

乾燥土壌と湿潤土壌の保水力

大水害と森林の保水力

わが国の自然条件は急峻な地形と多発する豪雨を特徴としていますが、2018、19年と連続で広域発生した大水害に直面してみると、人間活動の拡大を原因とした豪雨規模の増大をともなう気候変動の影響を認めざるを得ません。こうした現状において、緑のダム機能とも呼ばれている日本の山地をおおう森林の保水力は水害に対しては無力的なのでしょうか。森林の手入れや保全は減災に対して無関係なのでしょうか。森林水文学の立場から、拙著「水と土と森の科学」¹、ならびに「森林と災害」の教科書の中でわたしの担当した「第1章 水循環に及ぼす森林の影響」²をもとに、いま考えているところをまとめておきたいと思います。

乾燥土壌の保水力と湿潤土壌の保水力

岡山市郊外にある2つの隣り合う山地小流域に、台風による大雨があった際の降雨流量の観測結果（図1）を参考に、保水力について具体的に説明しましょう。

一般に、森林と土壌でおおわれた山地斜面に大雨があった場合は、雨水のほとんどは乾いた土壌にしみ込み、土壌水分を大きくすることで貯留され、洪水をもたらすような流量は川に流れてきません。この貯留効果は広く知られており³、これを乾燥土壌の保水力と呼ぶことにしましょう。図1では、9月9日がその期間に該当します、雨が降り続き土壌が十分湿ってしまうと、図1の9月10日に見られるように、川へ流れ込む流量は急に大きくなります。そこで、国土交通省³や河川水文学の研究者は、9月11日午後以降に示される、洪水をもたらすような流量の総量が降雨総量とほぼ同じになると、森林の保水力が限界に達すると考えているようです⁴⁵。しかし、保水力の一部は引き続き発揮されます。これについて、図1の9月11日午後以降のグラフに基づいて説明しましょう。

多くの観測研究²⁶⁷によりますと、大雨によっても土壌は湿りますが飽和するのではありません。飽和した土壌層に降る雨水のすべてが地表を走って直接川に流れ込み、それが流量のピークを作り出すと考えられやすいかもしれませんが、実はそうではないのです。こうした大雨の期間でさえ、雨水の多くは土壌にしみ込み、雨が降り出す前から貯留されていた土壌水を玉突きのように押し出します。そのため、川の流量の大きなピークは、部分的に発生する地表面流も確かにかかわりますが、土壌層から流れ出す水によって生じる方がむしろ多いのです。土壌に浸透する水は後日ゆっくり流れてくると考えられやすいのですが、洪水をもたらすような大きな流量をも産み出すことに注意してください²⁸。

ここで重要な点は、雨水が土壌層を通ることで流量の時間変化がならされることを、きちんと理解することなのです。いま、大雨が降り続けているとき、さらに激しい雨が

降ったとします。川の流量のピークはその雨の強さ（例えば 50 mm/h）に流域面積を掛けた値よりは小さくなりますが、そのピーク低下は、土壤に浸透してから流れてくる場合の方が地表面を流れてくる場合に比べて大きくなります。その理論的な根拠は土壤物理学にあり、次のような説明ができます。降雨中、雨が強くなると、その大きくなった水量を流すため、土壤はその中に含まれる水分量（体積含水率）を増加させなければなりません。逆に雨が弱くなると体積含水率は減少します。その結果、土壤内に貯留される水量の変動がクッションのようなはたらきをして、土壤層から流れ出す流量の時間変化は、はいつてきた降雨の時間変動よりもなだらかになるのです²⁹。この大雨で湿潤になった土壤が示す流量ピークを低くする効果を湿潤土壤の保水力と呼ぶことにします。

