

山地小流域における流域貯留量と流出量の関係

岡田, 裕子
九州大学大学院生物資源環境科学府

平松, 和昭
九州大学大学院農学研究院

四ヶ所, 四男美
九州大学大学院農学研究院

<https://doi.org/10.15017/4314>

出版情報 : 九州大学大学院農学研究院学芸雑誌. 58 (1/2), pp.55-60, 2003-10-01. 九州大学大学院農学
研究院

バージョン :

権利関係 :

山地小流域における流域貯留量と流出量の関係

岡田 裕子*・平松 和昭†・四ヶ所 四男美

九州大学大学院農学研究院生産環境科学部門地域環境科学講座水環境学研究室
(2003年6月30日受付, 2003年7月15日受理)

Relationship between Basin Storage and Discharge in a Small Mountainous Basin

Yuko OKADA*, Kazuaki HIRAMATSU† and Shiomi SHIKASHO

Laboratory of Drainage and Water Environment, Division of Regional Environment Science,
Department of Bioproduction Environmental Sciences, Faculty of Agriculture,
Kyushu University, Fukuoka 812-8581, Japan

緒 言

洪水流出現象の解析法として従来から数多くの手法が提案され実用に供されており, 事前に十分な降雨データ, 流量データさえあれば量的予測という面からはほぼ満足のいく結果が得られるまでになっている. 多くの手法は決定すべきモデルパラメータが多いことが欠点であったが, 近年では各種の最適化手法が考案され, 流出解析をより確かなものになっている. なかでも, 生物の進化の過程にヒントを得た遺伝的アルゴリズムは応用範囲が広く, 盛んに応用研究が行われている手法である.

ところで, 山地流域における洪水流出現象は複雑な要素から成っているため, 個々の雨水流を分布定数系として捉え, それを総合化する取り扱いほとんど不可能と言える. そこで個々の雨水流の持つ局所的法則を平均化し, その平均的法則性を通じて出水現象を把握しようとする方法論が生まれてくる.

本研究では, 流出解析のモデルパラメータの最適値探索に遺伝的アルゴリズムを用い, その探索能力を検討するとともに, 山地小流域における個々の雨水流の平均化の手段として流域貯留量に注目して, 流域貯留

量と流出量の関係から出水形態に関する考察を行った.

なお, 本研究を遂行するにあたり, 九州大学大学院農学研究院森林資源科学部門流域環境制御学研究室から, 試験流域の降雨・流量データ(2001年, 2002年)を提供頂いた. また, 本研究の一部は日本学術振興会科学研究費補助金 基盤研究(B)(研究代表: 大槻恭一, 課題番号: 14360088)の補助を得た. 記して感謝の意を表す.

データと方法

1. 試験流域と観測施設

解析の対象としたデータは福岡市の東方約15kmに位置する九州大学農学部附属福岡演習林内に設置された御手洗水試験流域での観測値である. 試験流域は流域面積0.095km², 河道長265mの山地小流域で, 流出現象の主要な発生場となる山腹の斜面長分布はほぼ正規分布に従う(田中ら, 1982). 流域の概略を図-1に示す. この流域の植生は, 低位部はヒノキ林, 高位部はマツ類を中心とした雑木林で, これらが流域面積に占める割合はそれぞれ35%および65%である. また, この流域の基岩の大部分は三郡変成岩を構成する緑泥片岩より成り, 基岩の上部に存在する表層土壌は黄褐

* 九州大学大学院生物資源環境科学府生産環境科学専攻地域環境科学講座水環境学研究室

* Laboratory of Drainage and Water Environment, Division of Regional Environment Science, Department of Bioproduction Environmental Sciences, Graduate School of Bioresource and Bioenvironmental Sciences, Kyushu University

† Corresponding author (E-mail: hiramatsu@bpes.kyushu-u.ac.jp)

