

森林の水源涵養機能に関する解説資料 (案)

多様な主体による森林づくり活動促進のために



[未定稿]

森林の水源涵養機能に関する解説資料（案）

多様な主体による森林づくり活動促進のために

令和6年（2024）11月時点で本資料は検討中のものです。
今後、内容が変更される可能性があることをご承知おきください。

目次

1. 資料の構成.....	7
1.1 目的.....	7
1.2 資料の内容.....	7
1.3 検討委員会.....	9
2. 水に関する世界および日本での動き	11
2.1 水に関する世界的な動向	11
2.2 VWBA と VWB	15
2.3 日本国内での企業や自治体の取り組み	21
3. 森林の多面的機能の定性評価.....	33
3.1 森林が発揮する多面的機能と特徴.....	33
3.2 森林の多面的機能を発揮させるための森林づくり	34
3.3 我が国における森林管理の課題	35
3.4 多面的機能と森林づくり活動を関連づける	36
4. 森林による水源涵養機能（洪水緩和機能）の定量評価.....	41
4.1 カーブナンバー法について.....	41
4.2 国内水文観測データ（降水量・流量）の収集	44
4.3 日本版カーブナンバーの設定	49
4.4 カーブナンバーを使った計算例	57
4.5 早見表：洪水イベント単位から年単位への換算	61
5. 蒸発散モデル－蒸発散量と水資源涵養量	67
5.1 蒸発散モデルの概要	67
5.2 蒸発散モデルの詳細.....	69
5.3 蒸発散モデルを使った試算例	76
5.4 （参考検討）水資源涵養量の評価と検証	89
5.5 （参考検討）施業効果の評価と森林管理シナリオの例	94
参考文献.....	95

1. 資料の構成

1.1 目的

世界的な SDGs や ESG 投資への関心が高まる中、森林の多面的機能、特に水源涵養機能が再評価されている。日本でも企業が CSR や CSV 活動の一環として森林づくりに取り組む動きが広がり、地域住民や NPO と連携した活動が進展してきている。持続可能な社会の実現には、企業や地域が森林づくりの効果を定量的に評価し、それを外部に発信できることが重要である。

本資料では、企業が森林づくりを通じてもたらす水源涵養効果を簡易に評価できる手法を紹介し、たとえ専門知識がなくても評価結果を活用できるようにした。自らの森林づくり活動を外向きに発信し、活動の効果を広く共有することで、企業や自治体等の多様な主体による森林づくり活動が拡大していくことを期待している。

1. SDGs や ESG 投資など世界的な水セキュリティへの関心の高まりを受け、多面的機能の一つである水源涵養機能について、日本社会でも企業等における活用が活発化している。
2. CSR 活動や CSV 活動として、森林づくりに関わろうとする企業等が増加し、地域住民、NPO 等との協働、企業の所有林を活用した地域貢献など多様な取組が広がりをみせている。
3. 森林づくりの取組がもたらす具体的な涵養効果等を定量的に示し、企業等の多様な主体による森林づくりが一層促進されることを期待。
4. 本資料では水源涵養機能に関するこれまで蓄積された知見や研究成果等を踏まえて、簡易な定量評価手法を提示し、その普及啓発を促進することを通じて、企業の多様な主体による森林づくりに寄与する。

1.2 資料の内容

本資料は大きく4つの項目で構成される

- 2章：水に関する世界および日本での動き
- 3章：森林の多面的機能の定性評価
- 4章：森林による水源涵養機能（洪水緩和機能）の定量評価
- 5章：蒸発散モデルー蒸発散量と水資源涵養量

2章では、現在の水を取り巻く世界・日本での状況を簡単に整理した。SDGs や ESG 投資など世界的な水セキュリティへの関心の高まりから、水保全活動に積極的に取り組む機運が世界的に醸成され、日本企業においても自治体、企業等さまざまな主体において水保全活動が活発化してきている。いくつかの自治体・企業の取り組みを紹介した。また、海外で水の量的効果算定に利用される VWBA の概念と其中で用いられる定量化指標（VWB）を紹介している。

2章

背景

背景にある世界や国内での動きを知っておく

水に関する世界および日本での動き

世界的な水セキュリティ・水保全活動への関心
SDGs, CDP, VWB, VWBA, 国内企業の動向

3章

森林づくり活動の定性評価

気軽に森林づくり活動に取り組む人・企業に知ってほしいこと

森林の多面的機能の定性評価

森林づくり活動と多面的機能のつながりを知る
指標・めやすを設定し活動意欲向上をはかる

4章

森林づくり活動の定量評価

森林づくり活動の効果を対外的に発信したい人・企業向け

森林による洪水緩和機能の定量評価

カーブナンバー法による簡易な流量推定
VWB にならった洪水緩和機能の定量化

5章

蒸発散の評価

本格的に森林が発揮する水資源涵養量を定量化したい人・企業向け

蒸発散モデル

間伐等による蒸発散量の変化を知る
降水、蒸発散、流量を把握し水資源涵養量を知る

3章では、水に限定せずより幅広く森林が発揮する多面的機能と森林づくり活動のつながりを取り上げた。VWB等の指標は定量評価が前提だが、実際に定量評価を行うには相応の調査・計測や解析が必要とされ、誰でも実施できるものではない。定量評価を行う時間や資金が準備できない場合であっても、企業等が実施する森林づくり活動を定性的に評価し、外向きに発信する際の参考としていただきたい内容である。具体的な森林づくり活動とそこに含まれるだろう森林の多面的機能との関係を表形式で整理・提示した。

4章では、一步踏み込んで定量的に評価するための方法を提示している。水の量的効果指標 VWB の1つであるカーブナンバー法を、日本の水文観測データに適用し、日本向けのパラメータを設定した。その上で、水源涵養機能の中の1つである洪水緩和機能、つまり森林が流域からの水流出を遅らせ、洪水流量を減じる「流出低減量」を簡易に算定する方法を提示した。日本ではカーブナンバー法はこれまであまりなじみがなかったが、洪水流量等の検討においては簡易で使いやすく、VWB と歩調を合わせる計算法として採用した。

5章では、さらに踏み込んで森林からの蒸発散量を推定する、ある程度簡易な方法を提示している。蒸発散量が定量化されれば、水収支式から流量の算定が可能となる。流量計測をしていない場合でも森林づくり活動にともなう水資源涵養量を算定したいという熱量の高い企業・自治体等での利用を想定する。なお、5章の内容は最新の研究成果等を踏まえ構築しているが、今後、更新・修正される可能性がある。林野庁ウェブページ等で発信していくことから、利用にあたってはアップデート情報を検索するようお願いする。

1.3 検討委員会

本資料の作成にあたっては、森林水文学の専門家および民間企業の有識者からなる検討委員会を立ち上げ、2年間にわたり内容に関する審議・指導をいただきました。この場をお借りしてお礼申し上げます。

委員長	五味 高志	学識経験者	名古屋大学 大学院 生命農学研究科 教授
委員	白木 克繁	学識経験者	東京農工大学 農学研究院 自然環境保全学部門 准教授
	篠原 慶規	学識経験者	宮崎大学農学部 森林緑地環境科学科 准教授
	玉井 幸治	学識経験者	森林総合研究所 研究ディレクター (国土保全・水資源研究担当)
	瀬田 玄通	民間企業有識者	サントリーホールディングス株式会社 サステナビリティ 経営推進本部 部長

事務局運営：国土防災技術株式会社

2. 水に関する世界および日本での動き

2.1 水に関する世界的な動向

2.1 の要点

- 自然環境や生物多様性を重視する企業を、投資家が見分けられるように企業情報開示の枠組み（TNFD）が2023年に策定された。
- 水に関する Water Positive, Water Stewardship という概念が誕生。
- Water Positive は利用する水の量と質について、利用する水量と同等以上を地域に還元し、かつその質も担保または向上させること。
- Water Stewardship は自らが利用・調達する水だけを対象とするのではなく、他者とも協働し、流域全体を対象に水保全活動を計画・実行すること。
- 世界資源機構より VWB, VWBA という水の量的効果算出の共通ルールが策定・運用されている。
- CDP によるランキングもあり、グローバル企業はこれらの枠組みに正面から取り組まざるを得ない状況。

（1）TNFD と水に関する国際的な枠組み

TNFD フレームワーク（Taskforce on Nature-related Financial Disclosures）とは自然に関する国際的な「情報開示」の枠組みであり、水に関する「規格」、「目標設定と進捗管理」が組み込まれ、水評価のための世界的なフレームワークとなっている。

TNFD フレームワークが対象とするのは水だけでなく植物、昆虫や自然界全体であるが、比較的取り組みやすい水から始めた日本企業が多い。水との関わりが強い医薬・食品・農業・ICT エレクトロニクス業界などが情報開示とその取り組みを始めている。

また、非政府組織（NGO）である CDP（Carbon Disclosure Project）は、環境に関連する活動情報等の開示を企業に促し、企業から提出される開示情報（回答書）をもとにスコアリングしている。「気候変動（CO₂）」「フォレスト」「水セキュリティ」の3部門で、スコア A~D の4段階でランキングされ、最上位である A スコアを取得した企業を A リストとして公開している。投資家は CDP ランクを投資判断の参考とすることから、グローバル展開する企業にとって避けて通れない指標となっている。

以下、右上に「サントリーホールディングス」と記載のある図は、瀬田委員が2023.10.20 第1回委員会でプレゼンに使われた資料を引用し、一部改変したものである。

自然関連の枠組み開発と連携しながら、水の枠組みの統合が進む



(2) ウォーター・ポジティブ目標

TNFD 及び付随する枠組みからの要請に基づき、ネイチャー・ポジティブの水版であるウォーター・ポジティブ目標を掲げる企業が増えている。ウォーター・ポジティブとは、企業活動で使用（消費）する水量よりも多い水を地域に還元することをいう。

飲料メーカーのみならず、データセンター等で冷却水を多量に使用する IT 企業からも多くの参加がみられる。

■ 企業に相次ぐウォーター・ポジティブ目標

Company	Goal	Year disclosed	
Suntory	By 2030, replenish more than 100% of water used in at least 50% of our owned plants globally, including all those in highly water-stressed areas, through local water source conservation efforts.	Jan, 2022	自社工場の 50%以上で使用量の 100%還元
Coca Cola	By 2030, Replenish 100% of our water use where it matters the most (local regeneration, watershed replenishment and community resilience)	Mar, 2021	重要箇所における使用量の 100%還元
PEPSICO	Replenishing back into the local watershed more than 100% of the water we use	Aug, 2021	使用量の 100%還元
Cargill	By 2030, Restore 600 billion liters of water in priority watersheds	July, 2020	優先流域において 6 千億リットルを還元
Heineken	By 2030, fully balance within the local watershed every litre of water used in our products in areas that are water stressed.	Mar, 2019	水ストレスのかる箇所で使用量をすべて還元
Keurig	Replenish 100% of water used for its beverages in the Company's highest water-risk operating communities by 2030	Mar, 2022	水リスクの高い箇所で使用量の 100%還元
Microsoft	By 2030, we will be water positive, replenishing more water than we use.	Sep, 2020	使用量以上を還元
intel	By 2030, achieve net positive water use by returning and restoring more water freshwater than we consume	May, 2020	2030 年までに水収支プラスを達成
Google	Working to reduce, replenish and restore water across our offices and data centers. Replenishing more water than we consume by 2030.	Sep, 2021	2030 年までに消費量以上を還元
Meta	Restoring More Water Than We Consume by 2030.	Aug, 2021	2030 年までに消費量以上を還元

流域の水資源保全へ、ウォーターポジティブ目標を掲げる企業が相次ぐ

(3) ウォーター・スチュワードシップ (WS)

例えば自社の工場内で水の浄化、再利用を行うことは、水管理 (ウォーター・マネジメント) である。これに対して、自社の工場外、他者の管轄範囲も含め流域スケールで、水の取扱いについて行動を起こすことをウォーター・スチュワードシップと呼ぶ (WWF ジャパン, 2022)。

同じ水資源を共有する他の水利用者と連携、協力をして水の保全活動などを行う。

Water Stewardship は **WS** と略称で記載されることも多い。

「マネジメント」と「スチュワードシップ」

サントリーホールディングス

ウォーター・マネジメント



自社の敷地内に焦点を当てた以下の取り組み:

- ・水質汚染・水使用量の削減対応
- ・内部ガバナンス
- ・法令遵守
- ・すべての労働者が水、衛生設備、衛生施設を十分に利用できるようにすること

ウォーター・スチュワードシップ



ウォーター・マネジメントから発展した以下の取り組み:

- ・データ収集、計画、同じ水資源を共有する他の水利用者との連携や協力を伴う行動。
- ・他の水関連利害関係者とのサイトによる共同行動
- ・流域の水計画やその他の地域的合意との調整
- ・自社の敷地を超えた流域のスケールの状況に基づく活動

Alliance for Water Stewardshipによる講演資料を一部改変

(4) Water Replenishment (水の還元)

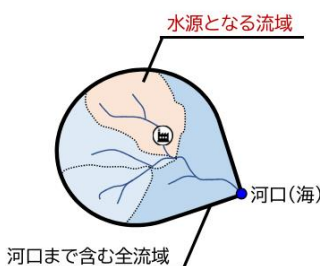
Water Replenishment (水の還元) とは、企業等の主体者が使用した水量と同量以上の水を流域に戻すことをいう。その定量化のための手法などが後述のVWB (Volumetric Water Benefit) となる。ウォーター・ポジティブを達成するための具体的な内容であり、ウォーター・スチュワードシップにおける基本目標となる。

Water Replenishment(水の還元)の定義

サントリーホールディングス

<p>水の還元の定義*</p> <p>* CEO Water Mandateガイドブック</p>	<p>以下の方法で使用した水と同量の水を水源となる流域に人為的に戻すこと</p> <ul style="list-style-type: none"> - 地域社会やステークホルダーと共有する、地域の水課題に取り組むこと - 企業のウォーター・スチュワードシップの先進事例と一致すること - 入手可能な最善の情報と流域の状況に基づいていること - そして流域の水賦存量、水質、アクセシビリティに測定可能なプラスの影響を与えること
--	---

《水の還元の対象となる場所》



《ウォーター・スチュワードシップの事例》



生態系や人間が利用可能な水を流域内で維持し、増やすことを目指す

(5) 水の量的効果の算出とその活用・VWBA

世界資源機構が2019年に出版した**VWBA**ガイド (Volumetric Water Benefit Accounting, Reig et al., 2019) は、水の量的効果の算出方法とその活用を定義したものであり、ウォーター・スチュワードシップにおけるデファクトスタンダード (事実上の標準) となっている。

■ 「利用可能な水」の量的効果の算出方法 – デファクトスタンダード化の動向 – サントリーホールディングス



流域保全活動の投資評価や便益評価へのニーズを背景に、食品業界を超えて様々な業界に採用が加速

VWB と VWBA の詳細については、次節 2.2 で詳しく説明する。

2.2 VWBA と VWB

2.2 の要点

● Volumetric Water Benefit (水の量的効果) と VWBA

- 世界資源機構より VWB, VWBA という水の量的効果算出の共通ルールが策定・運用されている。
- 水保全活動がもたらす効果を『水の量的効果』として具体的に算定する方法が VWB。
- 主だった VWB 指標として、A-1~A-10 の 10 種がある。表 2.1 参照 (p.18)。
- VWB 活用時の方針やルールを定めたのが VWBA。VWB Accounting の略。

● 森林に関連する VWB 指標

- 『水の量的効果』を算出する VWB 指標は 10 種あるが、そのうち森林に関連するものは表 2.2 に示す 5 種。さらに水源涵養機能の評価に使える指標は以下の 2 種。
 - A-1 : カーブナンバー法
 - A-5 : 流出低減法
- A-1 : カーブナンバー法は、アメリカを中心に世界的に広く利用されている。
- A-5 : 流出低減法は、低減率をどう設定するかが難しい。

(1) VWBA

ウォーター・スチュワードシップ (WS) と関連する形で水の量的効果の算出手法 (VWB) もしくは非量的な効果の評価方法を一定のルール下で整理したのが、世界資源機構が提唱する VWBA (Volumetric Water Benefit Accounting) である。VWBA は企業が VWB の活用をするための考え方や方法を規定した枠組みである。

VWBA は以下の 3 点を提供する。

1. 水の量的効果を算出する **VWB** 指標
2. 非量的なアウトプットを測定するための補完的指標
3. 社会的・経済的・環境的效果を生み出し、水課題の解決につながる **WS** 活動

VWB (Volumetric Water Benefit) は、「水の量的な効果」と訳され、ウォーター・スチュワードシップ活動に関連して得られる有益な水量評価のための手法である。

2019 年に世界資源機構が刊行した VWBA のワーキングペーパー (Reig et al., 2019) は以下の内容で構成される。

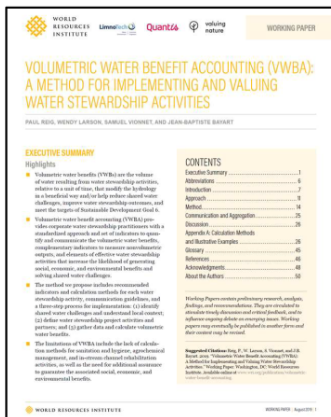
< 指針 >

- VWBA は、企業の意思決定により適用される。
- VWBA の策定にあたっては世界中の企業、NGO、プログラム、政府機関、学術機関など、主要な利害関係者と協議の上、開発された。
- VWBA の策定では、公表されている科学的エビデンス、経験、及び先進的な取組み例を参照している。

Volumetric Water Benefit Accounting (VWBA)

サントリーホールディングス

(Reig et al., 2019)



<p>水の量的な効果 Volumetric Water Benefit</p>	<p>ウォーター・スチュワードシップ活動に帰結して、単位時間に得られる水量のことで、水文を有益な方向に変化させるもの</p>
<p>ワーキングペーパーの構成</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● ウォーター・スチュワードシップ活動ごとに推奨される指標と計算方法 ● ステークホルダーとのコミュニケーションガイド ● 実施のためのプロセス <ol style="list-style-type: none"> 1. 水に関する共通の課題を特定し、地域の状況を理解する 2. ウォーター・スチュワードシップ・プロジェクトの活動とパートナーを定義する 3. データを収集し、水の量的な効果を計算する

< VWBA が求める手順 >

1. 流域の状況を理解し、関係者（パートナー）とともに共有する水課題を特定する。
2. ウォーター・スチュワードシップ（WS）の活動計画を策定し、パートナーと VWB 配分を決定する。
3. 必要なデータを収集し、VWB を計算する。

< VWB 指標及び計算方法 >

WS 活動の種類ごとに推奨される VWB 指標とその計算方法が提示されている。(2) に詳細を記述した。

WS 活動は多岐にわたるため、以下のような工夫を行ってもよい。

- 信頼性が高く、十分に文書化された別の方法が利用できる場合はその利用も可。
- 初期段階のプロジェクト評価や費用便益分析などでは、単純な推定値を使用する。
- 組織の WS 活動に関連した報告を行う際は、より詳細で複雑な推定値や測定値を使用する。

< 検討事項 >

以下の 5 点を明確に定義、報告する。

1. VWB の対象
2. VWB による社会的・経済的・環境的利益
3. VWB を算出する基準年とその後の予定

4.活動期間中の維持管理費とその資金や資源の調達計画

5.VWB の利用目的と対象流域内若しくは国際基準を満たす水質基準

(2) VWB

①VWB の特徴

VWB は水保全活動を定量化するための指標とその算定方法である。

VWB の特徴を以下にまとめた。

- VWB は企業等による水保全活動のプロジェクトあり/なしの差を評価する。すべての指標が差の形式で徹底している。プロジェクト後を単体で評価することはない。
- VWB では森林の存在そのものは評価対象ではない。ただし、VWB 算定時の前提事項として伐採の抑止等、森林が維持されるプロジェクトであるかの確認がなされる。
- VWB 指標で森林に関連しそうなものは、以下の5つである。
 - ・ A-1 : カーブナンバー法
 - ・ A-4 : 集水・浸透法
 - ・ A-5 : 流出低減法 (集水量法)
 - ・ A-7 : 涵養法
 - ・ A-8 : ハイδροグラフ法

表 2.1 Water Stewardship (WS) 活動/アクティビティと対応する VWB 指標

Reig et al., 2019 を基にサントリーホールディングスが和訳したものを一部改

分類	WS アクティビティ	VWB 指標	計算方法	付録番号
土地の保全 と修復	土地の保全（保全・保存）	流出回避	カーブナンバー法	A-1
	土地被覆の修復	流出低減		
水供給の 信頼性	水需要の少ない農業への転換	取水低減または 消費低減	取水法または 消費法	A-2
	水利用効率を高める施策	取水低減	取水法	
	漏水対策			
	消費者の水利用効率を高める施策			
	水の再利用			
	農作物の灌漑用水の新規確保	供給水量	供給水量法	A-3
	雨水回収	涵養増加	集水・浸透法	A-4
水アクセス	飲料水供給へのアクセス	供給水量	供給水量法	A-3
水質	農業の最適管理手法（BMPs）	流出低減	カーブナンバー法	A-1
	洪水流出の管理	集水量	流出低減法	A-5
	湿地処理システム	浄水量	浄水量法	A-6
	汚水処理施設			
水生生態地 の回復	湿地の保全	涵養維持	涵養法	A-7
	湿地の回復と造成	涵養増加		
	河川水を保持する法的取引	取水低減	取水法	A-2
	水流遮蔽物の除去	流況改善	ハイドログラフ法	A-8
	ダムの再稼働			
	遊水地/排水機構の再構築	目的に応じて	付録 A-7 参照	A-7
水統治	水統治による直接的関与、一般的な水管理	WS 活動と同じもの		A-9
保全活動	より長期的な視点で WS 成果をもたらす活動	WS 活動と同じもの		A-10

②具体的なVWB指標の紹介

10種類あるVWB指標のうち、森林評価に関連する手法を抜粋し、表2.2にまとめた。

これらのうち現実的に森林の評価に使えるものは、A-1:カーブナンバー法とA-5:流出低減法の2つとなる。

表 2.2 表 2.1 のVWB指標のうち森林に適用できるもの

計算方法	式
A-1 Curve Number method カーブナンバー法	$VWB = Q_{\text{baseline}} - Q_{\text{with-project}}$ $Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{(P + 0.8S)}, \quad S = \frac{25400}{CN} - 254$
	パラメータ： Q ：累積流量[mm]、 P ：累積降水量[mm]、 CN ：カーブナンバー カーブナンバー CN は、土地の種類や土地被覆特性により1~100の範囲で設定する。事業実施前と実施時それぞれに対して CN を設定する。
A-4 Capture and Infiltration method 集水・浸透法	$VWB = \text{Recharge}_{\text{with-project}} - \text{Recharge}_{\text{baseline}}$ $\text{Recharge} = \text{捕捉量} - \text{蒸発量} - \text{取水量}$ $\text{捕捉量} = \min(\text{利用可能な供給量}, \text{貯留可能量})$ $\text{利用可能な供給量} = \text{流域面積} \times \text{流出係数} \times \text{年間降水量}$ $\text{貯留可能量} = \text{設計貯留容量} \times \text{容量一杯になった回数}$
	パラメータ： 流域面積、流出係数、降水量、設計貯留容量、容量一杯になった回数
A-5 Runoff Reduction method 流出低減法 (集水量法)	$VWB = \Delta K \times \text{供給量}$ $\text{供給量} = \text{年平均降水量} \times \text{流域面積} \times \text{流出係数}$
	パラメータ： ΔK ：流出低減率（プロジェクト前・後の流出係数の差） 流域面積、流出係数、降水量、
A-7 Recharge method 涵養法	$VWB = \text{Recharge}_{\text{with-project}} - \text{Recharge}_{\text{baseline}}$ $\text{Recharge} = (\text{湿地の表面積}) \times (\text{土質に基づく浸透能}) \times (\text{湿地が氾濫している時間})$
	パラメータ： 湿地の表面積、土質に基づく浸透能、湿地が氾濫している時間
A-8 Hydrograph method ハイドログラフ法	$VWB = \text{ハイドログラフ}_{(\text{日単位})} \text{の差の足し合わせ}$ $\text{ハイドログラフ}_{(\text{日単位})} \text{の差} = \text{Flow}_{\text{baseline}} - \text{Flow}_{\text{with-project}}$
	モニタリング： 流量観測データ（プロジェクト前・後） パラメータ：（水理モデルを使いハイドロを推定する場合） マニングの粗度係数等、使用する水理モデルによる

(3) VWB2.0

情報収集中

2.3 日本国内での企業や自治体の取り組み

2.3 の要点

- **企業等による森林管理事例の収集・分析**
 - 各都道府県に「企業の森づくり」サポート制度あり。CO₂ 認証制度も活用されている。
 - 参画動機は社会貢献活動など対外アピール目的が多い。
- **企業・自治体へのヒアリング結果**
 - 簡便で、一定程度以上の科学性が担保され、投資家などへの説明が可能なもの
 - 先行する世界的なフレームワークと乖離しないこと（VWB など）
- **企業等が森林管理に参画することが容易となる仕組み**
 - 自治体制度の充実、経営層に対する PR、参画できる選択肢が多いこと
 - わかりやすく、他者（消費者など）に発信しやすいこと
 - 人材育成や鹿対策等に活用できる基金制度があれば、出資する企業も
- **企業等の取組みを促進させるには**
 - 都道府県の「企業の森づくり」サポート制度等の中で扱えること。
 - 簡易であること
 - 表彰制度とセットにすること（森林×脱炭素チャレンジなど）

（1）企業等による森林管理事例の収集・分析

企業等による森林管理は、国有林において 1992 年に「法人の森林」制度が創設されるなど古くから実施されており、特に 2000 年代に入り地球温暖化防止対策の重要性が認識される中で、都道府県を主体とした「企業の森づくり」サポート制度の充実が図られ「企業の社規的責任（CSR）」概念の浸透とともに拡大してきた。

都道府県が実施する「企業等の森林管理に携わる支援制度」は、ほぼ全国的に整備されている。表 2.3 は各都道府県のウェブで公表されている内容を整理したもので、支援内容の細部は若干異なるものの、都道府県による支援制度は、①企業等の直接的な森林整備（イベント程度も含む）、②都道府県の森林整備事業に対する資金提供（基金等）、③都道府県独自の評価制度、④CO₂ 認証制度（主に林野庁計算方式による認証）の大きく 4 つに区分される。一方で、市町村レベルでは、森林基本計画などの中で企業等との連携が謳われることは多いが、実際独自で企業等と積極的に連携している事例は少なく（小規模なものは存在する）、林業事業者や森林組合との具体的な森林整備の取組みが主となっている。

表 2.3 各都道府県で企業等が森林整備にかかわる制度の内訳
(都道府県が公開するウェブページの情報をもとに作成)

都道府県	森づくり活動	資金提供	評価制度	CO2 認証制度	都道府県	森づくり活動	資金提供	評価制度	CO2 認証制度
北海道	○				滋賀県	○			○
青森県	○		○		京都府	○			○
岩手県	○	○		○	大阪府	○			○
宮城県	○	○			兵庫県	○			
秋田県	○			○	奈良県	○			
山形県	○			○	和歌山県	○			○
福島県	○				鳥取県	○			○
茨城県	○				島根県	○			○
栃木県	○				岡山県	○	○		○
群馬県	○				広島県	○	○		
埼玉県	○			○	山口県				
千葉県	○				徳島県	○			○
東京都	△	○	○		香川県	○			
神奈川県	○	○		○	愛媛県	○			○
新潟県	○		○		高知県	○	○		○
富山県	○				福岡県	○			
石川県	○			○	佐賀県	○			
福井県	○				長崎県	○			
山梨県	○			○	熊本県	○			○
長野県	○	○			大分県	○			
岐阜県	○	○		○	宮崎県	○			○
静岡県	○			○	鹿児島県	○			
愛知県	○				沖縄県	○			○
三重県	○								

