

降雨流出計算手法の精度向上に向けた 陸面モデル情報の利用

Improvement of a Rainfall Runoff Method
Based on Hydrological Information with a Land Surface Model

北海道大学大学院工学研究科 准教授 正会員 山田朋人 (Tomohito Yamada)
カリフォルニア大学デービス校 研究員 正会員 呉修一 (Shuichi Kure)

1. はじめに

降雨流出計算手法は古くから多く提案されており、以下のように分類することができる。(a) 概念モデル：降雨に対する流出の応答関数を利用する手法であり、合理式や単位関法が該当する；(b) 概念的物理モデル：タンクモデルや貯留関数法が該当し、流出現象の非線形性を考慮することができる一方、物理的根拠の乏しいパラメータの推定が困難である；(c) 物理モデル：降雨流出過程を陽に扱うモデルであり、1940年代の Horton に端を発し、現在まで多くの科学的知見の発見により発展してきた。

流出プロセスに関する多くの知見により、多くの分布型物理モデルが開発・使用されるようになってきた。しかしながら、分布型物理モデルを適用する際に大きな問題・課題となるのは、入力として用いる降雨や日射量、風速などの気象情報が時空間的に密に存在しないことである。そのため、データの不足した流域などへの適用が極めて難しいことは周知の事実であり、PUB(Predictions in Ungauged Basins)などの取り組みが精力的に行われている。また、概念モデルや概念的物理モデルの問題点として、水文情報の不足した流域においてモデルパラメータを如何に決定するか、有効降雨や初期条件の決定は如何に行うかなどが挙げられる。特に山地流域における降雨流出現象は非線形性を示し、土壌の初期水分状態に応じて降雨流出特性が大きく異なることが知られている(山田¹⁾など)。よって、短期流出モデルにおいていかに土壌水分などの初期条件を決定するかは非常に大きな問題である。長期流出モデルでは、対象出水前の1年などを事前に計算し、その計算結果を初期条件として使用することが行われるが、短期流出モデルにおいては、連続計算を対象としないモデルも多々ありこのような対応は取れない。出水イベント前の土壌の初期水分状態を推定する方法としては、先行降雨や先行降雨指標、増水直前の水位や流量を利用する方法などが提案されているが(例えば、竹内²⁾、日野ら³⁾)、いずれも観測データに基づいており、水文情報の不足した流域などでは適用が困難であると考えられる。

以上に示したような、分布型流出モデルの入力情報の不足や短期流出モデルの初期条件の決定に関する問題を克服するために、ほぼリアルタイムで入手可能な衛星データなどのリモートセンシングデータや全球スケールで気象データをカバーする GCM (General Circulation Model) やメソスケール気象モデルなどの出力データを

利用することが昨今期待されている。これらのデータは全球規模で利用可能であるために、データ精度やバイアス補正の問題は存在するが、水文情報の不足した流域においても適用が可能であると考えられる。

ここで陸面モデルに着目する。陸面モデルは気候モデルにおける陸域の受け皿として水熱収支の計算を目的に1960年代から開発されたものである。初期の陸面モデルは、陸域をグリッドごとに Bucket モデルとして表現し、蒸発効率に従って蒸発量を大気過程に渡す役割を担っている⁴⁾。その後、フィールドや人工衛星による水文気象観測の充実化、水文過程の理解が進み、さらには計算機資源の発展に伴い、陸面モデルの開発が進み、積雪、土壌凍結、蒸散や葉面からの蒸発等の物理過程も考慮されるようになった。陸面モデルを用いた流出過程の再現の特徴として、AMeDAS データと併用した水文場の再現や GPV を利用したリアルタイム計算が可能になりつつある⁵⁾。また準季節スケールの水文気象予測精度には陸面モデルを用いた土壌水分情報が有効であるとの指摘がなされている⁶⁾。

本論文は AMeDAS により得られる陸面モデル情報の土壌水分データを利用することで、短期降雨流出モデルの精度向上を行うことを目的とする。また、土壌の初期水分状態が降雨流出に与える影響を草木ダム流域(254km²)における実測データおよび陸面モデル情報を用いて考察する。

2. 使用するモデルおよびデータの概要

(1) 対象流域の概要

適用流域は、利根川水系の渡良瀬川上流 78km 地点に位置する多目的ダムである草木ダム流域とする。流域面積は 254km²であり、全体的に山地流域である。使用する降雨データは、流域内 6 地点雨量観測所データにティーセン分割法により流域平均雨量としたものであり、流量データは草木ダム貯水位から換算したものをを用いる。