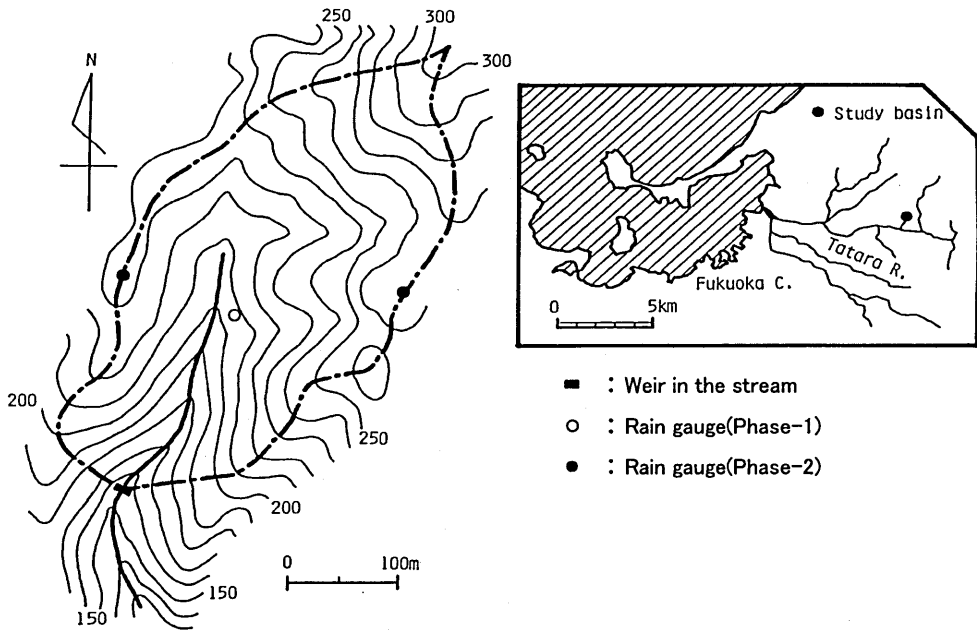


図-1 御手洗水試験流域図

色森林土壌より成っている。

観測は1982年から1987年にかけて（観測フェーズ1）と、2001年から再開し（観測フェーズ2）、観測フェーズ2は現在も継続中である。すべての観測期間において図-1に示す地点に流量測定用の堰が設置された。堰は高水位から低水位にわたって流出量を精度よく測定するため、直角三角堰と四角堰を組み合わせた複断面の堰とした。また流域の降雨量を測定するための雨量計は、図-1に示すように観測フェーズ1では河道付近の1地点のみであり、観測フェーズ2では尾根の2地点に設置されている。観測フェーズ2では観測値が2個得られているが、両者にほとんど差がないため2地点の算術平均値を解析に用いた。流出量、降雨量ともに10分間隔で記録され、解析にも10分間隔のデータを用いた。

2. 解析対象出水

本研究では洪水流出を対象としているため、10分間流出高が0.01mm以上のものを中心にできるだけ多くの出水イベントを選出した。このとき原則として、降雨開始時点、または降雨の開始後流出量が最も低い時点をその出水イベントの開始時点とし、次の降雨の開始直前、または流出量が十分に低下した時点をその出水イベントの終了時点とした。できるだけ小規模の

出水についても解析を行うために、選出したデータの中には出水規模の非常に小さなものも含まれる。それらのうち後述の流域貯留量～流出量関係の直線近似が成立せず、後述のような予め定めた範囲内でパラメータが同定されないものは解析の過程で対象から除外することとした。

3. 流出解析手法

本研究では、出水形態の変化に着目するために、流出解析手法として貯留法に分類される貯留関数法を採用した。貯留法とは、流域を雨水の貯留場であると考え、流域貯留量と流出量の間にある関数関係を想定して流出計算を行う方法で、貯留関数系とタンクモデル系に大別される。両者とも、洪水流出、長期流出解析のどちらにも適用可能ではあるが、前者は洪水流出に、後者は長期流出に適用される場合が多い。

