

森林斜面の洪水緩和効果はどのように評価できるのか

谷 誠

要 旨

森林斜面の洪水（流出）緩和効果（降雨に対する河川流出量の増加を緩和する効果、いわゆる「緑のダム」の効果）を、水の流出メカニズムに基づいて解説した。中小降雨では、降雨の一部は土壌に貯留されて河川の洪水流出量は降雨総量よりも小さくなる。大雨になると、この総量減少効果は限界に達し、それ以降に降る雨の総量と河川の洪水流出総量がほぼ等しくなる。そのような大雨の場合も、土壌内にしみこんだ雨水が斜面方向にパイプ状水みちを通して速やかに排水され、地下水面上昇が抑えられる結果、土壌に水で満たされない不飽和間隙が残される。そのため、その間隙内に含まれる貯留水量は大雨の期間も時間変動し、洪水流出量の時間変化が均される。これにより、ピーク流出量が低くなる流出平準化効果が発揮される。

こうした2種の効果が存在するにもかかわらず、治水計画においては、水源山地の森林やその変化の影響は考慮されていない。その一方、森林の取り扱い方法を変更することによってこれらの森林による効果を短期間に増進させることは難しい。可能な対策は森林の洪水緩和効果が低下しないようにすることであり、そのためには、流域における森林利用と治水計画とのバランスをとることが必要と考えられる。

はじめに

治水においては、その公共事業を実施する国土交通省などの河川整備担当者と流域住民の間で、見解が異なる場合が多い。担当者の考える事業責任の範囲は、現実には災害を受ける住民の期待よりは限定されたものになりがちである。また、流域の河川部分以外における利害関係者、あるいは、公共事業を経費面で負担する国民全体も、異なる意見を持つことは当然である。流域内の都市・農地・森林などの土地利用管理のあり方は、豪雨による河川の流出増加量に影響するはずであるが、その影響の大きさについても立場により評価が異なることが多い。こうした治水にまつわる利害対立や見解の相違の火だねはいくらでも存在するが、とりわけ、日本の山地をおおっている森林が降雨時の流出増加を緩和する効果、すなわち「緑のダム」の効果をどのように評価するかは、さかんに論議されてきた（蔵治・保屋野 2014）。

しかしながら、こうした議論では、「立場の違い」からの見解を述べているものが多いことは残念なことである。科学的な根拠を研究によって積み上

げるべき立場の学者が、利害関係の立場を代表しがちであり、利害関係を可能な限りそぎ落として得られる科学的見解を研究者が共有できていないように、筆者は思っている。確かに科学論文そのものは、理論や実験によって得られた結果を先行研究に照らしてどのように評価できるかを論じることで完結してしまうのが恒であるが、それでは、少なくとも研究の社会的な意義はわかりにくい。もちろん、「利害関係を可能な限りそぎ落として得られる科学的見解を研究者が共有する」ことは容易ではないが、この重要性を強く意識することは、自然科学の社会的な役割を認識するうえで非常に重要である。

本論考では、これまで得られてきた降雨流出機構について、研究者の間で共有が可能であると筆者が考える見解を、わかりやすく説明したい。降雨流出機構は、野外観測によって明らかになってきたわけであるが、地理的条件が異なれば違うということで、なかなか一般的な見解が研究者間で共有されてこなかった。しかし、日本のような、地震や豪雨が頻発する「湿潤変動帯¹⁾」の山地で、森林が斜面をおおっているような環境での流出機

注1 湿潤変動帯：日本は複数のプレートの境界に位置し、また温帯モンスーン地帯にある。そのため、激しい地殻変動と多量の降雨があり、それらによる山岳の継続的な隆起と強い侵食作用が特徴となっており、その地理的条件を表現した用語。

構には共有される特徴が見いだされてきたと、筆者は考えている。それでも、そうじゃないという研究者もあろうから、評価は今後の研究にゆだねるほかはない^{注2}。

2 降雨によって河川に洪水流出が生じるメカニズム

2.1 流域貯留量変動が流出に大きな影響を及ぼす

山地においては、尾根で囲まれた流域と呼ばれる空間（図1左）に降った雨水が低い部分に集まり、河川を通過して海に向かって流れてゆく。流域では、家計におけるお金の収支と同じように、空からの降水を収入、空に帰る蒸発と河川へ流れる流出を支出とする流域水収支が成り立つ。この水収支は流出を表す排水孔のついたタンクのイメージでも表現できる（図1右）。なお、以下では、貯留量と流出量を単位流域面積あたりの量で表すことにし、降雨と同じmmの単位で表現する。

さて、図1右のタンクのご概念図における大事な点は、流域における流出量と貯留量への降雨量の配分割合がタンクの排水孔の大小によって表現されていることである。孔が大きいタンクに対応するような流域では、降雨量がすぐに流出してしまつて貯留量増加は小さくなる。反対に孔の小さいタンクに対応する流域では、降雨量の多くが貯留量増加に配分されることによって流出量変動が均されるのである。家計の場合であっても、給料日（降雨期間）に収入（降雨量）を貯金（貯留量）に配分しなければただちに支出（流出）してしまい、収入のない日（無降雨期間）は支出（流出）

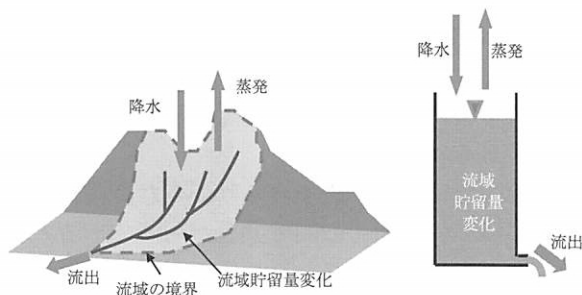


図1 流域水収支を説明する概念図
右図はタンクでモデルを表現しており、水収支が成り立っていることを示している。

できない不安定な生活になってしまう。収入（降雨量）の多くを貯金（貯留量）に配分するからこそ、支出（流出量）を均すことができるわけである。図1右のタンクのご概念図は、単に流域の水収支を示すだけではなく、貯留量と流出量の時間変動における相互関係を表現していることをご理解いただきたい。