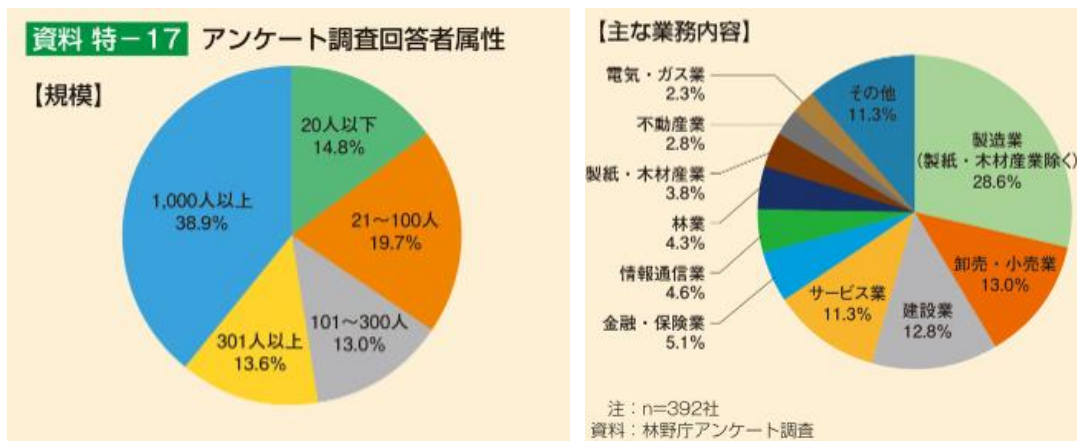
都道府県が実施する「①企業等の直接的な森林整備」の具体的な支援内容は、都道府県により様々なシステムが準備されており、企業が希望する内容を優先的に実施する形をとる場合や、都道府県が実施している森林整備事業の中の一部として組込む場合、都道府県ではなく市町村の森林整備事業の中（企業等は市町村と協定を結び都道府県はマッチング役）に組込む形などがある。また、参加登録の方法は様々であるが都道府県の HP 内で広報し、担当課に企業等が連絡（HP 上に申請書がある場合もあり）をおこなう形となる。

企業等が森林管理を行うモチベーションの一つとして、企業等の森林管理活動に対して都道府県が評価や認定をおこなう制度があるが、近年は CO₂ の認証制度を取り扱う都道府県が増加している。また、少数ではあるが入札制度に対する加対象や独自の認証制度を設ける都道府県も存在するなど、企業等が森林管理に取組みやすい（意義が持ちやすい）制度が整えられている。特に CO₂ の認証制度については、協定面積に応じた認証、実際の整備面積に応じた認証、支援した資金に応じた認証など、認証の仕方には幅がみられる（資金提供の場合は、支援資金で整備できる森林面積に換算して認証）ものの、いずれもある程度簡易に企業等が実施する森林管理活動を評価できるよう工夫されている。またその多くは、林野庁が公表する『民間企業の活動による二酸化炭素吸収・固定量の「見える化」実証事業』に基づく計算方法を活用している場合が多い。いずれの都道府県においても当該

活動に参加する企業名が公表されるなど、対外的にアピールできる体制が整備されている。

(2) 企業等による森林管理への関わりの目的・動機

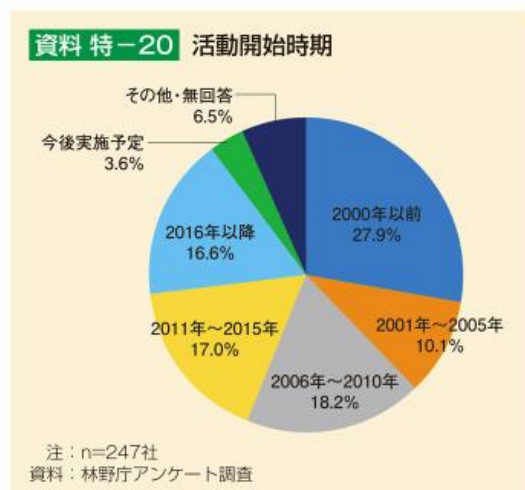
令和元年度 森林・林業白書では、特集 第3節で「企業等が森林にかかわる意向・活動調査」が取り上げられており、国内企業を対象とした Web アンケートにおいて図 2.1 に示すとおり幅広い規模・業種の企業から 392 社もの回答が得られている。このことから、少なくとも全国で約 400 社程度の企業等が、都道府県が整備した制度等をとおして森林整備活動に取り組んでいると考えられる。



(出典：https://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/hakusyo/r1hakusyo_h/all/tokusvu3.html)

図 2.1 アンケート調査回答者（国内企業）属性（令和元年度 森林・林業白書）

企業が森林管理にかかわる活動を開始した時期を問う設問では、図 2.2 に示すとおり 2000 年代に入ってから活動を開始した企業が約 6 割を超えており、近年、徐々に増加傾向にあることが分かる。

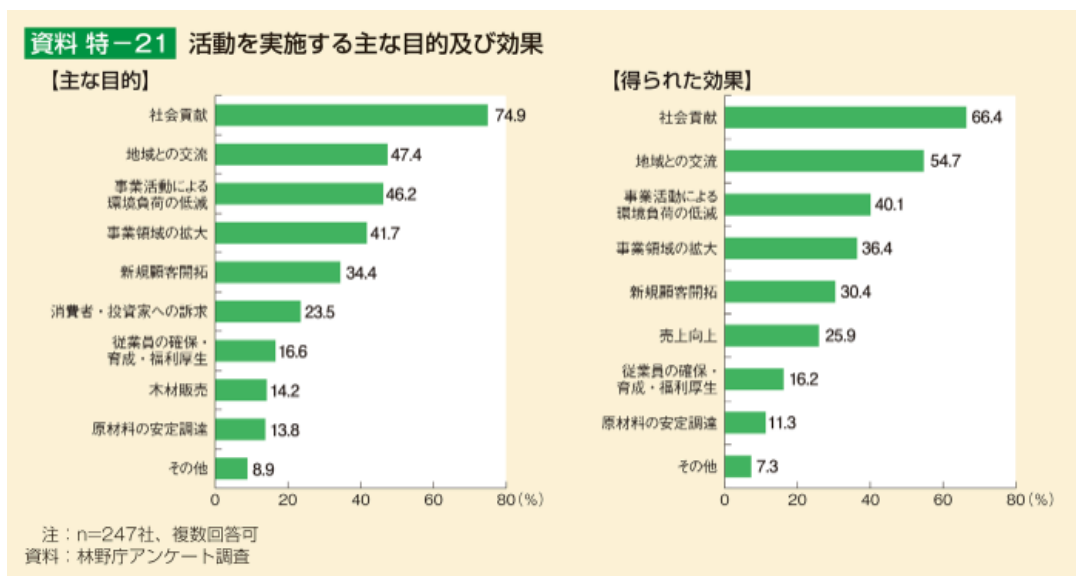


(出典：https://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/hakusyo/r1hakusyo_h/all/tokusvu3.html)

図 2.2 企業（n=247 社）の森林活動開始時期（令和元年度 森林・林業白書）

また、企業が森林活動に期待する効果（主な目的）としては、社会貢献が圧倒的に多く、次いで地域との交流、事業活動による環境負荷の低減、事業領域の拡大などが続く。「環境負荷の低減」や「事

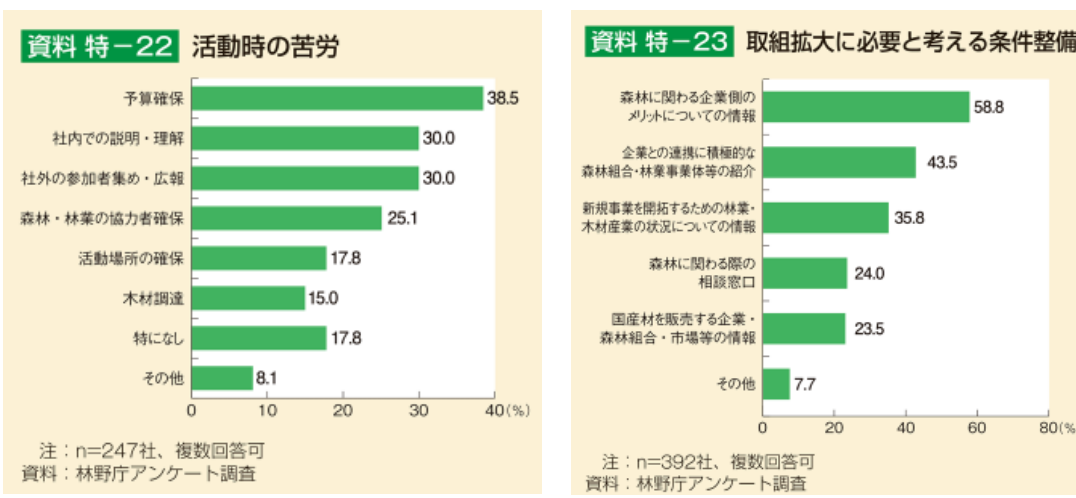
業領域の拡大」、「新規顧客開拓」などが上位になる理由として、SDGs や ESG 投資の考え方が世の中の流れとして一般化し、近年は CSR 活動だけでなく、事業活動を通じて森林に貢献しようという企業が増えていることが示唆される。そのため、企業等による森林管理が消費者に対する訴求効果（広告効果等）を期待できる（期待する）社会環境が醸成されつつあると考えられる。



(出典：https://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/hakusyo/r1hakusyo_h/all/tokusyu3.html)

図 2.3 企業が活動を実施する主な目的と得られた効果（令和元年度 森林・林業白書）

一方で、森林管理として実施されている活動としては直接的な森林整備はそれほど多くなく、関連 NPO への支援・寄付や従業員研修、地域住民等に対するイベントなど様々である。活動時の苦勞としては「社内での説明・理解」が上位に入り、取組拡大に必要な条件としても「森林に関わる企業側のメリット」が挙げられるなど、企業が森林管理活動を継続するためには取り組み意義や具体的なメリットを提示することが求められている。



(出典：https://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/hakusyo/r1hakusyo_h/all/tokusyu3.html)

図 2.4 森林活動時の苦勞（左図）と取組拡大に必要な条件（右図）（令和元年度 森林・林業白書）

企業等に対する具体的なメリットとしては、認証制度など企業等が実施した森林管理活動が評価され、他者（ステークホルダー等）に対してある程度の精度をもって示せることが重要となる。そのためには、森林管理がもたらす具体的なメリット（多面的機能の向上）や TNFD、CDP（水セキュリティ）、ウォーター・ポジティブなど国際的な水に関する枠組みに追随するような制度や適切な森林管理による CO₂ 等の吸収量を「クレジット」として国が認証する J-クレジット制度のような水に関する制度の創設が求められている。

（3）自治体へのヒアリング

企業等による森林活動への支援状況を把握するため、自治体に対しヒアリングを実施した。ヒアリング対象は表 2.4 に示す自治体で、対面にてヒアリングを実施した。

表 2.4 自治体ヒアリング先

自治体名	ヒアリング部署	ヒアリング方法
自治体 A	環境農政局	対面
自治体 B	農林水産部	対面
自治体 C	地域振興部	対面

主に企業等への支援活動制度や内容、水資源涵養量の評価への要望等についてヒアリングを行った。ヒアリング結果のうち、主な内容を以下に整理した。

企業等を支援する制度について（企業等が森林整備・管理活動へ関わるきっかけ）	
	自治体名の特定につながるため割愛
企業等が森林整備・管理活動にコミットしていくための施策など	
自治体 A	<ul style="list-style-type: none"> ✓水源涵養機能や多面的機能等、森林が果たす役割をわかりやすく伝え、管理などの重要性を理解してもらうことが大切 ✓CO₂ 認証制度のようにわかりやすく効果を表現することが重要で、水資源に関心を持つ企業等からは森林整備の効果を水量で出せないかと聞かれることもある
自治体 B	<ul style="list-style-type: none"> ✓企業等の経営層に森林整備・管理活動のような社会貢献活動があることを理解してもらう（気づいてもらう）仕組みの施策が有効（経済雑誌などに広告している） ✓実際の企業等による活動をイベントで発表してもらうなど、他企業が賛同しやすい環境づくりが必要 ✓CO₂ 認証制度のような企業活動をわかりやすく評価する手法の構築が有効
自治体 C	<ul style="list-style-type: none"> ✓財源よりもマンパワーが不足していることが、森林整備・管理活動が進まない原因であるため、<u>人材確保・育成のための基金などの重要性</u>を知ってもらいたい (当方の環境税は人材育成に使えないが、2017 年から国の森林環境譲与税が「林政アドバイザー制度」で活用できるようになったことは大きな進歩)
水源涵養機能の簡易評価手法への要望など	
自治体 A	<ul style="list-style-type: none"> ✓国が水資源涵養量の評価手法を公表してもらえれば<u>企業等のモチベーションが上がる可能性</u>がある ✓地質区分などを詳細に実施すると難しくなるため<u>簡便なものが良いが、国が示した評価手法をこちらで簡易なものに組み替えて運用することも可能</u> ✓なるべくバックデータを必要としない簡便な手法が望ましく、簡易手法と合わせ<u>興味のない人に HP など</u>で水源林整備の重要性を理解してもらうことも重要
自治体 B	<ul style="list-style-type: none"> ✓工場が増えた地域で水が足りるかという議論があり、水を使う企業に森づくり活動に携わってもらいたいと考えるが評価手法が無く困っていた。森林の水資源涵養量を数値化できる成果はとても助かる ✓ただし、<u>数値化に相当な労力がかかるようでは企業等も取り組めないため簡易な手法が望ましい</u>（実際の算定は自治体を実施しても企業等が実施してもよい） ✓要素がたくさんあるため平均的な考え方にならざるを得ないと思うが、ある程度簡易でないと活用されないため、樹種や地質ごとの面積から算出されるような手法が良い ✓J-クレジットのように複雑で外部委託が必要な内容であれば取り組めないため、林野庁が公表している CO₂ 算定手法（樹種と齢級、面積で計算可能）のようなものが良い
自治体 C	<ul style="list-style-type: none"> ✓水資源涵養量は雨の降り方や地形地質により大きく異なるため、極めて「複雑系」であるが、<u>企業が活用するためにはある程度簡易にすることが重要</u>。ただし、あまり単純化しすぎると説得力がなくなるため使用されなくなる可能性もある ✓企業が活用するためには、簡易にしながらもローカルな雨の降り方や地形地質を入れ込むなど、<u>ある程度科学性を担保した簡易式が必要</u>（環境投資の評価などに活用されることを考えると科学的な担保は必要） ✓<u>企業をひとくくりせず、水資源を多く使用する企業と単純に環境貢献したい企業等の度合いに応じて 3 区分くらいに分けるのもよい</u>（グループ分けの範囲などを示してもらえると企業も使いやすいのでは）

(4) 企業へのヒアリング（水資源と関わりのある企業）

実際に企業等がどのように森林活動へ関わりを持ち、どのような施策を実施しているかなどの詳細を把握するため、水資源に関わりのある飲料メーカーを中心とした企業にヒアリングを実施した。表 2.5 に示す企業で、対面形式と Web 形式である。

表 2.5 ヒアリング企業

	業種	ヒアリング
A 社	飲料メーカー	対面
B 社	飲料メーカー	対面
C 社	インフラ関連	Web

主に森林整備・管理活動の基礎情報、具体的な森林整備・管理活動の実施内容、活動によるメリットや苦勞・課題、企業等が森林整備・管理活動にコミットするための環境づくり、に関するヒアリングを行った。ヒアリング結果のうち、主な内容を以下に整理した。

森林整備・管理活動の基礎情報	
	社名の特定につながるため割愛
具体的な森林整備・管理活動の実施内容	
	社名の特定につながるため割愛
活動によるメリットや苦勞・課題、うまく進めるためのポイント	
A 社	<ul style="list-style-type: none"> ✓座学だけでなく実際に体験することで理解が深まり企業ブランディングの浸透に役立っている（自分の言葉で語れるメリット/エンゲージメント向上） ✓社外に対し CM 発信することで商品販売につながっている ✓<u>関係者とのしっかりとしたコミュニケーションを密にとることがポイント</u> ✓他社も意識が高くなっており同質化していくため差別化をはかることに苦勞 ✓森林整備・管理活動としては<u>鹿問題が最大の課題</u> ✓鹿の密度調整などはイメージの観点から一企業での実施は困難（狩猟のイメージ）なため、自治体などが窓口となり基金制度で狩猟をサポートする体制などが作られると解決の糸口となるのではと考えている
B 社	<ul style="list-style-type: none"> ✓水の大切さを理解し社業を進めていることを、営業で理解してもらいやすくなること ✓会社のシステム上、統一的な動きがとりづらいため<u>目的を明確にしてコミュニケーションをとりながら進めることがポイント</u> ✓<u>資金援助しても実際に作業できる人がいないこともあるため、バランスを確認しながら規模（年間計画）を検討している</u> ✓自社の目的でなく地域の課題に貢献しながら地域と一緒に進めることが重要 ✓水資源涵養量の達成が一番の目的であるが、<u>算定するための浸透率などが地域で異なるため文献などから引用するが、その正確性などの担保について苦勞している</u> ✓本社や監査法人から厳しいチェックが入るので、<u>適当な数値を使用するわけにはいかない</u>が、全てのデータが揃っているわけではなく難しい部分がある

C 社	<ul style="list-style-type: none"> ✓人材育成をとおして社員の社会貢献に対する意識が向上している ✓社外の人を招いて体験活動を実施することや人材育成事業をとおして社外 PR をはかっているが、それほど周知されているわけではない（積極的な広報を考えてはいない） ✓森林活動や育成事業では安全管理に気を使っている
企業等が森林整備・管理活動にコミットするために有効な行政の環境づくり	
A 社	<ul style="list-style-type: none"> ✓自治体に企業の森などの制度があれば枠組みに沿って協定できるため実施しやすい ✓鹿の問題で補助金の上乗せとして支援できるようなファンドの仕組みづくりなどがあれば企業が協力金提供できるのでは鹿問題も解決しやすい（流域だけでなく広域な問題であるため行政での枠組み作りが必要）
B 社	<ul style="list-style-type: none"> ✓森林を保全することと水資源を守ることが消費者目線で合致していない部分があり、何のために森を守るのかを伝えるのが難しいため、その浸透が有効 ✓森林を守っていることがどのような役に立ったのかを目に見えて評価いただけるような仕組みがあるとありがたい（例えば、脱炭素アワードの表彰など）
C 社	<ul style="list-style-type: none"> ✓実際に森林管理を委託している民間業者からは、森林整備に対する補助金の拡充や基幹林道の整備などが必要ということをよく聞く ✓特に奥地の作業が大変となるため、補助金などを検討していただきたい
水資源涵養機能評価手法について（簡易評価手法への要望など）	
A 社	<ul style="list-style-type: none"> ✓数値計算手法を使って水資源涵養量を計算し、直接的な指標としている ✓結果として水資源涵養量にフォーカスすることはあつてよいが、基本思想として利用可能な水量（水質）の観点も重要であり、<u>VWB などの思想を用いることがよい</u> ✓水資源涵養量は地形地質によりある程度決定するので、<u>水資源涵養量の全国のポテンシャルマップ（係数マップ）のようなものが整備されるとありがたい</u> ✓2023.9 から TNFD が進みだし、投資家に評価される CDP の参加企業も欧米に次いで日本が多く、来年からウォーターとフォレストも含め CDP がワンパッケージになる動きがある。<u>国が基本マップのようなものを公表すれば、各企業が水源涵養を簡易に評価できるようになり森林整備・管理活動に企業が参画するきっかけになると考える</u> ✓独自手法で水資源涵養量の算定をおこなっているため、今後提案される簡易手法を活用するかわからないが、基本マップができればその係数の活用は考えたい
B 社	<ul style="list-style-type: none"> ✓本社が世界の集計情報をレポート発信するため、<u>グローバルスタンダードに基づく算出方法が必要で、VWB の流出低減法とカーブナンバー法を使用している。</u> ✓日本では主に流出低減法を活用しているが、他国ではカーブナンバー法を活用している国が多い ✓グローバルスキームの中で実施しているため、日本独自の考え方が出されると活用できない。<u>グローバルスタンダードとかけ離れた評価手法にならないことを期待</u> ✓算定量などは本社や監査法人のチェックを受ける。現在は様々な文献から基礎データを引用しているが、<u>国がカーブナンバー法や流出低減法を活用する際の基礎データの指針を出してもらえると信用度があがり助かる</u> ✓水資源涵養量の算定手法として、流出低減法からカーブナンバー法に変更すると、現在算定している水資源涵養量から低下する可能性がある ✓算定手法を変えて現在の水資源涵養量から低下した場合、今までの活動を否定することにもつながり企業としてのリスクが大きいため、そのあたりの検討も必要と考えている（ただし、現在のグローバルの流れからはいずれカーブナンバー法に切り替える必

	要性も感じている)
C 社	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 統一的な指標を作成し、企業等だけでなく、森林組合や小規模林業者が導入し、そこにインセンティブ（例えば補助金を取りやすくなる等）を与えることで、日本の森林全体の管理が良い方向に向かっていくような使い方をしてもらいたい ✓ 企業も大企業が使えるようなものだけでなく、小規模な企業が活用できることも必要だが、ある程度根拠も必要となるため、そのバランスが重要 ✓ 国が検討する際には、理想論のような形を決めた上で情報を開示してもらえれば、企業として支援することができる可能性もある

（５）企業へのヒアリング（水資源や森林に直接関わりのない企業）

森林づくり活動を水資源に関係する企業だけでなく、広く一般企業に広げることを念頭に、水資源や森林に直接はかかわりのない企業にヒアリングを行った（表 2.6）。

表 2.6 企業等ヒアリング先

	業種	ヒアリング
D 社	飲食	対面
E 社	金融	対面
F 社	製造	対面

●森林整備・管理活動について	
	社名の特定につながるため割愛
●森林整備・管理活動実施による効果（メリット）や意識している機能	
D 社	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 活動の中でパートナーシップとのつながりを通常の業務（営業など）で役立てられることや社会貢献をしている会社であることを認識することで愛社精神がはぐくまれる ✓ 自治体や地域の人、客先（営業先）、従業員等に対するエンゲージメント向上が副次的効果として得られる ✓ 機能は特に限定しておらず、活動対象の森林が持つ課題を自治体や森林組合と話し合い活動をおし目指すべきテーマを設定している
E 社	<ul style="list-style-type: none"> ✓ GX に関する企業の取組支援を実施している中でコンサルする際の意識付けの入り口（教育の場）として活用（実体験の経験知は大きい） ✓ 先輩と後輩、様々な事務所に勤務している人々が一堂に集まり作業をすることでコミュニケーションツールの一つとして活用 ✓ 社外的には、15 年間 CSR 活動として継続し、客先に対し報告を行い、信頼感や企業イメージの向上が図られており広報として役立っている ✓ 特に機能は限定していないが CO₂ 関係以外に水資源へのつながりは学んでいる
F 社	<ul style="list-style-type: none"> ✓ セミナーなどがマスコミに取上げられることで CSR 活動が広報にも役立っている ✓ 数値整理は目的ではないが、CO₂ 排出量と森づくりによる吸収量を数値化したことで活動を後押しする形となり、参加者や周囲の理解が得やすくなった ✓ 社員教育として、役員と社員が同じレベルで活動する、あるいはお客さんと一緒に活動することでコミュニケーションや自覚の形成が進みやすい ✓ CO₂ 以外しっかりと意識していないが、洪水含む災害の緩和や水づくりに役立っている

	と感じている（魚関係の業者が水を扱う会社で森づくりに携わりたいと毎回参加）
●森林整備・管理活動での苦労やうまく進めるポイント	
D 社	<ul style="list-style-type: none"> ✓社内で社会的貢献活動の位置づけが明確なため社内的な苦労はない ✓森林の知識があまりない中で、テーマどおりの活動になっているかの評価が困難 ✓企業は支援者であり具現者ではないため、実際に森林整備・管理活動を行う森林組合などと信頼関係を構築するかが重要 ✓森林整備・管理活動を行う具現者と支援者がテーマを理解したうえでお互いにコミュニケーションを深めながら活動していけるかが重要
E 社	<ul style="list-style-type: none"> ✓経営者が経営判断で地域貢献として始めたため、企業内説明や理解への苦労はない ✓森林所有者職員の減少により現場活動の幅が狭まっている（企業論理だけでは地元負担を背負わせることになる） ✓相手（受け入れ側）に合わせたやり方を工夫・模索（逆を考えると森の管理者不足という山が抱えている課題を経験できる場にはなっている） ✓一度体験すると自分たちの関わった森がどうなっているのか興味が出て再度活動に参加し、楽しむ人が多く継続できている ✓同期同士のコミュニケーションの場として活用するなど工夫し一度体験してもらいと継続する（活動継続により企業内に意識浸透しているため「一度体験すると継続する」という経験知が得られている）
F 社	<ul style="list-style-type: none"> ✓経営層からは森林づくりをやるなどと言わないが、お金と時間をかけずにやってくれと言われる（担当者は呆然とすることが多い） ✓県の補助金などを有効に活用し初期費用確保や意義づけなどを行うと周囲の理解が進み活動しやすくなる（継続により周囲の理解が深まる） ✓森づくりはどこまでやらなければという目標値はなく継続を重視しているため、課題を抱えてまでは実施しないように意識（できる範囲で実施する） ✓活動のリーダーは必要だが人材の属人化は課題
●企業がコミットするために有効な行政の環境づくりや施策	
D 社	<ul style="list-style-type: none"> ✓企業の森林づくり制度については、事務手続きの簡素化や協定期間の自由度向上（例えば3年単位など）があると参加しやすい ✓J-クレジットのようにメリットを他者が確認しやすい指標があると有効 ✓指標や基準の明確化や（全国的な）統一化が図られ、それらが行政や世の中から必要（重要）とされていると社外発信等に活用したいという企業論理にかなうのではないかと
E 社	<ul style="list-style-type: none"> ✓導入部分のきっかけづくりの施策があるとありがたい ✓市民などが森づくりにアクセスできる機会は増えているが様々な世代・対象に対して幅広い施策があると実施しやすい（企業等が自ら参入することはハードルが高い）
F 社	<ul style="list-style-type: none"> ✓取組のきっかけづくりとして、XX 県の緑環境税はとても有効であった ✓予算が取れないときに苗代などの金銭補助があり、かつ補助金申請にあたり県が認めた事業という後ろ盾は活動の理由付けにもなりとてもやりやすかった ✓初期費用を企業がすべて準備するのはハードルが高いが、そこに補助金を活用できればあとは自走できるので最初のきっかけづくりと助成が大切 ✓社屋と関係する地域など活動場所を指定できれば目的が明確になるのでやりがいを感じる（活動の場所探しに苦労する）