貯留関数法では流域貯留量と流出量の関係を次のように表す（角屋・永井，1980）。

$$S_t = KQ_t^P \quad (1)$$

$$S_t = \int_0^{T-T_1} Idt - \int_0^T Q_t dt \quad (2)$$

ここで、 S_t は流域貯留量、 Q_t は流出量、 K 、 P は

パラメータ, I は流入量, T_l は遅れ時間である。通常, Q_l には直接流出量, I には有効降雨量が用いられる。洪水流出の場合, 流域貯留量と流出量の関係は上昇部と下降部では異なり, ループを描くことが多いが, 木村 (1975) は T_l の導入によってこのループがほぼ解消されることに着目し, (1), (2) 式を提唱した。 S_l , Q_l の添え字 l は T_l を考慮することを意味している。

ここで, 解析に用いる流出量は直接流出量, 流入量は有効降雨量なので, 事前に観測値からこれらを算定する必要がある。どちらもさまざまな算定法があるが, 本研究ではプログラムに乗せやすいように, 直接流出量は出水開始時点の流出量を基底流量として, これを観測値から引くことによって算定し, 有効降雨量は平均流入係数 f を用いて, これを観測値 r に乗じることによって (3) 式から算定した。

$$I = fr \quad (3)$$

以上の (1) ~ (3) 式で, 求めるべき貯留関数のパラメータは f, K, P, T_l の4つである。

4. 未知パラメータの最適値探索

4つの未知パラメータの最適値探索には, 遺伝的アルゴリズムの中で最も基本的な単純 GA を用いた。遺伝型を表す記号列にはビット列を用い, 遺伝的操作としては, 適応度比例戦略, エリート保存戦略, 一様交叉, 突然変異を用いた。ここで, 交叉率は0.5, 突然変異率は0.05とし, 世代交代数が1000回に達した時点で最適値探索を終了することとした。

人工生物としては遺伝子長が32ビットの個体を50個発生させ, 1つの個体の遺伝子を8ビットごとに4つに区切り, 各パラメータに対応させた。ここで, h を個体番号, i をビット番号, 生物集団中のある個体 h の遺伝子を $g_{i,h}$ とすると, パラメータの算定式は, 次のようになる。

$$f_h = f_0 + \frac{f_1 - f_0}{2^8 - 1} \sum_{i=1}^8 2^{i-1} g_{i,h} \quad (4)$$

$$K_h = K_0 + \frac{K_1 - K_0}{2^8 - 1} \sum_{i=1}^8 2^{i-1} g_{i+8,h} \quad (5)$$

$$P_h = P_0 + \frac{P_1 - P_0}{2^8 - 1} \sum_{i=1}^8 2^{i-1} g_{i+16,h} \quad (6)$$

$$T_{lh} = T_{l0} + \frac{T_{l1} - T_{l0}}{2^8 - 1} \sum_{i=1}^8 2^{i-1} g_{i+24,h} \quad (7)$$

ここで, 添字 h は個体 h が表現するパラメータ値,

添字 1, 0 はパラメータ値の上限と下限で, 想定されるパラメータ値の範囲から予め与える必要がある。

各個体が最適値問題の解にどの程度適応しているかを表す適応度は, 流出解析の場合では実測流量と計算流量を用いて, 両者の誤差の逆数に設定するのが一般的であるが, ここでは流域貯留量と流出量の関係をより正確に表すため, 流域貯留量と流出量との関係を貯留関数で表現した場合の対数スケールの2乗誤差の逆数を適応度として用いた。このとき, 個体番号 h の個体の適応度 F_h は次式で表される。

$$F_h = \frac{1}{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (\log_{10} S_{ij} - \log_{10} K_h - P_h \log_{10} Q_{ij})^2} \quad (8)$$

ここで, N はデータ総数, S_{ij} , Q_{ij} は時間ステップ j の流域貯留量と流出量, K_h , P_h は個体 h の遺伝子上に表現された貯留関数パラメータである。

