

森林小流域の流出特性と貯留量の指標化に向けた解析

東京農工大学大学院農学府 ○五味高志・宮田秀介

1. はじめに

流域の降雨流出は、林内雨・土壌浸透能・飽和透水係数・岩盤浸透など、空間的に不均質な条件によって形成される表面流や飽和不飽和浸透流、岩盤湧水などによって構成されている。このような不均質な条件を考慮しつつ、水流出過程の把握や流出予測を行うために、分布型水流出モデルなどが用いられてきた（五味ほか, 2008）。しかし、分布型流出モデルの入力値である諸処のパラメータは、流域の一部（プロットや土壌コアサンプル）から得られる「点」情報であり、流域を代表する値としての問題も指摘されている。一方、従来の水文観測では、流域の末端における流出量観測により、流出特性の把握や主要な流出経路の特定に関する研究が進められてきた。たとえば、降雨－流出応答、ピーク流出の出現時間、逡減の関数化による解析や、降雨量と直接流出量（クイックフロー）の関係から流域の流出特性が議論されてきた。また、水滞留時間の推定や流出経路の特定については同位体や水質を用いた解析もおこなわれている。これらの方法は、流出特性の把握という点ではたいへん有効であるが、流域の水貯留量特性の把握という点では不十分であり、水文研究の最も基礎的な情報である降雨流出応答（ハイドログラフ）から貯留量（ S ）の指標化については十分に行われていないのが現状である。そこで、本研究では、Kirchner (2009)により提案された手法を用い、ハイドログラフから流域の貯留量の指標化に向けた解析を試み、流域の流出特性の評価を行うことを目的とした。本研究はJST/CREST「森林荒廃が洪水・河川環境に及ぼす影響の解明とモデル化」の一部として行なわれた。

2. 調査地と方法

三重県中部大紀町に位置する40年生のヒノキ人工林に覆われた三重サイト流域（M1: 4.9ha）に、小流域を入れ子状に配置し観測を行なった。流域4（M4）および流域5（M5）はそれぞれ流域面積0.1haと0.3haの小流域であり、その下流部に流域3（M3: 3.5ha）および流域1（M1）が存在する。また本流沿いに流域6（M6: 2.3ha）を配置した。本観測流域では、森林や林床の植生状態の違いが降雨流出過程に及ぼす影響の評価を行うための研究として、調査研究が進められてきた（Gomi et al. 2008）。2004年5月からパーシャルフリュームによる流量観測および降雨（林外降雨）観測を開始した。本研究では、入れ子状に配置された流域を対象とすることによって、異なる流域サイズ（スケール）の貯留量の指標化およびその評価を行うことができる。