(2) 降雨流出モデルの概要

本研究で使用する降雨流出計算手法は、山田ら⁷⁾の土壌・地形特性に基づく降雨流出計算手法を用いる。本手法は、Kinematic Wave 法に基づき斜面流下方向流れに対して集中化を行うことで、単一斜面における降雨流出の基礎式(1)を導出している。

$$\frac{dq_*}{dt} = a_0 q_*^\beta (r(t) - q_*) \quad (1)$$

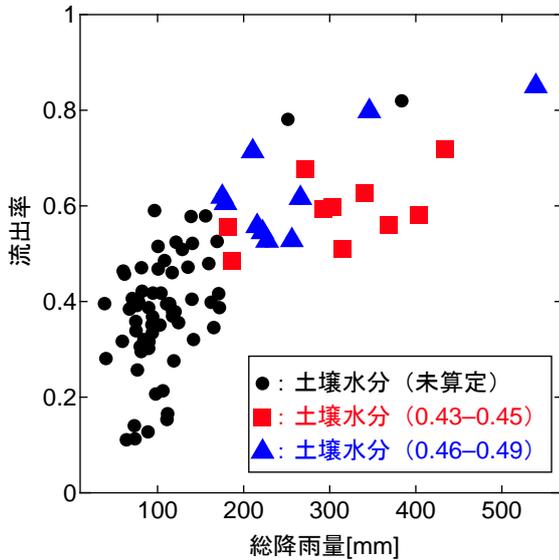


図-1 草木ダム流域における総降雨量，流出率および初期土壌水分量の関係

ただし，

$$a_0 = aL^{\beta-1} = (m+1)\alpha \frac{1}{m+1} L^{\frac{-1}{m+1}} \quad (2)$$

$$\beta = \frac{m}{m+1} \quad (3)$$

ここに，ここに， q^* ：流出高(mm/h)， L ：流出寄与斜面長(mm)， $r(t)$ ：有効降雨強度(mm/h)， m ：流出パラメータ(抵抗則)， α ：流域の流出特性を表すパラメータである。また，流域特性を示すパラメータ α と抵抗則 m の値は(4),(5)式に示すよう土壌・地形特性から決定される。

$$\alpha = \frac{k_s i}{D^{\gamma-1} w^{\gamma}} \quad (4)$$

$$\gamma = m + 1 \quad (5)$$

ここに， D ：表層土層厚(mm)， γ ：土壌の透水性を表す無次元パラメータ， k_s ：飽和透水係数(mm/h)， i ：斜面勾配， w ：有効空隙率であり $w = \theta_s - \theta_r$ (θ_s ：飽和含水率， θ_r ：残留含水率)で定義される。

また，呉ら⁸⁾は，本手法を表面流，鉛直浸透流，飽和・不飽和側方流に関する多層流れを考慮した降雨流出計算手法へと拡張している。このような多層構造を考慮することで損失雨量の表現，長期流出計算への拡張が可能であることを理論的に示したものである。しかしながら，本論文では短期流出モデルにおける初期土壌水分量などの初期条件を如何に決定するかを主たる目的としているため，式(1)に示す一層のみの斜面流下方向流れを対象とし短期降雨流出計算を行う。

(3) 陸面モデル MATSIRO

本研究で使用する陸面モデルは MATSIRO(Minimal

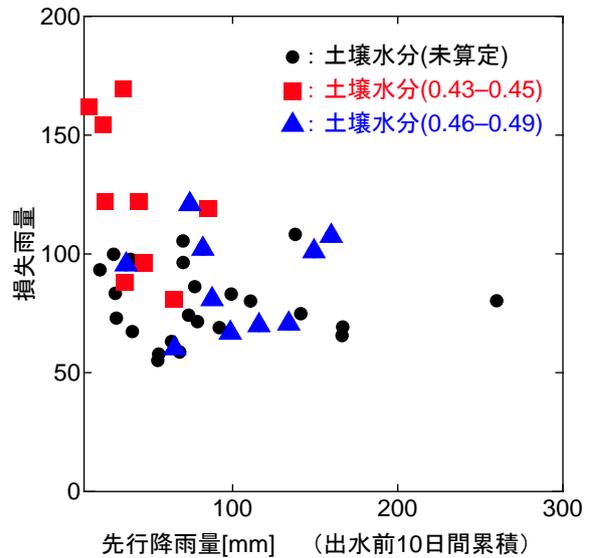


図-2 草木ダム流域における先行降雨量（出水前10日間の累積）と損失雨量の関係

Advanced Treatment of Surface Infiltration and RunOff)である⁹⁾。MATSIROは植生による蒸散や葉面からの蒸発散の効果やグリッド内の地形変化に伴う流出など陸域が有する物理過程を可能な限り考慮している。ここでは，水平スケール10km格子とし，気象庁AMeDASデータ(降雨量，風速，湿度，気温データ等)をMATSIROに与えることで水文諸量データを算出する。また，MATSIROへの入力にはAMeDasデータを用いるが，降雨流出モデルへの入力には観測された雨量データを使用することに注意されたい。本来であれば同一のデータを使用すべきであるが，土壌水分状態が降雨流出に与える影響に本論文は着目しており，入力降雨は精度の高い観測雨量を用いている。

