

土壌貯留能力の回復によるモデル定数の変化を考慮した貯留関数法の計算手法

安島裕太・本田尚正（茨城大院）

要旨：流域内に主たる降雨（主降雨）に先行する降雨（先行降雨）を有する降雨パターンでの流出解析を貯留関数法によって行う場合、主降雨時の流出計算には先行降雨終了後の無降雨期間による土壌貯留能力の回復を考慮する必要がある。本研究では、主降雨時の貯留関数モデル定数である土壌飽和量 R_{sa} と一次流出率 f_1 に無降雨期間による土壌貯留能力の回復を考慮し、計算流量と観測流量との適合度を高めることを目的とする。長崎県本明川流域を対象に流出解析を行った結果、 R_{sa} と f_1 をともに変化させることによって計算の適合度が高まることがわかった。さらに、計算流量はモデル定数の初期値を同定する際に用いる実績降雨量と流出解析の対象とする主降雨量の規模の違いによる影響を大きく受けることがわかった。

キーワード：貯留関数法, 土壌飽和量, 一次流出率, 土壌貯留能力の回復

Abstract: When an early rainfall precedes the main rainfall in a river basin, the main rainfall's runoff analysis must consider the recovery of soil-storage capability due to non-rainfall periods after the early rainfall. In this paper, we consider the recovery of storage capability in the storage-function model constants R_{sa} and f_1 to improve the conformity of the calculated flow discharges and the observed data. Based on our analytical results of the Honmyo River Basin in Nagasaki Prefecture, the calculated values and the observed data are in good agreement after changing both R_{sa} and f_1 . In addition, the calculated results are greatly influenced by the difference in the scale of the rainfall used to determine the initial model constants and the main rainfall which is the target of runoff analysis.

Keywords: storage-function method, amount of soil saturation, primary runoff rate, recovery level of soil-storage capability

I はじめに

流域内に主たる降雨（主降雨）に先行する降雨（先行降雨、後出の図-3参照）が存在する場合、流出解析ではそれによる土壌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（4）。しかし、同手法には先行降雨終了後の無降雨期間や、先行降雨の規模による影響は反映されていない。安島ら（2012）は、無降雨期間や先行降雨の規模による土壌の流出特性の変化が土壌貯留能力の回復に及ぼす影響を調査し、先行降雨量と土壌貯留能力の回復量との間に明確な相関関係を見いだした（1）。豊田ら（2012）は安島らの結果をもとに、主降雨時の土壌飽和量 R_{sa} を新たに決定し、計算流量を観測流量に適合させることができた。その一方、計算結果の中には十分適合しなかった例もあった（5）。

そこで本研究では、無降雨期間による土壌貯留能力の回復効果を土壌飽和量 R_{sa} だけでなく、一次流出率 f_1 にも考慮することによって、流出解析による計算結果と観測結果との適合度を高めることを目的とする。

II 貯留関数法

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。

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

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

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「 $f_1 - R_{sa}$ 方式」により、計算値と観測値とを適合させる。まず、流域を降雨開始と同時に流出が始まる「流出域」（流出域の面積の割合を一次流出率 f_1 と称する）と、累加雨量が土壌飽和量 R_{sa} （土壌が貯留できる降雨量）に達した後に流出が始まる「浸透域」に分ける。次に、流出域からの流出量 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。

2. モデル定数の決定方法

5つの定数 (K, T, p, f_1, R_{sa}) について初期値を設定し、トライアル計算によって修正することにより、計算値と観測値が適合する最適な組合せを選択する。

- 1) K, T, p の決定方法：流域の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する直接流出高 (V) と貯留高 (S) との関係を両対数グラフで描き、遅れ時間 T 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、トライアル計算では変化させない。
- 2) R_{sa} および f_1 の初期値の選定方法： K, T および 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-2に示すとおり、横軸に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。このとき、 R_{sa} および f_1 はいずれも近似値であることから、ともにトライアル計算の対象とする。
- 3) トライアル計算時の R_{sa} および f_1 の有効範囲：モデル定数の初期値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_1 の値を変化させる必要がある。具体的には図-2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、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-2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。

