

土壌不飽和帯の役割再認識による山地斜面洪水流出モデルの抜本的改革

京都大学農学研究科 谷 誠

1. キネマティックウェーブモデルの前提条件には無理がある

水災害や土砂災害を防止する研究において、山地斜面の洪水流出機構の理解が不可欠である。しかし、森林地帯での流出・崩壊予測において、分布型流出モデルの問題点は、真正面から議論されてこなかった。確かに、六甲都賀川で2008年に発生した災害のような都市河川の洪水事例では、舗装道路や各種排水路を通じた高速の開水路の流れによる極端に急激な流量変動が確かに起き、分布型のキネマティックウェーブモデルの考え方も許容できる（立川、京大防災研年報52B、2009）。しかし、山地森林地帯への応用に関しては無理が大きい。

開水路の水理学を斜面流出機構に適用しようとするキネマティックウェーブモデルのアイデアは、末石（土木論集29、1955）に始まる。石原・高棹（京大防災研年報5A、1962）（高棹モデルと称す）は、降雨があると土壌表層（A層と称される）の不圧地下水の流れがまず生じ、A層の飽和によって地表面流が発生すると考えた。半世紀以上経った今でも、河川工学ではこの考えが引き継がれているように見える（椎葉ら：水文学・水工計画学、京大出版、2013）。単純化はモデルなので止むを得ないとしても、物理性がそもそもあるのだろうか。

降雨時の森林地帯における洪水流出応答は、都市化河川よりも遅れが大きくピークが均される。そこで、高棹モデルで応答を再現するためには、非常に大きな飽和透水係数による「速い地下水流」、非常に大きな等価粗度による「遅い開水路流」を仮定することは避けられない。有機物に富むA層は透水性がきわめて大きいとか、落葉や下草のような抵抗の多い林地地面では抵抗がとくに大きいと考えるわけである。しかしながら、A層が数センチ程度の林学で言うところの有機物に富む薄い層を意味しているとしても、その下側の無機質土壌のB層以下の飽和透水係数も雨水の鉛直浸透を十分に許す大きさがあり、A層とB層の透水性の差を根拠とした流れの発生は考えにくい。ほとんどの雨水はB層以下の不飽和帯へ鉛直浸透するはずである。また、大規模な豪雨時でも洪水流に土壌水を含むという観測事実（恩田、人工林荒廃と水・土砂流出の実態、岩波、2008）からも、土壌層の洪水流出における大きな役割が示唆される。このように、高棹モデルを含むキネマティックウェーブモデルの前提が受け入れられなければ、分布型モデルの持つ基本的なメリット、すなわち、流域条件が流出応答に及ぼす影響が予測できるという利点は、論理的に主張できないことになる。

2. 洪水流出応答は持続性の強い現象で、地中流から地表面流への質的变化はみられない

洪水がA層の不圧地下水流と地表面流によって主に説明されるなら、降雨規模が大きくなったとき、地表面流の割合が増加し、なおかつ、いかに落葉や下草で邪魔されようと、地下水流が主体であったのとは異なる、素早い降雨流出応答が示されるはずである。高棹モデルはまさしく、こうした傾向を主張するものであるが、山地小流域では、降雨流出応答関係の解析によってこれは支持されていない。すなわち、タンクモデル（菅原、流出解析法、共立、1979）、貯留関数モデル（木村貯留関数法による洪水追跡法、建設省、1961）、HYCYMODEL（福嶋・鈴木、京大演報57、1986）などの貯留型モデルが広く用いられている経験的事実は、降雨規模の大小にかかわらず、流出応答が降雨規模にかかわらず一貫した貯留流出関係で再現されることを強く示唆している。

3. 洪水流出応答は、不飽和帯・飽和帯の連続性からもたらされる

すでに述べたことではあるが、地面に落ちた雨水はまず、不飽和帯を土壌水として鉛直に浸透するのであって、その後、降雨継続により洪水が発生するのであるから、不飽和帯の土壌水と飽和帯の地下水の相互作用は無視できない。高棹モデルの仮定するような飽和帯の不圧地下水の流れと地表面の開水路の流れのみを扱う近似は、森林地帯の土壌層の不飽和帯の存在を無視するが故に、水理学的に無理な仮定と言わなければならない。