●森林整備・管理活動評価や簡易評価手法（水源涵養関係）について	
D社	<ul style="list-style-type: none"> ✓一つの指標として活用できるため有用であると思うが、企業が活用するためには、世の中から企業の社会的責任の一つとして認識されていることが重要 ✓どのような目標を達成すれば企業の責務を果たしていることになるのかが社会に認識されていることも重要
E社	<ul style="list-style-type: none"> ✓森林の活動に対する評価指標はなく、定性的に参加人数、広報活動、社員の知識醸成になったか等を経営層にフィードバック（評価まではしていない） ✓県のCO₂吸収量評価は貢献度が具体的にわかるため、ありがたい ✓指標がオーソライズされ対外評価を受ける評価軸として認識されることが重要だが、国が定めた数値はステークホルダーへの公開指標として活用できる ✓上場企業としては、株主への公開義務が厳格化されている中で、日本独自に水源涵養に対する基軸が打ち出されることは説明責任を果たす中で重要 ✓森づくり活動がCO₂だけでなく水源涵養機能やその他の機能に役立つことが見える化されると良い（機能間の関係性が分かることは大切：一般的に知られていない）
F社	<ul style="list-style-type: none"> ✓数値化されることは企業にとって重要で森づくり活動を実施しやすくなると考える ✓CO₂のように県が計算して自動的に証明書を出してもらえると手間がかからず継続できるが、自分たちで計算することになるとハードルが高い（評価機関が有償で計算サービスしてくれれば活用する可能性あり） ✓CO₂のように簡易な水源涵養の認定があれば活用したい ✓様々な機能のつながりについて一般市民は理解していないため関係性が分かるとよい ✓地方では人口流入が重要だが地域の安心感もブランドになるため、森林活動との関係などが理解できると良いのではないかと ✓水源涵養という言葉が難しいため、何をどのように評価するのかをわかり易く表現することが必要
●中小企業等へ広めるために必要な施策	
E社	<ul style="list-style-type: none"> ✓J-クレジットのようにお金に換算できることは重要（明確な数値としての提示） ✓体力の不高くない中小企業は、いくら崇高な理念があっても具体的なインセンティブがないと力を入れにくい（例えば大手企業が評価してくれるなど） ✓自分たちが実施している事業に間接的にでも結び付くことが重要

（6）企業等が森林管理にかかわることが容易となる仕組みや要因

企業等が森林管理にかかわるための制度は、国、各都道府県のほとんどで整備されており、制度として充実している。ただし、各都道府県の制度内容は様々で、非常に手厚い支援を行っている場合もあれば、企業任せの制度もある。また、企業等の方も社会貢献が主ではあるものの、今回のヒアリング結果からは、企業の目的により森林管理に携わる重要度（意味合い）が大きく異なることも垣間見えた。

ヒアリングなどをとおして見えてきた、企業等が森林管理に関わることが容易となる仕組みや要因等（自治体との連携含む）の特徴は、下記のとおりと考えられる。

- ① 企業等が森林管理に関わる自治体の支援制度が分かりやすく整備されていること（マッチングや認証など制度の充実、アクセスのしやすさ等）

- ② 企業の森づくり制度等、自治体と協定を結ぶ制度については事務手続きの簡素化や協定期間（企業論理としては長期すぎると事業環境の変化や担当者の確保が困難になる等）の自由度向上が図られていること
- ③ 企業等が森林管理に関わるイベントを幅広く用意するなどきっかけづくりと初期活動費用の補助の整備が充実されていること
- ④ 規模の小さい企業等も参加できるよう複数の企業が合同で参画できること
- ⑤ 企業等の経営層が森林整備・管理活動の重要性を理解し、このような社会貢献活動があることを意識しやすい広報やPRをおこなうこと
- ⑥ 企業等が実施した森林整備・管理活動の評価が定量的にわかりやすく提示され、企業等が他者（消費者含むステークホルダー等）に対し発信しやすいこと
- ⑦ 企業等が森林整備・管理活動に参画しやすいよう選択肢を増やし、実際の活動だけでなく森林整備・管理活動の課題を解決できるような基金制度（人材育成や鹿対策等）などを設けること

また、検討中の「水源涵養機能の簡易な定量評価手法」を企業等が活用しやすくするために必要な事項は、下記のとおりと考えられる。

- ① モニタリングやデータ取得など大きな労力が伴う評価方法ではなく、ある程度簡便に評価できる手法であること（評価は自治体、企業等のどちらも行える形での公表が望ましい：CO₂の算定方法が参考になる）
- ② 企業等の目的は、業種や規模により様々で、企業等の目的・規模に応じてかかわり方や評価の仕方を選択できるような仕組みがよい（投資家の評価に活用できるレベルと社会貢献としてウェブで公表するだけのレベルでは求められる内容・精度が異なる）
- ③ 水評価のための世界的なフレームワークとしてすでに TNFD や CDP などがあり、水の量的効果算出手法としての VWB など、先行するこれらの考えからかけ離れたものとならないこと（投資家からの評価を得られる指標でなくなる可能性）
- ④ VWB で利用されるカーブナンバー法や流出低減法を活用するために必要となる基礎データの全国マップ整備などは、企業活動の効果算出の信用度が向上するため積極的に活用される可能性が高い
- ⑤ 指標がオーソライズされ対外評価を受けるための評価軸として認識されること
- ⑥ 都道府県が実施する CO₂ 吸収量認定制度のような認定制度として活用されること
- ⑦ 企業が自ら算出するだけでなく、行政などから自動的に認定されること（中小企業）
- ⑧ 森づくり活動が CO₂ だけでなく水源涵養機能含むその他の機能にも役立つことが見える化されていること

3. 森林の多面的機能の定性評価

3章の要点

- 本章では、森林が発揮する多面的機能の具体と森林づくり活動がこれら多面的機能とどうつながるのか、その定性的な傾向と評価をまとめた。
- 水の量的効果 VWB 指標は定量評価を行うことが前提だが、実際に定量評価をするには相応の調査・計測や解析が必要とされ、誰でも実施できるものではない。
- 定量評価をするほどの時間や資金が整わない企業等であっても、多面的機能と森林づくり活動とのつながりや、両者の関係を評価できるように多様な活動種と多面的機能の関係を表形式で整理・提示した。
- 自社の森林づくり活動を外向きに発信したいとき、または社員の参加意欲を向上させたいときなどに指標・めやすとして活用いただきたい。

3.1 森林が発揮する多面的機能と特徴

森林は、存在するだけで多様な機能を発揮するといわれておりそれを「森林の多面的機能」と呼ぶ。森林の多面的機能は表 3.1 に示す機能が知られているがこれらは下記の特徴を持つ。

【森林の多面的機能の特徴】

- ✓ 一つひとつの機能は単独ではそれほど強くなく限界があるが、多くの機能を重複して同時に発揮することができる
- ✓ 森林は国土の約 3 分の 2 と広大な面積を占めるが、それが他の環境要素（地形・地質等）とも複合し総合的に機能を発揮する（面的に広がりを持つことで大きな機能を発揮）
- ✓ 森林の多面的機能を高度に発揮させるには、森林が健全で持続的に保全されていることが重要であり、特に人工林は森林整備や伐採跡地での植栽等が必要となる

表 3.1 森林の多面的機能

【生物多様性保全機能】 ○遺伝子保全 ○生物種保全 ○生態系保全	【地球環境保全機能】 （地球温暖化緩和含む） ○地球温暖化緩和 ○地球気候システムの安定化
【山地災害防止機能/土壌保全機能】 ○表面侵食防止 ○表層崩壊防止 ○その他	【水源涵養機能】 ○洪水緩和 ○水資源貯留 ○水質浄化
【快適環境形成機能】 ○気候緩和 ○騒音防止など	【保健・レクリエーション機能】 ○療養 ○保養 ○レクリエーション
【文化機能】 ○景観 ○学習・教育 ○芸術 ○宗教・祭礼 ○伝統文化 ○地域の多様性維持（風土形成）	【木材等生産機能】 ○木材 ○食糧 ○肥料 ○飼料 ○薬品・工業原料 ○緑化材料 ○観賞用植物 ○工芸材料

3.2 森林の多面的機能を発揮させるための森林づくり

森林の多面的機能を発揮させるためには、健全な状態で保全されていることが重要となる。特に人工林は、放置すると樹木はお互いの成長を阻害し形質不良（いわゆるもやし状の森林）となることに加え、林床に光が差し込まないため下層植生が消失し土壌が流出するなど様々な問題が発生する。

そのため、計画的な森林整備が必要であり、一般的な森林整備としては図 3.1 に示す「地拵え」「植栽」「下刈り」「除伐」「枝打ち」「間伐」「主伐」がある。

■ 森林整備のイメージ

活動の目的と作業内容

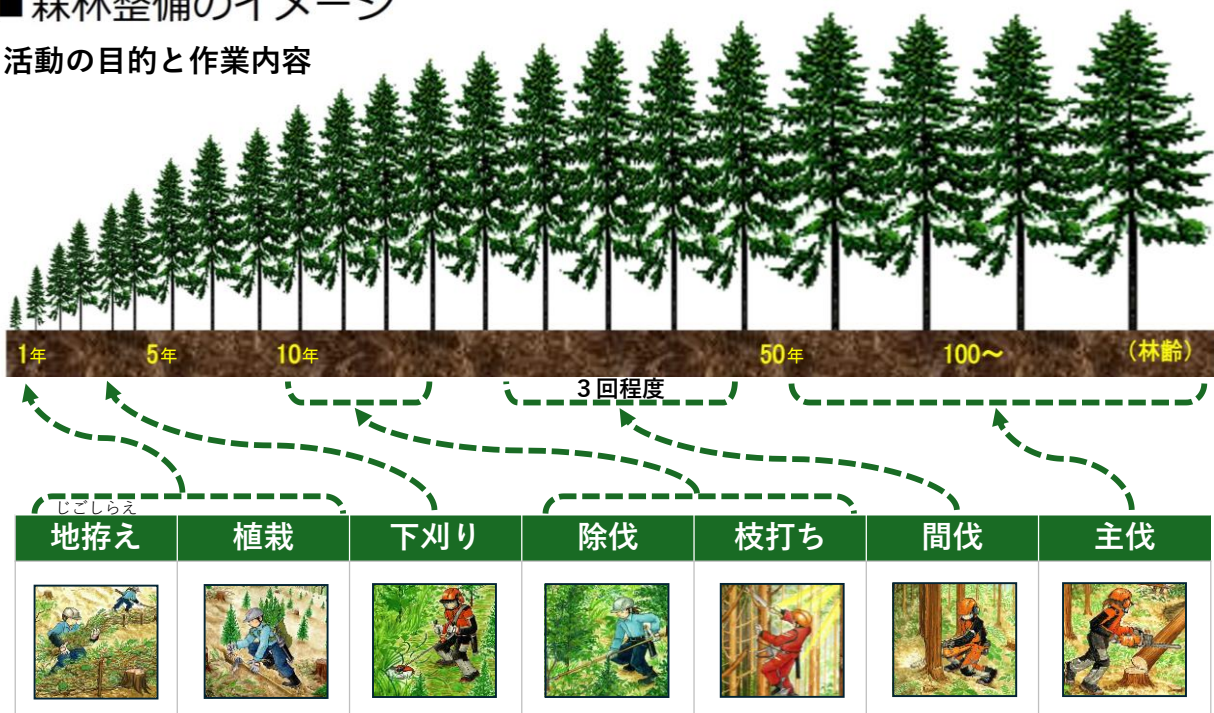


図 3.1 一般的な森林整備の内容（林野庁）

森林の多面的な機能を持続的に発揮させるためには、「伐って、使って、植えて、育てる」という森林資源の循環利用を推進することが肝要である。特に木材を積極的に利用することはカーボンニュートラルな社会の実現のためにも大切な要素となる。

森林の多面的な機能の発揮は様々な SDG s に貢献しており、さらに森林を利用するという行為が様々な SDG s に貢献し、そこから生み出される恵みを森林の整備・保全に還元させることで持続可能な大きな循環につながる（図 3.2）。

森林の循環利用とSDGsとの関係

きのこ・ジビエ等の利用



森林空間の利用



木材の利用



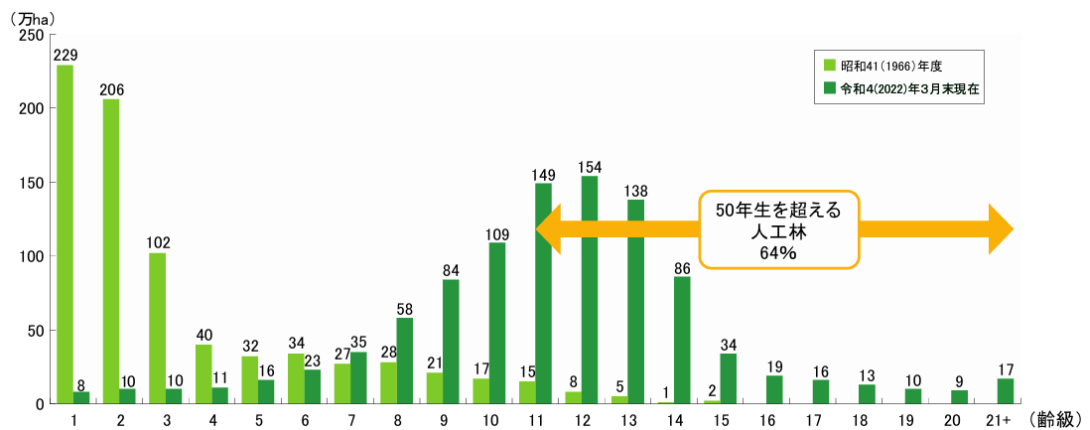
木材の生産・加工・流通



図 3.2 森林の循環利用とSDGsとの関係 (林野庁)

3.3 我が国における森林管理の課題

森林生態系多様性基礎調査によると、第1期（平成11～15年度）から第4期（平成26～30年度）の間に、森林面積は約25,500ha前後と大きく変化していないものの、蓄積は約55億m³から約86億m³と大きく増加している。これは、すでに伐期に達した森林が多くなり本格的な利用期を迎えていることを示している（図3.3参考）。前節に示したとおり、森林の多面的機能を持続的に発揮させるためには森林資源の循環利用を推進していく必要があるため、利用期を迎えている現在は間伐などの森林管理を継続するとともに主伐後の再造林を進めていく必要がある。しかし、林業経営体の減少や所有者不明（あるいは所有者が遠方に住んでいる等）の問題等により十分な管理が行き届かない森林の増加や主伐が伐採しやすい箇所へ偏り再造林されない場合がある等、様々な問題が発生している。



※「年齢級」は、林齢を5年の幅でくくった単位

図 3.3 人工林の年齢構成の変化 (令和5年度 森林・林業白書より)

また、近年の地球温暖化による気候変動の影響などによる豪雨で災害が増加しているなどの理由から、図 3.4 に示す通り木材等の生産だけでなく、地球温暖化防止といった「地球環境保全機能」や「山地災害防止機能」、洪水緩和や水資源貯留・水質浄化といった「水源涵養機能」などが求められており、これら森林の多面的機能を高度に発揮させるためにも森林を適切に管理する重要性が増している。

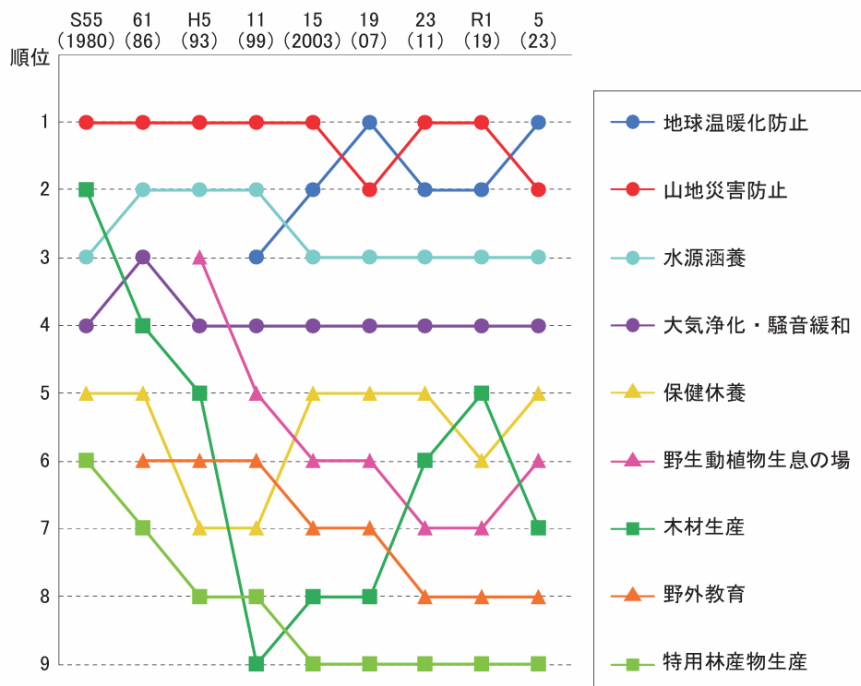


図 3.4 森林に期待する働きの変遷（令和 5 年度 森林・林業白書より）

3.4 多面的機能と森林づくり活動を関連づける

前節までに示したとおり、森林の多面的機能を発揮するため森林を森林として永続的に保全していくには、積極的な森林整備や管理への関わりが重要となる。近年は企業等の森林づくり活動に行政から CO₂ 認証（二酸化炭素吸収量の評価）をもらえる事例が増加するなどから、多様な主体が森林づくり活動に参画する機会が増えている。企業等が実施するこのような森林づくり活動は、表 3.1 に示す地球環境保全機能に対し効果を発揮していると考えられるが一つの機能だけでなく表 3.1 に示すその他の「多面的機能」にも大きな効果を発揮している。

そこで、企業等が実施する森林づくり活動が森林の多面的機能にどのような影響を及ぼすか、またどうすれば機能向上に向けた効果的な活動になるかを「見える化」できるよう、下記に示す目的で 3 つの表 A、B、C を作成した。なお、ここでは企業等の森林づくり活動に関係する機能（表 3.1 に示す 8 つの機能から快適環境形成機能・文化機能除いた 6 機能）について整理している。

（1）表の目的とねらい

以下の 3 つの目的を達成するため、表 A、表 B、表 C を作成している（作成途中）。

① 表 A：森林の多面的機能の容易な把握

⇒森林の多面的機能を整理した一覧表（森林の多面的機能一覧）

- ② 表 B：各機能別の森林の望ましい姿と重複して同時に発揮される機能の把握
⇒機能別の森林の望ましい姿と重複して発揮される機能を把握できる表（望ましい姿）
- ③ 表 C：企業等の森づくり活動における具体的な着目点や注意点の把握
⇒各森林づくり活動に対し注意事項などを示した表（活動の着目点・注意点）

（２）表の使い方

企業等が森林づくり活動を実施する際に、どの森林の多面的機能に貢献したいか、または実施したい活動があるがどのような効果があるかなどを確認するために使用する。特に、実際に森林整備を実施する森林組合などとのコミュニケーションツール（自身が実施したいことを的確に伝えるためのツール）として活用する。具体的には下記のような活用方法となる。

【活用事例 1：森林づくり活動が目的に合っているかを確認する場合】

- ① 貢献したい森林の多面的機能がある場合、「表 A：①森林の多面的機能一覧」で貢献したい機能の内容の確認
- ② 森林づくり活動で貢献できる場合は、「表 B：②望ましい姿」から、どのような森林の状態を目指せばよいかなどを確認
- ③ 実施する活動が決まれば、「表 C：③活動の着目点・注意点」から、活動時に留意すべき点を確認し実際の作業計画を立てる（あるいは、実際の作業員（管理者）と話し合う）

【活用事例 2：今まで実施してきた森林づくり活動が何に役立っているのかを確認したい場合】

- ① 「表 C：③活動の着目点・注意点」から実施してきた活動がどの機能の発揮に特に貢献してきたかを確認
- ② 「表 B：②望ましい姿」から関係する重複機能を確認
- ③ 「表 A：①森林の多面的機能一覧」によりどのような内容に貢献していたかを確認

なお、森林の多面的機能に関しては下記の資料が参考となる。

※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，H13）

※森林の有する多面的機能について（林野庁 HP）

[\(https://www.rinya.maff.go.jp/j/keikaku/tamenteki/\)](https://www.rinya.maff.go.jp/j/keikaku/tamenteki/)

※森林・林業基本計画（令和 3 年 6 月）

表A 森林の多面的機能の一覧

日本学術会議 平成13年11月答申より

【生物多様性保全機能】 ○遺伝子保全 ○生物種保全 ○生態系保全	【地球環境保全機能】 (地球温暖化緩和含む) ○地球温暖化緩和 ○地球気候システムの安定化
【山地災害防止機能/土壌保全機能】 ○表面侵食防止 ○表層崩壊防止 ○その他	【水源涵養機能】 ○洪水緩和 ○水資源貯留 ○水質浄化
【快適環境形成機能】 ○気候緩和 ○騒音防止など	【保健・レクリエーション機能】 ○療養 ○保養 ○レクリエーション
【文化機能】 ○景観 ○学習・教育 ○芸術 ○宗教・祭礼 ○伝統文化 ○地域の多様性維持 (風土形成)	【木材等生産機能】 ○木材 ○食糧 ○肥料 ○飼料 ○薬品・工業原料 ○緑化材料 ○観賞用植物 ○工芸材料



内閣府世論調査(R5) 国民が期待する森林の働きベスト3
平成25年度、27年度森林・林業白書を元に作成

【ポイント】

- ・森林の多面的機能は、単独の機能のみが発揮されるのではなく、多くの機能が重複して発揮される。
- ・森林の多面的機能が将来にわたって持続的に発揮されるようにするためには、人間の働きかけによって健全な森林を積極的に造成し、育成する「森林整備」が必要となる。
- ・特に、人工林や里山林では引き続き人間が手入れをすることによって、健全な森林として維持しながら利用することができる。

【生物多様性保全機能】

多種多様な樹木や下層植生等で構成され、希少種を含む多様な生物の生育・生息の場を提供する機能

【地球環境保全機能】

光合成を行って成長することに伴い、温室効果ガスである二酸化炭素を吸収し、炭素を貯蔵することによって、地球温暖化の防止にも貢献する機能



【山地（土砂）災害防止機能/土壌保全機能】

樹木の根が土砂や岩石等を固定することで、土砂の崩壊を防ぎ、また、森林の表土が下草、低木等の植生や落葉落枝により覆われることで、雨水等による土壌の侵食や流出を防ぐ機能

【水源涵養機能】

土壌がスポンジのように雨水を吸収して一時的に蓄え、徐々に河川へ送り出すことにより、洪水を緩和するとともに、雨水を水資源として貯留し、あわせて水質を浄化する機能



【快適環境形成機能】

気温や湿度等を適度なものとするほか、強風やこれに伴う飛砂及び塩分、騒音、塵埃等から、農地、道路、鉄道、住環境等を守る機能

【保健・レクリエーション機能】

人間の健康の維持・増進やレクリエーション活動の場として重要な役割を果たす機能

【文化機能】

史跡や名勝等と一体となって文化的価値のある景観や歴史的風致を構成したり、文化財等に必要な用材等を供給する機能

【木材等（物質）生産機能】

木材、山菜・きのこ等の林産物を産出する機能

表 B

企業等の活動による効果と多面的機能の関係表

> 森林の多面的機能は重複して発揮されます。各課題を解決するために必要な「森林の目指すべき姿」を達成することで、他の機能の発揮を同時に達成することも可能です。
 > この表は、達成したい目的の森林の状況と必要な活動種（基本活動含む）、同時に発揮可能な機能（主な機能）を整理しています。

機能	森林の目指すべき姿	森林づくり活動	機能
地球環境保全	【樹種】 ✓ ✓ ✓ 【あるべき姿】 ✓ ✓ ✓	イメージ図 	【森林がない場合】 ・ 【森林がある場合】 ・ 【その他の活動】 ・
物質生産	【樹種】 ✓ ✓ ✓ 【あるべき姿】 ✓ ✓ ✓	イメージ図 	【森林がない場合】 ・ 【森林がある場合】 ・ 【その他の活動】 ・
保健休養・文化	【樹種】 ✓ ✓ ✓ 【あるべき姿】 ✓ ✓ ✓	イメージ図 	【森林がない場合】 ・ 【森林がある場合】 ・ 【その他の活動】 ・

表 C

活動種の目的・注意点

目的	「造林」活動			「育林」活動			「更新」活動	
	地帯え	植栽	下刈り	除伐	枝打ち	間伐	主伐	樹種転換
水源涵養	植栽の準備を行うために、必要に応じて伐採した後の枝葉やササ等の整理を行う。	伐採跡地などに新たに森林を造るために、苗木の植付けを行う。	植栽木を健全に成長させるために、植栽木の生育を阻害する周りの雑草木やつるを刈り払う作業を行う。	植栽木を健全に成長させるために、植栽木の生育を阻害する雑木を伐る。とともに、植栽木の中で曲がったり、成長が悪い木を伐る作業を行う。	節のない良質な柱や板を作るため、また、光を森林の中に届けて病虫害を防ぐために、ある高さまでの生き枝を、その付け根付近から除去する。	健全な森林を育成するため、過密な森林の一部を伐採し、本数を調整する作業を行う。	林木を収獲し利用するための伐採であり、更新を伴うものを指す。主伐の方法には、皆伐と択伐がある。	樹種転換
山地災害防止								
生物多様性保全								



4. 森林による水源涵養機能（洪水緩和機能）の定量評価

4章の要点

- 本章では、水源涵養機能の定量評価を簡易に行うための1つの方法を提示する。
- 水保全活動の定量指標 VWB の1つであるカーブナンバー法を、日本の水文観測データに適用し、日本向けのパラメータを設定した。
- 定量化の対象としたのは水源涵養機能の1つである洪水緩和機能、つまり森林が流域からの水流出を遅らせ、洪水流量を減らす「流出低減量」である。
- 「流出低減量」は「水資源涵養量」そのものには該当しないが、VWBでは「水の量的効果」の指標の1つとして用いられている。
- 日本でカーブナンバー法はこれまであまりなじみがなかったが、世界で使われる VWB と同調する計算法として採用した。
- 「流出低減量」ではなく「水資源涵養量」を定量化したい場合は、5章の蒸発散モデルを用いて蒸発散量の推定を行う必要がある。

森林による水源涵養機能の1つである洪水緩和機能を簡易に推定する方法を提示する。水文学の手法としてカーブナンバー法を用い、降水量をインプットとして森林が流域からの水流出を遅らせ、洪水流量を減らす量である「流出低減量」を算定する。

4.1 カーブナンバー法について

(1) カーブナンバー法とは

カーブナンバー法は SCS 法 (Soil Conservation Service、合衆国土壌保全局) と呼ばれ、土地被覆・土地利用・土壌に基づき、カーブナンバー CN (1~100) を決定し、累積流量を推定する経験的手法である (Reig et al., 2019、Susan et al., 2011 参照)。

カーブナンバー法で降水量 P に対する、流量 Q は(1)式であらわされる。

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad \cdots(1) \quad \text{ただし、} P \geq 0.2S$$

Q : 累積流量[L]、 P : 累積降水量[L]、 S : 最大貯留量[L]

