

令和3年度
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)
委託事業

報告書

令和4年3月

林野庁

目次

1.	本事業の概要	1
1.1.	背景及び目的	1
1.2.	調査の流れ	1
1.3.	調査の内容	3
1.3.1.	水源涵養機能の解析・評価	3
1.3.2.	森林の水源涵養機能の知見の集約と解説・発信	3
2.	令和2年度の調査実施内容（水源涵養機能の解析・評価）	4
2.1.	基本方針の検討	4
2.2.	実施内容	6
2.2.1.	モデルの選定	6
2.2.2.	評価の手順	6
2.2.3.	調査対象地の選定	7
2.2.4.	モデル構築・解析の手順及び内容	12
(1)	林相区分に関する整理	14
(2)	林相とLAIの関係性に関する整理	19
(3)	SWATモデルによるシミュレーションの実施	19
2.3.	成果	20
2.4.	課題	21
(1)	入力データに関する課題	21
(2)	シミュレーション結果に関する課題	22
3.	SWATモデルの説明	25
3.1.	SWATモデルの概要	25
3.2.	モデルの構築手順	26
3.3.	入力データの収集	26
3.4.	モデルの設計・構築	27
3.5.	SWATモデルで考慮されない水文プロセス	30
4.	本年度の調査実施内容（構築済みモデルの精緻化及び新規モデルの構築）	31
4.1.	基本方針	31
4.2.	モデル構築・精緻化作業の流れ	32
4.3.	作業内容・結果	33
4.3.1.	モデルの条件設定	33
4.3.2.	入力データの収集・整理	33
(1)	気象データ	34
(2)	地形（DEM）データ	38
(3)	土壌データ	40

(4)	土地利用（林相）区分データ	44
(5)	河川流量データ	44
4.3.3.	林相区分図の見直し	46
(1)	貝沢モデル	46
(2)	道志・現代モデル	50
4.3.4.	林相区分図の作成	52
(1)	道志・過去モデル	52
(2)	三保・現代モデル	54
4.3.5.	崩壊地の判読（三保・過去モデルのインプットデータの作成）	55
(1)	作業目的	55
(2)	手法	56
(3)	結果	59
4.3.6.	林相区分図の妥当性の検証等	61
(1)	現地調査の方法	61
(2)	検証の方法	63
(3)	結果	64
(4)	考察	69
4.3.7.	パラメータ調整（キャリブレーション・バリデーション）	70
(1)	手法	70
(2)	結果	72
(3)	考察	89
4.3.8.	蒸発散量算出の検討	90
(1)	手法	90
(2)	結果	99
4.3.9.	土壌物理性に関する調査	109
(1)	方法	109
(2)	結果	110
5.	水源涵養機能の森林の成長や回復等による変化に係る評価	118
5.1.	水収支の評価	118
5.1.1.	土地利用別	118
5.1.2.	平水時・出水時別	120
5.1.3.	森林の管理状態別（樹種別、林分疎密度別）[評価の観点（イ）]	123
(1)	樹種別水収支	123
(2)	林分疎密度別水収支	124
5.1.4.	森林の成熟状態別（林齢別）[評価の観点（ロ）]	125
(1)	林齢別水収支	125

5.2.	洪水緩和機能の評価.....	127
5.2.1.	森林の管理状態別 [評価の観点 (イ)].....	127
(1)	樹種と蒸発散量の関係.....	127
(2)	林分疎密度と蒸発散量の関係.....	128
(3)	樹種と構成成分別流出量の関係.....	128
5.2.2.	森林の成熟状態別 [評価の観点 (ロ)].....	130
5.3.	渇水緩和・水資源貯留機能の評価.....	131
(1)	林分疎密度と浅層浸透量の関係.....	131
(2)	林分疎密度と深層浸透量の関係.....	132
5.4.	考察.....	132
6.	森林の状態と水の動態を統一的に評価できる指標の検討と整理.....	134
6.1.	検討・整理の方向性.....	134
6.2.	既存の水源涵養機能評価に関するレビュー.....	135
(1)	森林管理や森林の成長による影響.....	135
(2)	下層植生や土壌による影響.....	136
6.3.	実測をベースとした対象流域の水文特性の把握.....	137
(1)	降雨量と流出量の関係性の分析.....	137
(2)	過去・現代の流出傾向の把握.....	140
(3)	まとめ.....	141
6.4.	SWAT モデル出力結果の活用例.....	142
7.	森林の水源涵養機能に係る解説資料の作成.....	143
7.1.	洪水緩和機能等の評価結果に係る概要版の取りまとめ.....	143
7.2.	森林の水源涵養機能の評価に係る解説資料の作成.....	144
8.	検討委員会の開催.....	144
9.	引用文献.....	147
10.	巻末資料.....	153
(1)	各プロットで撮影した全天球写真及び開空率算出結果	
(2)	検討委員会議事概要	
(3)	洪水緩和機能等の評価結果に係る概要版	
(4)	森林の水源涵養機能に係る解説資料草稿骨子	
(5)	解説資料の引用文献候補	

1. 本事業の概要

1.1. 背景及び目的

近年、国内の森林資源は充実し、50年生以上の森林面積が半分以上を占める状況となっており、森林の公益的機能が過去に比べて向上しているのではないかと期待がある。一方で、公益的機能は森林土壌に依存するものであって森林の成長自体は機能の発揮に直接影響しないという見方もある。

また、昨今、豪雨をもたらす前線や大型の台風により激甚な土砂災害や洪水被害が発生しており、森林の水源涵養機能や土壌保全機能等の公益的機能の発揮に対する期待が高まるとともに、その効果が懐疑的に見られることもある。

このような状況を踏まえ、国内の森林の状態や公益的機能について広く適切な認知に資するとともに、森林の有する水源涵養機能の状態（程度）に応じた森林管理のあり方の検討にも資するよう、本事業においては、森林の水源涵養機能に関して、次の2点を実施することを目的とする。

- 水源涵養機能の定量的な把握と、森林の充実に伴う変化や森林の管理状態による相違等についての評価を行い、それらの関係性を分かりやすく整理する。
- 水源涵養機能に関係する最新の知見等を集約し、発信に適するよう整理して取りまとめる。

1.2. 調査の流れ

本事業は、令和3年6月1日から令和4年3月16日の期間で実施した。作業の流れを図1-1に示した。作業は大きく4つに分けられ、モデルの構築・精緻化及びそれらの結果をもとにした水源涵養機能の解析・評価を行う「(1) 水源涵養機能の解析・評価業務」、(1)の内容を含め、森林の水源涵養機能に係る最新の知見をとりまとめた解説書を作成する「(2) 森林の水源涵養機能の解説・発信業務」、さらに、(1)や(2)の作業を適切に遂行するための「(3) 検討委員会の開催」と、それらについて整理した「(4) 報告書とりまとめ」である。

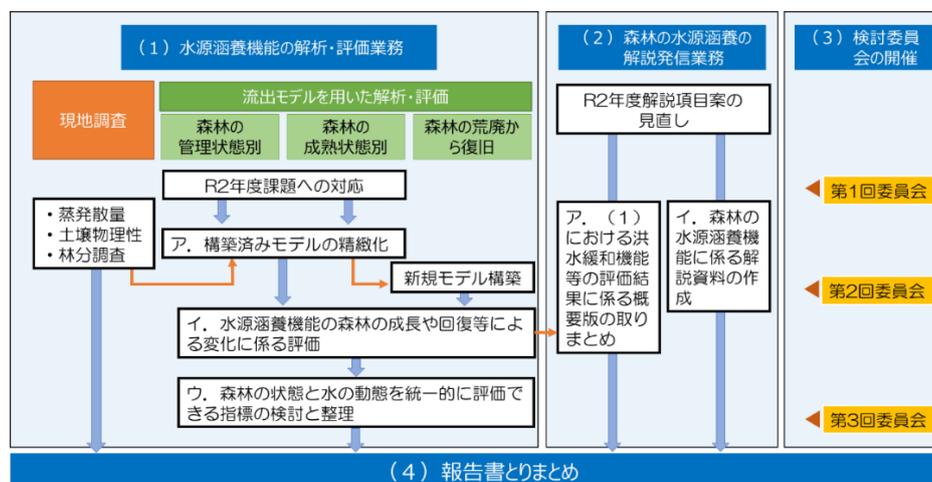


図 1-1 作業の流れ

本事業における調査スケジュールは、表 1-1 の通りである。

表 1-1 スケジュール

実施内容	R3(2021)							R4(2022)		
	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
(1) 水源涵養機能（特に洪水緩和や渇水緩和に資する効果）の解析・評価等業務										
ア. 構築済みモデル（貝沢試験流域・現代モデルAおよび道志ダム集水域・現代モデルB）の精緻化										
(i) 葉面積指数等について、森林の管理状態に応じた水源涵養機能に差異をもたらすと考えられる樹幹密度、相対照度や収量比数等との関係の合理性を整理	■									
(ii) 現地調査	■				■			■		
(iii) 既往研究の文献等調査		■				■	■			
(iv) モデルパラメータ調整および定量的評価	■	■	■	■	■	■	■			
イ. 水源涵養機能の森林の成長や回復等による変化に係る評価										
(i) 道志ダム集水域・現代モデルB をベースに1970年代の森林の状態を反映した道志ダム集水域・過去モデルC を構築		■	■	■	■	■	■	■		
(ii) 三保ダム集水域モデルの構築			■	■	■	■	■	■		
ウ. 森林の状態と水の動態を統一的に評価できる指標の検討と整理										
森林の状態のタイプ分け（指標化）	■					■			■	
森林指標に応じた水源涵養機能の程度に関する整理							■	■	■	
(2) 森林の水源涵養機能の解説発信業務										
ア. (1) における洪水緩和機能等の評価結果に係る概要版の取りまとめ		■					■			■
イ. 森林の水源涵養機能に係る解説資料の作成		■					■		■	
(3) 検討委員会の開催		◆					◆		◆	3/16納品
(4) 報告書のとりまとめ									■	★
打合せ（委員会前及び随時）	◆		◆		◆			◆		

なお、上記スケジュールのうち、「(1) 水源涵養機能の解析・評価業務」の「三保・過去モデル」の新規構築においては、後述のとおり、本年度はインプットデータ（林相区分図）の作成を優先することとしたため、実際の構築作業は次年度に繰り越しとなった。

1.3. 調査の内容

1.3.1. 水源涵養機能の解析・評価

本調査では、森林管理の計画・方向性の検討に資するよう、森林の成長や施業等の影響により異なる状態の林分について、それぞれが有する水源涵養機能の程度を把握し、それらの関係性を分かりやすく整理する（指標化）ことを目的としている。

本年度の調査においては、昨年度より構築・精緻化を進めている SWAT モデルを活用し、森林の管理状態や健全・荒廃の程度を表す要素（下層植生、遮断蒸発、土壌浸透能、保水能力、立木密度、収量比数、施業履歴等）及び森林の立地条件に係る要素（地形、地質等）のうち、流出特性や水収支に大きく影響を及ぼす因子を特定し、それらの因子が水源涵養機能（特に、洪水ピークの軽減や流出遅延効果等の洪水緩和に資する機能）にどのように影響するのかについて把握し、以下に示す評価の観点及び評価軸を踏まえ、可能な限り実態に則した定量的な推定及び評価等を行う。

【3つの評価の観点】

- (イ) 森林の管理状態別（管理／非管理）
- (ロ) 森林の成熟状態別（現代の森林／40年程度前の若・壮齢主体の森林）
- (ハ) 荒廃森林からの復旧（荒廃森林／回復森林）

【4つの評価軸】

- ① 水収支
- ② 洪水緩和
- ③ 渇水緩和
- ④ 水資源貯留

1.3.2. 森林の水源涵養機能の知見の集約と解説・発信

森林の水源涵養機能についての情報発信に資するよう、次の2点を実施する。

- 「水源涵養機能の定量的な把握と評価」の結果について、科学的なメカニズムと水源涵養機能の発現効果に関連づけ、図表等を用いた概要資料を作成する。
- 調査最終年度（令和4年度）において、森林の水源涵養のメカニズム・効果に関する解説資料の草稿を作成することを念頭に、昨今の森林の状況や最新の研究成果等を踏まえた草稿の骨子を作成する。

2. 令和2年度の調査実施内容（水源涵養機能の解析・評価）

2.1. 基本方針の検討

本事業の初年度である令和2（2020）年度は、森林の水源涵養機能（特に洪水緩和や濁水緩和）に応じた適切な森林管理のあり方の検討に資する、水源涵養機能の定量的な把握及び評価することを目的として、図4-1のとおり森林の水源涵養機能の評価に係る近年の課題の変化や各研究・調査の動向について整理し、本事業の位置づけを明確化する取組を行った。

戦後から平成12（2000）年以前にかけては、はげ山と拡大造林による植生回復地を比較した、いわゆる森林の有無による水源涵養機能の評価が主流であった。続いて、平成13年、23年の日本学術会議答申では、大規模な洪水ではピーク低減効果は大きくは期待できないことや、水源涵養機能は土壌の保水力に依るところが大きい等といったことが論じられるなど、評価の観点は変化を続け、さらに近年は、国内各地で森林荒廃の進行が顕著となってきたことから、間伐等の森林施業が流出に及ぼす影響の評価や、流出モデルを用いた森林流域からの長期的な流出量の推定に関わる取組も行われるようになってきた。

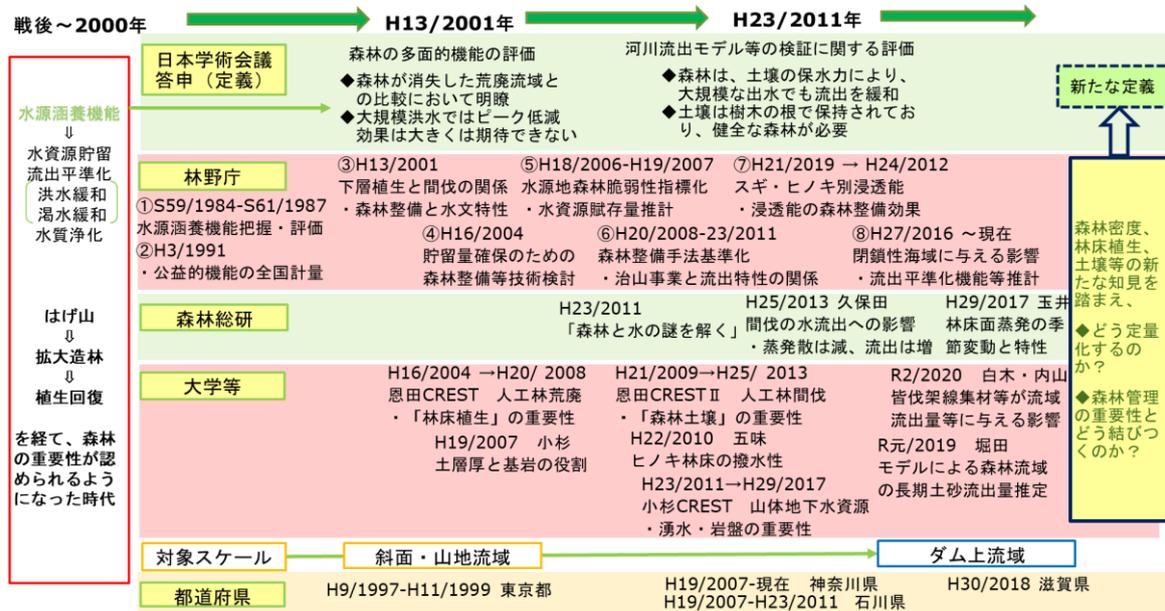


図 2-1 森林の水源涵養機能の評価を巡る近年の調査の動向

（令和2年度検討委員会資料より）

水源涵養に関わる社会の動きとしては、林野庁の「①水源涵養機能把握・評価」事業が実施されていた1980年代に、国税として水源税を導入しようという動きがあり、当時は実現しなかったものの、その後、自治体などによる独自の水源税導入等の事例にも後押しされる形で、森林の多面的機能の維持・向上を目的の一つとする森林環境譲与税が導入された。一方で、これまでの森林の水源涵養機能に関する調査・研究は、そのメカニズムが難解であること等により、多様な森林整備に直接活かすことが難しく、それらの成果の整理・発信も難しかったが、近年は新たな研究成果が蓄積されてきているところである。

以上のような、森林の水源涵養機能の評価に係る昨今の情勢を踏まえ、本事業における調査の基本方針を以下のように定めた。

日本国内の森林にフォーカスした水源涵養機能の評価

- 森林の水源涵養機能に関する最新の知見や情報を入手できるリソースは、海外文献も含めて豊富にあるが、日本国内の森林の特有の状況・課題への対応に資する水源涵養機能の評価を行う。

近年の国内の森林をとりまく課題を考慮した評価スケール

- 森林の過密化・荒廃、多発化する山地災害等、近年の森林をとりまく複合的な課題に対処するため、一定程度の規模のある流域（ダム集水域等）を単位として、森林・水・土壌を一体的に評価する視点を重視し、このような分析を行える広域かつ複合的な評価に有効なツールとして、シミュレーションモデルを活用する。

森林の水源涵養機能に係る評価・発信の必要性

- 森林の水源涵養機能に関する一般や森林管理・計画に携わる都道府県等の職員や森林技術者等への適確な知識・知見の普及に資する解説資料のとりまとめを行う。

2.2. 実施内容

2.2.1. モデルの選定

本事業では、流域を基本単位とした森林の水源涵養機能を広域で評価するために、流出モデルを活用することとし、モデルの選定に当たっては、昨年度の実施内容も踏まえ、特に以下のポイントを考慮し、SWAT (The Soil & Water Assessment Tool) モデルを活用することに決定した。

【ポイント 1：分布型（準分布型）モデルであること】

地形や土壌のタイプだけでなく、樹種や発達段階など、異なる状態にある森林の空間的な分布も表現できることが望ましい。

【ポイント 2：森林関連のパラメータが組み込まれていること】

本調査においては、森林の成長による変化を評価に加味する必要がある。このため、蒸発散、林床植被率、粗度係数など森林の状態を表現できるパラメータが組み込まれており、適用が可能であることが重要である。

【ポイント 3：時間スケールに応じた流出特性の解析が可能であること】

流域における流出特性を解明するためには、長期的な水収支に加え、豪雨時の洪水流出特性も把握することが望ましく、時間スケール（日・時間単位など）の変更・調整が可能であることが望ましい。

【ポイント 4：地下水挙動の解析が可能であること】

山地河川の流出特性を把握するため、基岩への浸透などを含む、地下水解析が可能なモデルであることが望ましい。

2.2.2. 評価の手順

本事業では、次の通り、モデル小流域における検証を経て、広域評価に展開していく手順を採用することとした。図 2-2 には、調査スケールの概念図を示す。

- ① 評価対象地域を、ダム上流の水源域等、具体的なイメージを持つことが可能な規模で設定する。
- ②-1 「森林の状態」と「水源涵養機能」の関係性の解明に向けた検証を可能にするため、机上での分析に加えて、現地観測及びデータ収集が可能な小流域規模のモデル流域も設定する。
- ②-2 モデル小流域における流出モデルの構築を行う。
- ③ モデル小流域で検証された結果を、①の評価対象地域の範囲に反映し、水源域スケールでの時点間の比較を含めた評価を行う。

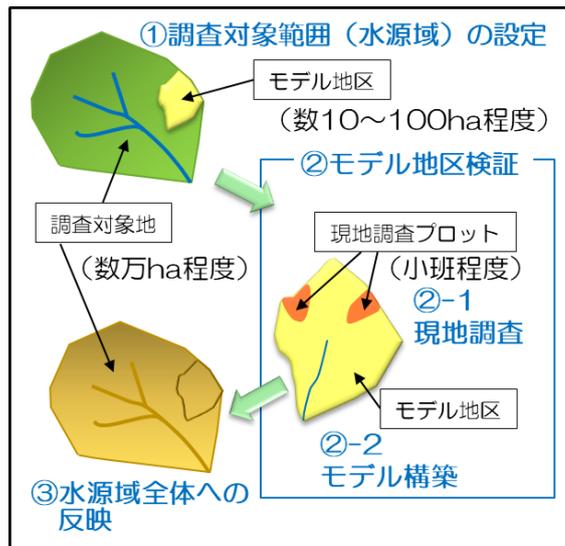


図 2-2 調査スケールの概念図

2.2.3. 調査対象地の選定

調査対象地は、貝沢試験流域、道志ダム集水域、三保ダム集水域の3流域とした。各流域の位置は図 2-3 に示す通りである。

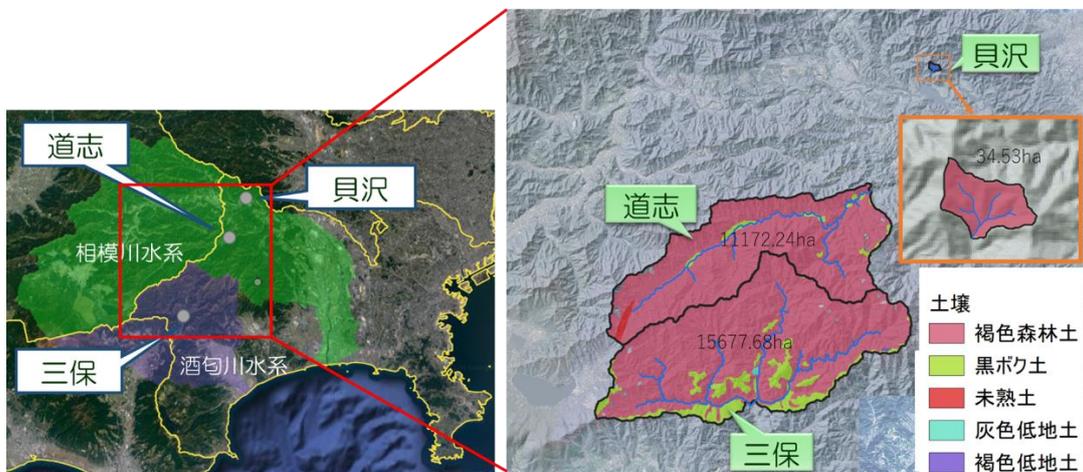


図 2-3 調査対象流域位置図

なお、令和2年度に行った調査対象地選定に当たっての検討過程を、以下に記載する。

本事業で調査対象とする流域の規模は2通りあり、一つは、水源涵養機能の広域的な評価を行うための比較的規模の大きい「評価対象流域」と、もう一つは、現地調査や航空レーザ解析などを通して、森林の物理的状态と水動態との関係性について検証し、パラメータ値の検討等を行うための「モデル小流域」である。前者については、図 2-4 に示すとおり、仕様書上、3つの選定条件が示されていた。

イ. 調査対象地域の選定

- ① 酒匂川水系の丹沢湖（三保ダム）、相模川水系の相模湖（相模ダム）、宮ヶ瀬湖（宮ヶ瀬ダム）の水源域
- ② 過去の同程度の降雨や湧水時の値との違いなどから過去と現在の値を比較した結果をモデルに反映可能なエリア
- ③ 森林整備による水源涵養機能が高まっていることを評価するために、40年程度前の林況の把握が可能なエリア

図 2-4 評価対象地域の選定

これを踏まえ、本調査では、以下の 4 点を評価対象流域の選定における重要ポイントと捉え、上記の条件その他に係る各候補流域の状況について表 2-1 に整理した。

- 酒匂川水系の丹沢湖（三保ダム）、相模川水系の相模湖（相模ダム）、宮ヶ瀬湖（宮ヶ瀬ダム）の水源域であること
- 気象やダム流入量のデータの活用のし易さ
- 過去の森林情報の入手性の高さ
- 有識者へのヒアリングに基づくモデル小流域としての適性

表 2-1 選定条件にかかる各候補流域の状況に関する整理表

直轄河川水系	流入する湖（ダム）	試験流域名 （モデル地区候補）	流域面積（ha）	森林以外の影響の排除	条件2 ダム・気象データ		既往研究の有無・実測データ入手性						条件3 過去の林相情報の入手性		条件4 水源林整備の積極導入		モデル地区候補地としての適性	調査対象地としての適性	
					気象	ダム流入量	降水量	気象	流量	土層厚	地下水頭	地表面被覆分布	落葉の供給・移動	森林簿（現況）	森林簿（過去）	空中写真			ヒアリング
相模川	相模湖（相模ダム）	貝沢（No.4）	96																
		No.1	7	○	○	△	○	○	○	○	○	○	△	○	○	◎	○	○	
		No.2	8	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		No.3	15	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	宮ヶ瀬湖（宮ヶ瀬ダム）	大河沢（No.2）	51																
	No.1	48	○	○	×	○	○	○	○	○	○	○	△	○	○	×	-	×	
	No.3	7	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	No.4	5	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	道志ダム（奥相模湖）	-		○															
酒匂川	丹沢湖（三保ダム）	又タノ沢	7																
		フチジリ沢	76	○	○	△	○	○	×	○	○	○	-	-	○	△	○	△	×

以下に、調査結果について詳細を記す。

条件1: ダム水源域であること

本調査における評価対象地域として、酒匂川水系の丹沢湖（三保ダム）、相模川水系の相模湖（相模ダム）、宮ヶ瀬湖（宮ヶ瀬ダム）の水源域であることが、本事業の仕様書上、指定されている。今回、神奈川県内のダム上流域が選定されている理由として、以下のことが挙げられ

る。

- 令和元年台風 19 号による甚大な被害があった。
- 神奈川県では水源林の整備に力を入れており、モニタリングデータの供与協力が得られる（※神奈川県自然環境保全センター、神奈川県庁のご厚意による）。
- イメージの湧きやすいメジャーなダムや水源が存在する。

条件 2: 気象やダム流入量のデータの活用のし易さ

気象やダム流入量データの活用のイメージとしては、ダム水源域における過去（40 年程度前）と現在の洪水時や渇水時の流出量や流出遅延時間の比較、流出モデルのキャリブレーションにおける参照などが挙げられる。

具体的には、過去と同程度の降雨や渇水時の値との違いから、過去と現在の値を比較した結果をモデルに反映するため、気象やダム流入量のデータについて、以下の分析、検討が可能であることが重要である。