不飽和帯の重要性をつかむため、強度一定の人工降雨を急峻なゼロ次谷流域で7日間も継続した実験（Anderson et al., Water Resour. Res. 33, 1997）を例にして説明しよう。一定強度の人工降雨が長く続き、土壌が湿潤になると、斜面土壌層の流れはほぼ定常になる。そのとき、土壌は湿潤な不飽和帯と地下水帯が連結された水理学的な連続体で構成されるようになる。いま、一定の降雨強度がある時点で突然大きい値に移行した場合には、降雨を受ける地表面の水理水頭変化が連続体内へ伝達してゆき、新たな定常状態に推移する。斜面下端からの流出は、その水理水頭変化の結果として生じるのであり、降雨変化に対する伝達にもなう遅れをとまって変化する。また、降雨が止むと、準定常減衰によって流出が減少する。もし、降雨強度が大きいと飽和地表面流が発生するかもしれないが、その場合は地表面流をも含む連続体が成立することになる（Tani, Hydrol. Earth Syst. Sci., 17, 2013）。

高棹モデルであっても水理水頭伝達が前提となっていること自体は変わらない。異なるのは、降雨強度の時間変動を遅らせる水頭伝達が何によって担われるかである（図1参照）。高棹モデルでは、A層と称される土壌層内の地下水や地表面流における水面変動が貯留量変動をもたらし、それが水頭伝達の遅れを通じて、流出波形変動に伝わってゆく。これに対して、斜面現場で起こっている観測結果は、降雨変動が生じたとき、地表面近くの不飽和帯での土壌水の鉛直浸透部分の水理水頭変動がまず起きることを示している。次に圧力水頭がゼロで示される地下水面の変動が遅れをもって続き、最後に斜面下端の流量変化に水理水頭変動が伝わってゆくのである。

キーポイントは、この土壌層内の不飽和帯と飽和帯、場合によっては地表面流も加わって、それら全体から成る水理学的連続体が貯留量の変動を起し、結果として流出波形変動が生じるとの理解にある。降雨波形の洪水流出波形への変換が、マンニングの粗度係数や飽和透水係数の値だけで決まるのではなく、不飽和土壌の厚さや不飽和透水係数と土壌含水率の関数関係といった土壌物理学的性質からももたらされることに注意すべきである。

4. 一段タンクモデルは洪水流出応答の準定常性を正確に表現している

貯留型モデルを構成する一段タンク（貯留関数と称しても同じ）は、流量が貯留量と一対一の単調増加関数であることを表し、準定常状態を保つ水理学的連続体を表現するという物理学的な意味を持っている。したがって、高棹モデルを選定としても、不飽和帯と飽和帯の連結を考えると、いずれも包含できる「ふところの深さ」を備えている。しかし、従前から言われてきたように、流量と貯留量との具体的関数関係の物理的背景が何であるのかは、不明である。したがって、この関数形が、斜面条件（地形・土壌厚さ・土壌物理性）や水理条件（降雨規模など）によってどのように変化するかを解明しなければならない。ただし、斜面上の流出場はきわめて複雑不均質であるのに、関数形は一般に非常に簡潔なものであるという、経験的にきわだった対比があって、各種条件の関数形へのパラメタリゼーションは容易ではない。筆者は、単純な条件ではあるが、降雨条件が与えられたとき、斜面条件が貯留量・流量の関係を通じて降雨流出応答関係に及ぼす影響を解析する手法を開発している（Tani, Hydrol. Earth Syst. Sci., 17, 2013）。それは、降雨強度を無次元化の基準とした相似率の枠組みを提起したものであって、これによって、貯留型モデルへの諸条件をパラメター化するきっかけが与えられたと考えている。

