

雨は、めぐみでもあり、
また、ときにいのちを脅かす猛威ともなります。

森林に降った雨は、森に貯えられることで、
水源としての役割を果たしてくれます。

大地に潤いをもたらし、
多くの生きものや作物を養ってくれますが、
ときに土砂災害や川の氾濫を引き起こす元凶ともなります。

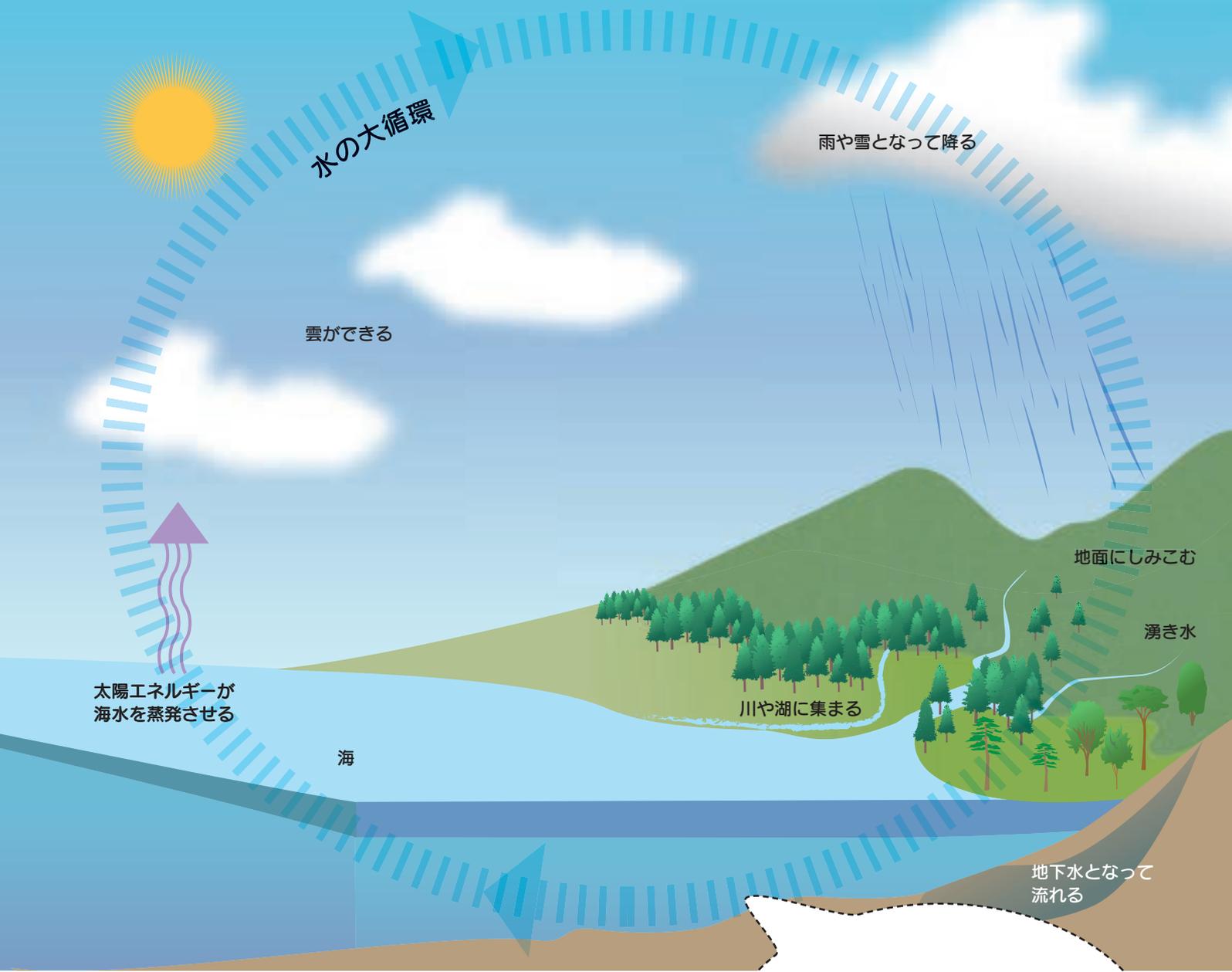
森林に降った雨は、どのような道筋を経て、
集まり、川の流れとなり、海へと還っていくのでしょうか？
最新の研究を踏まえつつ、水の流れを追いかけてみましょう。