また, 同じ試験流域における田中ら (1982) の解析結果と今回行った予備解析によって, それぞれのパラメータがとりうる値の範囲を, 原則として $f=0.1 \sim 1.0$, $K=5.0 \sim 90.0$, $P=0.1 \sim 1.0$, $T_l=0.0 \sim 3.0$ とし, この範囲内で最適値探索を行った。なお, 本研究では r, Q_l, S_l, K, P, T_l は mm-10min 単位とした。

結果と考察

解析対象出水53個のうち30個について表-1のように貯留関数のパラメータが同定された。 P の範囲は0.1~1.0に設定したが, 計算の過程でピーク流出量の大きさが十分であるにも関わらず P の値が0.1以下になるものがいくつかあった。それらに関しては, P の下限を0.05に修正して再度計算し, その範囲内でパラメータが同定できたものは対象出水として残し, それ以外は除外した。

同定されたパラメータ値の妥当性を検証するために, これらの貯留関数パラメータを用いて求めた計算流量と実測流量の関係の一例を図-2に示す。同図のように十分な再現精度が得られていることから, 単純 GA を用いた探索では良好なパラメータ値が得られているものと判断できる。

図-3は流域貯留量と流出量の関係の一例を示したグラフである。グラフの左側の不規則にプロットされた点は出水開始時点付近のもので, 時間の経過とともに右側に移行し, ピーク流出量発生後はほぼ直線を描きながら流出量の低減方向に移行しているが, 全体として若干ループを描いている。また, このグラフ上で

表-1 単純 GA により同定された貯留関数のパラメータ (mm-10min 単位)

観測フェーズ	観測年	データ No.	ピーク流出量	総雨量 [mm]	f	K	P	T_i
1	1982	1	1.143	77.0	0.34	22.7	0.40	0.00
		2	1.179	59.5	0.66	26.0	0.23	3.00
		3	1.114	73.5	0.66	26.3	0.22	0.00
		4	1.864	249.5	0.70	39.7	0.26	2.00
		5	0.902	49.5	0.75	15.3	0.19	0.00
	1983	6	0.477	67.5	0.55	29.3	0.22	0.00
		7	1.627	121.0	0.83	26.0	0.10	0.00
		8	4.294	145.0	0.67	27.0	0.26	0.05
		9	4.735	279.5	0.70	38.0	0.33	1.00
		10	0.448	112.5	0.22	9.3	0.13	0.44
		11	0.850	82.5	0.58	43.0	0.35	0.00
	1984	12	0.037	25.5	0.11	26.3	0.60	0.01
		13	0.225	32.5	0.56	15.7	0.19	2.44
		14	0.058	34.5	0.38	25.0	0.32	1.66
		15	1.432	205.5	0.79	31.7	0.23	0.00
		16	0.169	69.0	0.13	12.3	0.33	0.00
		17	2.637	93.5	0.48	26.7	0.44	0.00
		18	2.377	67.0	1.00	37.7	0.07	0.52
	1987	19	2.455	105.5	0.63	32.3	0.27	0.00
		20	1.084	127.0	0.96	47.7	0.13	3.00
		21	1.025	54.5	0.90	24.7	0.17	2.96
		22	2.268	144.5	0.71	54.7	0.36	3.00
		23	1.923	97.0	0.61	23.7	0.25	0.00
		24	3.387	212.5	1.00	23.0	0.27	0.00
		25	2.735	80.0	0.68	26.3	0.28	2.99
		26	0.075	27.0	0.44	12.3	0.17	2.00
		27	2.285	139.0	0.84	31.0	0.10	0.00
		28	0.476	73.0	0.59	24.0	0.18	2.00
2	2002	1	0.334	42.7	0.55	17.3	0.15	0.44
		2	5.855	180.3	0.61	33.7	0.12	1.00