5. 斜面は不均質なのに、なぜ、洪水流出応答は単純なのか

洪水時の降雨流出が単純な流量・貯留量関係に基づく一段タンクで表現され、しかも降雨規模が大きくなっても持続的であることの理由を最後に考えてみる。不均質な場で生起する現象は、空間規模が大きくなると平均化され、単純になりやすいことは確かである。けれども、平均化されずに特性がそのまま残る場合も存在するはずである。例えば、降雨規模とともに地中流から地表面流に変化するとか、斜面勾配が急な流域と緩い流域とでの降雨流出応答の差などは、流出機構からみて空間が大きくなっても一定の傾向が残ると予想される。しかし、降雨が100%洪水になるような豪雨でも流量・貯留量関係は一定である解析結果（Tani: J. Hydro. 200, 1997）、ある程度急な斜面では勾配の影響が見られない観測結果（Montgomery et al., Water Resour. Res.38, 2002）があり、流出機構に基づく予想とは異なる傾向が否定できない。筆者は、こうした傾向は、土壌層の長期にわたる発達形成過程から生じると考えている（谷：水文・水資源学会誌 26, 2013）。すなわち、日本のような地殻変動では、強い侵食力によって崩壊が繰り返されているが、崩壊と崩壊の間には、土層が発達してゆくプロセスがある。そのためには、少なくとも、勾配が急でかつ凹地状の集水地形の斜面部位には、土壌層発達のみみちの発達をともなっているのではないかと。その結果、不圧地下水がきわめて高速で効率的に排水され、地下水面上昇にともなう間隙水圧上昇を抑制することになり、地下水面より上側の不飽和帯における土壌水の鉛直浸透過程が流出応答にかかわる波形変換を担う。そこで、降雨流出応答が降雨規模にかかわらず、一貫して一段タンクで表される単純性を持つ根拠は、長期時間スケールにおける土壌層の発達プロセスに求められるのではないかと考えられる。

6. おわりに

山地森林流域における降雨流出応答関係に及ぼす流域条件の影響として、高棹モデルのような不飽和帯を無視した分布型流出モデルから示唆されるような性質は、まず期待できない。他方、一段タンクモデルをユニットとして構成される貯留型流出モデルは、水理水頭の伝達に基づく応答関係を水理学的に正しく表現している。したがって、最近観測で明らかにされてきた土壌層や風化基岩層における飽和帯と不飽和帯の水理学的な連続構造（小杉ら、砂防学会誌 65, 2012）を基に、それが貯留型モデルのパラメータにどうしたら反映させられるのか、に焦点を絞った流出モデル開発戦略が不可欠である。この作業はたしかに今後の仕事ではあるが、流出モデルの方向性転換を意識することは、いま、避けて通れないのである。

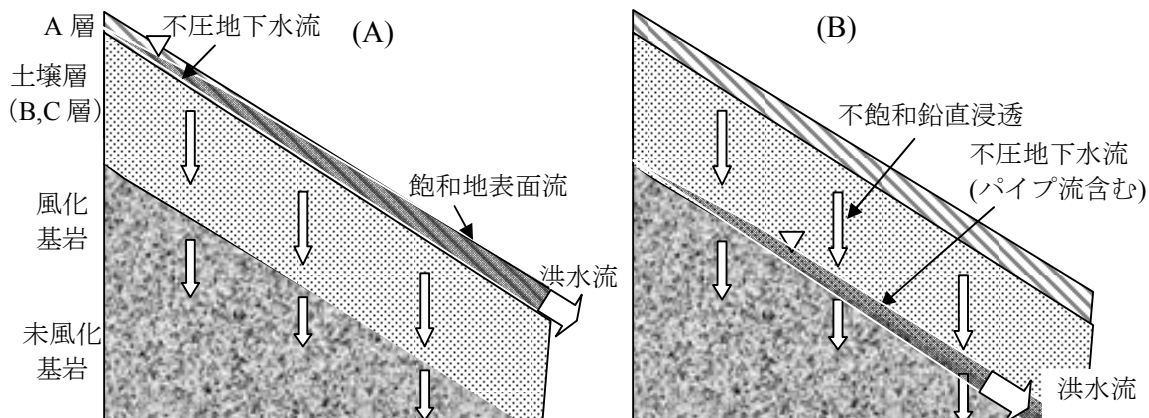


図1 (A) 不飽和帯を考えず A 層の不圧地下水流と飽和地表面流で洪水を説明するモデルと、(B)不飽和帯と不圧地下水の水理学的連続体によって洪水流を説明するモデルの対比