さて、貯留量の時間変動が流出に対して重要な役割を果たすわけであるが、経験的に、流出の時間変動には1日の間に半分位に減ってしまう激しい変動と、一日程度の期間では変化が目立たないようなゆっくりした変動が区別されることがわかっている。降雨中と直後の激しい変動である前者は「洪水流出^{注3}」と呼ばれる。なお、洪水流出といっても別に氾濫するわけではない。一方、後者は「基底流出」と呼ばれる。山地斜面の地下は深くなるほど水の通りが悪くなる傾向が認められるので、洪水流出は地表面あるいは浅い土壌層内の流れにより、基底流出はそれよりも深いところでの流れにより産み出されるとこれまでは考えられてきた。しかし、図4にも示すように、これらの流れは互いに混ざり合っており、複雑であることが現場観測によってわかってきた。ここでは、これまで観測で明らかになってきた洪水流出のメカニズムについて説明して行きたい。

2.2 洪水流出には古い水が多く含まれている

洪水流出が地中にしみこめなかった雨水による地表面流（ Horton 地表面流と呼ばれる）であるとの考え方は、1930年代にルーツを持つ。地表面流は土壌内の流れに比べてはるかに高速で流れるので、それが洪水流出を、また地下の遅い流れが基底流出を産み出すというのは、自然な考えでわかりやすい。そのため、現在でも、土壌表面から浸透できる水量を測定し、それが大きいほど洪水流出が少なくなるとみなす見解がみられる。このような降雨強度が土壌表面での浸透可能強度を上回ることで発生する Horton 地表面流は森林斜面でも確かに発生する。しかし注意しなければならないのは、都市化された丘陵などとは違って、地表面流だけが森林斜面からの洪水流出となるのではないことである。地中に浸透した雨水の一部も洪水流出となり、降雨前から土壌内に貯留されて

注2 本論考では、説明の裏づけとなる科学的なデータ引用については省略している。詳しくは、拙著「水と土と森の科学」（谷 2016）や筆者の個人ホームページをご覧ください。
(<https://sites.google.com/site/guchenghomupejitanimakoto/>)

注3 洪水流出：洪水とは、一般には、大雨などにより河川から氾濫した水によって土地が水没したり、水浸しになる自然災害をさすことが多い。しかし、水文学においては、洪水流出とは単に通常よりも河川流量が増加する現象をいい、それによる氾濫や災害の有無とは関係ない。本論考では、洪水流出を後者の意味で使用する。

いた水（古い水）が、地表を流れてきた雨水（新しい水）に比べ、むしろ洪水流出の中に多く含まれていることがわかってきたからである。

まず、土壌層が雨水を流す能力について説明しよう。いま、長さが10 m、深さが1 mほどの箱に土壌を詰め、長さ方向に30°ほどの傾斜をつけて斜面土壌層をこしらえたとする。表面に強度一定の降雨を人工的に降らせると、1時間に100 mm程度までの雨であれば、すべて土壌内に浸透する。しかし、雨を降らせ続けると、土壌層内の傾斜方向への流れはゆっくりであり、かつ地表面からの雨を受けてどんどん流量が増えるので地下水面が上昇してゆき、長さ10 mの短い斜面であっても、地表面に地下水があふれてくる。まして、自然斜面であれば、長さが50 mを超えるような斜面が普通なので、特に大雨でなくても土壌の中で地下水を流しきることができない。こうして地下水があふれて地表面流（飽和地表面流：ホートン地表面流とは区別される）が生じた場合、それは洪水流出になる。また大雨の時は、その地表面流の上にさらに雨が降って洪水流出量を大きくするので、流出水には古い水よりも新しい水が多くなるはずである。ところが、観測結果をまとめた恩田（2008）の第3章に詳しく説明されているように、大雨でも古い水の割合が大きいことがわかってきた。それゆえ、斜面のどこかで、古い水を洪水流出として速やかに流すメカニズムがはたらいていなければならない。では、どういうわけで地中に貯留されていた古い水が洪水流出になるのだろうか。

2.3 管水路と開水路とでは降雨強度変動の伝わり方は異なる

古い水の洪水流出への寄与のメカニズムを考えるには、水理学^{注4}の原理を知る必要がある。まず、水道の蛇口にホースをつないで庭に散水する場合を例に、水理学における管水路を取り上げよう（図2上）。水道栓を少し開くと、ホースの先から水が流れ出す。次に、水道栓を大きく開くと、ホース先の出口からの水量は栓を開くと同時に大きくなる。その理由は、流量の増加が流れの速度が大きくなることでまかなわれ、管水路に閉じ込められた水の体積が変化しないことによる。栓を開いて流量を増やしても体積が増加しないので、ホースにはいつてきた水の体積に等しい水が出口から押

し出され、流量はただちに大きくなるわけである。

次に、ソーメン流しの竹でできた水路を例にして、水理学における開水路の場合を考えよう（図2下）。水路上端には、蛇口から水が注がれ、水路内は水が流れている。次に、栓を大きく開くと水の供給量が増え、ソーメンは速く運ばれるだろう。しかし、管水路であるホースと異なり、水路出口からの排水量がただちに大きくなるのではない。開水路では、注水量の増大によって流れの速度が大きくなるが、同時に水深が増加して水路内の水の体積も大きくなる。管水路で水の貯留量が変わらないのとは異なり、開水路では貯留量が増えるわけである。この原理は、水道からの注水量があまりに大きいと水路から水があふれることから想像できるだろう。まず水路上端の水深が大きくなり、水深が大きくなった部分が下流に伝わってゆく。このように、開水路では水路上端と下端出口の間の水の体積（貯留量）が管水路と違って増加し、その結果、出口からの排水量増加が時間的に遅れる特徴が現れる。