3. 初期土壌水分量が降雨流出に与える影響

本章では，草木ダム流域における実測の降雨流出データおよび陸面モデルより得られた土壌水分データを用いることで，初期土壌水分状態が降雨流出に与える影響を評価する。

データとしては，1978年から2008年までの出水を対象とし，ティーセン分割より得られた流域平均雨量および草木ダムへの流入量から各出水の流出率，損失雨量を算定した。一つの出水としては，降雨開始から流量が出水開始時の値まで遞減する期間とした。直接流出量は平常時流量を基底流量とし除去することで算出した。同時に草木ダム流域の位置に該当する領域におけるMATSIROの計算結果より，降雨開始時における土壌水分量を抽出することで，初期土壌水分量とした。MATSIROでは，土壌水分量を鉛直方向2地点(25cm,100cm)で算出されている。土壌水分量を算定したのは，総降雨量が200mm以上の20ケースのみを対象とした。初期土壌水分量として本論文では含水率 θ (無次元)を用いている。

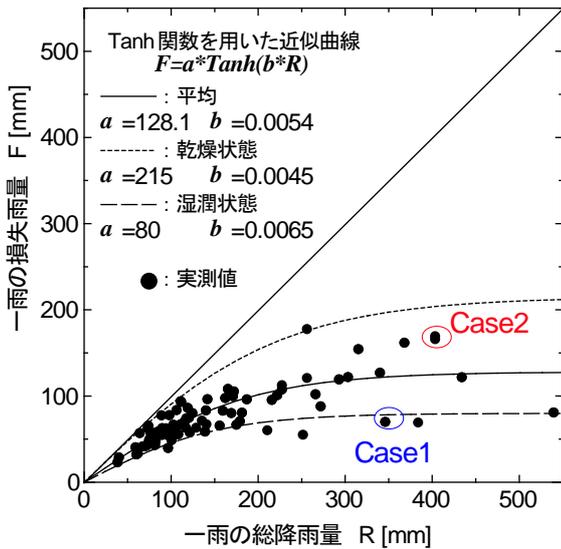


図-3 草木ダム流域における総降雨量と損失雨量の関係および回帰曲線

図-1に、草木ダム流域における総降雨量、流出率および初期土壌水分量(25cm地点)の関係を示す。図-1より総降雨量が多いほど流出率が大きく直接流出量が増大していることがわかる。また、同程度の総降雨量では初期土壌水分量が大きいくほど、流出率が高くなる傾向にあることがわかる。図-1に示されるように、初期土壌水分量が降雨流出に与える影響は大きく、初期土壌水分量が大きいくほど直接流出量が増加する傾向にあることが示された。また、総降雨量200mmから250mm程度では流出率、損失雨量に関して(図省略)初期水分量による差異があまり見られない。このような出水では降雨波形などの降雨の時空間分布など他の要因も影響しているためと考えられる。

図-2に、草木ダム流域における先行降雨量と損失雨量の関係を示す。先行降雨量としては、出水前10日間の累積雨量を用いた。図-2に示されるよう、先行降雨量が多いほど損失雨量が少なく直接流出量が増大していることがわかる。これは上記した土壌水分の関係を先行降雨量という観点から見たものである。図-2より、先行降雨に伴い流域土壌内の水分量が上昇し、初期土壌水分量が増加していることがわかる。

ここで特筆すべきは、10km×10kmグリットとかなり粗い(降雨流出過程としては)計算領域を用いて算定された土壌水分量が、草木ダム流域における流出率、損失雨量などの降雨流出関係を上手く表現していることである。これにより、降雨流出計算結果に大きな影響を与える要因である土壌水分量を、AMeDASと陸面モデルにより得られた面的平均データより代表的に算定することが可能であることを明らかにした。また、草木ダム流域における土壌の初期水分状態が直接流出量・損失雨量に与える影響は非常に大きい事を明らかにした。

