



飽和不飽和浸透流と降雨流出応答との整合性を探る

谷 誠¹

水文学では、蒸発散と雨水流出の両過程が基幹を為しており、いずれも土壤物理学を基礎知識として欠くことができない。ところが、山地斜面における流出過程に関しては、土壤物理学の応用に関して問題が残されている。この点について考えたい。

流出過程とは、大気中から重力によって落下する雨水が、やはり重力のみによって陸上から海洋に雨水を移動させる物理現象である。その最初の部分を担う斜面での流出過程は、ほぼ空間的に均質に降る雨水を受けた土壤における鉛直浸透過程に始まる。降雨は間欠的に生じ、無降雨期間には蒸発散があるので、降雨開始時点の土壤水分は低下して不飽和透水係数 K は一般に非常に小さくなる。一方、降雨強度 r の範囲は、しとしと雨からスコールまで一見広いようだが、 $1 \sim 100 \text{ mm h}^{-1}$ 程度でほぼ 2 オーダー以内にはいる。地表面付近の飽和透水係数はこれより大きい一方、体積含水率 θ に対する K の変化は急激で著しい非線形性があるため、無降雨時の K は降雨強度に比べてかなり小さくなる傾向がある。降雨が続くと土壤は湿潤化し、 K が r とほぼ同様のオーダーまで大きくなるが、不飽和状態は維持される。これまであまり注目されてこなかったのだが、降雨流出関係の時間変動においては、以下に述べるように、この K と r の関係が重要である。

林内雨量と土壤物理性双方の空間不均質性のために地表面流が発生する場合もあるが、雨水は通常土壤に浸潤する。乾燥した土壤で K が r のオーダーよりも小さい場合は、降雨開始後、 K が r に近づくまで湿潤化して土壤表面からウェッティングフロントができる。そもそも、土壤水・地下水の移動が Richards 式で解析できることは、圧力水頭が水理学的に連続していることを意味している。しかしながら、不飽和帯では、毛管力の大きい小間隙を優先的に伝わって水が移動するので、乾燥した土壤の K は r よりはるかに小さい。そのため、雨水を流すには K が大きくなる必要があり、下方の乾燥部との間に大きな θ の差異が生じる。しかし、この差異をならす水分拡散係数も小さいため、圧力水頭の下方への伝播が進まず、ウェッティングフロントと称される不連続な面が生じてしまうわけである。そのため、それよりも地表面側に雨水が貯留され、水文学で言う「損失」となって流出増加には寄与しない。

一方、土壤が下方まで湿潤になっており、土壤層全体で K と r が同じオーダーになっていたとすれば、 θ の上下差が小さいことと拡散係数が大きいことの両効果により、圧力水頭の伝播は速やかで浸透した雨水変動は流出変動に伝わりやすくなる。ただし、水分子の移動としては、雨水（「新しい水」と呼ばれる）が出口まで流れ出てくるわけではなく、土壤に貯留されていた「古い水」が押し出されることとなる (Anderson et al., 1997)。水理学的に連続しているとはいっても、圧力水頭の鉛直方向への伝播の状況は、 K が r より小さい乾燥部分が残されている場合と K が r のオーダーになっている湿潤部分が土壤層全体をおおっている場合とでは、大きく異なるわけである。

さて、 r に時間変動があったとき、不飽和土壤においては K や θ の変化をとまなうので、必然的に土壤内部での貯留変動がもたらされる。乾燥土壤におけるウェッティングフロント下降の場合も θ が変化するが、この不連続面によって貯留変動が地表面付近に偏ってしまい、 K が著しく小さい乾燥部が圧力水頭の伝播を遮断して、流出強度 q には変動が伝わってゆかない。湿潤化して貯留変動の偏りがなくなって初めて、 r の変動は q の変動に伝わる。重要なことは、貯留変動がある以上、湿潤化後であっても、 r の変動は貯留変動を引き起こすことで緩衝されて q の時間変動がならされるということである。湿潤土壤での鉛直浸透は、貯留変動なく圧力水頭を伝播させる栓流に近いとの観測結果もあるが (Torres et al., 1998)、不飽和帯であるがゆえに必ず貯留変動が随伴し、厳密な栓流にはなり得ない。この貯留変動を経ることによって、降雨の激しい時間変動に比べて流出変動が平準化され、ピークが低くなる (Tani, 2013)。

実際の山地斜面では、地表面流やパイプ状水みちの流れや風化基岩を通じた流れなどが入り乱れており、確かに複雑である。しかし、土壤における水移動においては、Richards の式で記述される飽和不飽和浸透流は、雨水流出の主役を担っていると筆者は考えている。ところが、水文学の歴史では、必ずしもそうは認識されてこなかった。斜面水文学の歴史を 1970 年頃まで振り返ってみよう。