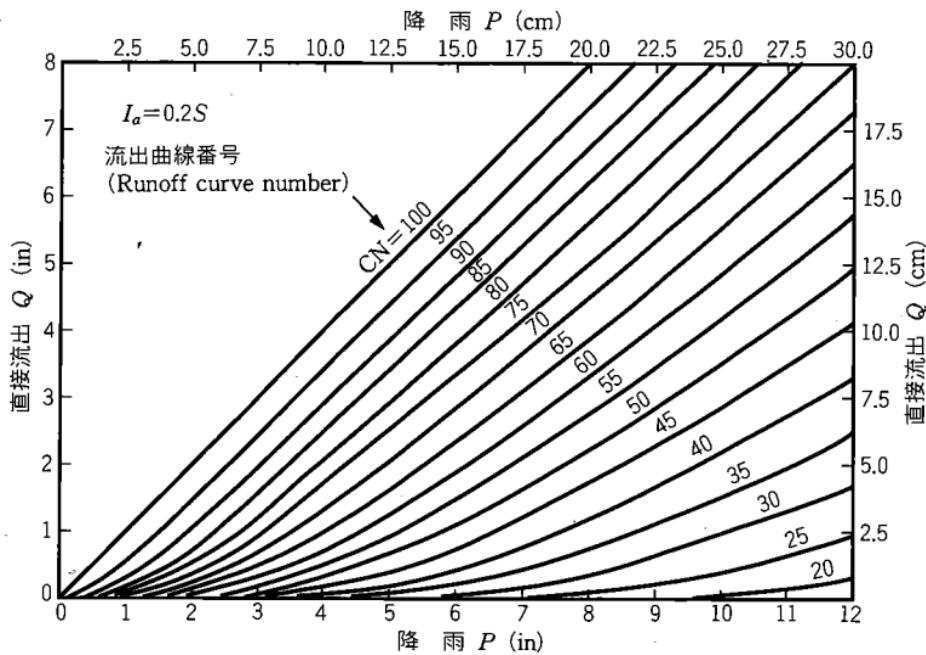


図 4.1 カーブナンバー法で算出される $Q-P$ 図 (水村 1998 より引用)

ここで、最大貯留量 S は(2)式で求められる。 S は土壌、土地利用、土地管理、斜面の変化に依存するが、カーブナンバー (以降 CN) がそれら特徴量を表現するパラメータとなる。

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad \dots(2) \quad Q、P、Sの単位が \text{mm} の場合$$

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \quad \dots(2)' \quad Q、P、Sの単位が \text{inch} の場合 (オリジナル文献)$$

CN : カーブナンバー

$CN=1$ では最大貯留量 S が最大値 25146mm となり、すべての降雨を貯留できる大容量のため流量はゼロとなる。 $CN=100$ では最大貯留量 S が 0 となり、降雨を貯留できずすべての雨はそのまま流量となる。そうした配分をカーブナンバー CN が調整する。

降水量と流量が判明している場合には、カーブナンバーの逆算が可能で CN 値は、水高単位が mm の場合は下式で得られる。

$$CN = \frac{1000}{10 + 0.1969P + 0.3937Q - 0.3937\sqrt{Q^2 + 1.25PQ}} \quad (3) \quad \text{単位が mm の場合}$$

以降の試算では(3)式を使い、 Q : 累積流量[mm]と、 P : 累積降水量[mm]から、 CN を算定する。

(2) アメリカ農務省が設定したカーブナンバー

VWB (Reig et al., 2019) で利用され、アメリカ農務省のハンドブック (National Engineering Handbook, 2004) で値が設定されているカーブナンバー (CN) の値を表 4.1 に示す。

VWBにおけるカーブナンバーの使い方は、裸地と森林がある場合の2つを比較し、森林が存在する場合に流域からの流出流量が低減する、その流出低減量を評価する。裸地と比べた場合に森林の存在効果を流出の低減水量として算出・評価する形である。

なお、アメリカでは、HSG (Hydrologic Soil Group、水文学土壤分類) と呼ばれる独自の土壤分類 A~D を用いて、地盤の透水状態がCNに反映される (National Engineering Handbook, 2009)。

表 4.1 A-1:カーブナンバー法による裸地→森林転換時の流量低減

植生	林床被覆状況	カーブナンバー CN				年雨量 1500 mm に対する流量 Q [mm]			
		A	B	C	D	A	B	C	D
裸地		77	86	91	94	1413	1451	1470	1481
森林	一部	45	66	77	83	1183	1354	1413	1439
	概ね	36	60	73	79	1068	1314	1393	1422
	全体	30	55	70	77	967	1277	1377	1413
$Q_{\text{裸地}} - Q_{\text{森林}}$		流量低減率				裸地からの流量低減 [mm]			
VWB 試算	一部	15%	6%	4%	3%	230	97	57	42
	概ね	23%	9%	5%	4%	345	137	77	59
	全体	30%	12%	6%	5%	446	174	93	68

流量低減率：(裸地からの流量－森林からの流量)/(年雨量)×100

水文学土壤分類 **A, B, C, D**：アメリカ独自の判定基準により土壤浸透能が反映されたもの
林床被覆状況：

一部：林床に落葉落枝がない部分が林床面積の半分以上

概ね：林床面積の半分以上が落葉落枝に覆われている

全体：林床全体が落葉落枝に覆われている

表 4.1 はアメリカで使われるカーブナンバーの値であり、日本の森林や水文条件においてそのまま適用できるものではない。したがって、日本でカーブナンバーを使うには日本向けの値を設定する必要がある。

4.2 国内水文観測データ（降水量・流量）の収集

日本版のカーブナンバー（CN）を設定する目的で国内の降水量と流量データが公開される文献を集めた（表 4.2～表 4.5）。4.2 節の文献は（6）文献リストに一覧を掲載した。

（1）森林総合研究所の理水試験地

森林総研が古くから観測している試験地として、表 4.2 に示す 5 試験地、11 流域がある。

表 4.2 森林総研の理水試験地（長期理水試験地）の概要と対象の観測地点

試験地名	地質	観測地点		集計期間 ^{※2}
		降水量	流量	
定山溪 (文献ア,イ)	石英斑岩 (第三紀層)	気象露場	時雨 1 の沢 時雨 2 の沢	2008～2017
釜淵 (文献ウ,エ)	凝灰岩・頁岩質凝灰岩 (第三紀層)	基地露場	1 号沢 2 号沢 3 号沢	2007～2016
宝川 (文献オ,カ)	5 割が花崗岩、4 割が凝灰岩 (第三紀層)、1 割が蛇紋岩	藤原 (気象庁) ^{※1}	本流	2007～2016
竜ノ口山 (文献キ,ク)	主に古生層堆積岩（古生層）、 一部（北谷右岸と両谷最下流部）が 斜長流紋岩、石英斑岩、黒雲母花崗岩 および花崗斑岩などの火成岩	露場	南谷 北谷	2006～2015
去川 (文献ケ,コ)	頁岩優勢で砂岩、石灰岩、礫岩を含む (中生層)	気象観測露場	1 号沢 2 号沢 3 号沢	1996～2005

※1 試験地内の気象露場では降水量を観測しているが、1～4、11～12 月は冬期間のため観測中止しており、近郊にある気象庁の藤原雨量観測所のデータを降水量として用いた。

※2 計測期間が非常に長い試験地があるため、直近の公開データから過去 10 年間で統一。CN 算出時、降水量もしくは流量で欠測のあった日は全ての同日のデータを集計から除外する。



図 4.2 森林総研の長期理水試験地の分布図

近年あらたに整備された試験地として、表 4.3 に示す 4 試験地、5 流域がある。

表 4.3 森林総研の理水試験地（新たに整備された試験地）の概要と対象の観測地点

試験地名	地質	観測地点		集計期間
		降水量	流量	
小川ブナ保護林 (文献サ)	主に変成岩（中生層）、 一部花崗岩	気象露場	小川	2001～2005
常陸太田 (文献シ)	緑色片岩（中世層）	基地露場	HA	2006～2008
筑波 (文献ス)	黒雲母片麻岩（中・古生層）、 一部花崗岩	A 地点	流域末端	1979～1987
鹿北 (文献セ)	結晶片岩（中生層）	雨量計 (WS2 下流)	WS2 WS3	2000～2008



図 4.3 森林総研の新たに整備された試験地の分布図

(2) 論文等から入手した森林流域の観測データ

公開論文等で入手できるものとして、表 4.4 に示す 8 試験地、9 流域の降水量、流量データを文献より入手した。

表 4.4 文献 17～文献 22 の概要と対象の観測地点

	流域名	地質	観測地点		集計期間
			降水量	流量	
篠原ら (文献ソ)	御手洗水	緑色片岩、蛇紋岩 (中生層)	東尾根	流域末端	2003～2007
地頭菌ら (文献タ)	高隈第 1 号 試験流域	火山砕屑物 (第四紀層)	雨量計 (下流端)	流域末端	1985～1988
	高隈第 2 号 試験流域	火山砕屑物 (第四紀層)	雨量計 (下流端)	流域末端	1987～1988
	郡山試験 流域	安山岩・凝灰岩 (第三紀層)	雨量計 (下流端)	流域末端	1985～1988
福崎ら (文献チ)	裏筑波 流出試験地	主に花崗岩、 一部が斑レイ岩	流域周辺 3 箇所	流域末端	1970～1977
石井 (文献ツ)	片品川 流出試験地	火山噴出物 (中生層)	露場	流域末端	2010～2019
福嶋ら (文献テ)	梁ヶ谷 試験地	粘板岩、砂岩、チャート (古生層)	R2	流域末端	1979～1980

福崙ら (文献ト)	桐生	花崗岩	露場	流域末端	1968
	川向	花崗岩	水位観測 小屋	流域末端	1968

(3) 裸地流域

裸地流域の観測データについては、入手できたのは下記の1文献(文献23)のみである。

表 4.5 裸地流域での観測地点概要

	流域名	地質	観測地点		集計期間
			降水量	流量	
福崙 (文献ナ)	裸地谷	花崗岩	若女	流域末端	1983

(4) 収集水文データ

収集データの流域数と期間は表 4.6 の通りである。

日本国内では裸地流域の水文データが少ない。裸地で収集できたのは、1流域1年のデータのみであり、このデータだけをもとにカーブナンバーを決定することは難しい。

表 4.6 収集した水文データの流域数と観測期間

	流域数	観測年数の合計
森林流域	25	113年
裸地流域	1	1年

(5) 収集データの地質区分

収集した流域データの地質情報を整理し、流域を代表する地質区分として、以下の4種を用いる。なお中生層と古生層は別々にデータ整理を進めたが、両者で得られるCN値に大きな違いがみられなかったことから、ひとまとめに中古生層という括りを採用した。

第三紀層、第四紀層、花崗岩、中古生層

(6) 文献リスト (水文データ収集)

収集した水文観測データは以下の文献内容に基づく。

- ア) 阿部俊夫・山野井克己・溝口康子・北村兼三 (2014), 定山溪森林理水試験地観測報告 (2008年1月~2012年12月), 森林総合研究所研究報告, 13(4), 207-223.
- イ) 延廣竜彦・山野井克己・溝口康子・阿部俊夫 定山溪森林理水試験地観測報告 (2013年1月~2017年12月), 森林総合研究所研究報告, 19(2), 195-217.
- ウ) 野口正二・村上亘・阿部俊夫・細田育広 (2023), 釜淵森林理水試験地観測報告 - 1・2・3号沢試験流域 - (2006年1月~2010年12月), 森林総合研究所研究報告, 21(4), 275-303.
- エ) 久保田多余子・野口正二・阿部俊夫 (2023), 釜淵森林理水試験地観測報告 - 1・2・3・4号沢試験流域 - (2011年1月~2016年12月), 森林総合研究所研究報告, 21(4), 305-355.
- オ) 久保田多余子・野口正二・清水貴範・阿部俊夫・清水晃・壁谷直記・延廣竜彦・飯田真一・玉井幸治・村上茂樹・澤野真治・坪山良夫 (2020), 宝川森林理水試験地観測報告 - 本流・初沢試験流域 - (2001年1月~2010年12月), 森林総合研究所研究報告, 19(4), 373-400.
- カ) 玉井幸治・久保田多余子・野口正二・清水貴範・飯田真一・澤野真治・延廣竜彦・荒木 誠・坪山良夫 (2021), 宝川森林理水試験地観測報告 - 本流・初沢試験流域 - (2011年1月~2016年12月), 森林総合研究所研究報告, 20(1), 49-67.
- キ) 細田育広・小南裕志・深山貴文・岡野通明・後藤義明 (2019), 竜ノ口山森林理水試験地観測報告 (2006年1月~2010年12月), 森林総合研究所研究報告, 18(1), 111-128.
- ク) 細田育広 (2023), 竜ノ口山森林理水試験地観測報告 (2011年1月~2015年12月), 森林総合研究所研究報告, 22(2), 89-107.
- ケ) 清水晃・宮縁育夫・清水貴範・小川泰浩・大丸裕武・佐藤保・竹下幸 (2008) 去川森林理水試験地観測報告 (1987年1月~2000年12月), 森林総合研究所研究報告, 7(1), 13-65.
- コ) 浅野志穂・清水晃・壁谷直記・萩野裕章・玉井幸治 (2011), 去川森林理水試験地観測報告 (2001年1月~2005年12月), 森林総合研究所研究報告, 10(1), 49-71.
- サ) 阿部俊夫・藤枝基久・壁谷直記・久保田多余子・野口宏典・清水晃・坪山良夫・野口正二 (2011), 小川群落保護林における水文観測報告 (2000年8月~2007年9月), 森林総合研究所研究報告, 10(4), 291-317.
- シ) 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伴う蒸発散量の変化, 日本森林学会誌, 95(1), 37-41.
- ス) 森林総合研究所森林環境部水土保持科水資源保全研究室・水流出管理研究室 (1993), 筑波森林水文試験地観測報告 (1978年5月~1987年12月), 125-168.
- セ) T. Shimizu, T. Kumagai, M. Kobayashi, K. Tamai, S. Iida, N. Kabeya, R. Ikawa, M. Tateishi, Y. Miyazawa, A. Shimizu (2015): Estimation of annual forest evapotranspiration from a coniferous plantation watershed in Japan (2): Comparison of eddy covariance, water budget and sap-flow plus interception loss, *Journal of Hydrology*, 522, 250-264.
- ソ) 篠原慶規・井手淳一郎・藏本康平・小松光・大槻恭一 (2009), 御手洗水試験流域の流量・気象観測

報告, 九州大学農学部演習林報告, 90, 51-87.

- タ) 地頭菌隆・下川悦郎 (1990), 南九州における火山砕屑物に覆われた森林流域の流出特性, 水文・水資源学会誌, 3(1), 7-16.
- チ) 福崎博彰・佐合純造・長谷川正 (1980), 裏筑波流出試験地の流出特性について, 土木学会第 35 回 年次学術講演会講演概要集, 2, 232-233.
- ツ) 石井隼樹 (2020), 片品川流出試験地について, 令和 2 年度スキルアップセミナー関東 (関東地方整備局), 一般(安全・安心(1))(防災)部門.
- テ) 福嶋義宏・鈴木雅一・友村光秀 (1981), 梁ヶ谷試験地の水文観測報告, 京都大学農学部演習林報告, 53, 131-143.
- ト) 福嶋義宏・加藤博之・松本潔・西村武二 (1972), 花崗岩山地の 2 つの小流域について : 地形・植生・水収支・流出減衰曲線からみた特性, 京都大学農学部演習林報告, 43, 193-226.
- ナ) 福嶋義宏 (1987), 花崗岩山地における山腹植栽の流出に与える影響, 水利科学, 31(4), 17-34.

4.3 日本版カーブナンバーの設定

表 4.6 に示す森林 25 流域の 113 年分のデータを基に、日本版のカーブナンバーを地質区分別に設定する。

(1) 洪水イベント単位での雨量・流量データの再整理

収集された降水量および流量を日単位で整理し、日降水量[mm]と日流量[mm]を基本データとした。カーブナンバー法は洪水イベントを対象とする。以下の手順で洪水イベント開始日と終了日を判断し、イベント中の日降水量と日流量を積算し、洪水イベント単位の降水量 [mm]と流量 [mm]を整理した。準備できた洪水イベント数を表 4.7 に示す。

カーブナンバーの算定は、この洪水イベント単位の積算降水量と積算流量を対象とした。

データ単位：日降水量[mm]、日流量[mm]

イベント開始判断：日降水量 20mm 以上が出現した洪水イベント

イベント終了判断：イベント開始日の流量を下回った日の前日まで

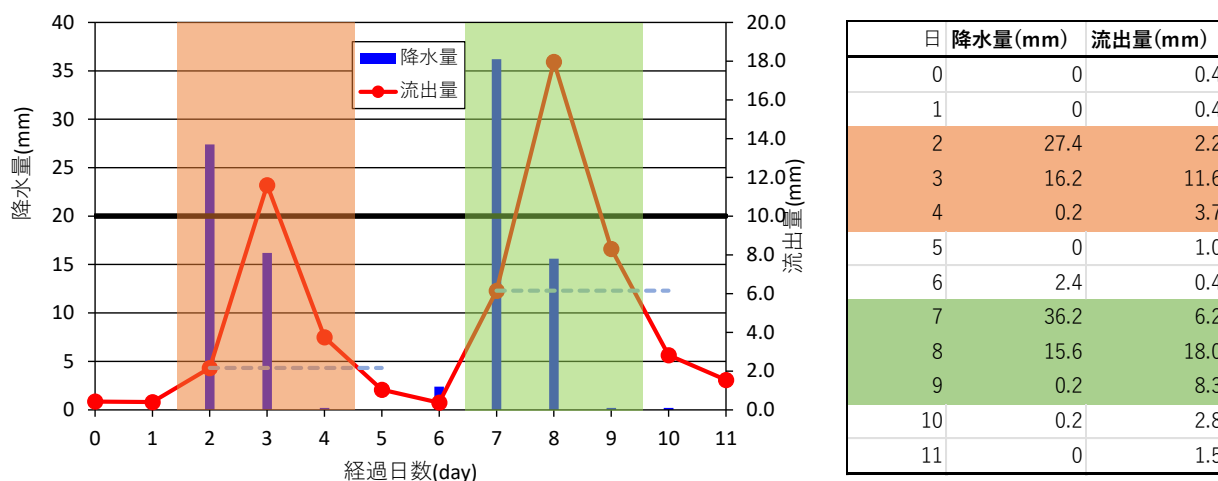


表 4.7 用意できた洪水イベント数 (データ総数 N=3042)

	第三紀層	第四紀層	花崗岩	中古生層
洪水イベント数	1126	45	471	1400

(2) 洪水イベントごとの降水量・流量データ散布図

各洪水イベントでの積算降水量と積算流量データを基に、散布図を作成した (図 4.4)。

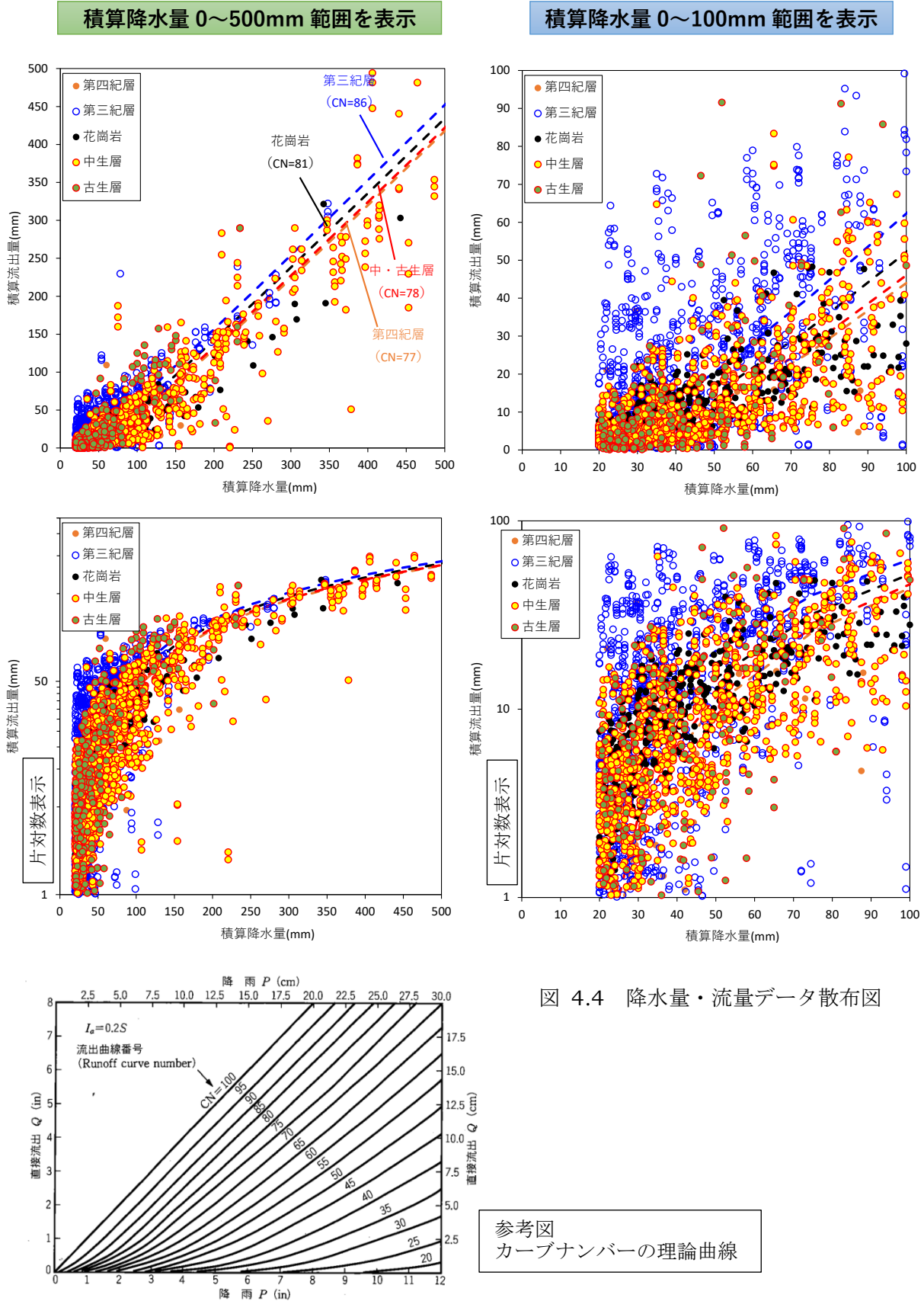
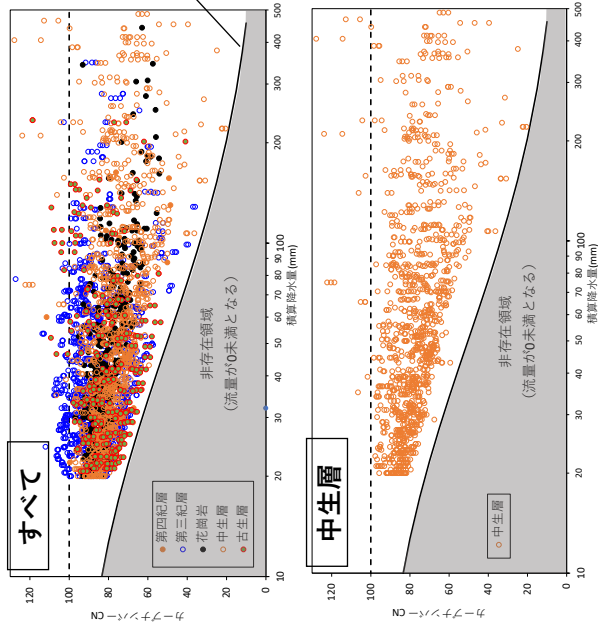
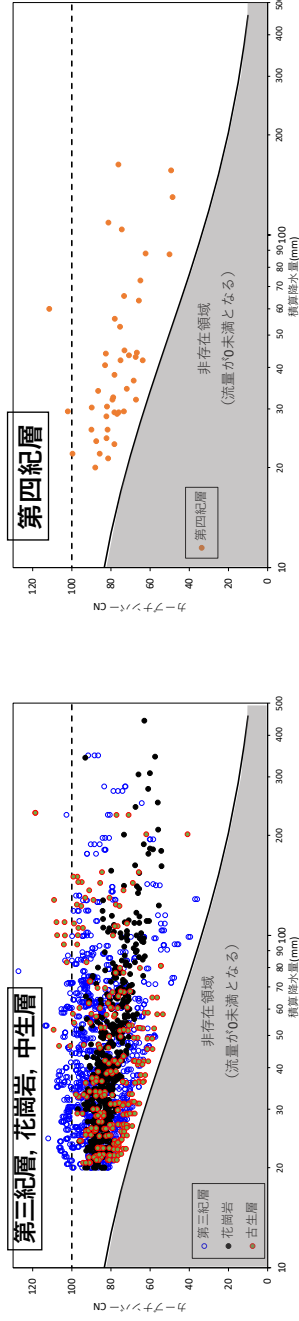


図 4.4 降水量・流量データ散布図

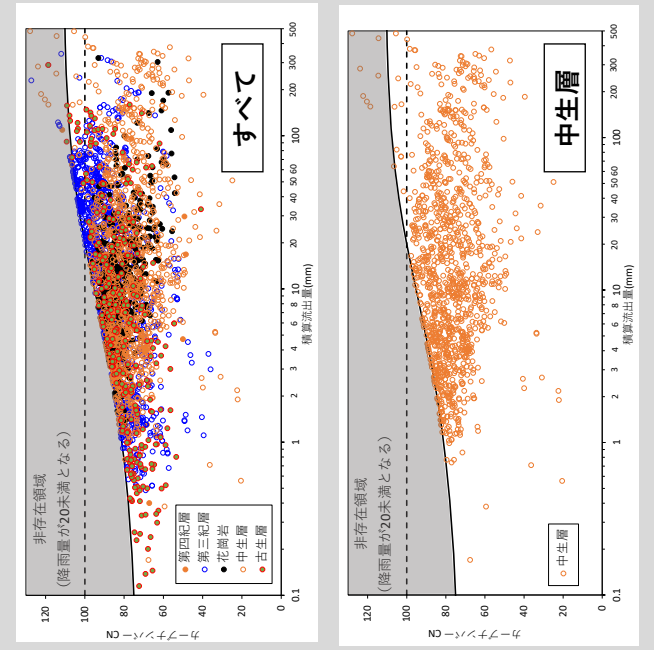
カーブナンバーと積算降水量



CN法の式で流量が0となる理論線
このラインより下にプロットされることはない



カーブナンバーと積算流出量



CN法の式で降水量が20mmのときの理論線
20mm 超の降水のみを対象としているため
このラインより上にプロットされることはない

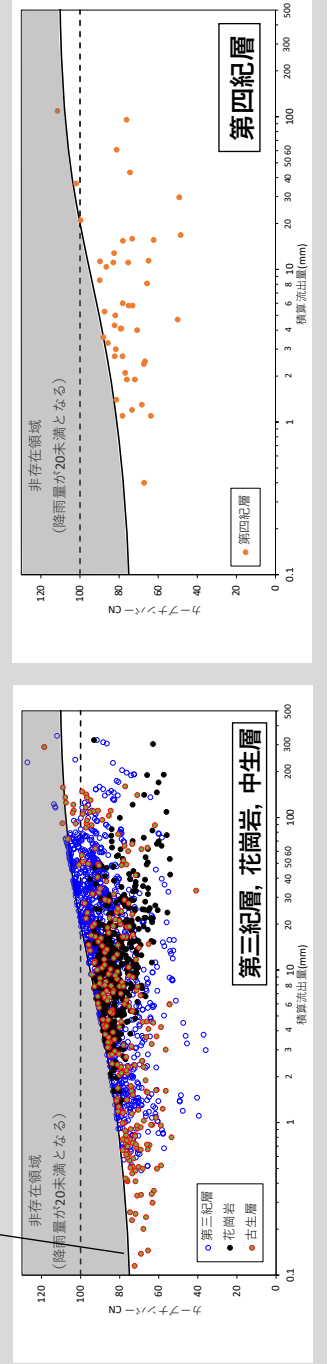


図 4.5 カーブナンバーと降水量・流量データの散布図 (洪水イベント単位)

(3) カーブナンバーの算定 (洪水イベントごと)

抽出された洪水イベント (総数 $N=3042$) ごとに、積算降水量 P と積算流量 Q のデータを用いてカーブナンバー CN を算定した。

CN は(3)式で算定した。洪水イベントごとに CN 値が1つ得られる。

$$CN = \frac{1000}{10 + 0.1969P + 0.3937Q - 0.3937\sqrt{Q^2 + 1.25PQ}} \quad (3)\text{の再掲} \quad \text{水高単位が mm の場合}$$

