

森林の水源涵養機能に係る解説資料

令和5年3月

林野庁

目次

はじめに	1
1. 森林の水源涵養機能の重要性	4
1.1. 日本の地理、地形、気象条件を踏まえた森林の位置づけ	4
1.2. 日本の森林と水循環	7
1.3. 水源涵養機能の定義	9
2. 森林の変遷と新たな評価の必要性	11
2.1. 森林の変遷と政策	11
2.1.1. 江戸時代から戦前までの動き	11
2.1.2. 戦後の動き	11
2.1.3. 近年までの動き	13
2.2. 森林環境税等の導入と水源涵養機能関連の知識等を普及する必要性	15
2.3. 今求められる森林の姿と水源涵養機能の評価の観点	16
3. 森林における水文プロセス	24
3.1. 一般的な流域での水文プロセス	24
3.2. 森林から河川への水文プロセスの全体像	26
3.3. 樹冠遮断と蒸散	28
3.4. 土壌から岩盤までの浸透・貯留	30
3.5. 河川等への流出	31
4. 水源涵養機能に関する因子	35
4.1. 土地利用形態に関する因子	35
4.2. 立木に関する因子	37
4.3. 下層植生・土壌被覆に関する因子	40
4.3.1. 下層植生等による遮断・蒸散	40
4.3.2. 下層植生等が浸透・表面流に与える影響	42
4.4. 土壌・基岩に関する因子	44
4.4.1. 土壌・地質条件	44
4.4.2. 樹木根系の影響	47
4.4.3. 基岩への浸透	49
5. 森林状態の変化が水循環に及ぼす影響	54
5.1. 自然攪乱による影響	54
5.2. 森林施業による影響	56
5.2.1. 間伐・主伐による影響（短期的影響）	56
5.2.2. 森林の成立・成長による影響（長期的影響）	60
6. モデルによる流域スケールの水源涵養機能の評価	66
6.1. モデルによる評価の重要性	66
6.2. 森林状態の評価	67
6.3. モデルによる水源涵養機能の評価例	68

6.3.1.	使用モデル.....	68
6.3.2.	対象流域の概況.....	70
6.3.3.	モデルの構築.....	74
6.3.4.	森林の洪水緩和機能の評価.....	75
6.3.5.	森林の水資源貯留（水量調節）機能の評価.....	77
6.3.6.	樹種の違いによる影響.....	78
6.3.7.	崩壊地の多寡の影響.....	80
6.4.	まとめ.....	82
7.	今後の課題.....	85
7.1.	気候変動も踏まえた流域単位での森林管理.....	85
7.2.	今後必要となる観測やモデルの高度化.....	86
7.3.	今後の展望.....	88

はじめに

森林は急峻な日本の国土の約7割を占め、私たちの暮らしと密接に関わっています。森林には国土の保全のほか水源の涵養など多面的な機能があり、古くから森林資源の利用のみならず、その時代背景に応じて森林の機能発揮のため、国を中心として様々な政策が展開されてきました。

地方自治体においては、平成18（2006）年度以降、独自財源である森林税等の導入が相次ぎ、さらに、令和元年（2019）年度からは国の森林環境譲与税（令和6（2024）年度から森林環境税を徴収開始予定）が導入されています。このように、地方自治体が主体となった森林の公益的機能発揮のための森林管理は全国的に進められており、それに伴って、それぞれの地域における森林の公益的機能の評価や森林整備等の効果に関する定量的な知見も求められるようになってきています。

森林の水源涵養機能には、洪水緩和機能・水資源貯留（水量調節）機能・水質浄化機能があり、これらの機能は流域における上下流の関係性を表しています。すなわち、山地等の源流に多く存在する森林の状態が、流域の水循環を通して下流の河川等の流出に影響を与えるというものです。このため、地域の森林管理においても、より広域に流域全体を視野に入れて取り組む必要があります。そしてその際には、森林の水循環や水源涵養機能に関する科学的知見、さらには水源涵養機能の評価に関する理解が欠かせません。

こうしたことから、森林管理に従事する技術者等が森林の水源涵養機能のメカニズムや関係因子についての理解を深めるとともに、地域住民への説明・普及などにも活用できるよう、現時点での森林の水源涵養機能に関する知見の到達点を整理し、わかりやすく発信することをねらいとして、本解説書を取りまとめました。

なお、森林の水源涵養機能には現時点で未解明な部分もあり、「水源涵養機能を高めるためにはこのような森林が最も良い、このような森林の管理が最も望ましい」等については、定量的な情報や、確定的な森林像などの見解が得られているわけではありません。また、実際の森林施業では、地域毎の植生条件、森林の生育する土壌や地形、流域などの面積的な広がり（スケール）等の条件により、施業上の細やかな工夫をしても、森林の水源涵養機能が常に向上するなどの目に見える明確な効果が得られないこともあります。

しかしながら、森林の水源涵養機能に関する過去数十年に及ぶ観測・解析により、多くの研究成果が積み重ねられていることも事実です。これらの科学的知見は、地方自治体の職員が森林の水文プロセスを理解し、水源涵養機能の発揮条件を考えるための助けとなり、森林管理や林野施策の方向性を検討する際にも一定の判断基準にはなり得るものと考えられます。

このような考え方のもとに、本解説書は次のとおりの構成としています。

（1）森林の水源涵養機能の評価をめぐる背景と評価に必要な科学的知見

水源涵養機能の評価に関する研究では、森林の水循環について立木単位、林分区画（プロット）、小流域など様々な大きさの空間的な広がり（以後、スケールとします）を対象とした知見が積み上げられています。これらの調査研究により、森林の樹冠や幹などの地上部から土壌や岩盤までの地下部を含む詳細な水文プロセスの把握、森林管理等による森

林状態の変化と森林水循環の関係の分析、森林流域を対象とした水循環を再現するモデル構築などが進展してきました。

一方で、現時点までの水源涵養機能の評価に関する知見の多くは、単木や斜面プロットから数ヘクタール程度の小流域等を対象としたものが中心となっており、地域や流域の森林管理に対応する視点、森林の成長などを考慮した中長期的な森林状態（密度など）の変化を含めた知見は得られていないことなどの課題がありました。

そこで、1～5章では、現状での森林や森林土壌の機能としての水源涵養機能の知見をとりまとめるとともに、今求められている水源涵養機能の評価に必要な知見を体系的に整理しました。

（2）森林の水源涵養機能の評価手法と流域スケールにおける評価事例

広域や流域レベルの視点に加えて、長期間の視点で森林の水源涵養機能の評価を行うためには、現状での多様な林相（樹種、林齢、管理履歴など）、過去から現在、さらには現在から将来への森林の変化なども考慮することが必要となります。

そこで6章と7章では、①流域スケールで評価を実施する際に重要となる情報（たとえば、森林調査簿、航空機レーザー計測（LiDAR）とそれらのデータの活用方法、それらのデータから森林の水源涵養機能の評価に必要な樹種や疎密度などの情報の抽出方法、流域の解析に必要な地形情報の取得方法を整理し、②それらの森林情報を活用した水源涵養機能の広域評価や時間変化（過去と現在の比較）も踏まえた評価事例を紹介します。以上を踏まえて、必要とされる観測やモデル構築、今後の展望について解説します。

【本書の概要】

（1～5章）

森林の水源涵養機能の発揮において、森林生態系を構成する樹木や土壌、さらには森林が生育する山地（岩盤）そのものが重要であることの理解が深まっています。過去には、森林の過度な伐採によるハゲ山の拡大などから、洪水や土砂移動を伴う山地災害が多発していましたが、その後の森林整備や治山事業の推進により土砂災害の発生件数も過去と比較すると減少してきています。

また、水源涵養機能が発揮されるメカニズムについては、未解明な部分が多かったものの、過去数十年におよぶ研究の進展により、樹木、林床植生、土壌、岩盤等における各因子の働きにより水源涵養機能が発揮されることを示す知見が集積されてきています。一方で、これまでに得られた知見は、スギやヒノキなどの人工林に偏っている点や、プロットや小流域観測を中心としたものであることなどの課題もあります。ダムや貯水池の集水域などの比較的まとまった範囲（流域）を対象とした場合、その中には多様な森林の状態（樹種、立木密度、成林後の林齢など）が存在します。森林の成長や伐採などによる森林状態の変化が、流域全体の森林の水源涵養機能にどのような変化をもたらすのか定量的な評価が求められる場合に、こうした問いに答えられる手法の構築なども重要です。

さらに、森林をめぐる課題としては、人工林での間伐遅れやシカによる食害などによる林床植生の衰退、それによる表面流の発生や土壌侵食、気候変動で増加する集中豪雨等に

よる水・土砂流出など、さまざまな新しい課題に対応できる知見の積み重ねも求められています。

森林の水源涵養機能評価における都道府県の動きとしては、平成 15（2003）年に森林税が高知県で導入されたのを契機として、31 都道府県で森林整備のための税・制度の導入が進み、それらを活用した森林整備や効果検証が行われてきました。また、国の動きとしては、平成 30（2018）年 5 月に成立した森林経営管理法を踏まえ、温室効果ガス排出削減目標の達成や災害防止等を図るための森林整備等に必要な地方財源を安定的に確保する観点から、平成 31（2019）年 3 月に「森林環境税及び森林環境譲与税に関する法律」が成立し、「森林環境税」と「森林環境譲与税」が創設されました。これにより、市町村が主体となった森林整備も進められています。このように進められてきた森林整備に対する水源涵養機能の発揮への期待も大きいことから、水源涵養機能に関する知見の整理や活用が求められています。

これらの点を踏まえると、過去のハゲ山からの植生回復のような森林面積の充実による水源涵養機能の発揮のみならず、樹種や密度などの森林状態の変化にも着目した「森林の質」を考慮した水源涵養機能の評価が必要となってきています。

ここでは、①森林を中心として日本の地理や地形、気象条件などを概観し、②日本における森林の変遷と新たな課題、③森林での水循環のプロセス、④森林の水循環に関連する因子、⑤森林状態の変化が水循環に与える影響について紹介していきます。

（6・7章）

水源涵養機能を定量的に評価するためには、流域での水文プロセスを解明・考慮する必要があります。そして、これらの水文プロセスの一部（もしくは全部）を考慮しつつ流域における水循環を検討するためには、数値的な空間情報をもとに水文プロセスを表現して蒸発散や流出量などを評価できるモデルを活用することが効果的です。

近年は複雑なメカニズムをモデル化する試みが進み、広域（流域レベル）での水循環評価を行うことも可能となってきました。一方で、既往の水流出モデルでは、複雑かつ多様な森林を対象としたパラメータが設定されていないなどの課題もあります。さらに、そのパラメータを設定するためには、森林状態を精度高くモデルで再現できるように、広域での森林状態を評価する手法も必要不可欠です。特に、従来の森林管理で用いられている森林調査簿や森林 GIS を活用することに加えて、昨今、都道府県で整備が進められている航空機レーザー計測データを活用した森林状態の評価なども有効です。

そこで、6・7章では、①広域における森林状態の評価（パラメータの設定等）に必要な情報の整備方法とその活用手法について解説し、②それを踏まえたモデルの活用による広域・長期間での水源涵養機能の評価手法の例を解説します。なお、モデル化の取組例としては、林野庁の調査委託事業「森林の水源涵養機能の評価・発信に関する調査」の内容を紹介しており、今後も研究や技術開発を進めることで、更なるメカニズムの解明や評価の高度化が期待されることを最後に説明しています。

1. 森林の水源涵養機能の重要性

本章では、日本の自然条件（地理、地形、気象）の特徴を踏まえ、森林の存在が水資源の保全に寄与していること、また、森林の水源涵養機能への国民の期待が高まっていることなどを解説します。

1.1. 日本の地理、地形、気象条件を踏まえた森林の位置づけ

日本列島はユーラシア大陸の東側に位置し、アジアモンスーン（季節風）の影響を受けることもあり、降水量が多く四季がはっきりしています。また、南北に長い日本列島は亜寒帯気候から亜熱帯気候までの様々な気候区分に属する上、山地と平野の標高差も大きく、さらに本州では脊梁山脈を境に太平洋側と日本海側で気象が異なるなど、その環境は多様なものとなっています（図 1-1）。

一方で、日本列島は地殻変動の激しいプレートの境界に位置し、火山や地震活動も活発で、国土のおよそ7割が山地や丘陵地です。平野や盆地に多くの人々が住んでいるのに対して、山地の大部分は森林に覆われています。このような立地に由来し、日本列島の大部分の森林は、河川源流等の急峻な山地斜面に生育しており、これまでも水源涵養機能をはじめとした森林の多面的機能の発揮が重視されてきました。

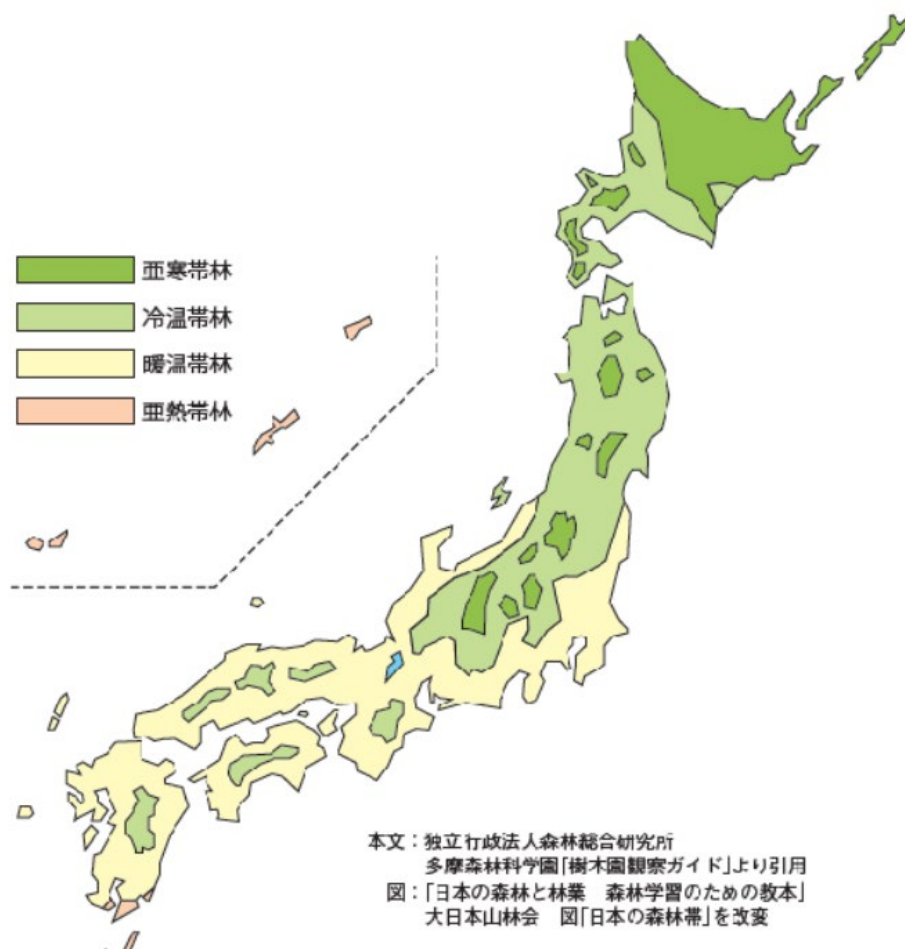


図 1-1 日本の森林分布（林野庁、2019）

日本列島は、降雨の多い地域と少ない地域の差が大きく、年間800ミリ以下の地域から4,000ミリまでの地域が分布しています（図 1-2）。また、降雨と降雪によって季節的にもたらされる降水量についても、地域ごとの違いが大きくなっています。

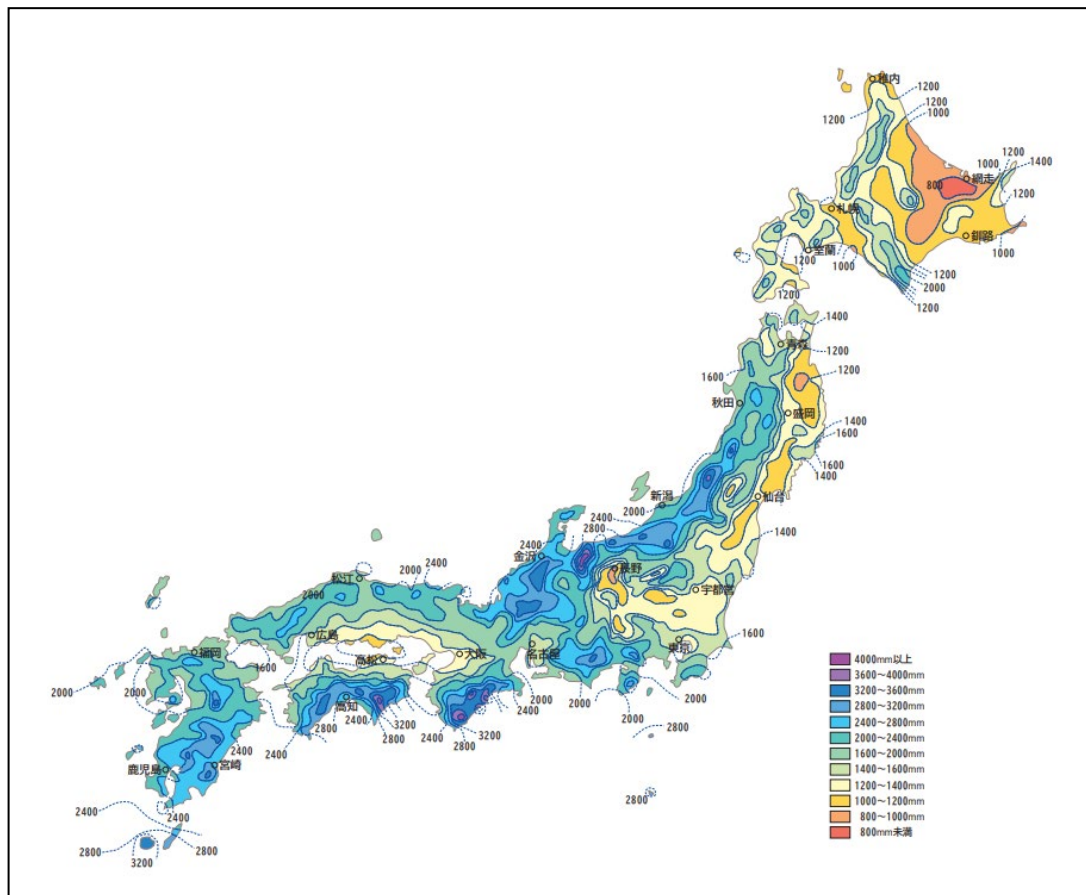
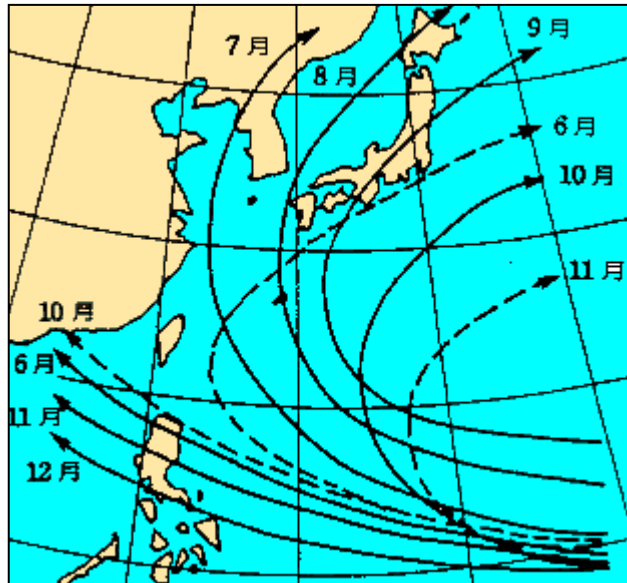


図 1-2 日本の年間降水量分布図（国土地理院、1990）

さらに、9月以降は太平洋高気圧の勢力が衰え、一部の地域では多くの台風が弧を描くように通過するようになります（図 1-3）。このような台風の通過に伴い、雨雲の発達や前線の活動による降雨の集中が見られます。さらに近年では地球規模の気候変動の影響によって線状降水帯（数時間にわたり同じ地域に強雨をもたらす列状に発達した雨雲）の発生頻度も高く、長時間にわたり継続的に強く降る降雨も多発しています（図 1-4）。このため、近年は洪水災害や土砂災害等が多発するとともに、被害の規模も激甚化している状況にあります。このような背景から、森林の整備や治山対策も連携して、上流の集水域から下流の氾濫域にわたる流域全体の関係者間の協働による水災害対策「流域治水」を推進することも重要になっています。



(実線は主な経路、破線はそれに準ずる経路)

図 1-3 台風の月別の主な経路 (気象庁、2020)

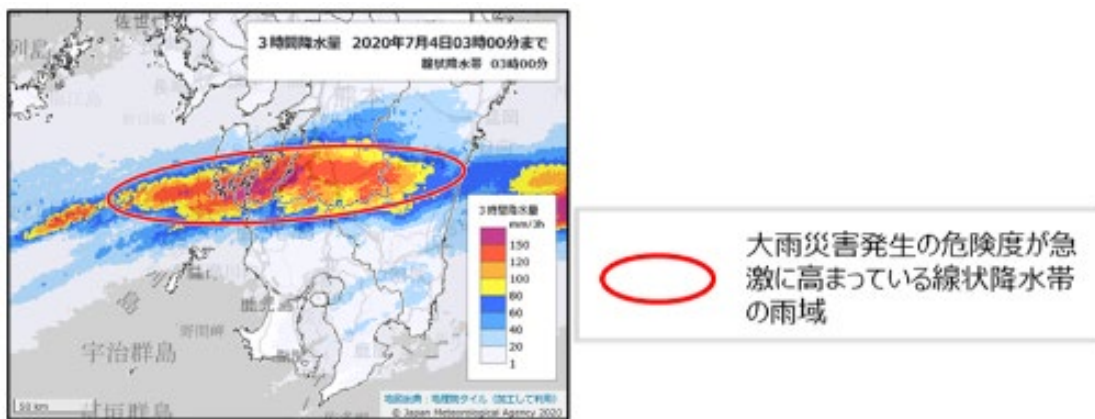


図 1-4 線状降水帯の雨域 (気象庁、2022)

また、近年は農山村の過疎化に伴う担い手の減少や、それによる森林の手入れ不足等が課題となっています。河川源流に存在する森林の管理については、近隣の農山村の自然災害リスクの低減や水資源の確保だけでなく、下流への影響も視野に入れた継続的な取組みが望まれます。世論調査の結果でも水源涵養機能については、森林に期待する役割の中でこれまで上位にあり (図 1-5)、近年の状況を踏まえると今後、森林の役割への期待が高まっていくものと考えられます。

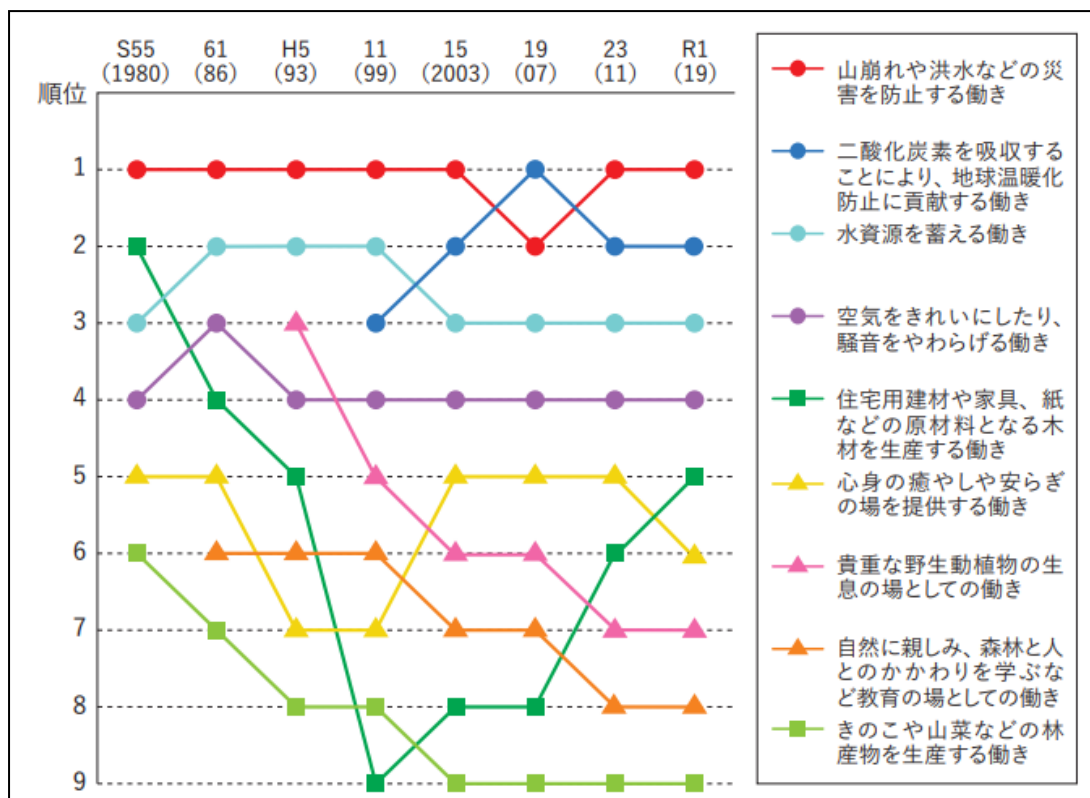


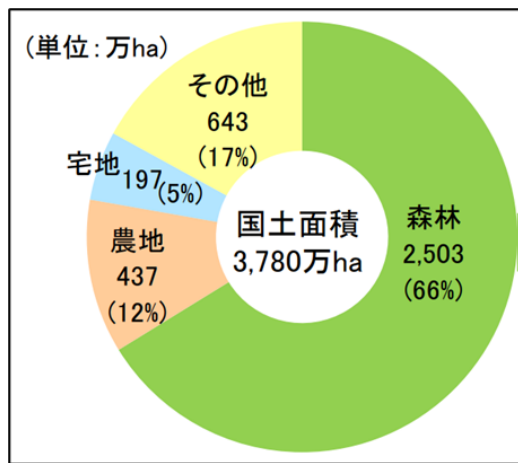
図 1-5 森林に期待する役割の変遷（林野庁、2022）

1.2. 日本の森林と水循環

我が国の森林面積はほぼ横ばいで推移しており、令和4（2022）年3月末現在で2,503万haとなっています（図1-6）。国土面積3,780万haのうち約3分の2を森林が占めており、日本の森林率はOECD（経済協力開発機構）加盟国中第3位です（表1-1）。森林と水循環は大きく関係しており、水循環の定義としては、内閣官房水循環政策本部事務局（2022）の『水循環白書』に記載があり、「水は、海水や河川の水として常に同じ場所にとどまっているわけではなく、太陽からの放射エネルギーによって海水や地表面の水が蒸発し、上空で雲になり、やがて雨や雪になって地表面に降下し、それが次第に集まって川となり海に戻るといのように絶えず循環している。これを「水循環」という」とされています。さらに、「この水循環によって塩分を含む海水も蒸発する際に淡水化され、私たちが利用可能な淡水資源が常に作り出されていることになる」と、水が利用できるようになる流れについても説明されています。

このように、海から空へ、そして空から陸地、陸地からまた海に戻るとい大きな水循環がある中で、特に森林率が高い日本にとっては、流域の上流部に存在する森林が降雨等によってもたらされた水資源を地下部で貯留し、中下流域に対して安定的に農業用水や工業用水、飲料水として供給するという、大きな役割を果たしているといえます（図1-7）。

表 1-1 OECD 加盟国森林率上位 10 カ国
(林野庁、2022)



順位	国	森林面積	森林率
1	フィンランド	22,409	73.7
2	スウェーデン	27,980	68.7
3	日本	24,935	68.4
4	韓国	6,287	64.5
5	スロベニア	1,238	61.5
6	コスタリカ	3,035	59.4
7	エストニア	2,438	56.1
8	ラトビア	3,411	54.9
9	コロンビア	59,142	53.3
10	オーストリア	3,899	47.3

図 1-6 日本の国土面積の内訳
(林野庁、2023)

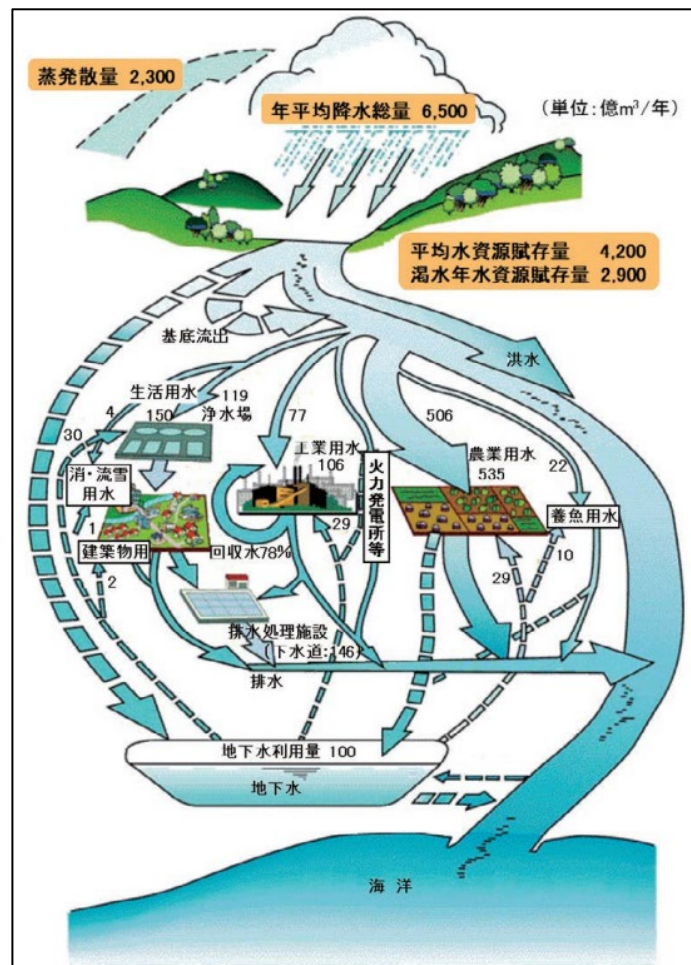


図 1-7 我が国の水収支 (内閣官房、2022)

1.3. 水源涵養機能の定義

森林の水源涵養機能の定義について、日本学術会議が平成13（2001）年11月に示した答申「地球環境・人間生活にかかわる農業及び森林の多面的な機能の評価について」（日本学術会議、2001）の中で、水源涵養機能を次のように説明されています。「森林は、おもに森林土壌のはたらきにより、雨水を地中に浸透させ、ゆっくりと流出させる。そのため、洪水の流出を緩和するとともに川の流量を安定させる。また、森林から流出する水は濁りが少なく、適度にミネラルを含み、中性に近い。このように、森林の存在が川の流量や水質を人類社会にとって都合が良いように変えてくれるはたらきを森林の水源涵養機能という。」答申の中では、水源涵養機能の内容として、洪水緩和、水資源貯留、水量調節、水質浄化の4つの機能が挙げられていますが、本書では、そのうち、「洪水緩和機能」と「水資源貯留（水量調節）機能」に着目して解説します。

ただし、現時点でも流域全体の評価を正確に行うことは非常に難しく、ごく限られた範囲（プロット）で降雨・流出の実験や調査・分析を行うことはできても、複数の流域を含むような山全体を対象とした広域スケールでの調査・分析を行うことには難しい面があります。このような状況にありますが、近年の調査技術や研究手法の発達により、少しずつ精度を高めていくことへの期待も持てるようになってきています。具体的な内容は、本書の後半で紹介します。

■ 出典

1. 森林の水源涵養機能の重要性

1.1. 日本の地理、地形、気象条件を踏まえた森林の位置づけ

林野庁（2019）我が国の森林と森林経営の現状－モニタリング・プロセス第3回国別報告書－。130pp.（Web版：<https://www.rinya.maff.go.jp/j/kaigai/index.html>）

国土地理院（1990）年間降水量分布（Web版

https://www.hrr.mlit.go.jp/river/dosya/sdk_hp/tokusei/bunpu1.html）

気象庁（2020）台風の発生、接近、上陸、経路（Web版

<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/typhoon/1-4.html>）

気象庁（2022）線状降水帯に関する各種情報（Web版

https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/bosai/kishojoho_senjokousuitai.html#b）

林野庁（2022）令和3年度 森林・林業白書 第1章 森林の整備・保全 第1節 森林の適正な整備・保全の推進（Web版

<https://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/hakusyo/r3hakusyo/zenbun.html>）

1.2. 日本の森林と水循環

林野庁（2023）森林・林業・木材産業の現状と課題（Web版

https://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/genjo_kadai/attach/pdf/index-55.pdf）

内閣官房水循環政策本部事務局（2022）令和3年版水循環白書（Web版

https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/mizu_junkan/materials/materials/white_paper.html）。1-221.

1.3. 水源涵養機能の定義

日本学術会議（2001）地球環境・人間生活にかかわる農業及び森林の多面的な機能の評価について
（答申）（Web版 <https://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/shimon-18-1.pdf>）. 112pp.
白川直樹（2021）4.5 水資源安定供給レベル向上機能の経済評価、恩田裕一・五味高志（編）水資源
対策としての森林管理—大規模モニタリングデータからの提言，東京大学出版会，218-222pp.