4. 土壌の初期水分状態が降雨流出計算結果に与える影響

上記したように土壌の初期水分状態が降雨流出に与え

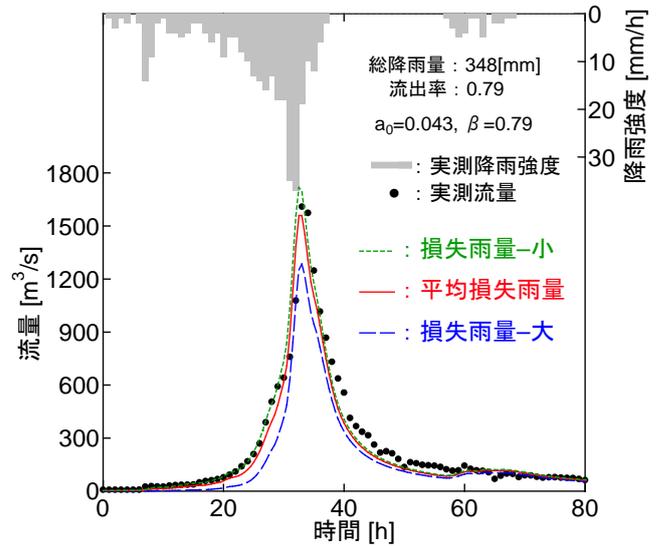


図-4 草木ダム流域における降雨流出計算結果(Case1)

る影響は非常に大きく、この影響を考慮した降雨流出計算が必要である。本章では土壌水分の影響を如何に流出計算で考慮するかを説明するとともに、初期土壌水分の影響が草木ダム流域における流出計算結果に与える影響を評価する。

(1) 損失雨量曲線

式(1)に示した降雨流出に関する基礎式は、直接流出量を算定するものであり、有効降雨を算定する必要がある。山田ら¹⁴⁾は、有効降雨の算定手法として流域土壌の保水能の流域に占める割合から保水能分布を求めることにより有効降雨を決定する理論を提案している。これにより累積雨量に応じて時々刻々と変化する有効降雨もしくは流出寄与域の算定が可能となる。

山地流域における損失雨量 $F(R)$ は累積降雨量 R に対して図-2の関係が存在し、保水能の理論において損失雨量曲線は式(6)で表現することが可能である。

$$F(R) = a \tanh(bR) \quad (6)$$

このとき、式(6)の a, b は総降雨量に対する損失雨量の関係を回帰するためのパラメータである。保水能の理論では、式(6)に示す損失雨量と総降雨量の関係を用いることで、流出に寄与する有効降雨および流出寄与割合を、累積雨量に応じて次々刻々と算出している。

ここで重要な点は、図-2に示したように、先行雨量に応じて総降雨量と損失雨量の関係は変化するという点である。つまり、土壌の初期水分状態が異なる場合は、式(6)中のパラメータを変え異なる損失雨量曲線を用いる必要があるということである。土壌の初期水分状態が乾燥、平均、湿潤状態を想定した場合の総降雨量と損失雨量の関係を式(6)から算定したものを図-3に示す。図-3に示すようパラメータ a, b の値を変えることで、土壌の初期水分状態の相違を考慮して損失雨量・総降雨量曲線を決定することが出来ることがわかる。つまりは、土壌の初期水分状態に応じて、この曲線を使いわけること、更に精度よく流出に寄与する有効降雨・流出寄与域を算定することが可能となる。この土壌の初期水分状態の決

定に関しては、MATSIRO からリアルタイムで算定される土壤水分データが利用可能である。

(2) 損失雨量曲線の違いが降雨流出に与える影響

図-3に示すよう、初期土壤水分状態の相違に応じて各損失雨量曲線が決定される。これらの損失雨量曲線の違いが降雨流出計算結果に与える影響に関して、実際の草木ダム流域における出水を対象として降雨流出計算を行うことで評価する。

対象とする出水は、1982年7月31日の出水(Case1, 総降雨量:348mm, 流出率:0.79, 初期土壤水分量(25cm):0.48, 損失雨量曲線:湿潤)と2002年7月9日の出水(Case2, 総降雨量:403mm, 流出率:0.58, 初期土壤水分量:0.45, 損失雨量曲線:乾燥)の2ケースを対象とした。Case1は損失雨量曲線が湿潤な場合であり、Case2は損失雨量曲線が乾燥した状態である。紙面の関係上、Case2については研究発表時に示すこととする。これらのケースは図-3に同時にプロットしている。この二つの出水に見られるよう同程度の総降雨量でも流出率が大きく異なることがわかる。これがまさに土壤の初期水分状態の影響である。