- アメダスデータによる洪水・渇水時及び平均的な年の降雨量の比較
- 洪水・渇水時の時点における森林の状況と流量の関係性
- ダム上流の取水・導水等の状況
- 過去の洪水・渇水時におけるダム流入量をモデルへ反映する方法の検討

条件 3: 過去の森林情報の入手性の高さ

調査対象地は、現在の水源涵養機能が、森林整備や森林の充実により、過去の一時期に比べて高まっていることを評価できると期待できるエリアである必要がある。例えば、以下の条件を満たしていることが望ましい。

- 水道水源林等の整備が積極的に進められていた森林地域であること
- 森林簿や施業計画図が入手可能であること
- 森林簿の情報や航空写真等により、40 年程度前の林況の把握が可能であること

これについて、神奈川県からは、近年の森林簿のほか、水源林整備履歴データ等が入手可能であることが分かった。ただし、40 年ほど前からの全てのデータは残っていないため、データの無い時期の森林状態の把握には、空中写真の活用が有効であると考えられた。

40 年程度前の空中写真データの有無について確認が可能である国土地理院の Web サイト「地図・空中写真閲覧サービス」（図 2-5）を活用した調査の結果、今回候補となっている水源域では、1970 年代以降の空中写真（カラー・白黒）が入手可能であることが分かった。

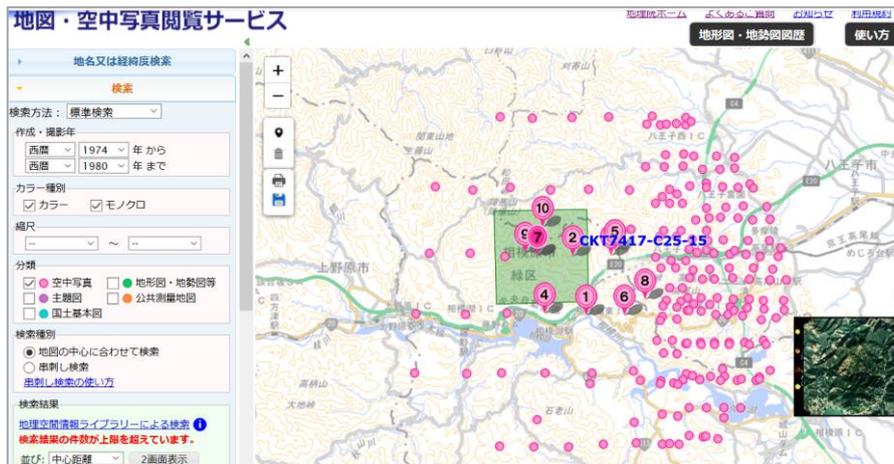


図 2-5 「地図・空中写真閲覧サービス」 Web サイト

条件 4: 知見者からの助言結果（ヒアリング）

神奈川県では、「森林のモニタリング調査」を実施しており、各試験流域の状況に詳しい神奈川県自然環境保全センターの内山氏や、過去にモニタリング調査の一試験地である大洞沢流域で研究・調査を行い、当該試験流域に知見のある、本事業委員の五味委員（東京農工大学）に各試験流域の状況についてヒアリングを行った。

その結果、以下の情報が得られた。

- 宮川瀬ダム水源域内にある大洞沢試験流域では、流量観測データの入手が可能であるが、優占樹種が広葉樹であることや、宮ヶ瀬ダム自体が比較的新しいダムであるため、過去のダム流入量データの蓄積が少ない。また、2019 年台風の影響により、2020 年夏の時点ではアクセス不可の状態になっている。
- 三保ダム水源域内にあるヌタノ沢流域やフチヂリ沢試験流域では、大洞沢試験流域と同様、流量観測データの入手は可能であるが、地質の影響により流出パターンが単純ではないことや、シカ被害の影響も少なくないため、当事業の調査に適しているとは言い難い。
- 相模ダム水源域内にある貝沢試験流域では、流量観測データの入手が可能であるほか、流出パターンが比較的単純のため、水文調査に適している。

これらの調査の結果、モデル小流域としては「貝沢試験流域」が妥当と考えられた。

また、全体の評価対象流域としては、貝沢試験流域を包含する相模ダム水源域が有力候補と考えられたが、検討委員会において、当該水源域は、山梨県の富士山頂を含む 1,016 km² (101,600 ha) 程度の大規模な流域であり、森林以外の土地利用に関わる要素も多く含まれることから、流出モデルにより検証を試みるには適切な流域とは言い難いとの意見が出された。

そのため、相模川の本流は避け、上流側において発電所による導水などの影響がなく、森林率やダム流入データの入手性等の見地から最適な流域として、支川である道志川流域を選定した。

以上のように、ダム水源域であること、既存モニタリングデータの入手性、人工林率、評価スケール等を考慮し、検証を含むモデル小流域として、神奈川県でのモニタリング試験地でもある「貝沢試験流域」、広域評価対象流域として「道志ダム集水域」を選定することとした。

さらに、三保ダムの上流域についても、崩壊から回復した流域を再現するにはふさわしい流域であるとの検討委員会での助言を踏まえ、令和3年度事業では、新たに調査対象地として追加した（表2-2）。

表 2-2 ダム水源域の流域概要及びダム諸元

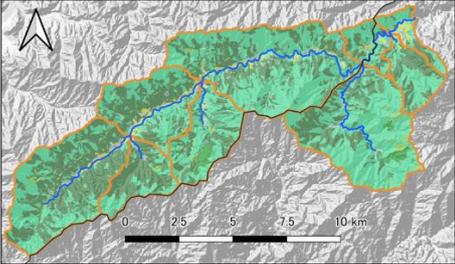
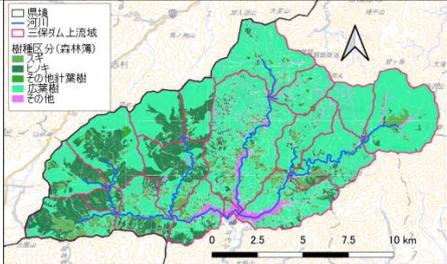
	道志ダム	三保ダム
水系	相模川水系	酒匂川水系
流域面積	111.66 km ² (11,166ha)	156.45 km ² (15,645ha)
河川	道志川	河内川
貯水池	奥相模湖	丹沢湖
ダム竣工年	1955年	1979年
有効貯水容量	616,100m ³	54,500,000m ³
取水・導水の影響	無し	有り（発電所）
流域の主な地質	玄武岩、安山岩、火山噴出物	火山噴出物
森林率（森林面積）	94.1% (105.07 km ²)	94.4% (147.64 km ²)
人工林（針葉樹）率	44% (46.51 km ²)	30% (44.29 km ²)
植生図		

図 2-6 は、令和2年度にモデル構築を行った貝沢試験流域及び道志ダム集水域の位置図である。



図 2-6 調査対象流域の位置図

2.2.4. モデル構築・解析の手順及び内容

SWAT モデルの構築・解析には当たっては、モデルで利用している各パラメータの値を設定する必要がある。これらは、蒸発散に関するもの、浸透・表面流出に関するもの、地下水流出に関するものなど数多く存在するが（第 3 章の図 3-3 参照）、令和 2 年度は、成長や施業等による森林状態の違いや変化を反映でき、比較的考慮のしやすい蒸発散関連パラメータの調整を優先的にを行うこととした。

後述するが、SWAT モデルにおいては、蒸発散量は林分内の葉面積に大きく関係する。葉面積は林分状態により大きく変わるため、まず、1) 林分状態の評価に係る作業として、①林相区分に関する整理や、林分疎密度の区分判定に用いる②立木密度の推計を行い、次に、その結果を基に、2) 林相と LAI の関係性に関する整理として、③文献整理を行った上で、④蒸発関連パラメータ値の設定に関する検討を行い、最後に、上記 1)、2) より得られた知見や情報を適用して、3) SWAT モデルによってシミュレーションを実施する流れで行った。以降で、各作業内容を詳述する。

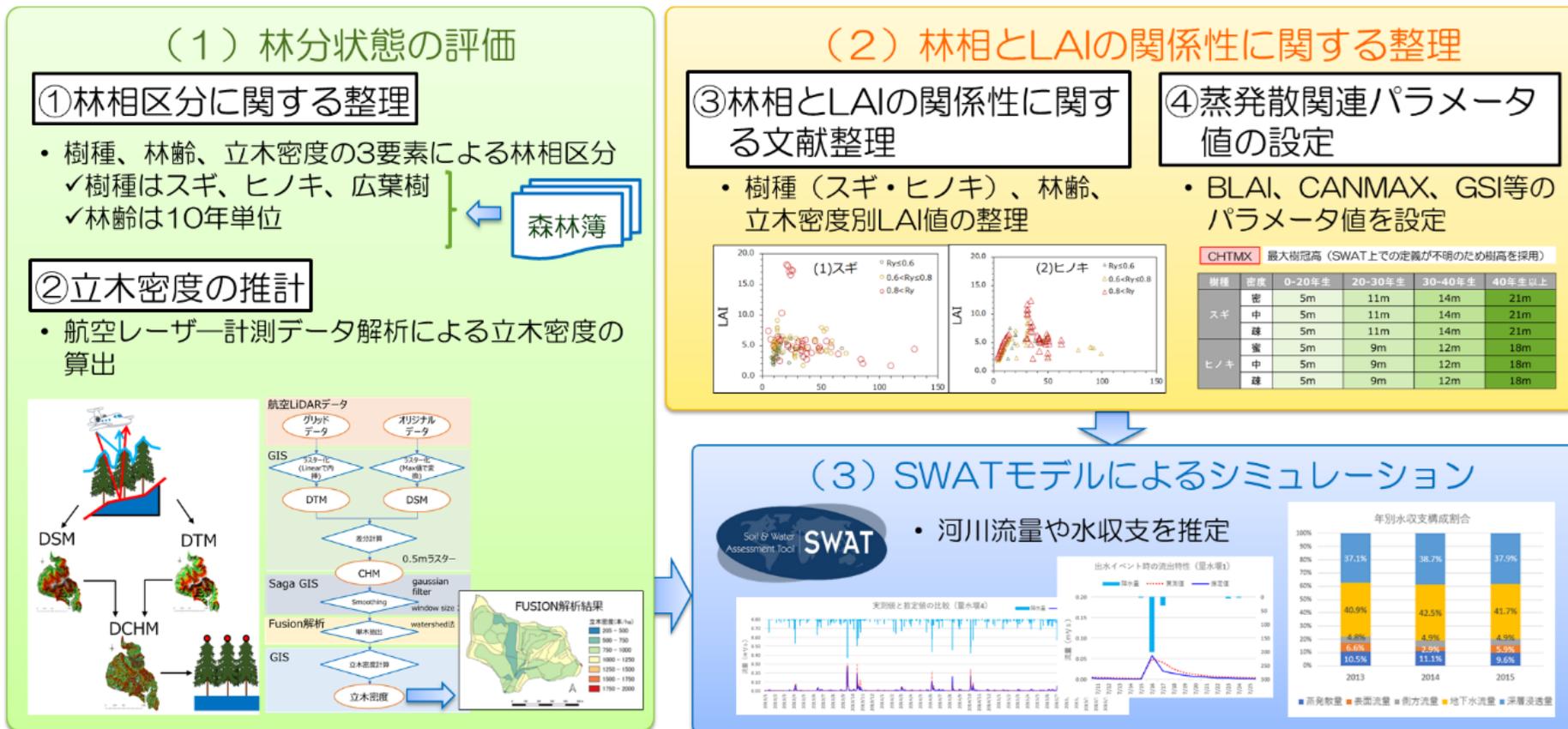


図 2-7 令和 2 年度調査におけるモデル解析・評価の流れ

(1) 林相区分に関する整理

林相区分は、森林の水源涵養機能に大きく影響すると考えられる、「樹種」、「林齢」、「林分疎密度」（厳密には収量比数に相当するが、本調査では便宜上、このように表記する。）の3つの要素で整理することとした。データ量が大きくなりすぎるとPCを用いた分析に要する時間も長くなることを踏まえ、樹種は「スギ」、「ヒノキ」、「広葉樹」の3区分とし、林齢は「0～10年生」、「10～20年生」等、2齢級毎に分類した。

また、林分疎密度については、貝沢試験流域においては、点群密度が 1m^2 当たり1点以上の航空レーザデータの入手が可能であった（国土地理院より「H20 渡良瀬川流域及び鬼怒川流域航空レーザ計測業務成果」提供を受けた）ため、当該データの解析により立木密度（林班毎の立木本数から算出）や樹高を算出し、それらの値を神奈川県収量比数判定表（スギ・ヒノキ）を基に本事業において作成した林分疎密度区分判定表（表 2-3、表 2-4）と照らし合わせ、密度区分「密」、「中」、「疎」を当てはめた。

表 2-3 スギの林分疎密度区分判定表 (1:疎、2:中、3:密)

樹高 (m) \ 立木密度	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
0~100本/ha	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
100~200本/ha	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
200~300本/ha	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
300~400本/ha	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
400~500本/ha	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
500~600本/ha	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
600~700本/ha	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
700~800本/ha	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3
800~900本/ha	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
900~1000本/ha	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
1000~1100本/ha	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
1100~1200本/ha	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
1200~1300本/ha	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
1300~1400本/ha	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
1400~1500本/ha	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
1500~ 本/ha	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3

表 2-4 ヒノキの林分疎密度区分判定表 (1:疎、2:中、3:密)

樹高 (m) \ 立木密度	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
0~100本/ha	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
100~200本/ha	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
200~300本/ha	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
300~400本/ha	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2
400~500本/ha	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
500~600本/ha	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3
600~700本/ha	1	1	1	1	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
700~800本/ha	1	1	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
800~900本/ha	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
900~1000本/ha	1	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
1000~1100本/ha	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
1100~1200本/ha	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
1200~1300本/ha	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
1300~1400本/ha	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
1400~1500本/ha	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
1500~1600本/ha	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
1600~ 本/ha	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3

道志ダム集水域については、航空レーザデータが十分でなかったことから、山梨県及び神奈川県から提供を受けた森林簿に記載された樹冠疎密度（「密」・「中」・「疎」）を、そのまま採用することとした。このようにして収集した樹種・林齢・林分疎密度の情報を組み合わせ、表 2-5 のようにコード化した（樹種・林齢・林分疎密度の各コードの値から、4桁の「林相コード」を作成し、それらを SWAT モデルでの植生タイプである「crop ID」に対応させる。「crop ID」は本事業で任意に設定したものであり、cropID 毎に LAI 等のパラメータの値が設定されている。）。この結果、針葉樹で 36 区分（スギ 18、ヒノキ 18）、広葉樹で 2 区分の全 38 区分の林相コードが設定された。また、森林以外の土地利用にも適切な crop ID を割り当てた。

表 2-5 林相区分の設定一覧

土地利用	林相区分図SHP						SWATモデル crop ID	
	林齢	林分 疎密度	樹種 コード	林齢 コード	林分疎密 度コード	林相コード		備考
スギ	<10年生	疎	1100	0	1	1101	植林予定の未立木地を含む	FSAS
		中	1100	0	2	1102		FSAM
		密	1100	0	3	1103		存在少ない
	10~20年生	疎	1100	10	1	1111		FSBS
		中	1100	10	2	1112		FSBM
		密	1100	10	3	1113		FSBD
	20~30年生	疎	1100	20	1	1121		FSCS
		中	1100	20	2	1122		FSCM
		密	1100	20	3	1123		FSCD
	30~40年生	疎	1100	30	1	1131		FSDS
		中	1100	30	2	1132		FSDM
		密	1100	30	3	1133		FSDD
	40~50年生	疎	1100	40	1	1141		FSES
		中	1100	40	2	1142		FSEM
		密	1100	40	3	1143		FSED
>50年生	疎	1100	50	1	1151		FSFS	
	中	1100	50	2	1152		FSFM	
	密	1100	50	3	1153		FSFD	
ヒノキ	<10年生	疎	1200	0	1	1201	植林予定の未立木地を含む	FHAS
		中	1200	0	2	1202		FHAM
		密	1200	0	3	1203		存在少ない
	10~20年生	疎	1200	10	1	1211		FHBS
		中	1200	10	2	1212		FHBM
		密	1200	10	3	1213		FHBD
	20~30年生	疎	1200	20	1	1221		FHCS
		中	1200	20	2	1222		FHCM
		密	1200	20	3	1223		FHCD
	30~40年生	疎	1200	30	1	1231		FHDS
		中	1200	30	2	1232		FHDM
		密	1200	30	3	1233		FHDD
	40~50年生	疎	1200	40	1	1241		FHES
		中	1200	40	2	1242		FHEM
		密	1200	40	3	1243		FHED
>50年生	疎	1200	50	1	1251		FHFS	
	中	1200	50	2	1252		FHFM	
	密	1200	50	3	1253		FHFD	
広葉樹	<20年生	中	2100	0	2	2102		FBYM
	>20年生	中	2100	20	2	2122		FBOM
タケ	-	-	3100	0	2	3102	タケは広葉樹(2102)に統合	FBYM
伐採跡地・未(無)立木地	-	-	5500	-	-	5500		BSVG
崩壊地	-	-	6600	-	-	6600	災害などによる攪乱地、荒廃渓流を含む	BSVG
水田	-	-	-	-	-	100		RICE
農地	-	-	-	-	-	200		AGRL
自然裸地・解放水域	-	-	-	-	-	600		BSVG
都市部	-	-	-	-	-	700		URLD
水域	-	-	-	-	-	1500		WATR
草地、芝生、ゴルフ場	-	-	-	-	-	1600		PAST

(2) 林相と LAI の関係性に関する整理

図 2-8 のとおり、SWAT モデルにおける蒸発散（樹冠遮断蒸発、蒸散、土壌蒸発）パラメータは、葉面積指数（区域内に生育する全植物の葉面積の合計値を単位面積当たりに換算した値。以下、「LAI」とする。）の関数で表現可能なものが多い。葉面積指数を、林相の要素（樹種、林齢、林分疎密度）から適切に変換・集約するため、文献整理を行って検討・設定を行った（図 2-8 の赤枠部分）。

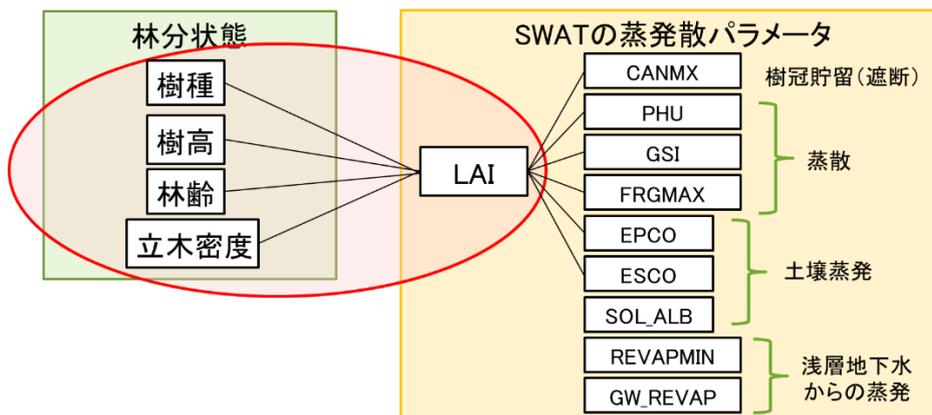


図 2-8 SWAT モデルの蒸発散計算に使用される主なパラメータ

また、SWAT モデルには組み込まれていない、森林域における林床面蒸発散プロセスについても、シミュレーション上、考慮する必要性を検討するため、まずは、東京農工大学の試験地である貝沢試験流域において、樹液流や林床面蒸発散量の現地調査を行うこととした。

(3) SWAT モデルによるシミュレーションの実施

1)、2) において整理・検討した事項を踏まえて構築した貝沢モデル及び道志モデルにより、シミュレーションを実施した。

シミュレーションでの設定条件のうち、複数のオプションから選択することのできる蒸発散の計算式には、設定できるパラメータが最も多く、各土地条件に対してより適切な蒸発散量を算出できると考えられたペンマン・モンティース法を採用することとし、表面流出の計算には、カーブナンバー法とグリーン&アンプト法の双方によるシミュレーションを試行し、結果を比較して検討することとした。

2.3. 成果

令和2年度調査の主な成果は以下のとおりである。

- 貝沢試験流域と道志ダム集水域を対象とした林相区分図を作成するとともに、それらをインプットデータとして貝沢モデルと道志モデルを構築した。
- モデルの蒸発散関連パラメータのうち、BLAI（最大葉面積指数）¹、CANMAX（樹冠最大貯留量）²、GSI（最大気孔コンダクタンスの分数）³等について、林相とLAIの関係性に関する文献調査により、実態を踏まえた値を設定した。
- 貝沢試験流域における林床面蒸発散量の現地調査により、今後、SWATモデルで林床面蒸発散を考慮する場合に必要な基礎データを得ることができた（植生ありプロットで0.01～0.72mm/日、土壌のみのプロットで0.01～0.34mm/日）。
- 浸透プロセスの計算方法として、カーブナンバー法とグリーン&アンプト法の双方を試行・比較した結果、両者の推定精度に大きな違いは生じなかったことから、森林の洪水緩和機能を評価する本事業においては、時間単位でより詳細な解析が可能なグリーン&アンプト法の方がより有効な方法と判断した。
- 更なる精緻化の必要はあるものの、シミュレーションを通して、対象流域から流出する河川流量や水収支を一定程度、定量化することが可能となった。

1 BLAI（最大葉面積指数）：単位面積当たりの葉面積の総和の最大値（植物の繁茂期）（ m^2/m^2 ）。

2 CANMAX（樹冠最大貯留量）：葉面積の関数として変化する樹冠貯留量の最大値。

3 GSI（最大気孔コンダクタンス）：気孔における水蒸気や二酸化炭素などの通りやすさを表す指標。

2.4. 課題

(1) インプットデータに関する課題

インプットデータに関する課題としては、以下の2点が挙げられた。

【課題1】林相区分図の妥当性に関する検証が不十分

令和2年度に作成した林相区分図には、表2-6に示す4つの課題があり、モデルの精度を向上させるためには、各要素の算出方法の見直しや、精度について実測値との比較・検証が必要と考えられた。

表 2-6 林相区分図の課題

	内容	対象流域
課題1-1	林分疎密度区分の判定に必要な立木密度の算出は、低密度LPデータ（平成21年度計測成果）を用いた樹頂点解析によるものであったが、実測の立木密度による補完・調整が行われていない。	貝沢
課題1-2	樹種が不明確な「その他針葉樹」という区分が残存している。	道志
課題1-3	LPデータ解析や森林簿情報に基づき設定した林分疎密度「疎・中・密」の妥当性の確認が不十分である。	貝沢・道志
課題1-4	林分疎密度区分「疎」・「中」・「密」に対する実際の立木密度の範囲が確認できていない。	貝沢・道志

【課題2】土壌に係るインプットデータの妥当性の検証が不十分

SWATモデルに必要な土壌に係るインプットデータの収集には、林野庁の有明海を対象地とした調査事業（平成24年度～）において整理された土壌データベースを用いた。この土壌データベースは、農林省農政局農産課の補助事業により、都道府県の農業試験研究機関が実施した地力保全基本調査（1959-1978年）の成果を基とする土壌情報データベースの内容や、大貫・吉永（1995）⁴、Kobayashi&Shimizu（2007）⁵、久米ら（2008）⁶等の既往研究成果をもとに構築したものであるが、これらのデータでの土壌物理性の値（孔隙率、透水性、仮比重等）が本事業の調査流域にも適用可能か否かについて、確認・検証を行っていない。

このため、モデルの精度を向上させるためには、実測データの入手や、国内の他地域への適用性も考慮した、一般的かつ汎用性の高い土壌データベースを構築する必要があると考えられた。

⁴ 大貫・吉永（1995），筑波共同試験地理水流域における土壌の分布とその保水・流出特性にかかわる物理的特性

⁵ Kobayashi&Shimizu（2007），Soil water repellency in a Japanese cypress plantation restricts increases in soil water storage during rainfall events Kobayashi and Shimizu 2007

⁶ 久米ら（2008），管理放棄人工林を主体とする御手洗水試験流域における土壌の性質と水分保持能

(2) シミュレーション結果に関する課題

シミュレーション結果に関する課題としては、以下の4点が挙げられた。

【課題3】 平水時の河川流量の推定値が実測値と比べて小さい (図 2-9)

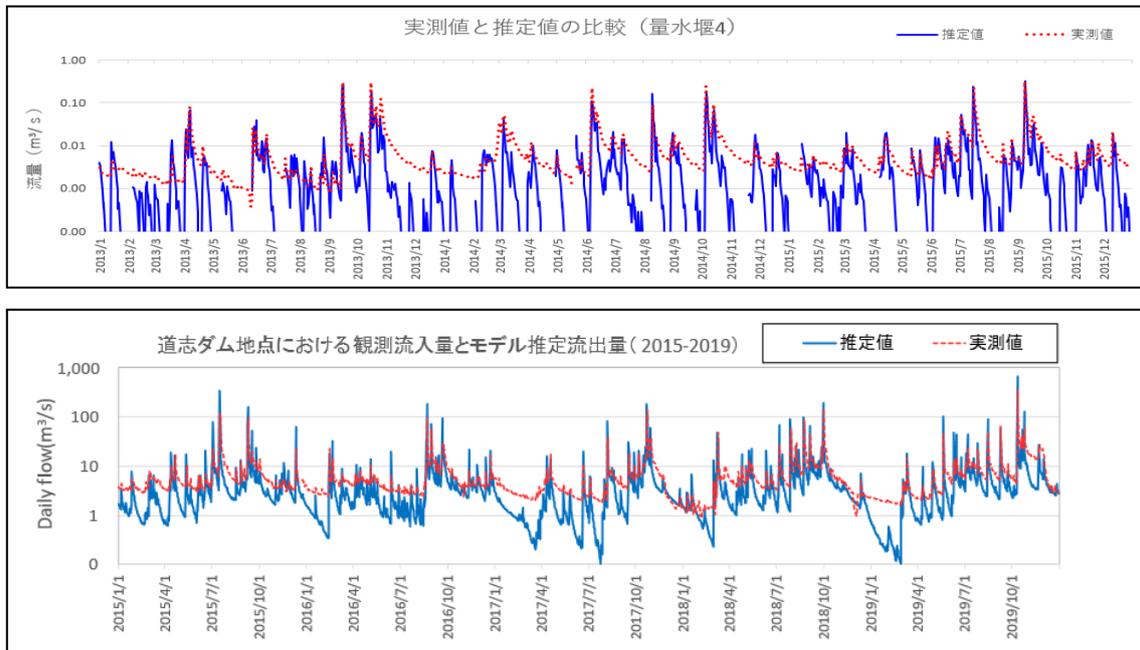


図 2-9 令和 2 年度のモデルのシミュレーション結果に基づくハイドログラフ
(上：貝沢モデル、下：道志モデル)