2. 森林の変遷と新たな評価の必要性

本章では、日本の森林をめぐるこれまでの経緯を振り返るとともに、森林の水源涵養機能を改めて評価し直すことの必要性について示します。まず、森林の変遷と災害の歴史、そして、それに対する政策での対応について概観します。

2.1. 森林の変遷と政策

2.1.1. 江戸時代から戦前までの動き

我が国では江戸時代頃から、森林の取り扱いが重要視されてきました。徳川林政史研究所（2015）は、次のとおり当時の国土の変遷と水土保持への着目に関して説明しています。森林資源は古くから建築用材や薪炭の燃料などに利用されていましたが、17世紀には過度な森林伐採や開墾により、山地から河川に土砂が流入し、洪水も頻発していました。そこで、熊沢蕃山（1619～1691）は「治水の要は治山にあり」とし、水源地域の植林などを進めました。特に、江戸時代には江戸（現在の東京）や大坂（現在の大阪）などでの建築需要の増加により、各地で森林の伐採が盛んになり、森林資源の枯渇や災害の発生が深刻になりました。このため、幕府や各藩によって、森林の伐採を禁じる「留山（とめやま）」などの規制が強化されるとともに、公益的機能の回復を目的とした造林も推進され、寛文6（1666）年に幕府が発出した「諸国山川掟（しょこくさんせんおきて）」では、森林開発の抑制とともに、河川流域の造林も奨励されました。また、森林の荒廃への対策として計画的な伐採・造林を説く林政論者も現れ、水源涵養林や土砂流出防止林などの造成も進みました。中村ら（2018）は、「日本は降水量が多く地殻変動の活発な湿潤変動帯に位置し、毎年、台風による風害や豪雨災害、高潮、地震、火山災害など、様々な自然災害を受けてきた。一方で、森林が災害を防止したり、軽減したりする機能については古くから知られ、日本人はこうした森林の効用を賢く利用しながら、災害リスクを減らす努力をしてきた」と説明しています。

明治時代の近代化により、さらに木材利用や森林伐採が進み、森林荒廃により災害も多発しました。このような荒廃地は、「ハゲ山」と呼ばれ、裸地が露出した斜面が面的に広がっていることから、日本各地で森林の造成や山地保全の重要性への理解が進みました。これを受けて、明治30（1897）年に「森林法」が制定され、保安林制度が創設され、森林の伐採が本格的に規制されることになりました。明治44（1911）年からは「第1期森林治水事業」が開始され、荒廃地の復旧・再生が進みました。このように、荒廃地からの回復によって洪水の流出を緩和する取組や、それを支える治山技術の重要性についての認識が広がりました。

2.1.2. 戦後の動き

戦後の状況について、多田（2018）は、太平洋戦争等の影響で軍用材の需要が増加し、森林の伐採が進んだ結果、昭和20年代及び30年代には、相次ぐ大型台風の襲来により死亡者数が千人を超える洪水や土砂災害が立て続けに発生したとしています。実際に、室戸台風（昭和9（1934）年）、枕崎台風（昭和20（1945）年）、伊勢湾台風（昭和34（1959）年）などの大型台風の来襲により甚大な被害が発生しました（図2-1）。山口（2015）は、「戦前・戦時の木材利用を通じて、国内の森林伐採面積と森林減少累計面積は着実に増加

し、終戦時には伐採可能な山林はほぼ限界に達していたといえる」としています。

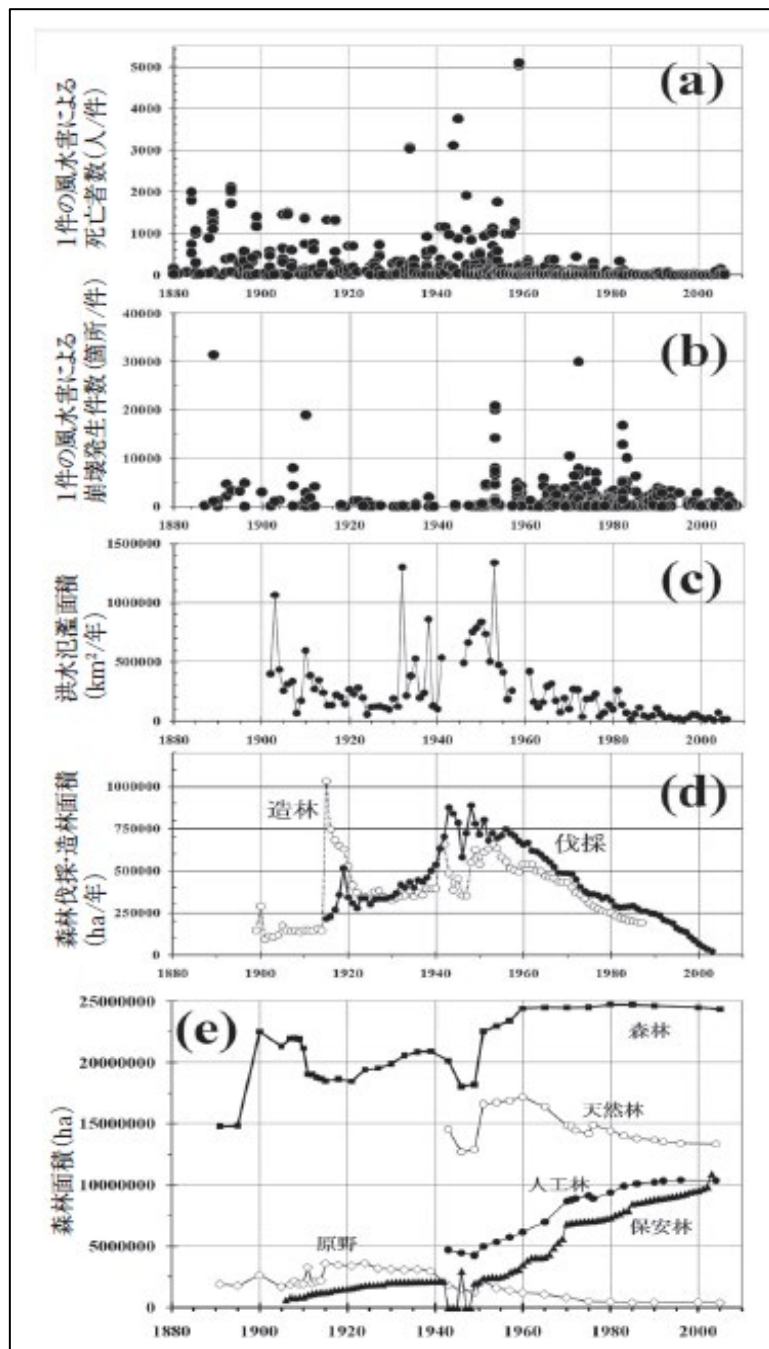


図 2-1 森林・伐採・造林面積 (1886~1946 年) (多田、2018)

以降、国土保全や水源涵養のための森林整備の必要性の認識も高まり、昭和 25 (1950) 年の「造林臨時措置法」制定による造林の推進や、「第 1 次治山 5 ヶ年計画」(昭和 23 (1948) 年) や「治山事業 10 ヶ年計画」(昭和 29 (1954) 年) による治山事業が進められました。昭和 26 (1951) 年には「森林法」が改正されて森林計画制度が創設されるとともに、昭和 29 (1954) 年に制定された「保安林整備臨時措置法」によって保安林整備と治山事業が推進されました。さらに、昭和 35 (1960) 年に治山治水緊急措置法も制定

され、治山事業の計画的な実施が推進されました。

2.1.3. 近年までの動き

昭和 30 年代以降は、石油やガスへの燃料転換に伴い、これまで薪炭材などで利用されていた広葉樹等の里山林が利用されなくなるとともに、国産針葉樹材の供給が停滞していたことから、天然林の伐採と人工林化を望む声が大きくなりました。このため、国は昭和 36（1961）年に「木材価格安定緊急対策」により緊急増伐と輸入の拡大を行うとともに、丸太や製材等の輸入を段階的に自由化しました。

緊急増伐が行われた伐採跡地には、成長の早い針葉樹の植栽による「拡大造林」が進められ、昭和 40 年代半ばまで毎年 40 万 ha 弱の造林が行われました（図 2-2）。さらに、昭和 39（1964）年に「林業基本法」が制定され、拡大造林や機械化の推進、路網密度の向上、優良種苗の確保等により生産性の向上を図ることとされました（林野庁、2013）。

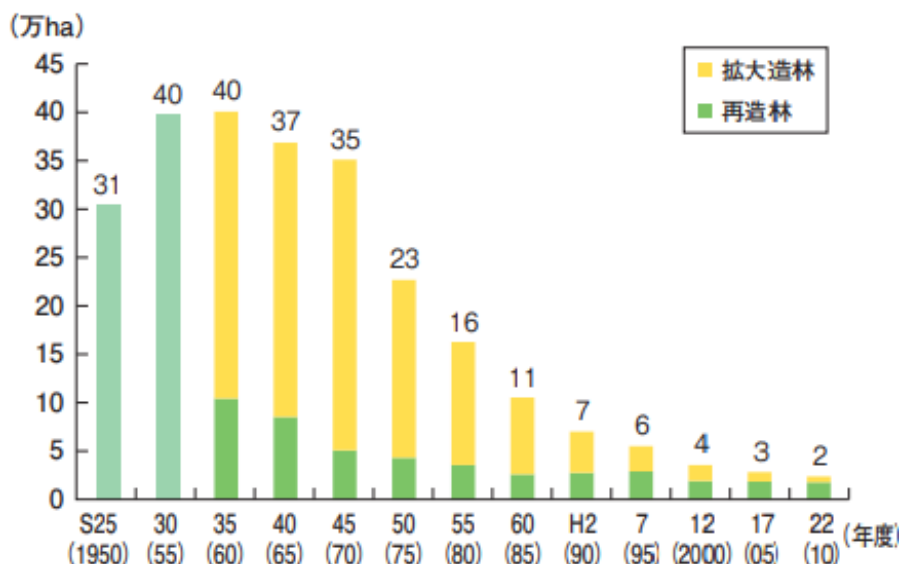


図 2-2 戦後の人工造林面積の推移（林野庁、2013）

昭和 40 年代になると、輸入が自由化された外材丸太の供給が増える一方、国産材の供給は減少し、山村の過疎化や林業労働者の高齢化等も相まって林業生産活動は低迷しました。昭和 50 年代からは木材需要が頭打ちとなり、昭和 60 年代以降は円高方向への推移等により製品輸入が急激に増大しました。さらに、平成 3（1991）年のバブル景気崩壊後の景気後退等による木材需要の減少の影響もあり、木材価格は長期的に低迷するようになりました。このため、林業生産活動は一層停滞し、間伐が行われない人工林や、植栽が行われない伐採跡地が見られるようになりました。こうした背景から、平成 13（2001）年に「森林・林業基本法」が制定され、森林の多面的機能を発揮するための政策を体系的に推進するとともに、生産性の向上等による林業の健全な発展を図ることとされました（林野庁、2013）。多田（2018）は、「1960（昭和 35）年以降森林面積は殆ど変わっていないが、崩壊の発生しやすい原野と林齢 20 年以下の幼齢林が消失し、崩壊防止効果を発揮する高林齢の人工林と国土保全を目的とした施業要件の厳しい保安林が増加した。その結果、

1980年代後半以降から、崩壊発生件数が減少していったのである」と説明しています。さらに、「わが国は大規模な風水害の場合、本来1件の風水害で数千～数万人規模の死亡者が生じる脆弱な国土」であることを示しています。死亡者数は明治中期に制定した治水三法以降減少に転じ、現在は大規模な風水害でも百名を上回る死亡者は生じなくなりました(図2-3、図2-4)。現在の1件の風水害で死亡する確率は127万人に1人にまで減少しており、国土の風水害に対する安全度は史上最も高い状況にあります。多田(2018)は、「この風水害の克服には治水施設の完備に加え、山地の森林の充実が重要な役割を果たした」とまとめています。また、太田(2012)は、昭和時代後期から平成時代にかけて、「荒廃山地や採草地・焼畑などは完全に姿を消した」として、「日本の森林は劇的に変化し、現在日本の森林は四百年ぶりの豊かな緑に満ちている」としています。

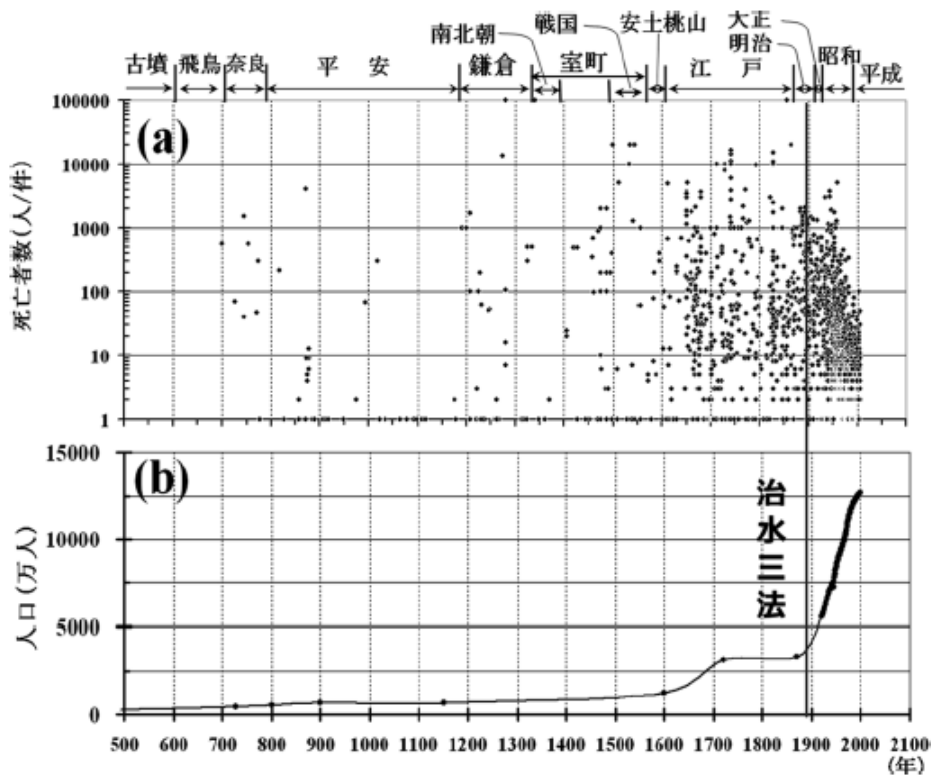


図 2-3 1 件の風水害による死亡者数と人口の推移 (多田、2018)

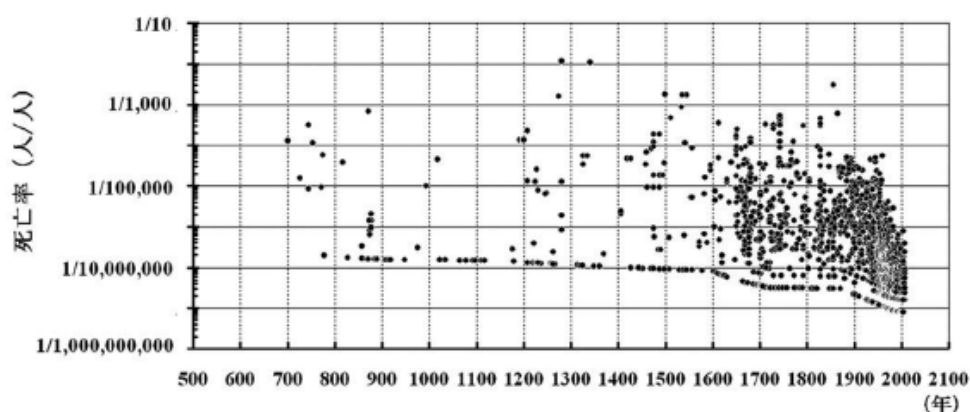


図 2-4 1 件の風水害における人口当たりの死亡率の推移（多田、2018）

このように、我が国の森林が充実したことで、森林の洪水緩和機能によって被害の防止・軽減がなされ、昭和 20 年代ころまでの年数千人規模での被害者を発生するような大規模な土砂や洪水災害は見られなくなりました。一方で、2010 年代に入ってから、平成 26 年 8 月豪雨（2014 年）では兵庫県や広島県、平成 29 年 7 月九州北部豪雨（2017 年）では福岡県や大分県、平成 30 年 7 月豪雨（2018 年）では岡山県などを中心として、大規模な洪水災害や土砂災害が発生しています。これらは気候変動の影響により、線状降水帯の形成などによる豪雨の発生やその頻度が高まっているためと考えられます。

2.2. 森林環境税等の導入と水源涵養機能関連の知識等を普及する必要性

近年の森林と水に関する動きとして、都道府県での水源税や国による森林環境税が導入されたことも、大きな流れの一つです。特に平成 18（2006）年度以降は、多くの森林が所在する市町村を中心に結成された「全国森林環境税創設促進連盟」等による運動が展開され、地方独自の財源確保の取組として、森林整備等を主な目的とした住民税の超過課税の導入が進みました。2017 年までに 37 件の都道府県が「森林税」や「水源税」として、自治体の独自税制による森林整備を進めています（香坂ら、2019）。

一例として、平成 9 年度から「水源の森林づくり事業」に取り組んできた神奈川県では、その後「かながわ水源環境保全・再生施策大綱」（神奈川県（2005））が策定され、平成 19 年度から 20 年計画で「水源税」としての独自財源による水源環境の保全・再生対策が進められています。施策の評価や見直しを県民参加で行う仕組みとなっており、森林整備等事業と合わせて事業効果の県民に説明、事業の県民への情報発信、森林モニタリングなども盛り込まれています。

政府の横断的な取組みとして、平成 26（2014）年に、水循環に関する施策を総合的かつ一体的に推進し、健全な水循環の維持・回復等を目的とした「水循環基本法」が施行され、森林による水の涵養機能の維持・向上を図る施策を講ずる旨も記載されています。

さらに、平成 30（2018）年には森林経営管理法の成立によって、市町村が森林所有者から委託を受けて手入れの行き届いていない森林の経営管理を行う森林経営管理制度が始

まるとともに、森林環境譲与税による間伐等が進められています（図 2-5）。本制度により、森林管理主体のすそ野が市町村に広がるなど、各地域での取組が地域住民にもより身近なものとなってきています。このように、森林環境税や自治体の独自課税が可能になった背景には、森林への社会の意識が変化したことや産業構造の変化などにより、森林の水源涵養機能を含む森林の公益的機能への理解が進んだという背景もあります。

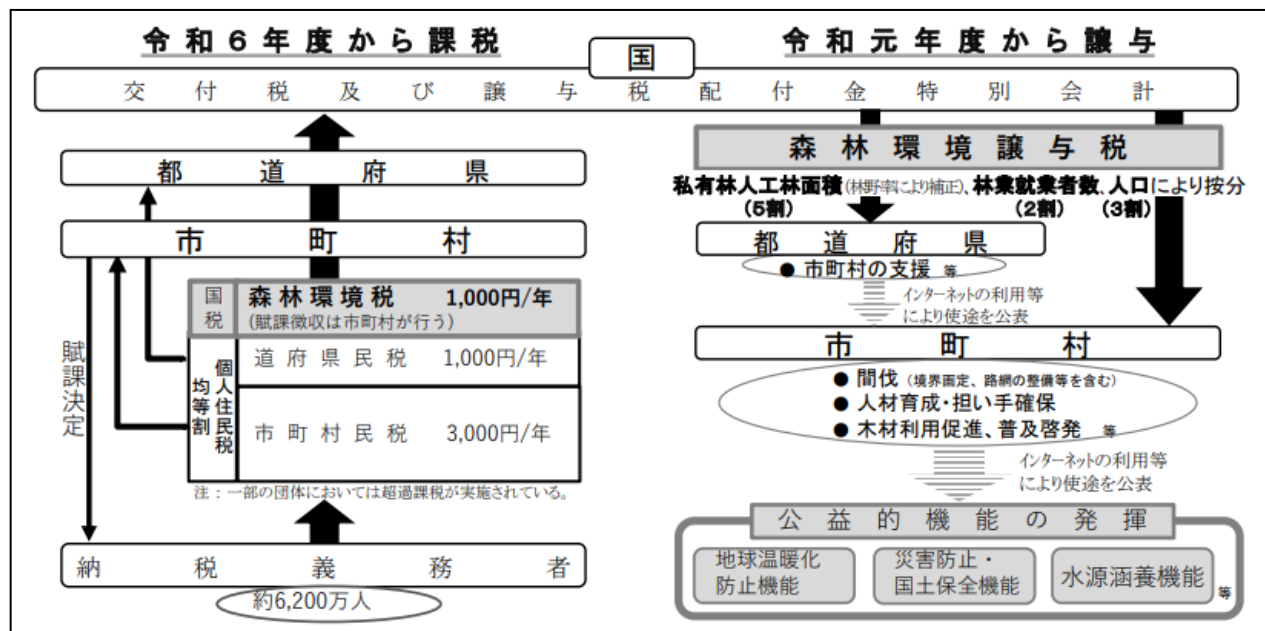


図 2-5 森林環境税及び森林環境譲与税の仕組み（林野庁、2022）

各県で導入されてきた森林税とともに、近年の森林環境譲与税（森林環境税）の導入などにより、森林整備が進んできました。一方で、それらの施策の効果検証を行うためには、水源涵養機能の科学的な根拠・メカニズムについての解明を進める必要があります。また、森林経営管理制度によって市町村が主体となった森林整備が期待される一方で、鈴木ら（2020）は、市町村職員の森林管理等に関する知識不足を指摘しています。このため、水源涵養機能の発揮も含めた今後の森林整備を適切に進めるためには、関連する知識や技術の普及も課題となります。

2.3. 今求められる森林の姿と水源涵養機能の評価の観点

これまでの森林に関する歴史や現在の状況を概観してきましたが、こうした背景を踏まえて、現在求められている森林の姿と、水源涵養機能の評価するに当たって必要な視点について説明します。

<求められる森林の姿>

国の方向性として描いている森林の姿として、令和3（2021）年6月に閣議決定された森林・林業基本計画（林野庁、2021a）では、水源涵養機能に応じた「森林の望ましい姿」

を、「下層植生とともに樹木の根が発達することにより、水を蓄える隙間に富んだ浸透・保水能力の高い森林土壌を有する森林であって、必要に応じて浸透を促進する施設が整備されている森林」としています。

森林・林業基本計画では、「森林の誘導の考え方」の「基本的な考え方」として、「自然的・社会的条件を勘案しつつ、現況が育成単層林のうち、林業に適した場所に位置する森林はこれを維持する一方で、それ以外は育成複層林化を図る。あわせて、天然生林を適切に維持することなどにより、一定の広がりにおいて様々な生育段階や樹種から構成される森林がバランス良く配置された望ましい森林の姿へと誘導する」と記載しています。これを受けて、「目標とする森林の状態」として、現況（令和2（2020）年）では、育成単層林1,010万ha、育成複層林110万ha、天然生林が1,380万haとなっている森林について、20年後の令和22（2040）年までに育成複層林の割合を増やし、それぞれ970万ha、190万ha、1,340万haの面積とすることとしています。将来的な「指向する森林の状態」については、育成単層林660万ha、育成複層林680万ha、天然生林1,170万haとして、段階的に複層林化を進めることが目標とされています（表2-1）。

表 2-1 森林の有する多面的機能の発揮に関する目標（林野庁、2021）

	令和2年 (現況)	目標とする森林の状態		
		令和7年	令和12年	令和22年
森林面積 (万ha)				
育成単層林	1,010	1,000	990	970
育成複層林	110	130	150	190
天然生林	1,380	1,370	1,360	1,340
合計	2,510	2,510	2,510	2,510
総蓄積 (百万m ³)	5,410	5,660	5,860	6,180
ha当たり蓄積 (m ³ /ha)	216	225	233	246
総成長量 (百万m ³ /年)	70	67	65	63
ha当たり成長量 (m ³ /ha年)	2.8	2.7	2.6	2.5

(参考)

○ 指向する森林の状態 (万ha)

育成単層林	育成複層林	天然生林	合計
660	680	1,170	2,510

さらに、森林・林業基本計画に即して、全国の森林を対象に5年ごとに15年を1期として立てる「全国森林計画」でも、目指すべき森林像を示しています。令和3年6月閣議決定の「全国森林計画」（林野庁、2021b）では、水源涵養機能についての「森林整備及び保全の基本方針」として、「ダム集水区域や主要な河川の上流に位置する森林及び地域

の用水源として重要なため池、湧水地、溪流等の周辺に存する森林については、水源涵養機能の維持増進を図る森林として整備及び保全を推進する。具体的には、洪水の流出を緩和し、良質な水の安定供給を確保する観点から、適切な保育・間伐を促進しつつ、下層植生や樹木の根を発達させる施業を推進するとともに、伐採に伴って発生する裸地については、縮小及び分散を図る。また、自然条件や国民のニーズ等に応じ、奥地水源林等の人工林における針広混交の育成複層林化など天然力も活用した施業を推進する。」とされています。

現在の森林状態としては、これまでの造林により（育成）単層林の面積が多いものの、今後の森林の方向性として、複層林化や針広混交林化も目指すこととしています。また、近年は地球温暖化の影響による線状降水帯形成による集中豪雨の頻発等により、洪水や土砂災害等の被害も深刻になっており、森林の整備により水源涵養機能が適切に維持されることが重要です。なお、林業による造林・育林等の施業は環境保全と概ね整合的ですが、地形や土壌などの立地条件によっては伐採等が環境や森林の公益的機能に大きな負の影響を与える場合もあることから、それぞれの立地を踏まえて方向性を検討することが望まれます。

<近年の動向・課題>

近年では、森林の水源涵養機能の発揮に関して、地方自治体の取組、さらには多様な課題への対応など、さまざまな取組が行われています。市町村での森林管理の取組例として、平成6（1994）年に設置された「豊田市水道水源保全基金」を活用した、森林の水源涵養機能の維持・保全のために森林保全事業を行うことなどが、小島（1995）により紹介されています。特に、水源涵養事業や水質保全の環境整備を進め、安全で良質な水道水を供給するために、市町村としては、全国に先駆けて制定されたものです。愛知県東部の矢作川上流域の森林を保全し水量確保を目的とする「水源の森事業」、水源の水質保全を目的とした「水質保全対策事業」とともに、「水道水源林間伐事業」、「水道水源林確保事業」、「水道水源林モニタリング事業」などを実施し、水道水源の保全を進めています。（中山ら、2006）

一方で、森林・林業を巡っては様々な課題もあります。森林に関する今後の課題として、地球温暖化や人工林の手入れ不足への対応、高齢化・過疎化が進む中山間地域などでの森林管理を進めるにあたり、田中ら（2020）は、森林環境譲与税の活用などを提示しています。一方、森林は充実してきましたが、人工林の手入れ不足による人工林の過密化や野生動物の影響による林床植生の衰退など、森林環境への影響も顕在化してきました。たとえば、野性動物の影響として、畢力ら（2013）は「シカの増加に伴って、採食圧が増加し、ブナ林の林床植生が衰退し、土壌浸食が発生して深刻な問題となっている」としています。シカ食害に対する近年の取組としては、「既存の獣道を残置し、複数の区画に分割して柵を設置するなどにより、シカの侵入リスクの低減を図る」小面積の防護柵（ブロックディフェンス）の実証なども行われています（森林整備センター関東整備局、2015）。さらに、これまでは、間伐が重点的に進められてきましたが、今後、主伐及び主伐後の再造林が進み循環型林業へシフトしていくことを考えると、どのような森林に誘導していく

かますます重要な課題となります。各都道府県においても主伐・再造林への転換に向けた取組みが進められています。

前述の「水循環基本計画」（内閣官房水循環政策本部事務局、2022）では、「水循環の目指すべき姿」として、「国土の多くを占める森林や農地においては、雨水を一時的に貯留し、水質を浄化する水源涵養機能に加え、土壌流出の防止、生態系の保全、教育・体験学習の場の提供などの多面的機能が持続的に維持・発揮されることが必要である」と記述されています。さらに、「他方、地下水を含む水循環の挙動解析や実態解明、水災害リスクの影響予測等の水循環に関する科学技術については、産学官が連携して調査研究、技術開発を行い、その成果を健全な水循環の維持又は回復に生かすことが重要である」とされ、更なる調査研究の重要性が示されています。そのためには、「森林の現況、自然条件、地域のニーズ等を踏まえながら、水源涵養機能をはじめとする多面的機能を持続的に発揮させるための森林の整備及び保全を進める必要がある」とされており、森林の水源涵養機能の発揮に当たっては、よりきめ細やかな対応が求められています。

<水源涵養機能の評価の観点>

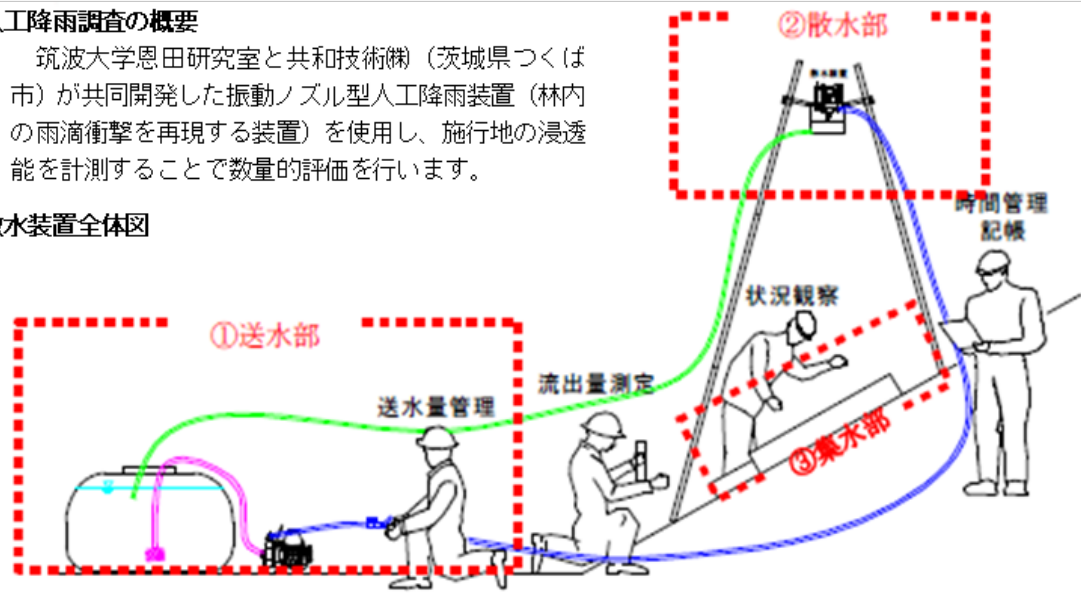
以上のように、森林資源の充実、森林経営管理制度の導入、近年の地球温暖化に伴う集中豪雨や台風の増加などを背景から考えると、これからの森林と水源涵養機能では、これまでの荒廃地（ハゲ山）への造林や治山事業による緑化を進めるという観点から、一步推し進めて、多様な森林状態や森林整備手法を考慮し、それらを定量的・科学的な知見から、政策に反映することが求められています。このためには、洪水流出緩和や水資源貯留等の機能について改めて評価し直す必要があります。

一例として、山口県（2009）は、「やまぐち森林づくり県民税」による森林整備等の導入効果を検証するため、事業箇所での人工降雨装置による土壌浸透能の調査を通して、洪水緩和機能や水資源貯留機能等について定量評価を行い、事業実施により土壌浸透能が2.7倍になったとの結果を示しています（図 2-6）。

人工降雨調査の概要

筑波大学恩田研究室と共和技術㈱（茨城県つくば市）が共同開発した振動ノズル型人工降雨装置（林内の雨滴衝撃を再現する装置）を使用し、施行地の浸透能を計測することで数量的評価を行います。

散水装置全体図



調査結果

雨水が土中に浸み込む量（土壌浸透能）

	①事業実施前 (mm/時間)	②事業実施後 (mm/時間)	増減率 (②/①) (倍)	③50年後 (予測) (mm/時間)	増減率 (②/①) (倍)
事業地	71	189	2.7	303	4.3

図 2-6 人工降雨調査の概要（山口県、2009）

石川県では、「いしかわ森林環境基金」の事業効果を評価するために実施（いしかわ森林環境基金評価委員会、2011）され、森林整備を実施した事業箇所での人工降雨装置による浸透能調査が行われ、「強度間伐実施後3年目の森林では、手入れ不足人工林と比較し、最大浸透能が2倍以上になるなど、水源涵養機能の向上が顕著に認められた」との結果が示されています（図 2-7）。

○調査方法

人工降雨装置を用いて降雨状態を再現し、強度間伐を実施した森林、手入れ不足人工林、下層植生が豊かで健全な森林という3タイプにおいて、浸透能（保水力）を測定し、森林の状態の違いによる水源涵養機能の発揮の程度を比較した。

○調査結果

強度間伐実施後、スギ林、アテ林とも森林土壌の最大浸透能が向上する傾向が認められた。特にアテ林においては、強度間伐実施後3年目の森林では、手入れ不足人工林と比較し、最大浸透能が2倍以上になるなど、水源涵養機能の向上が顕著に認められた。

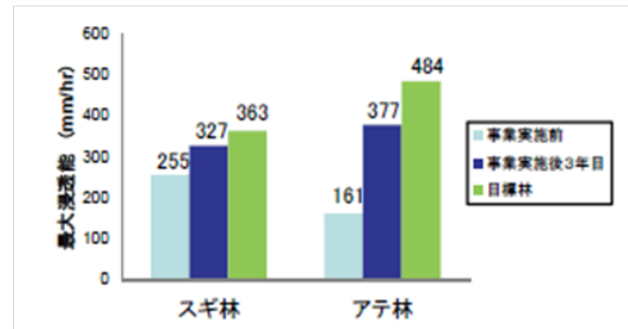
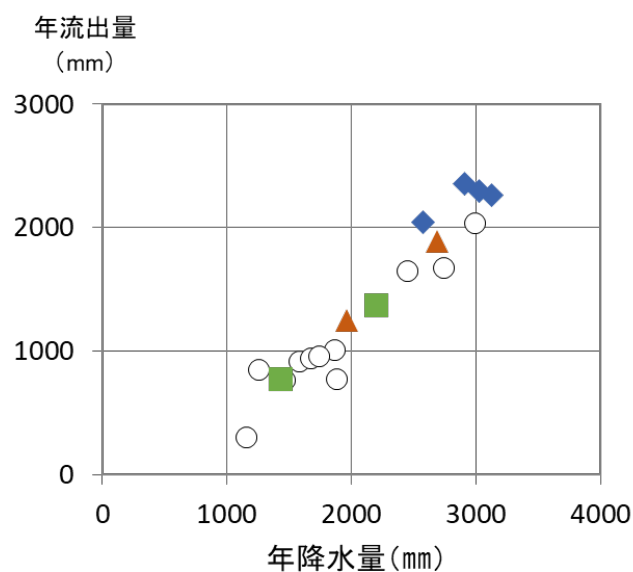


図 2-7 人工降雨装置による浸透能調査（いしかわ森林環境基金評価委員会、2011）

神奈川県では、水源環境保全・再生のために各種対策事業について、水源涵養機能の観点から効果を検証するために、地質等の異なる県内の4地域にそれぞれ試験流域を設定して、対照流域法によりモニタリング調査を行っています（水源環境保全・再生かながわ県民会議、2020）。具体的には、下層植生が衰退した水源林において森林整備やシカの管理対策などの事業を行うと下層植生が回復するため、下流への水の流出の変化を調査することにより、水源涵養機能への効果を検証しています。このモニタリングでは、神奈川県の水源域における水流出の特徴を評価し、概ね年間降水量の6割程度が流出していることを示しました。ただし、同一の神奈川県下でも、年間降水量地域（試験流域）により、およそ1,000 mmの差があり、この違いが流出量にも影響していたことが示されています（図 2-8）。このような調査・観測は、国や都道府県関係の研究機関、大学などでも実施されています。全国各地で観測とともに、実験的に施業を行うなどにより、森林斜面や流域での水循環を評価するための実証的・定量的なデータが蓄積されています。



- 国内の主な試験流域
- ◆大洞沢(No.1) 2010～2013年
- 貝沢(No.4) 2012、2013年
- ▲又タノ沢(B) 2012、2013年

図 2-8 試験流域ごとの水収支の比較（水源環境保全・再生かながわ県民会議、2020）

■ 出典

2. 森林の変遷と新たな評価の必要性

2.1. 森林の変遷と政策

2.1.1. 江戸時代から戦前までの動き

徳川林政史研究所（2015）徳川の歴史再発見－森林の江戸学Ⅱ，東京堂出版，224pp.

中村太子・菊沢喜八郎（2018）森林と災害，共立出版，1pp.

2.1.2. 戦後の動き

多田泰之（2018）国土の変遷と災害．水利科学，62(4)，121-137.

山口明日香（2015）森林資源の環境経済史－近代日本の産業化と木材，慶應義塾大学出版会，237pp.

2.1.3. 近年までの動き

林野庁（2013）平成25年度森林・林業白書（Web版

<https://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/hakusyo/25hakusyo/190411.html>）. 1-223.

多田泰之（2018）国土の変遷と災害．水利科学，62(4)，121-137.

太田猛彦（2012）森林飽和－国土の変貌を考える，NHK出版，136-137pp.

2.2. 森林環境税等の導入と水源涵養機能関連の知識等を普及する必要性

香坂玲・内山愉太（2019）森林環境譲与税の導入と都道府県への影響の分析－37府県の概況について

一. 日林誌, 101, 246-252.

神奈川県企画部土地水資源対策課 (2005) かながわ水源環境保全・再生施策大綱 (Web 版
<https://www.pref.kanagawa.jp/docs/pb5/cnt/f7006/p23516.html>). 1-59.

総務省・林野庁 (2022) 令和3年度における森林環境譲与税の取組状況について (Web 版
<https://www.rinya.maff.go.jp/j/keikaku/torikumizyoukyou-7.pdf>). 1-21.

鈴木春彦・柿澤宏昭・枚田邦宏・田村典江 ((2020) 市町村における森林行政の現状と今後の動向－
全国市町村に対するアンケート調査から. 林業経済研究, 66(1), 51-60.

2.3. 今求められる森林の姿と水源涵養機能の評価の観点

林野庁 (2021a) 森林・林業基本計画 (Web 版

<http://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/plan/index.html>). 1-38.

林野庁 (2021b) 全国森林計画 (Web 版

http://www.rinya.maff.go.jp/j/keikaku/sinrin_keikaku/attach/pdf/con_3-32.pdf).
1-28

小島昌資 (1995) 「豊田市水道水源保全基金」について. 林業技術, 645, 15-18.

中山恵子・白井正敏・山田光男 (2006) 愛知県豊田市水道水源保全事業の経済的評価. 中京大学経済
学論叢, 17, 55-68.

田中和博・吉田茂二郎・白石則彦・松村直人 (2020) 森林計画学入門, 朝倉書店, 178-182pp.

畢力格図・石川芳治・白木克繁・若原妙子・海虎・内山佳美 (2013) 丹沢堂平地区のシカによる林床
植生衰退地における降雨量、降雨係数および地表流出量と土壌侵食量との関係, 日本森林学会誌,
95, 163-172.

森林整備センター関東整備局 (2015) シカの侵入リスク低減に向けた防護柵－ブロックディフェンス
－. 季刊「森林総研」, 31, 24-25.

内閣官房水循環政策本部事務局 (2022) 水循環基本計画 (Web 版

https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/mizu_junkan/about/pdf/r020621_honbun.pdf). 1-78.

山口県 (2009) やまぐち森林づくり県民税関連事業評価報告書 (Web 版

<https://www.pref.yamaguchi.lg.jp/uploaded/attachment/65292.pdf>). 1-123.

いしかわ森林環境基金評価委員会 (2011) いしかわ森林環境基金事業の取組成果と今後の方向性
(Web 版

http://www.pref.ishikawa.jp/shinrin/zei/download/stack/H23_houkokusyo.pdf). 1-
22.

