

大雨時の流量予測モデルの物理的根拠は森林土壌における雨水浸透にあり

対象論文

Makoto Tani, Yuki Matsushi, Takahiro Sayama, Roy C. Sidle, and Nagahiro Kojima: Characterization of vertical unsaturated flow reveals why storm runoff responses can be simulated by simple runoff-storage relationship models. *Journal of Hydrology* 588, 124982, 2020.

doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124982>

(和訳)

谷誠・松四雄騎・佐山敬洋・ロイ C サイドル・小島永裕：洪水流出応答がなぜ単純な貯留関数法で再現できるのか、その根拠は鉛直不飽和浸透流の特性にある

(注 1 に要約の和訳を掲載)

概要説明

2018 年 7 月には西日本で、2019 年 10 月には東日本で大規模な水害が発生しました。このような大雨による河川氾濫への防御対策としては、堤防かさ上げやダム新設などの河川整備が行われてきました。その治水計画には、図 1 のような山地源流域に降った大雨に対して、河川の流量が増加してピークとなって減少してゆく、そうした流量の時間変化を流出モデルで計算することが必要で、1961 年に木村俊晃氏が開発した貯留関数法が広く使われてきました(注 2)。

この貯留関数法は、排水孔のある浴槽のような構造をもった図 2 のような流出モデルに基づいており、水道による給水が降雨、底孔からの排水が流量に相当します。浴槽では、貯留水量と排水量とに閾数関係がありますが(貯留水量が大きくなると排水量も大きくなります)、同じように、降雨によって増加する流域貯留量と流量との閾数関係が仮定され、貯留関数法ではその関係を用いて流量を計算するのです。

けれども、図 1 と図 2 を比べて感じるように、山地での複雑な流れのメカニズムが浴槽で表現できるのは不思議です。専門の研究者であってもその根拠がよくわからなかったため、物理学者から非科学的だとの厳しい批判を受けることもありました(注 3)。



図 1 山地源流域

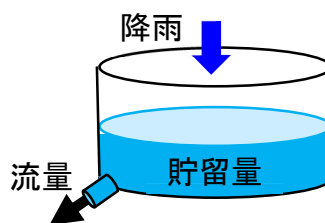


図 2 排水孔のある浴槽のような貯留関数法の基本構造



図 3 森林土壌の断面

こうした洪水流量予測に関する水文学(すいもんがく)研究の流れにおいて、対象論文は、「貯留関数法の根拠が、斜面をおおう土壌層における雨水浸透現象を近似しているところにある」ことを明らかにしました。つまり、貯留関数法の貯留量と流量との閾数関係は、雨水が図 3 のような土壌の中を浸透する過程で、土壌水分量が時間変動する物理的なメカニズムを、近似的に表現していることがわかったのです。

図4をご覧ください。これは、山腹斜面で観測された降雨時の観測結果と、図3のような土壌層の中の雨水浸透を表す土壌物理学理論に基づいて計算した結果、及び貯留関数法での計算結果とを比較したものです。現場の土壌を用いて計算すると（左側の図）、降雨の時間変化が土壌水分の変化として次々に深さ方向に伝わってゆき、流量変化を作り出していること、貯留関数法の計算流量も観測流量や雨水浸透の計算流量とほぼ合っていることがわかります。また、右上図は、土壌物理性の異なる土壌を用いて雨水浸透計算を比較したのですが、興味深いことに、土壌の種類にかかわらず流量の速やかな時間変化が作り出されること、サイ