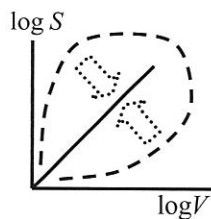


図-1. K, T, p の決定方法
Fig.1 Determination of K, T, p

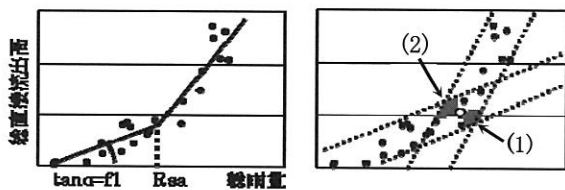


図-2. R_{sa} および f_1 の決定方法
Fig.3 Determination of R_{sa} and f_1

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、先行降雨のない降雨パターンに対して5個の初期モデル定数を決定する。それらを図-3に示すような先行降雨を有する降雨パターン（無降雨期間4日以内）に適用して流出解析を行うことにより、先行降雨が土壤貯留能力の回復に与える影響を調べる。次に、土壤貯留能力の回復を考慮した土壤飽和量 R_{sa}' を用いて流出解析を行い、 f_1 を変化させる（変化後の f_1 を「 f_1' 」とする）ことにより、計算流量と観測流量の適合度を高める。

2. R_{sa}' の算定方法

- 1) 先行降雨と主降雨の分割：先行降雨のある降雨パターンでは、主降雨による流出は先行降雨の影響を受けている。したがって、先行降雨と主降雨をまとめて流出計算を行うと計算結果に齟齬が生じてしまい、無降雨期間が土壤貯留能力の回復に及ぼす影響を調べることもできない。そこで図-4のように降雨を無降雨期間を境として先行降雨と主降雨に分け、主降雨のみを計算対象とする。
- 2) トライアル計算におけるモデル定数の取り扱い：上述の流出計算では、土壤内に貯留された降雨の量的変化に注目するため、 f_1 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}' [実績値]」とする。
- 3) 貯留回復量の算定：ここでは、先行降雨によって低下した土壤貯留能力が無降雨期間を経て回復する量を「貯留回復量」と呼ぶ。貯留回復量は図-5と式(4)により、

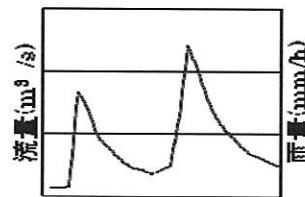


図-3. 先行降雨が存在する降雨パターンの例
Fig.2 The rainfall pattern in which previous precipitation exists

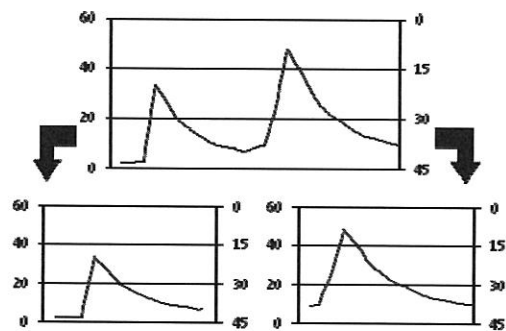


図-4. 先行降雨と主降雨の分割

Fig.4 Separation of previous rainfall and major rainfall

R_{sa}' [実績値]から先行降雨による貯留能力低下後の土壌飽和量 ($R_{sa} - \text{先行降雨量}$) を減じて求められる。

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

なお、図-5中の「 R_{sa}'' 」は初期モデル定数 R_{sa} と「流域が実際に保持している土壌飽和量」との差を示している。 R_{sa} は最大規模の実績降雨流出データを用いて同定されるが、実際の流域の貯留能力よりも小さく見積もられている可能性がある。これについては考察で詳述する。

(4) R_{sa}' の算定：(1)～(3)の手順を複数の実績データに適用すると、先行降雨量と貯留回復量との関係を後出の図-8のように表すことができる。この関係図に近似線を描くと、任意の先行降雨量に対する貯留回復量を見積もることができ、それにより、任意の先行降雨量に対する R_{sa}' を次式で求めることができる。