【課題4】 ピーク流量が過大であるとともに、出水後の逓減が適切に推定されていない (貝沢モデル・流量堰 2) (図 2-10)

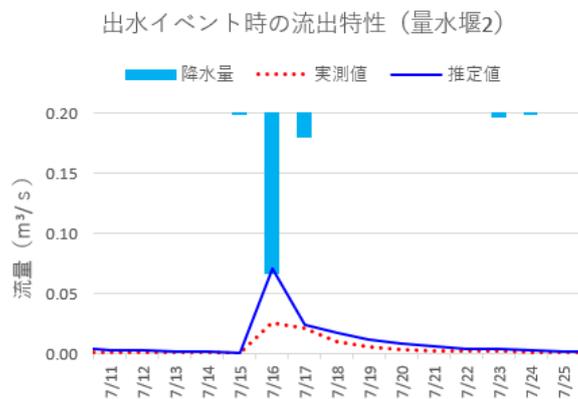


図 2-10 令和 2 年度のモデルのシミュレーション結果に基づく出水時のハイドログラフ (貝沢モデル)

課題 3 への対応も含めて、平水時・出水時別、又は時間単位での解析の実施などが必要と考えられた。

【課題5】 蒸発散量が過少、復帰流量が過大（貝沢）など、妥当な水収支割合とならない（図2-11）

モデルに組み込まれている蒸発散の計算処理が、実際の森林での蒸発散プロセス（樹冠遮断蒸発、蒸散、林床面蒸発散）を十分に反映できていない可能性があり、プログラム自体の改良や、シミュレーション結果の妥当性評価に当たり、参照することができる水収支や蒸発散に関する文献値や実測データの収集が必要と考えられた。



図 2-11 令和 2 年度のシミュレーション結果に基づく年別水収支の構成割合（貝沢モデル）

【課題6】 林分状態の異なる森林での水源涵養機能の差が明確に現れない（図 2-12）

令和 2 年度の暫定的な結果からは、林分状態（樹種、林齢、林分疎密度）の違いは、流出に大きく影響するものではないことが示唆された。一方で、森林の状態別の水源涵養機能の差をより明確に評価するには、山腹崩壊等により荒廃した森林が、時間をかけて回復した際の流出への影響を評価する等、よりダイナミックな変化の影響を捉えることも有効と考えられた。

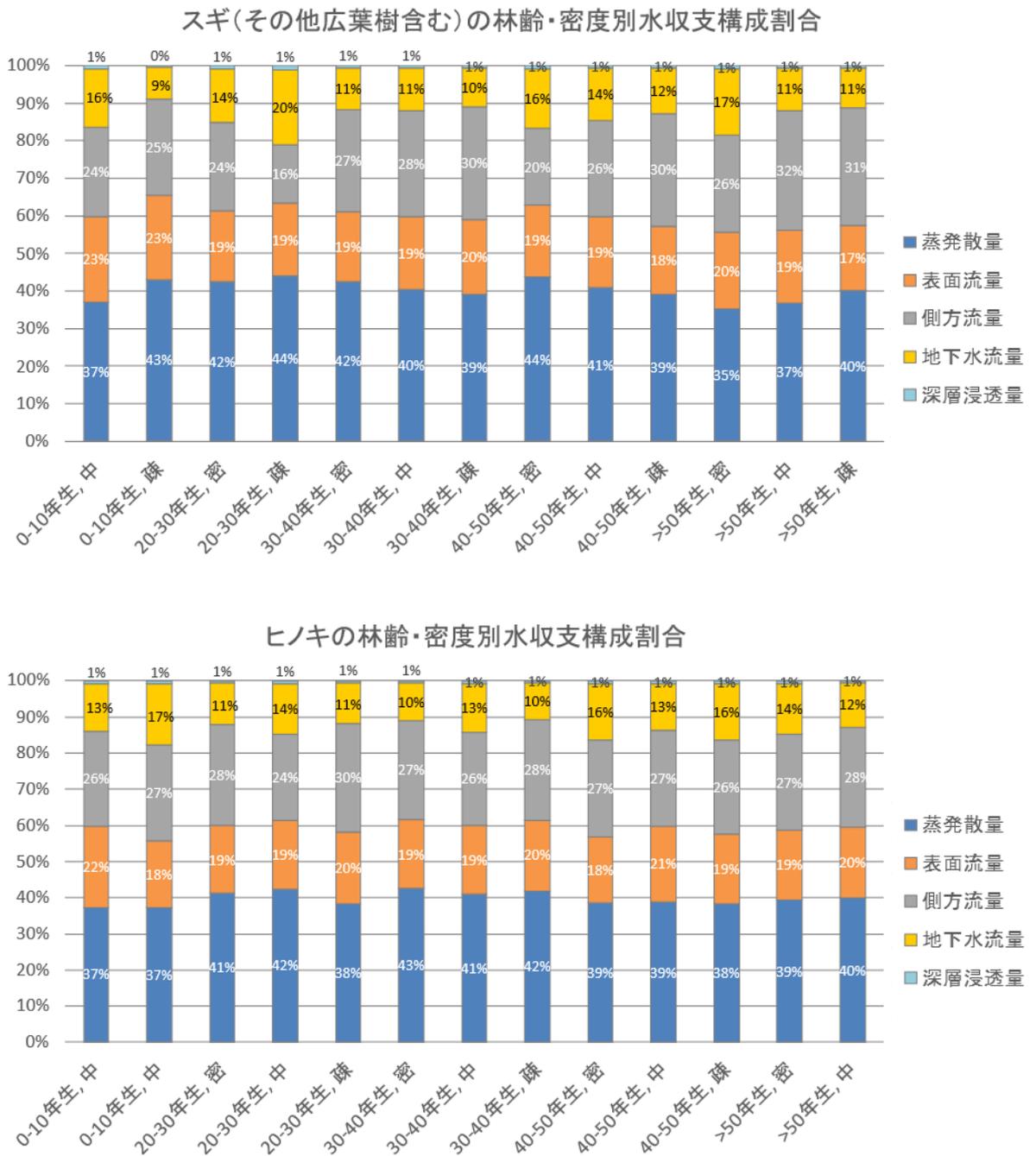


図 2-12 令和 2 年度のモデルのシミュレーション結果に基づく水収支の構成割合 (道志モデル)
(上: スギ、下: ヒノキ)

3. SWAT モデルの説明

3.1. SWAT モデルの概要

本事業はSWATモデルを用いた分析が中心となるが、複雑な水流出のメカニズムを反映させるために多数のパラメータが用いられており、モデル構築の準備作業や手順も少々複雑なものとなっていることから、あらかじめ、その概要を以下で説明する。

SWATモデルとは、アメリカ農務省農業研究局（USDAARS）によって開発された準分布型流出モデルであり、特に農業流域の水、土砂、物質の移動を解析することに主眼を置いて開発されたものである。また、モデルのソースコードは公開されているおり、改良も可能であることなど利便性も高いことから、Wellen et al. (2015)⁷によれば、1992年から2010年の間に流域の栄養塩循環を扱ったモデルとして最も多く使われたモデルとされている。

SWATモデルの長所を挙げると、以下のとおりである。

- 入手が容易な公表データを利用した分析が可能
- 大きな流域であっても比較的短期間に計算が可能（計算効率がよい）
- 解析スケールを任意に設定することが可能（流域レベル～小流域レベル）
- 実測データが無い流域でも予測可能
- 実測値を得ることが難しいパラメータについても、キャリブレーションにより適切な値の推定が可能
- 水・土砂の移動、作物の成長、栄養塩の循環などに関連するプロセスは物理法則に基づいてモデル化されている
- 長期的な予測が可能（気候変動などのシナリオにも対応可能）
- GISソフトとの親和性が高い（ArcGISやQGIS上で操作可能）
- ユーザーが多く、豊富な資料やユーザーグループを通じた問題解決が可能

一方、SWATモデルの短所としては次の点が挙げられる。

- 地下水の流れについてはシンプルなモデルしか実装されていない
- 農業地域は高い精度で推定可能だが、人為活動が複雑な都市域は推定が困難
- 森林地域ではほとんど解析事例がないため、試行錯誤的に進める必要がある

地下水の流れについては、SWATと親和性の高い地下水解析ソフトMODFLOWなどを併用することで詳細な解析を行うことも可能である。一方で、本事業の目的は森林の成長等についての評価を行うことであり、地上部から土層までのパラメータ調整が主となると考えられたため、現時点では地下水解析ソフトによる補完まで行う必要はないと判断した。

なお、SWATモデルは、ArcGISのエクステンションあるいはQGISのプラグインのいずれか

⁷ Wellen, Christopher, Ahmad-Reza Kamran-Disfani, and George B. Arhonditsis. "Evaluation of the current state of distributed watershed nutrient water quality modeling." *Environmental science & technology* 49.6 (2015): 3278-3290.

を導入することで活用できるが、本事業では、QGISで操作できるQSWAT3_64 version 1.1を主に使用した。その他、作業に応じてSWAT2012 (rev. 681), SWAT Editor 2012.10.23, SWAT-CUP2019 (v5.2.1.1)のソフトウェアを利用した。これらはいずれもSWATのホームページ (<https://swat.tamu.edu/>) から入手可能となっている。

3.2. モデルの構築手順

モデル構築に当たっては、まず、データ収集を行った上で、(原型となる)モデルの設計・構築、パラメータ感度分析・設定、校正(キャリブレーション)、検証(バリデーション)を行ってモデルを精緻化した上で、シミュレーション、新たな知見の蓄積及びフィードバックによる評価を行う手順となる。また、構築したモデルを用いて、シナリオ解析も行うことが可能となる(図3-1)。

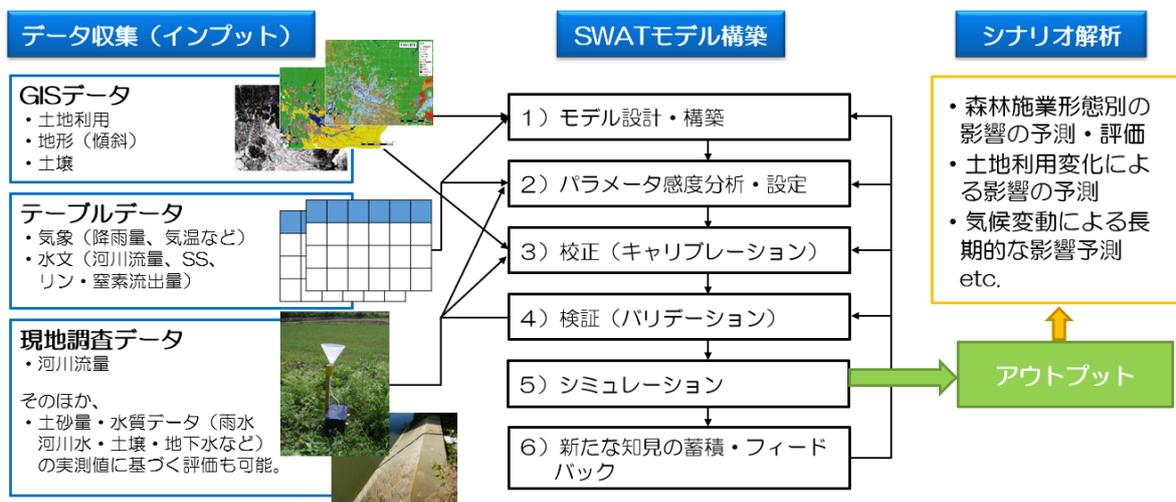


図 3-1 モデル構築における各ステップのフロー

3.3. インプットデータの収集

SWATモデルでは、傾斜、土地利用、土壌等の空間分布のデータを組み合わせた上で、それらが同一であり水文的挙動が似通っていると判断された範囲をHRU(Hydrologic Response Unit: 水文応答単位)として1つのブロックに区画している(図3-2)。設定したHRU毎に水文プロセスの計算を行い、その結果を統合することで、流域単位での水収支等を算出している。

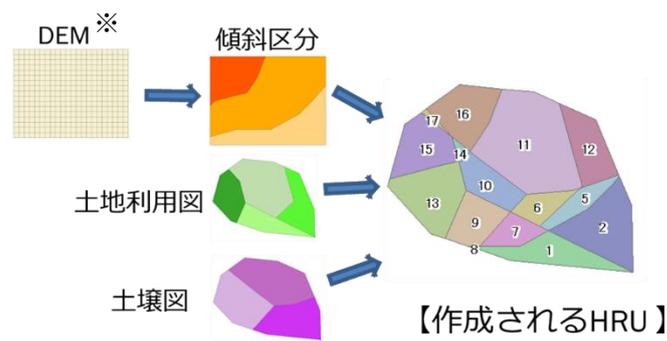


図 3-2 HRU の概略図

(※DEM：数値標高モデル (Digital Elevation Model)。地表面の地形を 3 次元の座標で表現したもの)

なお、各データの区分を詳細に分けるほど、解析の精度も高くなるが、HRU 数が増えることで、流出量の算出にも時間を要するため、区分の検討に当たっては、精度と時間のバランスを考えることが重要となる。

土地利用区分については、本事業のように森林の状態に着目したモデル解析を行うのであれば、土地利用のうち「森林」の区分は、森林の整備や成長による影響を評価可能とするため、樹種や林齢等の相違を踏まえた「林相」レベルで設定することが望ましい。

3.4. モデルの設計・構築

インプットデータを収集した後に、原型となるモデルを構築する。SWAT モデルでは、表 3-1 のとおり、水文プロセス毎に流出量が算出されるが、蒸発散と表面流出については、表 3-2 と表 3-3 に示すとおり、複数の算出方法が選択可能となっている。

表 3-1 SWAT モデルにおける主な水文プロセス及び算出される流出量の種類

水文プロセス	算出される流出量の種類
蒸発散 (遮断蒸発+蒸散+土壌蒸発)	蒸発散量
表面流出	表面流量
土壌層への浸透	土壌中の水分量、側方流量
浅層帯水層への浸透	浅層浸透量、復帰流量 (※下図では「地下水流」に相当)
深層帯水層への浸透	深層浸透量

表 3-2 蒸発散の算出方法

オプションタイプ	概要
Penman-Monteith (ペンマン・モンテュース) 法	<ul style="list-style-type: none"> • 水面蒸発量の測定法である Penman 式に植物生理学的プロセスを付加した方法であり、降雨で樹冠が濡れている時の遮断蒸発の基礎式として使用。 • 空気力学的抵抗 r_a と群落抵抗 r_c の推定法に重きを置く（群落抵抗は葉面積指数 LAI を用いる方法もある）。 • 時間毎の蒸発散量の計算を基本とするため、日平均での計算には誤差を含む可能性がある。 • 日射量、気温、相対湿度、風速のデータを使用。
Hargreaves and Samani (ハーブリーグス&サマニ) 法	<ul style="list-style-type: none"> • 牧草地でのライシメータによる観測結果を基に導かれた方法。 • 日毎の最高・最低・平均気温から日蒸発散量を算出。
Priestley-Taylor (プリーストリー・テイラー) 法	<ul style="list-style-type: none"> • 移流の大きい乾燥地・半乾燥地では可能蒸発散量を過小評価する傾向。 • 日射量、気温、相対湿度のデータを使用。

表 3-3 表面流の算出方法

オプションタイプ	概要
カーブナンバー (Curve Number) 法	<ul style="list-style-type: none"> • 様々な土地利用・土壌で適用可能な汎用性のある算出方法を得るために考案された方法。 • 土地利用、土壌タイプ、土壌の水分状況に応じて設定されている「カーブナンバー」を用いて、経験則に基づく単純な式 (SCS curve number equation) によって算出する。 • 土壌表面からの降雨の浸透過程を直接算出することはできない。 • 日、月、年単位での出力が可能。
グリーン&アンプト (Green&Ampt) 法	<ul style="list-style-type: none"> • 土壌の物理性を中心とした多数のパラメータを用いる複雑な式による算出方法。 • インプットデータとして時間雨量のデータを必要とするが、降雨の浸透過程を直接算出することができる。 • 土壌の物理性に関するパラメータが浸透量と表面流出量に強く影響するため、SWATの土壌データベースを十分に整備しておく必要がある。 • 時間、日、月、年単位での出力が可能。

また、各水文プロセスにおいて、パラメータが設定されている（主なパラメータは図 3-3 のとおり）。主に地表面よりも上部の水文プロセスに関するものが「a 蒸発散関連パラメータ」、比較的浅い土層に関するものが「b 浸透・保水関連パラメータ」、比較的深い土層に関するものが「c 地下水関連パラメータ」である。



図 3-3 SWAT モデルの各水文プロセスに関連するパラメータ

これらのうち、a) 蒸発散関連パラメータや b) 浸透・保水関連パラメータは、個々の森林の状態を反映できるため、森林管理のあり方を検討する本事業においては、特に留意すべきパラメータであるが、c) 地下水関連パラメータについては、森林状態による影響は比較的小さく、また、実測ベースのデータを得ることが難しいこともあるため、既往の文献を参照して、キャリブレーションにより適切なパラメータ値に調整していくこととする。

3.5. SWAT モデルで考慮されない水文プロセス

前述のとおり、SWAT モデルでは、水文プロセスごとに算出方法を設定するが、SWAT モデルは元々農地を分析対象として開発されたものであるため、森林内で生じている水文プロセスが必ずしも十分に反映されるわけではない。

モデルで考慮されていない、又は簡易な考慮しかされていない主なプロセスには以下の2点が挙げられる。なお、これらのうち、林床面蒸発散については、本年度に現地調査を行った上で、取り扱いを検討することとしたが、そのほかの点については、今後の課題として整理した。

○林床面蒸発散等

SWAT モデルでは、同一の HRU における植生の状態は均一かつ単一の植物種と想定されているが、実際の林分は複数の樹種かつ高木層、中木層、低木層といった階層構造で構成されている。また、林床面においても一定の蒸発散が生じているが、SWAT モデルでは、林床面蒸発散のプロセスは組み込まれていない（図 3-4）。

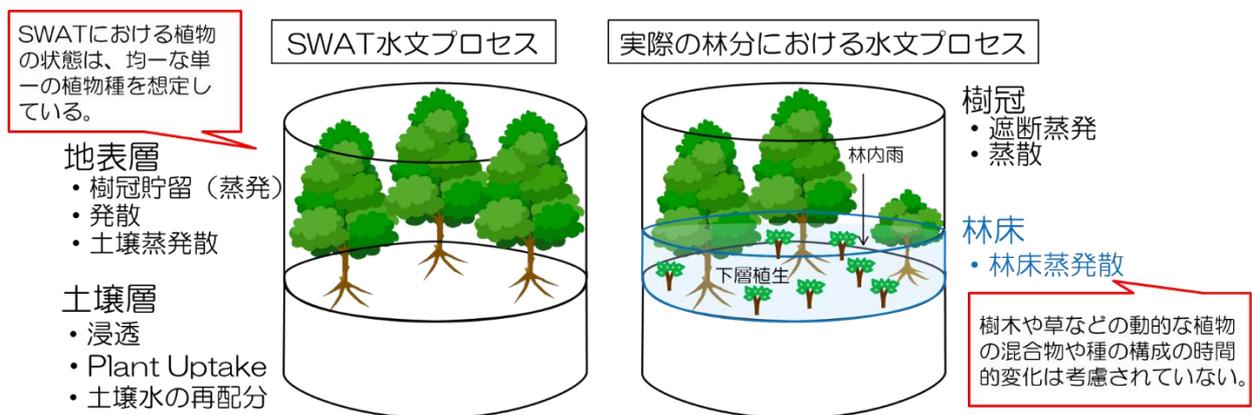


図 3-4 SWAT における水文プロセスの考慮

このため、SWAT モデルを森林域に適用するに当たっては、何らかの補完的な処理が必要と考えられるが、まずはモデルの適用性を確認するべく、すでに組み込まれたプロセス及び計算方法で解析したときに、実態とどの程度乖離があるかを確認し、その上で、カスタマイズの必要性の有無を検討する必要がある。

○山体地下水

森林の水源涵養機能は、森林土壌層による浸透水の貯留効果や流出遅延効果等によって発揮されるものと考えられてきたが（太田,1991）、近年の研究から、相当量の雨水は基岩に浸透して山体地下水として貯留されることも明らかになってきている（小杉, 2007）。

しかしながら、SWAT モデルにおける地下水に係る水文プロセスは、簡易な計算プログラムにより表現されており、扱えるパラメータ数が少ないこと、またそれらのパラメータ値の設定根拠となりうる実測ベースの情報も少ないことから、地下水流動をメインに扱う場合等は、MODFLOW モデルと組み合わせるなど、補完的な措置が必要である。

4. 本年度の調査実施内容（構築済みモデルの精緻化及び新規モデルの構築）

4.1. 基本方針

令和2年度に検討を行った基本方針（2.1）を踏まえ、本年度は、3つの評価の観点及び4つの評価軸を踏まえたモデル構築及び解析・評価を行った。表4-1は、各評価項目に応じて構築・精緻化する必要のあるモデルを整理したものである（「現代モデル」は現在の林相を、「過去モデル」は過去の林相をもとに構築したモデルである）。なお、モデルの対象流域の選定過程については、令和2年度の調査実施内容（2.2.3）に記載したとおりである。

表4-1 各評価の観点及び評価軸を踏まえて構築するモデル

評価軸	内容	評価する アウトプット 時間スケール	評価の観点				
			(イ) 森林の管理 状態別 (整備/未整備)	(ロ) 森林の成熟状態別 (現在の成熟林/ 40年程度前の若齢林)	(ハ) 崩壊からの復旧 (崩壊した森林/ 復旧した森林)		
評価対象流域			貝沢試験 流域	道志ダム 集水域	道志ダム集水域	三保ダム集水域	
① 水収支	・水収支	月・年単位	貝沢・現代 モデル (精緻化)	道志・現代モデル (精緻化)	道志・過 去モデル (新規)	三保・現 代モデル (新規)	三保・過 去モデル (新規)
② 洪水緩和	・ピーク流量 ・流出遅延時間	時間単位					
③ 渇水緩和	・渇水時流量	日単位					
④ 水資源 貯留	・地下水涵養量	月・年単位					

評価の観点（イ）「森林の管理状態別」は、間伐等の施業の結果又は仮想的な施業シナリオを、林相区分の各要素（樹種、林齢、林分疎密度）に関連するパラメータに反映し、森林整備が水流出に及ぼす影響を評価するものであり、対象モデルは昨年度に構築した「貝沢・現代モデル」（以下、「貝沢モデル」とする。）と「道志・現代モデル」とした。

評価の観点（ロ）「森林の成熟状態別」は、「現代モデル」と、約40年前の林相をもとに構築した「過去モデル」から得られた結果を比較し、森林の成長が水流出に及ぼす影響を評価するものであり、対象モデルは、昨年度に構築した「道志・現代モデル」と本年度新規作成した「道志・過去モデル」とした。

評価の観点（ハ）「崩壊からの復旧」は、過去の広域な山地崩壊を含め、1980年代前半まで比較的頻繁に土砂災害が発生していた酒匂川水系の三保ダム（神奈川県足柄上郡山北町神尾田）集水域を対象として、（ロ）と同様に「現代モデル」と「過去モデル」を構築し、林地における荒廃からの復旧が水流出に及ぼす影響を評価するものであり、対象モデルは、新規作成する「三保・現代モデル」と「三保・過去モデル」とした。

なお、「三保・過去モデル」の構築については、本年度の第2回検討委員会において、林相区分図作成をする上で、過去に崩壊が発生した箇所を、一定程度、正確に抽出する必要があるとの意見を踏まえ、本年度は抽出作業を優先し、モデルの構築はそのデータをもとに、次年度に構築することとした（詳細については、「4.3.5 崩壊地の判読（三保・過去モデルのインプットデータの作成）」に記す。）。