水源環境保全・再生かながわ県民会議 (2020) かながわ水源環境保全・再生施策 これまでの歩みと
これから 総合的な評価 (中間評価) 報告書 (Web 版

<http://www.pref.kanagawa.jp/docs/pb5/cnt/f7006/p1230000.html>). 15-27

3. 森林における水文プロセス

森林の水源涵養機能の評価について説明する前に、一般的な流域での降雨から流出までの水文プロセスを概観し、森林における水文プロセスの全体像について解説します。その後、樹木の地上部分（樹冠、下層植生等）での水の動きや、土壌や岩盤などの地下での水の動き、河川等への流出過程の順で大きな水の流れについて説明します。

3.1. 一般的な流域での水文プロセス

「1.2. 日本の森林と水循環の関係」でも触れましたが、地球上では海洋、大陸、大気を横断する大きな水循環が存在しています(図 3-1)。地球の表面の3分の2は水で覆われており、豊富な水が存在しますが、そのほとんどは海水で、淡水はわずか2.5%程度に過ぎません。さらに、淡水の大部分は南極や北極地域などの氷や氷河として存在し、地下水や河川、湖沼などの水として存在する淡水の量は地球全体の水の約0.8%に過ぎません。また、これらの大部分は地下水であり、河川や湖沼などの人が利用しやすい状態で存在する水は、地球上の水の約0.01%（10万km³）と言われています。水が地球上を循環することで、人間は必要な水を利用できるようになっており、沖ら（2007）の研究から、地球上の全流出量（循環量）は45,500 km³/年で、そのうち取水量は3,800 km³/年とされています。

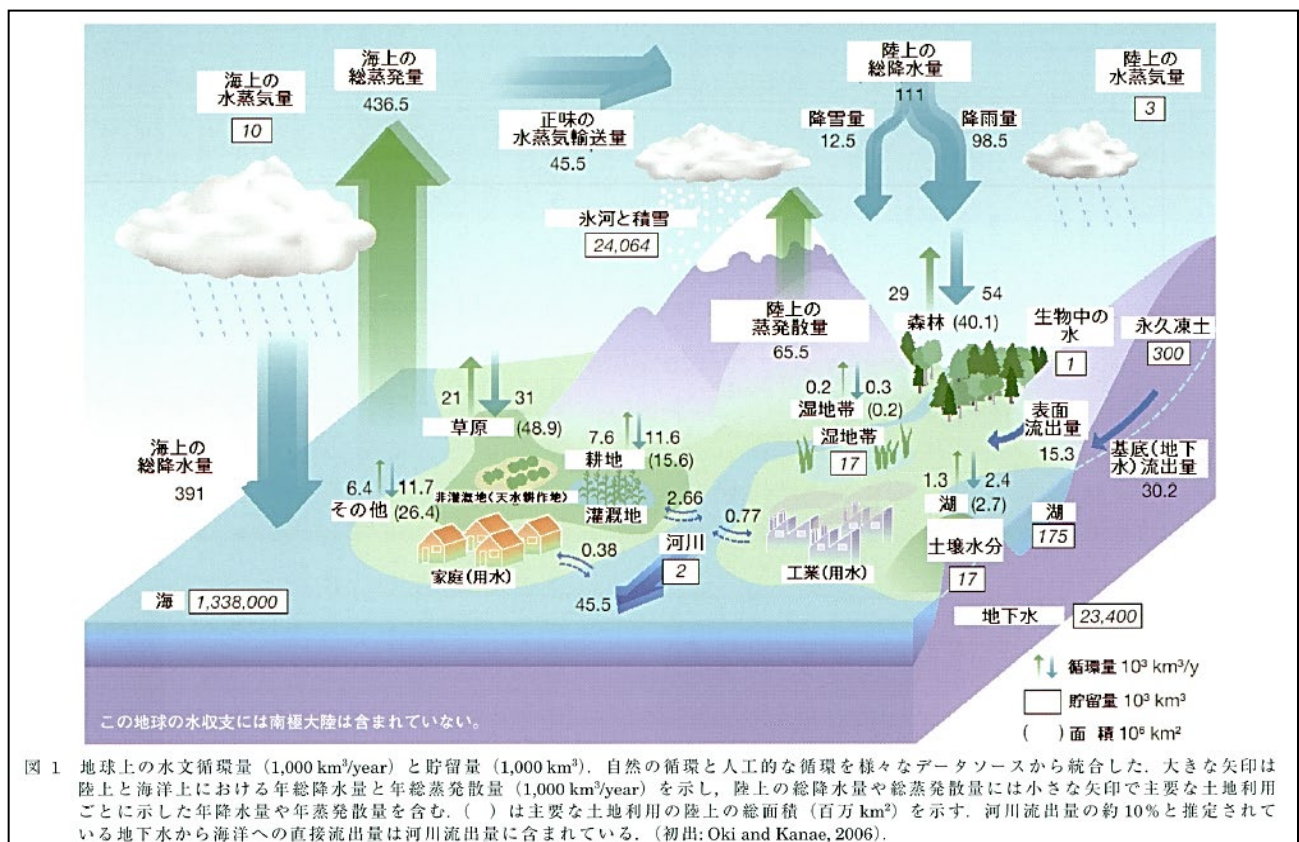


図 3-1 地球上の水文循環量 (1,000 km³/year) と貯留量 (1,000 km³) (沖ら、2007)

陸域での降水や降雪が、海に流出するまでの水文プロセスは、流域単位で起こっています。流域での水の流れの量を示した一例として、山梨県内での水収支の解析事例を掲載します（山梨県、2013）。山地に降った雨は、その一部が蒸発散で再び大気に戻りますが、大半は平野部に流出するか、地下水として涵養されます。そして、流出または涵養された水の一部は、農業用水や生活用水で使われ、一部は蒸発し、大部分は河川を通して海へと戻ることになります（図 3-3）。流域での水の動きはこのような流れをたどりますが、山地での森林の有無が、流域全体の水循環にも大きく影響します。以降では、森林がどのように水循環に影響するかについて説明します。

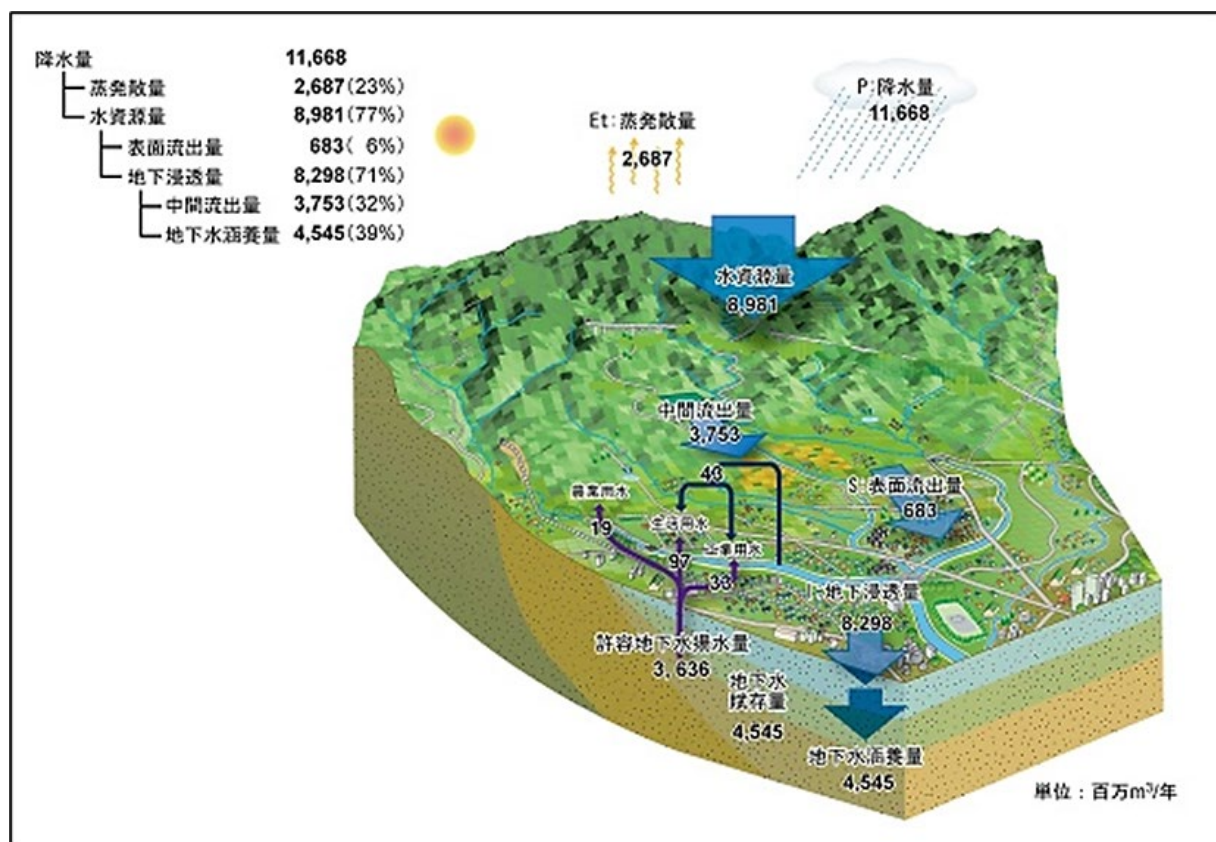


図 3-3 山梨県の水収支（山梨県、2013）

3.2. 森林から河川への水文プロセスの全体像

「1.3. 水源涵養機能の定義」で触れたように、水源涵養機能は、降雨時の早い流出を抑制する洪水緩和機能や、降った雨をゆっくりと流して水流出を平準化する水資源貯留（水量調節）機能、土壤中を流れる過程で水質を浄化する機能からなり立っています。これらの機能は、森林土壌での水の流れや、土壌から岩盤への水の浸透と貯留によって発揮され、森林状態や森林土壌と密接に関連しています。

森林に降った雨は、樹冠に到達し、樹冠の枝葉に付着します。その雨水の一部は、その

まま大気に戻っていき、これを樹冠遮断と言います。大気に戻らなかった雨水は、林冠を通過して、林床へ到達する樹冠通過雨となるか、樹幹流として幹を伝って流れ、土壌に到達します。林内に低木や林床植生がある場合には、樹冠通過雨の一部は、低木や林床植生でも遮断されます。そして、林床まで到達した雨水は、落葉層などに一時的に貯留され、その後、土壌へ浸透していきます。

水源涵養機能が発揮されるためには土壌層が重要です。そのため土壌の構造も水源涵養機能の発揮に大きく影響を与えます。土壌中に水を蓄えるためには、団粒と団粒の間に形成される隙間（孔隙）が、貯留する土壌中の「場」となります。まず、降雨初期には土壌の小さな隙間に水が貯留されます（図 3-4）。この状態は、土壌全体の一部に水が存在するために、「不飽和」状態と呼ばれています。不飽和状態の水は、団粒と団粒間の隙間に貯留されるために、土壌中での水の流れは非常にゆっくりとしたものになります。降雨が継続して、土壌中に十分な水が貯留された場合には、大きな隙間にも水が流れ出して、土壌から水が排出されるようになります。「飽和」状態での土壌中の水の移動速度は、「不飽和」状態の100～1,000倍になり、このような状態では、降った雨と同量の水が河川へ流出することになります。森林斜面の土壌にはさまざまな大きさの隙間があり、それぞれの隙間が水移動や貯留において役割を持つとともに、土壌からの排水のメカニズムにも影響しています。なお、土壌中の水は、樹木や林床植生の蒸散により、これらの根系から吸収もされています。このように、水源涵養機能は、複雑かつ多様な土壌構造の存在などによって、発揮されています。

土壌は、水の貯留のみならず、その下層にある基岩への水の浸透においても重要な役割を果たしています。土壌中に貯留された水の一部は、岩盤へ浸透することで、より長い期間、山体に貯留されることとなります。すなわち、土壌層が存在することで、土壌中を水がゆっくりと移動するとともに、岩盤への浸透にも寄与します。ただし、この岩盤への浸透（基岩透水性）の程度は、地質の違いや山地の発達過程で形成される割れや風化の程度などの岩盤の構造などによって異なります。このように、雨水は、森林の樹冠から土壌や岩盤までの水文プロセスを経て、河川へ流出します。以下の節では、これらの水文プロセスをこれまでの研究成果から得られている知見を交えて解説します。

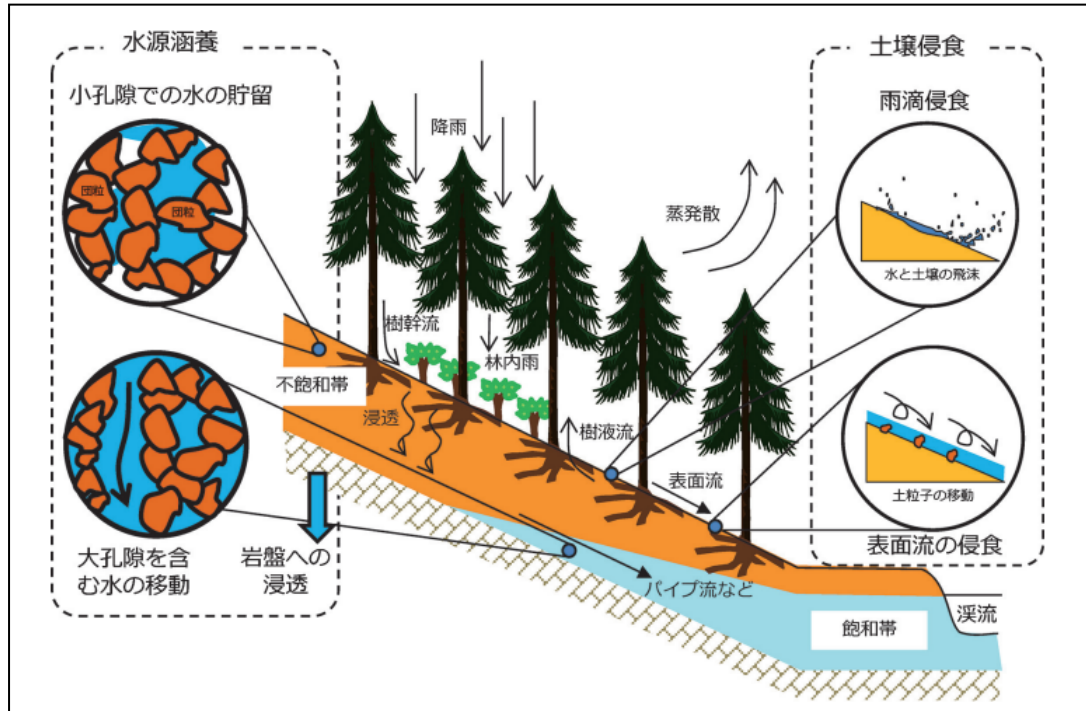


図 3-4 森林における水循環（五味、2016）

3.3. 樹冠遮断と蒸散

まず、樹木などの地上部での水の動態について見ていきます。森林に降り注ぐ雨や雪は、樹木の枝葉の生い茂る部分である樹冠や樹木の幹に付着するものと、樹冠や幹に付着せずに森林内の地表（林床）に到達する「樹冠通過雨」に分かれます（図 3-5、図 3-6）。樹冠と幹に付着した降水は、そのまま蒸発し、大気に戻る「遮断蒸発」となるか、幹を伝って林床に届く「樹幹流」となるか、樹冠から雨滴として林床に落ちる「樹冠滴下雨」の3つに分かれます。樹冠通過雨と樹冠滴下雨を合わせたものを「林内雨」と呼びます。林床に到達した雨水は、落葉層などに一時的に貯留され、その後、土壌へ浸透し、樹木や下草の根から吸収され、植物の成長に用いられます。

遮断蒸発の既往研究から、樹冠遮断量は降水量の 20～30%との結果が出ています（恩田ら（2021）、小松（2007））。村井（1970）が岩手県のアカマツ天然林で行った調査では、降雪時の樹冠遮断率は、25～35%程度とされています。なお、ここで示されている降水量に対する遮断蒸発量の割合は、調査期間の複数の降水イベント（降雨の開始から終了までを 1 イベントと言います）から得られた値です。服部（1992）は、降水量が小さくなるにつれて遮断率（雨水が遮断される割合）が高くなるとしています。このように、降雨遮断の研究は進められてきていますが、まだ多くの課題が残されており、樹冠の構造が樹幹遮断量に与える影響や遮断のメカニズムのさらなる研究の必要性が指摘されています。

蒸発散量に関しては、服部（1992）によれば、我が国の森林蒸発散量はほぼ 400～1,100 mm/年であり、その地理的分布は北海道、東北地方で 400～600 mm/年、九州を除く

関東以南の地方で 600～900 mm/年、九州地方で 1,000 mm/年前後になるとされています。また、降水量に対する蒸発散量の割合は 20～70%と幅が広いですが、多くの既往研究の報告は 40～60%の間に入ります。蒸散量は、気温や湿度、日射などの気象条件や樹種などの林分条件により異なることから、森林の立地や林分の状態を適切に把握することが重要となります。このように遮断蒸発と蒸散の量は、樹種や立木密度により異なると考えられており、その詳細については次章で解説します。

林床植生の蒸発散量も重要であることが指摘されています（恩田・五味、2021）。しかし、林床の蒸散量の観測例がたいへん少なく、今後観測が行われることが期待されています。詳細は、4.3.1でも説明します。

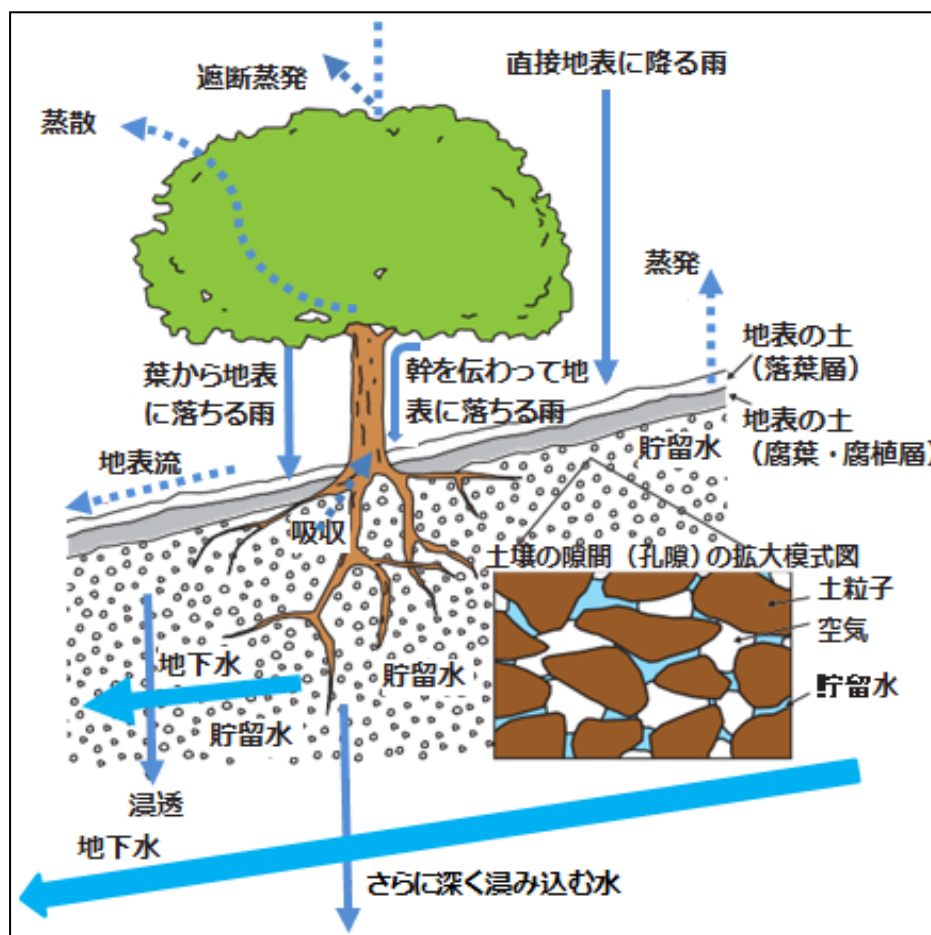


図 3-5 森林での水の動態（林野庁、2013）

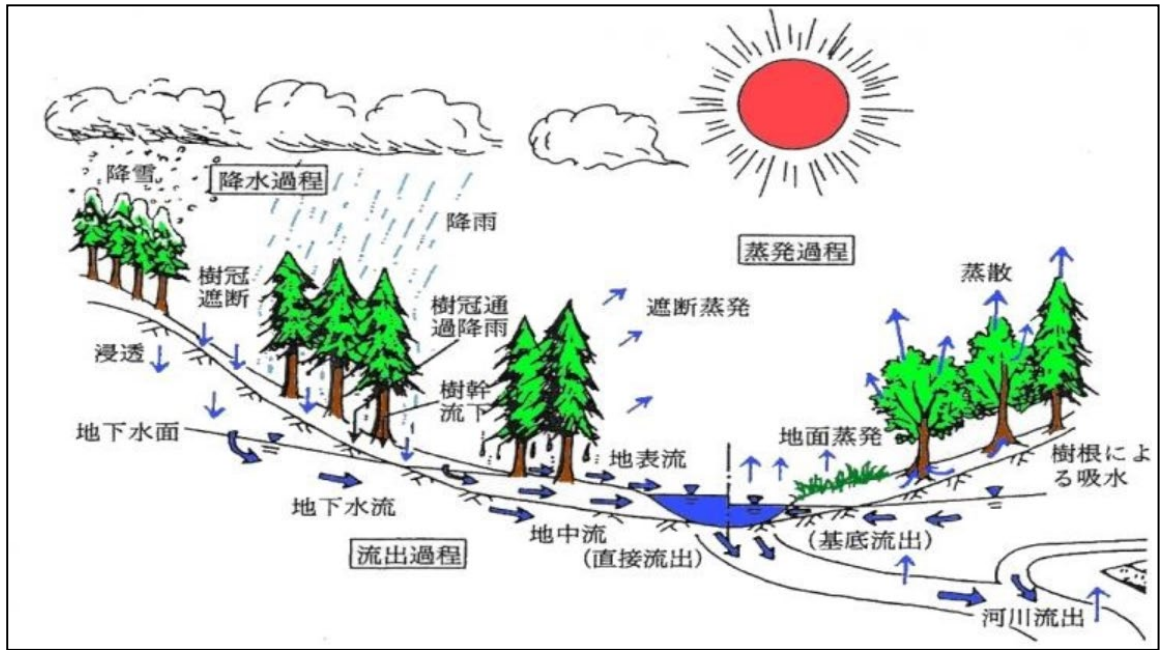


図 3-6 降水から河川流出までの水の動き（林野庁、2023）

3.4. 土壌から岩盤までの浸透・貯留

森林土壌は一般的に孔隙に富み、浸透能が高く、透水性がよいといえます。「浸透能」とは、土壌が地表にある水分を吸収することのできる量のことで、mm/h などの単位で表します。また、関連用語として「透水係数」がありますが、これは、土壌の中を水がどの程度の速度で流下するかを表すもので、mm/h などの単位を用い、特に、土壌が全て水で満たされた場合（飽和状態）での透水係数を「飽和透水係数」と呼びます。土壌に浸透した水は貯留水として土壌で保持されるほか、土壌中の隙間（孔隙）を縫うように流れていきます（図 3-7）。

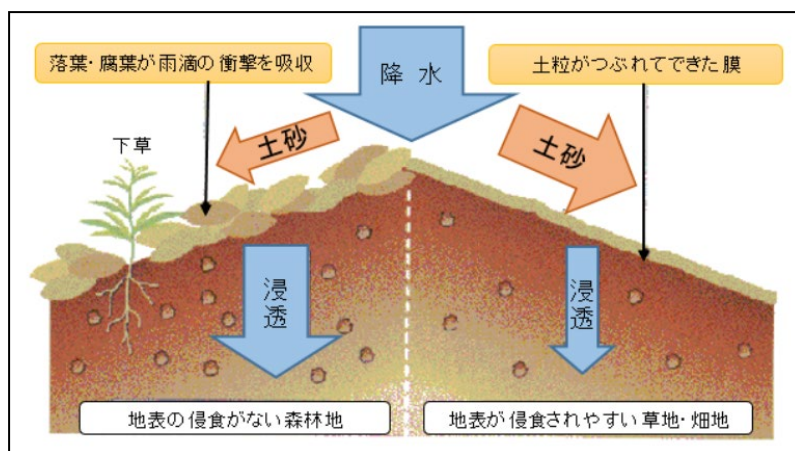


図 3-7 森林土壌の特徴（林野庁、2019）

森林の水源涵養機能は、「その主要な部分は森林土壌が担っている（有光、1987）」とされている。特に、森林土壌は「粗大な孔隙の多い団粒構造に富んでいる。このため降水の浸透は草地や裸地の場合に比べて格段に良い」ことから水源涵養機能を発揮します。土壌中の水の動きについては孔隙組成が影響しており、粗大な孔隙では早い流れの通り道、細かい孔隙は遅い流れの通り道になります。

雨水は土壌に浸透して地下水となりますが、土壌の浸透能力を超える水は地表面を流れる地表流となります。ただし、一般的に森林土壌の浸透能は高く、降水が激しい場合でなければ地表流の発生はないとされています。また、林床植生や落葉層（リター）の存在により土壌中への水移動が促されます。土壌の浸透能は、土壌の湿潤度によっても変わってきます。

山地斜面の土壌へ浸透した水は土壌中を側方流として移動します。土壌中の水の移動では、樹木や下層植生の根系等による土壌構造も影響します。土壌中を流れる水の一部は斜面下部などで復帰流として地表流（飽和地表流）となることもあります。土壌中を流れる水は、土壌中を移動する過程で、その下層の岩盤層にも浸透します。土壌や岩盤層での水の移動と貯留が、森林の水源涵養機能として重要となります。恩田ら（2021）によると、森林斜面では降水はほとんど直接に流出せず、代わりに降雨開始前に貯留されていた水（古い土層内や岩盤中にあらかじめ貯留されていた水）が流出しているとされています。さらに、地中に浸透した水の多くは岩盤を通り、森林土壌の下部の風化土層や岩盤の亀裂が、地下水の貯留層へ水を流入させていると説明しています。

3.5. 河川等への流出

前述のとおり、森林では降水が土壌や岩盤層など流域内のさまざまな「場」に一定期間貯留されることで、河川への流出が遅延し、その結果として洪水の流出を緩和することや水資源貯留（水量調節）機能が発揮されています。水が貯留される期間や、河川まで流出する時間については、地形や地質などの影響が大きく関連します。塚本（1998）は、降雨時において、樹冠や表土、基盤層での雨水流の各水文プロセスと、雨水流がそれらの「通過に要する時間の程度（オーダー）」を示しています。例えば、滴下雨は「秒」単位、樹幹流は「分」単位と、非常に短いオーダーですが、土壌や岩盤では「分」や「時」のほか、「日」や「月」といったオーダーになります（図 3-8）。塚本（1998）が示した、降雨時に対して、降雨後の流出では、数年から数十年かけて貯留され、流出する水の成分もあります。

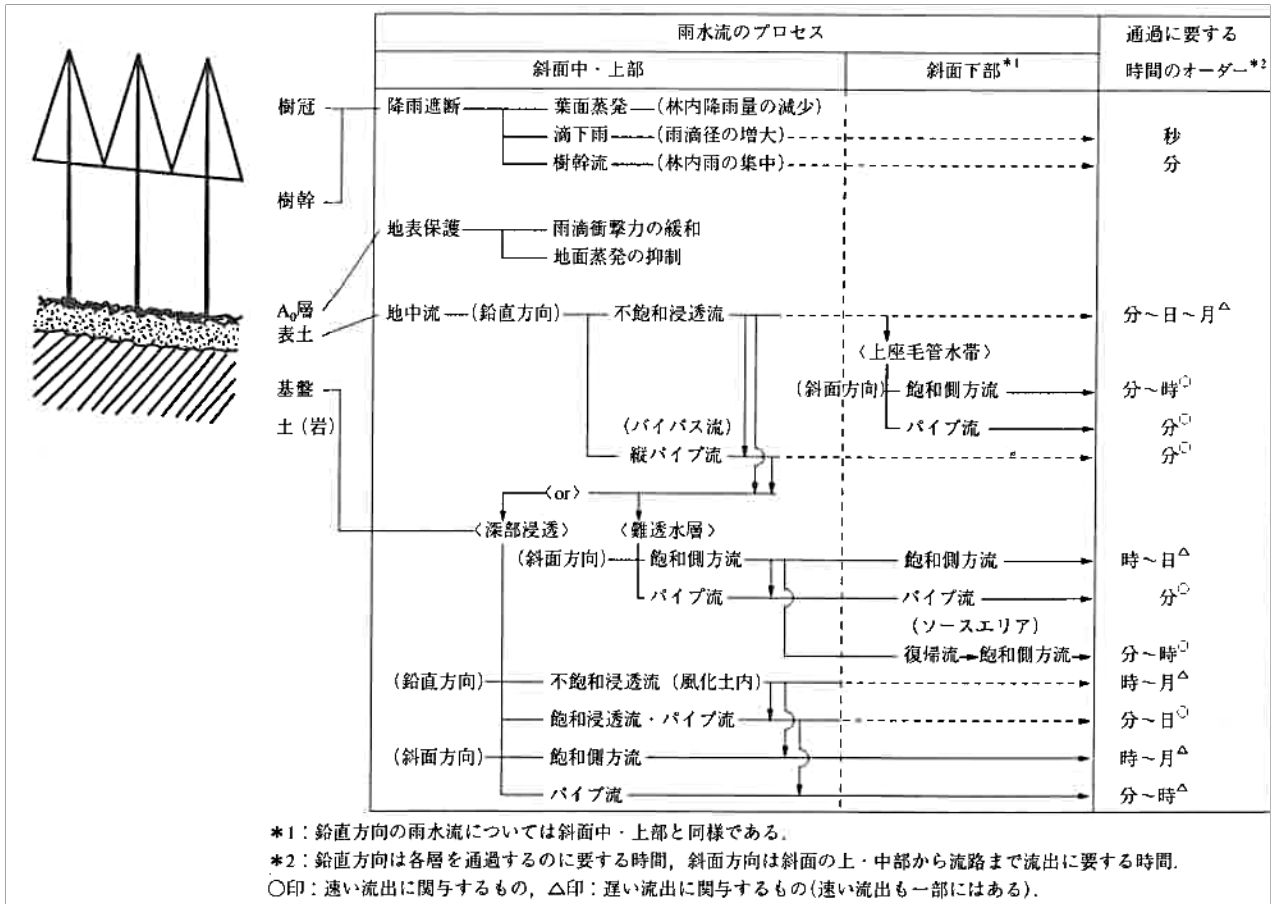


図 3-8 森林での雨水流の水文プロセスとそれぞれの場を通過に要する時間 (塚本、1998)

森林での水の移動期間を推定するために、流域での水の滞留時間を調査した研究があります。久保田ら (2007) による茨城県の常陸太田試験地内の森林小流域 (0.84～75.28ha の入れ子状の 5 流域) で行われた調査では、降雨と河川水 (沢水) に含まれている酸素と水素の安定同位体比 (重さの異なる原子が含まれている割合) を分析し、無降雨時の河川水の平均滞留時間 (降雨が河川水として流出するまでの期間) を推定しています。この結果では、平均滞留時間は 2.1～8.0 年の比較的長期間を要することが分かります。なお、この研究では、平均流路長が長くなると、この期間は長くなり、平均流路勾配や河川密度が大きくなると短くなる傾向があることも示されています。

一方で、地表流や側方流は比較的早く河川に流出します。このような比較的早い流出の特徴を把握するために降雨量の時間変化を表す「ハイエトグラフ」と流出量の時間変化を表す「ハイドログラフ」が用いられます (図 3-9)。降った雨がすぐにそのまま河川に流出するのであれば、降雨のピークに対して、流出のピークには時間的な遅れはなく、その形状は似たものになります。雨水が斜面土壌内を流下することで河川への流出を遅らせる効果があり (Tani et al., 2020)、降雨のピーク発生時刻より流出のピークが遅れるものと考えられています。ただし、流域面積が小さい場合には、ピークの遅れが明瞭ではない

場合もあります。そのような場合でも、ピーク時の流出量の値が、降雨のピークよりも小さくなり、ピーク発生後に平水時の水量に戻るまでの時間（逋減）についても、雨水の一部はゆっくりと河川へ流出し、ハイドログラフの流出期間（裾野）の幅が大きくなります。なお、急峻な地形において短時間に強い降雨が発生した場合には、斜面を水が流れる速度よりも、巨礫が多い山地河川を流れる方が屈曲し流下することなどから流路の延長が長くなるために、河川流下の方が斜面よりもハイドログラフのピーク発生時間を遅らせる効果があることが報告されています（Asano et al., 2018）。

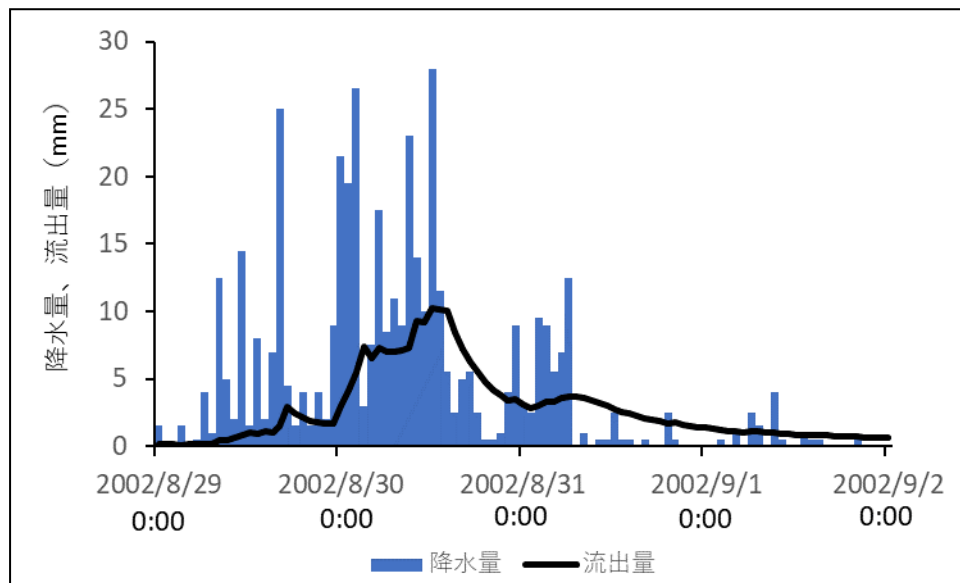


図 3-9 ハイエットグラフ（降水量の変化）とハイドログラフ（流出量の変化）の比較
森林総合研究所去川森林理水試験地 I 号沢流域（宮崎市）の場合（玉井、2023（未発表））

また、長期間にわたる森林の成長や伐採の影響を把握するために、流出量をモニタリング（定点観測）し、期間の前後のデータを比較するなどによって、森林の水源涵養機能を評価する手法の研究も続けられています。長期的なデータを蓄積することで、森林状態の変化や大きな降雨イベントにおける流出応答などを把握できることから、労力を要する長期観測は重要となります。このように基礎的なデータを継続して収集し、蓄積していくことで、将来の研究にもつながる取組になります。

■ 出典

3. 森林における水文プロセス

3.1. 一般的な流域での水文プロセス

沖大幹・鼎信次郎（2007）地球表層の水循環・水収支と世界の淡水資源の現状および今世紀の展望．
地学雑誌，166(1)，31-42．

USGS(2022) The Water Cycle (Web版：<https://www.usgs.gov/media/images/water-cycle-png>).

山梨県（2013）やまなし水政策ビジョン～持続可能な水循環社会を目指して～（Web版
<https://www.pref.yamanashi.jp/water/shiru/syushijunkan.html>）. 70.

3.2. 森林から河川への水文プロセスの全体像

五味（2016）森林土壌と水土保持機能. 森林科学, 77, 10-13.

3.3. 樹冠遮断と蒸散

恩田裕一・立石麻紀子（2021）1章 森林と水資源・水循環、恩田裕一・五味高志（編）水資源対策としての森林管理—大規模モニタリングデータからの提言, 東京大学出版会, 1-14.

小松光（2007）日本の針葉樹人工林における立木密度と遮断率の関係. 日本森林学会, 89(3), 217-220.

村井宏（1970）森林植生による降水のしゃ断についての研究, 林業試験場研究報告, 232, 25-64.

服部重昭（1992）林況と蒸発散量の関係, 塚本良則（編）森林水文学, 文永堂出版, 96-97.

服部重昭（1992）森林蒸発散の構成成分, 塚本良則（編）森林水文学, 文永堂出版, 78-96.

林野庁（2013）平成 25 年度森林・林業白書（一般社団法人全国林業改良普及協会「森林のセミナー No.1 水を育む森、森を育む水」を一部改編）（Web版：

https://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/hakusyo/25hakusyo/190411_6.html）223pp.

林野庁（2023）水を育む森林のはなし（太田猛彦「斜面における水文循環の各種成分（1996）より作成）（Web版：https://www.rinya.maff.go.jp/j/suigen/suigen/con_1.html）

3.4. 土壌から岩盤までの浸透・貯留

林野庁（2019）水源の森林づくりガイドブック, 43pp.

有光一登（1987）森林土壌の保水のしくみ, 創文, 16, 80pp.

恩田裕一・立石麻紀子（2021）1章 森林と水資源・水循環、恩田裕一・五味高志（編）水資源対策としての森林管理—大規模モニタリングデータからの提言, 東京大学出版会, 1pp.

3.5. 河川等への流出

塚本良則（1998）森林・水・土の保全—湿润変動帯の水文地形学—, 朝倉書店, 109pp.

久保田多余子・坪山良夫・壁谷直記（2007）常陸太田試験地における無降雨時河川水の平均滞留時間. 関東森林研究, 58, 163-165.

Tani M., Matsushi Y., Sayama, T., Sidle R. C., Kojima N. (2020) Characterization of vertical flow reveals why storm runoff responses can be simulated by simple runoff-storage relationship models, *Journal of Hydrology*, 588, 124982.

Asano Y.・Uchida T. (2018) The role of channels and hillslopes in rainfall/run-off lag times during intense storms in a steep catchment, *Hydrological processes*, 32, 713-728.