貯留関数パラメータ P は直線部分の傾きに、 K は切片に相当する。

各出水における流域貯留量と流出量の関係で、ピーク流出量発生時点直後からの直線部のみを取り出し、パラメータが同定された30出水をまとめた図が図-4である。

田中ら (1982) は、河道での貯留効果を見せず、キネマティック・ウェイブ (kinematic wave) 法から定数 P の値は流域の出水形態によって、Darcy 則に従う中間流で1.0、Manning 則に従う表面流で0.6となることを示している。この P の変化は流域貯留量～流出量関係の傾きの変化として捉えることができ、図-4からも直線の傾きが流域貯留量7.6mmを境に変化していることが分かる。しかし、ここで P の値は

7.6mm以下で0.4~0.6の範囲に、7.6mm以上で0.1~0.3の範囲に存在しており、田中らの値より小さくなっている。このことから、今回の解析では直接流出量と有効降雨量の算定に簡便な方法を用いたために、流域貯留量と流出量が適切に求められていない可能性も考えられる。しかしながら、図-4では流域貯留量7.6mmを境にグラフの勾配が変化しており、前述のような出水形態の違いによって、 P が変化したものと判断できる。つまり、図-4に示した出水は、流域貯留量7.6mm以下ではDarcy則に従う中間流が卓越しており、7.6mm以上ではManning則に従う表面流が発生し始めていると推測される。また、この流域貯留量7.6mmは、中間流出発生場の厚さ、すなわち水文活性層の厚さに対応する値と考えられる。

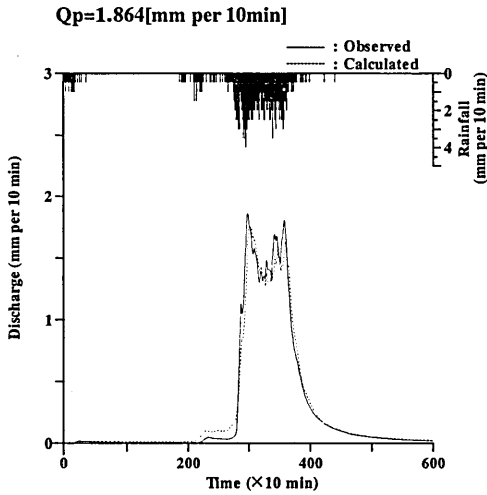


図-2 実測流量と計算流量の比較 (観測フェーズ1のNo.4)

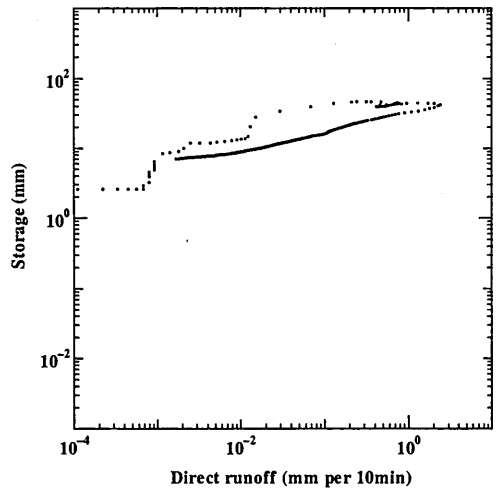


図-3 流域貯留量と流出量の関係 (観測フェーズ1のNo.19)