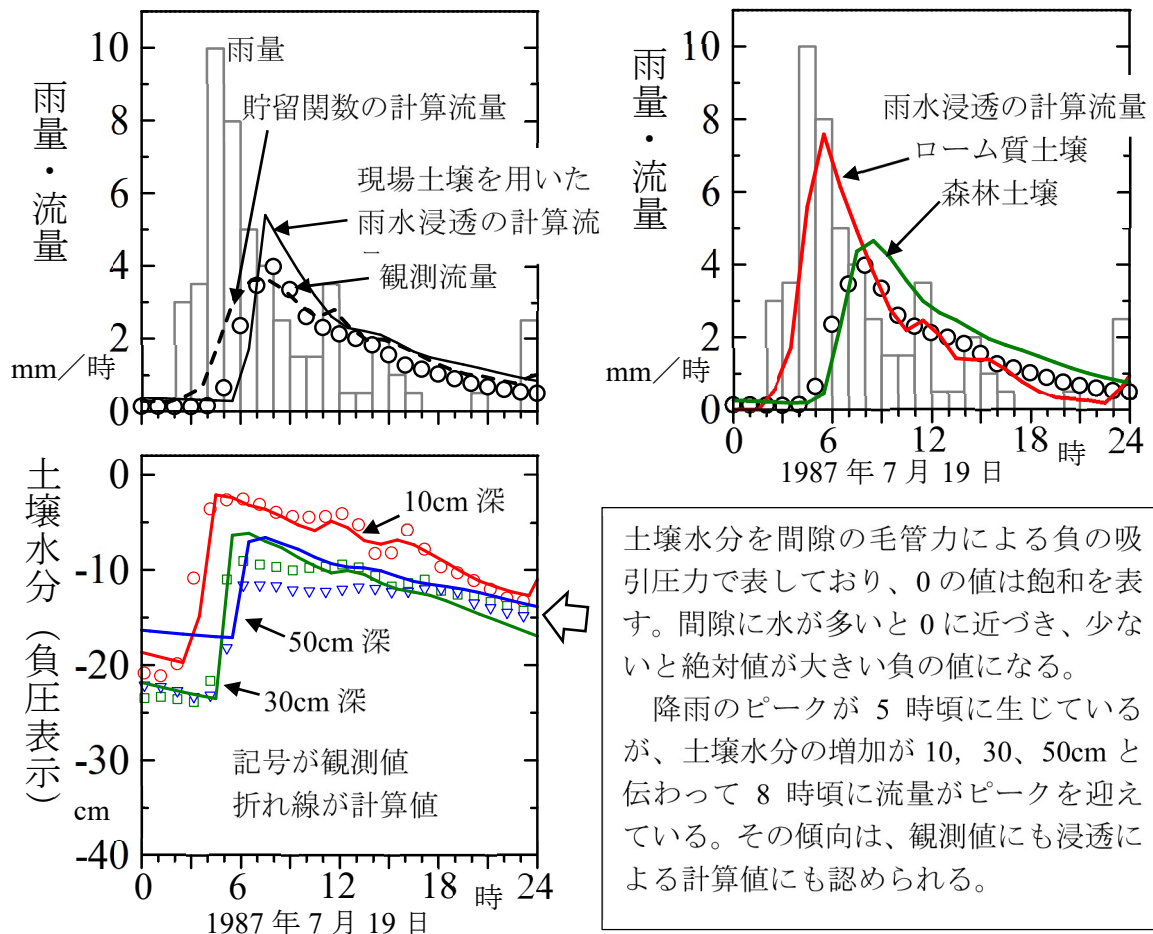


図4 山腹斜面における、1987年9月の降雨時の雨量、流量、土壌水分（10、30、50cm深、負圧表示）の観測値、及び雨水浸透を表す土壌物理学理論に基づいて得られた流量と土壌水分の計算値、貯留関数法による流量の計算値。

現場の土壌を用いて計算した場合の流量を左上図に、そのときの土壌水分を左下図に示す。また、右上図は、ローム質土壌と森林土壌を用いて計算した流量を示す。

左図からは、土壌水分が浅い深さから飽和に近づいていて、降雨の時間変化が土壌深部に速やかに伝わって、流量の変化を産み出していること、右上図からは、大きな間隙を欠くローム質土壌に比べて団粒構造をもつ森林土壌では、流量の時間変化がよりなだらかになっていることがわかる。

（データは、国立研究開発法人 森林研究・整備機構 森林総合研究所の関西支所が1937年以来調査している、岡山市郊外の竜ノ口山森林理水試験地南谷流域内の試験斜面で取得した。上記の図は、対象論文の図3を一部改変して引用したものである。）

ズの大きな間隙を含む森林土壌では、流量の時間変化がよりなだらかに、ピークが低くなる
ことがわかります。

以上の結果は、「長雨により土壌が十分湿潤になっても土壌は完全に飽和してしまうわけ
ではなく、土壌内の雨水浸透によって降雨の時間変動がなだらかになって流量のピークが低く
なる。森林土壌はその効果が大きい」ことを土壌物理学の理論によって説明しています（注
4）。また、貯留関数法が、浴槽のような単純なモデルであるにもかかわらず、この雨水浸透
現象をうまく近似していることもわかります。さらに対象論文では、貯留関数法で流量計算
に用いる数式（図2の貯留量と流量の関係）に含まれる係数（注1に示す $S=ku^p$ の p ）が、土
壌の物理的性質や土壌層の厚さによって近似的に表現できることも説明しています。

次に、対象論文の社会への反映について説明したいと思います。

当然ながら、水害対策は河川の整備が中心になりますが、雨は流域全体に降りますから、
河川河道の整備だけでは被害の減災はむずかしいです。対象論文は、河川整備計画に必要な
流量計算に用いてきた図2の流出モデルが、図1のような森林でおおわれた斜面土壌の「保
水力」を物理的な根拠としていることを示しており、森林整備と河川整備が協力しなければ
ならないことを強く主張するものです。