管水路と開水路の比較からわかるのは、出口からの排水の時間遅れに差があることであり、その差が生じる根拠は水路の上端と下端の間の貯留量変化の有無であるということである。この水理学的な原理は、山地斜面での雨水の流出を考えるうえで、たいへん重要である。地表面流は、ソーメン流し水路と同じく開水路であって地表面流の水深（貯留量）が変動するので、雨の強さの変化に対応し、斜面から溪流への流出変化に遅れが生じる。この遅れにともない流出の時間変化は降雨の時間変化よりも均^{なら}されてなだらかになり、流出量

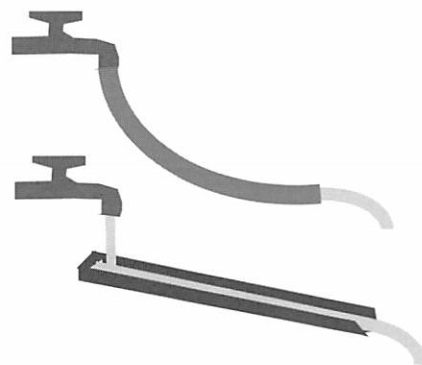


図2 ホースの中の流れ（上）とソーメン流し水路の流れ（下）
上は水理学における管水路を、下は開水路を代表する。

注4 水理学：水の流れを扱う力学をいい、水道管や河川や地下水などの流れの管理や必要な設備の設計において、その基礎となる法則性を解明する物理学である。これに対して本論考の主にかかわる水文学は、地球上の大気・海洋・陸面をめぐる水循環に含まれる現象のうち、陸面で起こっている現象を調査に基づいて理解する地球科学である。水文学研究においては、水理学の物理法則が応用される。

ピークが小さくなるのである。

以上は地表面流について説明したが、土壌層の中であればどうであろうか。土壌は土粒子の集まりであって、水はそのすきま（以下間隙という）を流れるので、地表面流に比べてさらに摩擦が大きくなり、流れははるかに遅くなる。したがって、地表面流と比べて土壌内の地下水流では、洪水流出の早い変動を産み出しにくいはずである。地下水があふれて飽和地表面流にならないかぎり、地下水の流れだけでは洪水流出を産み出せないという考えには説得力がある。

ところが、地中に大きなパイプのような水みちがあったとすればどうだろうか。その場合は地下水は速やかに流され、速やかな洪水流出変動を説明できるかもしれない。実際、山地斜面にはこうした土粒子間に巨大な間隙が見いだされている。均質な土壌を前提とすれば地下水の流れが遅く、地下水面が上昇して降雨期間に飽和地表面流が発生するのであるが、森林でおおわれた斜面では土壌が不均質でパイプ状水みちが存在するため、飽和地表面流は滅多には発生しない。土壌が均質ではないという性質が、驚くべきことに、洪水緩和効果の大きな鍵のひとつなのである。そして、地下水面より上側の土壌がその機能に大きな役割を持っている。次に詳しく説明しよう。

2.4 不飽和土壌での貯留量変動の持つ洪水緩和効果が大きい

地表面流などの開水路では水面の上には空気以外に何も無いが、土壌内には地下水面の上側の土壌の間隙の中に、空気以外に水がはいっている。この地下水面よりも上の土壌間隙内の水は毛管力によって吸引されており、地下水と区別して土壌水と呼ばれ、雨水流出においては非常に重要な役割をする。

タオルの比喩によって土壌水について説明しよう。タオルは、糸によって編まれてできており、土壌と同じように細かい間隙を含んでいる。まず、タオルを水のはいたバケツに入れると、タオルの中の間隙には水が満たされる。それは、水圧によって間隙内に水が押し込まれるからである。ところが、バケツからタオルを取り出すと、水がしたたり落ちる。これは、水圧がかからなくなったので、糸と糸との間の比較的サイズの大きな間隙では、毛管力が弱く水を吸引できなくなるからである。タオルを絞るとさらに水が落ちるが、力を込めて絞ってもぬれたままである。糸の内部にはもっと細かい間隙があって、強い毛管力で水を引きつけているからである。しかし、タオルを干し

て日射にあてると、毛管力で引きつけられている水も蒸発して逃げてゆく。間隙の大きさが小さいほどより強い毛管力で吸引されているという性質は、土壌水の場合もタオルと同じであることを、まずご理解いただきたい。

自然の土壌は織物であるタオルに比べて間隙の大きさが多様である。図3は、土壌間隙を小さいサイズから大きなサイズまで並べたとした場合の間隙での吸水状況を示している。水は毛管力の強い小さいサイズの間隙から優先的に満たされるので、乾燥した土壌においては細かい間隙にしか水が含まれていない。こうした乾いた土壌層に雨が降り始める場合を考えよう。乾いたタオルに水をかけた場合と同じように、水はまず細かい間隙に吸引され、ぬれた部分から乾いた部分に水が広がってゆく。乾いた土壌はほとんどの間隙に空気しかはいておらず、水が相互につながっている部分はごくわずかしかなないので、降ってくる雨水を移動させることができない。そのため、雨水は地表面付近にたまってしまふ。表面付近だけぬれて、すぐ下は乾いたままのような状態になる。一方、湿潤になった表面付近の土壌は、小さい間隙だけでなく比較的大きいサイズの毛管力の弱い間隙にも水がはいるので、水が互いにつながり部分が增加し、水は流れやすくなる。