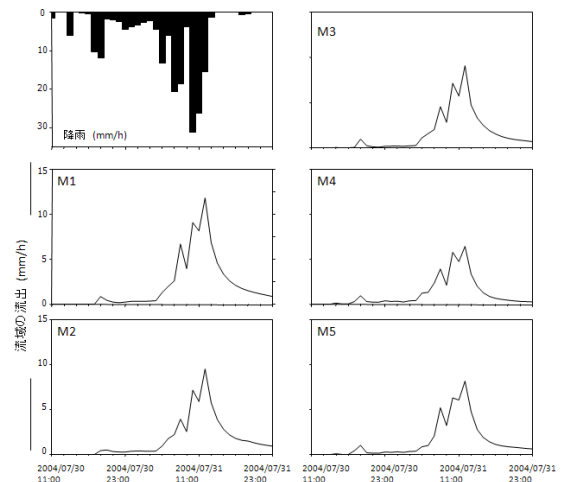


図-1 各流域の降雨流出波形

3. 三重サイト流域における流出特性

三重サイト流域の1時間ごとのハイドログラフを比較すると、降雨に対する流出量の変化についてはピーク流出量などが異なるものの、流出波形（流出の立ち上がり、ピーク、低減）は各流域で似ていた（図-1）。三重サイトでは、すべての流域において総降雨量が80mmを超えると直接流出量が急激に増加する傾向がみられた。総降雨量に対する直接流出量の増加割合は、流域面積の大きいM1, M2, M3で大きく、総降雨量80mmを越えるとそれ以降に降った雨水とほぼ同じ量の水が流出した（図-2）。一方、流域面積の小さいM4, M5, M6流域では、総降雨量80mmを越えるとそれ以降に降った雨水のおよそ半分の水が流出した。流域面積がほぼ同じで林床が荒廃しているM5と林床に植生のあるM4を比較しても降雨と直接流出量の関係には明瞭な差はない。また、M1, M2, M3, M6流域では、年間を通じて渓流水の流れが観察されるが、M4やM5流域は無降雨期間が長く続くと渓流水が涸れることもあった。

4. 貯留量指標の解析方法

ハイドログラフから得られる流出量の単位時間当たりの変化(dQ/dt)には、流域スケールの貯留量(S)および降雨(P)・蒸発

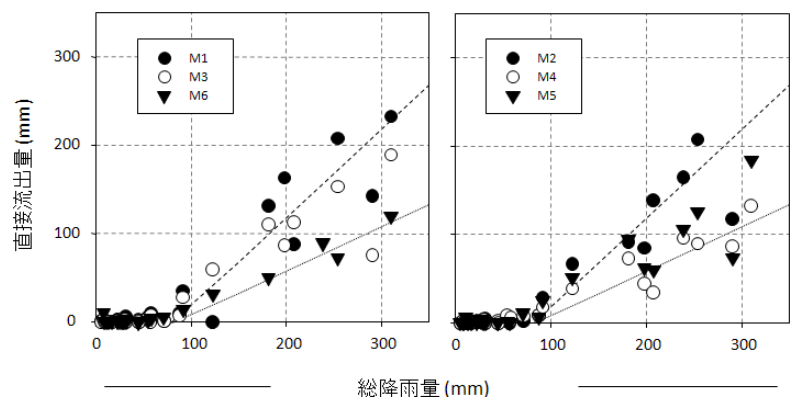


図-2 総降雨量と直接流出量の関係

散(E)・流出量(Q)を用いた以下の式[1]が成り立つ．ここで単位時間当たりの貯留量は $dS/dt = P - E - Q$ と表される．

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{dQ}{dS} \frac{dS}{dt} = \frac{dQ}{dS} (P - E - Q) \quad [1]$$

しかし、貯留量(S)については直接的に観測することはできないことから、流量の貯留量の微分値である流出応答関数 $g(S) = dQ/dS$ とした．この $g(S)$ および式[1]を用いると $g(S)$ は以下の式[2]のようになる．

$$g(S) = \frac{dQ}{dS} = \frac{dQ/dt}{dS/dt} = \frac{dQ/dt}{P - E - Q} \quad [2]$$

ここで、流量に対して蒸発散および降雨量が十分に小さい場合 ($P \ll Q$ かつ $E \ll Q$)，式[2]は以下のように簡略化することができる (Kirchner, 2009) ．

$$g(S) = \frac{dQ}{dS} \approx \left. \frac{-dQ/dt}{Q} \right|_{P \ll Q, E \ll Q} \quad [3]$$

すなわち、式[3]を用いて流出応答関数 $g(S)$ を求めるためには流量および流量の変化割合($-dQ/dt$)を把握すればよいこととなる．そこで、降雨量および蒸発散量が流量に対して十分に小さい無降雨の夜間（夜間には蒸発散量が十分に小さいと仮定）における流量変化（逡減期間となる）について解析を行った．流量変化量($-dQ/dt$)については任意の時間 t と $t+\Delta t$ における流量の差を計算し、流量 Q については任意の時間 t と $t+\Delta t$ の平均値を算出した．