文責＝編集部 監修＝玉井 幸治 飯田 真一

特集●

雨と森林

水の流れを追いかける



特集◎

雨と森林

水の流れを追いかける

大気と海洋を舞台とした水の大循環

海から蒸発した水蒸気が上空で冷やされると、水や氷の小さな粒になって雲ができる。水や氷の粒が集まって雨や雪となって降る。森など陸地に降った雨は大地を流れ、小河川から大河川へと集まりながら海へと還っていく。

水の大循環は、太陽の熱エネルギーや地球の自転、極地方と熱帯との温度差など、さまざまな要因によって引き起こされている。そして、これらの環境の中で多様に進化してきた生物もまた、水循環の一部となっている。海洋圏、大気圏、生物圏をめぐる水循環のダイナミズムこそが、自然生態系の命綱だ。

水の大循環

地球は、水の惑星といわれるほど、豊富な水におおわれた星です。宇宙から見ると、表面の70%をおおう海洋など水域の青と大気に浮かぶ雲の白さが織りなす色のコントラストが、太陽系の中でもひとときわその美しさを際立たせています。

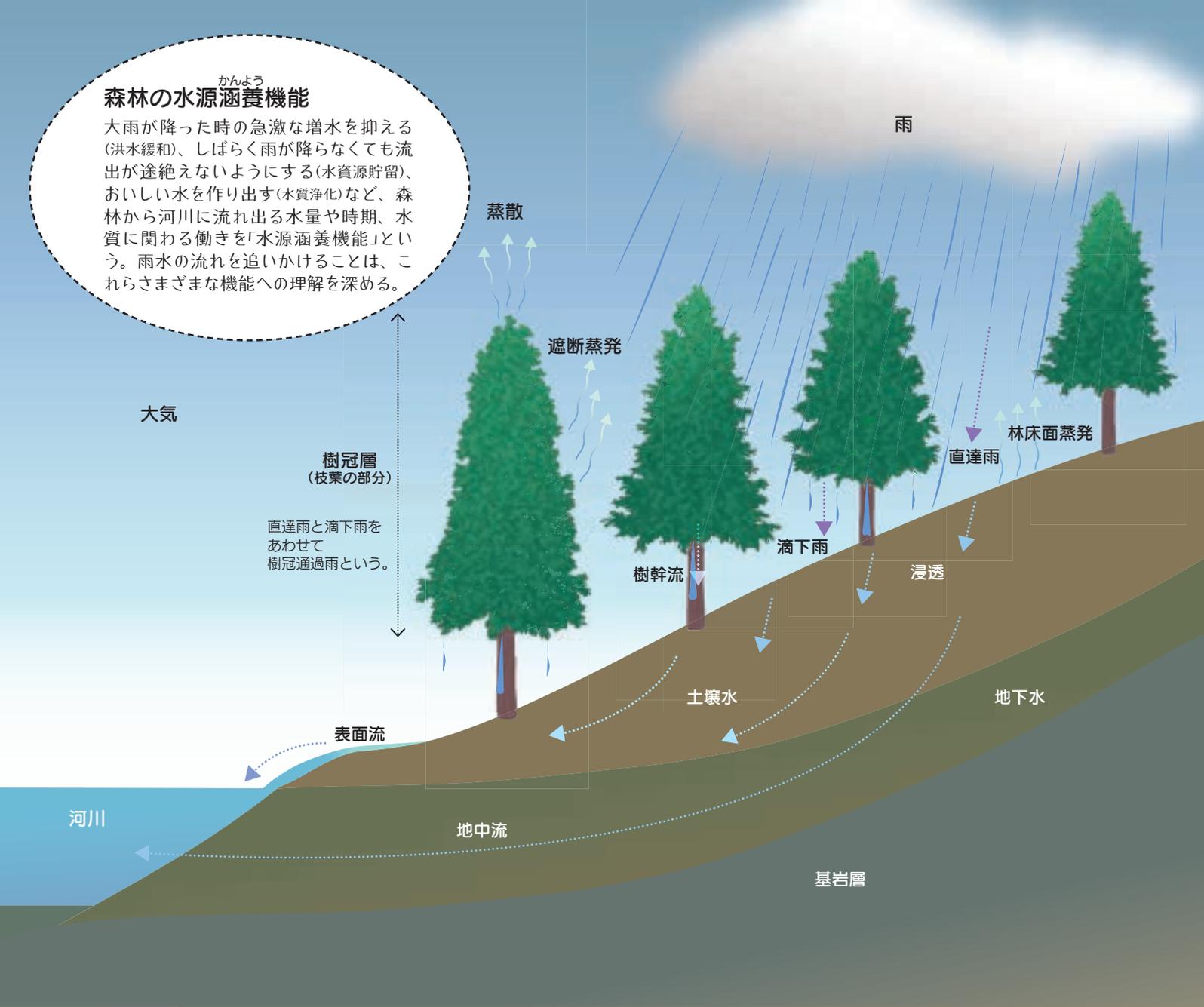
とはいえ、陸域の生物がいのちを育むことのできる淡水は、地球をおおうおよそ14億^{km³}ともいわれる水の2.5%にすぎません。さらに、そのうちの70%は氷山や氷河などで、残りの30%のほとんどが土壌水や地下水であることから、人間が使いやすい湖沼や河川の水は、淡水のうちのたった0.4%、海洋を含めた水の0.01%ほどにすぎないとされています（平成22年版「図で見る環境白書」）。そのわずかな淡水を生みだしているのが、大気と海洋を舞台とした水の大循環です。