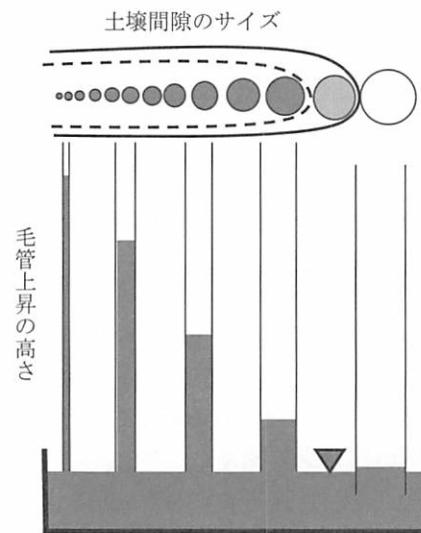


図3 土壌に含まれる間隙をそのサイズの小さいものから大きいものへ並び替えることができたとした場合における間隙サイズと毛管上昇高さの関係に関する概念図
破線と実線は、それぞれ、弱い降雨強度と強い降雨強度の場合に、水のはいている間隙サイズの範囲を概念的に示している。右端の最大サイズの間隙まで水がはいれば飽和になるが、破線、実線の範囲は不飽和であり、降雨強度の変動によって土壌内の貯留量変動することがわかる。

雨が續くと、水は上からどんどんやってきて重力で下に引っ張られるので、湿潤な土壤とその下の乾燥した土壤との間の境界（ウェッティングフロントと呼ばれる）が徐々に下がってゆき、やがて土壤層全体が湿潤状態になる。そうすると、乾燥した土壤と比べて水の通り道が大きくなって、土壤層全体で水がはるかに動きやすくなる。実際には、降雨は強くなったり弱くなったりするが、スプリンクラーのような人工降雨装置で1時間に5mmの雨を降らし続けたとすると、土壤層全体が湿潤になってその雨水を下へ運び続けるようになる。次に、降雨強度を10mmに増やすと、図3に示すように、5mmの雨を降らしていたときに水がはいっていた最大サイズよりもさらに大きな間隙にも水がはいり、その強い強度の雨水を真下方向に運ぶようになる。ただ、降雨強度が大きくなっても、土壤は不飽和の状態、さらに大きな間隙には空気ははいったままであることに注意いただきたい。

少し難しい理屈になってしまったが、先に説明したホース（管水路）とソーメン流し水路（開水路）の比較を参考にまとめてゆこう。斜面上の土壤の場合も、水道蛇口が人工降雨装置に変わったけれども、供給水量の増加にともない開水路と同じように貯留量が増加して、それが土壤からの排水に対して遅れをもたらす原理は共通している。土壤が乾いていると、それをぬらすための貯留増加はたいへん大きいのだが、土壤が1時間に5mmの降雨を流せるほど湿潤であれば、ほんの少し土壤間隙の中の水を増やすだけで10mmの降雨を下に流すことができる。こうした、湿潤ではあるが、完全に水で飽和してはいない不飽和土壤内の間隙では、降雨量の時間変動に応じて、雨が強くなれば貯留量が少し大きくなって水を通しやすくなり、雨が弱くなれば貯留量が小さくなって水を通しにくくする、という貯留量のわずかな変化が生じるのである。その変化はわずかなのであるが、斜面土壤層全体でその変化が合計されるので、流域全体としては大きな量として現れる。その結果、降雨強度の変動に比べて流出強度の変動を均すことができ、洪水緩和効果が発揮されるのである。

この湿潤な不飽和土壤内の雨水の動きの特徴は、水分子そのものの移動はたいへん遅いのかかわらず、降雨強度の時間変動ははるかに速く下の方に伝わるといことである。実際、水にラベルを付けて分子の動きを追いかけた研究では、1日に20cm程度しか水分子は移動しないのに、降雨量の変動は1～2時間程度で1mくらいまで

伝わるということがわかっている。先のホースとは異なり管水路ではないが、開水路であっても、時間変動が伝わることと水そのものが移動することは異なる。不飽和土壤では変動の速やかな伝達と水の遅い移動との差がきわだって大きくなるのである。これは、洪水流出のメカニズムとして大事な原理なので、ぜひ理解をしていただきたい。

2.5 洪水緩和効果には流出平準化効果と総量減少効果がある

以上から、斜面での雨水流出のメカニズムは、図4のようにまとめられる。斜面では一般に表面に近づくにつれて水を通しやすくなる地下構造があるが、細かに見ると場所ごとの不均質性が大きい。それゆえ、地表面でも水を通しにくいところではホートン地表面流が発生するし、緩い傾斜の部分では土壤層から地下水があふれて飽和地表面流が流れ出す。逆に地表面流もそのまま川に達さず、途中で水を通しやすいたとこで土壤にしみこむことが多い。また、土壤層から風化した岩盤に水が浸透してゆく場合もあるし、逆に風化岩盤から地下水が土壤層にあふれ出す場合もある。こうした斜面方向へのさまざまな流れがあるのだが、重要なポイントは、不均質な地下構造のひとつとしてパイプ状の水みちが存在し、それにより地下水が速やかに排除されるところにある。

そのため、大雨の場合でも、地下水水面が地表面まで上昇してあふれる場所は限られていて、地下水水面の上に湿潤な不飽和土壤が残される。土壤が乾燥しているところに雨が来ると、徐々に湿潤になるが、土壤層全体が湿潤になってしまうと、「水分子の動きは非常に遅いにもかかわらず、降雨の時間変動は速やかに伝わる」という土壤水の特徴が現れ、降雨強度の時間変動は速やかに地下水に伝わって地下水を時間変動させる。このとき地下

