R _{sa}	f _i
1987/10/16~10/18	45.0	2.0	0.2	100.0	0.32

(b) 各降雨に対する貯留回復量および R_{sa}' の値

計算期間	先行降雨量(mm)	無降雨期間(h)	貯留回復量(mm)	R _{sa} '
1982/9/9-9/14	110.7	42	21.0	26.8
1985/6/24-6/29	69.2	39	5.2	42.0
1998/9/22-9/26	117.6	35	50.0	30.4
1998/10/16-10/18	45.1	4	2.1	60.0
2004/9/26-10/1	52.1	39	12.1	56.4
2006/9/5-9/11	130.8	50	27.0	37.2
2006/10/1-10/8	38.2	64	3.2	68.5

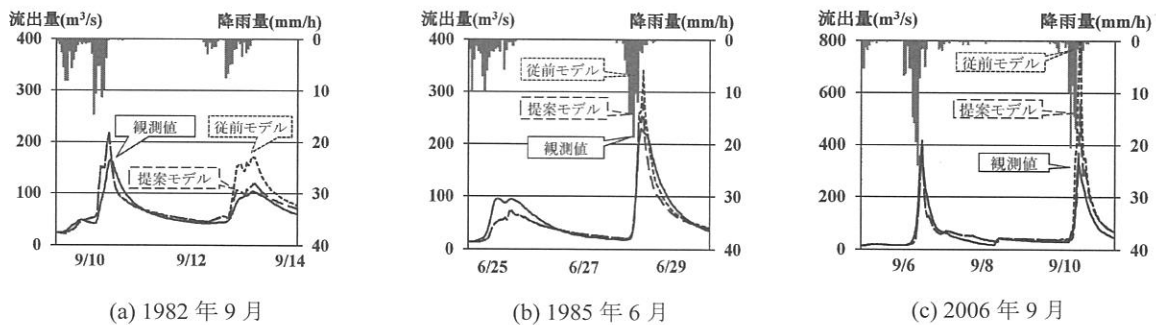


図-9. 大屋川流域における解析結果
Fig.9 Analytical result in Ohya River basin

2) 提案モデルの評価: 図-8 に兵庫県大屋川流域の先行降雨量と貯留回復量の関係を、表-2 に諸定数を示す。ここでは表-2 の7降雨を対象に解析を行った。

図-9 に、本研究の結果と貯留機能の回復による R_{sa} の変化を考慮しない方法 (従前モデル) による結果を示す。従前モデルではいずれも主降雨の計算値が観測値に比べて大きく、波形の適合度は概して悪い。とくに先行降雨が大規模な(c)でその差が顕著である。一方、本研究の結果では従前モデルに比べ主降雨の流出量が小さく表れ、無降雨期間における土壌の貯留能力の回復効果を反映することができた。以上の結果、(a)、(b)を含めた計5降雨に関して計算値と観測値の波形はほぼ一致した。一方、(c)を含めた2降雨では十分に波形を適合させるには至らなかった。

その原因には図-8 の精度の問題が挙げられる。先行降雨量と貯留回復量の関係にはばらつきがあり、その傾向は先行降雨量が大きいと顕著である。その場合、先行降雨の継続時間やピーク降雨量といった先行降雨量以外の要素が影響している可能性がある。さらに本研究で考慮されていない無降雨期間や f_i の変化の影響などについても検討が必要である。

V おわりに

本研究では、流域内に主降雨に先行する降雨が存在する降雨パターンに対して流出解析を行うにあたり、土壌飽和量 R_{sa} に代表される貯留能力の回復を考慮した貯留関数モデルを提案し、現地への適用性について一定の評価を得た。一方、計算値と観測値が適合しない例もあることから、今後、当モデルにさらなる要素を組み込む必要がある。

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)**: pp.26-32
- (4) 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