5. 流域スケールの貯留量

図-3には三重サイトの流域3 (M3) における解析結果を示した．ばらつきは大きいものの、全体的には流量が大きいほど流量の変化割合も大きくなることを示していた．図-3aの結果を対数変換すると、流量変化量($-dQ/dt$)と流量(Q)には2次関数で近似することができる (図-3b) ．ただし、Horton (1941)やBrutsaert and Nieber (1977)らは、流量変化量($-dQ/dt$)と流量(Q)にはべき乗則が成り立つとしていることから、流出応答関数 $g(S)$ は以下の式[4]として表すことができる (Kirchner, 2009) ．

$$g(S) = \frac{dQ}{dS} = \frac{dQ/dt}{-Q} = aQ^{b-1} \quad [4]$$

また、式[2]の逆関数として積分式 $\int dS = \int dQ/g(Q)$ を用いると、以下の貯留量と流量の関係式が導かれる．

$$\int dS = \int \frac{1}{a} Q^{1-b} dQ \quad [5]$$

この式を解くことによって、図-3cに示すような流量に対する流域の貯留量の曲線が得られた．流域3の降雨流出特性は、降雨後の流出量の減少が急激であり、本解析で得られた貯留量の低下による急激な流量の減少と一致していた．すなわち、流量－貯留量曲線を流域の降雨流出応答や貯留量の指標として用いることができると思われた．今後、流域内における流量-貯留量の関係を入れ子状に配置された各流域の比較や異なる地域や地質の流域と比較することによって流出特性と貯留量を評価し、流域スケールの斜面安定解析などへも応用できると考えられた．

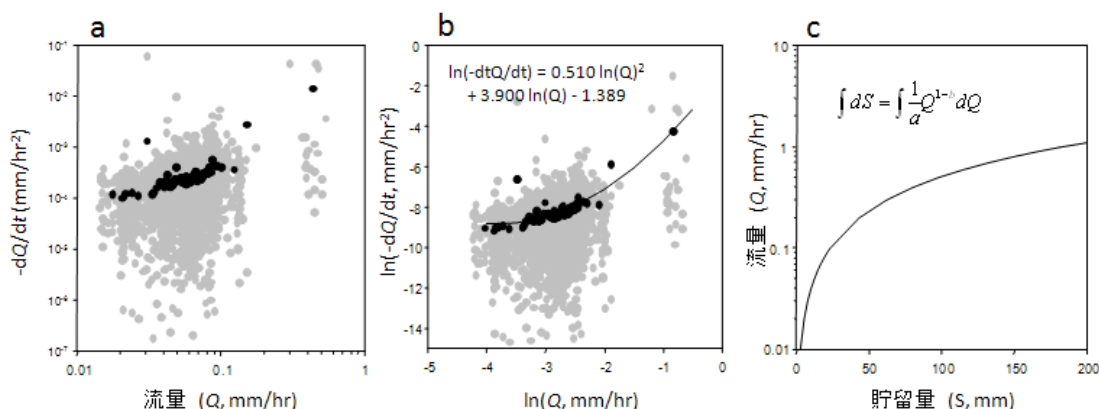


図-3 流域貯留量の解析と指標化．図中に灰色の点は観測値を示し、黒い点は 50 観測値ごとの平均値を示す．

参考文献

- Brutsaert W. and Nieber J.L. (1977) Regionalized drought flow hydrographs from a mature glaciated plateau, *Water Resources Research* 13: 637-643.
Horton R.E. (1941) Virtual channel-inflow graphs, *EOS, transaction AGU* 22, 811.
Gomi T., Sidle, R. C., Miyata, S., Kosugi, K., and Onda, Y. (2008) Dynamic runoff connectivity of overland flow on steep forested hillslopes: scale effects and runoff transfer. *Water Resources Research*. doi: 10.1029/2007WR005894
五味高志・宮田秀介・小杉賢一朗・平岡真合乃・恩田裕一・Roy Sidle (2008) ヒノキ人工林流域における浸透能の空間分布が表面流の発生と河川への流出におよぼす影響の評価:分布型流出モデルを用いた解析．平成 20 年度砂防学会研究発表会概要集 252p
Kirchner J.W. (2009) Catchment as simple dynamical systems: Catchment characterization, rainfall-runoff modeling, and doing hydrology backward. *Water Resources Research* 45, W02429, doi: 10.1029/2008WR006912.