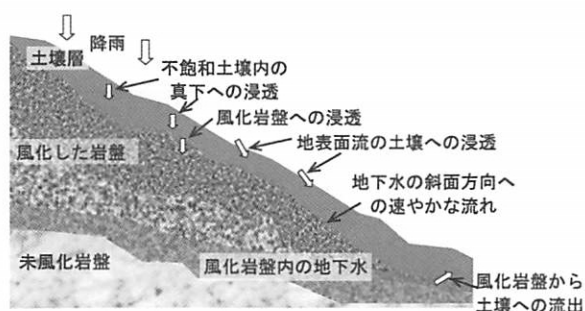


図4 大雨期間中の斜面における雨水流出メカニズムの概念図
土壤層内の地下水がパイプ状水みちを通して速やかに排水され、大雨期間中でも土壤層内に不飽和帯が残される点が重要である。

水に供給される水は、雨水ではなく土壌に以前から貯まっていた古い水なのである。次にその地下水はパイプ状水みちを通じて速やかに排水される。こうして、土壌に貯留されていた古い水が出てゆき洪水流出となるのであるが、そこでは、不飽和土壌における土壌水の貯留変動があるため、流出の時間変動が降雨強度よりも均されピークが低くなる(図5)。こうして、斜面土壌層の洪水緩和効果は、降雨の時間変動よりも流出の時間変動が均されることで発揮される。この効果を「流出平準化効果」と呼ぶことにしたい。

ところで、「この水分子の動きは遅いが、降雨の時間変動は速やかに伝わる」というメカニズムは、大雨があって土壌が十分ぬれてしまってから後の話であり、土壌層の下の方がまだ乾燥している場合は、水が動きやすい大きな間隙には水がはいっていないので、雨水がその間隙に吸収され、降雨強度の時間変動は下の方に伝わらない。その結果、図6に示すように、ひと雨期間における洪水流出総量は、土壌内に吸収貯留される水量の分だけ降雨総量よりも小さくなる。ここでは、この洪水流出総量の減少効果を「総量減少効果」と呼ぶ。当然、この効果は降雨前における土壌が乾燥しているほど大きくなる。一般に、気象条件が同じであっても、森林は草地よりも蒸発量が大きい傾向があり、土壌が乾燥しやすい。そのため、森林はこの

総量減少効果に貢献するといえる。

しかし、土壌層全体が湿潤になってしまうと降雨強度を速やかに伝えるようになるので、土壌にはいった雨水量と同じだけの土壌水が洪水流出として排水されてしまう。その結果、土壌層全体が湿潤になってから降った雨はすべて洪水流出量になるわけである。それゆえ、総量減少効果には大雨での限界がある。けれども、雨が降り続いて総量減少効果が限界に達する場合であっても、図5に示される流出平準化効果は継続的に発揮される。この2つの効果の区別を理解することが森林の洪水緩和効果において非常に重要なのである。

2.6 流出平準化効果こそ評価すべきである

ところで、国土交通省や森林総合研究所は、従来、総量減少効果のみを指摘し、「緑のダム」に限界がある点を指摘してきた(引用文献欄のそれぞれのホームページ参照)。しかし、治水に重要なのは、洪水流出総量を減らすことではなく、氾濫などの災害につながる洪水ピーク流量を低下させることである。そのためには、ダムの場合、流入量が多くなると貯留し、流入量が少なくなると放水するように、デリケートなゲート調節を行う必要がある。貯水池における貯留量の時間変化のために流入量に比べて放水量の時間変動が緩やかになり、ピーク流量を低くすることができるからであ

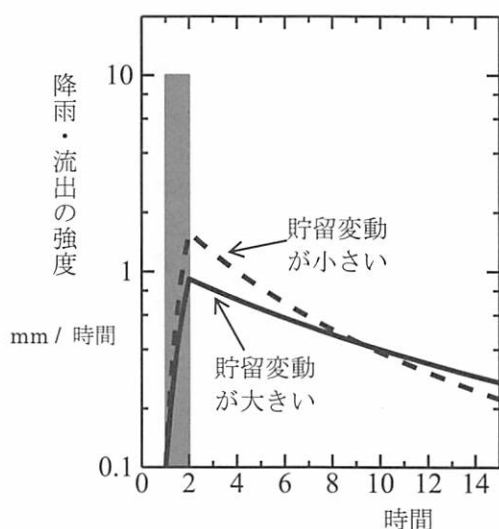


図5 土壌層全体がすでに湿潤になっていて、降雨がすべて洪水流出になるような時点で、1時間に10 mmの降雨があった場合の流出量の時間変化の計算例
不飽和土壌での貯留量の変化が大きいくほど、流出が均され、流出のピークが降雨強度に比べてより低くなり、流出平準化効果が大きくなる。なお、流出と貯留量に指数関係があると仮定したときの流出モデルでの計算結果を示している。

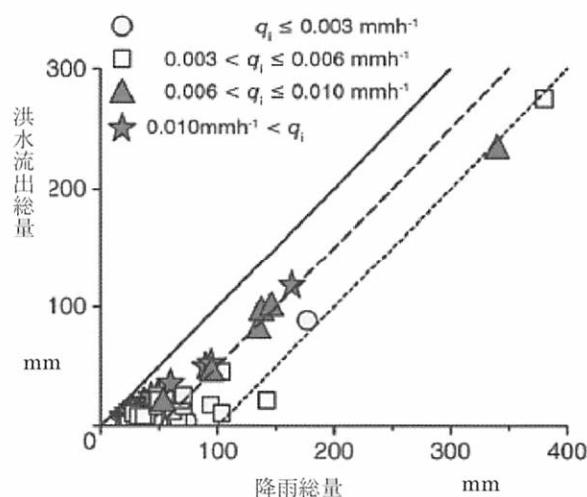


図6 森林総合研究所竜ノ口山試験地北谷流域において観測された、ひと雨の降雨総量と洪水流出総量の関係(谷 2012)
降雨総量が100 mm程度より大きくなると、それ以降の降雨総量は、ほぼ洪水流出総量に等しくなっており、総量減少効果が限界に達していることを示している。また、 q_i は、雨が降る前の流出量で、それが小さいほど流域が乾燥していることを表しており、乾燥が洪水流出総量を小さくする効果がみられる。