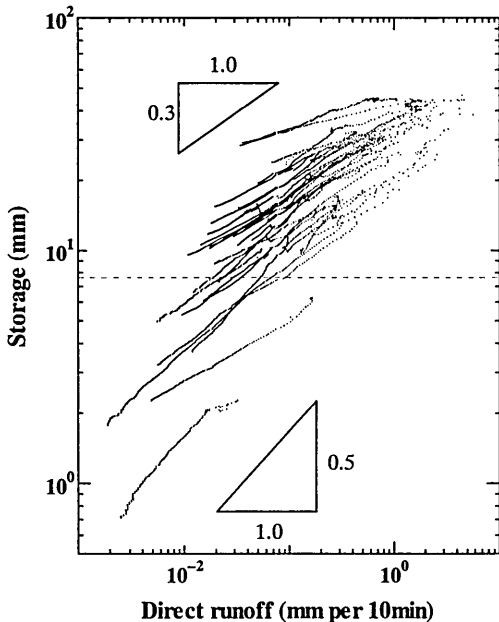


図-4 全出水の流域貯留量と流出量の関係

今回の解析では、出水規模が十分な大きさであるにも関わらず、流域貯留量～流出量関係の直線近似が成立せず、パラメータが同定されないため、解析対象から除外せざるを得ないものがいくつかあった。また、

計算流量と実測流量の比較を行うと、作成した最適値探索プログラムは、短期間に集中した降雨に対しては流量再現精度が低下するという弱点があると推察された。このような問題は、直接流出量と有効降雨量の算定に簡便な方法を用いていることが原因のひとつであると考えられる。また、このことは前述したように P が過小に算定される原因にもなっていると考えられる。

一方、貯留関数パラメータ K は次元を持つことから明らかなように、多くの因子が含まれ、出水やその発生場の特性により大きく左右される。したがって流域の植生や荒廃などの経時変化に伴って、 K も変化するものと考えられる。

要 約

山地流域における洪水流出現象は複雑な要素から成るため、個々の雨水流の持つ平均的法則性を通じて出水現象を把握する方法が有効である。本論文では、個々の雨水流の持つ局所的法則の平均化の手段として流域貯留量に注目し、流域貯留量と流出量の関係から出水形態に関する考察を行った。また、流出解析に必要なパラメータの最適値探索には、現在盛んに応用研究が行われている最適手法である遺伝的アルゴリズムを用い、その探索能力を検討した。得られた結果を要約すると以下のとおりである。すなわち、①遺伝的アルゴリズムは、短時間でパラメータの最適値探索を行うことができる。②流域貯留量と流出量の関係は、ピー

ク流出量発生時点の付近では直線になり、その傾き (P) は流域貯留量7.6mmを境に変化する。③この7.6mmは水文活性層の厚さに対応し、流域貯留量が7.6mm以下では中間流が卓越しており、7.6mm以上では表面流が発生し始めていると推察される。

以上のように、流域貯留量と流出量の関係から試験流域における出水形態を考察することができた。

文 献

- 角屋 睦・永井明博 1980 流出解析手法 (その10).
農業土木学会誌, 48(10): 747-751
- 木村俊晃 1975 貯留関数法. 河鍋書店, 東京, 10-16頁
- 田中宏平・四ヶ所四男美・瀬口昌洋 1982 山地小流域の土壤水分と流出特性. 京都大学防災研究所年報, 25(B-2): 195-204

Summary

Typical mountainous basins in Japan have a small drainage area and steep topography. On such small catchments, the average flow-state during flood events can be estimated by the average resistance law. In this paper, the average flow-state and the average resistance law in a study basin were discussed using the relationship between storage and discharge.

Ochozu study basin located in Fukuoka Forest of Kyushu University Forests is a small mountainous basin with a basin area of 0.095 km² and a stream length of 256 m. In the basin, river discharge and rainfall have been observed from 1982 to 1987 and from 2001 through 2002. Fifty-three flood events were selected for this study. The storage-discharge relationship was expressed by a storage function model and the parameters of the model were optimally searched by simple genetic algorithm. The parameter corresponding to the gradient of the storage-discharge relationship varied from event to event and the average resistance law was estimated by this gradient.

The results indicated that the average flow-state in the basin was classified into the predominance of overland flow described by Manning's formula and that of subsurface runoff described by Darcy's law. The threshold between overland flow and subsurface runoff was estimated to be a basin storage of 7.6 mm that is approximately equivalent to the thickness of zone of major hydrologic activity.