地表に降った雨や雪は、小さな流れがしだいに集まって河川となり、また地下では地下水の流れとなって、やがて海へと至ります。海水は蒸発して雲となり、再び雨や雪となって地表に降ります。これが「水の大循環」です。

この大循環のうち、大気中での水の移動をあつかう学問が「気象学」、地表・河川や地中などでの水の移動をあつかう学問が「水文学」です。水文学の中でも、特に

森林の水源涵養機能^{かんよう}

大雨が降った時の急激な増水を抑える(洪水緩和)、しばらく雨が降らなくても流出が途絶えないようにする(水資源貯留)、おいしい水を作り出す(水質浄化)など、森林から河川に流れ出る水量や時期、水質に関わる働きを「水源涵養機能」という。雨水の流れを追いかけることは、これらさまざまな機能への理解を深める。



森林に降った雨のさまざまな経路

雨水の70~90%は、「直達雨」「滴下雨」「樹幹流」となって林床に達する。これらの雨は、「表面流」「地中流」となって、河川へとたどり着くが、一部は林床から蒸発して直接大気にもどる「林床面蒸発」や、根から吸収されて樹体を通して葉から大気にもどる「蒸散」がある。

森に降った雨の中で、未解明の経路が「遮断蒸発」だ。これは、雨が林床に達することなく、樹木に接触したあと大気へともどる経路で、雨量の10~30%にもものぼる。

森林での水のうごきを対象とする学問が「森林水文学」で、森林総合研究所が得意とする研究分野です。おもに森林による水源涵養機能への影響を明らかにすることが命題の一つといつてよいでしょう。

森林流域に降り注ぐ雨や雪は、さまざまな経路をへて河川へと流れこみます。では、どのような経路が考えられるのでしょうか？

森林に降った雨の一部は、枝葉の間を通過して林床(森林内の地面のこと)にまで到達します。これを「直達雨」といいます。森林に降る雨のほとんどは、林床に到達する前にいちど樹木の枝葉や樹皮に付着します。付着した雨水はさらに3つの経路に分かれます。1つめが枝葉から林床へと滴り落ちる「滴下雨」、2つめが樹の幹の表面を根元へと流れ下る「樹幹流」、そして3つめが林床に到達することなく大気へと蒸発する「遮断蒸発」です。