4.2. モデル構築・精緻化作業の流れ

本年度のモデルの構築と精緻化に係る作業の流れは図 4-1 のとおりである。

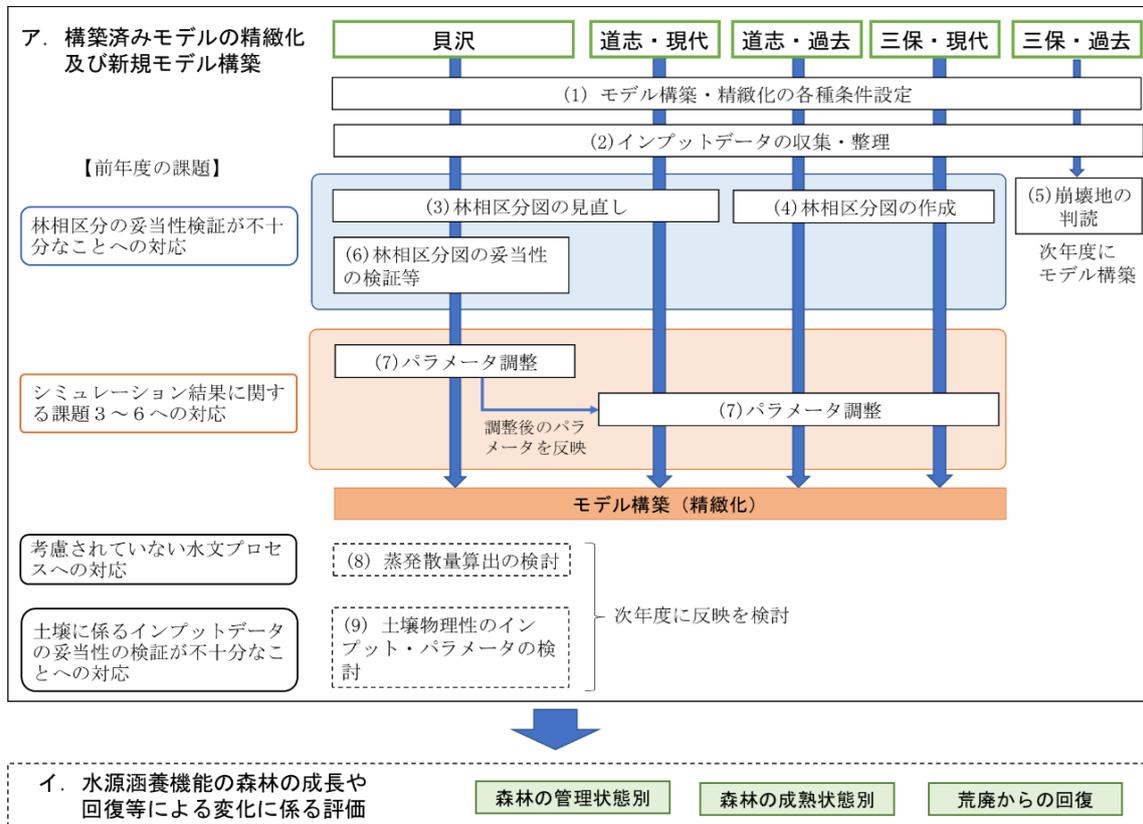


図 4-1 本年度のモデル構築・精緻化作業の流れ

2.4 で整理したとおり、令和 2 年度のモデルの主な課題には、インプットに関するものと、シミュレーション結果に関するものがある。このうち、林相区分や土壌区分に関するインプットデータについては、航空 LiDAR データの活用や現地実測データとの比較等により妥当性を高めるとともに、その知見・手法を本年度新たに構築するモデルに適用する。詳細については、4.3.1～4.3.6 に記載する。

また、シミュレーション結果に関する課題については、パラメータの調整（キャリブレーション・バリデーション）により改善を図る。まずは、小流域である貝沢試験流域を対象として、モデルの精度向上に寄与するパラメータの検証を行い、その結果を踏まえて適切に調整したパラメータを、道志・三保の広域モデルに適用する。この過程を経ても精度が不十分である場合には、流域毎にパラメータ調整を行うこととする。パラメータ調整の詳細については、「4.3.7」に記載する。

一定程度の推定精度が得られた後は、評価の観点及び評価軸に基づき、森林の水源涵養機能の解析・評価を行う。この結果を元に、「6. 森林の状態と水の動態を統一的に評価できる指標の検討と整理」を行うこととする。

4.3. 作業内容・結果

4.3.1. モデルの条件設定

本事業で採用した SWAT モデルの各種設定内容について表 4-2 に示す。

表 4-2 モデルの設定内容

	貝沢		道志		三保	
	現在	現在	過去	現在	過去 (次年度)	
プログラムのバージョン	SWAT2020, rev.681, 64-bit					
モデルの時点 (年)	2013	2016	1978	2016	1978	
インプ ット デー タ の 期 間 (年)	ウォームアップ	2011-2012	2013-2014	1976-1977	2013-2014	1976-1977
	キャリブレーション	2013-2014	2015-2017	1978-1980	2015-2017	1978-1982
	バリデーション	2015	2018-2019	1981-1982	2018-2019	1978-1982
分析の時間単位	評価項目に応じて時間、日、月、年単位から適宜選択					
蒸発散計算方法	ペンマン・モンティース法					
表面流計算方法	グリーン&アンプト法					
傾斜区分	4 区分 (0-15° /15-30° /30-45° /45° ~)					
最終的に構築された HRU 数	178	626	630	1,448	-	

各流域における対象期間については、気象や流量の実測データが入手可能な範囲を勘案して決定した。なお、「ウォームアップ」とは、キャリブレーションを開始するに当たり、あらかじめ一定期間のインプットデータを与えることにより、算出結果を適切な範囲の値に収束させるための準備期間であり、いわゆる“試運転”の働きをもつものである。

また、分析の時間単位は、時間、日、月、年の各単位で計算することが可能であるが、評価する時間スケール（表 4-1 参照）に応じて設定することとした。

蒸発散と表面流の計算方法は、昨年度の結果も踏まえ、ペンマン・モンティース法とカーブナンバー法とグリーン&アンプト法を採用することとした。

4.3.2. インプットデータの収集・整理

既に構築済みの貝沢モデル、道志・現代モデルに加え、新たに構築する道志・過去モデル、三保・現代モデルのインプットデータの作成や、モデルのキャリブレーション・バリデーション、精度検証に必要なデータの一覧を表 4-3 に示す。

表 4-3 収集データの一覧

分類	収集データ		用途	適用先モデル				
	データ名称	出典		貝沢	道志現代	道志過去	三保現代	
気象	雨量・日射量・気温・風速・相対湿度	気象庁アメダス	気象	-	○	○	○	
	雨量	神奈川県自然環境保全センター		-	○	○	○	
	雨量	東京農工大学		○	-	-	-	
地形	DEM	国土交通省（5mメッシュを20mメッシュに変更して使用）	傾斜区分図	-	○	○	○	
		神奈川県自然環境保全センター（1mメッシュを5mメッシュに変更して使用）		○	-	-	-	
土壌	土壌分布	国土交通省20万分の1土地分類基本調査	土壌区分図	○	○	○	○	
	土壌厚	神奈川県自然環境保全センター		○	-	-	-	
土地利用	森林簿	神奈川県	モデルインプット	樹種、林齢	○	○	○	○
		山梨県			-	○	○	-
		国有林			-	-	-	○
	5万分の1現存植生図	環境省自然環境局 生物多様性センター（1293面、第2回・第3回自然環境保全基礎調査）		樹種	○	○	○	○
	航空レーザ計測データ	国土地理院（H20渡良瀬川流域及び鬼怒川流域航空レーザ計測業務成果）			疎密度	○	○	-
		神奈川県ウェブサイト（R01神奈川県水源林林況等基礎調査委託業務における航空レーザ計測業務成果）		○		○	-	○
河川	流量	神奈川県自然環境保全センター	モデルキャリブレーション	○	○	○	○	

以下に、各データを収集・作成方法について述べる。

(1) 気象データ

SWAT モデル構築に必要な、以下の気象データを入手した。

- 降水量(mm)
- 気温(日最高気温(°C)、日最低気温(°C))
- 風速(日平均風速(m/s))
- 日射量(合計全天日射量(MJ/m²))
- 相対湿度(日平均湿度(%RH))

なお、日射量及び各データで欠測のあるものについては、SWAT に組み込まれている「気象データ補完システム」を用いて、アメリカ国立環境予測センター（The National Centers for Environmental Prediction）が提供している気象予測システム再解析（Climate Forecast System Reanalysis）のデータを使用した。

また、各観測所の緯度・経度、標高データも必要となるため、これらは DEM データ等を利用して準備した。観測所の一覧は、表 4-4、表 4-5 に示すとおりである。

表 4-4 気象観測所一覧（貝沢モデル）

地点名	気象庁	神奈川県自然環境保全センター	
	相模湖	観測所1	観測所2
雨量	○	○	○
気温	×	○	○
相対湿度	×	○	○
風速	×	○	○
日射量	×	○	○

注：「×」は提供されていないデータ。以下同様。

表 4-5 気象観測所一覧（道志・三保モデル）

地点名	気象庁						神奈川県自然環境保全センター									
	河口湖	山中	大月	上野原	相模湖	御殿場	石割	赤倉	青根	道志	箒沢	熊木	水ノ木	三保	須走	
雨量	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
気温	○	○	○	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	
相対湿度	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	
風速	○	○	○	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	
日射量	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	

1) 雨量データ

評価軸のうち、洪水緩和機能については時間単位の評価を行うため、雨量データも1時間単位で入力することとした。

道志・三保ダム集水域について、インプットデータ取得の候補とした雨量観測所の位置を図4-2に示す。実際にデータを使用する観測所は、SWATのプログラムが自動的に選択したものについて、委員会での意見も踏まえ、道志（現代・過去）モデルでは石割・赤倉・道志・青根の4地点、三保・現代モデルでは水ノ木・三保・丹沢湖・箒沢・熊木の5地点のデータを利用することとした。

なお、貝沢試験流域内に設置されている雨量計は長期にわたって不調であった。白木らの調査（2020）⁸においては、当該試験地内の雨量データと、南南東に約2 km離れたアメダス相模湖観測所の雨量データとの間に高い相関（ $R^2=0.98$ ）が得られており、アメダス相模湖の雨量の1.05倍の値で試験地の雨量を代替できることから、本事業においてもこれに倣い、貝沢試験流域の雨量をアメダス相模湖雨量の1.05倍とすることとした（図4-3）。

⁸ 白木ら（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, 第33巻, 第2号, pp.47-55.

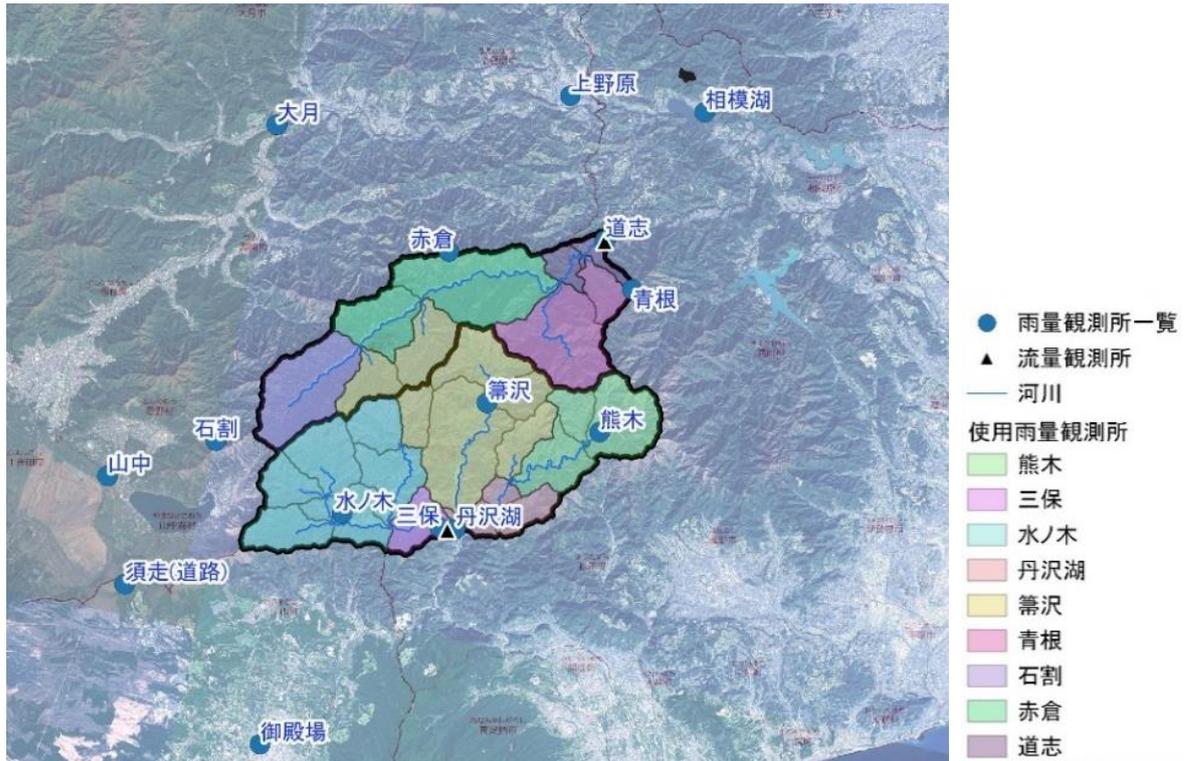


図 4-2 雨量観測所一覧(道志・三保ダム集水域)

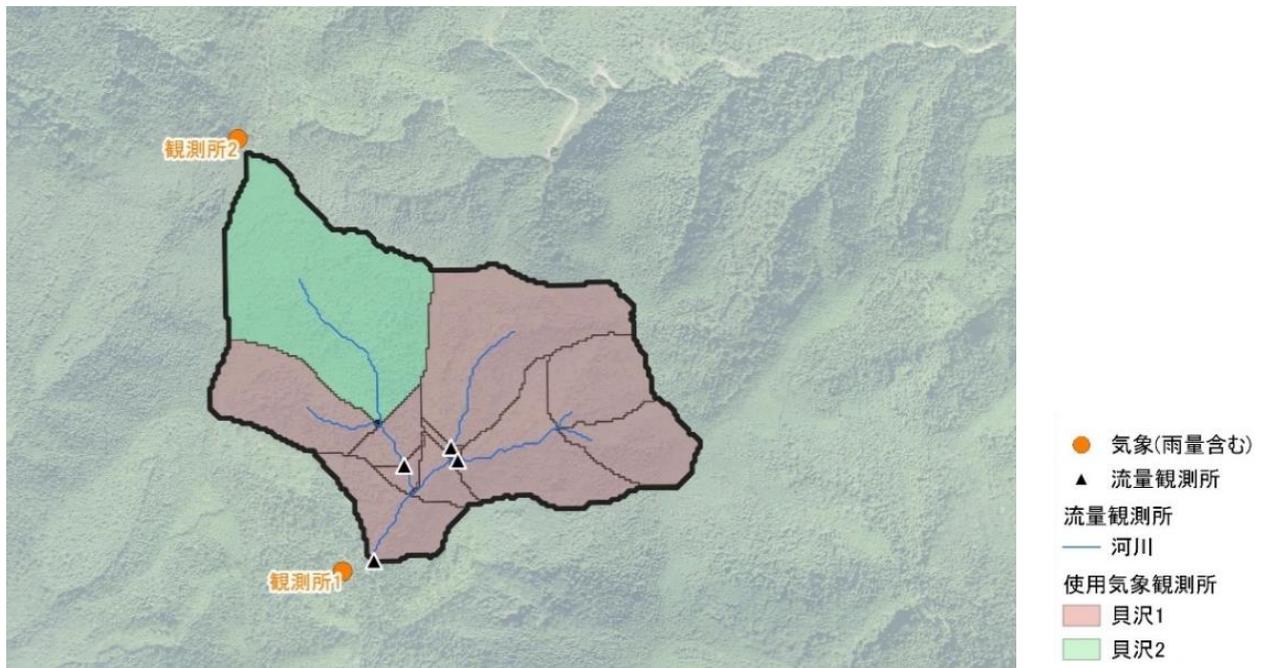


図 4-3 雨量観測所一覧(貝沢試験流域)

2) 雨量以外の気象データ

雨量以外の気象データについては、各観測所で提供されている各種データについて、調査対象範囲の最寄りに設置されている観測所を中心に利用した。具体的には、道志ダム集水域では、気温は山中・大月・御殿場の3地点、相対湿度は河口湖、風速は山中・大月の2地点のデータを使用した。三保ダム集水域では、気温は山中・大月・御殿場の3地点、相対湿度は河口湖、

風速は山中・大月・御殿場の3地点のデータを使用した(図4-4)。



図4-4 雨量観測所を除く気象観測所一覧(道志・三保ダム集水域)

また、貝沢試験流域については、流域内に設置した2箇所の気象観測所のデータを使用した(図4-5)。

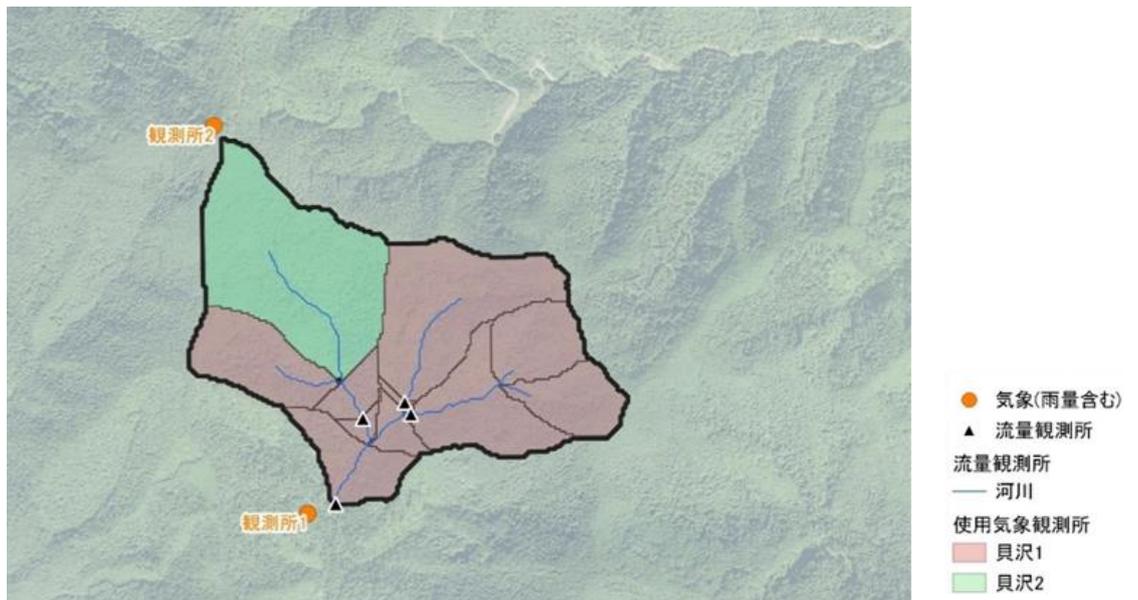


図4-5 気象観測所一覧(貝沢試験流域)

(2) 地形 (DEM) データ

SWAT モデルでは、地表の傾斜角のインプットデータを任意の階級で設定できる。DEM データについては、貝沢モデルでは、神奈川県自然環境保全センターから供与された 1m メッシュの解像度の DEM データを、道志・三保モデルでは、国土交通省基盤地図情報ダウンロードサービス⁹より入試した 5mメッシュの解像度の DEM データを、それぞれ 20m メッシュに変換したものをを用いた。

森林地における斜面区分の考え方として、路網整備などの検討において、緩傾斜地 (0 ~15° 未満)、中傾斜地 (15~30° 未満)、急傾斜地 (30~35° 未満)、急峻地 (35° 以上) の 4 つに斜面を区分することが一般的であるが、本事業の調査対象流域の大部分は急峻地にあることから、一律で 15° の階級幅とすることとし、0~15°、15~30°、30~45°、45° 以上の 4 区分とした (図 4-6)。

⁹ 基盤地図情報ダウンロードサービス, <https://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php>

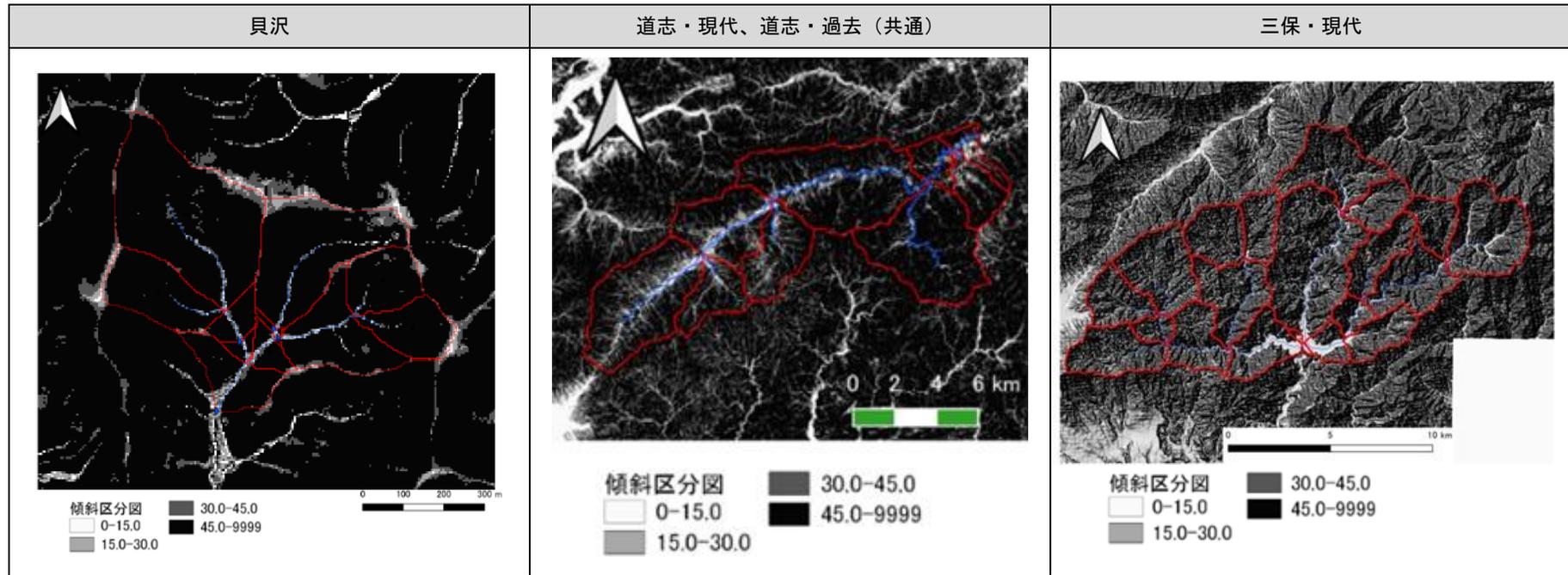


図 4-6 各モデルの傾斜区分図

(3) 土壌データ

土壌データとしては、入手のしやすさや、本事業の対象流域全域をカバーしているかを勘案して、国土交通省の国土調査（土地分類調査・水調査）¹⁰による、20万分の1土地分類基本調査の土壌分類GISデータを使用することとした。なお、貝沢試験流域については、同データでは全域が同一の土壌タイプ（褐色森林土）となっており、今後、土壌物理性に関するパラメータ調整を行うことも踏まえ、神奈川県自然環境保全センターより供与された土層厚調査の結果データを用いて、土壌区分の細分化を行った。

各モデルで作成した土壌区分図は、図4-7のとおりである。なお、この土壌区分図は、前述の有明海を対象とした調査での土壌データベースの区分とも対応しており、土壌区分に応じた土壌物理性に関する数値が参照可能となっている（表4-6）。この数値をインプットデータとした上で、キャリブレーションを通じて、最適な値になるよう調整を行った。詳細については、「4.3.7パラメータ調整（キャリブレーション・バリデーション）」で詳述する。