図 4.5 は洪水イベントごとに得られた CN 値を縦軸とした散布図である。図 4.5 では、流量がゼロとなる理論曲線を黒いラインで記載した。黒ラインはカーブナンバー法の数式を変形して得られる理論曲線である。

理論曲線 (黒ライン) をみると、積算降水量が 30mm 未満の洪水イベントから算出されるカーブナンバー CN は理論的に 60 以上の値となることがわかる。積算降水量が 100mm 以上の比較的規模の大きい洪水イベントでは CN 値が 80 超の大きな値となる場合もあれば、40 のように小さな値の両方を取り得る。これはカーブナンバー法の数式が有する理論特性となる。

算定された地質区分ごとの CN 平均値 (図 4.6 の×) に基づき、理論的に定まるカーブナンバー曲線を図 4.4 に挿入している。

(4) カーブナンバーのばらつき

図 4.4 や図 4.5 からわかるように、降水量～流量散布図のばらつきは大きい。

ばらつきを可視化するため、得られた CN 値 (総数 $N=3042$) の箱ひげ図を作成した (図 4.6)。

箱ひげ図で箱の高さは、データ全体の 25% (第一四分位数) ～75% (第三四分位数) の分布範囲をあらわす。箱の高さ (75%–25%) を四分位範囲 (IQR) と呼ぶ。どの地質区分でも箱の高さ (IQR) が 10 以上あり、ばらつきが大きい。もっともばらつきが小さいのは花崗岩で、IQR は 10.2 となった。

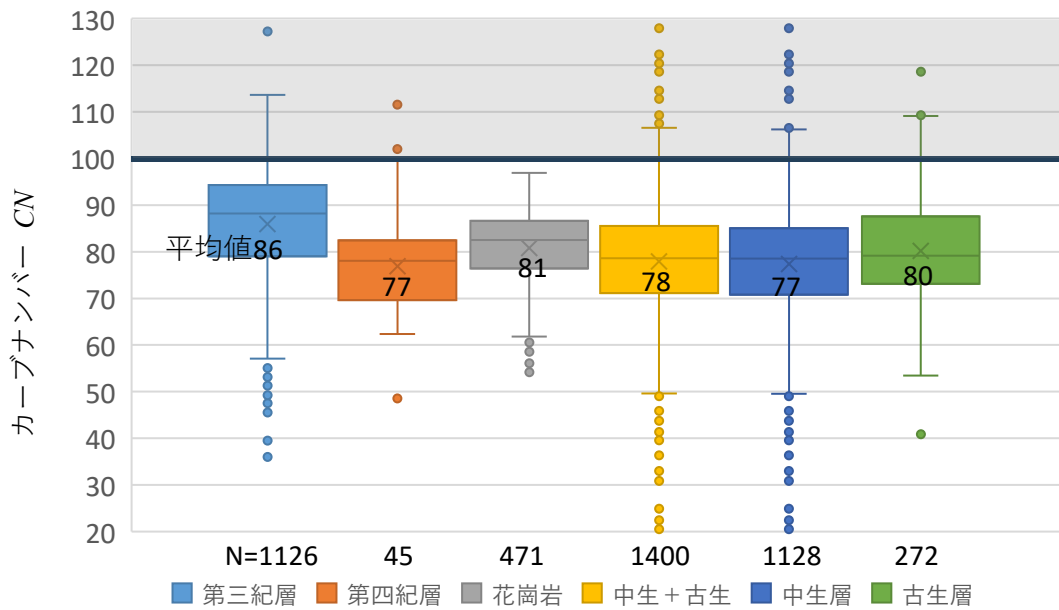


図 4.6 カーブナンバーCN値（洪水イベント単位）の箱ひげ図

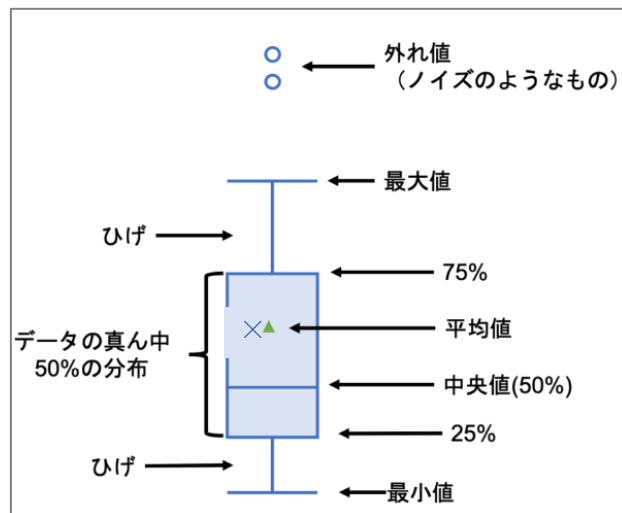


図 4.7 箱ひげ図の見方

洪水イベントごとに算定されるカーブナンバーCN値は、ときに100以上となる場合がある。これは抽出されたイベント降水量よりイベント流量が多い場合で、水文観測においては流出遅れ等によりそのようなデータが取得されることが時々ある。降水全量が流出量となるのがCN値=100であり、本来物理的には100が上限である。しかしながら、この後CN値の平均を取る、外れ値の検定等、CN値をベースとした統計作業を行うことから、CNが100を超えた場合でも100に足切りせずそのままの値とした。

(5) 地質区分別のカーブナンバー

(3) で算定した洪水イベントごとのカーブナンバーCN値を地質区分別に平均を取り、表 4.8 を得る。

表 4.8 日本における地質区分別のカーブナンバー
(降水量 20mm 以上の洪水イベントを対象とした場合)

	第三紀層	第四紀層	花崗岩	中古生層
カーブナンバー CN	86	77	81	78

第四紀層はデータ（洪水イベント）数 N が 45 と他の地質区分と比較して少なく、第三紀層に含めることも考えたが、図 4.6 でみるように平均値や IQR（箱の高さ）範囲が第三紀と第四紀では大きくずれていることから、第三紀と第四紀は別々の区分とした。

一方、中生層と古生層はカーブナンバー CN の平均値が 77 と 80 で近く、IQR の分布位置も大きく変わらないことから、中古生層とまとめ 1 つの地質区分として扱うものとする。

(6) 裸地相当のカーブナンバーの設定

VWB 指標の多くは、評価したい機能の有/無による違いを定量化する。水源涵養機能を定量化するためには、森林が存在する場合と森林が存在しない場合を比べることになり、裸地におけるカーブナンバーを決めておく必要がある。すなわち、森林が存在するときのカーブナンバー（表 4.8）と裸地のカーブナンバーのそれぞれで流量を求め、その差を求める。

裸地のカーブナンバー設定を検討する。

4.2 (3) に記したように、裸地流域で取得できたデータは 1 流域 1 年分のみであり、カーブナンバー代表値を得るに足るデータ数が入手できていない。現在の日本で裸地といえる箇所がそもそも少なく、継続的な観測対象となっていないためである。本来は観測データに基づいて裸地のカーブナンバーを設定することが望ましいが、ここでは森林流域データのうち、もっともカーブナンバーが大きい（洪水緩和機能が低い）値となるケースを取り上げ、これを裸地相当のカーブナンバーとみなすこととする。

図 4.8 は図 4.6 の再掲で、カーブナンバー値のばらつきを示したものである。箱ひげ図の箱部分 (IQR) は、データの 25~75% 分布範囲を示し、その外に伸びた線 (ひげ) がそれぞれ統計的に有意と判断された最小値と最大値を表している。線 (ひげ) の外は統計上のはずれ値と判断されたデータであり (○プロットで描画)、いわばエラー値である。

裸地相当のカーブナンバーとして統計で有意と判断される最大値を採用することとし、外れ値の検定を詳細に行った。

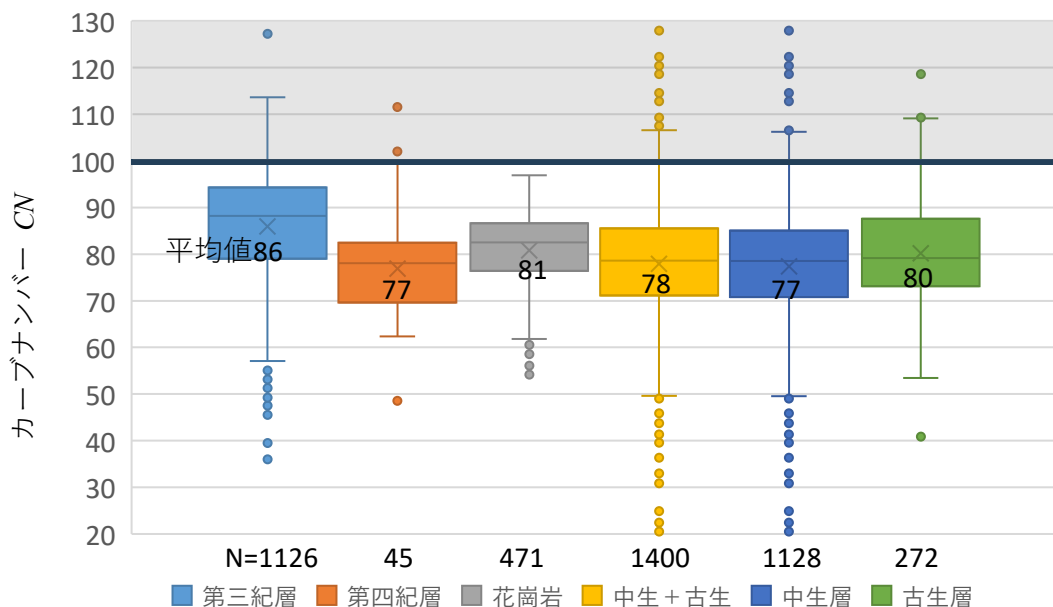


図 4.8 カーブナンバーCN値（洪水イベント単位）の箱ひげ図（図 4.6 の再掲）

統計的な外れ値の検定には幾通りかの手法があり、複数の方法で検討を行う。

なお、検定で得られるカーブナンバー値は小数点以下を有する実数だが、カーブナンバーは整数で利用することが多いため、算定されたCN値は小数部を四捨五入し整数丸め値を掲載している。

表 4.9 外れ値を除外後に得られたカーブナンバーCNの最大値

		第三紀層	第四紀層	花崗岩	中古生層
洪水イベント数		1126	45	471	1400
CN 平均値		86	77	81	78
外れ値除外後の CN 最小値	① 5%有意	62	62	65	54
	② $\mu - 1.5 \text{ IQR}$	56	54	61	50
	③ $\mu - 2.7 \sigma$	53	44	59	45
外れ値除外後の CN 最大値	① 5%有意	108	100	96	102
	② $\mu + 1.5 \text{ IQR}$	117	100	102	107
	③ $\mu + 2.695 \sigma$	119	110	102	111

外れ値の検定は、以下の3種の方法で行った。

- ① スミルノフ・グラブス検定・5%有意
- ② 平均値 $\mu \pm 1.5 \text{ IQR}$
- ③ 平均値 $\mu \pm 2.695 \sigma$

①はスミルノフ・グラブス検定と呼ばれる方法で、個別データと平均値の差に対し、スチューデントのt分布を使いp値を算定する。p値5%を有意判定のしきい値とした。なおt分布を使うことから、データが正規分布に準ずることが前提となる。

②は箱ひげ図の箱の高さIQR(75%–25%、四分位範囲)の1.5倍を平均値 μ に加える/減じるもので、正規分布を前提とするものでないことから汎用的に使える方法である。

③も②と同様に平均値に対して、加える/減じる方法だが、増減値を標準偏差 σ の2.695倍とする。一般に外れ値の判断目安は、平均値との差が標準偏差の2~3倍以上といわれており、その中間の値が採用されている。

なお、データが完全に正規分布に準ずる場合、数学的に②と③は完全に一致するはずだが、表4.9ではそのようになってはいない。

表4.9の最大値をみると、花崗岩の①でカーブナンバー最大値が96となったが、それ以外の地質区分、すべての外れ検定方法でカーブナンバーはCN=100もしくはそれ以上となった。100は降水量すべてが流量となる値である。

洪水イベント単位で降水量と流量を準備するとかなりのばらつきが含まれ、流量が降水量を上回るケース(CN=100超)も散発的に存在する。森林流域のデータで存在するそのようなばらつきを踏まえ、森林との比較対象となる裸地のカーブナンバーとして、CN=100を採用する。

4.4 カーブナンバーを使った計算例

カーブナンバーを使って、洪水イベント単位の流量を算定する例を示す。
用意する観測データは降水量である。

(1) 対象とする観測データ

4.2 (6) に掲載された文献リストの文献シ、および巻末の Kubota et al., 2018 の対象となっている常陸太田試験地の降水量データを使用した。

常陸太田試験地では降水量と流量の両方が観測されているが、ここでは観測降水量のみを用いる。流域は中古生層に属するため、表 4.8 よりカーブナンバー $CN=78$ を採用する。

(2) 洪水イベントの抽出

はじめに日降水量から洪水イベントの抽出を行う。

今回は流量データが計測されていない状態を想定するので、降水量データのみを洪水イベントに区切る必要がある。表 4.10 は日降水量から洪水イベントを抽出する例である。必ずこの例と同じとする必要はないが、表 4.8 のカーブナンバーは降水量 20mm 以上の洪水イベントを対象として設定された値であることから、イベント抽出においては 20mm 未満の降水は対象外とする。

表 4.10 日降水量から洪水イベントを抽出する考え方

日	降水量(mm)	
1	0	
2	0	
3	27.4	←降水量が 20mm を超えた日を 開始日
4	16.2	←20mm を下回った日を 終了日
5	0.2	イベント降水量 = 27.4+16.2 = 43.6mm
6	0	
7	2.4	
8	36.2	←降水量が 20mm を超えた日を 開始日
9	22.3	
10	15.6	←20mm を下回った日を 終了日
11	0.2	イベント降水量 = 36.2+22.3+15.6 = 74.1mm
12	0	

(3) 流量の算出

日降水量から洪水イベントを抽出し、イベントごとの積算降水量 P を算定する。得られた積算降水量 P から(1)式を使い、洪水イベントの積算流量 Q を算定する。

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad \dots(1) \text{ 再掲} \quad \text{ただし、} P \geq 0.2S$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254$$

Q : 流量[mm]、 P : 積算降水量[mm]、 S : 最大貯留量[mm]、 CN : カーブナンバー

常陸太田試験地の降水量データから(1)式で算定された流量をCN流量と呼称する。CN流量と観測流量の比較を図 4.9 に示す。

図 4.9 の右図（両対数軸）をみると、観測流量が 100mm 未満では、ばらつきはするが 1 : 1 ラインがプロット範囲の中心を通り、概ね妥当なCN流量が算出されていることがわかる。

一方、図 4.9 の左図をみると、観測流量が 100mm 以上の場合、CN流量は 1 : 1 ラインの下側にプロットされ、観測流量よりも小さな値が得られている。他に実施した分析検討からもCN流量は 100mm を超える大きな降水量、流量に対し、実際よりも控えめな流量が算定されやすいことが判明している。規模の大きな洪水イベントに対する適用性が現時点の課題である。

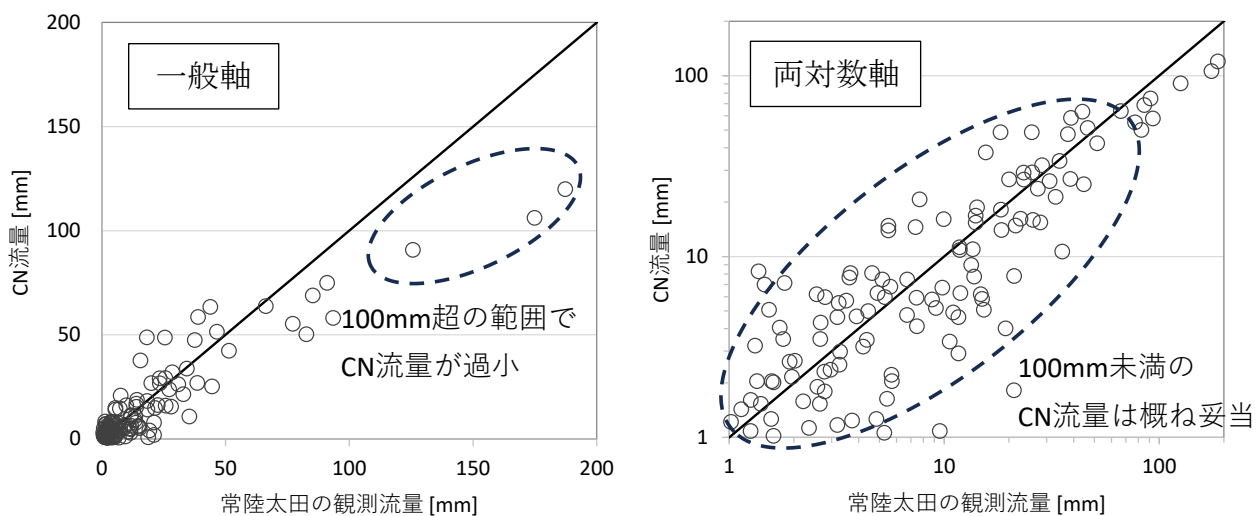


図 4.9 CN流量と観測流量の比較（常陸太田試験地データ）

（4）洪水緩和量（流出低減量）の算出

カーブナンバーを使い、森林の水源涵養機能の1つである洪水緩和量（流出低減量）の計算例を以下に示す。

流量算出には 4.5（3）の(1)式を使う。表 4.11 はカーブナンバーで計算される理論値である。

森林流域のカーブナンバーCN=78（中古生層の場合）

裸地相当のカーブナンバーCN=100（裸地流量は降水量そのものとなる）

表 4.11 CN流量から求まる流出低減量（洪水緩和機能、中古生層の場合）

イベント降水量	森林流量 CN=78	流出低減量
40mm	6.8 mm	33.2 mm
80mm	31.4 mm	48.6 mm
100mm	46.7 mm	53.3 mm
150mm	88.8 mm	61.2 mm
200mm	134.0 mm	66.0 mm

常陸太田試験地の観測流量データと、CN流量から算定される流出低減量の散布図を図 4.10 に示す。黒ラインは表 4.11 の理論値をつないだものだが、流量が 80~100mm を超えたあたりから、流出低減量が頭打ちとなる傾向がみてとれる。

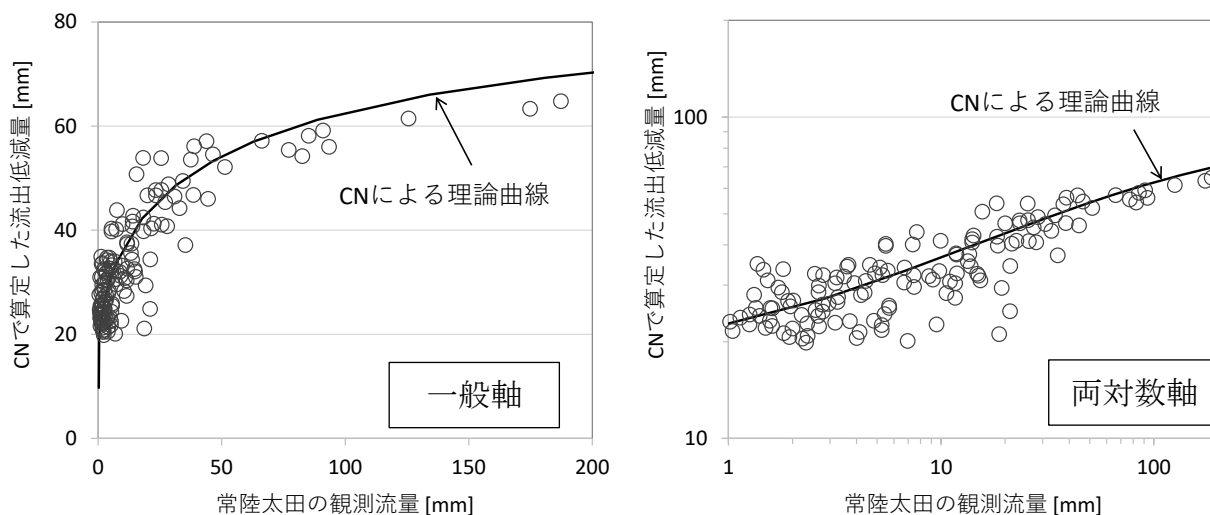


図 4.10 常陸太田の観測流量とCN流量から算定される流出低減量（洪水緩和機能）

各年での積算値を表 4.12、図 4.11 にまとめた。森林の存在による洪水緩和機能（流出低減量）は、年間 540~840mm の範囲にあり年降水量の多寡で上下する。

表 4.12 常陸太田試験地で算出された年間積算値（単位すべて mm）

年	年降水量	イベント単位を積算した値			流出低減量 CN 100-78
		イベント 降水量	裸地流量 CN=100	森林流量 CN=78	
2006	1,814	1,294	イベント 降水量 と同じ値	450	844
2007	1,418	976		277	699
2008	1,353	759		207	553
2010	1,609	1,012		264	748
2011	1,354	794		251	543
2012	1,565	923		270	654

日本の森林において VWB の算定を行う場合、以上の手順でカーブナンバー法を用いることで、森林の洪水緩和機能（流出低減量）を算定することができる。

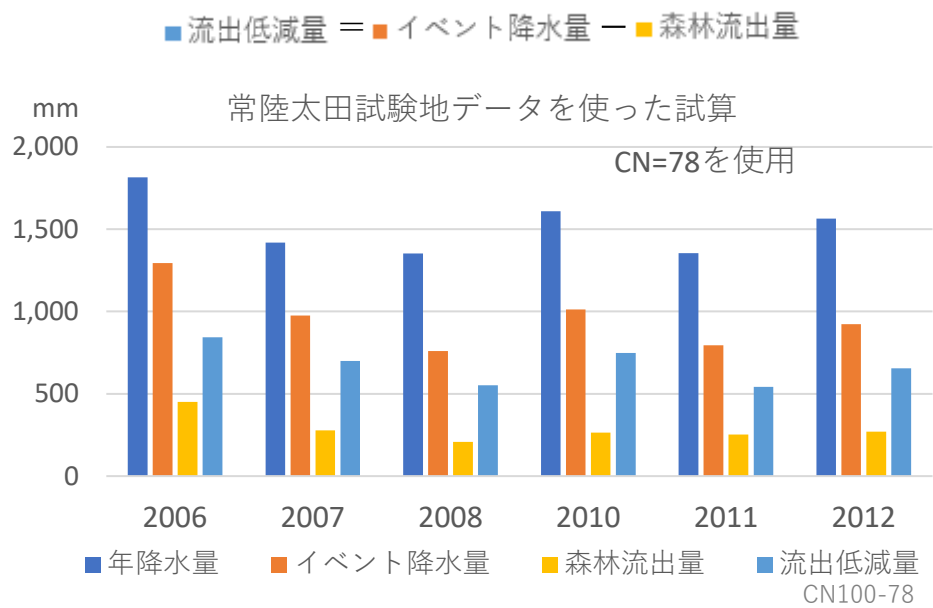


図 4.11 常陸太田試験地で算出された年間値 (単位 mm)

4.5 早見表：洪水イベント単位から年単位への換算

(1) 早見表の作成

2.3で紹介したように企業はなるべく簡易に森林機能を定量化したい、というニーズを有する。4.4に示した洪水イベント単位の計算は「簡易」とは言えない。

ユーザが年降水量を準備すれば、以下の手順で森林による年間あたりの洪水緩和量（流出低減量）が得られる早見表を作成した。

4.4で例示した計算は、表4.8のカーブナンバーを使うことから基本的に洪水イベント単位での計算となる。早見表でユーザが用意するのは年降水量であるから、洪水イベント単位での計算を年単位に変換する必要がある。

図4.13の上図は、中古生層のデータで抽出された洪水イベントを年間で積算した〔積算降水量〕と通常の観測による〔年降水量〕をプロットしたものである。〔積算降水量〕は洪水イベント部分のみを抽出しているため、平時部分が含まれず〔年降水量〕よりも少ない量となる。しかしながら、両者には一定の相関がみてとれることから、その回帰線である

$$[\text{積算降水量}] = 0.9867 \times [\text{年降水量}] - 490.05$$

この式を使って〔年降水量〕を〔積算降水量〕に変換する。

図4.13の下図は〔積算降水量〕に対して、洪水イベント単位の流量を年間積算した〔積算流出量〕をプロットしたものである。この図のプロット点に対してカーブナンバー法を適用し、CN値の平均を求めるとCN=21を得る。これは年間積算量に対するCN値であり、表4.8の洪水イベント単位のCNとは異なる。また、カーブナンバー法は洪水イベントに適用するのが本来であり、年間積算量に適用するのはイレギュラーとなる。ここでは早見表作成のための便法として用いる。

中古生層のデータで得られたCN=21を用いて、〔年降水量〕→①〔積算降水量〕→②〔積算流出量〕が求まる。最後に①-②を計算し、③〔洪水緩和量〕を得る（図4.12）。