すなわち、林床へ達するのは「直達雨」と「滴下雨」、そして「樹幹流」で、雨水の70~90%ほどになります。

これらの林床に到達した雨は、地表面を流下する「表面流」、いったん地中に浸透して流れる「地中流」となって河川へ流出します。一方、樹木の根から吸収されて葉から大気へともどっていく「蒸散」や、林床から蒸発する「林床面蒸発」で大気へともどっていく水もあります。



特集◎

雨と森林

水の流れを追いかける

森林に降った雨の観測システム

樋型雨量計：樋型の受水器で樹冠通過雨*を集め、ホースで誘導して転倒ます型流量計で測定している。

漏斗型雨量計：樹冠通過雨は林内のばらつきが大きい。漏斗型雨量計ではばらつき具合を把握している。

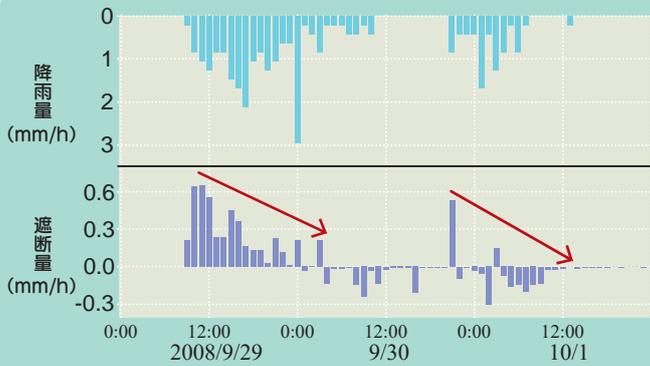
樹幹流測定システム：幹に青いマットを巻いて樹幹流を集め、転倒ます型雨量計で計量している。ここでは、転倒ます型雨量計を流量計として利用している。

* 樹冠通過雨
「直達雨」と「滴下雨」を合わせたもの。

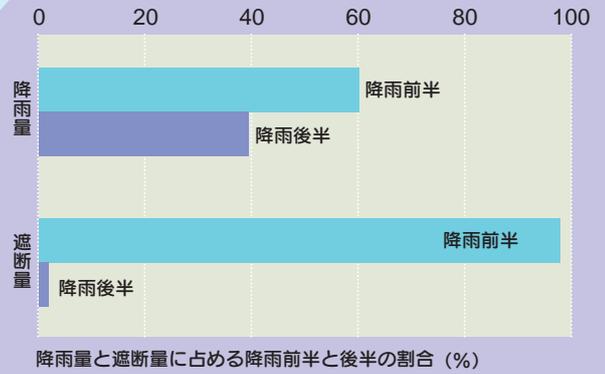
遮断蒸発とは、どんな現象か？

このように森林に降った雨は、さまざまな経路をたどって、河川と大気へと移動していきます。どれくらいの水がどの経路をへて移動するのかは、森林の状態（木の種類や本数の多さ）、日の当たりやすさや地形などによって大きくちがってきます。

森林流域での水の移動で特徴的な現象が、枝葉や樹皮に付着したあと林床に到達することなく大気へと蒸発する「遮断蒸発」です。これまでの調査によると、降雨量に占める遮断蒸発量の割合は10～30%とされています。遮断蒸発は、降雨中と降雨後の両方で発生しますが、どちらも日射量が少なく、湿度が高い条件で水が蒸発しにくい環境です。それにも関わらず、降雨量の10～30%の水が蒸発するのは、いったいどういうメカニズムが働いているのでしょうか？ じつは、この現象については、いまだに解明されていない点が多く残されています。とはいえ、研究者の地道な調査によって、降雨中の遮断蒸発について、いくつかの考え方が提案されるようになりました。そのうちの1つは樹冠層の形や構造によって、付着した雨水の蒸発しやすさが増減するというものです。これは空気の流れる方が樹冠層の特徴に大きく左右されるた