いま、通常の飽和透水係数を持つ物理性の均質な斜面土壤層を考えると、土壤内を斜面方向に流せる流出強度は洪水流出を説明できるほど大きくはないことが、飽和不飽和浸透流計算によって明らかになっている (Freeze, 1971)。

¹ 人間環境大学

そのため、降雨があると地下水面が地表面まで上昇してあふれ、飽和地表面流が発生する。その発生区間に降った雨水は浸潤できず、地表面における流れによって素早い時間変動を持つ洪水流出ハイドログラフが形成される。とすれば、飽和地表面流発生区域に降った「新しい水」が主に洪水流出になるはずである。ところが、1980年代には、洪水流出の流出水を調べると地中に降雨前から存在していた古い水が多くを占めることがわかってきた (Pearce et al., 1986)。これを説明するには、いったん土壌にはいったん雨水が洪水流出に寄与することを説明しなければならない。土壌を均質としている仮定自体に無理があることになり、パイプ状水みちを含む不均質な透水性媒体とみなすほかはない。雨水と土壌水との混合 (McDonnell, 1990) や土壌水の押し出し (Anderson et al., 1997) が、古い水が洪水流出に寄与する原因と考えられるようになってきた。

古い水の洪水寄与は、不均質な土壌層内での水の動きによると認識できたわけだが、降雨強度 r の変化であるハイエトグラフを流出強度 q の変化であるハイドログラフに波形変換する降雨流出応答関係が具体的にどのようなメカニズムによって担われているのかは、現在の水文学でも統一的理解が得られているわけではない。本稿では不飽和鉛直浸透に随伴する貯留変動が主にかかわるメカニズムに言及したが、そうした概念は一般的だとは言えない。むしろ、水理学的には不圧地下水に属する斜面方向の浅い地中流 (subsurface flow) か、もしくは開水路に属する地表面流が波形変換を担うのだと考えられてきたのである。筆者もそれらの役割を否定するものではないが、土壌が湿潤になってからの鉛直不飽和浸透流の役割が無視されてきた点はずいぶんここで指摘したい。そこで、波形変換の担い手に関してさらに詳しく説明する。

降雨が継続して土壌が湿潤化すると、斜面方向への浅い地中流が発生する。そのため、洪水流出の波形変動はこの浅い地中流の性質に依存し、例えば斜面長が短く勾配が急な場合に雨水の斜面下端への到達時間が短くなって流出強度のピークが大きくなりやすいなどの結果が想定されていた (例えば、神田ら, 1990)。また、地下水ではダルシーの法則にしたがい、水深と流れの強度が比例するため、降雨から流出への波形変換は浅い地中流からもたらされるので線形となるはずだとされ、降雨流出応答関係に広く見られる非線形性をどのように説明するかが、長く議論されてきた (Harman and Sivapalan, 2009)。それらの降雨流出応答関係の説明に関する理論的な研究では、乾燥期間には不飽和浸透流が雨水を吸収貯留するという認識は共有されているのだが、土壌が湿潤化して以降は波形変換が斜面方向に向かう流れによって担われることは暗黙の前提とされ、浅い地中流の水面よりも上側に存在する不飽和帯の役割は無視されてきた。現地斜面で行われた詳細な観測研究の中には、急斜面で洪水ピークが大きくなる傾向がみられないとの結果を基にして、洪水流出波形変換が斜面に沿う流れではなく、鉛直不飽和浸透流によってもたらされるとの考え方も提起された (Montgomery and Dietrich, 2002)。しかし、これは個別の観測結果にとどまり、鉛直不飽和浸透流の役割が理論的な降雨流出応答関係の研究において一般的に認知されるには至らなかった。

こうした降雨流出波形変換の担い手に関する問題の発生原因は、降雨を境界条件とする傾斜土壌層における水理学的な理論が確立されないままに、降雨流出応答関係が議論されているところにあると、筆者は考えている。そこで筆者は、最も簡単な条件として、一定強度の降雨を境界条件とする定常状態における傾斜土壌層の流れを考えたとき、圧力水頭の空間分布はどのような水理学的な性質を持つのかを検討した (Tani, 2008)。その条件での Richards 式による定常分布の計算結果によると、傾斜土壌層の流れは、鉛直不飽和浸透流、斜面方向への不飽和浸透流、斜面方向への飽和浸透流 (不圧地下水流) の3つで近似されることが示され、境界条件や土壌物理条件で、この3つの流れの領域がどのように変動するかが明らかにされた。そして、引き続き研究 (Tani, 2013) によって、パイプ状水みちのような地下水の効率的な排除を行う構造がなければ、まさしく Freeze (1971) の計算通りに飽和地表面流が発生するのだが、もし水みちのような不均質な構造を持つ場合は、地下水面上昇が抑制されて鉛直不飽和浸透流の役割が大きくなり、結果的に、不飽和帯が波形変換の担い手となることも示された。