同様の作業を中古生層以外でも行い、各地質区分ごとの早見表を作成した（表4.13～表4.16）。

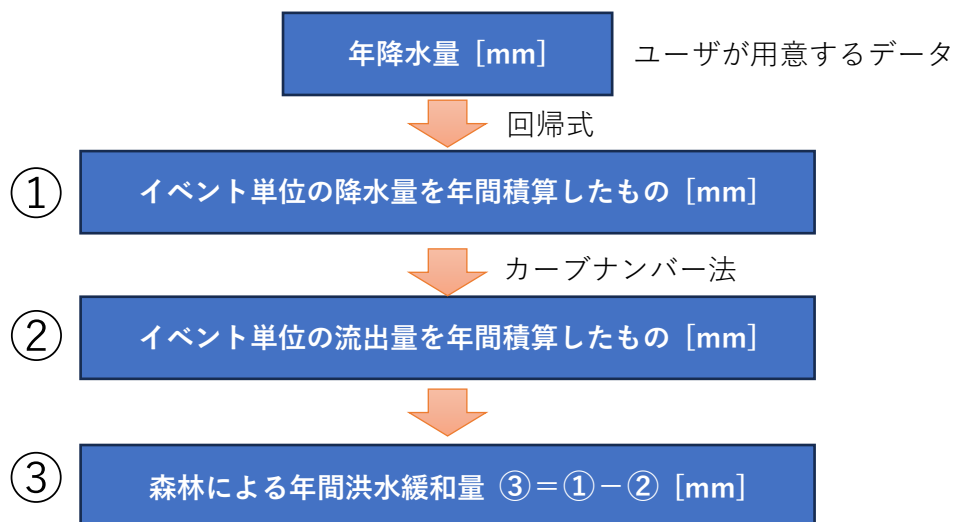


図 4.12 早見表を作成するまでの流れ

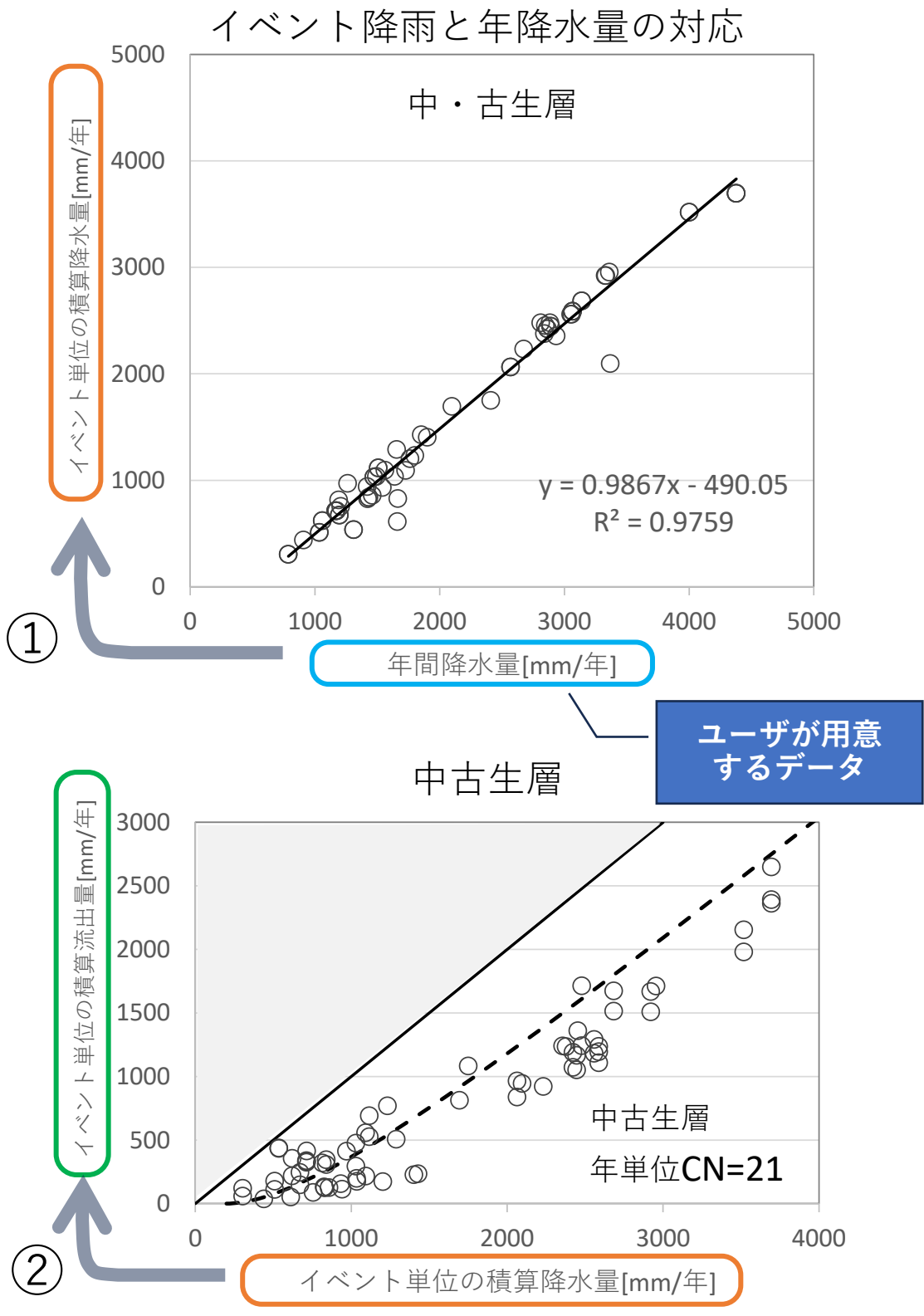


図 4.13 洪水イベント単位から年流出単位への変換（中古生層）

表 4.13 早見表：第三紀層の年単位量

年降水量 [mm/年]	①積算降水量 [mm/年]	②積算流出量 [mm/年]	③洪水緩和量 [mm/年]
800	194	6	188
1,000	340	52	288
1,200	485	127	359
1,400	631	219	411
1,600	776	324	452
1,800	922	437	485
2,000	1,068	556	512
2,200	1,213	679	534
2,400	1,359	806	552
2,600	1,504	936	568
2,800	1,650	1,068	582
3,000	1,795	1,201	594
3,200	1,941	1,336	605
3,400	2,087	1,472	614
3,600	2,232	1,609	623

表 4.14 早見表：第四紀層の年単位量

年降水量 [mm/年]	①積算降水量 [mm/年]	②積算流出量 [mm/年]	③洪水緩和量 [mm/年]
800	278	25	253
1,000	430	90	340
1,200	581	178	403
1,400	732	281	451
1,600	884	395	489
1,800	1,035	516	519
2,000	1,186	642	544
2,200	1,337	772	566
2,400	1,489	905	584
2,600	1,640	1,041	599
2,800	1,791	1,179	613
3,000	1,943	1,318	624
3,200	2,094	1,459	635
3,400	2,245	1,601	644
3,600	2,396	1,744	653

表 4.15 早見表：花崗岩の年単位量

年降水量 [mm/年]	①積算降水量 [mm/年]	②積算流出量 [mm/年]	③洪水緩和量 [mm/年]
800	394	11	383
1,000	573	57	516
1,200	752	130	622
1,400	931	221	710
1,600	1,110	327	783
1,800	1,289	444	845
2,000	1,467	569	898
2,200	1,646	702	944
2,400	1,825	840	985
2,600	2,004	983	1,021
2,800	2,183	1,130	1,052
3,000	2,362	1,281	1,081
3,200	2,540	1,434	1,107
3,400	2,719	1,589	1,130
3,600	2,898	1,747	1,151

表 4.16 早見表：中古生層の年単位量

年降水量 [mm/年]	①積算降水量 [mm/年]	②積算流出量 [mm/年]	③洪水緩和量 [mm/年]
800	299	11	289
1,000	497	73	424
1,200	694	172	522
1,400	891	294	597
1,600	1,089	432	656
1,800	1,286	582	704
2,000	1,483	740	744
2,200	1,681	904	777
2,400	1,878	1,073	805
2,600	2,075	1,246	829
2,800	2,273	1,422	850
3,000	2,470	1,601	869
3,200	2,667	1,782	885
3,400	2,865	1,965	900
3,600	3,062	2,149	913

(2) 早見表による算定例

常陸太田試験地の降水量データから、早見表（表 4.16）を使った算定値を表 4.17 に示す。

早見表で得られる洪水緩和量（流出低減量）と、4.5 で洪水イベント単位で計算される流出低減量を比較すると、早見表の流出低減量がやや小さな値となっている。年降水量が少ない2008年、2011年は逆転して早見表が多くなり、降水量による違いが表れている。

表 4.17 常陸太田試験地で算出された年間積算値（単位 mm）

年	年降水量	4.4 イベント単位での計算			4.5 早見表による計算		
		積算降水量	積算流量 CN=78	流出低減量 CN100-78	積算降水量	積算流量 中古生層	洪水緩和量 流出低減量
2006	1,814	1,294	450	844	1,300	593	707
2007	1,418	976	277	699	909	306	602
2008	1,353	759	207	553	845	265	579
2010	1,609	1,012	264	748	1,097	438	658
2011	1,354	794	251	543	845	266	580
2012	1,565	923	270	654	1,055	408	646

※表 4.16 の早見表は降水量が 200mm 刻みのため、前後行（1814mm の場合は 1800mm と 2000mm）を読み取り、線形補間で値を算定した。

例：2006 年の洪水緩和量は $(1814-1800)/200 \times (744-704) + 704 = 707$ mm と算定される。

(3) 早見表を使う場合の留意点

早見表は一般的な年流出量を求める用途には用いない。

その理由は、早見表による流量は一般的な年流出量とは異なり、直接流出量に相当する流量であるためである。そのため一般流量と比較すると小さな値が算出されている。早見表を作成する過程では、年降水量から洪水イベント単位の積算降水量に変換をしておき、洪水イベント期間以外の例えば基底流量等は除外される。

早見表の適用用途としては、以下の2つを想定している。

①森林の存在による年間の洪水緩和量（流出低減量）を求める

②森林の存在による年間の水資源涵養量を求める

①については、前項（2）に算定例を示した。

②については、参考検討として 5.4 に計算例を示している。

5. 蒸発散モデルー蒸発散量と水資源涵養量

5章の要点

- 本章では、森林施業による質（蒸発散量、基底流など）の変化や、林相や密度といった森林状態を、比較的簡易に評価できる『蒸発散モデル』を提示する。
- 採用する方法は概ね Komatsu, 2020 に記載された考え方で、森林の状態（林相や密度など）や施業の影響を考慮した上で、蒸発散量を評価する方法である。
- 『蒸発散モデル』を使い蒸発散量を定量化することで、水収支の式から流量の推定が可能となる。
- 『蒸発散モデル』と『カーブナンバー』を併用することで、森林の水資源涵養量を推定できるようになる。熱量の高い企業・自治体等での活用を想定している。
- 現時点の『蒸発散モデル』は、実際の蒸発散量よりも控えめな値が算定されやすく、今後更新・修正される可能性がある。更新はウェブページ等で発信していくことから、利用にあたってはアップデート情報を検索するようお願いする。

5.1 蒸発散モデルの概要

森林の水資源涵養機能を簡易に評価するという目的に向かって、3章では表形式で森林の多面的機能と森林づくり活動の相互関係を整理・提示し、4章では、VWB指標の1つであるカーブナンバー法を使って、森林の有無（森林が消失した場合、もしくはハゲ山化した場合）による洪水緩和機能の定量化方法を提示した。

5章では、森林が発揮する水資源の涵養機能定量化を目的とする。また同時に、森林の状態（直径や密度など）と施業の影響を考慮できる評価手法とすることで、施業による涵養効果を最大化するための道筋が示せるか、その可能性を探る。

森林による蒸発散量を推定するための『蒸発散モデル』について、その構成素案を以下に記す。

（1）森林の水循環項目とその評価

森林の水循環のうち、森林状態と関連する水文過程として、**遮断蒸発**、**蒸散**、**林床面蒸発**がある。また、浸透能は地盤内で移動する水の速度を規定する要因となる。

①樹冠の蒸発散（遮断蒸発＋蒸散）の評価

②林床面蒸発の評価

③浸透能の評価

施業効果を反映させつつ、比較的簡易に評価できることを想定し、①**遮断蒸発＋蒸散**を評価対象とし、②と③については、今回の評価対象には含めない。

(2) 施業や林相の評価

施業としては森林状態（直径や密度等）を変化させる伐採をおもに取り上げ、評価できるモデルとする。なお、施業（伐採）の多くはバイオマス量を低下させることから、蒸発散量や流出低減量は一時的ではあるが、減ずることになる。

- ・間伐（密度管理）
- ・皆伐+再造林
- ・択伐+広葉樹林化

(3) 入力データ

蒸発散モデルの入力データとして必要なものは、**月降水量、月平均気温、樹種（針広区分）、平均胸高直径、平均樹高、立木密度**である。

(4) 試算例

蒸発散モデルを使って実際の観測データに基づき試算した例を 5.3 に掲載した。

5.2 蒸発散モデルの詳細

5.2.1 森林の水循環項目とその評価の方向性

森林の水循環のうち、森林状態と関連する水文過程として、**遮断**、**蒸散**、**林床面蒸発**がある。これら要因をどのように考慮するかが肝要だが、5.1 で述べたようにある程度簡易に評価することを念頭に、**遮断+蒸散**で評価する方針とする。

遮断と蒸散による降水の損失量を定量評価することで、森林から地下に供給される水資源涵養量を推定する方法を検討する。後述する5.4 でその一例を示す。

蒸発散モデルの骨子としては、Komatsu (2020)を参考としている。時間単位は月を基本とし、気象データとして月の平均気温と降水量を入力とする。また、森林情報で用意するのは樹種、平均 DBH (胸高直径) と立木密度 (針葉樹の場合)、平均樹高 (広葉樹の場合) である。

上記の入力データから、森林樹冠による月・遮断量と月・蒸散量の2種類をそれぞれ求め、合算することで月・蒸発散量を得る。

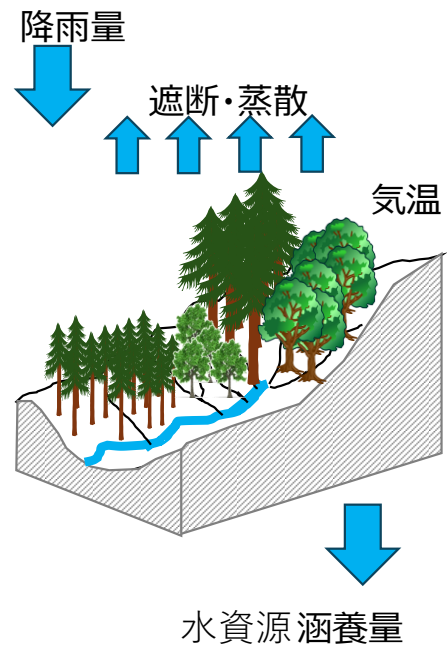


図 5.1 蒸発散モデルのイメージ

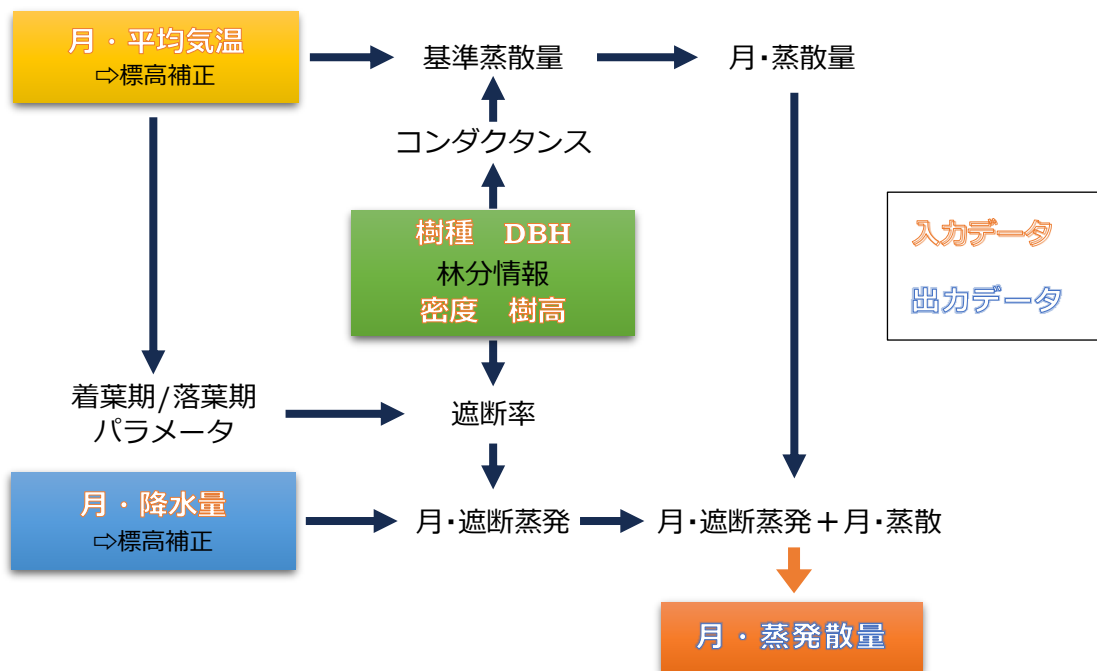


図 5.2 蒸発散モデルの構成

5.2.2 遮断と蒸散の評価

施業管理の影響を加味し、森林の水源涵養機能を評価するには森林状態と水文プロセスを関連付けていく必要がある。また、さまざまな樹種が対象となると想定され、人工林（針葉樹林）のみならず広葉樹林が含まれること、また降雨のみならず降雪を考慮した森林水文プロセスが必要である。

時間単位については最終的に年積算値で評価することを踏まえ、気象データは月単位の降水量や気温を基本とする。そこから月の遮断量もしくは月の蒸散量を簡易に評価する方法を検討する。

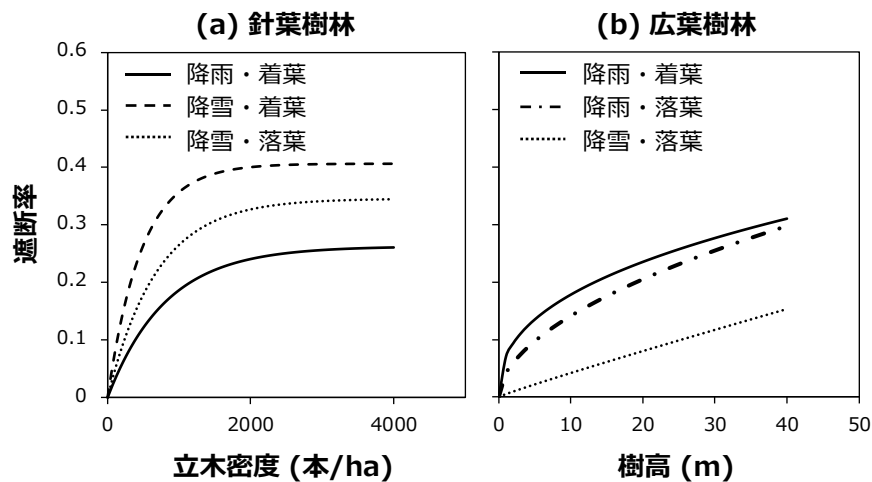


図 5.3 針葉樹と広葉樹の遮断モデル（猪越、2024）

（1）遮断の簡易モデル

降雨中に発生する遮断は、Komatsu et al. (2015) や Inokoshi et al. (2023) の手法を用いて評価する。樹高・立木密度・樹種（針葉樹・広葉樹）から、降雨に対する遮断率を計算する。また、降雨と降雪による遮断の違いも考慮することで、積雪地域における遮断量（遮断率）の評価が可能となる。針葉樹林では遮断と立木密度、広葉樹林では遮断と樹高との関係を用いる。

①モデルの構成

遮断量は降雨に応じた以下の式で表す。

$$I_c = r \times P \quad (\text{遮断量の式})$$

I_c : 遮断量, P : 降水量, r : 遮断率

遮断量は、林分ごとに降水量に対して一定の割合で発生すると仮定している。

針葉樹林の遮断率は立木密度 N の関数で表される。

$$r = k_1 \{1 - \exp(-k_2 N)\} \quad (\text{針葉樹の場合})$$

k_1 [unitless] および k_2 [ha] は葉の有無や降雨・降雪によって決まる係数

N : 立木密度 [本/ha]

広葉樹林の遮断率は樹高の関数で表される。

$$r = \left(\frac{H}{j_1}\right)^{j_2} \quad (\text{広葉樹の場合})$$

j_1 [m] および j_2 [unitless]は葉の有無や降雨・降雪によって決まる係数

H : 樹高 [m]

遮断率 r の算定に使用する各係数の値を表 5.1 に示す。

表 5.1 遮断率 r の係数

森林タイプ		降水形態	式	k_1	k_2	j_1	j_2
針葉樹林	着葉期	降雨	$r = k_1\{1 - \exp(-k_2N)\}$	0.263	1.24×10^{-3}	—	—
	着葉期	降雪		0.406	2.11×10^{-3}	—	—
	落葉期	降雪		0.346	1.46×10^{-3}	—	—
広葉樹林	着葉期	降雨	$r = \left(\frac{H}{j_1}\right)^{j_2}$	—	—	743	0.401
	落葉期	降雨		—	—	380	0.539
	落葉期	降雪		—	—	293	0.941

②落葉期の判定について

表 5.1 では着葉期と落葉期を分けている。落葉期の判定に関しては、一般に平均的な植生の生理生態を参考とすると着葉期 5 月から 10 月を落葉期 11 月から 4 月となる。今回は月の平均気温データがあるので、Nagai et al. (2015) の考え方をを用いて落葉判定を行うことも可能である。Nagai の考え方については、(2) 蒸散の簡易モデル、で紹介する。

③必要となる基礎情報

遮断の簡易モデルでは、以下の情報が入力データとして必要である。

降雨量：月・降雨量

自治体等の観測点や気象露場等のデータが近隣で取得可能な場合、そちらを活用することもできる。そうした観測点がなければ、対象林分近隣のアメダス地点を利用する。

ただし、対象林分と観測地点の標高差が大きい場合は、標高補正を行うようにする。標高による雨量変化は大きく、補正を行わない場合は精度が低下する。

標高補正は山田ら (1995) の以下の式で行う。

$$P = \alpha(h - h_a) + P_a$$

P : 補正後の降雨 [mm], P_a : 観測地点の降雨[mm] (任意の観測期間、日、月など)

h : 対象林分の標高[m], h_a : 観測地点の標高[m]

α : 増加率 ($\alpha = CP_a$) [mm/m], C : 係数[m⁻¹]

増加率 α の係数 C は、降雨量の平均値を期待する場合 $C = 4.7 \times 10^{-4}$ 、降雨量の最大値を期待する場合は $C = 1.0 \times 10^{-3}$ とされ、今回の用途では $C = 4.7 \times 10^{-4}$ を用いる。

気温：月・平均気温

遮断量の算定で気温データは直接は用いない。

ただし、雨が雪に変わる気温のしきい値として利用する。観測データ上で降雨と降雪が区分されている場合はそれを用いればよいが、アメダスは地点によって降雨量のみで降雪量がない場合もある。その場合、平均気温を用いて区分する。

まず対象林分と観測点の標高差がある場合、気温の標高補正を行う。

$$T = T_a - 0.0065(h - h_a)$$

T ：補正後の平均気温 [°C]

T_a ：観測所での平均気温 [°C]

補正後の平均気温を基に太田（1989）が提示した図 5.4 を使い、降雨と降雪の割合を按分する。

図中の赤い直線を代表値として、読み取った降雨/降雪割合を数値表とした。平均気温が 2°C の場合 43% が雪、57% が雨となる。なお、太田のデータは日平均気温に基づくものだが、月単位での作業を想定して月平均気温に読み替えて利用する。

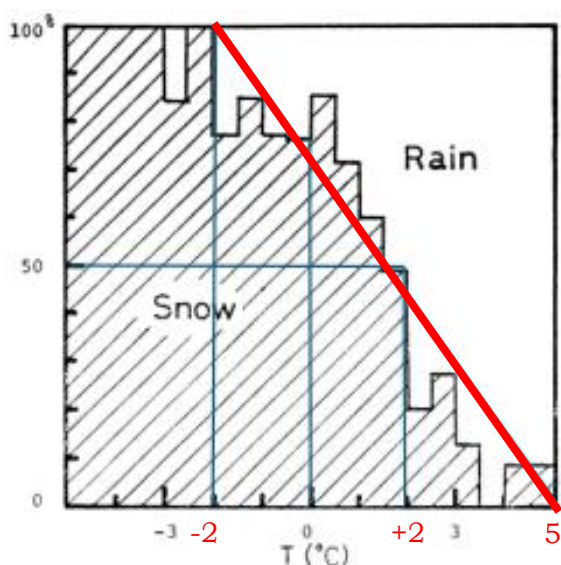


図 3 日平均気温(T)による降水形態の変化

気温(°C)	降雪割合(%)
5	0
4	14
3	29
2	43
1	57
0	71
-1	86
-2	100

月別平均気温から割合決定

↓
月別降水量から降雨降雪割合を決定

↓
遮断の計算方法を決定

図 5.4 降雨量と降雪量の按分（太田, 1989）

立木密度：樹種が針葉樹の場合に必要（表 5.1 参照）。

毎木調査等により、対象林分の立木密度を算出する。従来ながらの毎木調査のほかに、最近では OWL などの地上レーザー計測、航空レーザー計測等の活用も可能である。

樹高：樹種が広葉樹の場合に必要（表 5.1 参照）。

毎木調査等による。バーテックス等の超音波樹高測定器なども活用できる。OWL などの地上レーザー計測は樹高を過小評価することが多い。航空レーザーによる樹高計測精度は地上レーザーより高く、実測に近い値が得られる。

(2) 蒸散の簡易モデル

蒸散の計測には、樹木ごとに樹液流等を計測し、その結果を林分に拡張する単木積みあげ法と、タワー観測による林冠と大気とのガス交換から計測するフラックス法がある。ここでは、林分に拡張する積み上げ法をもとにして、蒸散の簡易モデルを構築する。

①モデルの構成

Tsuruta et al (2019)で提案されている以下の式を参考とする。

$$Q_t = Q_{tref} \cdot f_1(D) \cdot f_2(R_S) \cdot D$$

Q_t : 単木蒸散量 [cm³/day]

Q_{tref} : 単木蒸散量の参照値 [cm³/day]

D : 大気飽差 [kPa]

R_S : 日射量 [W/m²]

上式の中で D と R_S の関数 f は月平均気温で近似できる。また、既往研究により $DBH \sim Q_t$ 関係が、針葉樹と広葉樹で同じである可能性が指摘されていることから、針葉樹と広葉樹を区別せずにモデルが構築できる可能性がある。

Tsuruta の式を簡易にした簡易鶴田モデルを、以下の内容で提案する。

$$Q_t = Q_{tref} \cdot f(T_a)$$

T_a : 月平均気温 [°C]

$f(T_a)$ には以下の関係式を適用する。

$$f(T_a) = 0.0244T_a + 0.4361$$

Q_{tref} は DBH との関係式 (Tsuruta et al., 2019) より算出する。

$$Q_{tref} = 849DBH - 7350$$

以上のデータをもとに、林分全体を代表する DBH から林分蒸散量を算出する。

ただし、月別の蒸散量を算出する場合、落葉広葉樹と落葉針葉樹については、落葉期間を考慮する必要がある。

②必要となる基礎情報

蒸散の簡易モデルでは、以下の情報が入力データとして必要である。

月平均気温 : 対象林分と観測点の標高差がある場合、気温の補正を行う (遮断を参照)。

立木密度 : 毎木調査等により、対象林分の立木密度を算出する。従来ながらの毎木調査のほかに、最近では OWL などの地上レーザー計測、航空レーザー計測等の活用も可能である。

胸高直径 : 対象林分について毎木調査等を行い、林尺などで胸高直径を算出する。プロット計測に加えて、OWL などの地上レーザー計測の活用も可能である。

③ 落葉期間の考慮方法

蒸散量推定において落葉時期の判定は重要となる。落葉時期の判定は、Nagai et al., 2014 による日平均気温の積算値を使って行う (図 5.5)。簡易判定のための判定表を今後準備予定である。

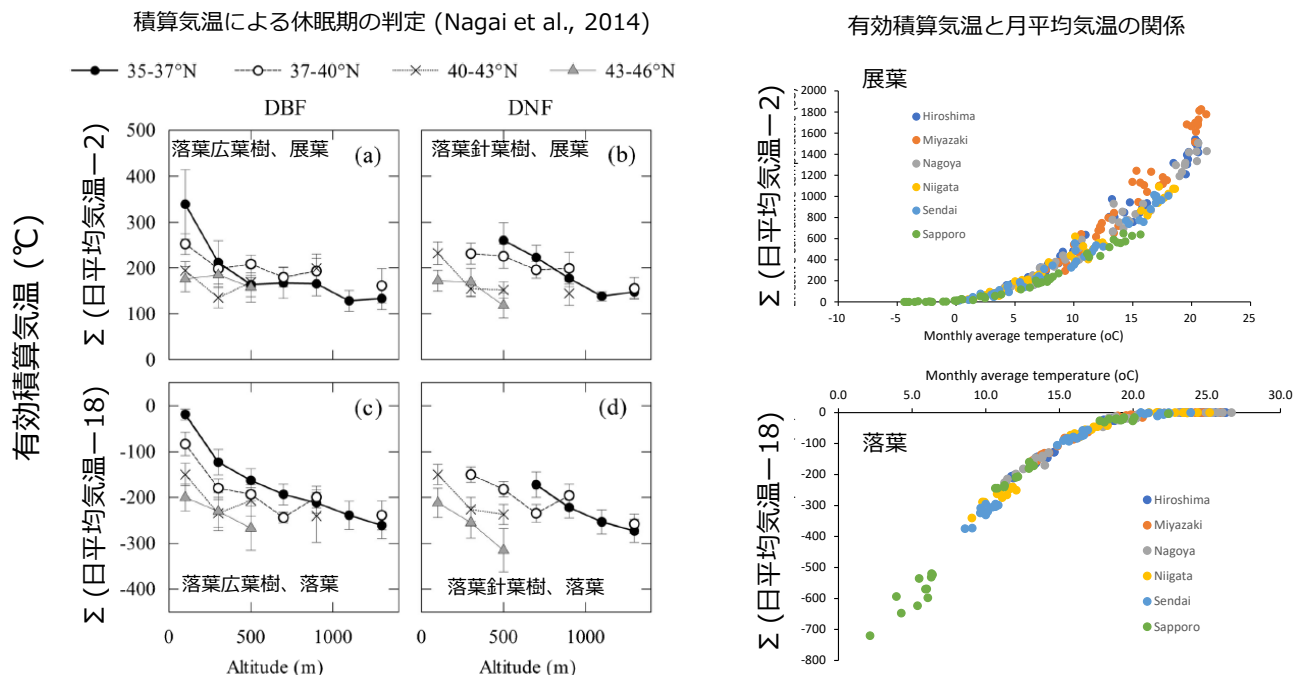


図 5.5 落葉・展葉の判定方法 (Nagai et al., 2014)