る。しかし、ダムには「ただし書き操作^{注5}」が定められ、ダム貯水池への流入量と同じ量を放水せざるを得ない限界が明瞭に存在する。ただし書き操作をせざるを得なくなった後にさらに大雨が降った場合には、貯水池貯留量を操作してピーク流量を低下させることはできない。

「緑のダム」といわれる森林土壌は、すでに流出平準化効果として説明したように、流入量である降雨が強くなると不飽和土壌内の間隙内における貯留量を大きくし、降雨が弱くなると貯留量を小さくすることで、土壌層から河川への流出量の時間変動を降雨量の時間変動に比べて緩やかにしている。ただし、この流出平準化効果にも限界が存在する。それは、ほぼ同じ降雨強度が数時間続く場合に現れる。降雨量が一定であれば、流出量は徐々に降雨量に近づいて、最終的に流出量が降雨量と同じ大きさになる「定常状態」に到達してしまうからである。それゆえ、総量減少効果が限界になって、なおかつ、大雨が数時間降り続くような場合には、流出平準化効果も限界に達して流出量を降雨量より低くできなくなる。しかし一般には、雨は強くなったり弱くなったり激しい時間変動をするので、総量減少効果の限界になっても、流出平準化効果は継続し、ピーク流出量は低下するわけである。

極端に大規模な豪雨においては洪水流出を緩和することは不可能であり、自然の猛威には逆らえないことも明確に認識すべきである。とはいえ、2種の森林の洪水緩和効果のうちのひとつである総量減少効果に限界があることを根拠に、流出平準化効果が大雨でも継続する点を無視するわけにはゆかないのである。こうした森林の洪水緩和効果については、日本学術会議も注目していて、2001年に出した答申『地球環境・人間生活に関わる農業及び森林の多面的な機能の評価について』においては、「森林は中小洪水においては洪水緩和機能を発揮するが、大洪水においては顕著な効果は期待できない」として総量減少効果の限界にふれている。しかし、2011年に出された河川流出モデル・基本高水評価検討等分科会の国土交通省水管理・国土保全局長あて回答『利根川水系の河川流出モデル・基本高水の評価と検討』では、「森林の保水力は、岩盤上の土壌層全体における雨水の貯留変

動によるものであり、降雨がすべて洪水になるような規模の大きい出水であっても、流出波形を緩やかにする機能は維持され、保水力として評価できる」として、新たに流出平準化効果についても説明し、この10年間の研究進展を反映したものになっている。

3 洪水緩和効果と河川整備・森林整備との関連性

3.1 河川整備方針においては森林の洪水緩和効果は前提条件である

これまで解説してきた森林の洪水緩和効果は、河川法に基づく洪水防御計画において、どのように捉えられているかを次に考えてゆきたい。この洪水防御計画では水害が起きないように鋭意努力するわけではあるが、どんな大規模な豪雨であっても河川が氾濫を起ささないようにすることは、先に述べたように不可能である。治水に限らず、地震・土砂災害などの自然災害対策にはもともとこの難しさが避けられない。そこで、河川の治水に関しては次のような手法が採用されている（国土交通省 2004）。

まず、過去の豪雨例を参考するとともに、その流域の重要性を考慮して洪水防御計画にふさわしい降雨の規模を決める。例えば、過去の降雨データを解析して30年に1回程度発生すると予想される規模の降雨を決めることにすると、この降雨を流出モデルの入力条件として河川各地点に流れるであろう流量を計算することによって、洪水防御計画の規模が定まることになる。ところが、現況ではそれを氾濫しないように流せる堤防などの設備が整っていないので、計算流量を流せるように、堤防のかさ上げやダムの設置を実行することになる。

したがって、この計画の中には、1) 計画規模を左右する降雨をどう決めるか、2) 降雨条件から流出量を計算する流出モデルとそのパラメータの値をどう決めるか、3) 河道を流れる洪水流が氾濫しないように、堤防やダムをどのように配置・設計するか、の3つのステップが含まれる。しかし、現行の洪水防御計画においては、1) と2) で求められた洪水流出量を前提として、それ

注5 ただし書き操作：ダム上流で計画を超える異常洪水が発生し、通常の洪水処理操作によってダムから放流を続けると、ダムの貯水位が洪水時最高水位を超えると予想されるとき、ダムからの放流量を流入量まで徐々に増やすような特別な放流（緊急放流）を行うことがある。この放流操作を一般に「ただし書き操作」と呼ぶ。ダムの操作規則に、このような操作について、「ただし、気象、水象その他の状況により特に必要と認める場合」と規定されているために、こう呼ばれる。ただし書き操作によって、下流に急激な増水が発生し、問題になることがある。このことから、洪水時のダム操作を最適に行うことは容易でないことが理解できる。

を氾濫させないためには堤防増強とダムのどちらが安上がりかという3)の課題の比較検討が重視されてきたが、1)や2)をどのような根拠で決めるかの議論は不十分であると、筆者は考えている。