4. 水源涵養機能に関係する因子

これまで森林での水文プロセスについて説明しましたが、本章では水循環を決定する要素となる、土地利用形態、立木、下層植生、土壌、岩盤などの因子について、地上部から土壌や岩盤などの地下部の順で詳説します。各因子の説明の中では、降水の遮断、土壌の浸透、土壌中への貯留、流域の水流出に及ぼす影響について、近年の研究成果も紹介していきます。なお、本章では、ある一時点での状態において比較検討などで影響因子を抽出した事例を見ていくこととし、自然攪乱や森林施業、森林の成長といった、時間の推移による変化とその影響については次章で説明します。

4.1. 土地利用形態に関する因子

森林の因子を検討する際には、他の土地利用との比較で検討される場合があります。土地利用形態の種類を細分化すると様々なものに分かれていますが、ここでは、大きく、森林、草地、農地、裸地に分けて、その違いを見ます。3.4節でも説明しましたが、森林では地表の浸透能が高いと言われていています。森林の浸透能の優位性を比較した研究として、村井ら（1975）は、散水試験の結果から、裸地や草地よりも林地の浸透能が高い（裸地：79 mm/h、草地：128 mm/h、林地：258 mm/h）ことを示しています。また、海外の研究事例にはなりますが、裸地・農地・森林（針葉樹と広葉樹の人工林）での降水による水と土砂（浮遊土砂）の流出量を調査し、いずれも森林からの流出量の方が小さくなる結果も得られています（Ochiai, 2018）（図 4-1、図 4-2）。

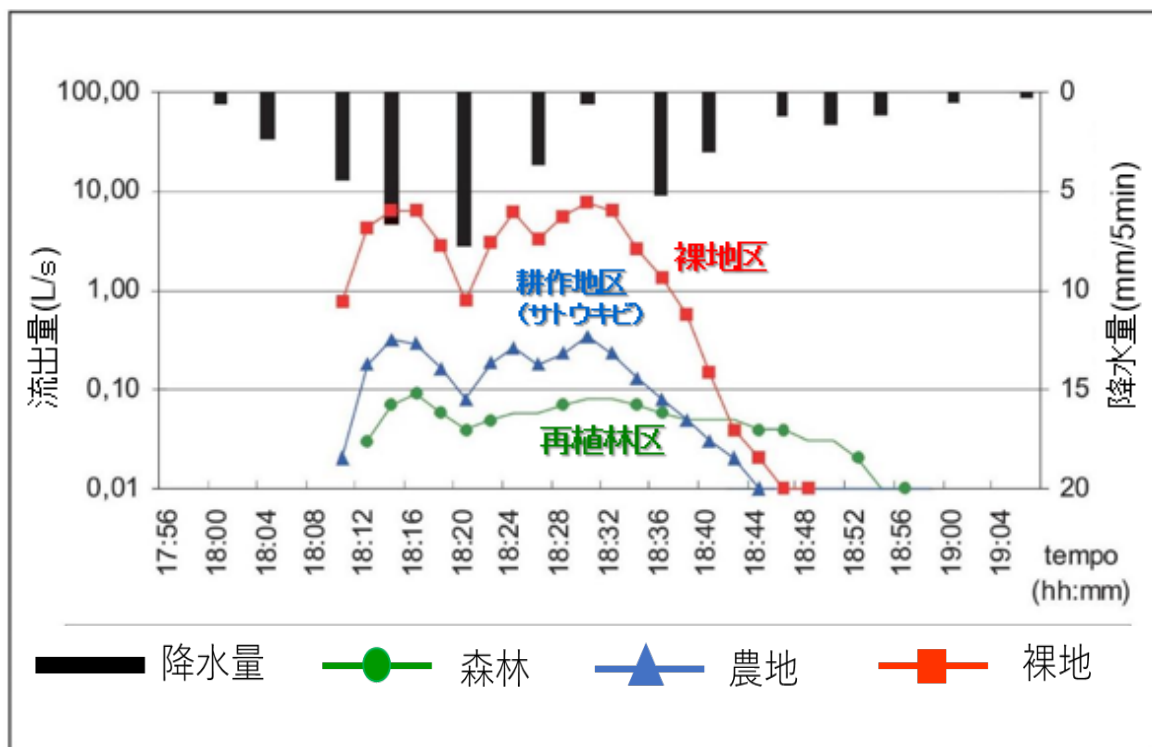


図 4-1 1997年2月17日の降雨イベントにおける降水量と土地利用別流出量の時間変化 (Ochiai, 2018)

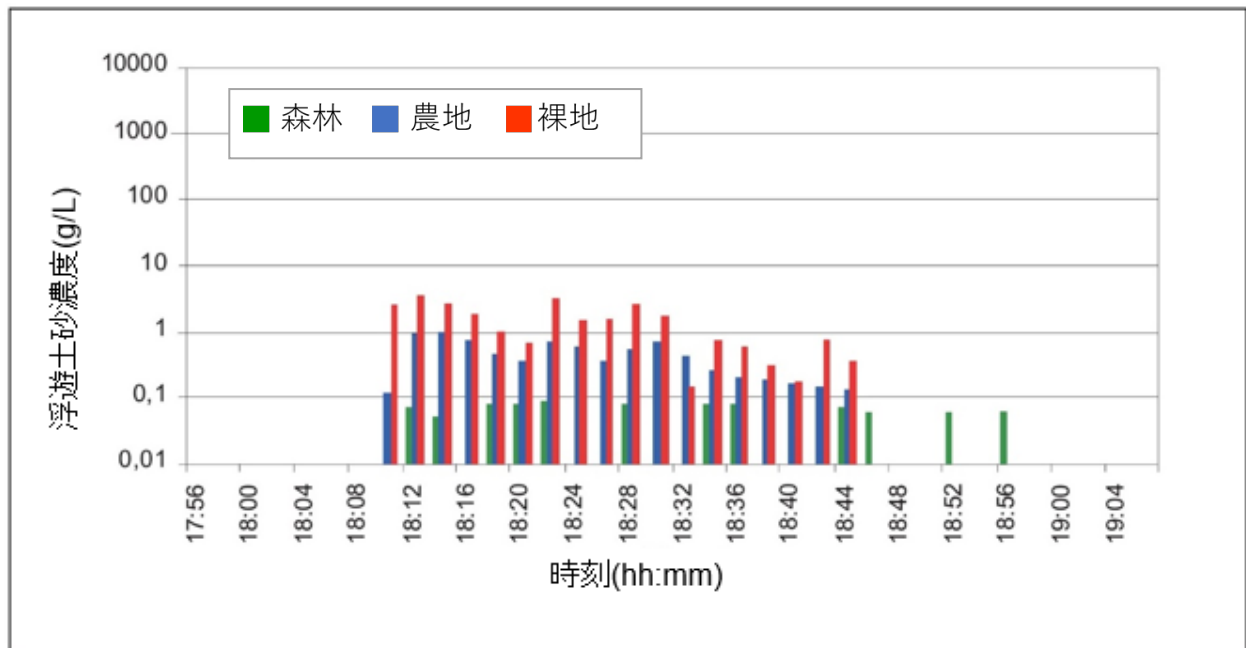


図 4-2 土地利用別の浮遊土砂量の時間変化 (Ochiai, 2018)
 (※降水量の時間変化は図 4-1 と同じ)

さらに、流域における水貯留量を森林と農地の流域で比較した研究事例のレビュー（藤枝、2007）では、「総降雨量 200 mm における流域貯留量は農地流域では 60～80 mm 程度、森林流域では 130～150 mm 程度」と報告されており、森林流域で貯留量が高いことが示されています。

ただし、流域での水の貯留量を考える場合、これらに加えて、土壌の厚さにも留意する必要があります。土壌層自体が薄ければ、浸透能や透水係数が大きくても、浸透して流域で貯留できる水の総量は小さくなります。農地や草地は平坦地や緩傾斜地にあるために土壌層の厚さが急激に薄くなることは少ないものの、かつて裸地化していた急傾斜の森林では土壌層が未発達で薄いことから、浸透能や貯留量が劣ることもあります。たとえば、糸数ら（2004）は、過去に裸地化していた山地流域での調査により、その後の植生の回復状況が異なる 3 流域（森林流域、植生回復流域、裸地流域）での平均土層厚がそれぞれ 94 cm、48 cm、8 cm となっていた結果を示しています。このことから、山地において森林を回復・維持することが、土壌層を発達・維持させ、流域の水貯留としても重要であるといえます。

2 章で紹介したとおり、かつて日本の各地には、森林荒廃により裸地化した山（ハゲ山）が広がっていましたが、これまで森林整備を進めてきたことによりピーク流出量は大きく低減し、災害は減少しました。森林は裸地や草地と比較すると樹冠遮断量や蒸散量が大きく、降雨でもたらさせる水が土壌へ供給される水量は小さくなります。一方で、森林斜面では、表面流による早い流出を低減させること、土壌侵食を抑制して土壌を保持することなどから、水源涵養機能が発揮されます。

4.2. 立木に関する因子

樹木の樹冠による降水の遮断蒸発や、蒸散によって水蒸気として大気中に戻る流れがありますが、これらの量や割合は樹種（針葉樹・広葉樹）や立木密度によって左右されます。さらに、落葉性の樹木では、落葉期と着葉期の季節変化により、樹冠の水の動きに影響を受けます。立木の状態と水の動きの関係を評価するためには、単木レベルでの因子やメカニズムを把握することと林分全体での水の動きを評価することを組み合わせていく必要があります。立木や林分でのパラメータの代表的なものとして、樹冠全ての葉の表面積を樹冠投影面積で除した葉面積指数（LAI： Leaf Area Index）があり、これを用いて遮断蒸発や蒸散の程度などを表現することもできます。

< 樹冠遮断 >

樹冠遮断量と樹種の関係について、村井（1993）は、広葉樹類の樹冠遮断量は針葉樹類より相対的に小さく、落葉広葉樹の場合は落葉期間には常緑樹に比べて遮断量が小さいことを報告しています。一方、太田・服部（2002）のように「広葉樹と針葉樹では著しい違いは認められない」との報告もあります。また、樹冠遮断と降雨量の関係について、Murakami（2006）はヒノキ林での調査から、樹冠遮断量は時間降雨量（降雨強度）が大きいほど大きくなる結果を示しています。この要因として、雨粒は樹冠に当たることで多数の飛沫が発生し、降雨中でもそれらが蒸発しているという、樹冠遮断のメカニズムを提示しています（図 4-3）。しかし、降雨中の樹冠遮断のメカニズムについては、不明な点も多く、今後の研究が期待されます。

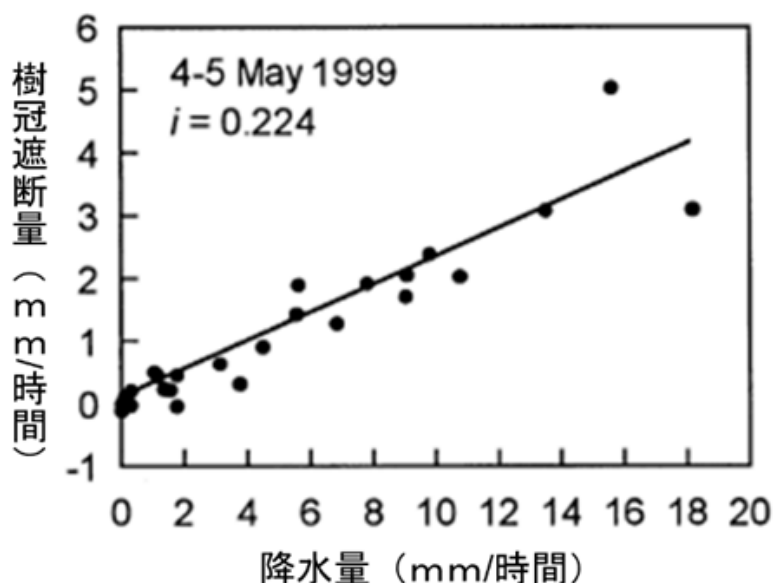


図 4-3 ヒノキ林における時間降雨量と樹冠遮断量の関係（Murakami, 2006）
（※一降雨イベントの降雨総量が 132.6mm の例）

樹冠遮断量は、樹幹流と樹冠通過雨の量を測定し、その量を林外降水量から差し引いて算出します。樹幹流と樹冠通過雨の量の測定には、転倒ます型の流量計を林内に複数設置して観測することが多くあります（図 4-4）。

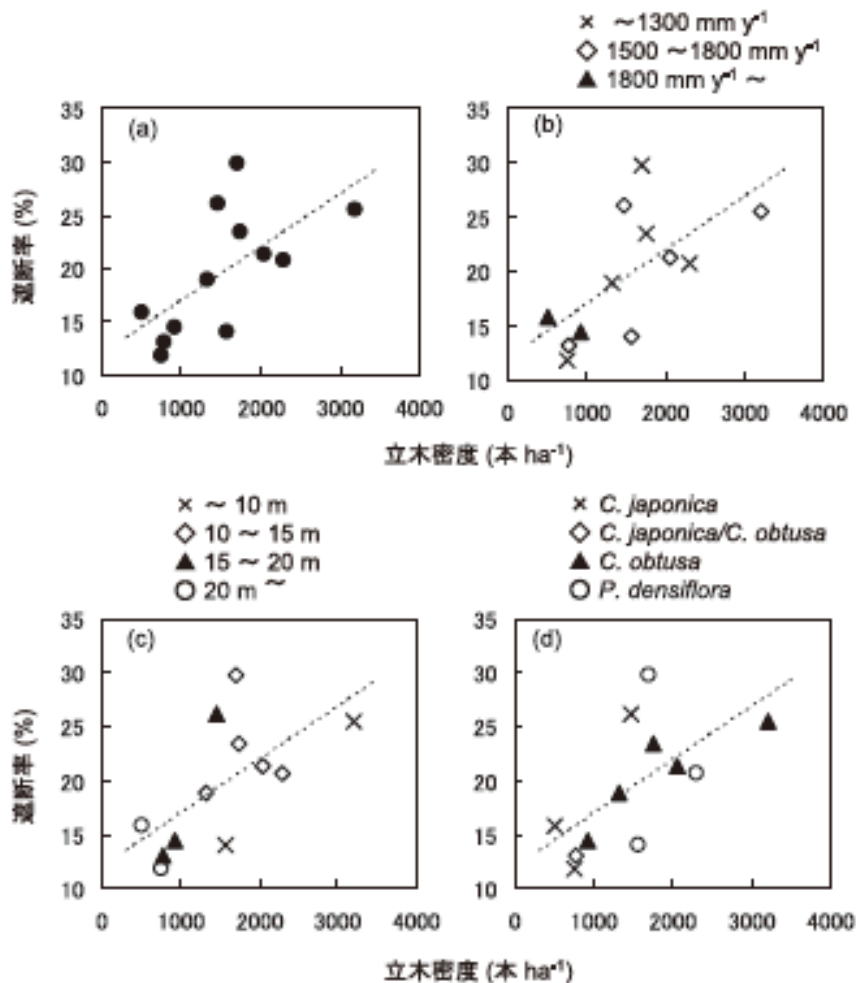


図 4-4 転倒ます型流量計の林内設置イメージ (Iida et al., 2017)

観測例としては、Iida et al. (2017) は、降雨イベント中の降水量と樹冠通過雨量、樹幹流量の変化から、樹冠遮断は樹皮や枝葉に貯留された雨水が降雨イベント終了後に蒸発する現象とも考えられることを報告しました。小松 (2007) は、日本の針葉樹人工林での計測事例から、立木密度と遮断率との間には正の相関が見られた一方で、降水量や樹高、樹種との間には明確な関係は認められなかったことから、立木密度とそれに伴う葉面積指数の変化により樹冠に貯留される水分量が増加し、結果として、樹冠遮断量に影響を及ぼすとの説明をしています（図 4-5）。

樹幹流や林内雨を転倒マスで観測する方法の課題もあります。転倒ます型の流量計に想定を超える水量が流入した場合には、一方のますからの水排出時に他方のますでは受け切れない水が増加します。その結果として樹幹流と樹冠通過雨の量が雨量強度に比例して過小評価され、樹冠遮断量は過大評価となります。Shimizu et al. (2018) は、スギ林で

の実験結果によって、その補正方法を提案しています。



回帰直線は、遮断率 [%] = 0.00498 × (立木密度 [本 ha⁻¹]) + 12.0
 で表現される。(b) 図-1a に同じ。ただし、年降水量で場合分け
 されている。(c) 図-1a に同じ。ただし、樹高で場合分けされてい
 る。(d) 図-1a に同じ。ただし、樹種で場合分けされている。

図 4-5 針葉樹林における立木密度と遮断率の関係（小松、2007）

<蒸発散>

森林状態の違いによる蒸発散量の変化について、小松ら(2005) は、暖候期における森林での蒸発散量（蒸散量と遮断蒸発量）に占める蒸散量の割合に関して、広葉樹林の方が針葉樹林よりも、蒸散が抑制されにくいことを示唆しています。久田ら（2011）は、ヒノキ中心の常緑針葉樹林の流域とミズナラなどの落葉広葉樹林の流域で水文観測を行い、広葉樹林流域に比べて針葉樹林流域の蒸発散量が大きいこと、落葉広葉樹流域に比べて針葉樹流域の遮断蒸発量が大きいこと、を示しています（図 4-6）。また、谷ら（2012）では、長期にわたる植生変化の影響を調査し、「マツ林は広葉樹林よりも、年蒸発散量、冬季の遮断蒸発量、夏季の蒸散量がともに大きいと推察された」と示しました。森林の蒸発

散量は樹種のみならず、立木密度によって変化することが示されており、間伐などの密度管理を行うことにより、蒸発散量は変化します。こうした森林状態の変化については、次章で説明します。

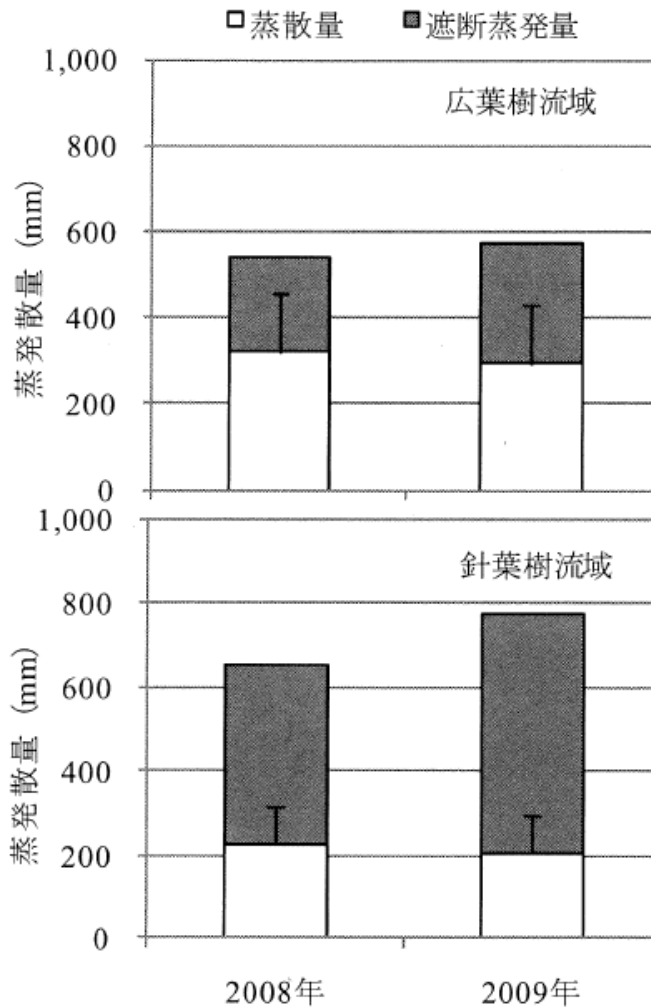


図 4-6 暖候期における広葉樹流域と針葉樹流域の蒸発散量と遮断量の内訳
(久田ら、2011)

4.3. 下層植生・土壌被覆に関する因子

これまで樹木について述べてきましたが、林床に生育する下層植生や低木も遮断・蒸発散を行うことで水循環に影響を及ぼすことが示されています。すなわち、森林の水源涵養機能では、立木のみならず、森林生態系全体として下層植生を含めた視点を持つことが重要です。

4.3.1. 下層植生等による遮断・蒸散

下層植生は木本（低木・灌木）と草本とに分かれますが、いずれも立木（上木）と同様に、葉による降雨遮断や蒸散が行われます。通常、下層植生が水循環に与える影響は、上

木よりも小さなものとなりますが、下層植生が十分に発達していれば、その影響は無視できないものとなります。下層植生による降雨遮断は、邱ら（2020）の研究結果があり、栃木県での 50% の列状間伐実施 6 年後の、38 年生ヒノキ人工林での調査で、下層植生による遮断率は約 2 割となっていることが示されています（下層植生通過雨率が 81%、樹幹流率 1%、遮断率 18%）。また、安部ら（2017）のように、広葉樹林のササ林床植生による降雨遮断の影響を示す研究例もあります。

下層植生による蒸散に関する研究について、北村ら（2000）は、北海道の針広混交林、森林（落葉広葉樹林）の林床ササ群落、開放地のササ群落のそれぞれについて、6～10 月の平均日蒸散量を算出したところ、針広混交林では 2.0 mm/日であったのに対し、林床（落葉広葉樹林内）のササ群落は 0.2 mm/日となり、1 割程度に相当することを示しました。また、上層木がない開放地でのササの平均日蒸散量は 1.5 mm/日に達したことから、林内照度の違いにより下層植生の蒸散量は大きく変化する可能性があります（図 4-7）。

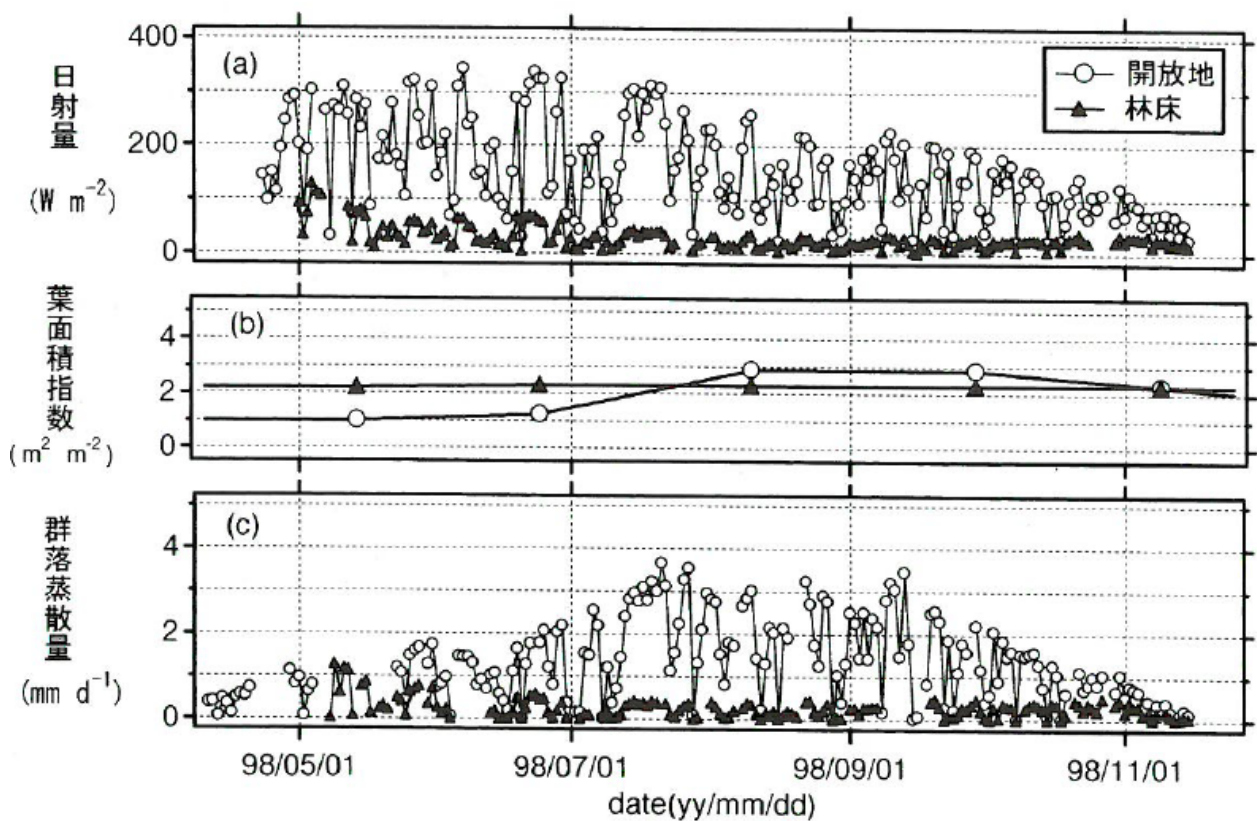


図 4-7 開放地と林床でのササ群落の蒸散量等（北村ら、2000）

さらに、下層植生に加えて、地表面に蓄積されたリターも降雨の遮断や蒸発、貯留に影響を及ぼすことが知られています。佐藤ら（1999）は、スギ人工林でのリター層の蒸発強度に関する実験から、リターが堆積することで、一定期間リター層からの蒸発が継続することを示しました（図 4-8）。

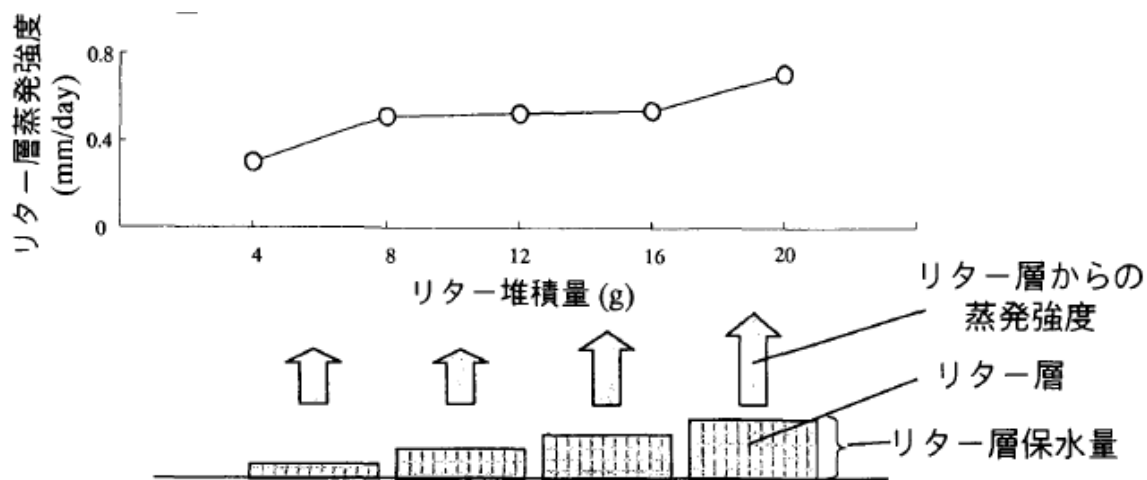


図 4-8 リター層の堆積量（初期保水条件）と蒸発強度の関係（佐藤ら、1999）

4.3.2. 下層植生等が浸透・表面流に与える影響

下層植生や土壌の被覆は、水の土壌浸透や表面流の程度にも影響を与えます。下層植生の発達により、それらの根が土壌中の孔隙を増やし、土壌の透水性や保水性を向上させることや、下層植生があることで土壌が乾燥せずに土壌の撥水性の発現が抑えられ、水の浸透が促進されることなどが考えられます。

<浸透能を向上させる効果>

森林の林床には低木類、シダ類、コケ類などの林床植生が生育し、落葉が堆積するなどして地表面への雨滴衝撃エネルギーは抑えられる効果があります（Miura ら、2003；五味ら、2006）。特に、落葉層はマット状に林床全体に分布することで、面的に土壌表面への雨滴衝撃を抑える効果があります。一方で、湯川ら（1995）は、三重県のヒノキ林において、下層植生が失われた林地での浸透能の低下の原因を調査し、「下層植生が失われた林分は、下層植生の繁茂する林分と比較して浸透能が低く、粗孔隙率が高いという結果を得た。また、林床の裸地化したヒノキ林では、土壌硬度が高く浸透能が低い特徴をもった乾燥した皮膜が観察された。この皮膜は、雨滴衝撃による団粒構造の破壊によってできるクラストであると考えられた」とした。すなわち、下層植生の失われた林地においては粗孔隙率よりクラストの有無が浸透能に影響を与えることが示されています。

恩田（2007）による研究では、異なる下層植生やリターで被覆した人工降雨実験により、雨滴の衝撃エネルギーによって土壌の団粒の破壊が起こり、浸透能の減少が引き起こされていることが示されました。なお、アカマツのリターの場合は、破壊された団粒が表面流によって徐々に流下し、団粒間の窪みを埋める形で堆積するために浸透能が低下すると考えられたことから、「土壌浸食を防ぐために混植を行うときには、混交する樹種と量に気を付けることが必要であろう」としています。すなわち、下層植生を含む林床の被覆が雨滴の衝撃を抑え、土壌の団粒の破壊と土壌表面が固くなることを防ぐことにより、土

壤による水の浸透性が維持されていると考えられます。

浸透能の計測については、平岡ら（2010）の研究事例があります。ヒノキ人工林において、林内雨と同等の雨滴衝撃を与える散水装置（降雨強度 168～340 mm/h）による浸透能試験を行い、土壌の最大最終浸透能（降雨強度を増加させていっても浸透能の上昇がほとんど見られなくなる時の値）が 5～322 mm/h であったとの結果を示しています。また、最大最終浸透能は、下層植生の量（乾重）と非常に高い相関がみられ、落葉（リター）の量も含めた林床被覆乾重との相関も認められました。また、植被率が 50% を下回ると最大最終浸透能は 45 mm/h 以下と低くなり、自然降雨下においてホートン型地表流¹が発生する可能性が高いとしています（図 4-9）。

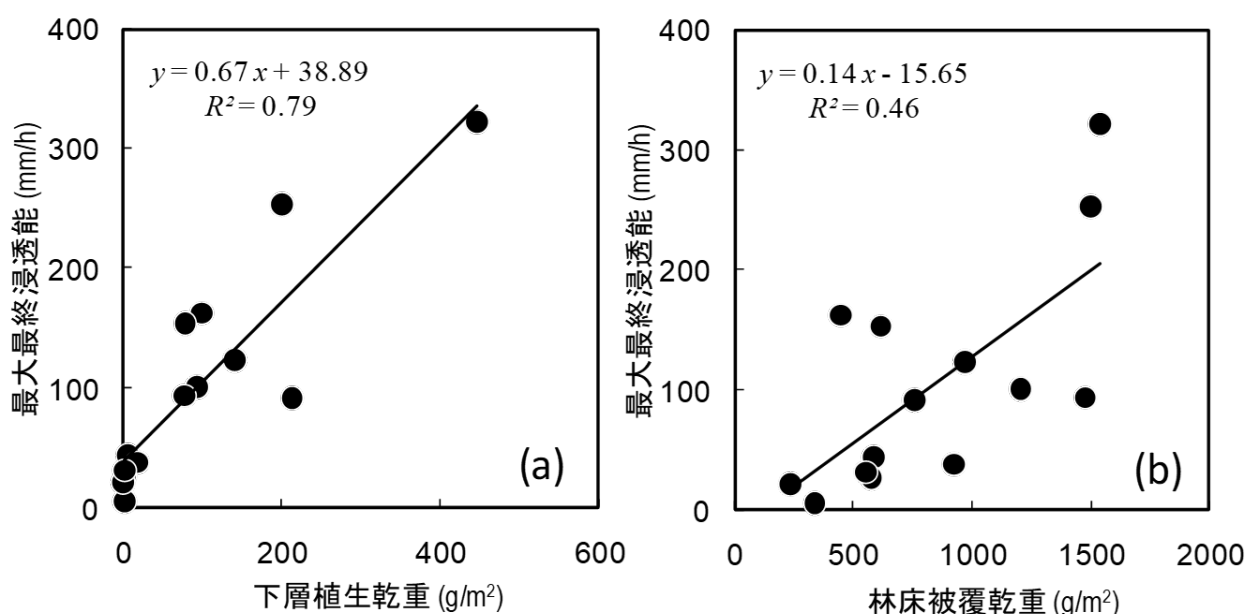


図 4-9 最大最終浸透能と下層植生乾重及び林床被覆乾重（平岡ら、2010）

<表面流や土砂流出を抑える効果>

下層植生や土壌被覆が表面流や土砂流出を抑える効果についても、Gomi et al. (2010) は、三重県の 40 年生のヒノキ中心の林分での調査から、下層植生がわずかな林分では、流域の流出のうち表面流が占める割合は 30% に及び、シダや低木の植生に覆われた林分では、その割合が 1～2% であったことを示しています。海虎 (2012) は、ブナ林での林床合計被覆率と地表流流出率には高い負の相関があるとの調査結果を示し、「リター堆積量が少ない夏季（7～9 月）はリター堆積量が多い春季（4～6 月）や秋季（10～11 月）に比べて地表流流出率が増加することが明らかになった」としています。

土壌侵食や土砂流出に関してみると、石川ら (2007) は、シカの食害によって土壌侵食が進行しているブナ林について、土壌侵食量を測定した結果、「林床植生が衰退して林

¹ ホートン型地表流は浸透能を超える降雨強度で発生する地表流。土壌中の地下水面が上昇して発生するのは「飽和地表流」と呼ばれる。

床植生の被度が低下すると土壌侵食量は急速に増加するとともに、「林床植生が衰退すると浸透率が低下するとともに地表流になる割合も増加する」としています。Mizuno et al. (2021) は、琵琶湖周辺の森林流域の土砂流出調査から、下層植生の被覆率が 60% 以上の森林は 30% 未満の森林と比べて、年間土砂流出率が 97% 減少することを明らかにしました。また、その減少効果は 72 時間の総雨量が 400 mm を超える降雨でも有効になり得ることを示しています。

これらの結果から、下層植生や土壌被覆が浸透能の向上とともに、土砂流出の防止に大きく寄与していることが考えられます。下層植生等の有無やその量は水循環の評価において無視できないものであるとともに、森林管理や施業によって、林床の状態がどのように変化するかを留意する必要があります。

4.4. 土壌・基岩に関する因子

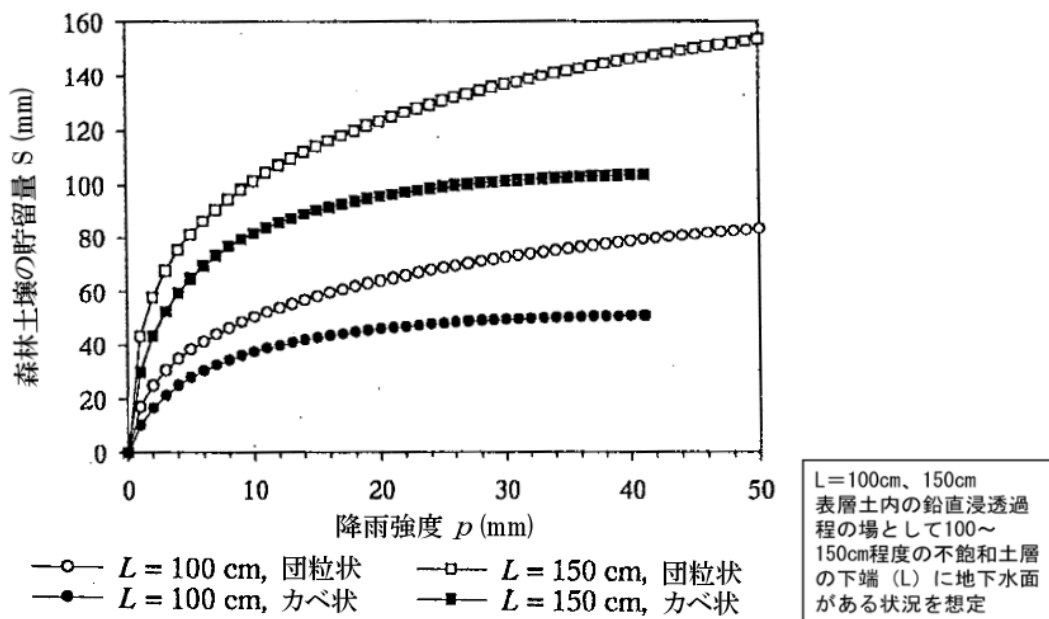
土壌や岩盤などの地下部は、直接観察することにも限界があります。しかし、土壌や根系、基岩に関する因子について、近年多くの知見が集積されており、本節ではそれらの研究を概観します。

4.4.1. 土壌・地質条件

<土壌の透水性・保水性>

森林土壌は、雨水を直接貯留したり、深部への浸透を促進したりする機能を有していますが、こうした土壌の保水性や透水性の発揮には、土壌の団粒構造が寄与しています。服部 (2001) は、土壌中の孔隙と保水性や透水性の関係について、「細かい孔隙は水を強く保持する働きがあるが、水を通しにくい。一方、大きな孔隙は水を通しやすいが保持する能力に欠ける」と説明しています。また、「年間を通じて変化する降水を受け止め、安定的に下流域に流出させるためには、孔隙組成が単調であってはならず、大小様々な孔隙を多くもっている土壌を形成し維持していくことが必要である」とし、孔隙の大きさが多様であることの重要性にも言及しています。

これに関連して、小野 (2014) は信州大学演習林のヒノキ林での土壌の発達に関する調査から、土壌の団粒構造が発達することで、大きな孔隙の量が増え、透水性が高まる結果を示しました。また、有光ら (1995) は、群馬県みなかみ町に位置する宝川理水試験地での調査から、土壌の保水機能では、特に小さな孔隙が影響することを示しました。また、小杉 (1999) も、森林土壌の雨水貯留能に関する研究から、団粒状土壌はカベ状土壌 (緊密な土壌) よりも「降雨中により多くの雨水を土層内に貯留し、降雨終了後に徐々に流出させることで、ハイドログラフをより緩やかにする」ことを示しています (図 4-10)。



(S : 降雨波形と流出波形の差の時間積分値で、降雨後の水流出の遅れを表す)

図 4-10 団粒状構造 (Crumb) とカベ状 (Massive) の森林土壌の貯留量指標 S の関係 (小杉、1999 の図-6 を一部加工)

さらに、藤枝 (2001) は、北海道から沖縄までの森林流域の流出観測の結果から、保水容量を評価しところ、「森林流域では通常の総降雨量をほぼ貯留できる容量の孔隙が存在するものと考えられる」とし、「下層植生が繁茂し、 A_0 層が発達した健全な森林生態系ほど表層土壌の保水容量が多くなり、水源かん養機能が高い」と示した。このことから森林土壌の保水性の高さや下層植生等の重要性がうかがえます (表 4-1)。

表 4-1 森林流域の最大の水保留量（藤枝、2001）

流域名	流域面積 (km ²)	最大保留量 (mm)	流域地質	森林状態
常陸太田(茨城県)	0.157	79.0(±6.9)	堆積岩	スギ・ヒノキ
筑波(茨城県)	0.037	191.0(±14.6)	片麻岩	スギ・ヒノキ
岡山・北谷	0.173	58.5(±6.1)	堆積岩・粗面岩	アカマツ
岡山・南谷	0.226	71.0(±7.7)	堆積岩	アカマツ
南明治山(沖縄県)	0.248	179.5(±9.2)	堆積岩	常緑広葉樹
辺土名(沖縄県)	0.406	156.1(±10.1)	堆積岩	常緑広葉樹
道志ダム(神奈川県)	11.25	253.0(±27.8)	堆積岩・火山灰	スギ・広葉樹
吉野上多古(奈良県)	23.2	194(±39.6)	堆積岩	スギ・広葉樹
布引ダム(兵庫県)	9.22	184.6(±23.8)	花崗岩類	スギ・広葉樹
クーニャA(ブラジル)	0.56	184.1(±12.0)	片麻岩	亜熱帯林
クーニャB(ブラジル)	0.37	161.8(±15.0)	片麻岩	亜熱帯林

それでは、大雨の時の状況を見てみます。大雨時に斜面に大量の雨水を貯め込むことは、斜面を不安定にし、斜面崩壊の危険性を高めることとなりますが、森林土壌中では、水を素早く排水させる構造もあり、これにより土壌の安定を保っています。この構造は、土壌中での樹木の根の発達や、根の枯死・腐朽、小動物や昆虫が穴を空ける孔（隙間）などによって、パイプと呼ばれる連続した大孔隙から成る「水みち構造」の形成が、土壌中を選択的に流れる選択流を形成します。谷（2017）は、「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」と説明しており、「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」と、土壌中の水みち構造の効果を示しています。

<土壌の厚さの影響>

土層の厚さや深さも、水の動きに影響を与えます。小林ら（1994）は、斜面の位置による透水性等の違いについて、「土層の厚い谷頭部では、深度 100 cmにおいても粗孔隙が多く、湿潤時の透水係数が大きかった。そのため雨水は深度 3 mの基盤面付近まで速やかに鉛直浸透し、基盤面付近に達した後、側方流となって斜面下方へ緩やかに排水されると考えられる」と述べています。また、上杉ら（1999）は、高知県の吉野川源流域で行った調査から、「土壌深度の浅いところで保水容量が小さく、土壌深度の深いところで保水容量が大きい」との結果を示しました。これらの結果から、土層が厚いほど、透水性や保