ある1時間に降った雨のうち、林床に到達していない雨水（遅れて林床に到達、あるいは樹体に貯留、または蒸発したものを含む）を遮断量として計測すると、降雨開始直後から中盤に高いが、降雨がとつくと減少することがわかった。

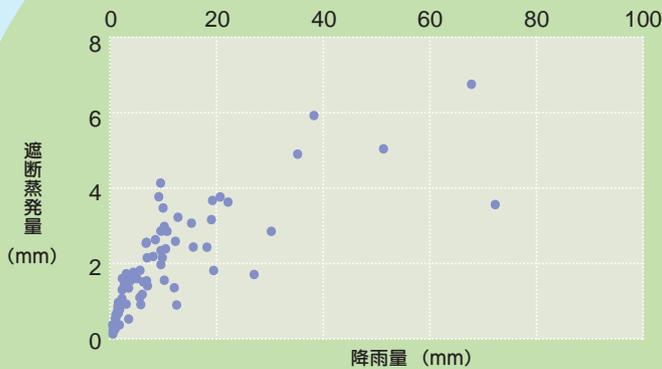


降雨量と遮断量に占める降雨前半と後半の割合 (%)

20回超の降雨について調査したところ、前半と後半で降雨量の差は大きくないものの、遮断蒸発量のほとんどは、降雨前半の遮断量であることがわかった。

観測によるアプローチ

Iida et al. (2017) に基づく

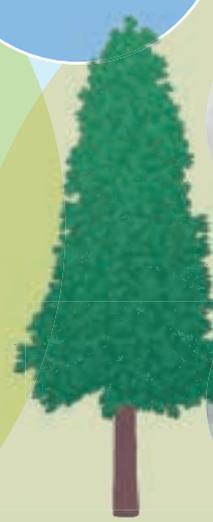


降雨量が50mmを超えてくると遮断蒸発量は増加しにくい傾向にあり、計測を行った3年間の最大値は6.7mmであることがわかった。

遮断蒸発について現在までにわかっていること

これらのことから、遮断蒸発量の発生メカニズムは、森林に降った雨水が直ちに蒸発するのではなく、いったんスギに付着して貯留された後で徐々に蒸発していると考えられる。

溜まった水の深さで表す降雨量と比較するために、遮断蒸発量などの水量は面積などで除すことで mm 単位に換算



スギの葉を水に浸し、どれくらい水を貯留できるか調べたところ
0.7~1.5mmだった

木全体では、4.4~7.2mm分の雨水を貯留できる



樹皮全体でどれくらい水を貯留できるか調べたところ
3.7~5.7mmだった

スギの葉と樹皮を水に浸して付着可能な水の量を求め、スギ林全体で枝葉や樹皮が貯留できる雨量に換算したところ 7.2mm にも達し、計測された遮断蒸発量の最大値 6.7mm に近い値を示した。

観測とモデルの両方からアプローチ

遮断蒸発量を直接観測することは、現状では残念ながらできません。そのため森林に降った雨量から、林床に到達した雨量を差し引くことで、遮断蒸発量を求めています。このような計測から、遮断蒸発量は降雨量の増加に伴って比例して大きくなったことが報告されています(比例型)。また、スギ林での観測では、雨量の増加と比べて遮断蒸発量はある段階で頭打ちになりました(貯留型)。降雨中の変化に着目すると、降雨の前半に遮断される雨水が多いこともわかりました。このことは、森林に降った雨水が直ちに蒸発するのではなく、いったん樹木に付着して貯留された後で徐々に蒸発していることを示すと考えられます。