¹⁰ 国土調査（土地分類調査・水調査），<https://nlftp.mlit.go.jp/kokjo/inspect/inspect.html>

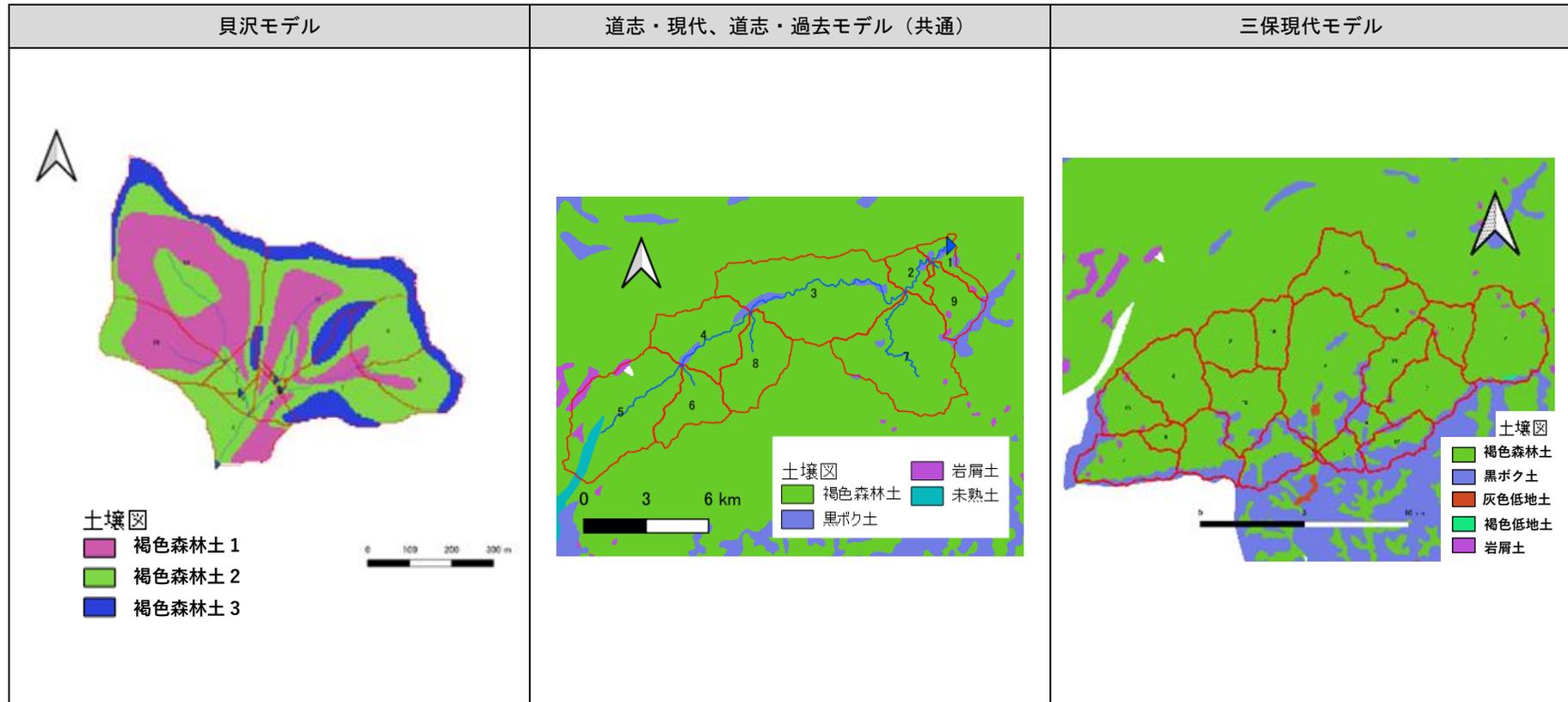


図 4-7 各モデルの土壤区分図

表 4-6 土壌データベースに設定されているインプット値

国土数値情報 土壌分類	SWATNAME	NLAYERS	HYDGRP	SOL_ZMX	ANION_EXCL	SOL_CRK	TEXTURE	SOL_Z	SOL_BD	SOL_AWC	SOL_K	SOL_CBN	CLAY	SILT	SAND	ROCK	SOL_ALB	USLE_K
				(mm)				(mm)	(Mg/m3 or g/cm3)	(mmH2O/mm soil)	(mm/hour)	(% soil weight)		0.013(ton m2 hr)/(m3 ton cm)				
		層の数	水文グループ	根伸長 最大深	アニオン 排除能	最大空隙 率	土性	土壌厚	仮比重	有効水分	飽和透水 係数	有機炭素 含有率	粘土率	シルト率	砂率	岩石率	湿潤土壌 アルベド	土壌係数
黒ボク土	ANDOSOL	3	A	2000	0.5	0.5	CL-LiC-LiC	310	0.462	0.352888	38	3.92	17	31.8	51.2	5.55	0.01	0.5
								590	0.543	0.352	3.283	38	29.6	27.3	43.1	4.82	0.01	0.5
								1130	0.52	0.352	38	3.022	27.1	33.7	39.2	4.51	0.01	0.5
褐色森林土	BROWNFESTSOIL	3	B	2000	0.5	0.5	CL-CL-LiC	200	1.07	0.13523	38	1.58	21.06	36.37	42.45	12.33	0.01	0.5
								800	1.34	0.13523	0.989	38	18.7	32.15	49.2	13.53	0.01	0.5
								1100	1.37	0.13523	38	0.729	28.235	23.53	48.235	10.68	0.01	0.5
褐色低地土	BROWNLANDSOIL	3	C	2000	0.5	0.5	CL-CL-CL	184	1.118	0.12	147	1.918	22.25	27.3	48.44	9.448	0.01	0.5
								424	1.318	0.12	1.018	170	24.476	25.84	49.88	9.068	0.01	0.5
								639	1.347	0.12	200	0.78	20.8	23.06	58.13	11.324	0.01	0.5
灰色低地土	GLEYSOIL	3	C	2000	0.5	0.5	CL-CL-CL	168	1.155	0.05	147	2.4	23.197	27.51	49.535	4.79	0.01	0.5
								374	1.26	0.05	1.24	170	21.95	25.5	53.7	7.306	0.01	0.5
								620	1.233	0.05	200	1.003	18.74	21.04	60.19	9.164	0.01	0.5
グライ土	GLEYSOIL	3	C	2000	0.5	0.5	CL-CL-CL	150	0.95	0.12	147	2.89	24.79	28.86	46.34	3.38	0.01	0.5
								300	1.22	0.12	1.3989	170	23.32	26.66	49.778	6.38	0.01	0.5
								650	1.166	0.12	200	1.18	22.156	23.68	54.308	3.82	0.01	0.5
未熟土	IMMATURESOIL	3	B	2000	0.5	0.5	CL-LiC-LiC	215	1.2	0.032	38	1.498	23.78	27.275	48.94	20.18	0.01	0.5
								447	1.3235	0.032	0.68	38	29.9	27.43	42.658	16.339	0.01	0.5
								696	1.35	0.032	38	0.89	25.7	21.03	53.23	21.02	0.01	0.5
泥炭土	PEATSOIL	3	D	2000	0.5	0.5	LiC-SiC-LiC	115	0.81	0.25	165	3.32	26.5	36.05	37.45	0.5	0.01	0.5
								225	0.89	0.25	3.105	159	31.7	50.4	17.9	0.95	0.01	0.5
								465	0.825	0.25	200	2.55	36.2	39.4	24.4	0	0.01	0.5
赤黄色土	REDYELLOWSOIL	3	D	2000	0.5	0.5	CL-LiC-LiC	177	1.124	0.093	165	2.11	23.88	27.3	48.81	11.9	0.01	0.5
								459	1.24	0.093	0.78	159	27.4	27.21	45.38	10.8	0.01	0.5
								608	1.27	0.093	200	0.8288	29.56	24.59	45.84	11.99	0.01	0.5
岩屑土	PEATSOIL	3	D	2000	0.5	0.5	LiC-SiC-LiC	300	1.3	0.078	8.21	1.2	23	35	42	0	0.0484	0.5
								1000	1.5	0.078	0.6	2.58	34	30	36	0	0.154	0.5
								500	1.5	0.078	2.58	0.6	34	30	36	0	0.154	0.5

参考文献：

【黒ボク土】

筑波共同試験地理水流域における土壌の分布とその保水・流出特性にかかわる物理的特性 大貫・吉永(1995)

※褐色森林土と記載されているが、林野土壌と農耕地土壌の分類の違いを考慮し、火山灰性であることから黒ボク土として用いた。

※異なる土壌型のデータが記載されているが、森林だけでなく農耕地へも適用することを鑑み、斜面下部のBD型のデータを用いた (TS45, 65, 115)。

【褐色森林土】

Soil water repellency in a Japanese cypress plantation restricts increases in soil water storage during rainfall events Kobayashi and Shimizu 2007

管理放棄人工林を主体とする御手洗水試験流域における土壌の性質と水分保持能 久米ら(2008)

含水率測定データ (小林、未発表)

【その他土壌】

地力保全基礎調査による土壌情報データベースの代表土壌断面データを使用。土壌厚さはその層位の最頻値とし、その他は該当の土壌分類の平均値とした。有効水分については、pF4.2の測定値があるデータの中から該当する土性かつ粘土・シルト・砂率が各層の範囲内にあるデータを選択し、pF2.7の含水率からpF4.2の含水率を引いた値とした。

※泥炭はデータがなかったため、デフォルト値で土性がPEATとなっている chocorua の有効水分を適用した。

透水係数については土壌情報データベースに適用できるデータがなかったため、SWAT内のデフォルトのデータベース内 (usersoil) から、透水性ごと、層ごとに平均値を計算し、該当する値を適用した。

(4) 土地利用（林相）区分データ

土地利用区分データについては、森林の水源涵養機能の評価に着目する本事業においては、特に森林について詳細な林分情報が含まれている方が望ましい。一方で、SWAT モデルでは、規定値では「森林」という1区分しか与えられていないことから、林分の状態を細分化して「林相区分図」を作成し、これを土地利用区分に反映することとした。

「2.2.4」に記載のとおり、林相区分図は、具体的には「樹種」、「林齢」、「林分疎密度」の3つの要素を用いて区分している。「樹種」や「林齢」の区分に係る情報は主に森林簿から、「林分疎密度」は、貝沢試験流域についてはLiDARデータ解析による推計結果、道志ダム集水域については森林簿に記載の樹冠疎密度（密・中・疎）をそのまま適用する方法としたが、この方法については、いくつかの課題がみられたため、それらへの対応方針とともに表4-7に整理した。

表 4-7 令和2年度に作成した林相区分図の課題とその対応方針

	内容	対象流域	対応方針
課題1-1	令和2年度の立木密度算出は低密度LPデータ（平成21年度計測成果）を用いた樹頂点解析によるものであったが、実測値による補完・調整が行われていない。	貝沢	同一のLPデータを用いて実測情報を組み込んだ別の手法によって再解析
課題1-2	樹種が不明確な「その他針葉樹」という区分が残存している。	道志	現地調査や空中写真判読により「その他針葉樹」の樹種を詳細化
課題1-3	LPデータ解析や森林簿情報に基づき設定した林分疎密度「疎・中・密」の妥当性の確認が不十分である。	貝沢・道志	現地調査による実測の立木密度との比較・検証
課題1-4	林分疎密度「疎・中・密」に対する実際の立木密度の範囲が確認できていない。	貝沢・道志	

なお、課題1-1と1-2への対応方針及び結果については、「4.3.3 林相区分図の見直し」で詳細を記載した。また、課題1-3及び1-4は、課題1-1と1-2の対応の結果として、見直した林相区分図の精度検証としての位置づけとなり、その内容を「4.3.6 林相区分図の妥当性の検証等」に記載した。

(5) 河川流量データ

河川流量のデータは、モデルから算出される値と比較して精度検証を行う目的で収集している。以下に、貝沢試験流域、道志ダム集水域、三保ダム集水域の実測流量データとして用いているデータの概要を示す。なお、実測の気象データと流量データの関係性については、グラフ化したものを「6.3 実測をベースとした対象流域の水文特性の把握」に記載している。

1) 貝沢試験流域

神奈川県自然環境保全センターから提供された貝沢試験流域内の4つの量水堰で観測された2013年1月1日から2014年12月31日までの流量観測データを用いた。モデルの推定精度は、当該流域の最下流点である量水堰4の実測値とモデル最下流点（量水堰4の位置に相当）における推定値を照らし合わせることで評価した。昨年度に使用した実測流量データは、日単

位のデータのみであったが、令和 3 年度は、時間単位モデルの作成及び精度評価を行うため、時間流量データについても整理した。

2) 道志ダム・三保ダム集水域

道志ダムと三保ダムの集水域については、貝沢試験流域のように最下流地点に流量堰が存在しないため、「ダム流入量」を「最下流地点における流出量」と置換えて、精度検証を行った。貝沢試験流域と同様に、昨年度に使用した実測流量データは日単位のデータのみであったが、令和 3 年度は、時間単位モデルの作成及び精度評価を行うため、時間流量データについても整理した。

4.3.3. 林相区分図の見直し

(1) 貝沢モデル

1) 手法

昨年度、貝沢試験流域内の立木の本数密度の推定は、LiDAR データの DCHM¹¹ (Digital Canopy Height Model; 林冠高モデル) が局所的に最大になる地点を樹頂点として本数を算出する解析手法を用いたが、結果の妥当性を確認するための実測ベースの本数密度データが存在せず、精度の確認ができていなかった。

そこで、本年度は現地で本数密度についてサンプリング調査を実施し、LiDAR データの統計値と本数密度の解析結果を林相区分図に反映することとした。なお、本年度利用した LiDAR の点密度は昨年度と同様、1 点/m²以上である。

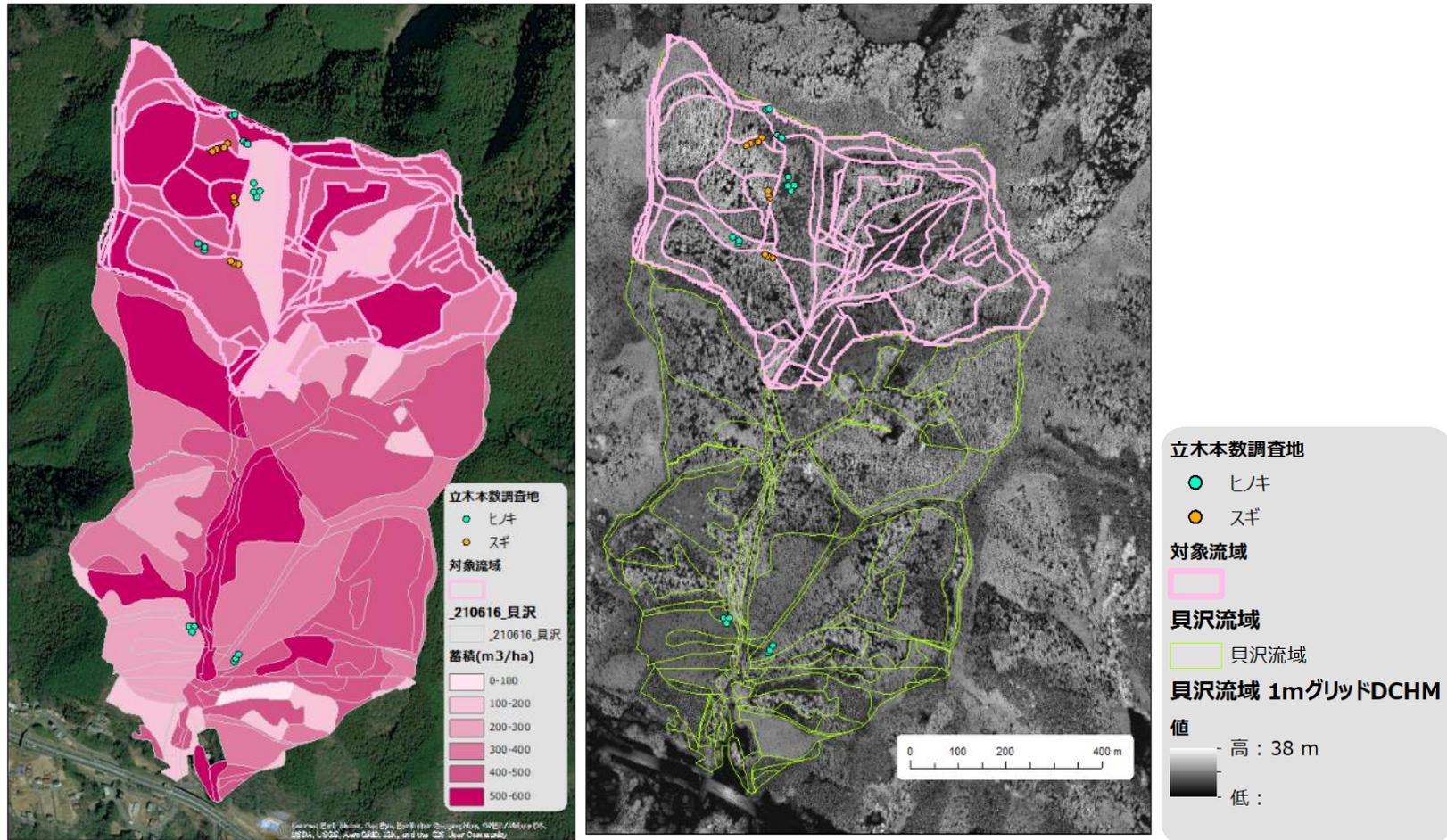
現地調査は 2021 年 6 月 18 日に実施した。本数密度を推定するための調査法としては「鈴木-ESSED の方法」と呼ばれるサンプリング調査法を採用した。この方法は、小班内の無作為な 3 ヶ所を中心として、中心から 3 番目に近い立木までの距離を計測し、その平均値を用いて本数密度を推定する方法であり、調査の効率が高いとともに、一定程度の精度の結果が得られるものである。

調査対象とする小班は、森林簿に記載されているヘクタール当たり林分蓄積のデータをもとに貝沢試験流域全体の小班を 6 クラス (0~100、100~200、200~300、300~400、400~500、500~600m³/ha) に分類した後、スギ・ヒノキの樹種別に各クラスから選定した。現地調査は 6 箇所、各箇所につき 3 地点で距離計測を行った。貝沢試験流域における現地調査結果を表 4-8 と図 4-8 に示す。

表 4-8 現地調査による立木本数と LP データより算出した DCHM (林冠高) データの比較

樹種	現地調査による立木本数	DCHM 最大値 (m)	DCHM 平均値(m)	DCHM 標準偏差 (m)
スギ	376	38.1	18.1	10.4
スギ	299	38.7	17.5	10.2
スギ	335	32.4	15.8	9.1
ヒノキ	1,031	27.4	13.8	7.7
ヒノキ	1,179	30.9	13.9	8.2
ヒノキ	1,755	21.3	9.3	5.5

¹¹ DCHM とは Digital Canopy Height Model、林冠高モデルのことで、樹冠表層モデル (Digital Canopy Surface Model、DCSM) の値から地盤高モデル (Digital Elevation Model、DEM) の値を差し引いて求める。



蓄積クラス分けと立木密度の調査地（各箇所につき3地点で距離を計測）

LiDAR データから算出した DCHM

図 4-8 本数調査地点と DCHM 分布図

2) 結果

現地調査で得られた本数密度と DCHM データとの対応について分析した結果、本数密度と調査対象小班の DCHM 標準偏差との相関が最も高い結果となった (図 4-9)

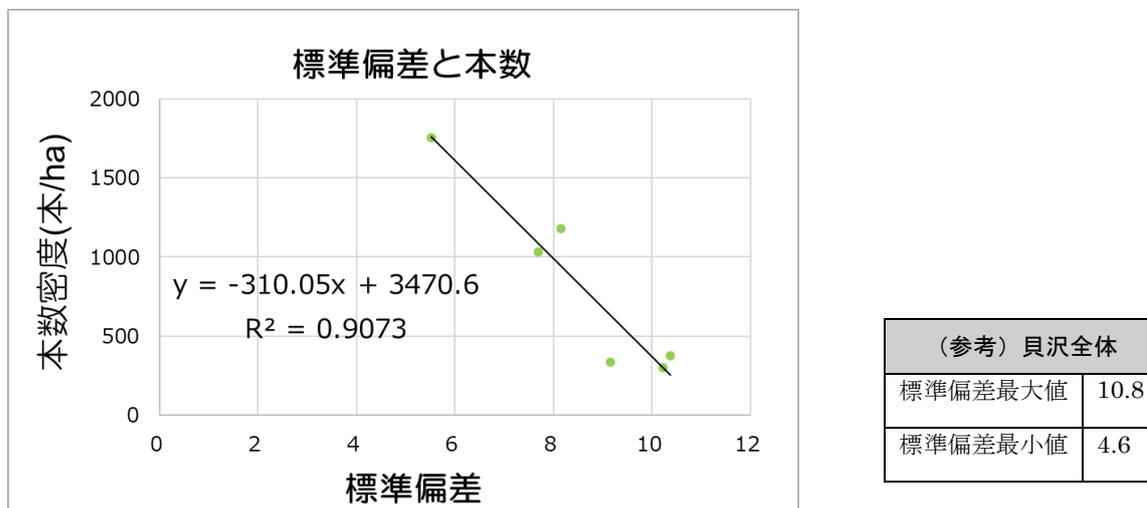


図 4-9 本数密度と調査対象小班の DCHM 標準偏差の関係

上記のような結果となった理由としては、林分が疎であるほど林床までレーザ光が達しやすいため DCHM の分散が大きくなり、反対に密であるほど樹冠表面での反射が多くなり DCHM の分散が小さくなるため、本数密度と小班の DCHM 標準偏差の間に負の相関が示されたと推察された (図 4-10)。なお、このような相関が現れるのは林分の密度が一定以上である場合に限られるものと考えられることから、本事業に限り、上記のような整理とした。

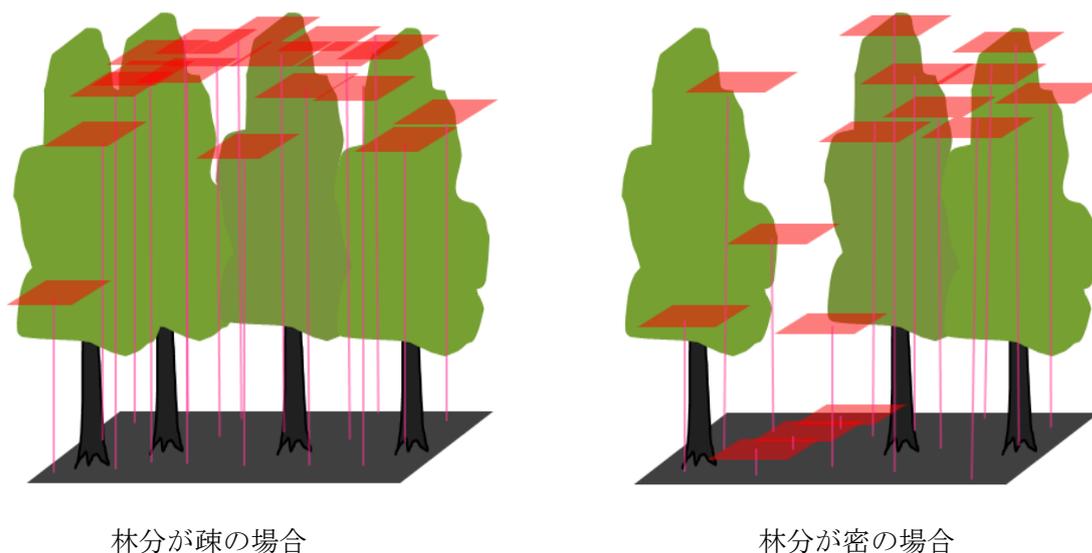


図 4-10 本数密度によるレーザ光反射位置の違いのイメージ

この結果をもとに、LiDAR データから小班別の本数密度を推定した結果を図 4-11 に示す。

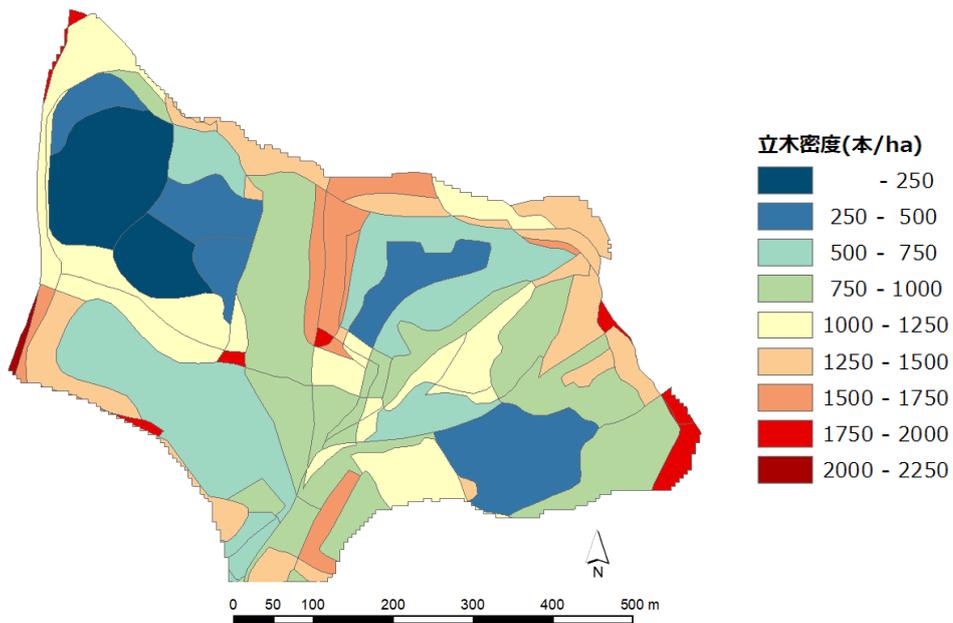


図 4-11 貝沢試験流域の小班別推定本数密

この結果に森林簿から樹種と林齢の情報を加えた林相区分図を図 4-12 に示す。なお、林相区分は表 4-9 に示す樹種・林齢・林分疎密度のコードをもとにコード化している。例として、スギ (1100) で、林齢が 10~20 年生 (10) で、密度が密 (3) の場合は、「1100+10+3」で林相区分コードは「1113」となる。なお、貝沢試験流域以外についても同様の方法により林相区分コードを定めている。

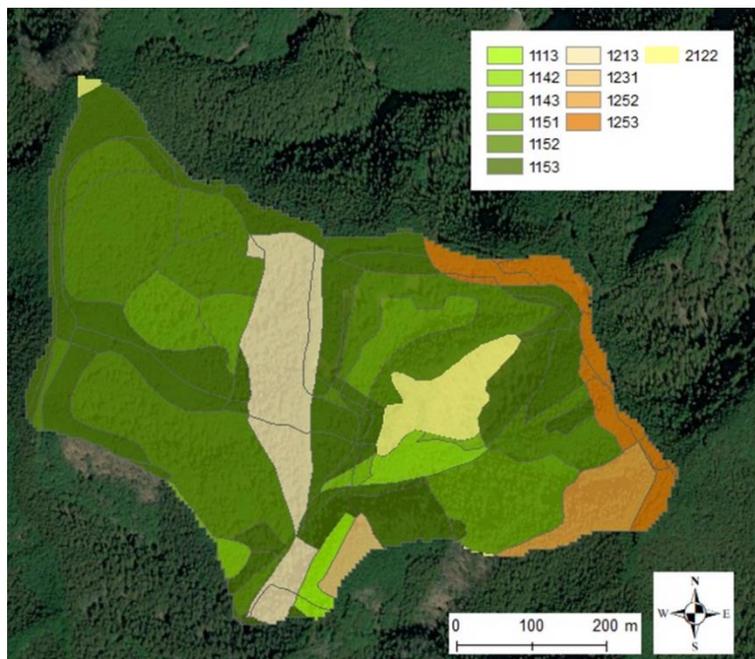


図 4-12 作成された貝沢試験流域の林相区分図

表 4-9 林相区分コードのもととなるコード

樹種コード		林齢コード		林分密度コード	
1100	スギ	【スギ、ヒノキ、マツ】		1	疎
1200	ヒノキ	0	<10年生	2	中
1300	マツ	10	10～20年生	3	密
2100	広葉樹	20	20～30年生		
3100	タケ	30	30～40年生		
5500	伐採跡地・未立木地・無立木地	40	40～50年生		
6600	崩壊地	50	≧50年生以上		
200	農地	【広葉樹】			
600	自然裸地・解放水域	0	<20年生		
700	市街地（都市部）	20	≧20年生以上		
1500	水域	【タケ】			
1600	草地、芝生、ゴルフ場	0	すべて		

(2) 道志・現代モデル

1) 手法

昨年度用いた道志ダム集水域（現代）の林相区分図には、森林計画区外にあるものの環境省植生図では森林に相当する樹種で分類されている箇所があった。該当箇所は森林簿情報が存在しないため、環境省植生図で補完していた。この一部には「その他針葉樹」という区分があり、詳細化されていなかったため、本年度は衛星画像を用いて目視で樹種判読を行い、スギ、ヒノキ、マツ、広葉樹のいずれかの樹種情報を与えることとした。

判読には高分解能画像が必要となるため Google Earth を利用して樹種を判読した。判読作業に先立ち、2021年6月10日～11日に現地確認を行い、現地の樹種と画像の見え方を確認し、作業時の参考とした。また、「その他針葉樹」とされた区画が実際の林分の境界と一致していない場合は、占有割合が高い樹種を当てはめた。