水性の効果が高まることが示唆されています。これらに関連する研究として、Ohnuki et al. (1999)が茨城県の筑波流域試験地での堆積土・崩積土を対象として行った調査があります。この研究では2つの流域を比較し、土壌が厚い流域では、個々の降雨が流出量に与える影響は比較的小さい一方で、基底流量（河川への流出量）は比較的大きく安定した流量を維持していることから、厚い土壌層が直接流出に対する緩衝（バッファー）として機能していることを示しました。

<地質の影響>

土壌は主にその場所に存在している岩石が風化したものから成っており、風化の程度の差によって不均質性が生じます。また、地域によって基岩（母材）が異なるため、土質（地質）や土壌の特性も変わります。この地質も水の貯留・流出に影響を与えます。虫明ら（1991）は、「地下水流出が支配的と考えられる平水以下の流量については、地質要因の規定力が卓越し、第四紀火山岩類、花崗岩類、第三紀火山岩類、中生層・古生層の順に流量値が小さくなることが明らかとなった。すなわち、上記地質区分に対応して、流域の地下水貯留能ならびに流出調節機能に有意な相違があるものと考えられる。」として、地質の影響を評価しました。また、同様に年最大流量についても、「年最大流量に着目すると、第四紀火山岩類流域が際立って小さく、花崗岩類、第三紀火山岩類、中生層、古生層の順にかなり明白な差を示しながら大きくなる。これは、平水量以下で認められたのちちょうど逆の傾向であり、浸透性の高い流域ほど洪水流出量が小さい」とされています。このような流域比較研究から地質の違いによる流出量の違いが示されています。

さらに、真板ら（2008）は、東京大学千葉演習林での皆伐試験の結果から、低水期（流量が少ない期間）ほど、地質の方が植生よりも流況曲線に大きな影響を与えているとの結果を示しています。また、谷（2016）は、流況が安定した地質を持つ山地では、「基岩の内部に深層風化などで十分な量の間隙が含まれていて、その上部の土壌からの浸透水を受け入れて貯留し、無降雨期間が続いても基底流が減少しにくいのだと考えられる」と説明しています。このように、地質により土壌の性質や岩盤の構造が異なり、水流出特性や貯留量が変わる研究結果が示されています。このことから、森林の水源涵養機能を考えるときには、山そのものの地質構造を知ることも重要であると考えられます。以上の結果が示すように、土壌を維持することが森林の水源涵養機能の発揮の上で重要と考えられますが、土質や土層の厚さ、団粒構造の発達具合などの土壌条件やその物理性、地形や勾配による土壌の浸透能（飽和・不飽和透水係数）や保水性などの変化により、流域の貯留量は変わることを考慮する必要があります。また、土壌の中での水の動きに関しては、その不均質性により、パイプ流などの選択流と呼ばれる複雑な流れが発生しています。土壌中水の動きは、複雑であり、まだ未解明の部分も多く、詳細な分析を行うことが難しい面があることに留意が必要です。

4.4.2. 樹木根系の影響

樹木の根系は、地下に向かって伸びる鉛直根と、比較的地上に近い層で広がる水平根とに大別されます。根系は斜面崩壊や土壌流出を防止・軽減することに加えて、根系の広が

りや発達度合いが土壌の浸透能や地下での水の動態に及ぼす影響も大きいと考えられています。平松ら（2002）は、愛媛県のスギ林斜面で人工降雨実験を行い、根系（活性根と腐朽根）周辺からの流出の方がマトリックス部（根系のない通常の土壌）からの流出よりも早期かつ多量だった結果などから、「降雨時には、根系部周辺に雨水が集中し、この根系部周辺への雨水の集中は散水強度の増加とともに助長される」こと、また、樹木根系は降雨時に雨水の選択的な経路として働き、森林内における雨水の挙動に大きな影響を及ぼしていることが明らかになった」と示しています。また、佐伯ら（2003）による疑似根系を用いた浸透実験では、根系により土壌への浸透（土壌下層部への流出）時間が早まり、浸透量も増加させる結果が得られ、樹木根系が「土層内での雨水の挙動に多大な影響を及ぼすことが明らかになった」と説明しています（図 4-11）。

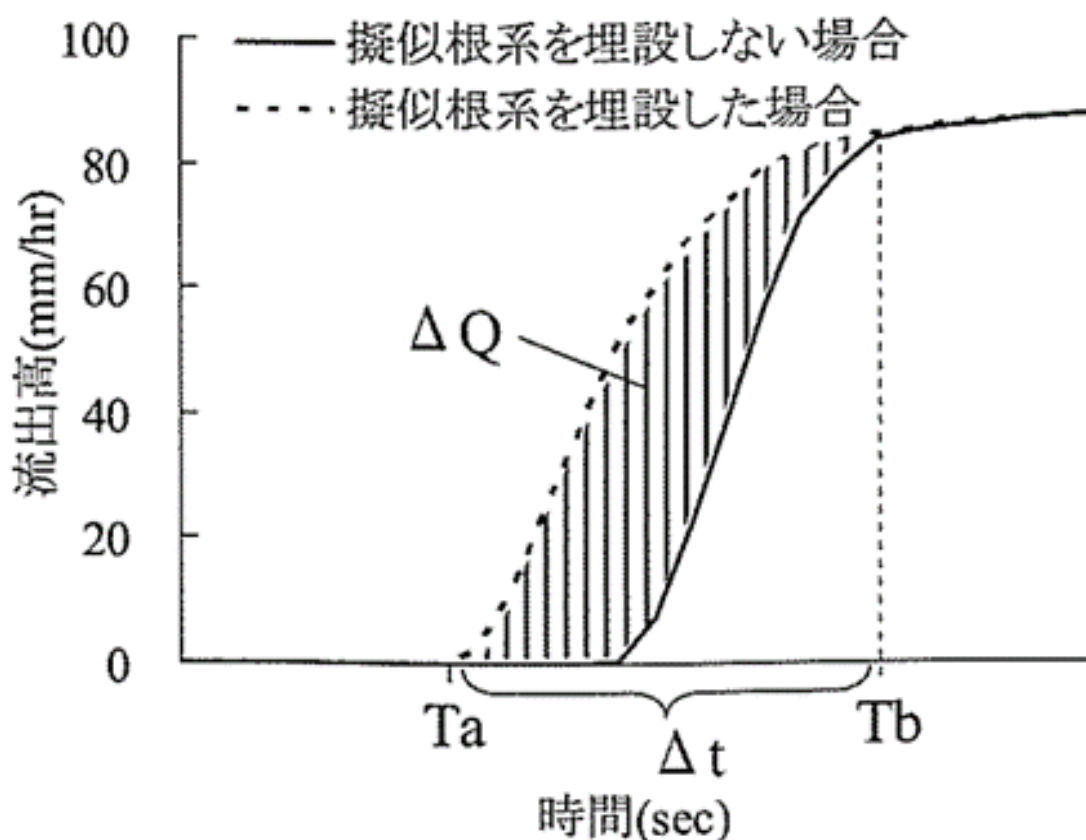


図 4-11 根系の存在による地下水流出（下層への浸透）状況の変化（佐伯ら、2003）

さらに、根系自体が水を吸収することも、土壌の保水性に影響を与えます。小林ら（2000）は、茨城県筑波台地のヒノキ林での調査から、根系が吸水することで土壌が乾燥し、土壌下層への水の浸透量が小さくなる結果を示しています。このことから、樹木の蒸散の働きによって土壌中の水が根系から吸水され、土壌の状態や土壌中の水の動きを変化させることが分かります。このように、近年の研究結果から、根系の構造や広がりによって土壌への水の浸透が促進され、また、根系自体の働きも森林での水循環に影響を及ぼす

ものと考えられます。

4.4.3. 基岩への浸透

土壌の下層にある基岩層の働きも、水源涵養機能の評価に当たり無視できないほど大きいことが近年の研究で示唆されています。小杉（2007）は、風化花崗岩を母材とする森林小流域（大・中・小の入れ子状の3流域）の調査から、大・中流域では無降雨時でも基底流出が継続していたのに対し、小流域では降雨後に速やかに基底流出が減衰・停止したこと、また、年間総雨量との比較において、小流域の流出割合が大・中流域より小さかったことから、小流域では降雨の49%以上が基岩に浸透し、「山地河川の基底流は基岩からの流出により維持されていること」を明らかにしています。さらに、土層厚や降雨強度を変化させて流出量への影響を評価したシミュレーション結果から、「基岩からの流出が無降雨時の渓流水の直接の涵養源となっているのに対して、土層は降雨を一時的に貯留して波形を緩やかに変換した上で系外に放出するバッファの役割を果たしている」としており、土層と基岩のそれぞれの働きにより、洪水の流出を緩和することや流域の水貯留の機能が得られていることを示しています（図4-12）。

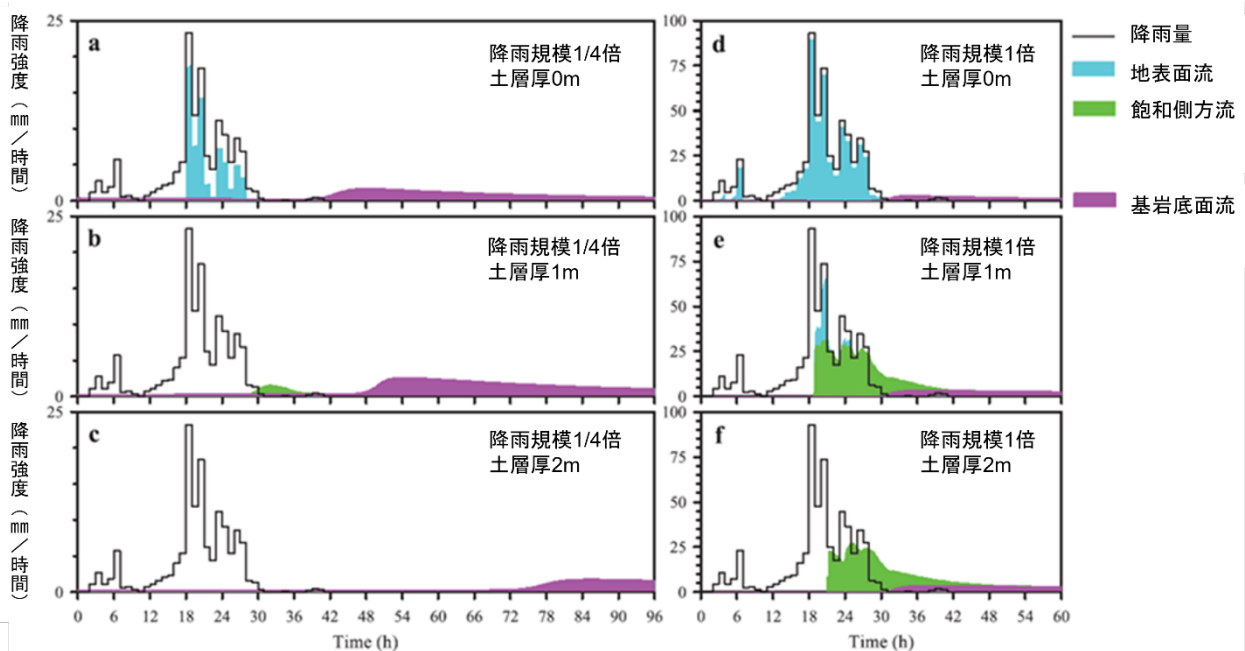


図 4-12 土層厚・降雨強度を変化させた場合の流出量（表面流、側方流、基底流）の時間変化（小杉、2007）

さらに、金澤ら（2021）は、堆積岩から形成された地質をもつ滋賀県甲賀市の信楽川流域における地下水と河道の湧水の水質調査を行い、「源頭部の湧水は溪流直上流の斜面の地下水の影響が大きいのに対して、河道部の湧水は河道を下るにつれて側方の斜面の地下水の影響が大きくなる」ことや、同一地点での基岩内にも深さが異なる複数の帯水層があ

るとの結果を踏まえて、「降水による水分供給により土層から基岩に浸透した地下水は、基岩の割れ目などの破碎や風化の進行した透水性の高い部分を水みちとして選択し、基岩内を分岐あるいは合流しながら流動することで、それぞれの湧水点に湧出するものと考えられる」としています。また、小杉（2012）も、山体地下水の涵養・流動に関する水文プロセス等に関する研究を行い、「中生代層の堆積岩を地質とする流域の場合、同地点の複数の深度に、独立した地下水帯が存在することが判明し、階層的な地下水分布構造を把握する必要があるとの結論に至った」とし、「また花崗岩を地質とする流域では、山体地下水の水位上昇が降雨イベントに対してかなり遅れることが明らかとなり、不飽和基岩層内の雨水貯留量が多い」と示しました。

これらの研究結果から、基岩内では水みちによって水の流れは複雑になっているとともに、基岩に浸透した水は通常の地下水流よりも移動速度が小さく、また、基岩内には水を貯留する複数の帯水層があることで、基岩も流量の安定化に寄与しています。このため、森林での水循環を考える上では、基岩の上部にある土壌による雨水の浸透・保持に加えて、基岩を含めた貯留・流出を考えることで、降雨時のみならず長期的な水の貯留や流出を検討・評価することが可能となります。以上のように、地下部が水源涵養機能に及ぼす影響は非常に大きい一方で、地下部は地上部に比べて調査が難しいことから、メカニズムの解明に向けた更なる研究の進展が望まれます。

■ 出典

4. 水源涵養機能に関する因子

4.1. 土地利用形態に関する因子

村井宏・岩崎勇作（1975）林地の水および土壌保全機能に関する研究（第1報）－森林状態の差異が地表流下、浸透および侵食に及ぼす影響－. 林業試験場研究報告, 274, 23-84.

Ochiai, H. (2018) Efforts of Brazil to prevent sediment runoff from mountains (山地からの土砂流出の防止 (ブラジルの取組から)). 平成 30 年 11 月 9 日独立行政法人国際協力機構主催国際セミナー「ミャンマー国・インレー湖における湖沼と集水域の管理をいかに目指すか?」発表資料, 33pp.

藤枝基久（2007）森林流域の保水容量と流域貯留量. 森林総研研究報告, 403, 101-110.

糸数哲・太田岳史・恩田裕一・井上淳（2004）植生の自然回復流域における降雨流出特性, 第 115 回日本林学会大会抄録 (Web 版

https://www.jstage.jst.go.jp/article/jfs/115/0/115_0_B29/_article/-char/ja/).

4.2. 立木に関する因子

村井宏（1993）広葉樹林地、針葉樹林地および草生地の水文特性の比較. 水利科学, 271, 1-40.

太田猛彦・服部重昭（2002）地球環境時代の水と森－どうまもり・はぐくめばいいのか, 日本林業調査会, 222.

Murakami, S. (2006) A proposal for a new forest canopy interception mechanism: Splash droplet evaporation. *Journal of Hydrology*, 319, 72-82.

Iida, S., Levia, D. F., Shimizu, A., Shimizu, T., Tamai, K., Nobuhiro, T., Kabeya, N., Noguchi, S., Sawano, S., and Araki, M. (2017) Intrastorm scale rainfall interception dynamics in a mature coniferous forest stand. *Journal of Hydrology*, 548, 770-783.

小松光 (2007) 日本の針葉樹人工林における立木密度と遮断率の関係. *日本森林学会*, 89(3), 217-220.

Shimizu T., Kobayashi M., Iida S., Levia D. F. (2018) A generalized correction equation for large tipping-bucket flow meters for use in hydrological applications. *Journal of Hydrology*, 563, 1051-1056.

小松光 (2005) 森林の特性と蒸発散量の関係. *日本森林学会誌*, 87(2), 170-185.

久田重太・千家正照・伊藤健吾・丸山利輔 (2011) 落葉広葉樹林流域と常緑針葉樹林流域における水収支特性の比較. *農業農村工学会論文集*, 271, 1-7.

谷誠・細田育広 (2012) 長期にわたる森林放置と植生変化が年蒸発散量に及ぼす影響. *水文・水資源学会誌*, 25(2), 71-88.

4.3. 下層植生・土壌被覆に関する因子

4.3.1. 下層植生等による遮断・蒸散

邱滇璋・五味高志・恩田裕一 (2020) ヒノキ人工林の50%列状間伐6年後の下層植生遮断が水循環に及ぼす影響, 第131回日本森林学会大会学術講演集原稿抄録

安部豊・五味高志・中村規尚 (2017) 里山広葉樹-ササ群落における下層植生(アズマネザサ)による遮断の特徴: ササ稈流の考慮, 第128回日本森林学会大会学術講演集原稿抄録

北村兼三・中井裕一郎・坂本知己・寺嶋智巳・白井知樹 (2000) 開放地と林床のクマイザサ群落の蒸散量, *森林総合研究所北海道支所研究レポート*, 55, 1-4.

佐藤嘉展・熊谷朝臣・小川滋 (1999) リター層による雨水遮断と土壌蒸発抑制. *日本林学会誌*, 81(3), 250-253.

4.3.2. 下層植生等が浸透・表面流に与える影響

Miura, S., Yoshinag, S., Yamada, T. (2003) Protective effect of floor cover against soil erosion on steep slopes forested with *Chamaecyparis obtusa* (hinoki) and other species. *Journal of Forest Research*, 8, 27-35.

五味高志 (2006) II章 土壌侵食と森林-森林斜面から流域の視点へー. *森林科学*, 47, 10-14.

湯川典子・恩田雄一 (1995) ヒノキ林地において下層植生が土壌の浸透能に及ぼす影響 (I) 散水型浸透計による野外実験. *日本林学会誌*, 77(3), 224-231.

恩田裕一 (2007) 第3章 人工林の荒廃と地表面流発生メカニズム、*森林水文学編集委員会 (編) 森林水文学-森林の水のゆくえを科学する*, 森北出版, 65-81.

平岡真合乃・恩田裕一・加藤弘亮・水垣滋・五味高志・南光一樹 (2010) ヒノキ人工林における浸透能に対する下層植生の影響. *日本森林学会誌*, 92(3), 145-150.

Gomi, T., Asano, Y., Uchida, T., Onda, Y., Sidle, R. C., Miyata, S., Kosugi, K., Mizugaki, S., Fukuyama, T., and Fukushima, T. (2010) Evaluation of storm runoff pathway in steep nested catchments draining a Japanese cypress forest in central Japan: A hydrometric, geochemical, and isotopic approaches. *Journal of*

Hydrological Processes, 24(5), 550-566.

海虎・石川芳治・白木克繁・若原妙子・畢力格図・内山佳美 (2012) ブナ林における林床合計被覆率の変化が地表流出率に与える影響. 日本森林学会誌, 94(4), 167-174.

石川芳治・白木克繁・戸田浩人・若原妙子・宮貴大・片岡史子・中田亘・鈴木雅一・内山佳美 (2007) IV 堂平地区における林床植生衰退地での土壌浸食と浸透の実態. 丹沢大山総合調査学術報告書 (2007), 445-458.

Mizuno, T., Kojima, N., and Asano, S. (2021) The risk reduction effect of sediment production rate by understory coverage rate in granite area mountain forest. Scientific Reports, 11, 14415.

4.4. 土壌・基岩に関する因子

4.4.1. 土壌・地質条件

服部重昭・志水俊夫・荒木誠・小杉賢一郎・竹内郁雄 (2001) 森林の水源かん養機能に関する研究の現状と機能の維持・向上のための森林整備のあり方 (I) - 渇水地域上流森林整備指針策定調査報告 - . 水利科学, 45(3), 1-40.

小野裕 (2014) 森林伐採後の団粒破壊に伴う土壌物理性変化に関する研究. 信州大学博士論文 (乙第14号) (Web版)

https://soair.repo.nii.ac.jp/?action=repository_action_common_download&item_id=11670&item_no=1&attribute_id=72&file_no=3, 1-104.

有光一登・荒木誠・宮川清・小林繁男・加藤正樹 (1995) 宝川森林理水試験地における土壌孔隙量をもとにした保水容量の推定: 初沢小試験流域1号沢および2号沢の比較. 森林立地学会誌森林立地, 37(2), 49-58.

小杉賢一郎 (1999) 森林土壌の雨水貯留能を評価するための新たな指標の検討. 日本林学会誌, 81(3), 226-235.

藤枝基久 (2001) 森林の水源かん養機能とその評価. 林業技術, 711, 12-17.

谷誠 (2017) 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誌), 55, 41-50.

小林政広・加藤正樹・小野寺真一・荒木誠・松浦陽次郎 (1994) 林地土壌の保水・排水特性の斜面位置による違い. 森林総合研究所平成6年度研究成果選集 (Web版)

<https://www.ffpri.affrc.go.jp/pubs/seikasenshu/1994/p02.html>.

上杉大輔・西村武二・有光一登 (1999) 吉野川源流域森林土壌の貯水能の評価. 高知大学演習林報告, 26, 25-89.

Ohnuki Y., Yoshinaga, and S., Noguchi, S. (1999) Distribution and Physical Properties of Colluvium and Saprolite in Unchannelized Valleys in Tsukuba Experimental Basin, Japan. Journal of Forest Research, 4 (3), 207-215.

虫明功臣・高橋裕・安藤義久 (1981) 日本の山地河川の流況に及ぼす流域の地質の効果. Effect of Basin Geology on River-flow Regime in Mountainous Areas of Japan. 土木学会論文報告集, 309, 51-62.

真板英一・鈴木雅一 (2008) 森林植生の伐採が山地小流域の劉教曲線に与える影響 - 流況の流域間変動に対する植生要因の大きさの検討 - . 日本森林学会誌, 90(1), 36-45.

谷誠（2016）水と土と森の科学，京都大学学術出版会，76pp.

4.4.2. 樹木根系の影響

平松晋也・熊沢至朗（2002）樹木根系の存在が森林土壌中の水分移動に与える影響．砂防学会誌，55(4)，12-22.

佐伯響一・平松晋也（2003）雨水の鉛直浸透過程に及ぼす樹木根茎の影響に関する実験的研究．信州大学農学部紀要，45(1-2)，11-20.

小林政広・小野寺真一・加藤正樹（2000）樹木の存在が林地土壌中の水分動態に与える影響．日本林学会誌，82(3)，287-294.

4.4.3. 基岩への浸透

小杉賢一朗（2007）森林の水源涵養機能に土層と透水性基岩が果たす役割の評価．水文・水資源学会誌，20(3)，201-213.

金澤瑛・正岡直也・小杉賢一朗・勝山正則・中谷洋明（2021）山地源流域における湧水の涵養域の推定，水文・水資源学会誌，34(2)，100-114.

小杉賢一朗（2012）良質で安全な水の持続的な供給を実現するための山体地下水資源開発技術の構築．戦略的創造研究推進事業 CREST「持続可能な水利用を実現する革新的な技術とシステム」平成24年度実績報告，国立研究開発法人科学技術振興機構（Web版

https://www.jst.go.jp/kisoken/crest/research/nenpou/h24/16_kosugi.pdf）. 1-7.

5. 森林状態の変化が水循環に及ぼす影響

本章では、森林の状態の変化が水循環に与える影響について説明します。森林域で生じる自然攪乱や森林の管理・成長に伴う森林状態の変化によっても、森林内での水の配分は変化し、水源涵養機能の発揮の程度に影響する可能性があります。このため、森林の状態が変化することに伴う樹冠から土壌や岩盤を含めた水文プロセスを把握するとともに、その定量的な評価が必要になります。

5.1. 自然攪乱による影響

森林の状態に影響を与える外部要因としては、自然現象による攪乱と人為的な攪乱とがありますが、まずは前者の自然現象として、風倒、山火事、獣害、病虫害などによる影響について見ていきます。細田ら（2006）は、台風で約 5 ha（対象区域の 22%）の風倒害が発生したヒノキ林（岡山県の竜ノ口山森林理水試験地）での調査から、森林の消失により水流出が 1.21 倍増加したとの結果を得ています。また、福芳ら（2011）は、広島県におけるスギ・ヒノキ人工林での調査から、流域面積の 23%の風倒害や伐採本数率 50%の択伐により、「夏季の流出量は、森林の変化 1 年後で変化前の 1.43 倍に、変化 6 年後～10 年後には 1.11 倍に増加した」と報告しています（図 5-1）。

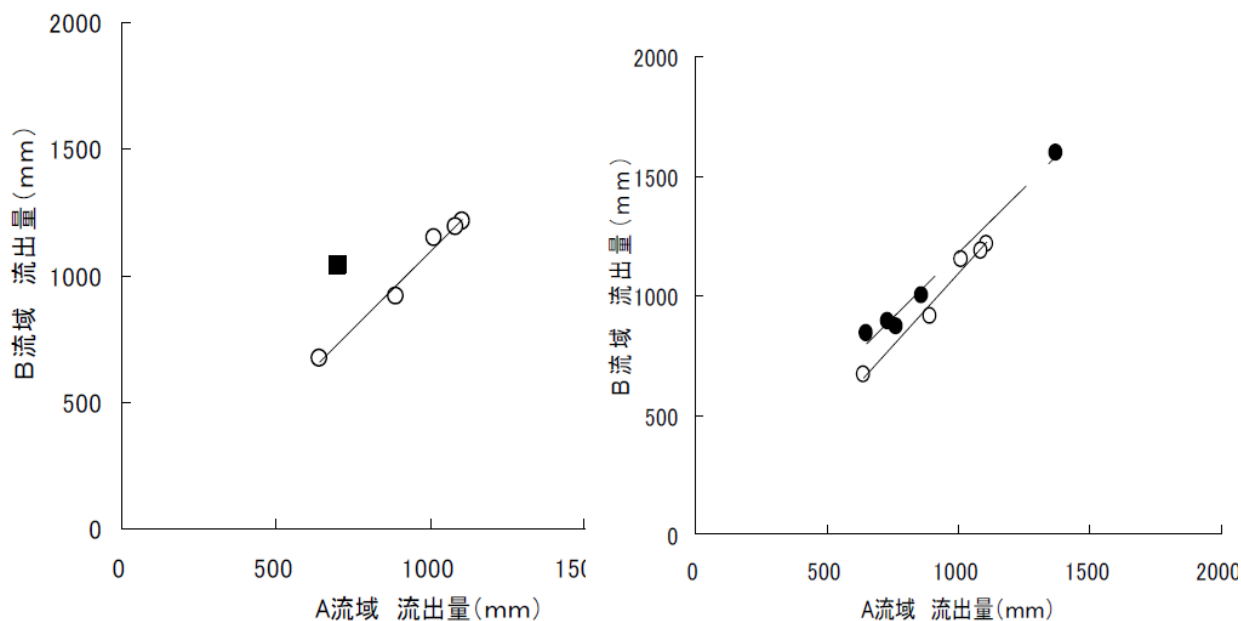


図 5-1 A 流域（对照区）と B 流域（風倒被害区）の夏季流出量の関係（福芳ら、2011）

○：森林の変化前（1986～1990 年） ■：森林の変化 1 年後（1992 年）

●：森林の変化後 II 期（1997～2001 年）

山火事による影響については、芳賀ら（2002）が広島県のアカマツが優占する森林で調査を行い、山火事発生時の昭和 62（1987）年から植生が回復した平成元（1989）年までの

期間において、対照流域の日流出量が1.0mm未満の日の山火事跡流域の流出量は、対照流域より最大で2mm程度多くなったとの結果が得られています。これらの結果から、台風や山火事の発生により、森林の一部が失われ、流域全体としての立木密度が減少することで、水流出が増加すると考えられます。

また、獣害や病虫害によっても、森林の状態は変化します。石川ら（2007）は、シカ食害により林床植生が衰退している丹沢堂平地区のブナ林において、食害が土壌浸食や水流出に与えた影響を調査し、「林床植生およびリター堆積量が減少すると浸透量、透水係数は減少し、特に大きな降雨時には地表流になる割合（流出率）が増加することがわかった」としています（図 5-2）。

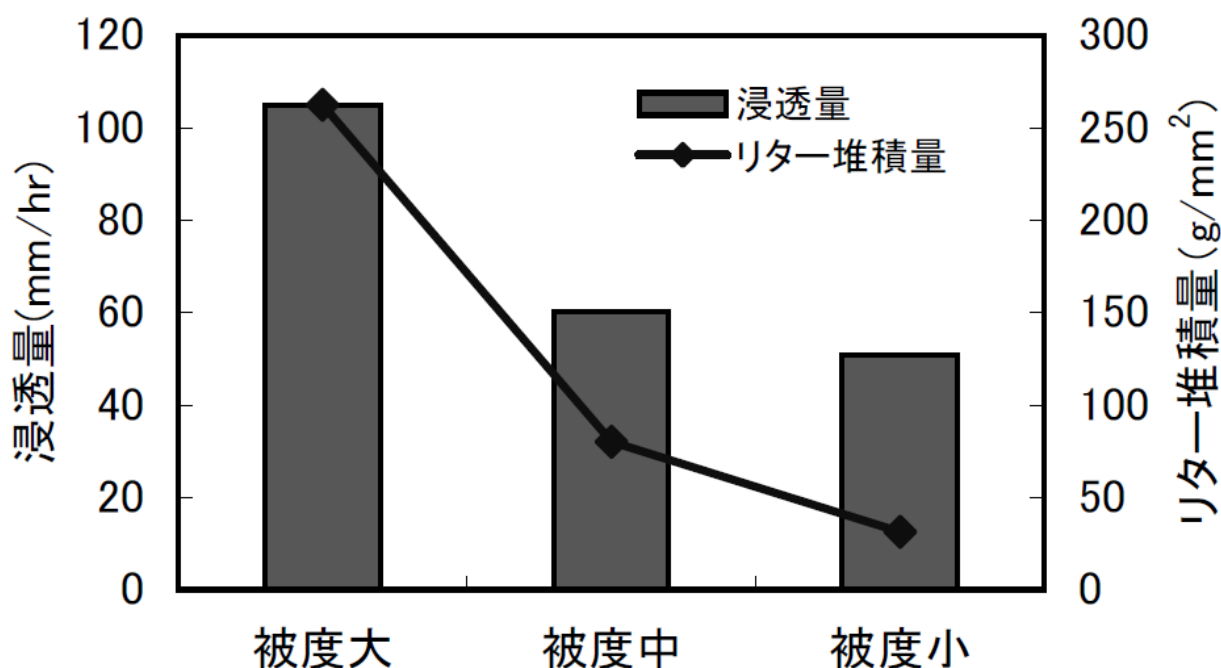


図 5-2 リター堆積量と観測時最大浸透量の関係（石川ら、2007）

病虫害による影響に関しては、阿部ら（1985）は、岡山市の森林総合研究所竜の口試験地において、クロマツ人工林での松くい虫被害が流出に及ぼす影響の調査を行い、「年流出量は約110mm増加した。基底流出量は、冬季が1.5倍に、夏季が2.0倍に、年間を平均すると1.7倍に増加した」との結果を示し、その原因として、松枯れによって上層木の樹冠遮断や蒸発散量がほとんどなくなったことを挙げています。マツ枯れは、渓流水質に影響を及ぼしており、Hobara et al. (2001)は、流域の25%でマツ枯れの影響を受けた滋賀県の流域での、硝酸体窒素イオン濃度の上昇を報告しています。

また、玉井ら（2004）は、岡山県竜の口試験流域において、林野火災とマツ枯れによる森林の攪乱による影響を推定するために、森林が健全であった期間の「回帰直線から算出される日流出量計算値」を、森林衰退期（攪乱後）の日流出量観測値と比較した結果、

「ごく一部を除いて、ほぼ全ての日において日流出量観測値の方が大きかった。この増加割合は、1～40日目で約15%、140～320日目で約35%、320日目以上で約43%と、日数が大きいときほど大きかった」としています。このように、自然攪乱により上層木や林床植生等の被覆状態が変化することで、水の流出量や水質も影響を及ぼします。森林の消失や衰退・劣化は、水循環に負の影響を与えることが多いため、この影響を回避・低減させるためにも風害・獣害等を防止・軽減することが重要です。なお、著しい降雨現象や地震など、通常の方策では対応が困難なものについては説明を省きましたが、これらも水循環に大きな影響を及ぼし得ることに留意ください。

5.2. 森林施業による影響

次に、森林施業や森林の成長が水循環に与える影響について説明します。特に、間伐・主伐による立木密度や下層植生の変化、施業方法等も、水や土砂の流出に影響を与え得るものになります。このため、伐採方法の工夫などで水収支を調節する観点の研究もあります。

5.2.1. 間伐・主伐による影響（短期的影響）

<間伐・主伐による影響>

間伐が蒸発散量に及ぼす影響に関しては、久保田ら（2013）がスギ・ヒノキ人工林における流出観測から蒸発散量を推定したところ、「年間蒸発散量は間伐に伴い間伐前より約17%減少した。間伐の影響は間伐半年後から徐々に表れ、間伐2年目により顕著になった」と報告しています（図5-3）。

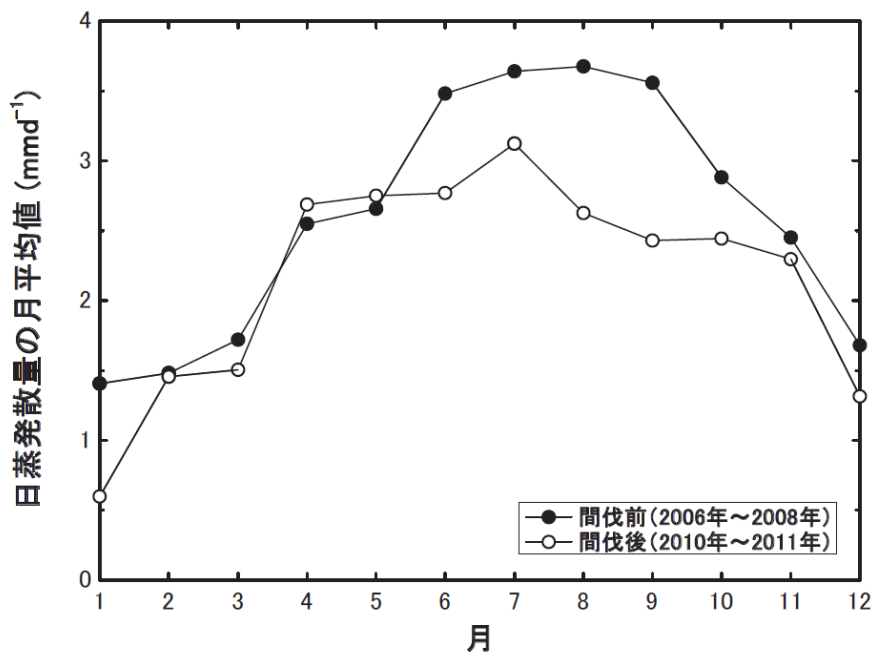


図 5-3 日蒸発散量の間伐前後の比較（久保田、2013）

間伐が単木内の水の動きに与える影響については、Sun et al. (2014) が 32 年生のヒノキ林での 50% の列状間伐が蒸発散量に及ぼす影響について、樹液流観測から解析したところ、間伐後に辺材部の深さ 0 ~ 20 mm での樹液流密度が顕著に増加し、また、日蒸発散量は特に小径木での増加が大きいことを明らかにしています。さらに、Sun et al. (2016) は、約 40 年生のヒノキ林（十分な手入れがなされていなかった 2,200 本/ha の高密度林分）での 50% の列状間伐によって、林床の年単位の蒸発量が約 2 倍に増加したと算出しています。

間伐が林内の積雪深に与える影響に関しては、野口ら (2010) が秋田県のスギ林で間伐区と無間伐区の積雪深を比較しています。雪の堆積期では樹冠開空度の大きい間伐区の方が無間伐区よりも積雪深が大きくなる一方、融雪期では放射収支量が大きいと考えられる間伐区の方が積雪深の減少が大きく、「積雪深は樹冠開空度の大きさによって異なり、降雪遮断量と放射収支量の影響を受けている」としています。

間伐が流出量に与える影響については、Dung et al. (2012) が約 50 年生のヒノキ林の間伐（本数間伐率 58%、断面積間伐率 43%）による流出量の変化を調査、間伐によって年流出量や一時的な流量は変化するものの、表面流の増加は顕著ではなく、間伐は択伐（主伐）よりも流出に与える影響が小さいとの結果を示しています。強度な間伐の影響に関して、恩田 (2015) は、地質などの環境条件が異なる 5 つの地域（栃木、愛知、三重、高知、福岡）の隣接する複数の調査流域（スギ・ヒノキ林）での調査結果から、「強度間伐後 1 ~ 2 年では、とくに過密な林分で樹冠の遮断蒸発量が減少すること、林内雨が空間的に均一化することで地下への浸透がゆっくり進み流出が安定化すること、河川流量はとくに渇水期の増加が見込めること、さらに濁質の少ない「きれいな水」の供給が増えることなどが明らかとなり、水資源利用効率が向上することが示された」としています（図 5-4）。

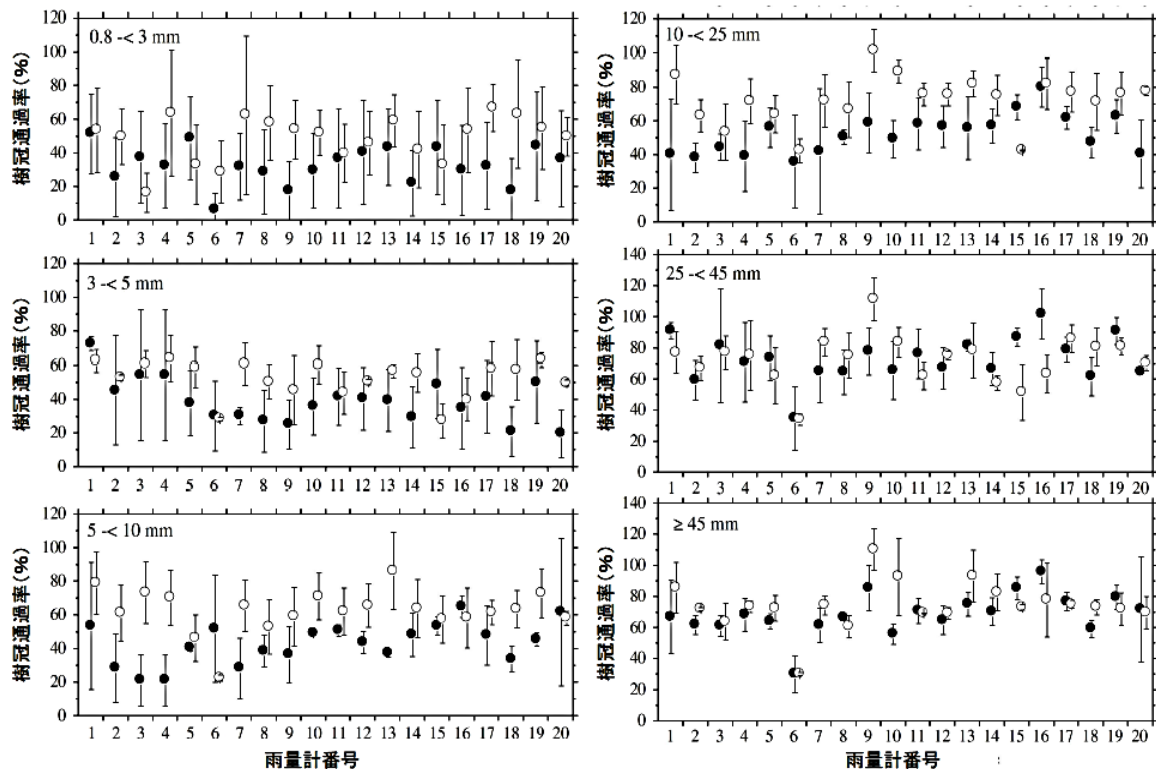


図 5-4 間伐前 (●) と間伐後 (○) の降雨規模ごとの樹冠通過率 (恩田、2015)