流出計算としては、式(1)に示す基礎式を用い、流出寄与域として有効降雨を想定した。流出パラメータはハイドログラフの逓減特性から算定した平均パラメータを使用している。ここで初期流出高 $q(0)$ に関しては一定の0.1mm/hを両出水で用いた。山田⁹⁾が既に示しているよう、この初期流出高も土壤初期水分の影響を受けると考えられる。この影響に関しても今後検討する必要がある。図-4にCase1の出水に対する流出計算結果を示す。損失雨量曲線として乾燥、平均、湿潤状態を想定した3つの曲線を用いたときの計算結果を示している。Case1の出水は降雨前の土壤が湿潤な状態であり、損失雨量の少ない曲線を用いた結果が実測値と最良の一致を示している。特に流量の立ち上がり部分でその差は大きい。平均状態の曲線を用いたときはさほど大差は無いが、乾燥状態の損失雨量曲線を用いたときの計算流量は過小評価して計算されていることがわかり、実際の流出計算においても土壤の初期水分状態の影響が非常に大きいことがわかる。

以上示したように、土壤の初期水分状態の相違は異なる損失雨量曲線を用いることで降雨流出計算に組み込むことができることを示すとともに、損失雨量曲線の違いが降雨流出計算結果に与える影響が非常に大きいことを示した。陸面モデルのMATSIROはリアルタイムで土壤水分量の算定が可能であり、この情報を用いることで、流出計算を行う前に土壤の水分状態を想定することが可能となる。これにより、実際の流域の土壤の水分状態を表現した損失雨量曲線の選択が可能となり、更に高精度の短期降雨流出計算が可能となることがわかる。

今後の課題としては、式(6)に土壤水分の影響を陽に組み込むことで、土壤水分に応じて損失雨量曲線が直接算定されるようにすることが必要である。同時に初期流出高の設定に関しても議論が必要になってくる。また、長期的な観点としては、気象モデル、陸面モデル、流出モデルを個別に用いるのではなく、統合した一つのモデルとして大気・流域水循環モデルを構築することが必要と

なるであろう。

5. まとめ

本論文は、草木ダム流域における実測の出水データおよび陸面モデルより算定される土壤水分データを用いることで、土壤の初期水分状態が降雨流出に与える影響を評価したものである。また、陸面モデルの情報を利用することで、更に高精度な短期降雨流出計算が可能であることを明らかにした。以下に本論文で得られた知見を列挙する。

- 1) 草木ダム流域における出水データおよび陸面モデルより算定される土壤水分状態を整理することで、土壤の初期水分状態が流出率に与える影響が非常に大きいことを明らかにした。
- 2) 初期土壤水分状態に応じて異なる損失雨量曲線を用いることで、初期流域土壤水分量の乾燥・湿潤状態を考慮した流出計算が可能であることを示した。

参考文献

- 1) 山田 正:山地流出の非線形性に関する研究, 土木学会水理講演会論文集, Vol.47, pp.259-264, 2003.
- 2) 竹内信治, 森林伐採前後における1連続降雨による直接流出量の統計的方法による解析, 日本林学会大会発表論文集, 88, pp.385-386, 1977.
- 3) 日野幹雄, 長谷部正彦:流出率と湿潤指標としての洪水直前流量, 土木学会論文報告集, 328, pp.41-46, 1982.
- 4) Manabe, S. Climate and the ocean circulation. 1. The atmospheric circulation and the hydrology of the Earth's surface, *Mon. Weather Rev.* 97 (1969) (11), pp. 739-774.
- 5) Yoshimura, K., T. Sakimura, T. Oki, S. Kanae, and S. Seto, Toward flood risk prediction: a statistical approach using a 29-year river discharge simulation over Japan, *Hydrol. Res. Lett.*, 2, 22-26, 2008.
- 6) Yamada, T.J., R.D. Koster, S. Kanae, and T. Oki. Hydrological Forecast Skill Associated with Land Surface Initializations, *Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE*, 54, 55, 2010.
- 7) 山田 正, 山崎幸二, 流域における保水能の分布が流出に与える影響について, 土木学会水理講演会論文集, Vol.27, pp.385-392, 1983.
- 8) 呉 修一, 山田 正, 吉川秀夫, 表面流の発生機構を考慮した斜面多層降雨流出計算手法に関する研究, 土木学会水工学論文集, Vol.49, pp.169-174, 2005.
- 9) Takata, K., S. Emori, and T. Watanabe. Development of the minimal advanced treatments of surface interaction and runoff (matsiro). *Global Planetary Change.*, Vol. 38, pp. 209-222, 2003.

謝辞:本研究は平成22年度CREST持続可能な水利用を実現する革新的な技術システムの成果の一部である。