なお、林齢、林分疎密度及び「その他針葉樹」以外の樹種情報は、昨年度と同様に、森林簿に記載されたデータを利用し、モデルの時点（林齢を決定するための基準とする年。基準年）は2016年とした。

2) 結果

判読前後を比較した一例を図4-13に示す。

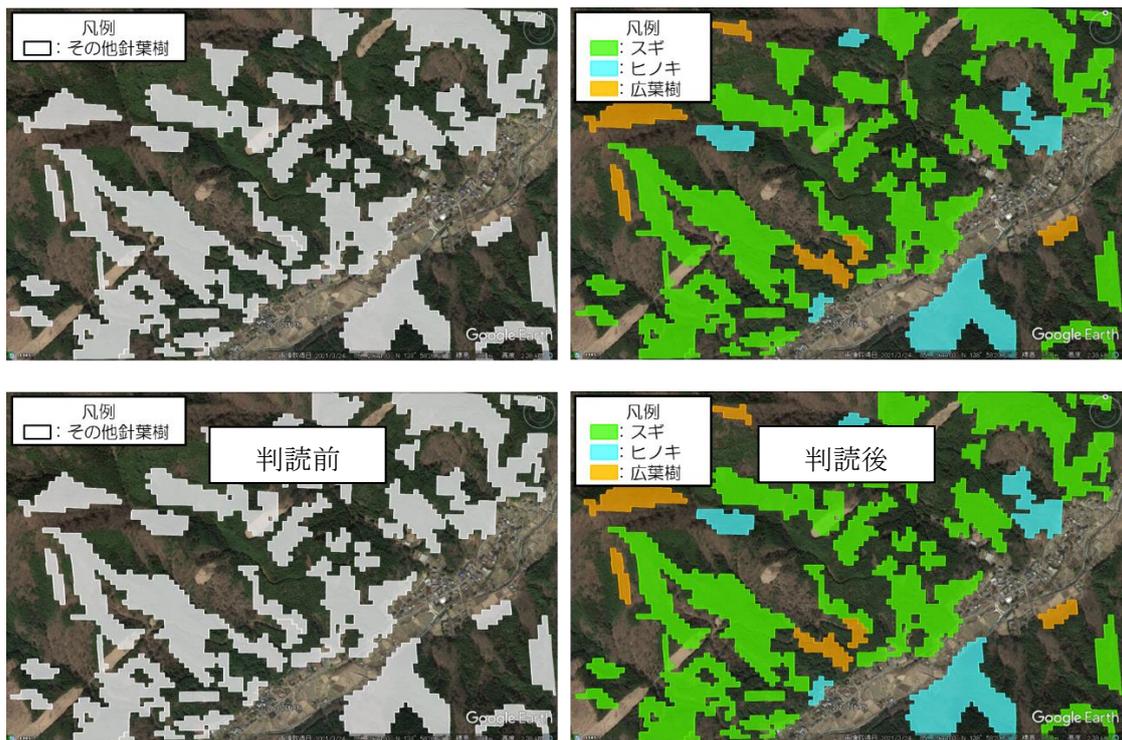


図 4-13 「その他針葉樹」の判読前後の比較

また、判読結果の道志ダム集水域（現代）の林相区分図を図 4-14 に示す（簡略化のため、実際にインプットデータとした林相コードではなく、樹種の分布を示した）。

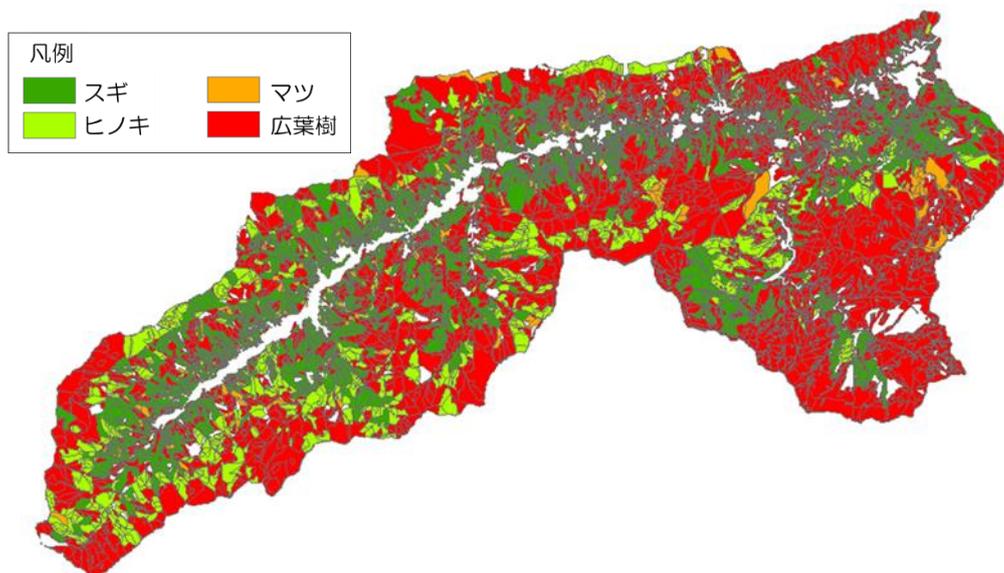


図 4-14 道志ダム集水域の現代の樹種の分布（道志・現代モデルの林相区分図）

なお、後でのパラメータ調整を効率化する観点から、面積割合が小さいマツについてはスギに統合し、それを最終的な林相区分図とした。

4.3.4. 林相区分図の作成

(1) 道志・過去モデル

1) 手法

まず、モデルの時点は（過去の林相区分図の時点（基準年））は、航空写真、気象・流量データ等の入手性を考慮し、現代基準年から 38 年遡る 1978 年に設定した。（表 4-10）。

表 4-10 モデルのシミュレーション年

モデル		ウォームアップ	キャリブレーション	バリテーション	基準年
道志ダム	現代	2013-2014	2015-2017	2018-2019	2016
	過去	1976-1977	1978-1980	1981-1982	1978

次に、過去の樹種、林分疎密度、林齢の決定方法について述べる。

まず、樹種については、当時の森林簿 GIS データが存在しないため、環境省の植生図（5 万分の 1。第 2 回調査）の樹種や群落名等の情報を元に決定した。

次に、過去の林分疎密度については、判定のために参照可能なデータがいたため、一律で「中」とした。

林齢については、まず、2016 年時点での林齢が判明している林分については、その値から 38 年を差し引いた値を設定した。ただし、38 年生よりも若い林齢の林分については、当該林分が造成される前の林齢を推定する必要があり、今回の分析では、標準伐期齢で伐採された林分が存在していたと仮定することで林齢を定めた。（当時の実際の伐期は標準伐期齢とは異なっていた可能性もあるが、調査時点では確認ができなかったため、今回はこのような仮定を置いた。）なお、標準伐期齢は、神奈川県森林については、同県の地域森林計画書¹²に記載されている標準伐期齢（表 4-11）を、山梨県森林については、山梨県森林簿¹³に記載されている標準伐期齢を用いた。

表 4-11 神奈川県の森林タイプ別標準伐期齢

スギ	40年
ヒノキ	45年
マツ	35年
その他針葉樹	50年
クヌギ・コナラ	10年
その他広葉樹	20年

また、この際、現在の森林の造成時には、慣例を踏まえて 2 年生の苗を植栽したものと仮定した。さらに、伐採年の翌年に植栽が行われたものとして計算を行った。具体の例を示すと、スギについて、現代林齢が 10 年生の場合、2007 年、2008 年に伐採、植栽が行われたと想定

¹² 神奈川地域森林計画書（神奈川森林計画区）第 1 回変更平成 31 年 4 月 神奈川県（p.46）より

¹³ 山梨県の森林簿には小班ごとに伐期齢が設定されている。

して、過去林齢を 11 年生とする（図 4-17）。なお、ここで、過去の林齢が 1 年生となるものについては、未造林地として取り扱った。

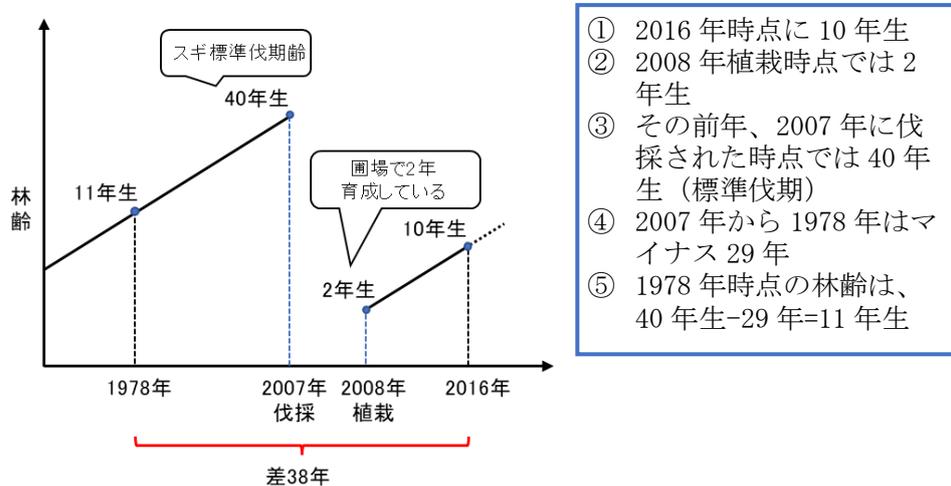


図 4-15 現代 10 年生のスギの場合の過去林齢計算イメージ

また、上記の例は、現在も過去もスギ（人工林）の例だが、過去が天然林の場合には、過去の環境省植生図等から判断して大半が成熟林と判断されたことから、広葉樹の最長の伐期齢である 20 年生を林齢として設定した。現在の林齢情報がない林分についても同様に、過去が天然林であるものは 20 年、人工林は針葉樹の最長の伐期齢の 50 年生を設定した。

2) 結果

以上の方法から過去の林相区分図を作成した。過去の樹種の分布を図 4-16 に示す（簡略化のため、実際にインプットデータとした林相コードではなく、樹種の分布を示した）。過去と現代（図 4-14）を比較すると、赤い色で示した広葉樹林が緑の針葉樹林に変化している。

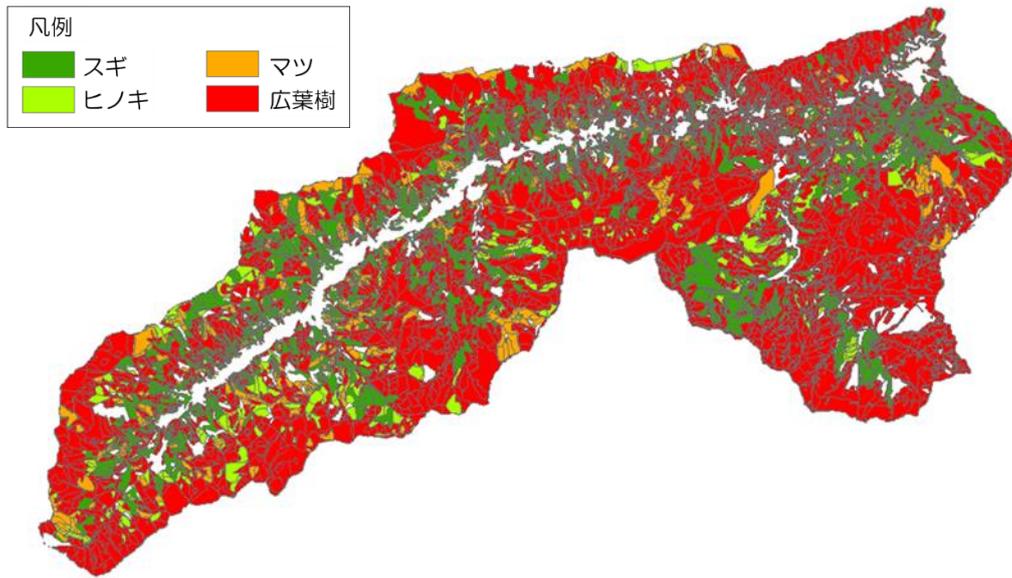


図 4-16 道志ダム集水域の過去の樹種の分布（道志・過去モデルの林相区分図）

上記のとおり、作成した林相区分図を本年度の道志・過去モデルのインプットデータとして用いた。なお、後でのパラメータ調整を効率化する観点から、面積割合が小さめのマツについてはスギに統合し、それを最終的な林相区分図とした。

(2) 三保・現代モデル

1) 手法

三保・現代モデルの林相区分図については、道志・現代モデルと同様の方法で作成した。

なお、三保ダム集水域の範囲は神奈川県内のみだが、民有林と国有林が含まれるため、神奈川県と国有林の森林簿をそれぞれ利用した。林相区分の決定に必要な樹種、林齢は、森林簿の内容をそのまま用いることとし、林分疎密度については、森林簿の樹冠疎密度のデータを用いた。

また、森林簿データが欠損している場合や森林簿の範囲外となる場所については、環境省 2.5 万分の 1 植生図（第 6 回調査）のデータを用いての樹種情報で補完した。ただし、当該データには、具体的な樹種や林齢等の情報が含まれていないため、樹種については、森林簿で樹種が記載されている林分と環境省植生図の群落名等とを照合して作成した対応表をもとに推定した。なお、林齢については、現代の森林の大半が成熟林とみなされたことから、道志・現代モデルと同様に、人工林は 50 年生、広葉樹は 20 年生で設定し、林分疎密度は全樹種で「中」を設定した。

2) 結果

上述の方法で作成した三保・現代モデルの林相区分図を図 4-17 に示す（簡略化のため、実際にインプットデータとした林相コードではなく、樹種の分布を示した）。結果からは、広葉樹が広く分布していることが分かる。

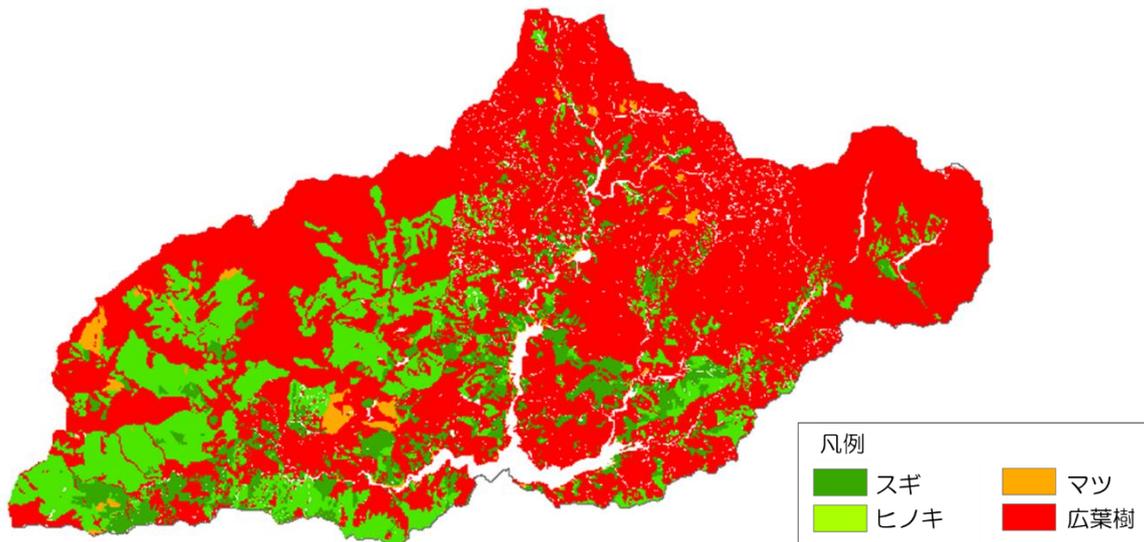


図 4-17 三保ダム集水域の現代の樹種の分布

なお、マツについては面積割合が小さく、モデルでのパラメータもスギに近い値を取ることから、パラメータ調整やモデルによる計算を効率化するため、スギの区分に統合させた。

4.3.5. 崩壊地の判読（三保・過去モデルのインプットデータの作成）

(1) 作業目的

三保ダム集水域の分析に当たっては、検討委員会での助言を踏まえ、昭和 47 年に同地域で発生した豪雨災害からの回復状況を評価することとした。過去の林相区分図を作成するため、神奈川県自然環境保全センターより神奈川県自然災害履歴図 GIS データ（原図は平成 2 年神奈川県発行。図 4-18）の提供を受けた。その内容を確認したところ、昭和 47 年災害を含む関東大震災までの斜面崩壊地が GIS ポリゴンとして作成されており、崩壊地数は 15,300 個となっていたが、崩壊発生の時期についてはデータに含まれておらず、また、三保ダム集水域北西部の国有林部分のデータが含まれていなかった。

このため、本データをもとに林相区分図を作成することは困難と判断し、空中写真等をもとに、昭和 47 年災害による崩壊地地図を新たに作成することとした。なお、崩壊地の抽出には一定の時間を要すること、精度の高いモデルを構築するためには、精度の高いデータが必要になることを踏まえて、今年度はデータの整備にとどめ、林相区分図作成やモデル構築は次年度以降の作業とすることとした。なお崩壊地の抽出作業は、株式会社パスコに再委託して実施した。

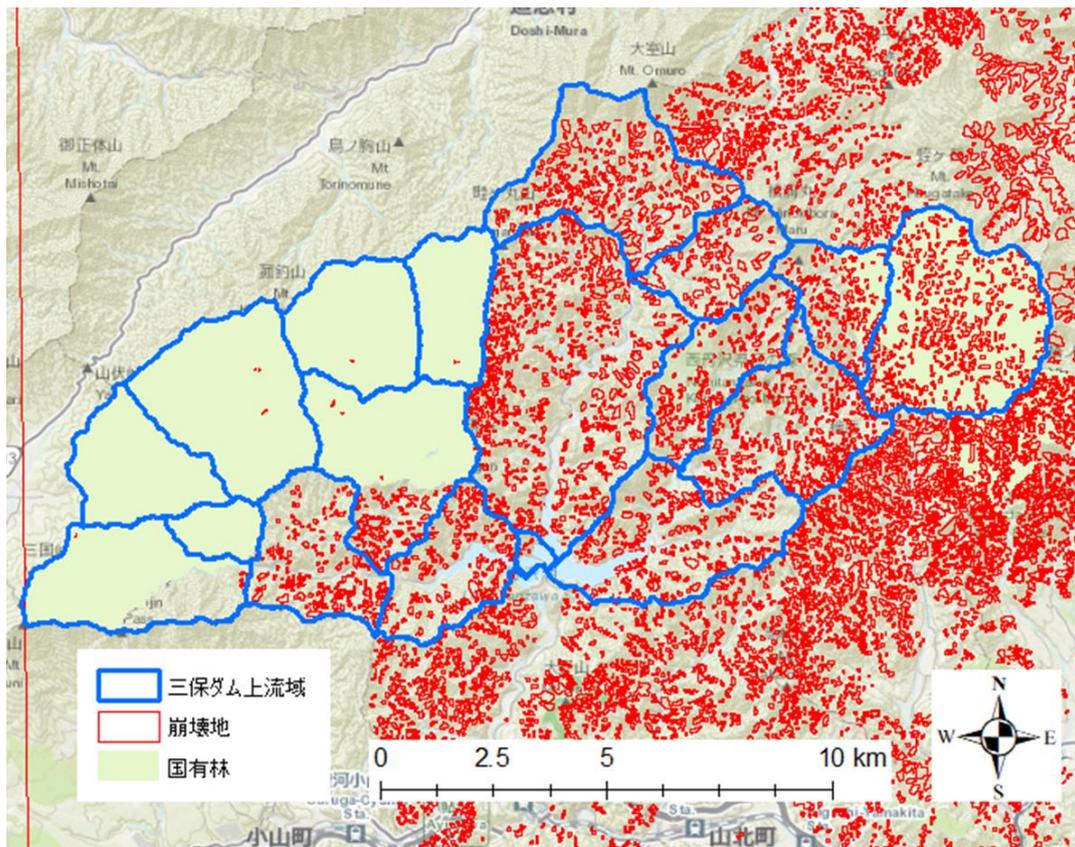


図 4-18 既往の三保ダム上流域崩壊地データ

(2) 手法

崩壊地の判読作業には、全国的に撮影された国土地理院の年代別（1974～1978 年）の空中写真が活用可能と考えられたが、解像度が粗く、小規模な崩壊地が十分に判読できなかったこと、また、空中写真の撮影時期が秋季・冬季であったために、山影により北向き斜面の判読が困難である等の問題が確認された。このため、空中写真（単写真）を別途入手し、これを簡易幾何補正することにより判読の補助情報として利用した（図 4-19）。

作業に当たっては、集水域を 195 のメッシュ単位で区画し（図 4-21）、概ね 100m²以上の非植生部分を抽出し、ポリゴン化した。ただし、第 2 回環境省 1/5 万現存植生図（1981～1982 年）における非植生部分（市街地、緑の多い住宅地、造成地、裸地、開放水域）は判読対象から除外した（表 4-12）。

表 4-12 判読から除外する部分

属性コード	属性名称
9902	市街地
9905	緑の多い住宅地
9919	造成地
9925	造成地、裸地
9931	開放水域

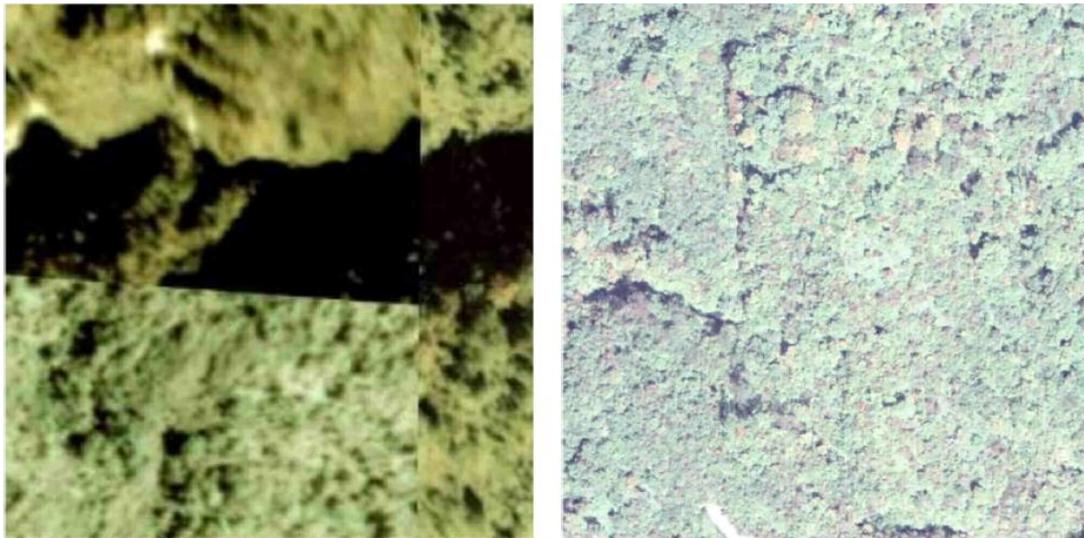


図 4-19 簡易オルソ画像（左）と空中写真（右）の精度の比較（同一縮尺）

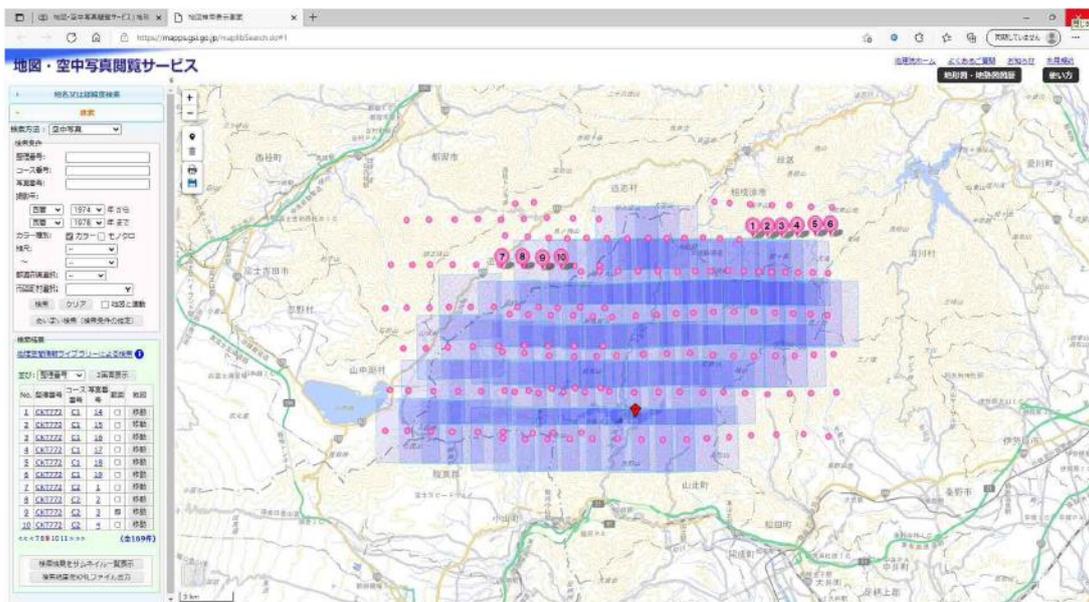


図 4-20 空中写真の入手範囲（日本地図センターのサイトより）

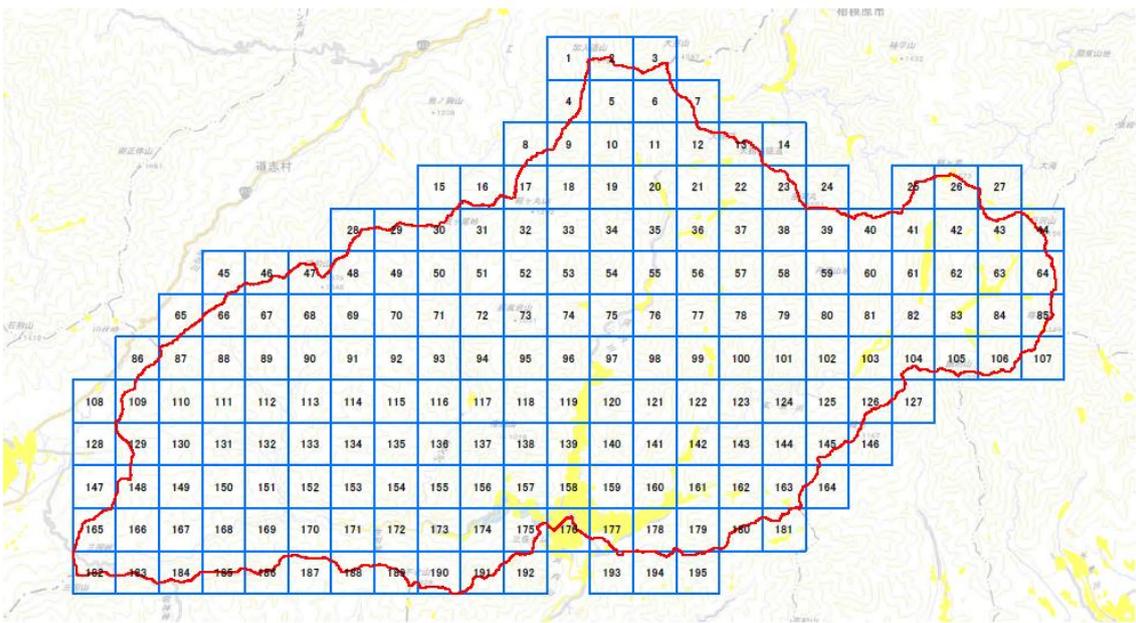


図 4-21 判読作業の区画

なお、河川内における水域以外の非植生部分については、0 次谷等の崩壊起点から河道に接続するまでの部分は崩壊地とし、それ以外は非崩壊地とした。また、山影が強く判読できない部分については、崩壊地と連続していて明らかに樹木が無いと判断できる場合は崩壊地とし、それ以外は非崩壊地とした。道路の法面にあたる部分も非崩壊地とした。