このように、パイプ状水みちは降雨波形の洪水流出波形への変換に重要な役割を果たす。しかし、なぜそういう水みちを含む不均質構造が存在するのかは、狭義の水文学の枠組みでは説明が困難である。すなわち、湿潤変動帯 (塚本, 1998) の急斜面における強い侵食外力に耐えて土壌層が発達する長期過程 (下川, 1983) から不均質構造の成立を考えざるを得ない。いったん土壌層が崩壊してしまった急斜面に土壌層が再生し厚みを増すためには、植物根系の粘着力補強 (北原, 2010) が決定的に重要である。しかしその補強があっても、降雨時に地下水面が地表面まで頻繁に上昇するとすれば、土壌層の安定条件は浮力のために低下して、斜面安定条件を維持することはむずかしい。地下侵食 (新藤, 1993) によって、排水構造が土壌層とともに発達することが必要だと考えられる。

筆者らは、土壌層の発達と流出機構の関係に関するこうした学際的な研究について、多様な時間スケールの変化が入れ子構造を為すことに注目し、科学研究費によるプロジェクト「地形・土壌・植生の入れ子構造的発達をふまえた流域水流出特性の変動予測」(2011–2015年度)に取り組んできた。その成果は、拙著「水と土と森の科学」(谷, 2016)のほか、「地形学連合」の雑誌「地形」の特集号にまとめるべく、現在、地形学が専門の松四雄騎氏 (京都大学防災研究所) とともに編集作業を行っている。降雨流出過程の包括的な理解には、地形学、土壌物理学、水文学に関する学際的な協力がどうしても必要である。土壌物理学のご専門の方々、雨水流出過程とのリンクについて、より強い関心をお持ちいただければ幸いである。

引用文献

- Anderson, S.P., Dietrich, W.E., Montgomery, D.R., Torres, R., Conrad, M.E. and Loague, K. (1997): Downslope flow paths in a steep unchanneled catchment. *Water Resources Research*, 33: 2637–2653.
- Freeze, R.A. (1971): Three-dimensional, transient, saturated-unsaturated flow in a groundwater basin. *Water Resources Research*, 7: 347–366.
- Harman, C. and Sivapalan, M. (2009): A similarity framework to assess controls on shallow subsurface flow dynamics in hillslopes. *Water Resources Research*, 45, doi:10.1029/2008WR007067.
- 神田 徹, 神吉和夫, 吉岡泰邦 (1990): 斜面流域における洪水到達時間の推定. *土木学会論文集*, 417: 53–62.
- 北原 曜 (2010): 森林根系の崩壊防止機能. *水利科学*, 53(6): 11–37, 2010.
- McDonnell, J.J. (1990): A Rationale for old water discharge through macropores in a steep, humid catchment. *Water Resources Research*, 26: 2821–2832.
- Montgomery, D.R. and Dietrich, W.E. (2002): Runoff generation in a steep, soil-mantled landscape. *Water Resources Research*, 38: doi:10.1029/2001WR000822.
- Pearce, A.J., Stewart, M.K. and Sklash, M.G. (1986): Storm runoff generation in humid headwater catchments 1. Where does the water come from? *Water Resources Research*, 22: 1263–1272.
- 下川悦郎 (1983): 崩壊地の植生回復過程. *林業技術*, 496: 23–26.
- 新藤静夫 (1993): 災害とその予測 第四紀研究の果たす役割 — 斜面災害における地中水の集中流現象. *第四紀研究*, 32: 315–322.
- Tani, M. (2008): Analysis of runoff-storage relationships to evaluate the runoff-buffering potential of a sloping permeable domain. *Journal of Hydrology*, 360: 132–146.
- Tani, M. (2013): A paradigm shift in stormflow predictions for active tectonic regions with large magnitude storms: generalisation of catchment observations by hydraulic sensitivity analysis and insight into soil-layer evolution. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17: 4453–4470, 2013.
- 谷 誠 (2016): 水と土と森の科学, p. 243. 京都大学学術出版会, 京都.
- Torres, R., Dietrich, W.E., Montgomery, D.R., Anderson, S.P. and Loague, K. (1998): Unsaturated zone processes and the hydrologic response of a steep, unchanneled catchment. *Water Resources Research*, 34: 1865–1879.
- 塚本良則 (1998): 森林・水・土の保全 — 湿润変動帯の水文地形学, p. 138. 朝倉書店, 東京.