まず、1)については、洪水防御計画の目的(堤防増強やダム建設)が達成されたとしても、計画の前提になっている規模を超えた降雨が発生した場合は、論理的帰結として河道のどこかで氾濫が起きることを指摘せざるを得ない。そこで氾濫危険性を小さくするために計画規模を大きくすると工事費は大きくなり、工事費を負担する納税者の理解が必要になる。したがって、前提となる降雨規模の決定には多くの利害関係が含まれていて、河川工事を担当する官庁だけでは決めることはできないはずである。さらに、森林を含む流域条件の変化も、降雨条件から流量を計算する2)に関係し、降雨条件が同じでも流量が変化するはずである。そのため、源流域の林業などによる利益と下流域の水害防御による利益とは対立する場合がある。利害関係の相違による軋轢は、工事推進の阻害要因になるわけである。

しかし、2)の流量計算は、河道外の流域条件は変わらないことを前提に行われる。つまり、森林の保水機能が発揮されていることは前提とされており(引用文献欄の国土交通省のホームページ参照)、この効果は変化しないとみなすことで、森林の取り扱いの影響は洪水防御計画では事実上棚上げにし、河川河道の整備工事と河道以外の流域全体との利害対立は極力避けるようになっている。

一方、降雨規模決定の1)においては、長期的な洪水防御目標である「河川整備基本方針」とおおよそ20~30年間に行われる具体的な工事内容である「河川整備計画」を設けることで、立場による利害関係の違いに基づく軋轢を減らす工夫がなされている。つまり、すでに述べたように、降雨規模をどのように決めたところで、氾濫が発生しない場合と発生する場合のしきい値を決定しているだけなので、どこにしきい値を置くかは、工事担当官庁だけで本来決めようがなく、河川整備の受益者と経費を負担する納税者との利害が対立する。そこで、基本方針の理想に近い規模と整備計画の現実的な規模を2つ掲げることによって、「理想に近い工事が望ましいが予算上それは難し

い」という、利害関係者双方の痛み分けがなされたかのような一種の錯覚が産み出される。筆者は、この流れによって、現行の洪水防御計画が利害関係の軋轢を避けて整備工事が粛々と進められるように組み立てられていると考えている。だが、繰り返しになるが、洪水防御計画は工事を行う立場だけでは本来決めることができず、多くの利害関係者の調整によってその規模と内容が決定されるべきであることを強調しておきたい。

3.2 森林整備は洪水緩和効果を増進するのか

森林の洪水緩和効果とは、総量減少効果にせよ、流出平準化効果にせよ、森林でおおわれた斜面の土壌層での雨水の流出メカニズム(図4)に根拠があることは、2章の説明でご理解いただけたと思う。それゆえ、土壌層の厚さは決定的に重要である。土壌層は樹木の根や下草の繁茂などによって支えられているので、樹木を伐採して根が腐朽すると崩壊(土壌層全体が一気にくずれる)が、また下草や落葉が失われると侵食(土壌層の表面が流水によってけずりとられる)が起こりやすくなる。1960年頃の燃料革命より以前は、人間の生活は主に森林に依存していたから、継続的に樹木が伐採され、落葉や枯れ枝が採取されていた。そのため、土壌層は侵食と崩壊によってうすくなるばかりでなく、土壌がやせて植生成長が悪くなり、里山二次林^{注6}が成立した。さらに侵食に弱い砂質の山(花崗岩のマサ土地帯など)では、土壌層が完全に失われてはげ山になってしまった。そこで里山二次林では、人間の手がいっていない原生林と比べて侵食や崩壊が発生しやすくなる。また、はげ山では基盤岩の風化によって土粒子が作られてそのまま流されるので、土壌層がほとんどないのに土砂は毎年大量に河川に流出する。燃料革命前の里山が、利用されず放置され植生が伸び放題になった現在よりも侵食や崩壊に強いなどと思う人があるかもしれないが、そんな可能性はまず考えられない。崩壊侵食防止効果は、あくまで、森林生態系自身の持つ各種生物の生命力総体によって発揮されるのである(谷2016)。

では、樹木を伐採しないほうが洪水緩和のためには望ましいことになるのだが、現在でも人間は森林資源を必要とすることに注意しなければならない。木材は石油で代替できるように思われるかもしれないが、それによって温室効果ガスが増加

注6 里山二次林: 森林科学では、二次林は伐採や火災などで森林が消失した後に再生した森林を、原生林は人間の手がいっていない森林をいう。また、人工林は人間が木を植えて成立した森林を、天然林はそれ以外の森林をいい、原生林も二次林も天然林に含まれる。

して、気候が望ましくない方向に変化するなど、地球環境が劣化してきている。地球全体では、気候環境の維持に貢献している天然林の消失が切迫しており、日本の人工林伐採を避けて海外から木材を輸入する選択は、地球環境保全の観点から望ましくない(谷 2016)。人工林を伐採利用しながら洪水緩和効果を維持する、森林の林業利用と環境保全の両立策を模索するほかはないのである。

日本の人工林は、1960 年前後に植栽された人工林が圧倒的に多く⁷、年齢が極端に偏っている。放置しておくともますます成長してゆくので、崩壊や侵食への抵抗力が増すだろう。だが、そのまま放置しても、必ず大雨によっていつかは崩壊が発生する。例えば 10 年間に崩壊する確率は伐採したら大きくなるが、伐採してもしなくてもゼロにはならないし、伐採せずに保護しても数百年のうちにはまず 100%崩壊するとみなしなければならない。手つかずの原生林であってさえ、土壌層が厚く発達してゆくとしてもどこまでも厚くはなれられず、いつか大雨の際に崩壊するのである。

前節で述べた河川洪水防御計画では、こうした森林の取り扱いの観点は、降雨条件から流出量を流出モデルで予測する上記の 2) の中にはいる。原生林、人工林、里山二次林、はげ山における洪水緩和効果の違いや伐採を含む森林管理方法によるその効果の変化を定量的に評価する必要があるわけである。これまでの洪水防御計画では、その効果は時間的に変化しないので前提条件となってしまう。けれども、これは河川整備工事を軌離なく進めるためには好都合ではあっても、流域全体のさまざまな土地利用をどのように計画するのかという流域管理においては、森林の効果も評価しなければならない。