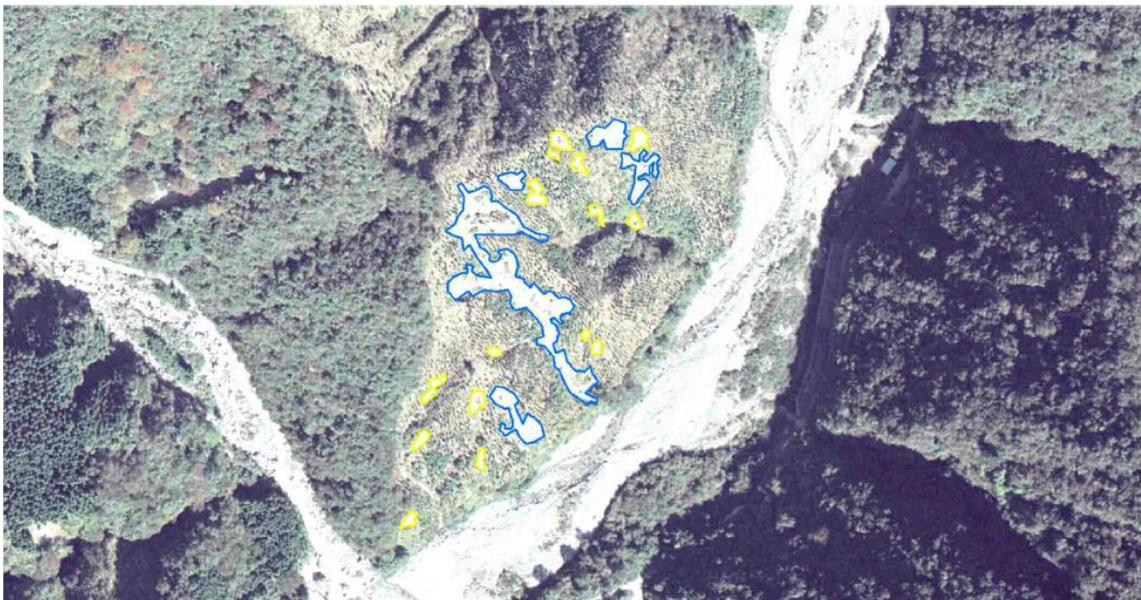


図 4-22 判読例

(3) 結果

抽出結果は図 4-23 に示すとおりである。集水域 15,657ha 中、崩壊地と判定されたのは 2,384 箇所、169.81ha であった。1 か所当たりの平均面積は 712m²、集水域に占める割合は 1.08% であった。崩壊地は集水域内に広く分布しているが、一部集中して分布しているところも見られ、その多くは、新植の造林地や林道の下斜面等であった。

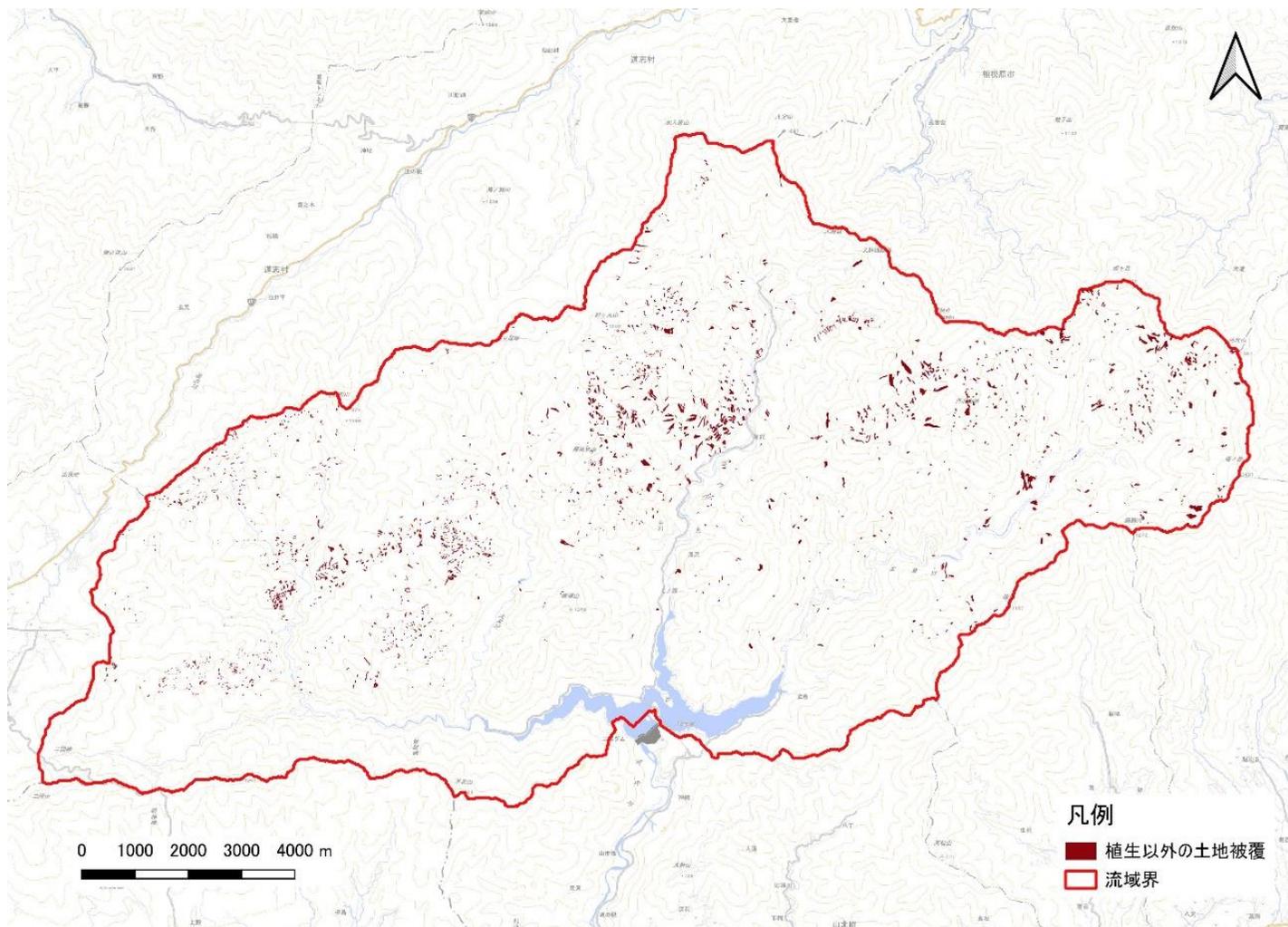


図 4-23 判読結果

4.3.6. 林相区分図の妥当性の検証等

(1) 現地調査の方法

表 4-7 の課題 1 - 3 と課題 1 - 4 に対応するため、貝沢試験流域及び道志ダム集水域を対象として現地調査を行い、林分疎密度の妥当性の確認を行った。また、今後、森林状態と水の動態を統一的に評価する指標の検討に活用するため、妥当性の確認に必要な情報以外にも、参考データとして収集することとした。

また、4.3.3 に記載のとおり、DCHM の標準偏差から立木密度を算出したが、検討委員会において、樹頂点の数から立木本数（立木位置）を算出する従来の方法についても検証を行うことが望ましいとの意見があったことや、神奈川県令和元年度航空レーザ測量成果である、1m²当たり 4 点以上の高密度 LiDAR データを新たに入手できたことから、これらを踏まえた検証も合わせて行った。

具体的には、モデルで設定している林相のタイプ毎に、LiDAR データから作成した DCHM の分布等を参考に、代表性があると判断された 2~3 サンプルについて標準地調査を行い、樹高、立木密度、胸高断面積等の LiDAR 解析結果と比較可能なデータを収集した。

プロットは 0.02ha の円形（半径 7.98m）とし、林縁を避け、できるだけ平衡斜面に設置した。なお、0.02ha プロットで計測対象の立木本数が 5 本以下となる場合は、プロットサイズを 0.04ha（半径 11.28m）に拡張した。設定方法の詳細は、図 4-24 のとおりである。

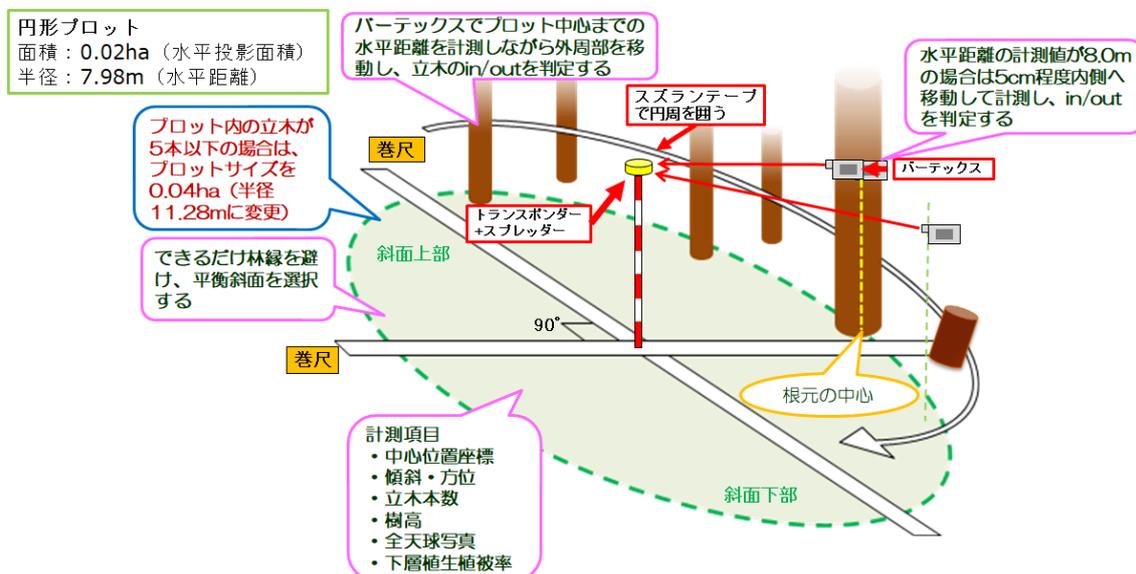


図 4-24 林相調査プロット（標準地）の設定方法

プロットは、貝沢で 7 箇所、道志で 10 箇所の計 17 箇所を設定した（図 4-25、図 4-26）。

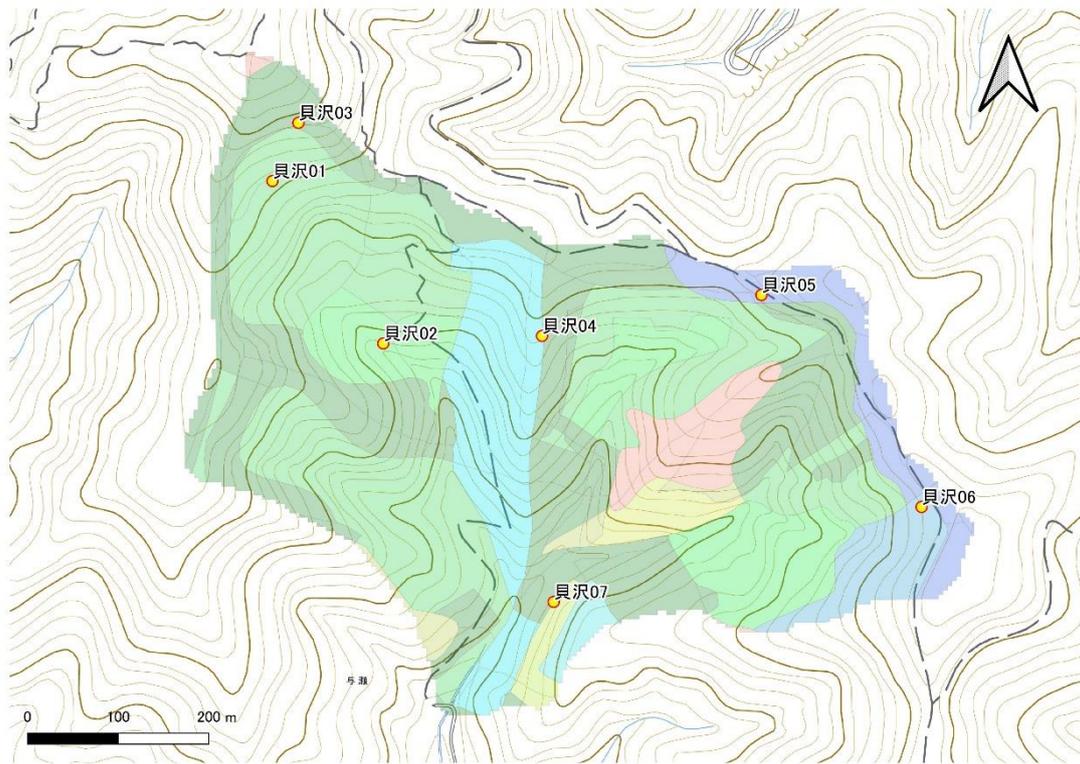


図 4-25 林相調査箇所位置図（貝沢試験流域）

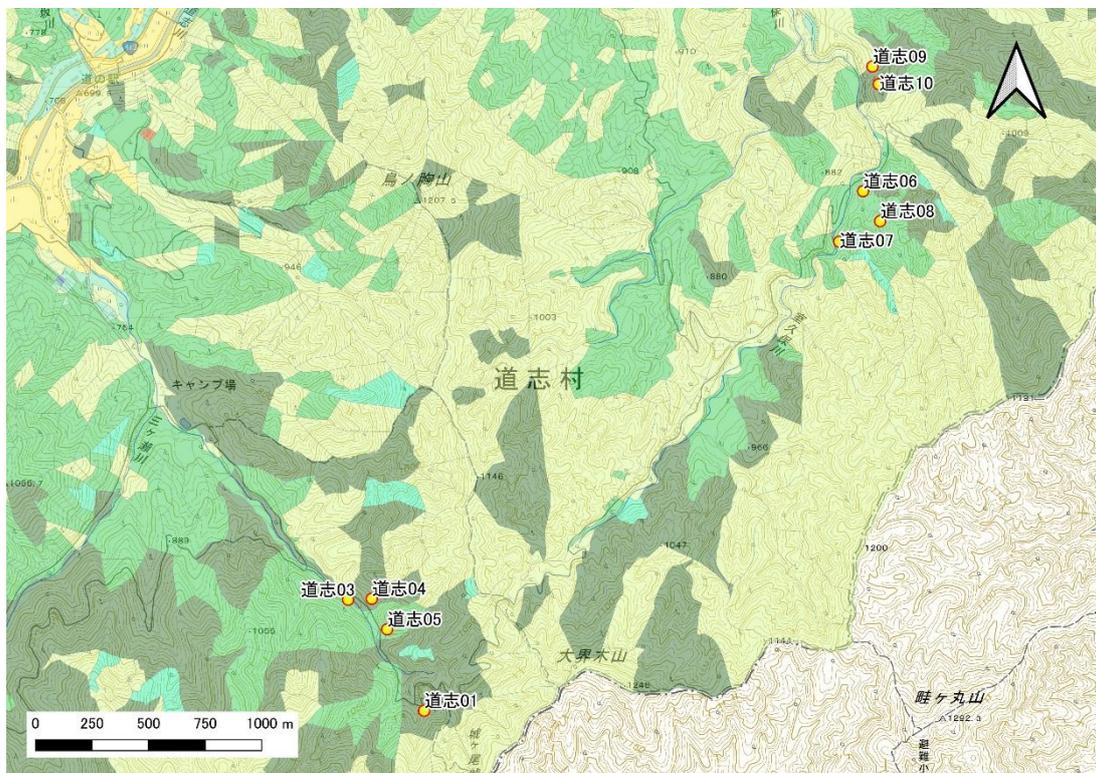


図 4-26 林相調査箇所位置図（道志ダム集水域）

(2) 検証の方法

現地調査でのプロットは代表的な箇所を選定したが、流域全体では、標準的なばらつきから外れた箇所も一部存在する可能性がある。このため、検証に当たっては、使用する LiDAR データと立木密度の解析手法に加えて、分析対象の範囲も検証のパターンに加えることとした。算出方法の一覧を、図 4-12 に示す。

表 4-13 LiDAR データを用いた立木密度等の算出方法の一覧

算出方法	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨
使用 LiDAR データ	低密度データ			高密度データ					
立木密度の解析手法	樹頂点抽出 (R 解析)		標準偏差からの回帰	樹頂点抽出 (R 解析)			樹頂点抽出 (民間企業による開発)		
ウインドウサイズと最小樹高	5×5m、5m		-	5×5m、5m		3×3m、10m		不明	
対象範囲	プロット	林小班	林小班	プロット	林小班	プロット	林小班	プロット	林小班
調査時点での適用状況	令和2年度作成林相区分図		令和3年度作成林相区分図	-	-	-	神奈川県人工林現況調査	-	-

まず、LiDAR データについては、低密度（1点/m²以上）と高密度（4点/m²以上）の2種類を用いることとし、低密度データは国土地理院「H20 渡良瀬川流域及び鬼怒川流域航空レーザ計測業務」の成果データ、高密度のデータは神奈川県から提供を受けた「令和元年度神奈川県水源林林況等基礎調査委託業務における航空レーザ計測業務」の成果データを用いた。

次に、立木密度の解析手法としては、統計解析ソフト「R」を用いた樹頂点抽出手法、今年度採用した DCHM の標準偏差から回帰式により求める手法、アジア航測株式会社・東京電力株式会社により共同開発された樹頂点抽出法の3つの手法を検証対象とした。このうち、「R」を用いた樹頂点抽出方法でパラメータとして設定するウインドウサイズ（樹頂推定に用いる解析範囲）と最小樹高については、昨年度はそれぞれ5m×5mと5mを設定したが、神奈川県人工林現況調査で実施している手法も踏まえて、3m×3mと10mとする設定も追加した。

なお、精度の評価に当たっては、現地実測データと各解析結果データの関係性や当てはまり具合を定量的に評価し、どの解析パターンがより適切であるかを複数の観点から見極められるよう、相関係数（R）¹⁴、決定係数（R²）¹⁵、2乗平均平方根誤差（RMSE）¹⁶の3つの指標を用いることとした。

¹⁴R（相関係数）：2つのデータの相関関係をみる指標で、-1.0に近いほど負の相関、1.0に近いほど正の相関が高く、0に近いと相関が低いとされる。観測値と計算値の関係性の評価等に用いられる。

¹⁵R²（決定係数）：回帰式の当てはまり具合を見る指標。

¹⁶RMSE（2乗平均平方根誤差）：Root Mean Squared Error の回帰モデルの誤差を評価する指標の一つ。観測値と計算値が近づくほど小さい値となる。

(3) 結果

各プロットにおける現地調査の結果は表 4-14 のとおりである。今後、森林状態と水の動態を統一的に評価する指標の検討に活用するため、立木密度以外の情報についても参考データとして収集した。

表 4-14 林相調査結果

No.	林相コード	方位	斜面傾斜(度)	優占樹種	下層植被率(%)	プロット面積(ha)	計測本数(本)	ha当り本数(本/ha)	平均樹高(m)	胸高断面面積(m ² /ha)	平均直径(cm)	材積(m ³ /ha)	開空度
貝沢01	1152	SE	33.0	スギ	40	0.04	17	425	31.4	61.6	43.0	851.3	22.7
貝沢02	1151	E	33.8	スギ	70	0.02	9	450	32.5	59.6	41.1	869.0	20.1
貝沢03	1153	S	39.9	スギ	40	0.02	17	850	24.6	77.2	34.0	870.4	18.2
貝沢04	1213	S	23.9	ヒノキ	60	0.02	14	700	19.6	62.0	33.6	555.5	23.8
貝沢05	1253	SW	26.9	ヒノキ	20	0.02	24	1200	20.1	94.4	31.6	883.7	23.4
貝沢06	1252	W	41.1	ヒノキ	70	0.02	18	900	18.8	53.8	27.6	484.6	20.1
貝沢07	1213	NW	42.1	ヒノキ	0	0.02	41	2050	13.0	46.0	16.9	306.9	19.1
道志01	1221	N	44.0	ヒノキ	10	0.02	17	850	18.6	49.0	27.1	438.6	29.9
道志02	1232	SE	36.7	ヒノキ	0	0.02	13	650	19.1	46.4	30.1	414.2	24.1
道志03	1152	NE	30.8	スギ	10	0.02	11	550	30.7	51.6	34.6	708.7	22.7
道志04	1251	SW	51.0	ヒノキ	0	0.02	21	1050	20.0	67.8	28.7	649.4	15.1
道志05	1142	W	51.0	ヒノキ	0	0.02	18	900	18.1	51.4	27.0	445.2	21.9
道志06	1141	E	33.8	スギ	0	0.02	13	650	27.4	64.0	35.4	793.7	22.4
道志07	1152	NW	9.4	スギ	0	0.02	14	700	33.7	84.4	39.2	1253.2	19.7
道志08	1142	W	33.7	スギ	0	0.02	13	650	28.0	76.0	38.6	957.4	23.4
道志09	1252	SW	42.1	ヒノキ	10	0.02	16	800	23.8	86.4	37.1	941.1	23.9
道志10	1222	N	36.9	ヒノキ	0	0.02	25	1250	15.9	40.8	20.4	329.6	29.4

1) 立木密度の精度検証

表 4-15 に、立木密度の精度検証結果を示す。プロット No.01～03 がスギ林、No.04～07 がヒノキ林であるため、樹種別（スギ・ヒノキ）及び全体の 3 つのグループについて、それぞれ①～⑨までの 9 つのパターンにおいて評価指標を算出した。

このうち、現地実測データとの相関や回帰の当てはまり具合が相対的に良いと思われる解析パターンを検出するため、高い相関（ $R=0.9$ 以上すべて）が認められたパターンと、誤差が少ないパターン（ここでは RMSE が低いものから上位 2 つとする）の結果について、それぞれハイライトで表示した。

表 4-15 立木密度の精度検証結果（R 及び RMSE による評価）

No.	樹種	林相コード	立木密度 (現地プロット調査)	立木密度 (LiDAR解析)								
				①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨
貝沢01	スギ	1152	425	300	437	125	300	406	450	953	300	341
貝沢02	スギ	1151	450	500	356	215	450	328	1000	828	450	261
貝沢03	スギ	1153	850	650	635	1048	550	582	1200	1000	400	571
貝沢04	ヒノキ	1213	700	550	580	1535	750	580	1150	946	850	574
貝沢05	ヒノキ	1253	1200	650	589	1121	750	539	1350	1054	700	545
貝沢06	ヒノキ	1252	900	600	446	764	550	408	1350	920	650	420
貝沢07	ヒノキ	1213	2050	1000	647	1610	750	488	1500	1361	950	683
スギ	R (相関係数)			0.8507	0.9435	0.9993	0.8331	0.9363	0.7423	0.6762	0.2402	0.9547
	RMSE (二乗平均平方根誤差)			139	136	248	188	170	377	385	270	200
ヒノキ	R (相関係数)			0.9881	0.6460	0.4406	0.3502	-0.1744	0.8900	0.9813	0.6027	0.7252
	RMSE (二乗平均平方根誤差)			616	800	478	710	885	427	373	621	797
全体	R (相関係数)			0.9446	0.6884	0.7224	0.6890	0.3226	0.7439	0.9459	0.7409	0.7870
	RMSE (二乗平均平方根誤差)			474	611	396	551	678	406	378	502	617

プロット単位で解析された立木密度は、同じくプロット単位で現地実測された立木密度と相関が高く、精度も高いと予測したが、そのような結果は明瞭には表れず、むしろ②③⑤⑨など、林小班単位で解析されたスギ林で高い相関がみられた。また、ヒノキ林では、⑥⑦の高密度 LiDAR を用いた R 解析（ウインドウサイズ 3m×3m、最小樹高 10m）により算出された立木密度の推定誤差が小さかったが、スギ林では①②の低密度 LiDAR を用いた R 解析、全体（スギ+ヒノキ）では、同じく低密度 LiDAR を用いた③の回帰式法による立木密度の推定誤差が小さかったことから、必ずしも高密度 LiDAR データの方が高い精度が得られるというわけではなく、低密度 LiDAR データは全国的に広範なエリアで整備されているという利点も活かして活用することも有用と思われた。