なお、間伐を行っても比較的早期にその影響は低減し、樹冠遮断量や流出量が元の状態に戻るとの報告もあります。例えば、Kubota et al. (2018) では、ヒノキ林での強度間伐の影響調査を行った結果、「樹冠遮断量は間伐後最初の年に 4 % 減少し、徐々に回復して間伐 3 年後には間伐前の水準に戻った。年流出量の増加量は間伐 2 年目に最大値となり、147 mm であった。間伐後、平成 22~24 (2010~2012) 年の年流出量の増加量の平均値は 54 mm であった。この増加量は有意ではなかった。間伐後の平均年蒸発散量は有意に 140 mm 減少し、特に蒸散期の減少量が大きかった。このように、源頭部小流域における強度間伐は、短期間でみれば、林内降雨量を増やし、流出量を増すのに効果的であると考えられた」としています。

主伐に関する研究結果については、真板ら (2005) による、約 70 年生のスギ・ヒノキ人工林での皆伐による流出量の影響の調査があります。この調査では、伐採後 3 年間の年流出量が増加する結果が得られており、さらに、「伐採前には寡雨時に流出が停止することがあったが、伐採後には発生しなくなり、流出が途切れなくなった」との結果については、伐採による蒸散量の減少が影響していると推測しています。さらに、「流況曲線の解析では、豊水・平水・低水・渇水各流出量は伐採後いずれも増加したが、全流出量に占める豊水流出量の割合は低下し、伐採により流出年間の一様性が増す結果となった」ことについては、架線集材により地表面の攪乱を最小限にとどめたことによる効果があったものと推定しています。

< 施業上の工夫 >

前述の真板ら（2005）の研究のほか、伐採方法の選択などの施業上の工夫により、ピーク流出量等を低減させることについては、多くの研究結果があります。志水（1994）は、帯状伐採が流出に及ぼす影響を調査し、直接流出量やピーク流量は伐採前に比べて増えるものの、「これらの値は皆伐試験による流出量の増加倍率の値と比較して小さな値となることが示された」としています。また、Stendnick（2008a）や Stendnick（2008b）は、米国オレゴン州の混交林での調査において、間伐や溪流沿いに保残帯を設定したパッチ上の択伐では年流出量やピーク流量に大きな変化は起きず、適切な伐採方法や伐採間隔をとることで、資源利用と持続可能性の両立が可能と示唆しています。そのほか、田村ら（2020）は、徳島県の一斉植林・皆伐型施業のスギ人工林と、弱間伐・択伐型施業のスギ・ヒノキを中心とする針広混交複層林の調査結果から、「スギ人工林を針広混交複層林・弱間伐に変更すると 20%程度の洪水時のピーク流量低減効果を得られる可能性が示唆された」としています（図 5-5）。

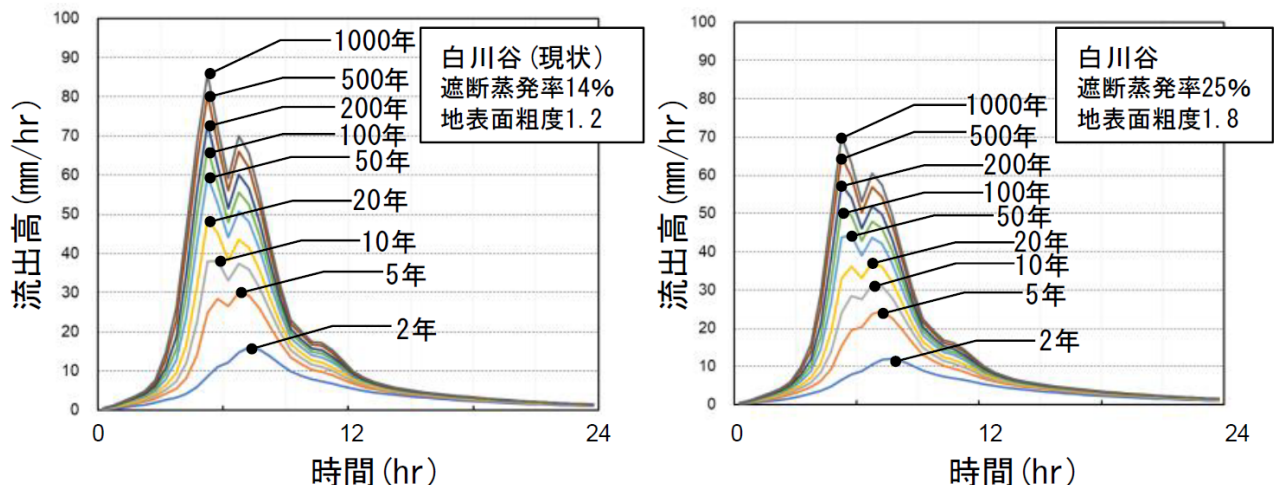


図 5-5 スギ人工林（左）を針広混交複層林化した場合（右）の洪水時のピーク流量の比較
（田村、2020）

土砂流出の抑制の観点からは、白木ら（2020）は、スギ・ヒノキ人工林において、簡易架線集材で新たな作業道の作設を行わずに実施した小面積皆伐の効果を調査し、流出量の増加は見られたものの「浮遊土砂量の増加が認められず、本試験で行った森林整備法では浮遊土砂流出の増加を伴わないことが示された」としています。一方、Nam et al.（2016）のように、50%列状間伐した流域では、間伐直後は、作業道や搬出路からの土砂の流入があり浮遊土砂量が増えたとの報告もあり、施業を行う手法や降雨発生時期などを考慮することが重要であると言えます。また、服部ら（2001）は、水源涵養機能を維持・向上させる森林施業の検討を行い、渇水対策に資する人工林施業について、「間伐に

よる葉量の制御」、「広葉樹林化による蒸発散量の抑制」、「枝打ちによる葉量の制御」を挙げています。

こうした研究結果から、前章で説明した水源涵養機能に関係する各因子がどのように影響するのかを踏まえた上で、適切な森林施業を行うことにより、水循環に良い影響を与え得ることが分かります。その反面、適切な森林施業が行われなかった場合には、水循環に悪影響を及ぼすことも予想されることから、伐採・搬出の際には水源涵養機能の発揮において重要な役割を果たす土壌の流亡を抑えることなどの工夫が重要です。

5.2.2. 森林の成立・成長による影響（長期的影響）

ここでは、植栽から主伐までの長期にわたる森林の成立や成長が、水循環に与える影響について説明します。なお、森林の成長には長期の時間を要することもあり、森林の成熟に至るまでの長期的な変化が水源涵養機能に及ぼす影響への知見は十分ではありません。そのため、以下で紹介する近年の研究成果については、伐採手法や対象地域による違いなどもあり、定量的に結果を示すことや一般化することについては、まだ課題があることにご留意ください。

<森林の成長と蒸発散量・樹冠遮断量の関係>

村上（2002）は、林齢 10 年から約 300 年のスギ・ヒノキ人工林の葉面積指数や蒸発散量の関係を調査し、いずれも「林齢 10～20 年で大きな値を示し、その後は緩やかに減少した」としています（図 5-6、図 5-7）。また、Vertessy et al.（2001）は、オーストラリアでのユーカリが優先する 15～240 年生の森林での調査から、蒸発散量と遮断蒸発量は長期的には林齢の上昇に伴って減少する傾向にあることを示しています。以上の 2 例では、成長速度の大きい幼齢期（林齢 10～15 年）以降では蒸発散量は減少するとしています。

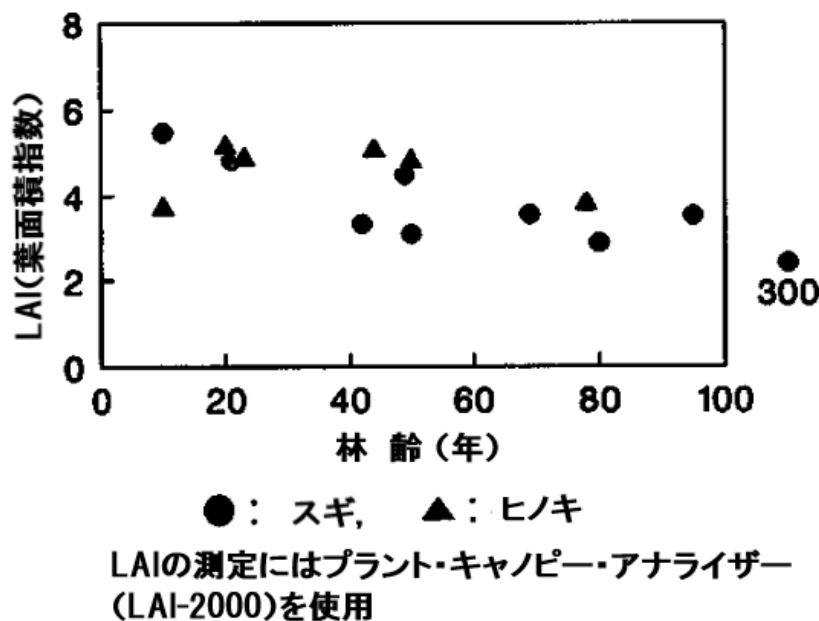
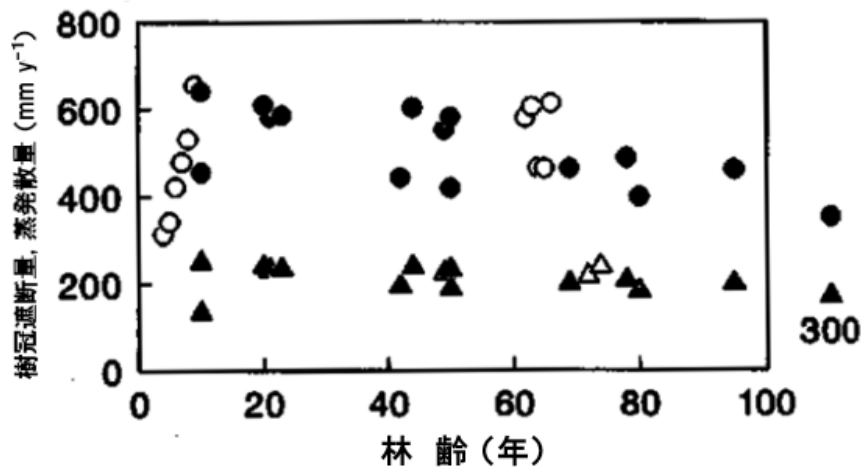


図 5-6 LAI の林齢依存性（村上、2002）（一部加工）



●：計算された蒸発散量，▲：計算された樹冠遮断量，○：測定された蒸発散量，
△：測定された樹冠遮断量。

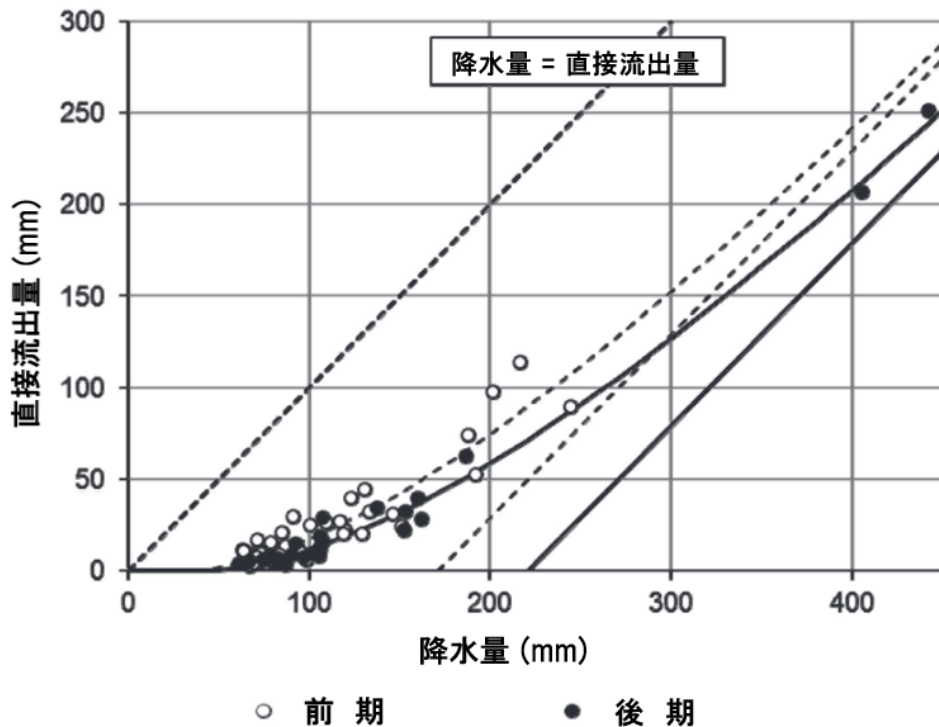
測定値は Murakami (2000) および Murakami et al. (2000) に基づく。

図 5-7 蒸発散量と樹冠遮断量の林齢依存性 (村上、2002) (一部加工)

その一方で、谷ら (2012) は、岡山県の竜ノ口山試験地での広葉樹林化が進んだ流域での調査により、年蒸発散量は平均気温の変化の影響によって増減しつつも、広葉樹林の成長に伴い増加する傾向があることを報告しています。このように森林の成長に伴う蒸発散の変化には様々な研究結果が報告されていますが、世界各地の調査結果からは、蒸発散量は森林の成長すなわち林齢によって変化することが示されており、これには葉量が関係していると考えられています (村上、2003)。

<流出量への影響>

五名ら (2012) は、愛知県の東京大学穴の宮試験流域において、ハゲ山での植栽開始時期 (前期) と 65 年後 (後期) との流出量を比較し、「後期と比べて前期の方が、同じ降雨量に対して推定直接流出量が大きかった」との結果を示し、森林の成長が流出量に及ぼす影響を示唆しています。なお、同研究では、「前期と後期の差は、初期水分条件が乾燥の場合や、最大降雨強度が大きい場合により明瞭に現れた」とされていることから、気象条件や土壌状態が極端な場合ほどその差が現れやすいと考えられます (図 5-8)。



図上には、降雨の全量が直接流出量となる線 ($D_R=R$) および回帰曲線の漸近線である $D_R=R-S_B$ も示してある。点線および実線は、それぞれ前期と後期である。

図 5-8 前期(1935~1946)と後期(2000~2011)における降水量と直接流出量の関係 (五名、2012)

さらに、児島ら(2013)は、岐阜市のヒノキ主体の森林において、タンクモデルを用いた解析を行い、「表土層の生長に伴う土層厚、粗大孔隙の増加、樹冠の生長に伴う遮断量の増加等により、表面流の発生が抑えられる等により、(直接流出の)ピークの低下が発生する。表面流出が遅れ、表土層内に一時的に貯留される雨水が増加する」としています。また、この研究では、「森林の生長によって基岩層の特性は変化しない」という前提で解析を行っていますが、「森林の生長に伴う側方流出特性の変化だけで、地下水涵養量も増加することが分かった」としており、森林の成長によって土壌の発達等が促進されることで、結果として表面流が抑えられ、地下水の涵養に寄与していることが示唆されています(図 5-9)。

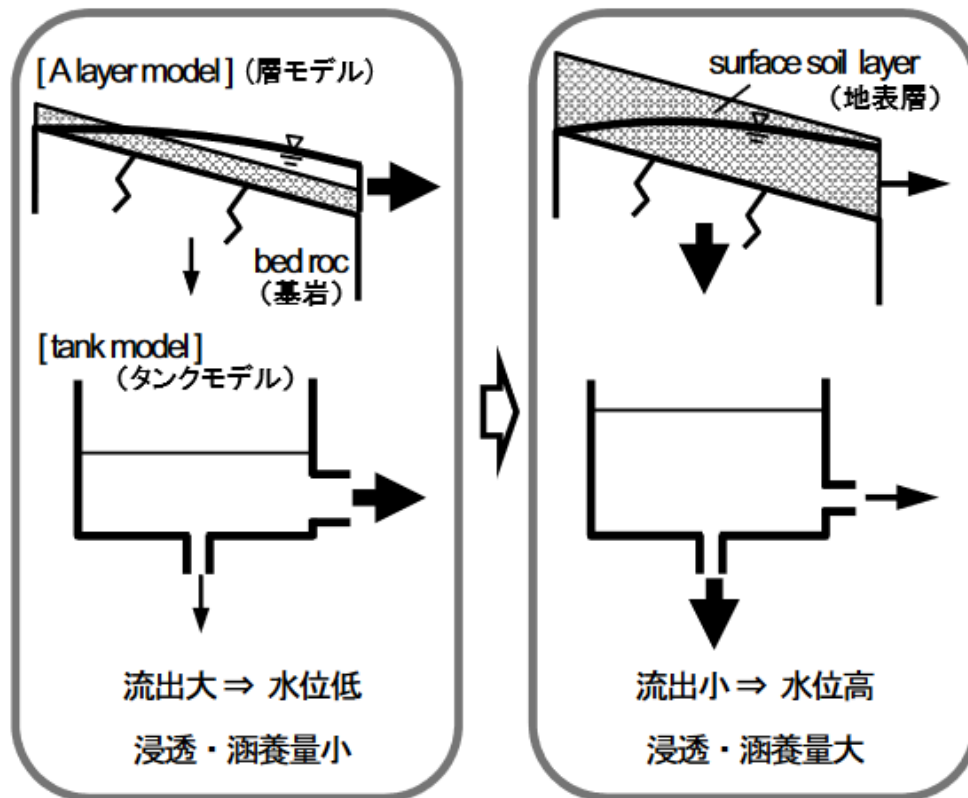


図 5-9 森林の成長に伴う流出特性の変化の模式図（児島、2013）

その一方で太田（2012）は、森林の成長に伴う蒸発散量の増加が特に渇水時の流出量の減少をもたらしている可能性を指摘しています。また蔵治（2021）は渇水シミュレーションから、森林の蒸発散による水消費は流出量を減少させる可能性があり、その減少量は樹冠が閉鎖した放置人工林で最大になるとしています。

こうした結果から、森林の成長が渇水時などで流出量の増減がどちらに寄与するのか見解が分かれる部分もあるものの、また、自然攪乱や伐採ほど急激な変化ではありませんが、森林の成長・成熟によって蒸発散量や土壌状態は緩やかに変化していき、長期的には水循環に与える影響も大きい可能性があります。森林の成熟により、立木が成長するだけでなく、土壌も発達して維持され、さらには林床植生やリターが土壌を被覆するといった林分全体の働きが機能し続けることが、水源涵養機能の維持・発揮のために重要と考えられます。

■ 出典

5. 森林状態の変化が水循環に及ぼす影響

5.1. 自然攪乱による影響

細田育広・深山貴文・小南裕志・岡野通明・玉井幸治・後藤義明（2006）竜ノ口山森林理水試験地南

- 福芳隆博・山本哲也 (2011) 森林の変化が小流域の流出量に及ぼす影響. 広島県立総合技術研究所林業技術センター研究報告, 42, 1-15.
- 芳賀弘和・大槻恭一・小川滋 (2002) 広島県江田島流域での山火事後約 20 年間における基底流出の変化. 水文・水資源学会誌, 15(6), 584-593.
- 石川芳治・白木克繁・戸田浩人・若原妙子・宮貴大・片岡史子・中田亘・鈴木雅一・内山佳美 (2007) IV 堂平地区における林床植生衰退地での土壌侵食と浸透の実態. 丹沢大山総合調査学術報告書, 445-458. (Web 版 : https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/12051138/www.pref.kanagawa.jp/docs/f4y/03shinrin/e-tanzawa/keii/sogochosa/gakujutsu_hokoku.html)
- 阿部敏夫・谷誠 (1985) 松くい虫による松枯れが流出に及ぼす影響. 日本林學會誌, 67(7), 261-270.
- Hobara, S., Tokuchi, N., Ohte, N., Koba, K., Katsuyama, M., Kim, S.-J. and Nakanishi, A. (2001): Mechanism of nitrate loss from a forested catchment following a small-scale, natural disturbance. *Canadian Journal of Forest Research*, 31, 1326-1335.
- 玉井幸治・後藤義明・深山貴文・小南裕志 (2004) 林野火災とマツ枯れによる森林の衰退が流出量と流況曲線に及ぼす影響. 日本林學會誌, 86(4), 375-379.
- 5.2. 森林施業による影響
- 5.2.1. 間伐・主伐による影響 (短期的影響)
- 久保田多余子・坪山良夫・延廣竜彦・澤野真治 (2013) 常陸太田試験地における間伐による蒸発散量の変化. 日本森林学会誌, 95(1), 37-41.
- Sun, X., Onda, Y., Otsuki, K., Kato, H., Hirata, A., and Gomi, T. (2014) The effect of strip thinning on tree transpiration in Japanese cypress. *Agricultural and Forest Meteorology*, 197, 123-135.
- Sun, X., Onda, Y., Otsuki, K., Kato, H., and Gomi, T. (2016) The effect of strip thinning on forest floor evaporation in a Japanese cypress plantation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 216, 48-57.
- 野口正二・金子智紀・和田覚・野口正二 (2010) スギ林における間伐区と無間伐区の積雪深の比較. 水文・水資源学会誌, 23(4), 339-346.
- Dung, B. X., Gomi, T., Miyata, S., Sidle, R. C., Kosugi, K., and Onda, Y. (2012) Runoff responses to forest thinning at plot and catchment scales in a headwater catchment draining Japanese cypress forest. *Journal of Hydrology*, 444-445, 51-62.
- 恩田裕一 (2015) 戦略的創造研究推進事業 CREST 研究領域「持続可能な水利用を実現する革新的な技術とシステム」研究課題「荒廃人工林の管理により流量増加と河川環境の改善を図る革新的な技術の開発」研究終了報告書 (Web 版 https://www.jst.go.jp/kisoken/crest/research/s-houkoku/JST_1111074_09154476_EE.pdf). 1-77.
- KUBOTA, T., Tsuboyama, Y., Nobuhiro, T. (2018) Effects of thinning on canopy interception loss, evapotranspiration, and runoff in a small headwater *Chamaecyparis obtusa* catchment in Hitachi Ohta Experimental Watershed in Japan.

Bulletin of FFPRI, 17(1), 63-73.

真板英一・鈴木雅一・太田猛彦 (2005) 新第三紀層流域における 70 年生スギ・ヒノキ林伐採による年
流出量の変化. 87(2), 日本森林学会誌, 124-132.

志水俊夫 (1994) 森林の水保全的施業—帯状伐採について—. 林野時報, 41(9), 24-28.

Stendnick, J. D. (2008a) Effects of timber harvesting on streamflow in Alsea
Watershed Study. Hydrological and biological responses to forest practices,
Springer, 35pp.

Stendnick, J. D. (2008b) Long-term streamflow changes following timber harvesting.
Hydrological and biological responses to forest practices, Springer, 153pp.

田村隆雄・上田尚太郎・武藤裕則・鎌田磨人 (2020) 遮断蒸発率と地表面粗度の増強による森林の洪
水低減機能の早期向上に関する検討. 土木学会論文集 B1 (水工学), 76(2), I_127-I_132.

白木克繁・金澤悠花・工藤司・片岡宏介・ウジムセ・内山佳美 (2020) 簡易架線集材による森林整備
が流出浮遊土砂量と流域流出量に与える影響. 水文・水資源学会誌, 33(2), 47-55.

服部重昭・志水俊夫・荒木誠・小杉賢一郎・竹内郁雄 (2001) 森林の水源かん養機能に関する研究の
現状と機能の維持・向上のための森林整備のあり方 (II) — 湯水地域上流森林整備指針策定調査報
告—. 水利科学 45(4), 48-74.

5.2.2. 森林の成立・成長による影響 (長期的影響)

村上茂樹 (2002) スギ・ヒノキ人工林における LAI と蒸発散の林齢依存性およびその水源林管理への
応用の可能性. 水文・水資源学会誌, 15(5), 461-471.

Vertessy, R., and Watson, F.G.R. (2001) Factors Determining Relations Between Stand
Age and Catchment Water Balance in Mountain ash Forests. Forest Ecology and
Management, 143, 13-26.

谷誠・細田育広 (2012) 長期にわたる森林放置と植生変化が年蒸発散量に及ぼす影響. 水文・水資源
学会誌, 25(2), 71-88.

村上茂樹 (2003) 森林からの蒸発散と林齢・葉量・林分構造との関係. 水利科学, 46(6), 1-28.

五名美江・蔵治光一郎 (2012) ハゲ山に森林を再生した小流域における降雨量—直接流出量関係の長
期変化. 日本森林学会誌, 94(5), 214-222.

児島利治・Edwina ZAINAL・大池永子・大橋慶介・篠田成郎 (2013) タンクモデルと長期水文観測デ
ータを用いた森林小集水域における緑のダム機能の評価. 土木学会誌, 65(5), I_137 -I_144.

太田猛彦 (2012) 森林飽和—国土の変貌を考える. NHK 出版, pp258.

蔵治光一郎 (2021) 4.1 森林管理による水資源の安定供給レベル向上は可能か、恩田裕一・五味高
志 (編) 水資源対策としての森林管理—大規模モニタリングデータからの提言, 東京大学出版会,
260pp .

6. モデルによる流域スケールの水源涵養機能の評価

前章までは、森林における水文プロセスとそれに関わる因子や、森林状態の変化が各因子や水の浸透・移動・流出に与える影響について、最新の研究成果の紹介も含めて説明してきました。現時点でも水循環のメカニズムを完全に解明するまでには至ってはいませんが、有用な知見は多々集まってきています。

近年では、こうした知見を活用して、森林流域での水循環を評価する取組が進められてきています。本章では、多様な森林の状態と水源涵養機能との関係について分析を行うツールとしてモデルを用い、そのシミュレーションから得られた分析結果を示します（なお、本分析は、一定の条件の下での暫定的な結果であり、参考として例示した内容であることに留意願います）。

6.1. モデルによる評価の重要性

前章までで説明してきたように、水循環のメカニズムは複雑で、因子も多様であるとともに、森林状態の変化も、水循環やそれらの因子に影響を与えます。とくに、前述の「2.3 今求められる森林の姿と水源涵養機能の評価の観点」では、森林の水源涵養機能について、より細やかな分析を行い、得られた知見を政策に反映することが望ましいことを記しました。近年では、「集水域（雨水が河川に流入する地域）から氾濫域（河川等の氾濫により浸水が想定される地域）にわたる流域に関わるあらゆる関係者が協働して災害対策を行う考え方」として流域治水が進められており、この取組と連携する観点からも、流域スケールで森林の水源涵養機能を適切に評価することが必要です。

複雑な水流出のメカニズムを取り扱いやすい形で分析・評価する手法としてはモデルでの分析があり、モデルで水流出を表現する試みがこれまで多くなされてきました。代表的なモデルとしては、集中型モデル（例えばタンクモデル）や分布型モデルがあります。タンクモデルは、流域での水流出の段階を複数のタンクに見立て、タンクごとに浸透係数や流出係数を設定し、水の貯留量や流出量を段階的に算出できます。また、分布型モデルは、流域を一定の区画（メッシュ）に分割し、それぞれの区画に地況・林況の状態（パラメータ）を設定した上で、流域全体の流出量を算出するものです。さらに、流域をいくつかの小さな小支流域として分割する方法もあります。これは「準分布型モデル」と呼ばれており、流域を複数の支流域ユニットに分割し、ユニット内は同一の土壌、地質、植生条件と仮定したもので、集中型モデルと分布型モデルの中間として位置付けられます。こうしたモデルを活用することにより、個々の水文プロセスの要素を一体的にとらえて、水循環に森林が果たしている役割を流域スケールで評価・分析することができます。たとえば、アメリカ農務省農業研究局（USDA-ARS）によって開発された SWAT（Soil & Water Assessment Tool）モデルでは、準分布型モデルであり、流域の地形や森林植生などの分布情報を地理情報システム（GIS）で考慮し、流域の水、土砂、物質の移動の解析が試みられています。

モデルは、森林の水源涵養機能に関する水文プロセスや因子の解明をすすめる基礎的な研究と、それらの知見を生かし、流域の水資源や森林資源管理につなげる応用的な研究として活用できる利点があります。鈴木（1991）は、森林における水を取り扱う研究を

「森林で生起する現象の理解を進めるための研究（基礎研究）」と、「現在の知識を基礎に、森林で生起する現象を制御するための研究（応用研究）」とに分類しています。「基礎研究」については、さらに「個々の水循環プロセス（素過程）を対象としたもので、物理・化学的な機構に還元して、現象を説明しようとするもの」と、「複合した素過程の総合化」したアプローチに分類しており、具体のモデルで言えば、蒸発散のメカニズムや土壌浸透のメカニズムなど、それぞれの段階での水の動き（水文プロセス）を個別にモデル化していくものと、それらのメカニズムを統合（ここでは、水文プロセスもしくは素過程の総合化とも言います）した流域での水循環のモデルになります。一方、「応用研究」では、基礎研究が一定程度進展し、現実を概ねモデルで表現できるようになった次の段階で、降雨に対して流出の応答の再現性の確認や予測、さらには、流域スケールでどのような森林管理を行っていくべきかなど、影響評価への検討へと発展させた研究になります。

6.2. 森林状態の評価

どのようなモデルであっても、まずはその設計から始まります。具体的な手順としては、モデルを構築する目的を定めた上で、それに適したモデルを選定し、分析対象とする範囲・条件を決めるととともに、求める結果（アウトプット）の内容・精度を検討していきます。対象となる流域などの枠組みがある程度整理されたら、必要となるデータを収集します。モデルの種類や求める結果によって必要なデータの種類や量は変わりますが、ここでは、中核となる森林状態のデータが重要になります。

森林状態についてのデータを取得する場合、小さなプロット単位であれば、現地で森林を計測するなどデータ取得のための調査は比較的容易です。しかし、モデルの対象となる流域スケールなどの広範囲になると、対象範囲について精度を高く十分な量のデータを集めるには、効率的な調査やデータ収集が求められます。近年では森林GISも普及していることから、それらの活用も有益な手段のひとつですが、森林GISでは立木密度や樹高等のデータが不十分であることが多く、それらをより精密に計測する場合には、航空機レーザー計測によるLiDAR（Light Detection and Ranging：光による検知と測距）データの活用も非常に有効です。従来から空中写真の撮影が行われてきたように、航空機でのレーザー計測では短時間で広範囲のデータを集めることができる上、樹冠や地表までの距離を測定することで、森林の立体的な形状を精密に把握できます。そのため、LiDARデータは、森林の密度や樹高など計測することに用いられています（図 6-1）。

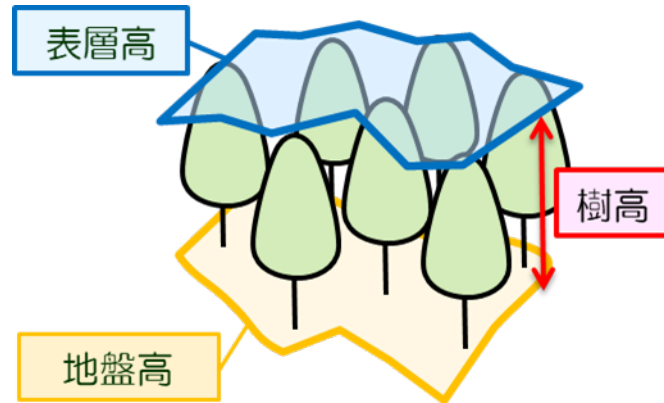


図 6-1 LiDAR 計測データから得られる情報のイメージ

流域スケールで森林における水の動きをモデル化する研究では、水循環のメカニズムの把握が難しいことに加え、森林状態を精度高く再現するためのデータ収集も大きな課題となっていました。そこで、LiDAR データのような精度の高いデータの整備とその活用から、広域での複雑な森林を考慮して、それらを水循環のモデルで活用する試みもあります。

一方で、航空機レーザー計測による LiDAR データも万能ではありません。たとえば、LiDAR データでは地形を詳細に把握することはできませんが、土壌の状態や地質まで把握することはできません。また、立木密度が高く樹冠の広がりや密になるほど、レーザー光は地表に届きにくくなるため、十分な地形情報が得られないこともあります。さらに、立木密度が高い場合には樹木の抽出が難しくなり、密度の推定に誤差が生じやすくなります（西園ら、2020）。LiDAR センサーの精度も重要であり、近年では森林の抽出においてレーザーの照射密度が 4 点/m² などが推奨されています（縄村ら、2007；日本林野計測協会、2014）。このような場合には、過去の研究成果や森林 GIS、森林調査簿などの情報を参照し、現地調査、さらには地上レーザー計測（千葉、2017）などによって必要なデータを補完したりする必要もあります。

研究の進展により水循環のメカニズムの解明が進み、技術の進歩によって森林状態の詳細なデータが得られることにより、水循環の分析・評価も現実の水の動きに近づけることが可能になってきました。今後、過去から現在、現在から未来へと森林の変化についてもシミュレーションで表現・推定することができ、仮想的に森林の樹種や土地利用の状態を変化させて水循環への影響を評価することなども可能になることでしょう。

6.3. モデルによる水源涵養機能の評価例

6.3.1. 使用モデル

モデルを活用した水源涵養機能の評価の試行的事例について、ここでは紹介します。先に述べた、アメリカ農務省農業研究局で開発された SWAT モデルと呼ばれる準分布型の水流出モデルを用います。このモデルは、流域を地形（傾斜）、土地利用、土壌等の条件がほぼ同一である小区画（Hydrologic Response Unit (HRU)：水文応答単位）に分割し、区画ごとのデータにより地理情報システム（GIS）を用いて、水や土砂などの移動形態を統合して流域単位での解析が行えるようにしたものです。Wellen et al. (2015) によ

れば、平成4（1992）年から令和2（2020）年の間に流域の河川での栄養塩循環を扱ったモデルとして世界で最も多く使われたモデルとされています。SWAT モデルのソフトウェアはWebサイトから無償でダウンロードでき、また、プログラムのソースコードは一般に公開されているため、必要に応じて改良することも可能です（図 6-2）。

SWATモデル Webサイト(2023年3月現在) <https://swat.tamu.edu/software/>

図 6-2 SWAT モデルの公開サイト

SWAT モデル構築の基本的な流れを図 6-3 に示します。SWAT モデルは GIS ソフトと親和性が高く、モデルの作業も GIS インタフェース上で行います。ArcGIS または QGIS のいずれかの GIS パッケージの利用が可能で、該当するソフトウェアをダウンロードし、各自のパソコンにインストールすることで、GIS インタフェース上のツールとして使用することができます。

モデルの基本的なインプットデータとして、地形（傾斜）、土地利用、土壌に関する GIS データが必要です。雨量、気温等の気象データが入手可能であれば、より流域の実態に即した降雨量に対する流出量の計算を行うことができます。ただし、入手不可のデータがあった場合であっても、SWAT にオリジナルで組み込まれているデータベースを用いて簡易的に、水流出の計算を行うことが可能です。また、流量観測地点の位置情報を入力することにより、流域を分割する地点（支流の末端となる地点）を任意に設定することもできることから、流域内の各地点での流量を計算することもできます。また、流域内に観測地点がある場合（たとえば、ダムなどの流量）は、モデルによる計算値と実測値を比較し、モデルのパラメータを調整（キャリブレーション）することで、モデルの計算精度の向上を図ることができます。

モデルにより推定された水や土砂流出、栄養塩などの流出量のアウトプットは、SWAT モデルに付属のツールを用いて図化することや、ハイドログラフやマップ等の形式で可視化することができます。これらは、森林管理・計画などの検討材料として役立つことができます。

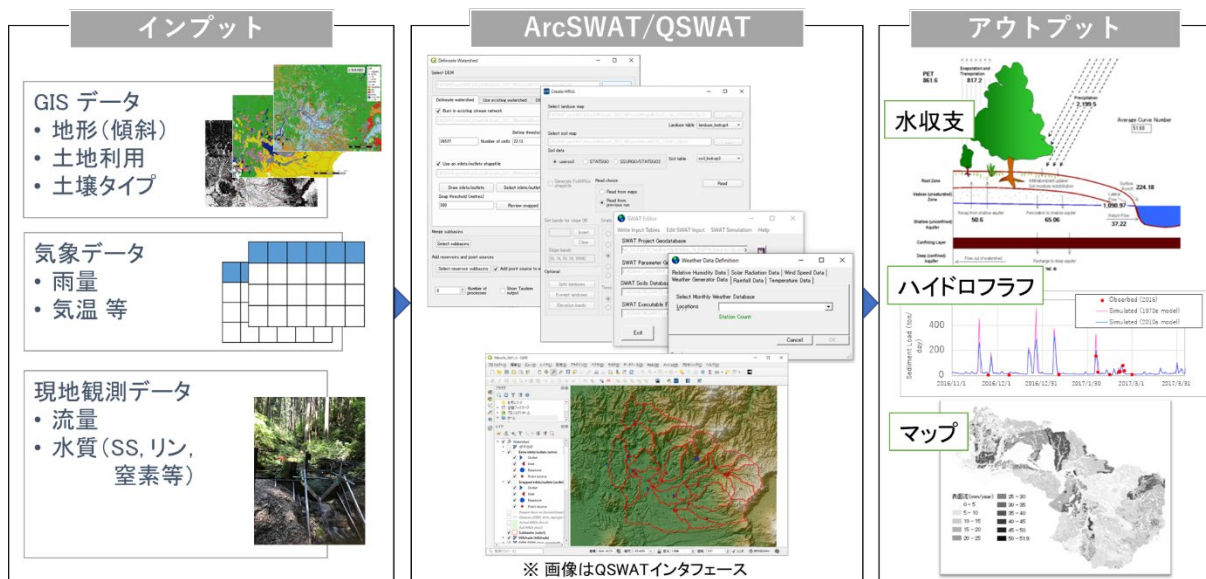


図 6-3 SWAT モデル構築の基本的な流れ

SWAT モデルは、元来、農地（肥料・農薬等）の環境影響評価を行う目的で開発されたモデルであることから、国内でも SWAT モデルを利用した農地流域での水や物質の流出解析事例が報告されています（清水ら、2013）。近年では、森林を対象とした研究事例もあり、Marin et al. (2020) は、1,000 km²以下の森林流域を対象として、SWAT モデルの適用性能について評価し、実測値に対して計算値は、「満足」(satisfactory) から「良好」(good) の結果が得られています。国内の森林への SWAT モデル適用例として、Wang ら (2022) の研究事例では、過去 40 年以上に及ぶ森林の成長や植生群集の相違等が蒸発散量や地下水涵養量に与える影響について評価を行い、主伐・再造林実施の有無など、管理状態の違いが蒸発散量を含む水収支に影響を与える可能性を示唆しています。