この湿潤土壤の保水力については、2011年の日本学術会議による国土交通省水管理・国

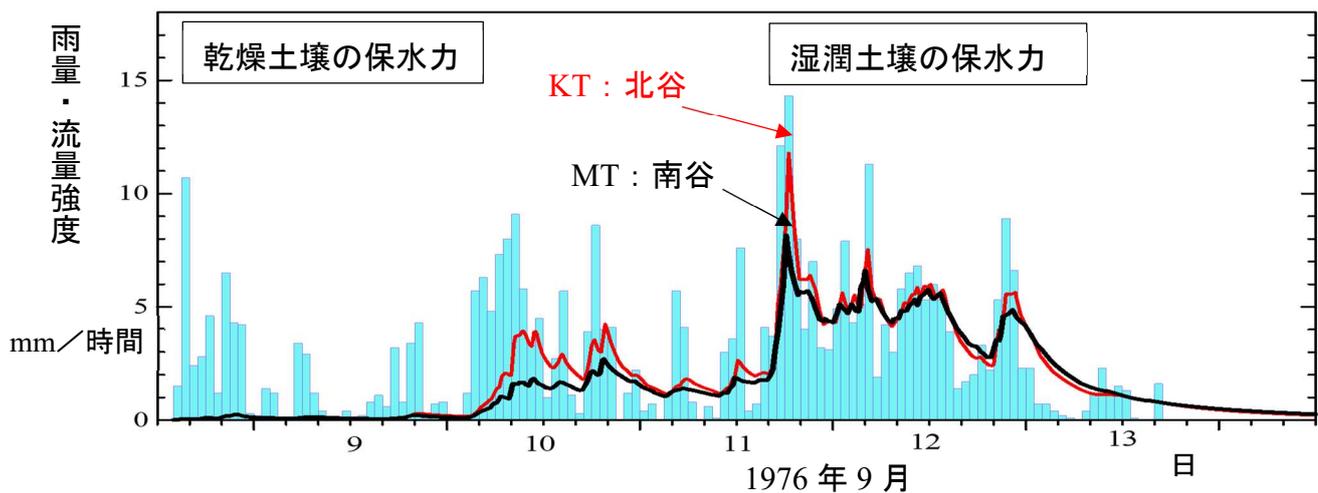
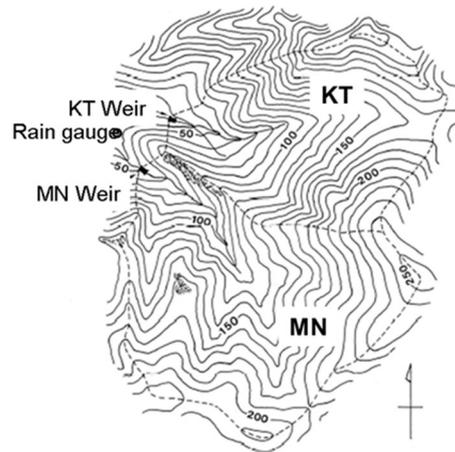


図1 雨量が相等しい2つの山地小流域における、総雨量375mmの大雨の場合の、雨量と流量の時間変化

右上に、観測が行われた岡山市近郊にある森林総合研究所竜ノ口山森林理水試験地の北谷(KT)と南谷(MN)の地形図を示す。

流量は、単位流域面積あたりで表示されており、雨量強度を示す棒グラフは、雨水が貯留されずにそのまますべて一気に流出したと仮定したときの流量をも表現する。

初めのうち(9月8~9日)はほとんど流量が増加しておらず、乾燥土壤の保水力の効果を示す。10日頃から流量が増加し、11日午後になると、流量の規模は雨量の規模とほとんど同じになっているが、時間変化がなげらされておる、湿潤土壤の保水力の効果が現れている。

南谷は、北谷に比べて流量の時間変化が緩やかでピークも低いので、湿潤土壤の保水力がより大きいことがわかる。

土保全局長への回答「利根川水系の河川流出モデル・基本高水の評価と検討」においてもふれられており、「規模の大きい出水であっても、流出波形（流量の時間変動のことです）を緩やかにする機能は維持」されると表現されています¹⁰。

緑のダム的人工ダムとの比較

人工ダムとの対比によってさらに説明を加えましょう。人工ダムの機能は、「貯水池の貯留量の変動によって、放流量の時間変化を流入量の時間変動よりもならしてして最大流量を低くする」ことです。これに対して、大雨期間における湿潤土壌の保水力は「土壌層の貯留量の変動によって、斜面から出てゆく流量の時間変化を斜面に降る雨量の時間変化よりもならして最大流量を低くする」ことなので、人工ダムの機能と何ら変わらないこととなります。ところが、2019年台風19号の水害を経た後に出版された最新の書物⁵をみても、洪水期間の総流量を総雨量よりも小さくする緑のダムの効果（乾燥土壌の保水力）が大雨の場合に限界に達することを説明して、「大洪水ではピーク流量の低減を期待できず」と結論しています。この説明は、乾燥土壌の保水力の限界を根拠に洪水流量のピークを低くする湿潤土壌の保水力を否定しており、誤った結論と言うほかはありません。

ところで、図1を見て、11日の流量ピークは雨量のピークよりも確かに低いけれども、その低下量はわずかだと感じた方もあるのではないのでしょうか。しかし、緑のダムにしても人工ダムにしても、その効果を過大に評価することは危険です。また、乾燥土壌及び湿潤土壌の保水力は、いずれも土壌層の存在が前提になって生じるものなので、山崩れがあると完全に失われます。実際、土壌層内の地下水が低い場合は、土壌層の安定が保たれるのですが、地下水面が上昇してしまうと浮力が発生して、その時点で崩壊が起こることが多いです^{11 12}。斜面上の土壌層は、地質等によって異なるとはいえ、千年程度の時間スケールでは、一度は崩壊するとみるべきです。森林の保水力も、人工ダムや堤防の効果と同様、決して過信することはできません。