(3) 今後の課題

蒸散モデルはまだ構築の途上にある。現時点で認識する課題を以下にあげる。

蒸散量の精度：蒸散量の推定では樹液流ベースの手法であることから、通常のフラックス法で算出される結果と比較して相対的に小さい値となる。ただし、遮断の簡易モデルは過大評価する傾向もあり、全体としての遮断+蒸散の算出においては妥当な値が得られる可能性が高い。

森林管理や樹木成長に対応するシナリオ：間伐等の施業効果を含めた検証を行う場合、たとえば、間伐後年数による評価においてはDBHの変化量、単木ごとの成長を評価する必要があるか、間伐で単木あたり樹液流速の変化を考慮するかしらないか (間伐により樹木1本あたり日射量が多くなり樹液流速が増加する報告もある)、など細部の検証が必要。

森林管理のシナリオ特定に必要な情報の整理：一般的な森林情報の解析ツールとしてなにを用いるのがよいか。森林総研のLYCSモデルまたは収穫表などがある。利用者の便をはかり、DBH変化量の早見盤を作るかどうかなど。

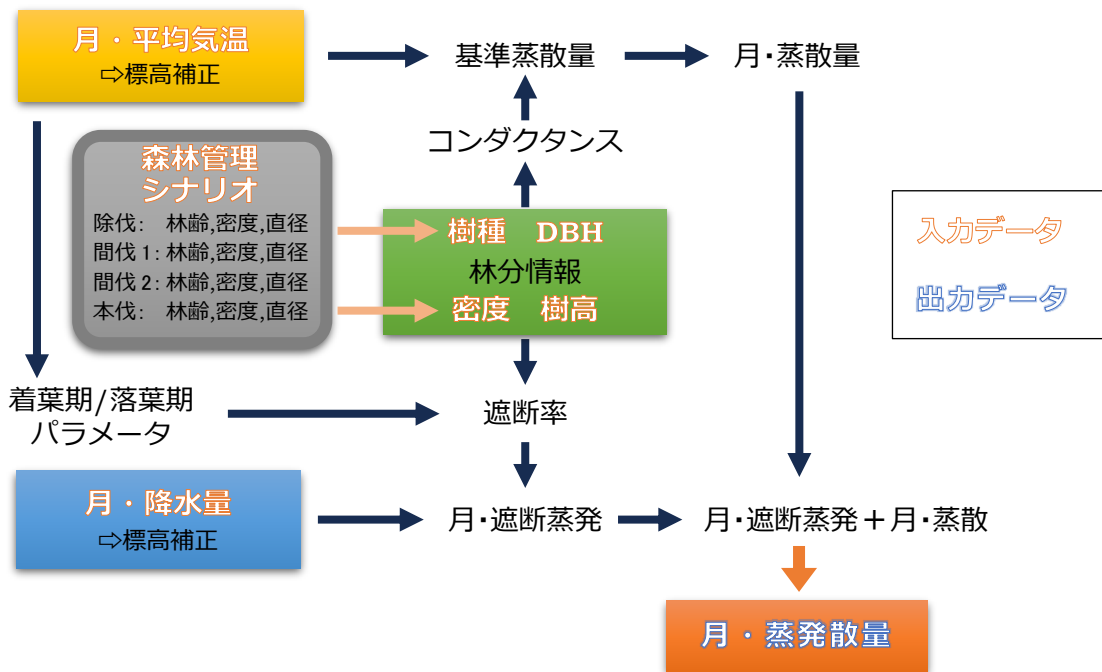


図 5.6 森林管理のシナリオを組み込んだ蒸発散モデルの構成

5.3 蒸発散モデルを使った試算例

5.3.1 対象とする水文データ

久保田らの水文データ (4.2 (6) 文献シ、巻末の Kubota et al., 2018) を対象として蒸発散モデルの試算を行う。

(1) 観測概要

- 森林総研の常陸太田試験地 (図 5.7)。

HA 流域：伐採施業なし

HV 流域：間伐 2009 年

- ヒノキ林、河岸のみスギが成立。
HV 流域の上流に一部広葉樹が存在。
- 2009/3/9 に HV 流域のおよそ半分を間伐。
2009/5/26 に伐採本数 50%、伐採材積 30% に調整するため追加間伐。
HA 流域は伐採なし。
- 2009 年 (間伐年) は除外し、下記期間を検討対象
2006~2008 年：間伐前
2010~2012 年：間伐後

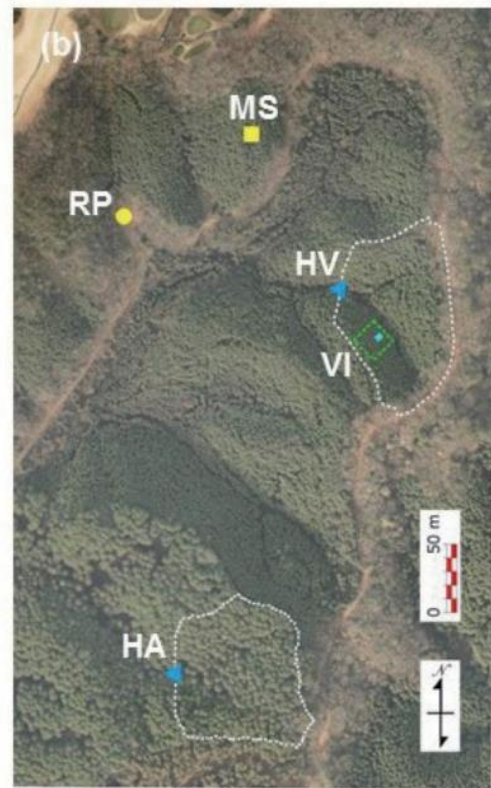


図 5.7 流域図 (Kubota et al., 2018)

表 5.2 林分情報—HA 流域と HV 流域 (間伐前・後、Kubota et al., 2018)

		HV		
		HA ¹	Pre-thinning ² 2006-2008	Post-thinning ³ 2010-2012
植栽年	Planted year	1924	1986	1986
立木密度	Stand density (stem ha ⁻¹)	783	2229	1132
胸高断面積	Basal area (m ² ha ⁻¹)	63	32.4	25.1
樹高	Tree height (m)	18	10.8	12.1
胸高直径	DBH (cm)	32	13.6	16.8
材積	Total volume (m ³ ha ⁻¹)	553	308	218

¹ Values surveyed in 1993 (Murakami et al. 2000).

² Values surveyed in 2008.

³ Values calculated for residual trees.

(2) 水文データの概要

久保田らが観測・検討したデータの概要を以下に記す。

- 気象露場 (MS) に転倒ます型雨量計。気象露場 (MS) 周囲の植生が成長したため、より開けた RP 地点にも雨量計を設置し、MS の雨量を補正している。論文内の表に掲載される降水量は補正後のもの。今回は解析の都合上、補正前の降水量を使用した。
- 林内雨と樹幹流は HV 流域内の VI 地点で計測。樹幹流は間伐前 10 本、間伐後は 5 本の残存木で測定。樹冠水収支は以下の式で表される。

$$P = I + T + S$$

P : 降水量 [mm], I : 遮断蒸発量 [mm], T : 林内雨量 [mm], S : 樹幹流量 [mm]

- 久保田らは蒸発散量 (evapotranspiration) を、水収支をベースとする下式で算定している。

$$E = P - Q = \int_{t_1}^{t_2} p(t)dt - \int_{t_1}^{t_2} q(t)dt$$

E : 蒸発散量 [mm], $p(t)$: 降雨強度 [mm/day], $q(t)$: 流量 [mm/day]

t_1 : 開始日, t_2 : 終了日

- HV 流域 (間伐あり) での蒸発散量 E を間伐前後で比較したのが図 5.8。
生育期にあたる 6 月～10 月の期間で、蒸発散量 E の差 (間伐前○/間伐後●) が見られた。

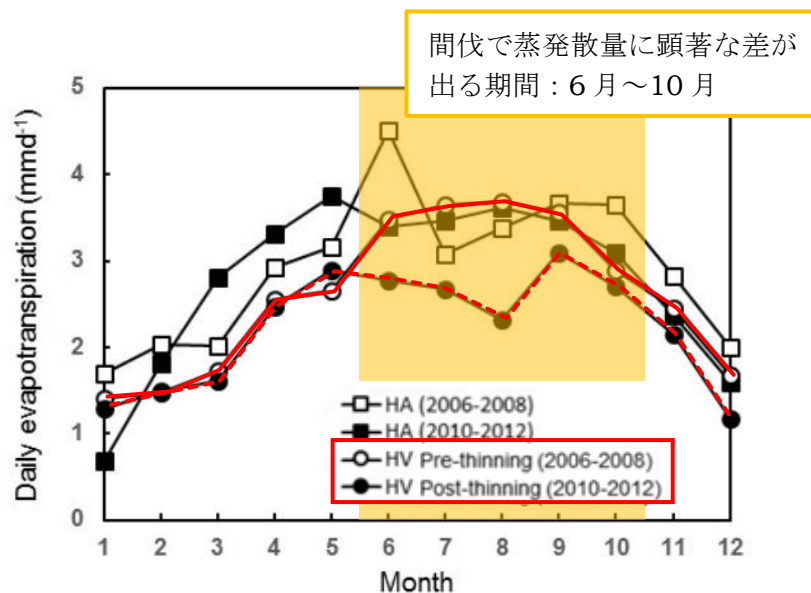


図 5.8 日平均蒸発散量 (Kubota et al., 2018)

(3) 久保田らが整理した HV 流域の各種データ

表 5.3 HV 流域の観測データ

年	降水量 P(mm)	流量 Q(mm)	遮断量 I(mm)
2006	2020	971	389
2007	1571	674	342
2008	1499	538	282
2010	1783	821	277
2011	1500	809	260
2012	1735	880	351

5.3.2 蒸発散モデル：遮断量の算出

(1) 遮断率の算定

針葉樹の遮断率 r は以下の式で表される。ヒノキ・スギは常緑針葉樹で落葉期がないため、表 5.4 赤枠内の着葉期の数字を用いる。算出した遮断率 r を表 5.5 に示す。間伐前後を比較すると、遮断率は 3~5% 減少している。

$$r = k_1(1 - e^{-k_2N})$$

- r : 遮断率 [unitless] (降雨・降雪に対する遮断量率)
- k_1 : 着葉や降雨・降雪で決まる係数 [unitless]
- k_2 : 着葉や降雨・降雪で決まる係数 [ha]
- N : 立木密度 [本/ha]

表 5.4 遮断率の求め方 (Inokoshi et al. 2023)

森林タイプ	降水形態	式	k_1	k_2
針葉樹林	着葉期	降雨	0.263	1.24×10^{-3}
	着葉期	降雪	$r = k_1\{1 - \exp(-k_2N)\}$	2.11×10^{-3}
	落葉期	降雪	0.346	1.46×10^{-3}

常緑樹は
着葉のみ

表 5.5 遮断率 r の算出

		遮断率 r	k_1	k_2 (ha)	HV 流域の 立木密度(本/ha)
間伐前	降雨	0.246	0.263	0.00124	2229
	降雪	0.402	0.406	0.00211	2229
間伐後	降雨	0.198	0.263	0.00124	1132
	降雪	0.369	0.406	0.00211	1132

(2) 気象データと標高補正

今回は気象露場 (MS) の観測データが存在するが、気象データは実際にはアメダスから入手するケースが多いと想定される。

参考として近隣のアメダス観測所 (図 5.9 の日立と常陸大宮の 2 地点) の月降水量・月平均気温を使った場合を検討対象に加える (表 5.6)。



図 5.9 常陸太田試験地とアメダス（気象庁）2箇所の位置図

表 5.6 MS 気象露場およびアメダス観測所の概要

観測所名	緯度	経度	標高 (m)
MS 気象露場 (常陸太田試験地)	36.567	140.583	320
アメダス日立	36.580	140.645	34
アメダス常陸大宮	36.607	140.325	95

表 5.6 でみるようにアメダス日立・常陸大宮と気象露場では標高が 230~290m 異なる。降水量と気温について以下の式を使い標高補正を行った (図 5.10、図 5.11)。

$$P = \alpha(h - h_a) + P_a$$

P : 補正後の降雨 [mm]

α : 増加率 ($\alpha = CP_a$) [mm/m] $C = 4.7 \times 10^{-4}$

h : 対象林分の標高 [m]

h_a : 観測地点の標高 [m]

P_a : 観測地点の降雨 [mm]

$$T = T_a - 0.0065(h - h_a)$$

T : 補正後の平均気温 [°C]

T_a : 観測所での平均気温 [°C]

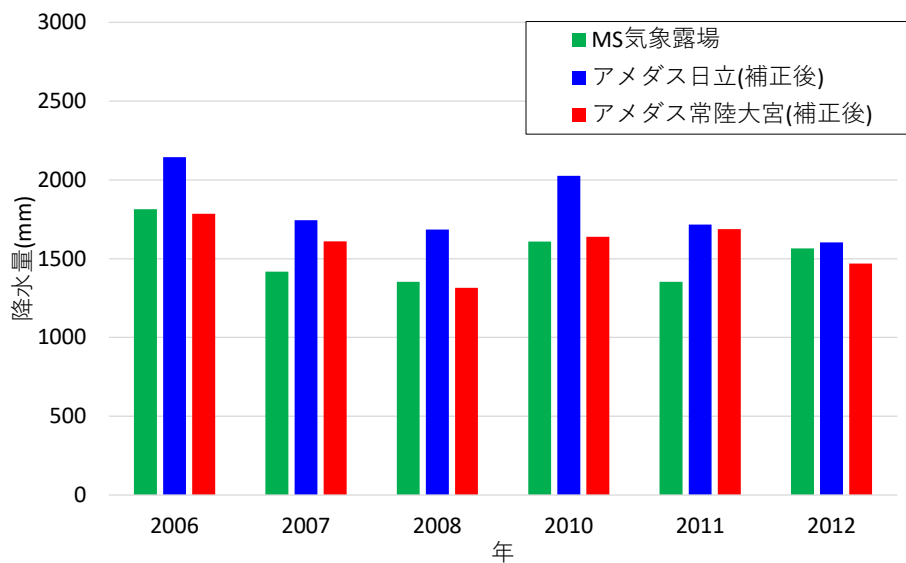


図 5.10 年降水量の比較

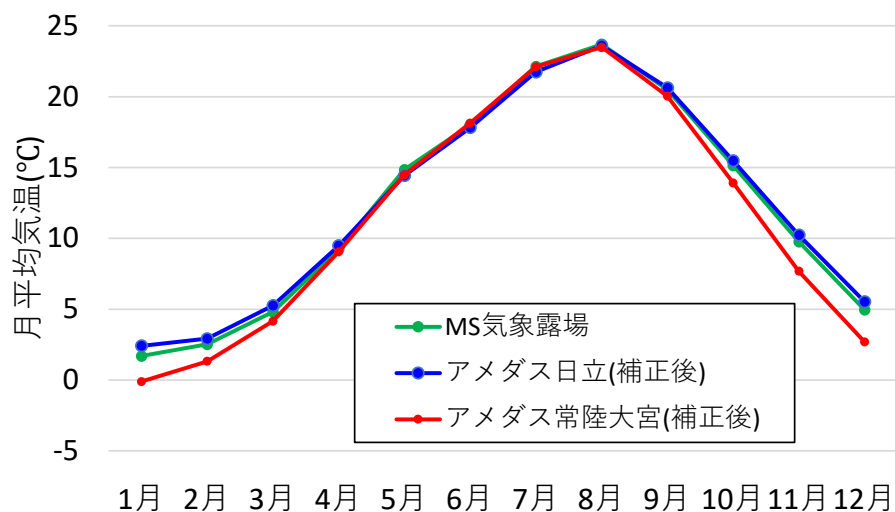


図 5.11 月平均気温の比較

(3) 降水の按分 (降雨と降雪)

降水の形態を降雨と降雪に分ける。

ここでは、図 5.12 に記載される太田 (1989) の方法で降雨/降雪割合を決定した。降雨/降雪量按分を行った結果を、表 5.7～表 5.9 に示す。

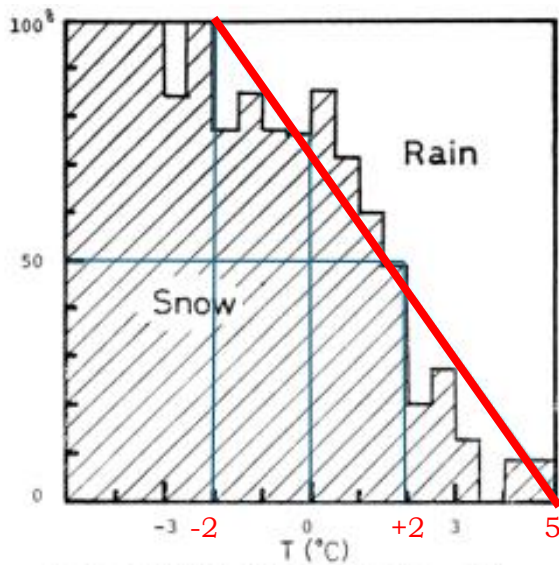


図 3 日平均気温(T)による降水形態の変化

気温(°C)	降雪割合(%)
5	0
4	14
3	29
2	43
1	57
0	71
-1	86
-2	100

月別平均気温から割合決定
↓
月別降水量から降雨降雪割合を決定
↓
遮断の計算方法を決定

図 5.12 降雨量と降雪量の決定方法 (太田, 1989 を参考に設定)

表 5.7 降雨/降雪按分を行った MS 気象露場の降水量

	年	降水量(mm)	降雨量(mm)	降雪量(mm)
間伐前	2006	1814	1763	51
	2007	1418	1396	22
	2008	1353	1312	41
間伐後	2010	1609	1551	58
	2011	1354	1290	63
	2012	1565	1458	108

表 5.8 降雨/降雪按分を行ったアメダス日立の降水量

	年	MS 気象露場 降水量(mm)	アメダス日立			
			標高補正前 降水量(mm)	標高補正後		
			降水量(mm)	降雨量(mm)	降雪量(mm)	
間伐前	2006	1814	1891	2145	2083	62
	2007	1418	1538	1745	1735	10
	2008	1353	1486	1685	1656	29
間伐後	2010	1609	1787	2027	1978	49
	2011	1354	1514	1717	1644	73
	2012	1565	1413	1603	1536	67

表 5.9 降雨/降雪按分を行ったアメダス常陸大宮の降水量

	年	MS 気象露場 降水量(mm)	アメダス常陸大宮			
			標高補正前 降水量(mm)	標高補正後		
			降水量(mm)	降雨量(mm)	降雪量(mm)	降雪量(mm)
間伐前	2006	1814	1615	1786	1673	113
	2007	1418	1456	1610	1562	48
	2008	1353	1189	1315	1259	56
間伐後	2010	1609	1483	1639	1552	87
	2011	1354	1526	1687	1585	102
	2012	1565	1329	1469	1298	171

(4) 遮断量の計算値と実績値との比較

3地点（気象露場、アメダス日立、アメダス常陸大宮）の降雨量・降雪量から蒸発散モデルで遮断量を計算した（表 5.10）。

久保田らによる実測値との比較を図 5.13 に示す。MS 気象露場（プロット○：流域から 100m の距離）の降水量から算定した遮断量が最も実測値と近い値となった。アメダス日立（プロット□）は補正後の降水量が 1～2 割程度、気象露場よりも大きく、算定された遮断量もすべて大きな値となっている。アメダス常陸大宮（プロット×）は気象露場との降水量のずれが日立ほどではなく、概ね気象露場のデータと同程度の結果が得られている。

アメダスの気象データを使う場合でも、現地との降水量に大きなずれがなければ、相応の精度が得られることが期待できる。

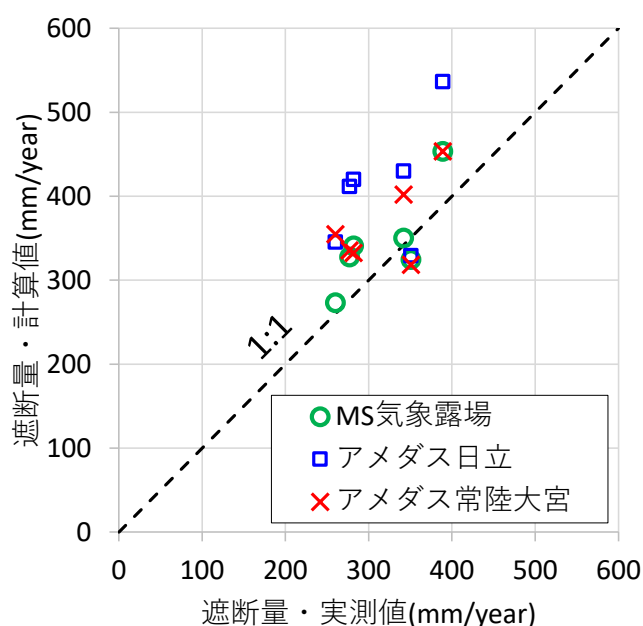


図 5.13 遮断量の計算値と実測値の散布図

表 5.10 モデル算定による遮断量と実測値との比較

	年	降水量から算定した遮断量(mm)			実測 (久保田) による遮断量 (mm)
		MS 気象露場	アメダス日立	アメダス常陸大宮	
間伐前	2006	455	538	458	389
	2007	353	432	404	342
	2008	340	420	333	282
間伐後	2010	329	410	340	277
	2011	279	353	352	260
	2012	329	329	321	351

5.3.3 蒸発散モデル：蒸散量の算出

(1) 単木蒸散量の算出

Tsuruta et al, 2019 を簡易化した簡易鶴田モデルにより単木の日蒸散量 Q_{t-day} (cm^3/day) を求める。

$$Q_{t-day} = Q_{tref} \cdot f(T_a)$$

$$f(T_a) = 0.0244T_a + 0.4361$$

$$Q_{tref} = 849DBH - 7350$$

Q_{t-day} : 単木蒸散量 [cm^3/day]

Q_{tref} : 単木蒸散量の参照値 [cm^3/day]

T_a : 月平均気温 [$^{\circ}\text{C}$]

DBH : 胸高直径 [cm]

表 5.11 単木蒸散量参照値 Q_{tref} の算出と流域内本数

	DBH (cm)	Q_{tref} (cm^3/day)	流域面積 (ha)	密度 (本/ha)	N 本数 (本)
間伐前	13.6	4196	0.88	2229	1962
間伐後	16.8	6913		1132	996

(2) 流域蒸散量

月平均気温 T_a から求まる日毎の単木蒸散量 Q_{t-day} に、当該月の日数 $days$ と流域内樹木本数 N を乗じ、流域の月蒸散量 $Q_{t-month}$ を得る。これを12か月分積算することで、年間蒸散量 Q_{t-year} が求められる。流域面積 A で除して水高単位に変換し、 mm 単位の年間流域蒸散量 Q_{t-mm} を得る。

$$Q_{t-month} = Q_{t-day} \cdot days \cdot N$$

$$Q_{t-year} = \sum Q_{t-month} \quad (1 \sim 12 \text{月または} 1 \text{水年分を積算})$$

$$Q_{t-mm} = \frac{Q_{t-year}}{A \times 10^7} \quad (\text{水高単位} \text{mm} \text{となるよう係数を調整})$$

$Q_{t-month}$: 1ヶ月の流域蒸散量 [$\text{cm}^3/\text{月}$]

Q_{t-year} : 1年間の流域蒸散量 [$\text{cm}^3/\text{年}$]

Q_{t-mm} : 1年間の流域蒸散量 [$\text{mm}/\text{年}$]

$days$: 月の日数 (1月=31日、2月=28日など)

N : 流域内の樹木本数 [本]

A : 流域面積 [ha]

計算によって得られたHV流域の蒸散量を表5.12にまとめた。

なお、久保田らは蒸発散量の推定を行っているが、蒸散量単体の推定は実施していないため、久保田らの値との直接比較は行えない。

表 5.12 算出された蒸散量

	年	蒸散量(mm)		
		MS 気象露場	アメダス日立	アメダス常陸大宮
間伐前	2006	251	252	244
	2007	255	256	247
	2008	251	252	245
間伐後	2010	216	214	207
	2011	213	211	203
	2012	211	210	201

5.3.4 蒸発散モデル：遮断量+蒸散量

5.3.2 と 5.3.3 の結果より、蒸発散モデルで算出された遮断量と蒸散量を足し合わせた(図 5.14)。

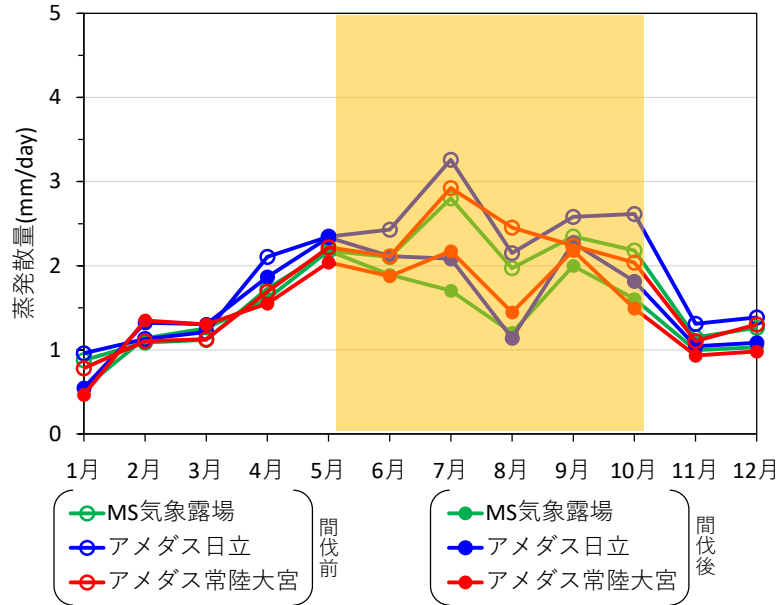


図 5.14 蒸発散モデルによる遮断量+蒸散量

図 5.15 は久保田らの論文内での蒸発散量 (evapotranspiration) である。久保田らによる蒸発散量 E は、次の式で算定され降雨と流量の開始日と終了日を設定し積算したものである。

$$E = P - Q = \int_{t_1}^{t_2} p(t)dt - \int_{t_1}^{t_2} q(t)dt$$

E : 蒸発散量 [mm]

P : 降雨 [mm]

Q : 流量 [mm]

$p(t)$: 日降水量 [mm/day]