一方、森林内での水のうごきを再現す

めであると考えられています。

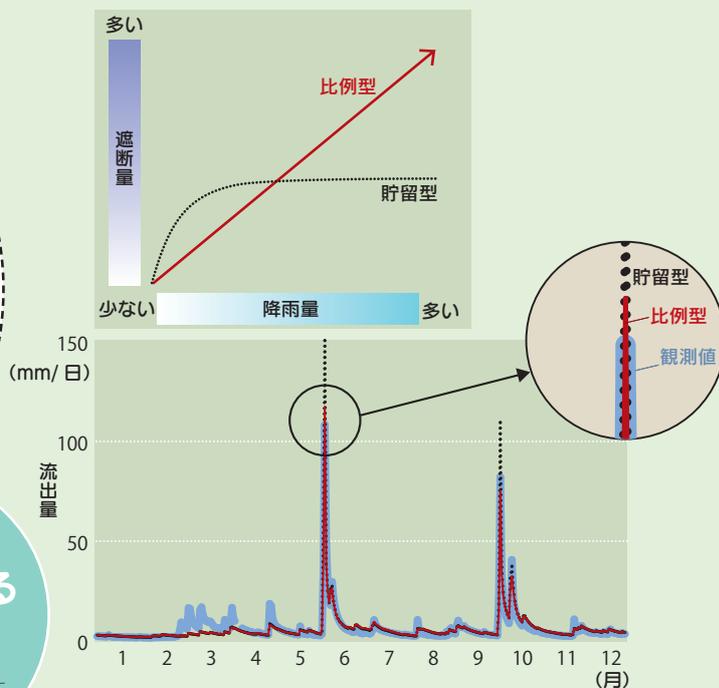
また、雨粒が枝葉にぶつかって、より小さな雨粒となることで蒸発がしやすくなるという考え方もあります。これらが複合的に働いているとも考えられます。これからの検証が待たれるところです。

一方、降雨後にも遮断蒸発が発生します。これは、付着した雨水が樹体のどこかに貯留されていて、降雨後の日射量の増加と湿度の低下に伴って大気へと蒸発していくと考えられます。

貯留型と比例型

右の数値モデルは、河川の流出量の再現を行ったものだが、その計算過程に遮断蒸発が含まれている。この遮断蒸発量を計算するために、次の2通りの考え方をういた。

- ①降雨量に比例して遮断蒸発量が増加する比例型。
 - ②ある段階で頭打ちとなる貯留型。
- ①と②の考え方のうち、どちらを採用するかによって、計算される洪水時の流出量は大きく変化した。したがって、適切な流出予測のためにも、遮断蒸発メカニズムの解明はとても重要である。



モデルによるアプローチ

Momiyama et al. (2023) に基づく

観測値は神奈川県大洞沢流域にて
東京大学森林生物地球科学研究所が測定したデータを使用
降雨量と比較するために、流出量は流域面積などで除すことで mm 単位に換算

特集

雨と森林

水の流れを追いかける



河川の流出量の再現では、地形分布を考慮して水はけの良さあしを把握することが重要だ。この鳥観図では、地形指標で水はけの程度を評価している。谷部では値が大きく（色が濃く）、水が集まりやすいことがわかる。

観測結果とモデル研究

実際に測定された流出量とよく合うように調整が可能なモデルでは、遮断蒸発量が降雨量の増加に伴って比例して大きくなるという設定を取り入れることが重要であった。一方、12ページに見るように、観測によるアプローチでは、遮断蒸発量は降雨量の増加によって大きくなるものの、ある段階で頭打ちになることもわかっている。遮断蒸発量の実態については、未解明なことも多く、今後の研究に大きな期待がかかっている。



▶ 註：2022年プレスリリース「植物細胞壁は葉から吸収された水でもできている」参照。

解明の口へ向かい

このように、降雨量と遮断蒸発量には関係性がありますが、その特徴は研究事例によって異なる場合があります。この原因を明らかにするためには、今後も継続的な調査観測を続け、遮断蒸発の発生メカニズムを解明する必要があります。

近年、「雨水の一部が樹体に吸収され、細胞壁の形成に利用されている」という現象も発見されました「▼註」。この現象が遮断蒸発と関係しているのかどうかも、検証・検討を行っていく必要があります。森林流域での水のごきには、いまだに未知の課題がたくさんあります。もちろん、日々新しい発見もあります。森林総合研究所では、こうした未知の課題が解明される日が来るまで、地道な観測調査、研究に挑戦しつづけています。