また、林野庁における「有明海等の閉鎖性海域と森林に関する調査」(林野庁、2022) でも、同モデルを活用し「有明海・八代海等総合調査評価委員会中間取りまとめ」(環境省、2022) において、森林の水源涵養機能等の定量評価結果を報告しています。このように SWAT モデルは、森林の状態や変化を反映できる有用な手法の一つと言えます。

6.3.2. 対象流域の概況

モデルによる分析の対象とした森林は、山梨県から神奈川県にまたがる道志ダム流域と、神奈川県の日沢山地に位置する三保ダム流域です。流域面積はそれぞれ 11,166ha、15,645ha であり、人工林率（針葉樹林率）はそれぞれ 44%、30%です（図 6-4）。

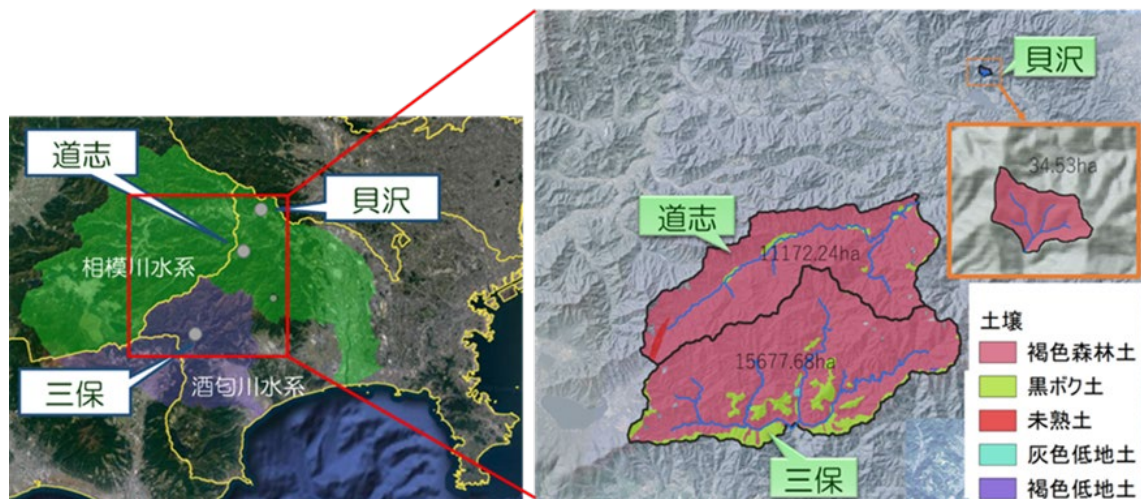


図 6-4 調査地位置図

各流域の森林の成長が水流出に及ぼす影響を評価するために、それぞれの流域について、過去（昭和 53（1978）年）と現代（平成 22（2010）年）の 2 つのモデルを構築しました。道志ダム流域では、スギやヒノキなどの針葉樹人工林の植栽が進められ、スギやヒノキの割合が約 2 倍になりました（図 6-5）。一方、三保ダム流域の林分構成の大きな違いはありません（図 6-6）。また、各流域でスギ・ヒノキの林齢構成の現在と過去を比較しました（図 6-7、図 6-8）。その結果、若齢だったスギ・ヒノキ林が順調に生育し、両流域ともに 50 年生以上の林齢が 65% を占め、壮齢林に移行していることが分かります。この点は、日本全国の人工林の齢級構成において、50 年生以上の割合が 50%（平成 29（2017）年 3 月 31 現在）を占めているのと同様の傾向です（林野庁，2022）。

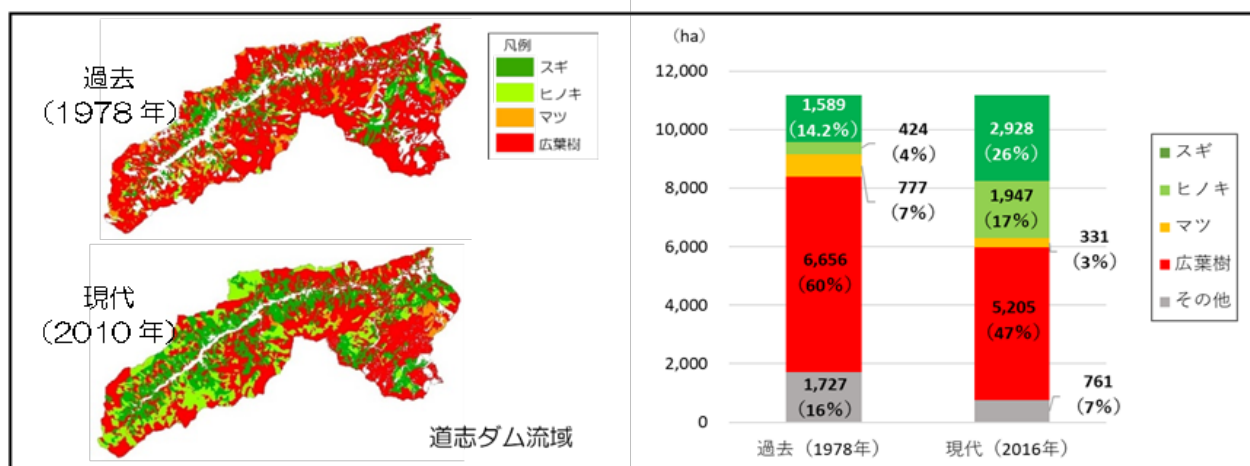


図 6-5 道志ダム流域における林相の変化

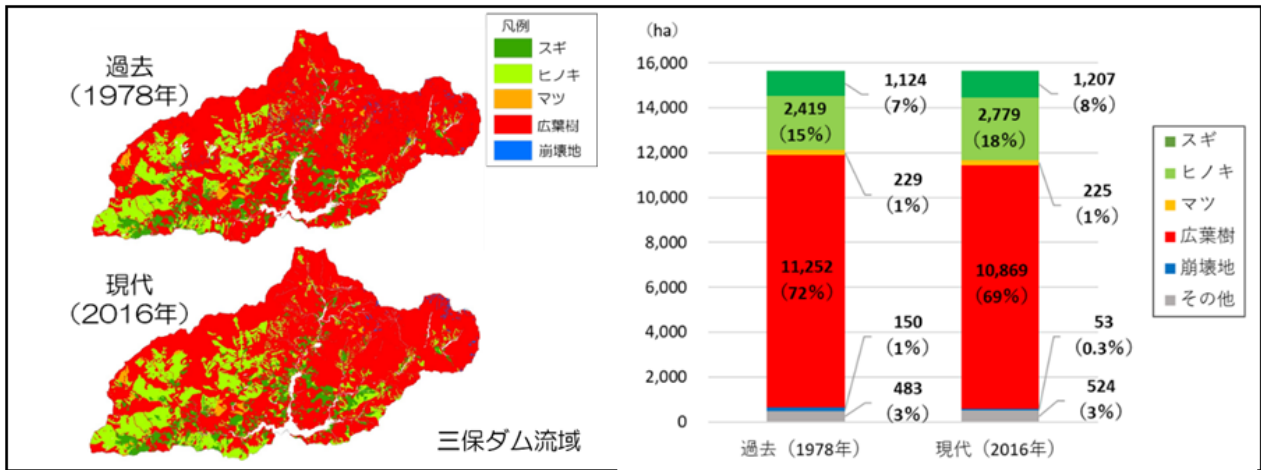


図 6-6 三保ダム流域における林相の変化

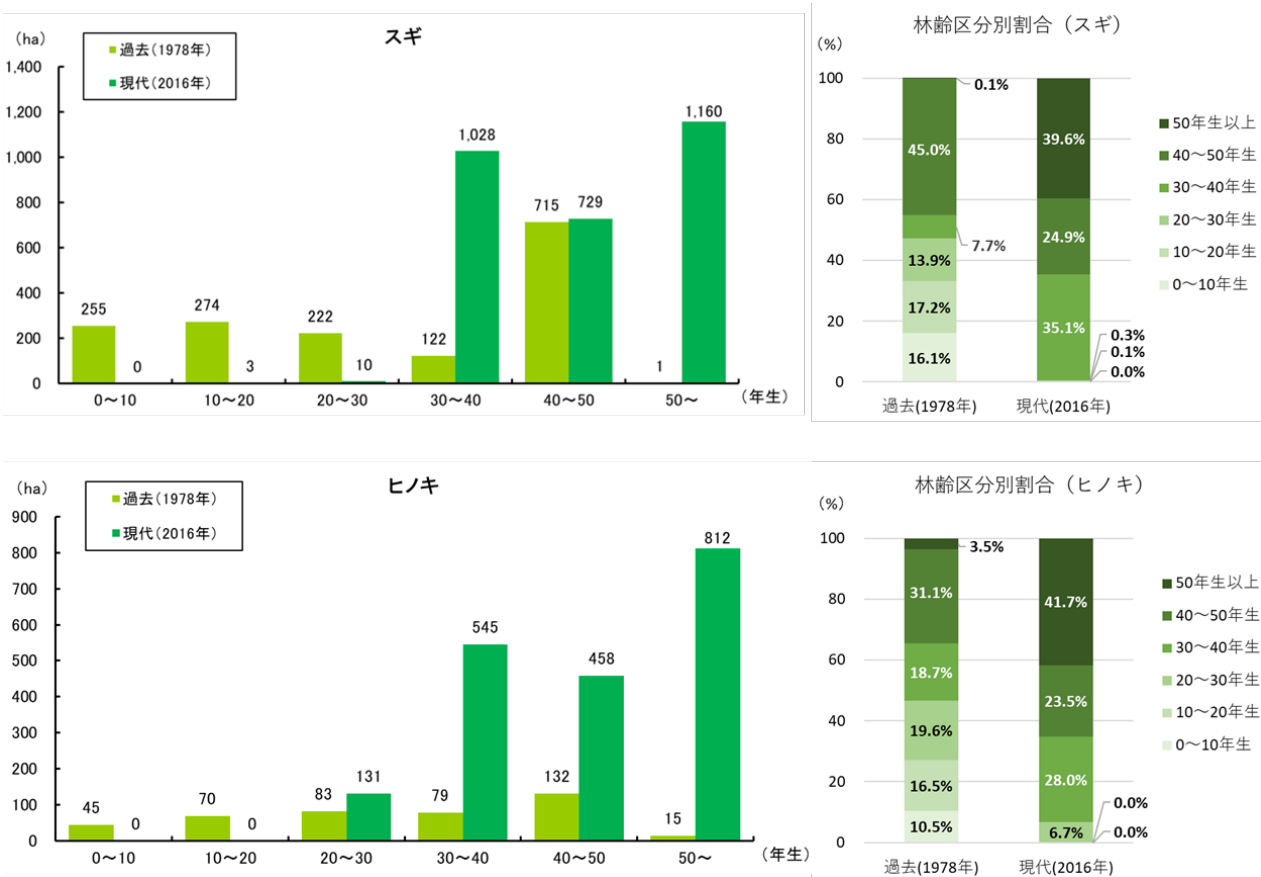


図 6-7 道志ダム流域における林齢構成の変化

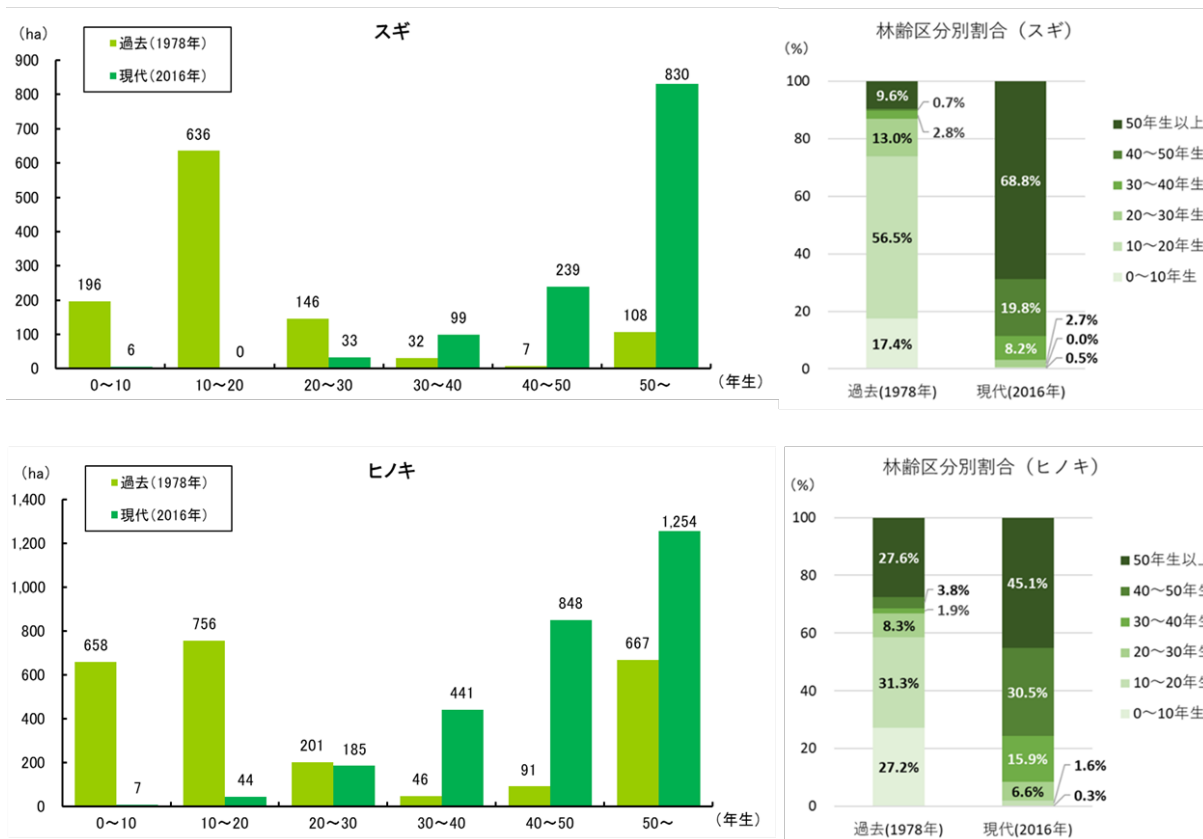


図 6-8 三保ダム流域におけるスギ林齢構成の変化

このような林齢構成の変化のもと、流出傾向についても変化が生じている可能性があることから、道志ダム、三保ダム流域において、過去と現代で同程度の降雨がみられた年について、それぞれ実測ダム流入量に基づく流況曲線を作成し、比較を行いました（図 6-9、図 6-10）。なお、同程度の降雨規模の組み合わせが1つのみでは、流出傾向の誤った解釈につながりかねないことから、ここでは、2つの組み合わせについて比較することとしました。

1つ目の組み合わせは、昭和54（1979）年と平成28（2016）年で、年降水量は、道志ダム流域で2,100 mm程度（図 6-9 左）、三保ダム流域で2,600 mm程度（図 6-10 左）です。2つ目の組み合わせは昭和61（1986）年と平成29（2017）年で、年降水量は、道志ダム流域で1,800 mm程度（図 6-9 右）、三保ダム流域で2,100 mm程度（図 6-10 右）です。

いずれの流況曲線においても、豊水流量（1年間365日の各流量を大きい順に並べた場合の95番目（26%）の日流量）は、過去年よりも現代年の方が小さくなり、出水時の流出量が抑えられている一方で、渇水流量（大きい順に並べた場合の355番目（97%）の日流量）については、特に道志ダム流域において、過去年よりも現代年の方が大きい傾向が顕著であり、水の少ない渇水時にも水を安定的に流していることが分かります。これらの流況曲線からは、約40年間で流域の森林が成長した結果、流出量が平準化された可能性が示唆されます。それでは、次節ではモデルによる解析結果をご紹介します。

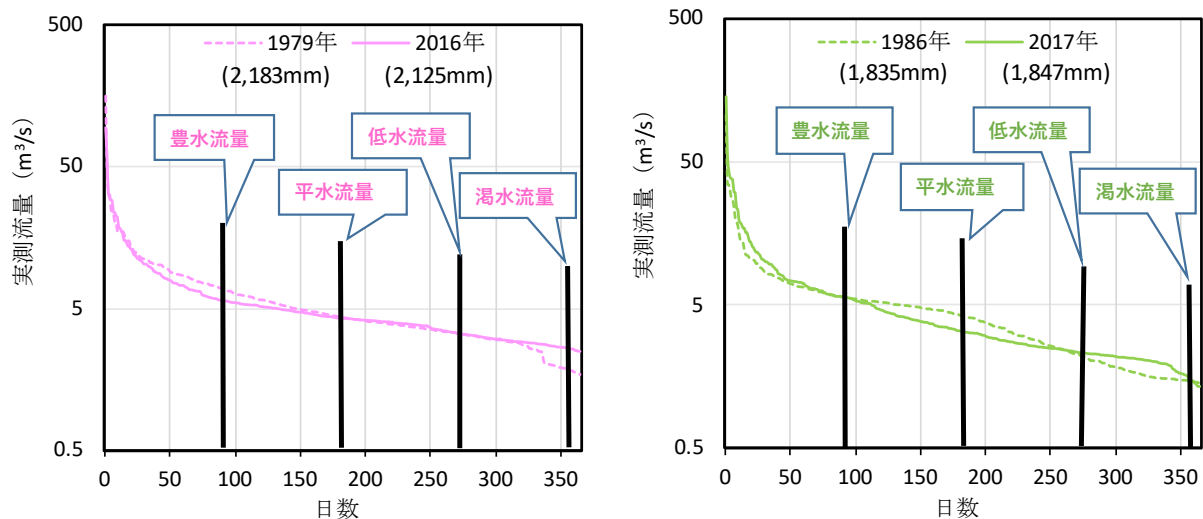


図 6-9 道志ダム流入量の実測値を基にした流況曲線
 (左：年降水量 2,100 mm 程度、右：年降水量 1,800 mm 程度)

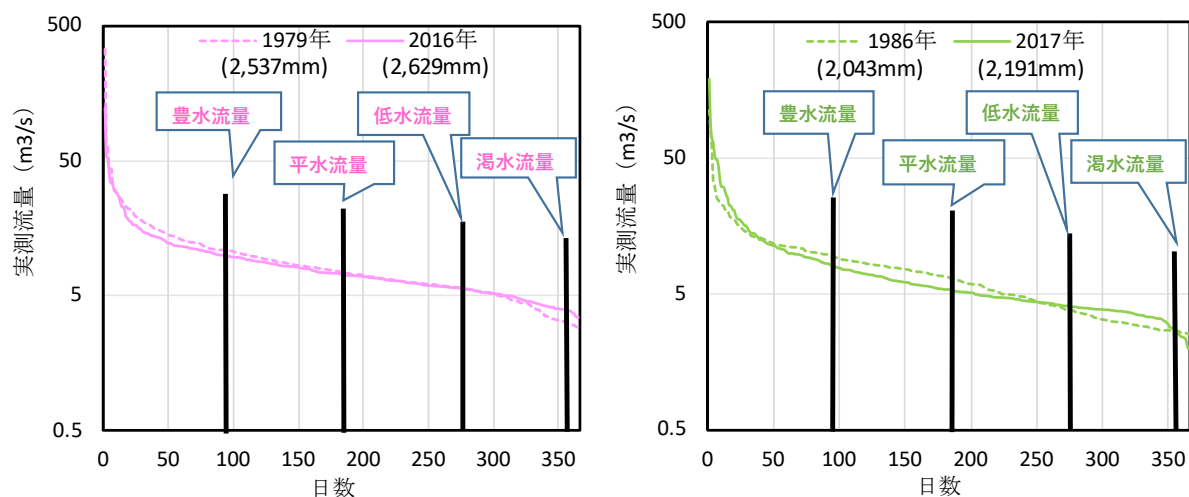


図 6-10 三保ダム流入量の実測値を基にした流況曲線
 (左：年降水量 2,600 mm 程度、右：年降水量 2,100 mm 程度)

6.3.3. モデルの構築

次に、具体的なモデル構築の手順について説明します。まず、林相を樹種・林齢・林分密度の3つの要素に分けて設定しました。樹種は、スギ、ヒノキ、広葉樹の3区分、林齢は、0～10年生、10～20年生、20～30年生、30～40年生、40～50年生、50年生以上の6区分、林分密度は、森林調査簿にある樹冠疎密度の情報を基に疎・中・密の3区分としました。このほか、裸地・未立木地と崩壊地の区分も設定しました。なお、広葉樹については、林分密度はすべて「中」に設定しました。

これらの区分ごとに、葉面積指数や地表の粗度係数等のモデルに必要なパラメータを既往文献の値を踏まえて初期値として設定します。その後、実際にモデルを稼働させて流出量を算出します。算出した流出量を実測の流出量（ダム流入量を使用）と比較し、実測の

値に近づけられるように各パラメータの値を調整（キャリブレーション）し、モデルの推定精度を向上させていきます。

このようにして構築したモデルを活用し、林相の変化による影響を分析する際には、樹種・林齢・林分密度のうち、特に流出へ及ぼす影響を把握したい要素のみを変動させ、残りの要素は一律の値に設定しました。例えば、森林の成長による変化を見る場合には、林齢のみを変化させ、樹種と林分密度については、流域全体がスギ・中密度となるよう統一しています。

なお、SWATモデルなどのモデル解析全般では、林床の状況や地質・岩盤等の情報を得て、それらをモデル内で正確に反映することはたいへん難しいことから、以降の各結果については、主に、森林の地上部の状態（樹種や密度）の精緻化を進めてきたモデル解析により算出しています。土壌や岩盤については、今後もさらなる精緻化が必要である暫定結果であることに留意してください。

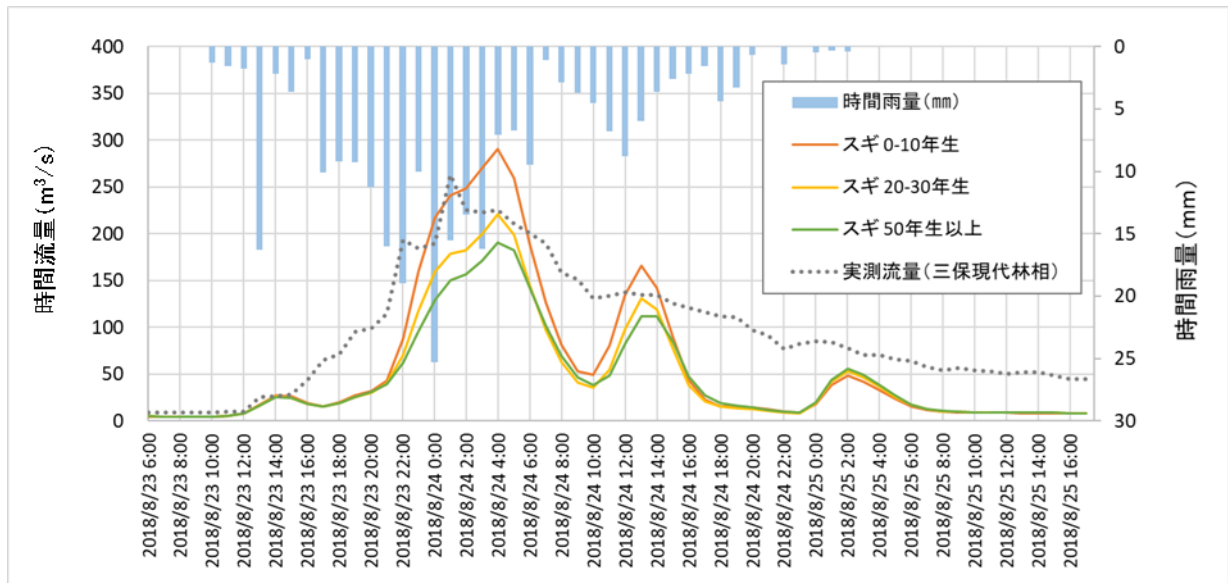
6.3.4. 森林の洪水緩和機能の評価

森林の成長が流出量に与える影響を評価した結果を見ていきます。図 6-11 は、三保ダム流域での降水量と流出量の時間変化を示したグラフです。三保ダムのある AMeDAS 丹沢湖地点における総降雨量が 219.5mm、最大時間雨量 33.5 mmを記録した平成 30（2018）年の台風第 20 号の通過時と、同地点の総降雨量が 518mm、最大時間雨量 81.5 mmの記録的短時間大雨となった令和元（2019）年の台風第 19 号の通過時のものを示しました。

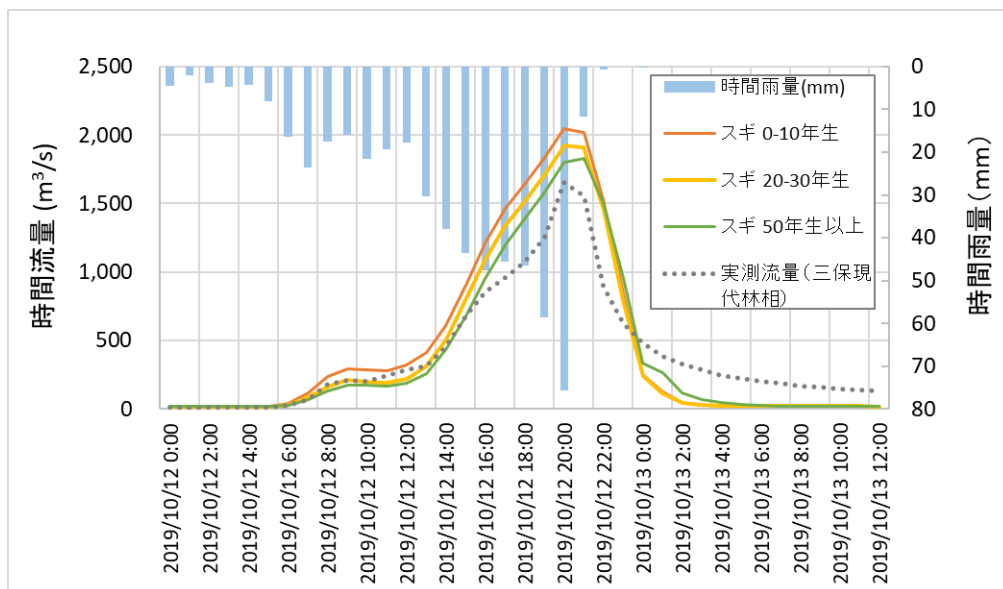
なお、ここでは成長による流出量の差に着目するため、流域内の樹種を一律「スギ」にしたことや、林分密度を一律「中」に設定した上で、林齢が 10 年生以下、20～30 年生、50 年生以上の 3 つのパターンでシミュレーションを行いました。林分密度を「中」に設定することの補足説明として、林分密度と密接な関わりのある BLAI（最大葉面積指数）等のパラメータ値は、樹種・林分密度・林齢に応じた一般的な樹冠疎密度に照らした設定としているため（表 6-1）、流域内の林分密度が一律「中」であったとしても、計算される蒸散量等が一律となるものではなく、樹種や林齢区分毎に設定された異なるパラメータ値をもって林分毎（ここではモデルの計算単位である HRU 毎）に個別に算出されます。

表 6-1 BLAI（最大葉面積指数）の設定値

樹種	疎密度	0-20年 (低)	20-30年 (高)	30-40年 (中)	40年以上 (中)
スギ(高)	密 (高)	8	12	10	10
	中 (中)	6	10	8	8
	疎 (低)	4	8	6	6
ヒノキ(中)	密 (高)	6	10	8	8
	中 (中)	4	8	6	6
	疎 (低)	2	6	4	4
広葉樹(低)	中 (中)	4			



① 2018 年台風第 20 号通過時



② 2019 年台風第 19 号通過時

図 6-11 三保ダム流域での降水量と流出量（林齢別）の推移

これらのグラフから、森林が成長して林齢が高くなるほど、流出量のピークが低下する傾向がみられました。この結果は、植栽から 10 年生までの若齢期までは樹冠遮断量は小さくなること（村上，2003）、林冠が閉鎖する若齢段階では林床被覆が乏しくなり、表面流が発生しやすくなるといった既往の研究結果（たとえば、宮田ら，2009；海虎ら，2012 など）からの知見と一致しています。これは、モデル構築においてこのような知見をパラメータに反映させたことから、結果がモデルでも再現されたものと考えられます。

一定程度成長した森林では、樹冠から下層植生まで、林層構造がバランスよく発達し、ピーク流出量が低く抑えられる傾向となりました。なお、図 6-11①のような時間雨量 30 mm 以下の降雨においては、「スギ 50 年生以上」の最大ピーク流量は「スギ 0～10 年生」

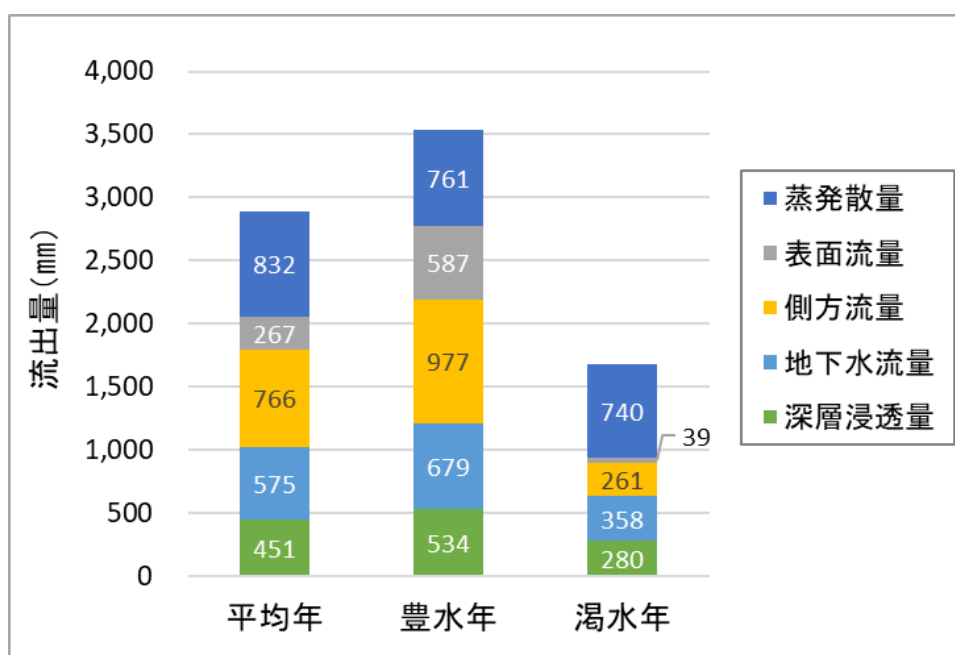
よりも 34%低くなり、林齢の違いが表れたものの、時間雨量 50 mmを超えるような強雨の場合（図 6-11②）には、その差は 12%とやや小さくなる結果となりましたが、これは、非常に強い降雨があった場合には、土壌への浸透・保水の限界を超えてしまい、浸透しきれなかった水が早期に河川に流出したためと考えられます。

森林の成長による洪水緩和機能の発揮に関する調査研究は、これまではプロットや斜面区画、上流の小流域を対象（小スケール）としたものが多かったところですが、本章で示したように大きな流域（1km²以上）を対象としたモデル分析結果からも、森林の成長に伴ってピーク流出量が減少する効果が示され、流域全体の洪水緩和機能の向上に寄与していることが示唆されました。なお、これは一定の条件の下でのモデル解析による暫定的な結果であり、今後、モデル精緻化などの必要があることに留意が必要です。

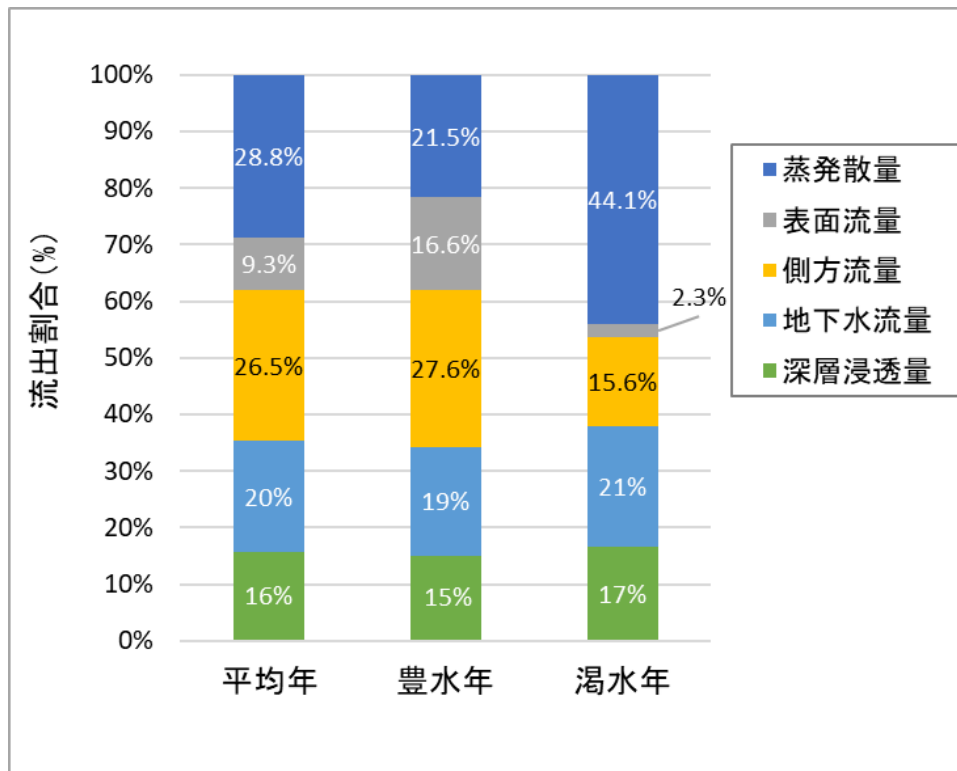
6.3.5. 森林の水資源貯留（水量調節）機能の評価

次に、年間降雨量の多寡による森林内の各流量の変化を見ていきます。図 6-12 は、道志ダム流域の現代モデル（現状の樹種・林齢・林分密度としたもの）を用いて、年間降雨量別に水収支を比較したグラフです。「平均年」は、昭和 53（1978）年から令和元（2019）年までの過去 41 年で平均的な降雨量の年（2015 年）、「豊水年」は最も降雨量の多かった年（1998 年）、「渇水年」は最も降雨量の少なかった年（1984 年）を示します。

また、第 3 章「森林における水文プロセス（p24）」でも説明があるとおり、水収支構成成分のうち、「蒸発散量」は土壌面からの水の発散と、植物からの水の発散する量、「表面流量」は地中に浸透せず土壌表面を流出する量、「側方流量」は地中に一時的に浸透して比較的早期に流出する量、「地下水流量」は流出に長期間を要し流出する量、「深層浸透量」は深層の帯水層まで浸透して長期間流出しない、または対象流域から離れた地点で流出する量となります。



① 流出量



② 流出割合

図 6-12 年間降雨量別の水収支（道志ダム流域）

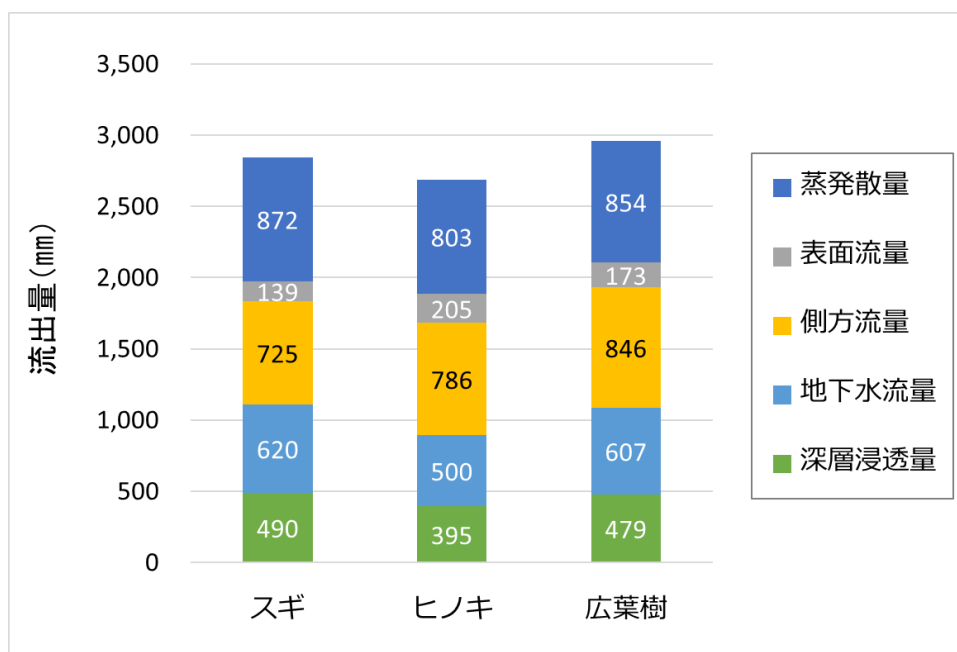
まず、流出量の総量（蒸発散量を含む）については、豊水年では約 3,500 mm、渇水年では約 1,700 mmとなっており、渇水年の量は豊水年の半分程度となっています。次に、流出割合を見ると、豊水年では蒸発散量は比較的少なく、表面流量は多くなっているのに対して、逆に渇水年では蒸発散量が極めて多く、表面流量はほとんど発生しない傾向となっていました。これは、渇水年の蒸発散量が割合としては大きいものの、樹木の生長のためには必要な量であり、実際の量としては平均年・豊水年・渇水年により大きな差はなかったためと考えられます。一方、渇水年においても側方流量が一定以上確保されていることから、成熟した森林においては常に一定の水資源貯留（水量調節）機能が働いているということがいえます。