ところが、図 4 に示したように、洪水緩和効果は土壌内での水貯留量の変動を主な根拠とするものであって、その効果が発揮されるまでには土壌層が厚く発達してゆく 100 年を超える長い年月がかかる。それゆえ、樹木成長によってその効果が増加してゆくといった希望的な予想は妥当とはいえない。間伐によって下草が繁茂することで地表面流の流れが遅くなって流出平準化効果が増えること、あるいは森林の蒸発散は森林がないときよりも大きいので総量減少効果が大きくなること、それらは確かにその通りであろう。しかし、洪水流出量の多くは土壌を通過した古い水であり、大

雨でも発揮される流出平準化効果は不飽和土壌での貯留量変動によるところが大きく、数十年で効果が増大するとは考えにくいのである。

とはいえ、この森林の洪水緩和効果は、土壌層が侵食や崩壊で失われた場合には比較的短期間で減少する可能性がある。したがって、人工林の伐採利用や里山利用においては、できるだけ土壌が失われないようにしなければならない。確かに、短期間の森林整備で洪水緩和効果を増大させることは困難である。しかし、伐採した後できるだけ速やかに森林を再生させるとか、崩壊の確率が高い極端に急な斜面での伐採を控えるなど、洪水緩和効果の低下をできるだけ最小限に抑制することは大切なのである。現在は、シカ類などによる食害の可能性が高く、森林の再生には十分な配慮が必要になっている。もし、草や樹木が成長するとただちにシカに食べられる事態が継続すると、伐採前の樹木の根が腐る一方で、新たな根の補強が成立しないので、土壌は崩壊や侵食で失われてゆく。その期間は、土壌が厚くなる期間よりははるかに短いはずであり、樹木の成長期間よりも短いかもしれない。

4 おわりに

唐突かもしれないが、最後に、テレビの「情熱大陸」で放送された、ニワトリを卵から大切に育ててそれを解体して料理していただくという農業高校の授業のことを述べたい。涙を流しながら鶏肉を食べる生徒たちは、生物の一種である人間が他の生物を利用するというこの本質を学び、農業と生命両方のかけがえのなさを身をもって体験することができるわけで、筆者は農業高校だけでなく広く実施されるべき授業だと考える。森林も同じようなところがあり、それを伐採利用することで環境を破壊するという感情を持ちやすい。動物の場合は、解体に立ち会うことはつらいことなのに、見えないところで解体された動物は毎日おいしくいただいている。森林生態系の場合は、環境保全を意識して熱心に植樹に参加したり、伐採に反対したりする一方、海外で伐採された樹木から作られた住宅や紙を利用しながら、その伐採地での環境劣化を気にしない傾向がある。生物資源の利用にはこうした人間の身勝手な感覚がつきまとう。大事な点は、そうだからこそ、どのように

注 7 人工林：日本の人工林は戦後の高度成長期の 1950 年代後半から 1960 年代前半における拡大造林に植栽されたものが多く、林齢が極端に偏ったまま成長を続けている。樹種としては、北海道以外ではスギとヒノキが、北海道ではトドマツとカラマツが多い。

利用と保全のバランスを取るかという課題を強く意識しなければならないことにある。

水害を少しでも減らすためには、森林は一切伐採してならないとか、大規模なダムや堤防を築かなければならないなどというような主張は、その実現のためには、かかる経費の問題のほかにも、さまざまな不都合が生じてくることを無視しているのではないだろうか。例えば、木材を利用するにあたっては森林を伐採する地域での環境劣化の問題に、また大雨の際に洪水氾濫をまぬかれた場合には河川上流でダムのために移住しなければならない人々の苦悩に思いをいたさなければならないはずである。生物資源の利用と環境保全の問題について、つっこんだ議論が拡大するよう、筆者は望んでいる。

引用文献

国土交通省ホームページ「『緑のダム』が整備されればダムは不要か」

http://www.mlit.go.jp/river/dam/main/opinion/midori_dam/midori_dam_index.html

国土交通省 (2004) 河川砂防技術基準

http://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/gijutsu/gijutsukijunn/gijutsukijunn.pdf

蔵治光一郎・保屋野初子編 (2014) 緑のダムの科学：

減災・森林・水循環. 築地書館, 253 p.

日本学術会議答申「地球環境・人間生活に関わる農業及び森林の多面的な機能の評価について」

<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/shimon-18-1.pdf>

日本学術会議河川流出モデル・基本高水評価検討等分科会の国土交通省水管理・国土保全局長あて回答「利根川水系の河川流出モデル・基本高水の評価と検討」

<http://www.mlit.go.jp/common/000165844.pdf>

恩田裕一編 (2008) 人工林荒廃と水・土砂流出の実態. 岩波書店, 245 p.

森林総合研究所ホームページ「流域の保水力の大きさはどのくらいですか (流域の保水力)」

<http://www.ffpri.affrc.go.jp/qa/moritomizu/documents/q2-3-2.pdf>

谷 誠 (2012) 森林の保水力はなぜ大規模な豪雨時にも発揮されるのか?—その1 洪水緩和にかかわる二種の効果の区別—. 森林科学, 66, 26-31.

<http://www.forestry.jp/publish/ForSci/BackNo/sk66/66.pdf>

谷 誠 (2016) 水と土と森の科学. 京大出版, 243 p.

谷 誠ホームページ <https://sites.google.com/site/guchenghomupejitanimakoto/>

谷 誠 (たに まこと)

1950年大阪生まれ。森林総合研究所気象研究室長を経て1999年から京都大学農学研究科森林水文学分野教授。2016年退職し、現在、人間環境大学特任教授。著書に「水と土と森の科学」(京大出版2016)がある。