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

3. 検討対象流域および流出解析に必要な条件

ここでは、観測データが豊富な長崎県本明川流域を検討対象流域とした。図-6に本明川流域の位置を示す。

流出解析に必要な水文データは、国土交通省が公表している観測結果の中から表-1のデータを用いた。直接流出量と基底流量の分離は図-7の方法に拠った(2)。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、精度も良いことから実務計算にも多用されている(3)。

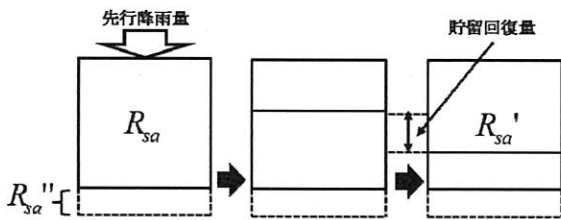


図-5. 貯留回復量の考え方

Fig.5 Concept of recovery of soil-storage capability



図-6. 検討対象流域

Fig.6 Location of study river basins

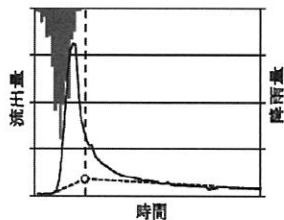


図-7. 直接流出と基底流出の分離

Fig.7 Separation of direct runoff and base flow

IV 結果および考察

本明川流域における先行降雨量と貯留回復量との関係を図-8のように表し、前章で述べた解析手順にしたがって流出解析を行った。図-9にその結果の一例を示す。

同図の(a)のとおり、豊田ら(2012)のように主降雨時の R_{sa} のみ変化させ、 f_1 は初期モデル定数 ($f_1=0.35$) のまま無変化とすると、主降雨時のピーク流量は観測値よりも大きく計算されてしまった。これは表-1のとおり、主降雨時の降雨量 (72mm) が初期モデル定数同定時の降雨量 (148mm) よりも小さい (したがって流出率も小さい) にもかかわらず、 f_1 の値を初期値のままとしたため、流出量が実際よりも大きく計算されてしまったと考えられる。そこで、 f_1 を「 $0.35 \rightarrow 0.21$ 」まで小さく変化させると、計算値と観測値の適合度は高まった。同様の方法により、表-1(b)の降雨パターンのほとんどの流出解析において計算値と観測値の適合度は高まった。

ただし、図-9(b)の降雨パターンでは、主降雨時において R_{sa} と f_1 の両方を変化させても、計算ピーク流量の突出を抑えることができなかった。これは図-5でもふれたとおり、初期モデル定数として決定された土壌飽和量 R_{sa} が、流域が実際に保持している貯留能力より R_{sa}'' だけ小さく見積もられている可能性があり、図-9(b)のように大規模な降雨量 (主降雨量 430mm, 表-1(b)参照) の場合、それが解析結果に大きく影響したと考えられる。そこで、図-8の関係とは別途に R_{sa} を 50mm ほど増加させて流出計算を行ってみると、計算値は観測値にほぼ適合した。以上述べた「 R_{sa} に対する R_{sa}'' の存在」の是非については、今後さらなる検討が必要である。

図-10に、降雨量と R_{sa}' および f_1' との関係を示す。同図(a)では、 R_{sa}' の増加に伴って f_1' が減少する傾向がみられた。これは、無降雨期間を経て土壌の貯留能力が回復することにより、主降雨時の流出が抑えられたことを示している。同図(b)では、初期モデル定数同定時の降雨量に対して主降雨量が小さい場合、 f_1' が減少する傾向がみられた。これは図-9(a)の結果と一致する。一方、初期モデル定数同定時の降雨量に対して検討対象降雨の主降雨量が過大な場合、計算値を観測値に適合させるためには R_{sa} および f_1 の再検討が必要と思われる。

V おわりに

R_{sa} 、 f_1 および貯留能力の回復度 (R_{sa}' および f_1') は、先行降雨による土壌の飽和の程度、先行降雨量と主降雨量の相対的な大きさの程度、無降雨期間の長さの影響を強く受けている。複数の流域を対象とした解析事例の蓄積が今後の課題である。