とはいうものの、水源山地の斜面がすべて崩壊してしまうことはないので、流域全体でみると湿潤土壌の保水力が消滅するわけではありません。ひとつの斜面の崩壊は滅多に起こらないのに土砂災害が毎年発生するのは、単に山地に斜面が多数存在するからです。急傾斜地崩壊危険箇所は全国で33万箇所¹³ですが、斜面の数はさらにずっと多いはずです。他方、人工ダムは、建設されてまだ百年も経過していないことに注意が必要です。その機能を千年の時間スケールで維持させるためには、堆積土砂の除去やコンクリート劣化の修繕が必要になります。ですから、緑のダムが人工ダムよりも破壊されやすいと言うわけではありません。

長期的視点の重要性

そもそも、大雨の際には、斜面の土壌層を崩して押し流そうとする強い侵食力が生じますが、それに耐えて森林生態系が長年の間繁栄できるのは、多様な生物種の生命力の総和があるからです^{1 14}。その結果、斜面に土壌層が安定に保持され、乾燥土壌及び湿

潤土壌の保水力が創られてくるのです。そのため、樹木の伐採は根を腐朽させて土壌層を崩れやすくします^{15 16}。とはいうものの、地球全体での森林破壊を防ぐ観点からは、木材や紙その他の生活資材として使い続けていながら、日本の森林だけ伐採しないという利己的な選択はできません¹。水害の減災のためには、治水工事や避難対策ももちろん重要ですが、樹木の成長に要する半世紀以上の時間スケールを考慮して、豪雨規模増大につながる温暖化の進行を抑制し、森林資源の持続的利用と保全の両立を図るような、社会全体にまたがる抜本的な対策も不可欠なのです¹。

参考文献

- 1 谷誠：水と土と森の科学、京大出版、243p、2016。
- 2 谷誠：水循環に及ぼす森林の影響、中村太士・菊沢喜八郎編：森林と災害、共立出版、24-77、2018。
- 3 国土交通省：「緑のダム」が整備されればダムは不要か、国土交通省ホームページ、https://www.mlit.go.jp/river/dam/main/opinion/midori_dam/midori_dam_index.html。
- 4 山田正：河川工学、治水の立場から、蔵治光一郎・緑のダムの科学、31-45、2014。
- 5 高橋定雄：森林における治水・利水機能とその限界、虫明功臣・太田猛彦監修：ダムと緑のダム、日経 BP、45-68、2019。
- 6 Montgomery, D. R., Dietrich, W. E.: Runoff generation in a steep, soil-mantled landscape, *Water Resources Research* 38, 2002. doi: 10.1029/2001WR000822.
- 7 Watakabe, T., Matsushita, Y.: Lithological controls on hydrological processes that trigger shallow landslides: Observations from granite and hornfels hillslopes in Hiroshima, Japan. *Catena* 180, 55-68., 2019. doi.org/10.1016/j.catena.2019.04.010.
- 8 谷誠：森林斜面の洪水緩和効果はどのように評価できるのか、北海道の自然（北海道自然保護協会会誌）55、41-50、2017。
- 9 谷誠：複雑な斜面流出機構が単純な降雨流出応答を産み出す根拠、地形 37、531-557。
- 10 日本学術会議：「河川流出モデル・基本高水の検証に関する学術的な評価」（回答）、日本学術会議ホームページ、<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/kohyo-21-k133.html>。
- 11 秋山怜子・木下篤彦・内田太郎・高原晃宙・石塚忠範：。簡易な水文モデルを用いた崩壊発生時刻予測手法、砂防学会誌 68(2)、3-13、2015。
- 12 Milledge, D. G., D. Bellugi, J. M. McKean, A. L. Densmore, and W. E. Dietrich: A multidimensional stability model for predicting shallow landslide size and shape across landscapes, *J. Geophys. Res. Earth Surf.*, 119, 2481-2504, 2014. doi:10.1002/2014JF003135.
- 13 国土交通省砂防計画課：土石流危険渓流及び急傾斜地崩壊危険箇所に関する調査結果の公表について、2013、https://www.mlit.go.jp/kisha/kisha03/05/050328_.html。
- 14 松四雄騎・外山真・松崎浩之・千木良雅弘：土層の生成および輸送速度の決定と土層発達シミュレーションに基づく表層崩壊の発生場および崩土量の予測、地形 37、427-453、2016。
- 15 谷誠・玉井幸治・鶴田健二・野口正二：治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全との両立」、森林科学 80、42-45、2017。
- 16 谷誠：森林利用と環境保全の両立に関する研究の必要性、森林科学 80、56-57、2017。