6.3.6. 樹種の違いによる影響

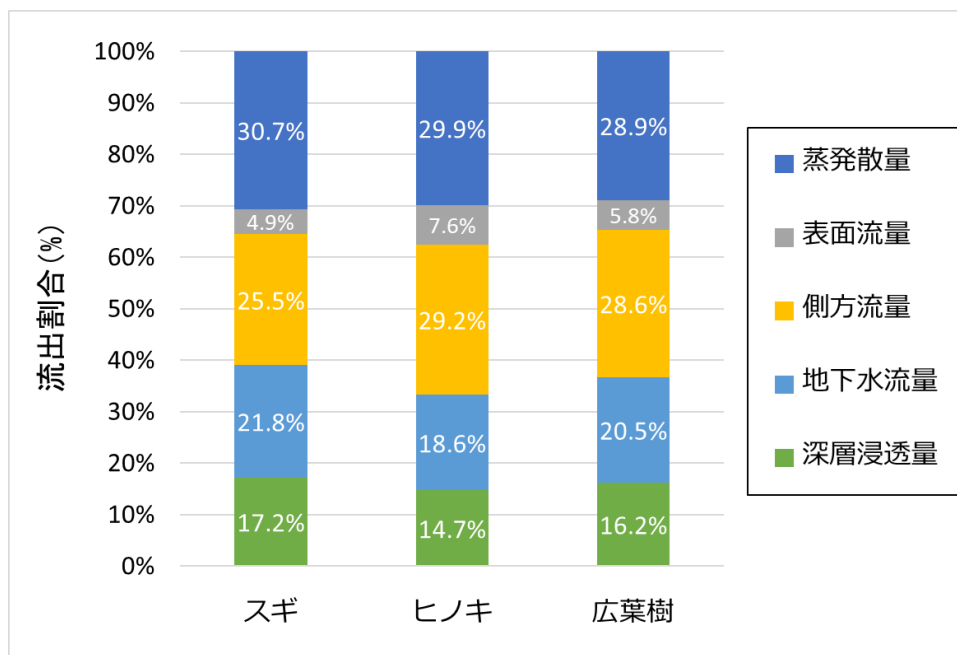
図 6-13 は、道志ダム流域（現代）のモデルについて、流域内の樹種を全て同一にした場合の水収支を比較したものです。流出量全体では広葉樹が最も多く、次いでスギ、ヒノキの順となりました。蒸発散量はスギが最も多く、次いで広葉樹、ヒノキの順となりました。この結果は、SugiHinokiDB（スギとヒノキの苗木から成木までの生理的特性を網羅的に解明するため、過去 70 年間に発表された主に国内の文献をもとに作成された大規模データベース）を用いた検証により、ヒノキよりもスギの方が蒸散能力や水輸送能力が高いとされた知見に近い結果となりました（Osone et al., 2021）。

ここで取り上げたスギ、ヒノキと広葉樹の水収支割合は、3種ともに同程度の割合構成となりました。

水源涵養機能の向上には、森林の広葉樹林化が有効であるとする文献（たとえば、金行，2006 など）もみられますが、流域スケールでは地形や地質といった立地要素も影響していることや、樹種別の土壌浸透能に関する知見が十分ではないことから、モデル解析からは、針葉樹・広葉樹などの樹種別での水源涵養上、有利かを断定することは難しい状況です。針葉樹や広葉樹といった視点のみならず、今後は、本モデル解析では考慮されていない林床状況などの森林を全体として評価することが期待されます。また、広葉樹については樹種別に評価することが望ましいですが、現実的には広葉樹で単一樹種からなる森林は限られているため、端的に針葉樹と広葉樹を区分して評価することには難しい面があります。



① 流出量

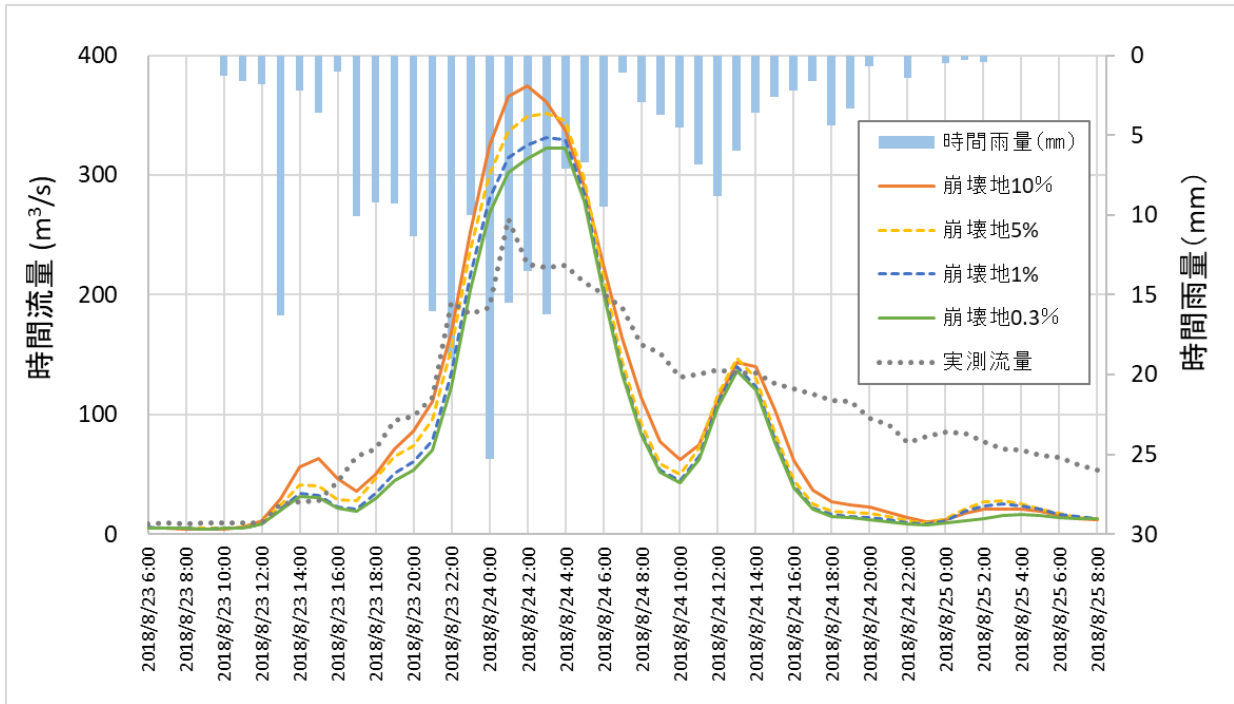


② 流出割合

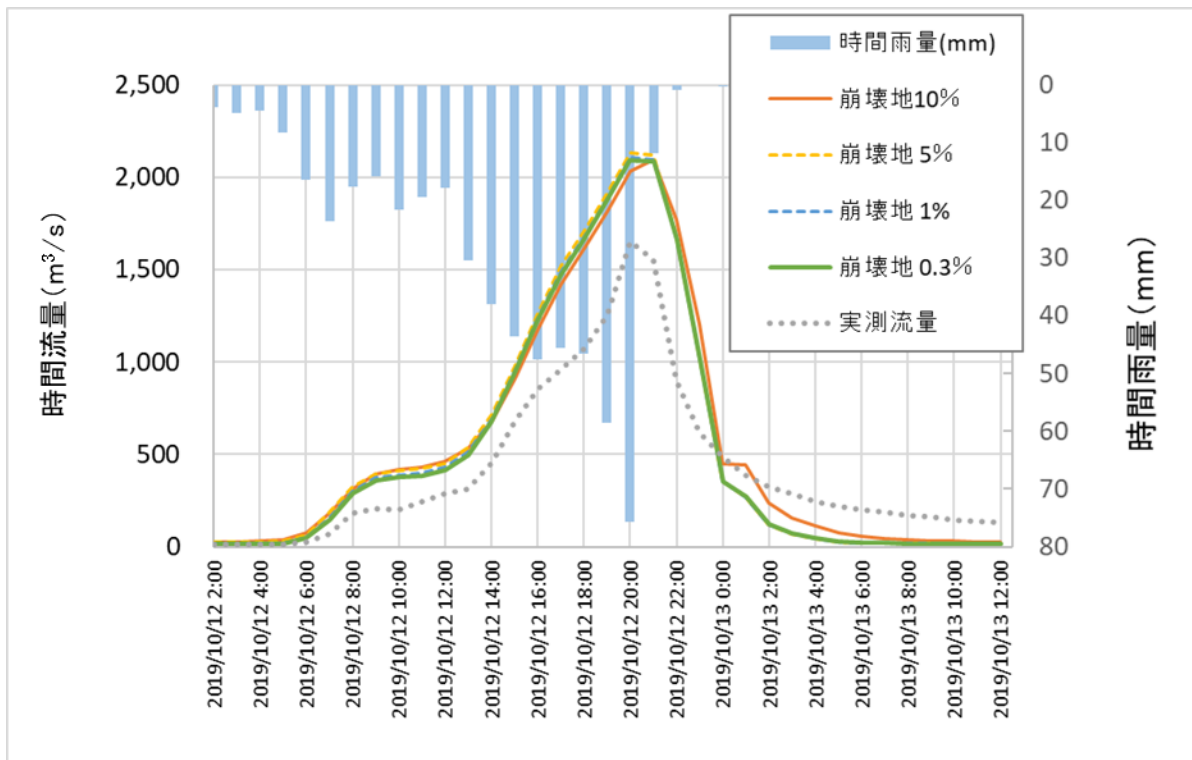
図 6-13 年間降雨による樹種別の水収支（道志ダム流域）

6.3.7. 崩壊地の多寡の影響

三保ダム流域においては、昭和 47（1972）年の降雨（7月 11 日から 12 日の丹沢・塔ノ岳の総降雨量：524mm，最大時間雨量 129 mm）等により崩壊地が多数発生したため、過去モデルを構築することにより、崩壊地が流出に及ぼす影響についても評価ができるようになりました。ここでは、モデル内で、崩壊地の面積割合の増加により、ピーク流量にどのような影響が及ぶかを見ていきます。図 6-14 は、崩壊地の面積割合を 0.3%（現代モデルの値）、1%（過去モデルの値）、さらにこれらよりも大きい 5%と 10%の 4つのパターンで、2018 年 8 月 23 日から 24 日までの台風 20 号（AMeDAS 丹沢湖地点の総降雨量：219.5mm，最大時間雨量 33.5 mm）と、2019 年 10 月 12 日の台風 19 号（同地点の総降雨量：518mm，最大時間雨量 81.5 mm）の 2 回の台風通過時の降雨量を与えたシミュレーションを行った結果です。



① 2018年台風第20号通過時



② 2019年台風第19号通過時

図 6-14 崩壊地の多寡別の流出量の推移 (三保ダム流域)

これら2回の台風時における降雨量と流出量の推移をみると、図 6-14①のような時間

雨量 30 mm以下の降雨では崩壊地の割合が大きいほど流出量も多くなり（最大ピーク流量が 19%増）、崩壊地の規模による影響を強く受けています。これは、中小規模の降雨では崩壊地において発生する表面流がピーク流量へ影響したためと考えられます。一方、図 6-14②のような時間雨量 30 mmを超えるような降雨時には、崩壊地の多少は流出に与える影響が僅か（同 1.9%増）であることが示されました。この結果は、降雨規模が大きくなると、土壌が飽和し森林や地表面状態の違いにかかわらず、大部分の降雨が流出量として変換されるため、洪水ピークの差は明瞭でなくなるという既往研究が示す結果と調和的となりましたが（太田(1991)、五味ら(2008)）、洪水ピークを遅らせる効果（谷, 2012）を現時点のモデルで再現できているかどうかについては十分な確認ができておらず、さらなるモデル検証の余地がありそうです。

6.4. まとめ

本章では、多様な森林の状態と水源涵養機能との関係について分析を行うツールとして、アメリカ農務省農業研究局によって開発された SWAT モデルを用いた結果を、一定条件の下での暫定的なものですが、参考として例示しました。

モデルの精度については、指標による最良の判定結果までは得られていないことや、実測流量との開きがあるなど、完全な再現には至っていないことから、改善の余地は残されています。しかし、一方では、林分単位で林相区分し、SWAT モデルでも森林流域の水収支（蒸発散量、表面流量、側方流量、地下水流量、深層浸透量）を定量的に算出することができ、今後も活用可能な手法であることが確かめられました。

また、森林の林相や崩壊地の面積割合を考慮したシナリオ解析により、各種崩壊地規模の違いによるピーク流量の差が、現実に近い時間雨量時に森林の効果が強く出てくることが確かめられました。

現時点では、広域を対象とした流域スケールでの、森林状態の変化に対する出水時や渇水期の流出量には、従来のプロットや小流域といった小スケールで行われてきた調査研究からの報告ほど顕著な差異は見られず、特に立木密度や林齢といった林相の差異による影響は非常に小さく、現在知られている研究での知見とは異なる結果となりました。

そのため、これらの課題を解決していくためには、

- ① 森林から土壌や岩盤までのモデルにおける関連するパラメータの調整を行うこと
 - ② 多様な森林の立木密度などのパラメータ値のデータを高精度に取得してモデルに反映させること
 - ③ モデル内における森林水文過程における樹冠遮断や林床面蒸発散量の評価を行うこと
 - ④ 地中深くに浸透して時間をかけて流出する水の動きも再現できるようにすること
- などへの対応が必要であると考えられます。

今後、これらの様々な課題を解決するためには、さらなる技術開発や研究の必要性も明確となりました。

■ 出典

6. モデルによる流域スケールの水源涵養機能の評価

6.1. モデルによる評価の重要性

鈴木雅一（1991）水に関わる森林機能とモデル化．森林科学，3，32-35．

6.2. 森林状態の評価

西園朋広，細田和男，福本桂子，山田祐亮，高橋正義，齋藤英樹，北原文章，小谷英司，小谷英司（2020）．ヒノキ人工林における地上型レーザースキャナを用いた樹木サイズの計測-間伐履歴や林分条件が計測誤差に与える影響．森林計画学会誌，54(1)，37-44．

縄村達矢，遠藤貴宏，安岡善文（2007）スギ人工林における LiDAR を用いた樹木抽出の最適観測密度に関する考察．生産研究，59(3)，329-331．

一般社団法人日本林野測量境界（2014）森林・林業分野における航空レーザ計測積算ハンドブック．

千葉幸弘（2017）地上レーザ計測による森林調査のこれから．森林科学，80，32-35．

6.3. モデルによる水源涵養機能の評価例

6.3.1. 使用モデル

Wellen, C., Kamran-Disfani, A., and Arhonditsis, G.B. (2015) Evaluation of the Current State of Distributed Watershed Nutrient Water Quality Modeling. Environmental Science & Technology, 49, 3278-3290.

清水裕太・小野寺真一・齋藤光代（2013）郊外農業流域におけるリン流出量推定への SWAT モデルの適用可能性．水文・水資源学会誌，26(3)，153-173．

Marin, M. Clinciu, L., Tudose, N. C., Ungurean, C., Adorjani, A., Mihalache, A. L., Davidescu, A. A., Davidescu, S. O., Dinca, L., and Cacovean, H. (2020) Assessing the vulnerability of water resources in the context of climate changes in a small forested watershed using SWAT: a review. Environmental research, 184, 109330.

Wang, K., Onodera, S., Saito, M., Iwata, T. (2022) Effects of forest growth in different vegetation communities on forest catchment water balance. Science of the Total Environment, 151159.

林野庁（2022）令和3年度山地保全調査（水源森林保全調査・有明海等の閉鎖性海域と森林に関する調査）委託事業報告書，林野庁，100pp．

環境省（2022）有明海・八代海等総合調査評価委員会中間取りまとめ（Web版 <https://www.env.go.jp/press/110753.html>）．1-160．

6.3.2. 対象流域の概況

林野庁（2022）令和3年度 森林・林業白書 第1章 森林の整備・保全 第1節 森林の適正な整備・保全の推進（Web版 <https://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/hakusyo/r3hakusyo/zenbun.html>）

6.3.3. モデルの構築

6.3.4. 森林の洪水緩和機能の評価

村上茂樹（2003）森林からの蒸発散と林齢・葉量・林分構造との関係－水源林管理への応用に向けて

ー. 水利科学, 46, 1-28.

宮田秀介・恩田裕一・五味高志・水垣滋・浅井宏紀・平野智章・福山泰治郎・小杉賢一郎・Roy C. Sidle・寺嶋智巳・平松晋也 (2009) 森林斜面におけるホートン型表面流の発生に影響を与える要因- 地質および降雨特性の異なる3サイトにおける観測結果の解析-. 日本森林学会誌, 91, 398-407.

海虎・石川芳治・白木克繁・若原妙子・畢力格図・内山佳美 (2012) ブナ林における林床合計被覆率の変化が地表流流出率に与える影響. 日本森林学会誌, 94(4), 167-174.

6.3.5. 森林の水資源貯留 (水量調節) 機能の評価

6.3.6. 樹種の違いによる影響

Osone Y. et al. (2021) Verification of our empirical understanding of the physiology and ecology of two contrasting plantation species using a trait database, PLOS ONE, 16(1), e0254599.

<https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0254599>.

金行悦子・中根周歩 (2006) 吉野川上流域の同一斜面上に隣接する無間伐人工林と広葉樹自然林の土壌孔隙率と最大含水量の比較. 森林立地学会誌, 森林立地, 48 (1), 17-24.

6.3.7. 崩壊地の多寡の影響

太田猛彦 (1991) 森林の水源涵養機能と森林施業のあり方私論, 水利科学 34(6), 1-33.

五味高志・恩田裕一・寺嶋智巳・水垣滋・平松晋也 (2008) ヒノキ林流域と広葉樹林流域の降雨流出の違い. (人工林荒廃と水・土砂流出の実態. 恩田裕一編, 岩波書店). 73-85.

谷 (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.

6.4. まとめ

7. 今後の課題

これまでの研究によって森林流域における水循環についての知見が蓄積されてきました。また、様々なモデルの開発も進み、降雨に対する流出量の推定などが可能となってきました。しかし、現地での水文プロセスの観測、モデルの再現性やその評価結果の精度を高めるための精緻化についての課題もあります。さらに、2章でも触れたように、近年は気候変動による豪雨の多発や台風の増加によって、深刻な降水や土砂災害も毎年のように発生しています。また、森林域における降雪量や積雪量や融雪タイミングの変化などを予想されます。このように、森林の状況も過去から現在に大きく変化しているとともに、自然条件も大きく変化しており、短期的・長期的な視点での研究が必要な状況になってきています。締めくくりとして、本章では、森林の水源涵養機能評価の今後の課題を整理しつつ、より適切で効果的な評価を行うための方向性などを提示したいと思います。

7.1. 気候変動も踏まえた流域単位での森林管理

前章では、モデルによるシミュレーションを通じて、水源涵養機能を向上させるための方策について検討してきましたが、森林の洪水緩和機能には限界もあり、どれほど森林を充実させたとしても、激しい降雨などによる水害を必ずしも全て防げるものではありません。さらに、「日本の気候変動 2020」(文部科学省・気象庁、2020)によれば、パリ協定の気温上昇を2℃抑えられた場合であっても、非常に激しい雨とされる1時間降水量50mm以上の降水の発生頻度は、21世紀末時点では約1.6倍に増加すると予測されています。このように、水害が増えるリスクは今後さらに高まっていくものと予想されます。

しかしながら、このような事態が危ぶまれるからこそ、我が国では、あらゆる分野の関係者が連携し、一体となって防災・減災に取り組む「流域治水」が進められています。ひとつの対策だけでは対応しきれない災害であっても、それぞれの関係省庁や学術分野で最善を尽くすことによって、少しでも被害を軽減させることはできるはずです。こうしたことから、流域の最上流部に位置する森林の水源涵養機能を最適化していくことは、今後も変わらずに求められる、防災・減災や流域の水資源管理のための重要な要素であると考えられます。

また、「日本の気候変動 2020」(文部科学省・気象庁、2020)では、気温上昇が4℃になった場合には、日降水量が1.0mm未満の日の年間日数も約8.2日増加する予測がされていることに加えて、猛暑日も増加傾向と予測されています。また、積雪量の減少と気温上昇による融雪期の変化などを予想されており、森林における積雪や融雪などの水文プロセスを考慮した水源涵養機能の評価は重要と考えられます。このように、気候変動という世界的規模で進行している自然条件の変化は、日本各地にも様々な影響を及ぼし得るため、いかに水循環を健全な状態に維持していくかは、今後も重要性を増す課題になるのではないのでしょうか。

そのような課題を考える際、「流域」という視点は欠かせないものになると考えられます。「流域治水」という言葉に表されているように、また、地球上の大きな水循環も、それぞれの流域単位で起きている現象が統合された結果であるように、流域単位で物事をとらえる視点や、流域内で連携して解決に向けた方策を検討していくアプローチは、基本的

かつ最も重要な要素になるものと考えられます。また、どのように森林の水源涵養機能を高めていくのか、そのための森林の管理・整備をどのように進めていくべきかについても、流域ごとに検討していくことが必要と考えます。

なお、検討に当たっては留意しておくべきこともあります。たとえば、洪水緩和機能や水資源貯留機能の発揮に着目して森林施業を進める場合でも、必ずしも他の森林の公益的機能の向上に寄与するとは限らず、各機能の間にはトレードオフの関係にあるものも存在する可能性があります（片岡ら、2021）。どのような森林管理が最適かについては必ずしも唯一の正解がなく、検討の難しい課題ではありますが、各地域での地形や地質、気象条件、また森林の分布や下流の状況を勘案しながら、それぞれの地域での最適な森林の姿を想定し、さらに結果の評価と改善を繰り返していくことで、望ましい森林の管理・整備の方向性を地道に検討していくことが重要ではないかと考えられます。複数の森林の多面的機能を同時に検討し、その関係性を中長期的に実施する取組みを進められており（たとえば、山浦・山田、2022）、地域特性を踏まえた森林の将来像を検討できる資料が集まりつつあります。

7.2. 今後必要となる観測やモデルの高度化

前述のような背景を踏まえて、今後必要となる観測の内容や、モデルを高度化させていく方向性などについて説明します。

<必要な観測>

過去からの長期間にわたる定点観測（モニタリング）によって、これまで数々の貴重な研究成果が得られました。たとえば降水量や気温などの環境要因の変化や、5章で説明した自然攪乱や森林の伐採・成長などの森林状態の変化によって、流出量がどのように変化するかを分析し、その要因やメカニズムを推定する研究は、継続的なデータの蓄積があってこそ可能となるものです。地道な観測とデータの蓄積を行うことで、国内外の森林流域における森林状態の変化と水流出や水質への影響についての比較検討も可能となり、新たな知見が得られており（Oda et al. 2018）、このようなデータ蓄積と活用は新しい知見を得るためにも重要です。また、既往研究では、降雨を中心とした森林の水源涵養機能の評価が多く、降雪や積雪地域における森林の水源涵養機能の評価は限られており、降雨と降雪の両面からの観測研究を進めることも重要です。

飯田ら（2019）は、森林状態と流出の関係や地中水の移動、蒸散量に関する国内の研究成果のレビューを行い、「この分野では、現地計測データに基づいた研究が精力的に行われてきており、重要な知見が蓄積されている」と述べています。その一方で、「気候変動に伴って気象条件、特に降雨現象が極端化しており、このような変化に対して森林がどのように応答するのかを予測し、影響を軽減する方策を検討する必要に迫られている。気候変動がもたらす気象条件の変動幅は、これまでの計測データが示すものよりも大きい可能性がある」と注意を呼びかけています。たとえば森林流域での流出量の計測については、「近年の気候変動が森林植生や森林水循環に与える影響を今後検討するためにも、現在行われている長期的な観測を維持していく努力が必要である」としています。

環境要因の変動が一定の範囲の中に収まっている場合には、仮にデータの欠損が一部の期間で発生したとしても、その前後の期間のデータで代替することも可能です。一方で、わずかであっても気温が年々上昇していくなど、環境要因の変動の範囲自体が変化していく場合には、前提条件が変わってしまうためにデータの代替は難しくなります。森林や水流出の状態に変化が認められた場合、それが気温上昇によるものなのか、他の要因の変化によるものなのかの見極めもより困難なものとなります。

環境要因は常に変動していることから、切れ目なく観測を継続することによって、モデルの中に当該環境要因の変動をパラメータとして反映し、将来のさらなる変動（たとえば一層の気温上昇や極端な降水や渇水）によって森林や水の流出にどのような変化が起こるかを予測することも可能となり、問題への対応が取りやすくなるといえます。予測が確実に可能かどうかは今後の研究や技術開発の進展にもよりますが、少なくとも、科学的な検証を行うためにはデータが必要不可欠なことには変わりありません。近年、極端気象の頻度が増加している状況の中、現在と将来の課題へ対応するためには、高精度・高頻度のデータ収集などの観測体制の継続・充実が求められます。

<森林流域を対象としたモデルのスケール・精度>

森林流域における水の流出過程を表現して水量を推定するには、モデルの利用が効果的ですが、実際に個々の流域でモデルを構築する場合は、その目的や対象範囲について十分な検討が必要です。小川（2015）は、「流出モデルは、現象を忠実に、網羅的に説明するというより、どのように目的に沿った説明ができるかということに重点が置かれる」としています。このため、モデルの選択・検討に当たっては、まずはモデルから得ようとするアウトプットがどのようなものであるかを整理した上で、その種類や対象とする面積（スケール）、求める精度や時間単位等を選定していく必要があります。一例として紹介したSWATモデルでも、アウトプットとして求める精度が高ければ、モデル構築を行うためのインプットデータも詳細なものが求められ、モデルの精緻化にも時間と労力を要します。

森林流域を対象としたモデル化の場合、広域を対象とした森林状態の評価の精度を上げていくことが重要です。先に述べたように、航空機レーザー計測技術などの技術の発展があるものの、これらの技術でも広域の森林を高精度で計測するには課題もあります。ドローン搭載型のレーザー計測、地上レーザー計測などとの融合による、森林情報の高度化が求められています。その上で、図 7-1 に「一般的」として示したレベルの樹種や林齢、疎密度の細分化は一定程度を考慮したモデル構築であれば、現状では、比較的容易に行えます。

ただし、いずれの場合でも、将来の気候変動を踏まえて森林の機能を評価し、今後の森林の管理・整備の方向性を検討するためには、前述のとおり継続的な観測データが必須となります。さらに本書で述べてきたように、土壌や岩盤などの流域スケールでの森林の水文プロセスでは、今後のさらなる研究が必要な点多々あります。加えて、このようなモデル化の技術においては、森林科学の領域のみならず、データサイエンスを含めて、分野を超えた視点が重要であるとともに、高度化されたモデル等を活用できる技術者等の育成も課題です。森林の育成に必要な長期的な視座と同様に、長期的な視点での産学官

での人材育成も必要です。

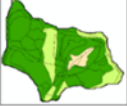

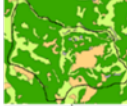
構築手法	一般的	高度
雨量	<ul style="list-style-type: none"> 気象庁や国交省の地点雨量データを使用 	<ul style="list-style-type: none"> 雨量の空間分布を考慮。標高などで加重。
林相区分図	<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-right: 10px;"> 入手可能な公的機関データ ・ 土地利用細分メッシュ ・ 環境省植生図 </div>  <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-left: 10px;"> 林相区分図 (森林簿) </div> </div>	<div style="display: flex; align-items: center;">   <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-left: 10px;"> 林相区分図 (レーザ林相図 から目視判読) </div> </div>
土壌図	<ul style="list-style-type: none"> 20万分の1 土地分類基本調査 (土壌) 土層厚の考慮が不十分 	<ul style="list-style-type: none"> 同左 土層厚を考慮 より詳細な土壌分布図を使用
蒸発散	<ul style="list-style-type: none"> モデルに組み込まれた計算方法から選択 	<ul style="list-style-type: none"> 森林地向け蒸発散モジュールの独自開発
メリット	<ul style="list-style-type: none"> 一般的に入手可能なデータを用いることで、モデル構築手法の汎用性が高まる。 複数モデル間での比較が容易。 	<ul style="list-style-type: none"> 複層林や混交林など、より複雑な状態の林分構造を反映できる可能性がある。 林分状態別により詳細にプロセスを説明・検証することが可能となる。
デメリット	<ul style="list-style-type: none"> 簡易な計算式であるため、水文プロセスが適切に再現されない場合は、フィールドに応じて計算の中身の解釈を変える必要が生じる場合もある。 	<ul style="list-style-type: none"> LiDARデータが存在しないエリアもある。 インプットデータ作成に時間を要する。
適したケース	<ul style="list-style-type: none"> 単独、あるいは複数流域における流出量や流出傾向を大まかに把握したい場合。 森林とその他の土地利用との流出特性の違いを把握したい場合。 	<ul style="list-style-type: none"> LiDAR等の高精細データが入手可能な場合。 森林の物理的な状態に応じた水文プロセスの説明や流出量の違いを把握したい場合。

図 7-1 モデルの高度化

7.3. 今後の展望

ここまで、森林の水源涵養機能を評価するための研究成果や、今後の課題を説明してきましたが、最後に、今後の展望について述べます。森林整備により公益的機能が高まることについては国内でも一定の理解が得られており、森林整備を進めること自体には異論はないと思います。

しかし、水源涵養機能の背景にあるメカニズムには未解明な部分も多く、細かな施業方法の違いによる水源涵養機能への影響評価を行うには技術的な限界があります。また、これまでの研究結果からは、森林の有無が流出量や貯留量に及ぼす影響に比べて、すでに成林している立地・流域においては、森林状態が多少変化したとしても、その影響は比較的小さい可能性が示唆されています。流域スケールでの水流出を考える場合、地上部とともに、土壌や基岩などの地下部が与える影響も大きいことが関連しています。このような、点が解明されたことも、およそ100年にわたる森林の水源涵養機能の研究や知見の積み重ねによるものです。

一方で、本書で示したように、森林の水源涵養機能のメカニズムや機能の評価について、すでに明確となり、さらに掘り下げて研究していく意義は小さいのではないかとと思われる方もいるかもしれません。しかし、森林や水に関する課題、取り組むべきことは多々あり、その一例を紹介します。

第一に降雨から水流出までの時間スケールです。早期に河川に流出する表面流等は別として、地中深くまで浸透する水は、数年単位、数十年単位、場所によっては数百年かけて

貯留されるものもあります。また、この時間スケールは、土壌の形成や岩盤の風化などとも関連します。土壌は、枝葉が分解して生成されたものもありますが、その多くは長い年月をかけて岩石が風化したものがもとになっています。かつて、「ハゲ山」であった場所も、数十年かけて土壌が形成され、現在の森林の回復につながっています。一度流亡してしまった土壌は、基本的には再び供給されることのない、一度きりの資源であると考えの方が適切です。水も土壌も、その取り扱いによっては、遠い将来に影響を及ぼし得るものになります。少しでも将来への影響を低減させ、より良い環境を残す可能性として、今後も研究を進めることが、現在の私たちが担うべき役割ではないかと考えます。

第二に、これまでは森林の水源涵養機能のメカニズムについて十分に捉えきれておらず、半ば見過ごされていたことが、実際には大きなインパクトを与えている可能性もあります。森林における蒸発散量が無視できないほど大きいことは本書の中で紹介しましたが、海外の研究では、さらに驚くべきことも分かってきています。大西洋で蒸発した水蒸気は偏西風によってユーラシア大陸の北方に運ばれますが、森林からの大量の蒸発散がそのような水の流れをもたらし、広大なカラマツ林の生育を支えていることが示されています（谷、2014）。また、アマゾンの熱帯雨林では、森林からの大量の蒸発散が雨雲の発生に寄与していることも分かっており、その水量はアマゾン川の流量に匹敵するほどとされて、大陸の気象とも関連していることが報告されています（Staal, et al. 2018）。このように、単木、斜面、流域、地域、大陸などのさまざまな空間スケールでの森林と水のつながりを理解していくためには未知の部分も多く、それをモデルなどで再現できるようにするための研究と技術開発は重要となります。

第三に、多様な森林の姿と水循環の評価です。本書でみてきたように、これまで多くの研究は、スギやヒノキなどの人工林を対象とした研究に偏る傾向があり、広葉樹林を対象とした研究は多くはありません。とくに、樹木のみならず、林床植生を含めた森林生態系全体としての樹冠遮断や蒸散、さらには土壌の形成など検討していく必要もあります。針葉樹と広葉樹が混在する針広混交林を対象とした知見なども必要となります。複層林化や針広混交林など多様な林相を目指した森林管理が進められており、それらに対応した水源涵養機能の定量評価も重要です。森林の管理も多様化しており、従来の定性間伐、定量間伐、列状間伐のみならず、群状伐採など、さまざまな施業手法が導入されています。森林管理や目指す森林の姿も、流域内での奥山と里山で異なる場合もあります。このような森林管理手法に対応した森林の水源涵養機能の評価も重要です。

第四に、前述のとおり、気候変動による影響は年々強まっていくことが予想され、今後の気温上昇、大雨や大雪や渇水などの極端気象の発生については、明確な見通しがありません。そのような不確実な未来を前に、できる限り多くの対応策を備えておくためには、やはり地道に研究を積み重ねていくことが必要です。森林が温暖化を緩和する機能を持ち、また気象にも影響することを考えれば、将来に向けて森林のより良い取り扱い方法を検討することの重要性は否定できません。こうしたことから、本書で紹介したように森林施業が水の流出・貯留に及ぼす影響を定量的に、かつ十分な精度で評価できる技術を確立することが必要かと思えますし、そうした技術をツールとして発展・普及させることで、各流域においてより適切・的確に森林の管理・整備のあり方を検討していけるものになると

考えられます。

研究を進めていくためには、実証と観測が欠かせません。最新の知見をもとに、それぞれの地域で森林の管理・整備の方向性を定め、具体的な計画を検討いただき、その実施結果をフィードバックすることにより、さらに研究を進展させることができます。

本書がそのための出発点となり、より良い未来へとつながることを祈ります。

■ 出典一覧

7. 今後の課題

7.1. 気候変動も踏まえた流域単位での森林管理

文部科学省・気象庁（2020）日本の気候変動 2020（Web 版：

<https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ccj/index.html>）。1-49.

片岡佑太・芳賀智宏・松井孝典・町村尚・鶴田健二・木村道徳（2021）滋賀県における森林管理シナリオの相乗効果とトレードオフのモデリング．環境情報科学論文集，35（2021年度環境情報科学研究発表大会），73-83．一般社団法人環境情報科学センター．

山浦悠一・山田祐亮（2022）森林の多面的機能の時空間的評価の試み．環境情報科学，51(2)，21-25.

7.2. 今後必要となる観測やモデルの高度化

Oda, T., Green, M. B., Urakawa, R., Scanlon, T. M., Sebestyen, S. D., McGuire, K. J., Katsuyama, M., Fukuzawa, K., Adam, M. B. & Ohte, N. (2018) Stream runoff and nitrate recovery times after forest disturbance in the USA and Japan. *Water Resources Research*, 54(9), 6042-6054.

飯田真一・玉井幸治・野口正二・小林政広（2019）森林における水文過程の解明：プロットから流域スケールの手法による知見と今後の展望．日本水文科学会誌，49(3)，135-159.

小川滋（2015）2-5 流出現象と流出モデル，森林環境と流域生態圏管理，p63.

7.3. 今後の展望

谷誠（2014）地球圏・生物圏・人間圏の相互作用と環境問題、京都大学教養・共通教育通信、19、14-18.

Staal, A., Tuinenburg, O. A., Bosmans, J. H., Holmgren, M., van Nes, E. H., Scheffer, M., Zemp, D. C. & Dekker, S. C. (2018). Forest-rainfall cascades buffer against drought across the Amazon. *Nature Climate Change*. 8(6), 539-543.

参考文献

本書に記載した内容について、さらに知見を深めるために有用と思われる文献を紹介し
ます。目的やご関心に応じて、ご参照ください。

○森林水文学全般に関する書籍

『森林水文学入門』大槻恭一・久米朋宣・笠原玉青編、朝倉書店

○森林での水流出のメカニズムに関する書籍

『森林水文学 森林の水のゆくえを科学する』森林水文学編集委員会編、森北出版

『水と土と森の科学』谷誠、京都大学学術出版会

○森林施業による影響に関する書籍

『水資源対策としての森林管理』恩田裕一・五味高志編、東京大学出版会

○森林整備の歴史・変遷に関する書籍

『森林飽和 国土の変貌を考える』太田猛彦著、NHK 出版

謝辞

本書の作成にあたっては、令和2年度から4年度にかけて実施された林野庁委託事業
「山地保全調査（森林の水源涵養機能の評価・発信に関する調査）」の検討委員会座長で
ある五味高志氏（名古屋大学生命農学研究科・教授）をはじめ、同検討委員の恩田裕一氏
（筑波大学アイソトープ環境動態研究センター・教授／センター長）、小杉賢一朗（京都
大学大学院農学研究科教授）、白木克繁氏（東京農工大学農学研究院・准教授）、玉井幸治
氏（国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所・研究ディレクター）、堀田紀
文氏（東京大学大学院農学生命科学研究科・准教授）及びオブザーバーの内山佳美氏（神
奈川県自然環境保全センター研究企画部・主任研究員）にご執筆協力及び監修をいただき
ました。また、大西健夫氏（岐阜大学応用生命科学部・准教授）には、SWAT モデルに関
する技術アドバイスをいただきました。この場をお借りして厚く御礼申し上げます。

（※検討委員は五十音順、所属と役職は令和5年3月時点）