$q(t)$: 日流量 [mm/day]

t_1 : 開始日

t_2 : 終了日

久保田らの蒸発散量と蒸発散モデルによる蒸発散量(蒸発散モデルは正確には遮断量+蒸散量)を重ねた図が図 5.16 である。

- 久保田と蒸発散モデルを比べると、**0.5~1.0 mm/day ほど蒸発散モデルの絶対値が小さい**。
- 蒸散量推定に使う簡易鶴田モデルは樹液流計測に基づく式である。樹液流による推定は、蒸散量を過小評価する傾向にあることが知られ、その影響が表れた可能性がある。
- 蒸発散モデルの構成は遮断+蒸散であり、**林床面蒸発が考慮されていない**。過小となったのはその影響の可能性もある。
- 久保田と蒸発散モデルで間伐後の曲線同士を比較すると 6月~10月にかけての変化傾向がよく再現されている。

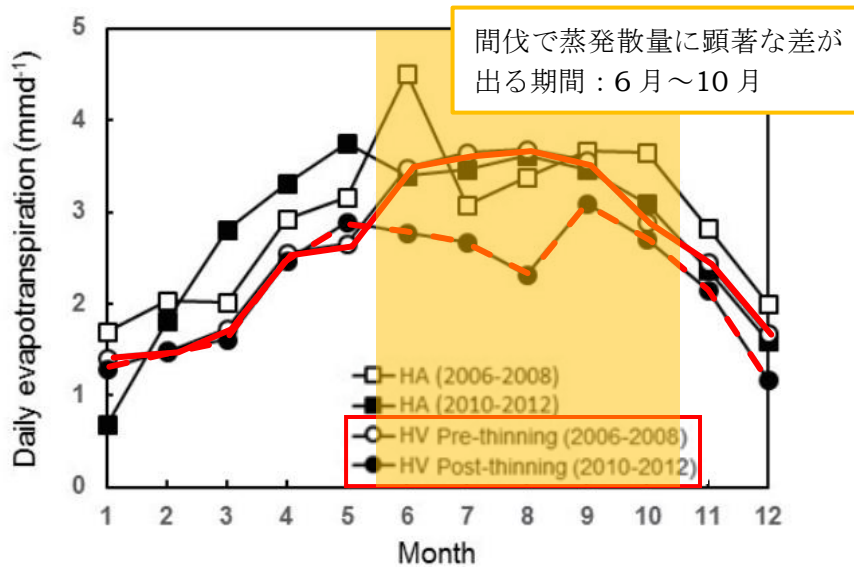


図 5.15 久保田らが算出した蒸発散量

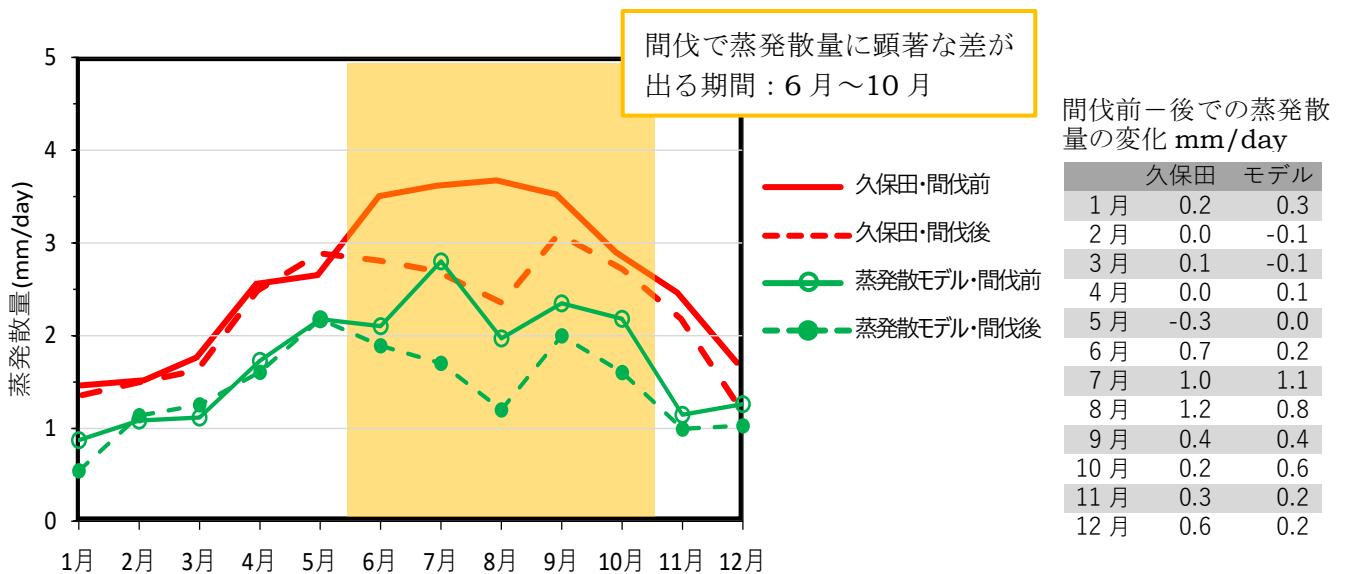


図 5.16 久保田らと蒸発散モデルによる蒸発散量の比較

蒸発散モデルで推定される蒸発散量は、観測値と比較して控えめな値が得られた。

モデルが採用する理論式の影響、または林床面蒸発の影響など複数の理由が考えられるが、その特徴を踏まえた使い方をするよう留意する必要がある。

5.4 節の内容はまだ試行錯誤の段階です。
参考資料としての扱いをお願いします。

5.4 (参考検討) 水資源涵養量の評価と検証

これまでの検討では、森林が発揮する水資源涵養量が評価されていない。ここでは水資源涵養量を評価する方法の試算例を示す。

5.4.1 常陸太田流域の水収支

一般に流域に降った降水の水収支構成は以下となる。

$$P = E + Q$$

P : 降水量 [mm], E : 蒸発散量 [mm], Q : 流出量 [mm]

ここで蒸発散量 E の内訳は以下であり、

$$E = I + E_T + E_F$$

I : 遮断蒸発量 [mm], E_T : 蒸散量 [mm], E_F : 林床面蒸発量 [mm]

流量 Q の内訳は以下となる。

$$Q = Q_D + Q_B$$

Q_D : 直接流出量 [mm], Q_B : 基底流出量 [mm], または 水資源涵養量 [mm]

森林の水資源涵養量は、 Q_B 基底流出量に該当する。

なお久保田らによる蒸発散量 E は、上の収支式を変換した次式で算定されたものである。

$$E = P - Q = \int_{t_1}^{t_2} p(t)dt - \int_{t_1}^{t_2} q(t)dt$$

E : 蒸発散量 [mm]

P : 降雨 [mm]

$p(t)$: 日降水量 [mm/day]

t_1 : 開始日

Q : 流量 [mm]

$q(t)$: 日流量 [mm/day]

t_2 : 終了日

久保田らは降水量と流量の積算期間 (t_1 : 開始日、 t_2 : 終了日) の設定を、短期水収支法で ΔS がゼロとなるよう定めている。それは流量 Q の式で Q_D と Q_B を分離しないよう期間 t_1 、 t_2 を設定することに等しく、久保田らのデータから水資源涵養量 (= Q_B : 基底流出量) の値を直接知ることはできない。

図 5.17 は常陸太田 HV 流域の水収支 (降水量 P 、蒸発散量 E 、流量 Q) を示したものである。

収支式から求まる $E_{\text{収支}} = P - Q$ が本来の蒸発散量だが、今回蒸発散モデルから算定した $E_{\text{モデル}}$ は $E_{\text{収支}}$ より過小となり、その誤差分を残差として表現した。

観測流量 Q の内訳が Q_D と Q_B である。観測や解析等の方法により Q と Q_D (直接流出量) が定まれば、 $Q_B = Q - Q_D$ より水資源涵養量を算定することが可能となる。

流量 Q を直接流出成分と基底流出成分に分離する方法は複数あるが、ここでは 4 章に示したカーブナンバー法の活用を考える。

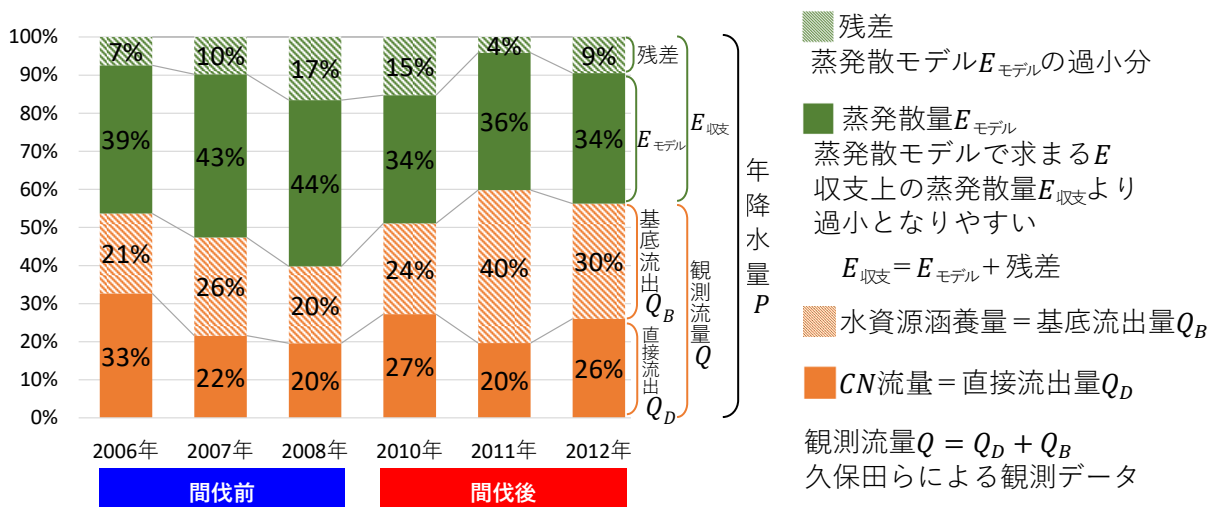


図 5.17 常陸太田 HV 流域での水収支割合 $P = E + Q$ (年降水量 P を 100%)

5.4.2 カーブナンバー流量を直接流出量として水資源涵養量を算出する

4 章のカーブナンバー法で得られるCN流量は実際のところ、 Q_D (直接流出量) に相当する流量とみなすことができる。そのことを踏まえて、流量データが存在する場合と存在しない場合、それぞれにおける水資源涵養量の検討方法を提示する。

(1) 流量データがある場合

流量データがある場合は、比較的シンプルである。流量 Q は多くの場合、観測で得られるが、その他の計測等による年流量 Q が存在する場合、以下の考え方で表 5.13 を得る。

- 常陸太田試験地の地質は中・古生層 (黒雲母片麻岩)。CN=78 を用いる。
- カーブナンバー法を使いCN流量を算出する。以下2種類の方法による。
 - A. イベント積算流量：4.4 に提示した洪水イベントごとのCN流量を1年間積算したもの
 - B. 早見表による流量：4.5 に提示した早見表で得られる年流量
- 得られたCN流量を直接流出量 Q_D とみなす。
- $Q_B = Q - Q_D$ で得られる基底流出量 Q_B を水資源涵養量とみなす。

表 5.13 流量データがある場合の水資源涵養量算出例 (常陸太田、中・古生層、mm/年)

年	降水量 P (mm/年)	流量 Q (mm/年)	直接流出 Q_D (CN流量)		水資源涵養量・ $Q_B=Q-Q_D$	
			A.イベント積算 CN=78	B.早見表	A.イベント積算 CN=78	B.早見表
2006	1,814	973	450	593	523	380
2007	1,418	672	277	306	394	365
2008	1,353	538	207	265	332	273
2010	1,609	821	264	438	557	383
2011	1,354	809	251	266	558	544
2012	1,565	881	270	408	611	473

図 5.18、図 5.19 は表 5.13 を収支割合で図化したものである。

図 5.18 は「A.イベント積算」の場合、図 5.19 は「B.早見表」の場合、それぞれで算定された直接流出量と水資源涵養量を示している。

「A.イベント積算」によるCN流量は「B.早見表」に比べ過小な流量が得られ、差し引きで算定される水資源涵養量が「A.イベント積算」では大幅に増える結果となった。「A.イベント積算」では、CN流量が小さいため、水資源涵養量が直接流出量以上の大きな値となっている。

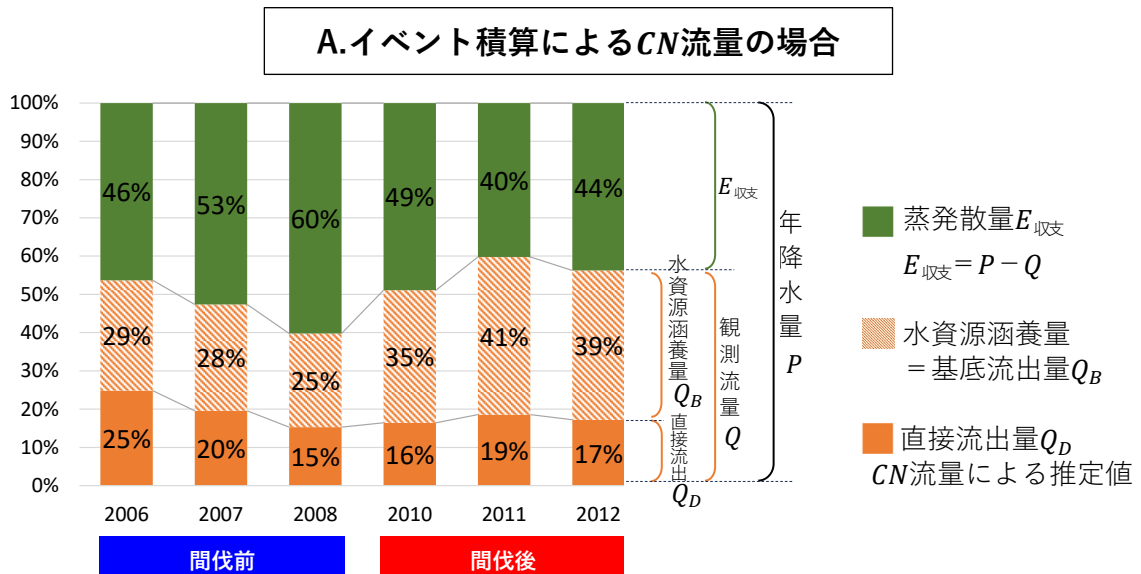


図 5.18 直接流出量と水資源涵養量の算定（「A.イベント積算」によるCN流量の場合）

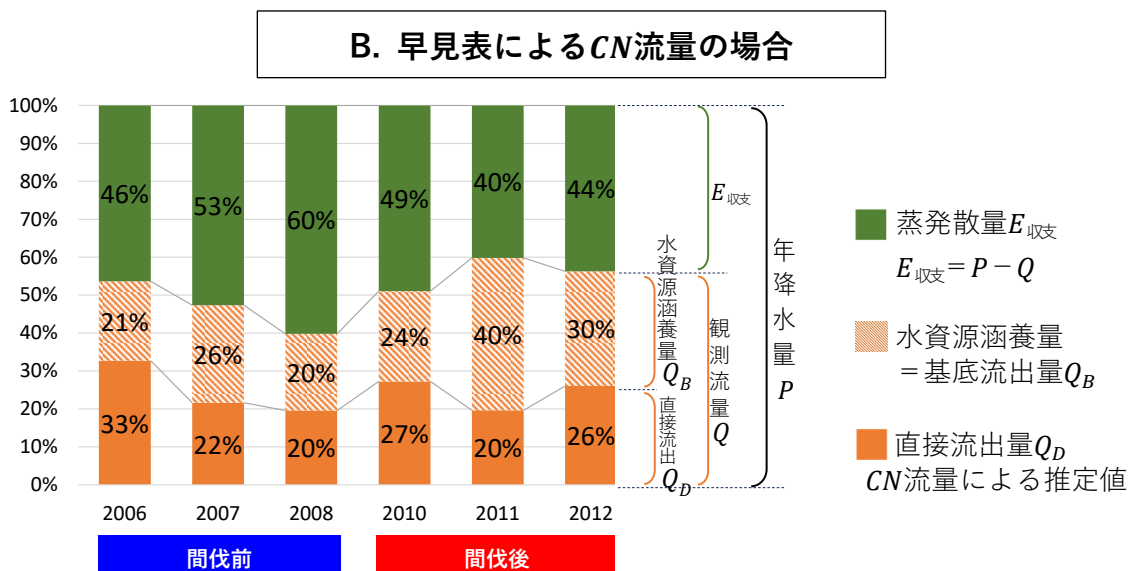


図 5.19 直接流出量と水資源涵養量の算定（「B.早見表」によるCN流量の場合）

(2) 流量データがない場合

水資源涵養量を求めたい場合、本来は流量を観測することがもっとも望ましい。しかし、流量観測は簡単に実施できるものでないことから、観測やその他計測等による流量データが存在しない場合の水資源涵養量算定の方法を紹介する。以下の考え方で表 5.14 を作成した。

- 常陸太田試験地の地質は中古生層（黒雲母片麻岩）。 $CN=78$ を用いる。
- **カーブナンバー法**を使い CN 流量を算出する。ここでは「早見表」を採用する。
- 「早見表」による CN 流量を直接流出量 Q_D とみなす。
- **蒸発散モデル**を使い、流域の蒸発散量 $E_{モデル}$ を算出する。
 - **通常の $E_{モデル}$** ：蒸発散モデルから得られる蒸発散量 $E_{モデル}$ をそのまま使う
 - **$E_{モデル}$ の値に 1.45 掛け**： $E_{モデル}$ による値は過小傾向があるので、1.45 倍した値を使う
- $Q = P - E_{モデル}$ で得られる値を流量 Q とみなす。
- $Q_B = Q - Q_D$ で得られる基底流出量を水資源涵養量とみなす。

表 5.14 観測流量データがない場合の水資源涵養量算出例（常陸太田、中古生層、mm/年）

年	降水量 P (mm/年)	直接流出 Q_D CN 流量 早見表より	蒸発散量 E		流量 $Q=P-E_{モデル}$		水資源涵養量 $Q_B=Q-Q_D$	
			$E_{モデル}$	$1.45E_{モデル}$	$E_{モデル}$	$1.45E_{モデル}$	$E_{モデル}$	$1.45E_{モデル}$
2006	1,814	593	706	1,024	1,108	791	515	197
2007	1,418	306	608	881	810	537	504	231
2008	1,353	265	591	857	762	496	497	231
2010	1,609	438	542	786	1,067	823	628	385
2011	1,354	266	489	709	865	645	599	379
2012	1,565	408	536	778	1,029	787	621	379

$E_{モデル}$ に **1.45 を乗じた**根拠を表 5.15 に示す。

表 5.15 蒸発散量の残差率（常陸太田、mm/年）

年	降水量 P	蒸発散量 $E_{モデル}$	収支残差	残差率	
2006	1,814	706	135	19%	
2007	1,418	608	139	23%	
2008	1,353	591	224	38%	
2010	1,609	542	245	45%	←最大
2011	1,354	489	56	11%	平均
2012	1,565	536	148	28%	27%

常陸太田地区 HV 流域で 2006～2012 年（2009 年除く）の 6 年における収支残差率の最大が 2010 年の 45%であった。収支残差が大きいほど水資源涵養量は小さくなる。水資源涵養量の過大評

価を避けるため、残差率の最大 45%を採用し、 $E_{\text{モデル}}$ を 1.45 倍したケースを検討に追加した。

図 5.20、図 5.21 は表 5.14 を収支割合で図化したものである。

なお、図 5.18、図 5.19 は実測ベースの蒸発散量で図化されたものであり、これと図 5.20、図 5.21 を比較すると蒸発散量の大小が把握できる。実測での蒸発散量の割合が 40~60%であるのに対し、 $E_{\text{モデル}}$ の値そのままを採用した図 5.20 は、蒸発散量の収支割合が 34~44%となり、蒸発散量が過小評価されている。

$E_{\text{モデル}}$ に 1.45 掛けした図 5.21 は、蒸発散量の収支割合は 49~63%でありやや過大だが、水資源涵養量の推定に用いるには 1.45 掛け程度が妥当といえる結果となっている。

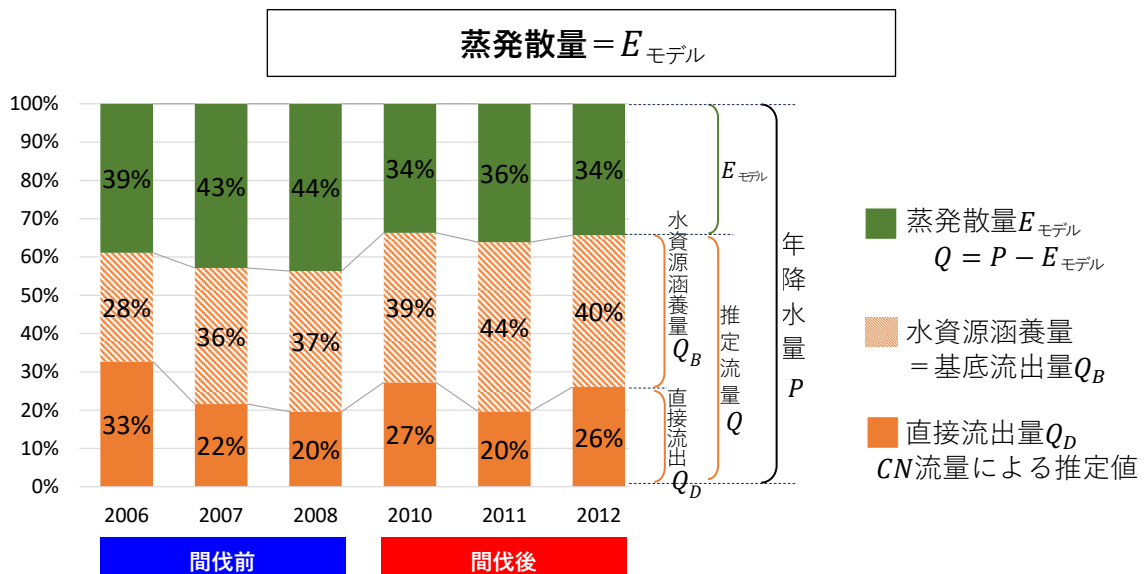


図 5.20 直接流出量と水資源涵養量の算定（「蒸発散量= $E_{\text{モデル}}$ 」の場合）

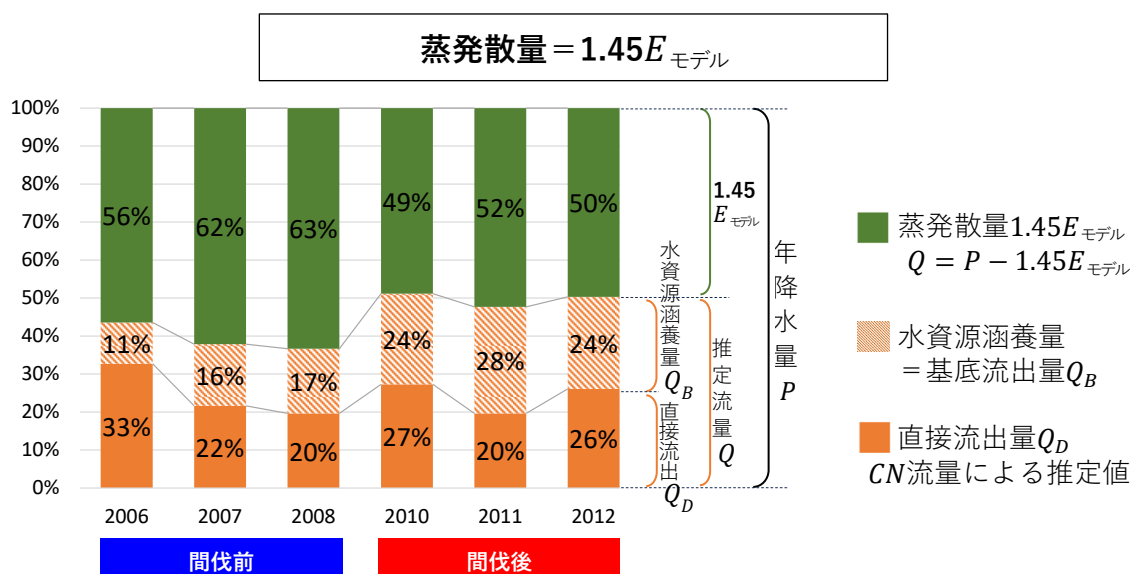


図 5.21 直接流出量と水資源涵養量の算定（「蒸発散量= $1.45E_{\text{モデル}}$ 」の場合）

5.5 (参考検討) 施業効果の評価と森林管理シナリオの例

準備中

参考文献

- CEO Water Mandate (2021): Benefit Accounting of Nature-Based Solutions for Watersheds
- Inokoshi, S., Gomi, T., Chiu, C. W., Onda, Y., Hashimoto, A., Zhang, Y., & Saitoh, T. M. (2023). A watershed-scale evapotranspiration model considering forest type, stand parameters, and climate factors. *Forest Ecology and Management*, 547, 121387.
- Komatsu, H., Shinohara, Y., & Otsuki, K. (2015). Models to predict changes in annual runoff with thinning and clearcutting of Japanese cedar and cypress plantations in Japan. *Hydrological Processes*, 29(24), 5120-5134.
- Komatsu, H. (2020) : Modeling evapotranspiration changes with managing Japanese cedar and cypress plantations, *Forest Ecology and Management Vol.475, No.1*, 118395. available online.
- 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 the Forestry and Forest Products Research Institute*, 17(1), 63-73
- 水村和正 (1998) : 水圏水文学, 山海堂, pp.253.
- Nagai S, Saitoh TM, Nasahara KN Suzuki R. (2015) Spatio-temporal distribution of the timing of start and end of growing season along vertical and horizontal gradients in Japan. *International Journal of Biometeorology* 59; 47-54.
- National Engineering Handbook Part 630 (2004) : Hydrology Chapter 9 Hydrologic Soil-Cover Complexes.
- National Engineering Handbook Part 630 (2009) : Hydrology Chapter 7 Hydrologic Soil Groups
- 太田岳史. (1989) : 気温および降水量による山地積雪水量の経時変化の推定, *雪氷*, 51(1), 37-48.
- Reig, P., Larson, W., Vionnet, S. and Bayart., J.B. (2019): “Volumetric Water Benefit Accounting (VWBA): A Method for Implementing and Valuing Water Stewardship Activities.” Working Paper. Washington, DC: World Resources Institute. Available online at <https://www.wri.org/publication/volumetric-water-benefit-accounting>.
- Rozza, J., Richter, B., Larson, W., Redder, T., Vigerstol, K., Bowen, P. (2013): Corporate Water Stewardship: Achieving a Sustainable Balance, *J. of Management and Sustainability*; Vol. 3, No. 4, p.41-52.
- Susan, L.N., Arnold, J., Kinyiri, J.R. Williams, J.R. (2011): Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009, Texas Water Resources Institute, <https://hdl.handle.net/1969.1/128050>
- Tsuruta, K., Komatsu, H., Kume, T., Otsuki, K., Kosugi, Y., & Kosugi, K. I. (2019). Relationship between stem diameter and transpiration for Japanese cypress trees: Implications for estimating canopy transpiration. *Ecohydrology*, 12(5), e2097.
- WWF ジャパン(2022): ICT 業界における水戦略 : ウォーター・スチュワードシップの取り組みを始めるためのステップ, <https://www.wwf.or.jp/activities/data/20230801sustainable03.pdf>
- 山田正, 日比野忠史, 荒木隆, & 中津川誠. (1995). 山地流域での降雨特性に関する統計的解析. *土木学会論文集*, (527), 1-13.