表-1. 流出解析に用いた水文観測データ
Table 1 Hydrological observation data for runoff analyses

(a) 初期モデル定数の同定

期間	雨量(mm)	K	T	p	f1	Rsa (mm)
1999/8/26	148	2.6	1	0.53	0.35	148

(b) 先行降雨を有する水文観測データ

期間	総雨量(mm)	先行降雨量(mm)	主降雨量(mm)	無降雨期間(hr)
1997/7/10~11	253	181	72	8
1989/8/22	118	58	60	9
1985/8/31	156	111	45	10
1985/6/27	224	46	178	12
1998/6/22~24	219	119	100	27
1993/8/16~17	123	62	61	33
1999/9/22~24	177	57	120	33
1980/7/28~30	130	43	87	44
2006/7/2~4	126	32	94	53
1982/7/20~23	554	124	430	68
1993/6/19~23	191	69	122	73
1992/8/8~12	199	99	100	90

貯留回復量(mm)

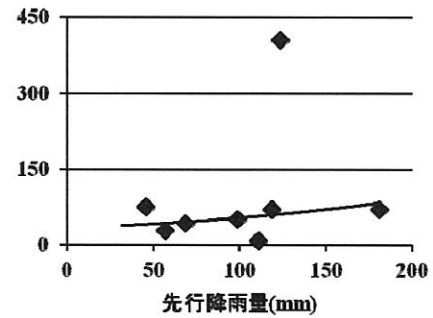
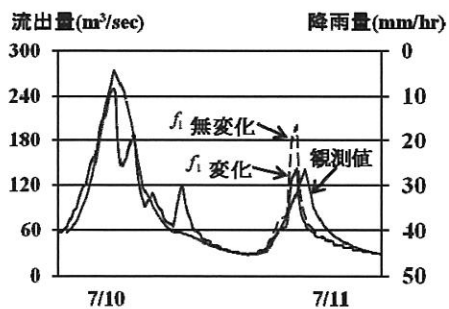
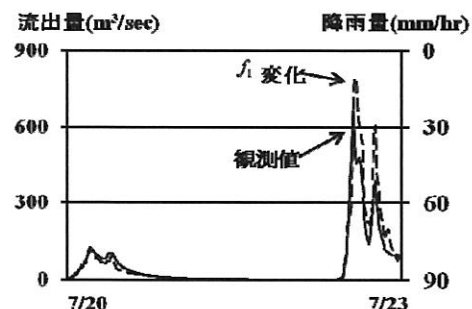


図-8. 先行降雨量と貯留回復量の関係
Fig.8 Relationship between amount of previous rainfall and amount of recovery of soil-storage capability

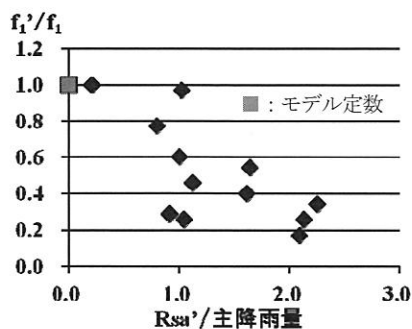


(a) 1997年7月10日~11日

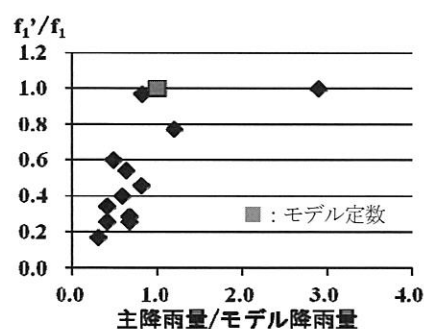


(b) 1982年7月20日~23日

図-9. 本明川における解析結果
Fig.9 Analytical result in Honmyo River Basin



(a) 主降雨量および R_{sa}' と f_1' との関係



(b) モデル降雨量および主降雨量と f_1' との関係

図-10. f_1' , R_{sa}' と降雨量との関係

Fig.10 Relationship between f_1' , R_{sa}' and amount of rainfall

引用文献

- (1) 安島裕太・本田尚正・豊田晋平 (2012): 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, 関東森林研究, **63(2)**: pp. 125-128
- (2) 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
- (3) 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
- (4) 加藤英朗・上野亮介 (2004): 洪水流出に対する森林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
- (5) 豊田晋平・本田尚正・安島裕太 (2012): 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, 関東森林研究, **63(2)**: pp. 129-132