花崗岩山地にはかつて図5のようなはげ山が広がって
いました。森林と土壌層が失われたはげ山になってしまっ
たら、流水をざるで受けるようなもので、いくら河川整備
を推進しても水害が頻発してしまいます。確かに、砂防・治
山事業による緑化工事が明治以来続けられたこと、化石燃
料が使えるようになって生活資材を里山の森林に依存しな
く
て良くなったことにより、はげ山はほとんど見られなくな
りました。ところが最近、成長した人工林を伐採しても、長
期間の手入れを続けなければ
か、植林を放棄する事例が多くなっていて、今後、シカ食
害による裸地化が進み、再び土
壌層が失われてゆくことが危惧されています（注5）。



図5 花崗岩山地のはげ山

さらに、2018、2019年の広域水害でわかるように、気候変動によって降雨規模が大きくな
っています。そのため、水害を減らすためには、河川そのものの整備以外に、流域内の森林
や土壌を保全し、気候変動も抑制する、社会全体での努力が必要になるのです。こうした統
合的な環境・災害対策に向けて、対象論文の社会貢献が期待されます。

注釈

（注1）対象論文の要約の和訳。なお、要約中の指数関係式（ $S=ku^p$ ）が、本文における、貯
留関数法の貯留量と流量の関数関係を具体的に表している。

表題 洪水流出応答がなぜ単純な貯留関数法で再現できるのか、その根拠は鉛直不飽和浸透
流の特性にある

著者 谷誠¹・松四雄騎²・佐山敬洋²・ロイ C サイドル³小島永裕⁴

所属 1：人間環境大学人間環境学部、2：京都大学防災研究所、3：中央アジア大学山岳社会
研究所（タジキスタン）、4：滋賀県琵琶湖環境科学研究センター

要旨 地殻変動帯における洪水流出応答が流出と貯留量の指数関係式に基づく単純な流出
モデルで再現できるのはなぜかについて、その物理的根拠を明らかにするために、鉛直不飽
和浸透流に関するリチャーズ式を用いた数値実験を実施した。その実験によって、降雨の大
きな一定割合が洪水流出になるような「一定配分期間」においては、それぞれの土壌に固有
の物理特性のいかんにかかわらず、鉛直不飽和浸透流による圧力水頭の伝播が土壌コラム底

面からの素早い排水量の応答を産み出すこと、山腹斜面で観測された洪水流出応答は実験と同様の結果を示すことが明らかになった。引き続き、降雨強度の増加に応じて下方への流れが大きくなる増加過程、降雨終了後の減水過程の両過程を対象として、鉛直不飽和浸透の詳細な特性を調べるための数値実験を行った。その結果、増加過程においては、ウェッティングフロントの形成が排水量の増加に遅れをもたらしたが、一定配分期間においてはその遅れは小さかった。また、減水過程においてはその全過程を通じて、土壌コラムからの排水強度と総貯留量との関係が、排水強度一定の定常状態における排水強度 u と総貯留量 S との関係に見られる指数関係式 ($S=ku^p$) によって近似された (なお、 k 、 p は経験的なパラメータである)。そして、指数 p の値は、土壌コラムがうすくなると最大値である 1 に接近するが、厚くなると対象としている土壌に固有の物理特性、すなわち体積含水率と不飽和透水係数との関係に由来する最小値に接近した。さらに、こうした土壌の不飽和帯に限って検出される排水強度と総貯留量との関係は、たとい土壌物理特性が不均質であったとしても一般的に見られる性質であることも明らかにした。本研究における以上の解析結果は、単純な流出モデルがなぜ不均質性に富む山地流域に適用できるのか、その根拠を説明するものである。

(注 2) 「国土交通省河川砂防技術基準調査編」、2014 の第 3 章第 2 節に、
https://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/gijutsu/gijutsukijunn/chousa/pdf/00.pdf

「貯留関数法は流域ないし河道をひとつの貯水池と考え、貯留量と流出量の関係(貯留関数)を運動方程式とし、これを連続方程式と組み合わせて、流出量を追跡する方法である。(中略)貯留関数法は我が国でこれまで多数の流域で適用実績を持っていて信頼性がある方法である。」とある。

(注 3) 富永靖徳「貯留関数法の魔術 —ダム事業を根拠付けるデータの非科学性」『科学』83 (3), 268-273、2013 を参照。

(注 4) 森林土壌の流量に及ぼす影響に関する日本語での詳しい説明は、中村太士・菊沢喜八郎編「森林と災害」共立出版、2019 の「第 1 章第 2 節 雨水の流出過程」(谷誠執筆) 44-77 を参照。

(注 5) 谷誠・玉井幸治・鶴田健二・野口正二「日本森林学会企画シンポジウム報告『収穫期を迎えた人工林における資源循環利用と水土保持との両立』」、森林科学 80、42-45、2017 を参照。