次に、現地調査による実測の立木密度と LiDAR データを用いて推計した立木密度の関係性を図 4-27 に示す。

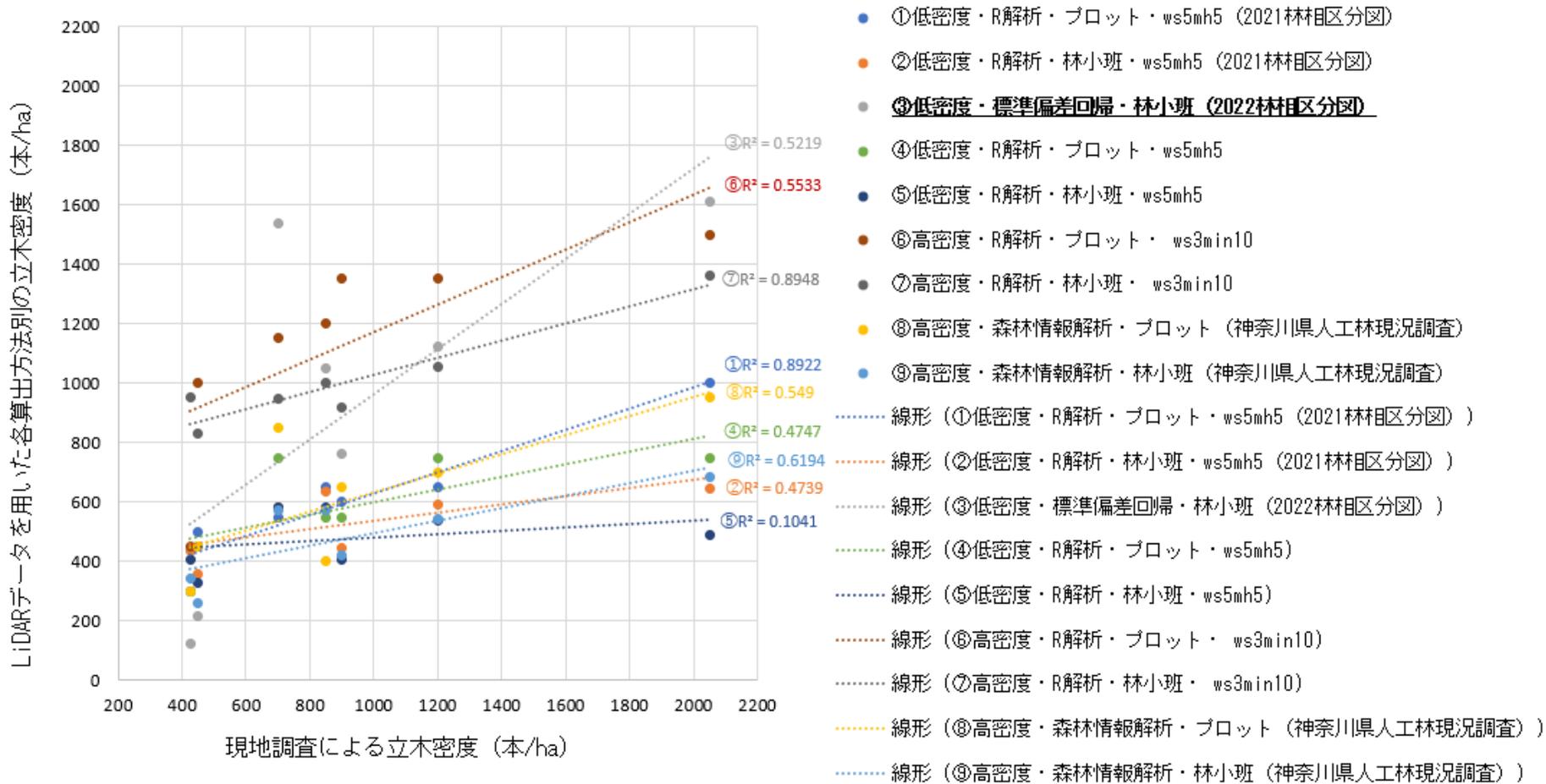


図 4-27 立木密度の精度検証結果 (R^2 による評価)

(③は今年度の作業で採用した方法)

図 4-27 のグラフ上に示した R^2 (決定係数) によると、①の低密度 DCHM を用いたプロット単位の R 解析 ($R^2=0.8922$) や、⑦の高密度 LiDAR を用いた林小班単位の R 解析による回帰式 ($R^2=0.8948$) のあてはまりがよいと評価された。

2) 樹高の精度検証

樹高の精度検証結果を表 4-16 樹高の精度検証結果 (R 及び RMSE による評価) に示す。立木密度と同様に、スギ、ヒノキの樹種別及び全体の 3 つのグループでそれぞれ評価指標を算出した。さらに、現地実測データとの相関や回帰の当てはまり具合が相対的に良いと思われる解析パターンを検出するため、高い相関 ($R=0.9$ 以上すべて) が認められたパターンと、誤差が少ないパターン (RMSE が低いものから上位 2 つ) の結果について、それぞれハイライトで表示した。

なお、②、③については、樹高算出までの処理過程が同じのため、同値の結果となっている。

表 4-16 樹高の精度検証結果 (R 及び RMSE による評価)

No.	樹種	林相コード	立木密度 (現地プロット調査)	樹高 (LiDAR解析)								
				①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨
貝沢01	スギ	1152	31.4	33.05	30.00	30.00	32.81	31.40	31.96	28.97	33.20	28.55
貝沢02	スギ	1151	32.5	34.97	30.00	30.00	34.62	33.25	32.93	28.26	34.90	29.40
貝沢03	スギ	1153	24.6	25.38	23.00	23.00	26.25	24.69	25.22	22.81	26.90	23.30
貝沢04	ヒノキ	1213	19.6	19.79	19.00	19.00	19.70	19.22	19.33	18.63	19.80	12.83
貝沢05	ヒノキ	1253	20.1	21.86	22.00	22.00	21.87	21.70	21.48	21.43	22.30	15.13
貝沢06	ヒノキ	1252	18.8	20.63	23.00	23.00	21.15	20.46	20.55	22.76	21.00	11.53
貝沢07	ヒノキ	1213	13.0	13.94	17.00	17.00	14.30	14.08	14.14	16.39	13.90	12.57
スギ	R (相関係数)			0.9978	0.9924	0.9924	0.9965	0.9966	1.0000	0.9739	0.9968	1.0000
	RMSE (二乗平均平方根誤差)			1.79	1.88	1.88	1.77	0.45	0.55	2.99	2.20	2.53
ヒノキ	R (相関係数)			0.9747	0.7351	0.7351	0.9584	0.9573	0.9619	0.7397	0.9648	0.3458
	RMSE (二乗平均平方根誤差)			1.36	3.06	3.06	1.61	1.29	1.26	2.73	1.63	5.56
全体	R (相関係数)			0.9960	0.9526	0.9526	0.9951	0.9938	0.9957	0.9472	0.9951	0.9435
	RMSE (二乗平均平方根誤差)			1.56	2.62	2.62	1.68	1.02	1.02	2.84	1.89	4.52

推計された樹高は総じて実測樹高との相関が高く、算出方法間における RMSE のばらつきも少なかった。このことから、立木密度と比べ、LiDAR データを用いた樹高推定では比較的高い精度が得られ、樹高算出においては LiDAR データの活用がより有効であると考えられた。

特に、高密度 LiDAR データを用いた⑤や⑥の算出方法において誤差が小さく、高密度の LiDAR データでは、より高い精度で樹高を推定できる可能性が示唆された。ただし、立木密度と同様、樹高推定においても、低密度の LiDAR データの推計精度が極端に低いわけではないため、低密度の LiDAR データも適宜有効活用が可能と考えられた。

次に、現地調査による実測の樹高と LiDAR データを用いて推計した樹高の関係性についてグラフ化したものを図 4-28 に示す。

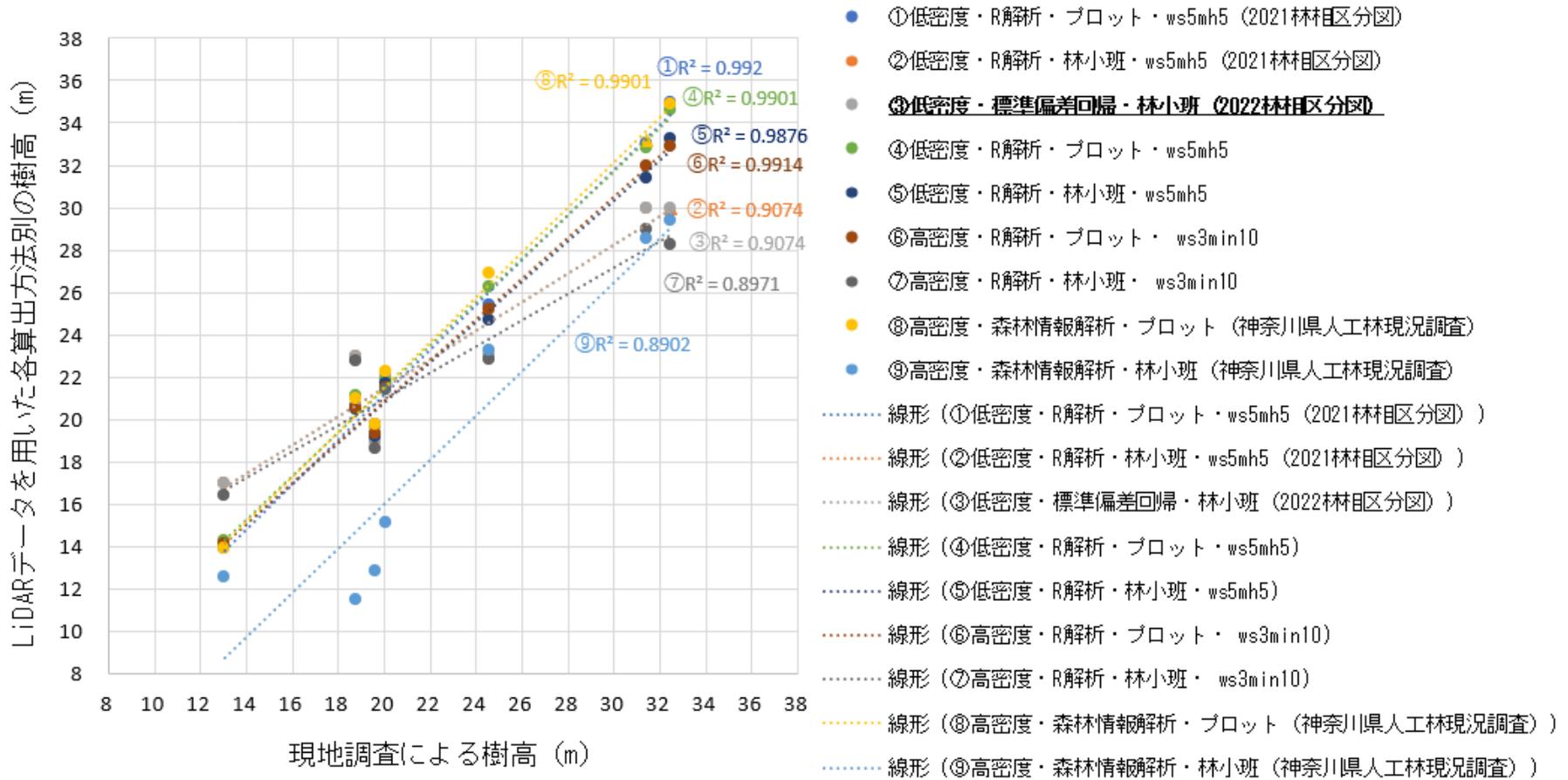


図 4-28 樹高の精度検証結果 (R^2 による評価)
 (③は今年度の作業で採用した方法)

図 4-28 に示されるように、R（相関係数）と同様、現地調査による樹高と LiDAR 解析による樹高の回帰式のあてはまりは総じて良く、特に①、④、⑤、⑥など、R 解析による樹頂点抽出方法で高い R²（決定係数）が得られた。

(4) 考察

立木密度と樹高の精度の検証結果からは、必ずしも最適な立木密度や樹高の推定方法を絞り込むまでには至らなかったものの、本年度採用している手法③の精度は他の手法と比較して特段低くはなく、林相区分の決定方法について一定の妥当性があると考えられた。このため、現時点では林分疎密度の判定に森林簿の樹冠疎密度（疎・中・密）を適用している道志ダム集水域についても、今後 LiDAR データを活用した林分疎密度区分に置換えることで、より精度の高い分析ができる可能性もあると考えられた。

4.3.7. パラメータ調整（キャリブレーション・バリデーション）

(1) 手法

1) 精度の評価指標値の見直し

モデル推定結果の精度確認のため、本事業では、RNR、NSE、PBIAS の評価指標を用いたが、近年、Moriasi ら（2015）により、NSE と PBIAS についてはより厳格な評価閾値が示されたことから、本年度では、より精緻なモデルの構築するために、これらの新しい評価指標値に基づき、Very good (vg)、Good (g)、Satisfactory (s)、Unsatisfactory (us) を判定することとした（表 4-17）。

表 4-17 流出モデルの評価指標と精度評価基準（Moriasi et al. (2007,2015)）

Performance Rating	RSR	NSE		PBIAS(%)	
		2007	2015	2007	2015
Very Good	$0.00 \leq \text{RSR} \leq 0.50$	$0.75 < \text{NSE} \leq 1.00$	$\text{NSE} > 0.80$	$\text{PBIAS} \leq \pm 10$	$\text{PBIAS} \leq \pm 5$
Good	$0.50 < \text{RSR} \leq 0.60$	$0.65 < \text{NSE} \leq 0.75$	$0.70 < \text{NSE} \leq 0.80$	$\pm 10 \leq \text{PBIAS} < \pm 15$	$\pm 5 \leq \text{PBIAS} < \pm 10$
Satisfactory	$0.60 \leq \text{RSR} \leq 0.70$	$0.50 < \text{NSE} \leq 0.65$	$0.50 < \text{NSE} \leq 0.70$	$\pm 15 \leq \text{PBIAS} < \pm 25$	$\pm 10 \leq \text{PBIAS} < \pm 15$
Unsatisfactory	$\text{RSR} > 0.70$	$\text{NSE} \leq 0.50$	$\text{NSE} \leq 0.50$	$\text{PBIAS} \geq \pm 25$	$\text{PBIAS} \geq \pm 15$

注：RSR (RMSE-observations standard deviation ratio)：観測値と予測値の RMSE（二乗平均平方根誤差）を観測値の標準偏差で割ったもの。

NSE (Nash-Sutcliffe 効率係数)：流量のばらつきの大きさを考慮して流出モデルの精度を評価する指標。

PBIAS：評価したデータの偏りを 100 分率で示したもの。

2) キャリブレーションの手順

キャリブレーションに当たっては、いずれのモデルにおいても、まずはパラメータの初期値を用いて貝沢モデルのキャリブレーションを行い、その結果を踏まえて改善の検討・試行を行った。また、貝沢以外のモデルについては、初期値でのキャリブレーションで妥当な結果が得られない場合は、貝沢モデルで調整後のベストパラメータを適用して精度を検証し、十分な精度が得られない場合は、各モデルで個別にキャリブレーション・バリデーションを実施した。

作業の流れは図 4-29 のとおりであるが、詳細な手順については結果の項で詳述する。黄色の○印で示されている「PS」はパラメータの一式（セット）を表し、PS0（ゼロ）は林野庁有明海調査事業や昨年度の本事業成果を活用した、初期値のパラメータセットである。具体的なパラメータ初期値は、表 4-18 及び表 4-19 のとおりである。

なお、キャリブレーションの効率化のため、まず水収支の適正化を図った上で、ハイドログラフの改善を図ることとした。

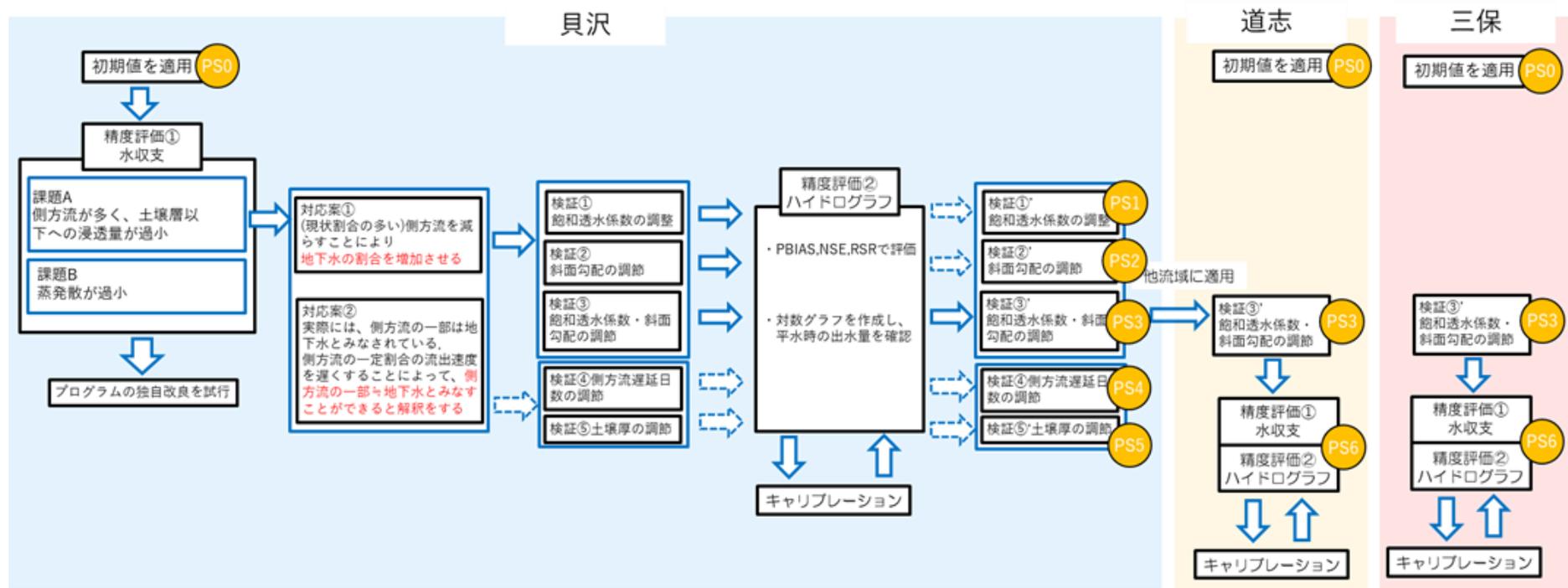


図 4-29 貝沢モデルのキャリブレーションとその結果パラメータの広域モデルへの適用の流れ

表 4-18 パラメータ初期値一覧（有明海調査事業）

テーブル名	パラメータ名	パラメータ説明	デフォルト値[単位]	R2有明パラメータ
BSN	SURLAG	表面流の流出遅延度合い	4 days (1-24)	1.19365
GW	ALPHA_BF	降水による供給が無い状態での地下水の流出量（ベースフロー）を決定するファクター。	0.048 [1/days]	0.655
	GWQMIN	浅層地下水が川へ流入する際の閾値	1000[mm]	215
	GW_REVAP	地下水の再蒸発（土壌表層への水の移動）係数。	0.02	0.102
	REVAPMIN	毛管上昇が生じる浅層地下水の閾値。	750[mm]	486.5
	RCHRG_DP	地下深層への透過率。	0.05	0.516
MGT	LAI_INT	葉面積指数 (LAI) の初期値	0 (0-8)	4
	BIO_INT	乾重量バイオマスの初期値	0 [kg/ha] (0-1000)	1000
	BIOMIX	生態混交率	0.2 (0-1)	0.139
	PHU_PLT	植物成長の全期間における積算温度	0 [phu] (0-3500)	2000
HRU	EPCO	植物による吸水の補償係数。	0.01-1	0.918
	OV_N	地表面におけるマニングのN(粗度係数)	0.01-0.15	0.4422
RTE	CH_COV1	河川の浸食されやすさ。	0 [](-0.05-0.6)	0.0215
	CH_COV2	河川の被覆係数。	0 [](-0.001-1)	0.19
	CH_K2	河床における実効透水係数	0[mm/hr](-0.01-500)	0.19
	CH_N2	基幹河川におけるマニングのN (粗度係数)	0.014 [](-0.01-0.3)	0.202
CROP	BLAI	葉面積指数 (Leaf Area Index: LAI) の最大値	-	5.7
	T_BASE	植物が成長可能な最低気温	℃	8.05
	T_OPT	植物の成長の最適気温	℃	30
	GSI	最大気孔コンダクタンス	m/s	0.00985
	MAT_YRS	木が成熟するまでに必要な年数	years	62.5
	ALAI_MIN	休眠期における最小の葉面積指数	m2/m2	0.6855
	FRGRW2	最適葉面積発達曲線上の第 2 点上における植物の成長度	-	0.325
	BMX_TREES	森林の最大バイオマス	tons/ha	126.149
	EXT_COEF	吸光係数。樹冠の構造やLAIによって光がどれだけ遮断されるか。	-	0.402
	RSDCO_PL	植物残渣の分解率	-	0.249
	VPDFR	気孔コンダクタンス曲線上の第 2 点上における飽差	kPa	4

表 4-19 パラメータ初期値一覧（昨年度の本事業成果）

テーブル名	パラメータ名	パラメータ説明	デフォルト値[単位]	R2本事業パラメータ
GW	GW_DELAY	地下水の流出日数	31 [days]	1.7
HRU	CANMX	樹冠最大貯留量。	0[mm]	4
	ESCO	土壌からの蒸発ファクター。	0.95	0.1
CROP	CHTMX	最大樹冠高（植物が成長したときの最大成長高さ）	m	スギ：17.95 ヒノキ：15.75 広葉樹：13
	GSI	最大気孔コンダクタンス	m/s	スギ：0.0209 ヒノキ：0.0116 広葉樹：0.0177

(2) 結果

1) パラメータ初期値（PS0）によるシミュレーション

日単位のシミュレーションを行った結果を、表 4-20 に示した。また、結果からは以下の課題が確認された。

- ①降雨量に対して、蒸発散量が過少となる（貝沢モデル）
- ②平水時の流出量が過少となる（全モデル共通）
- ③側方流が地下水流出量や地下浸透量に比べて過大となる（全モデル共通）

表 4-20 パラメータ初期値 (PS0) を適用したモデルシミュレーション結果 (1/2)

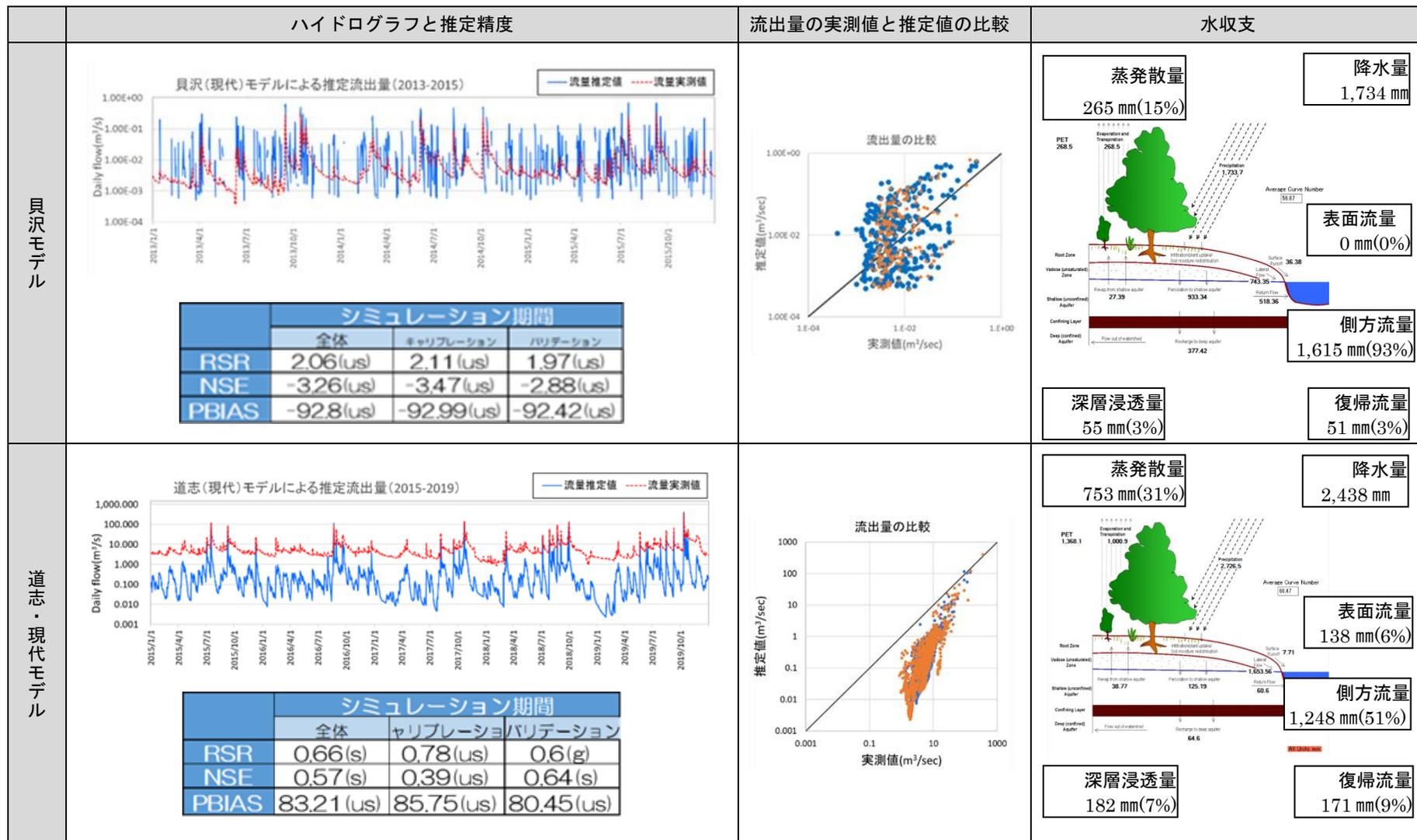
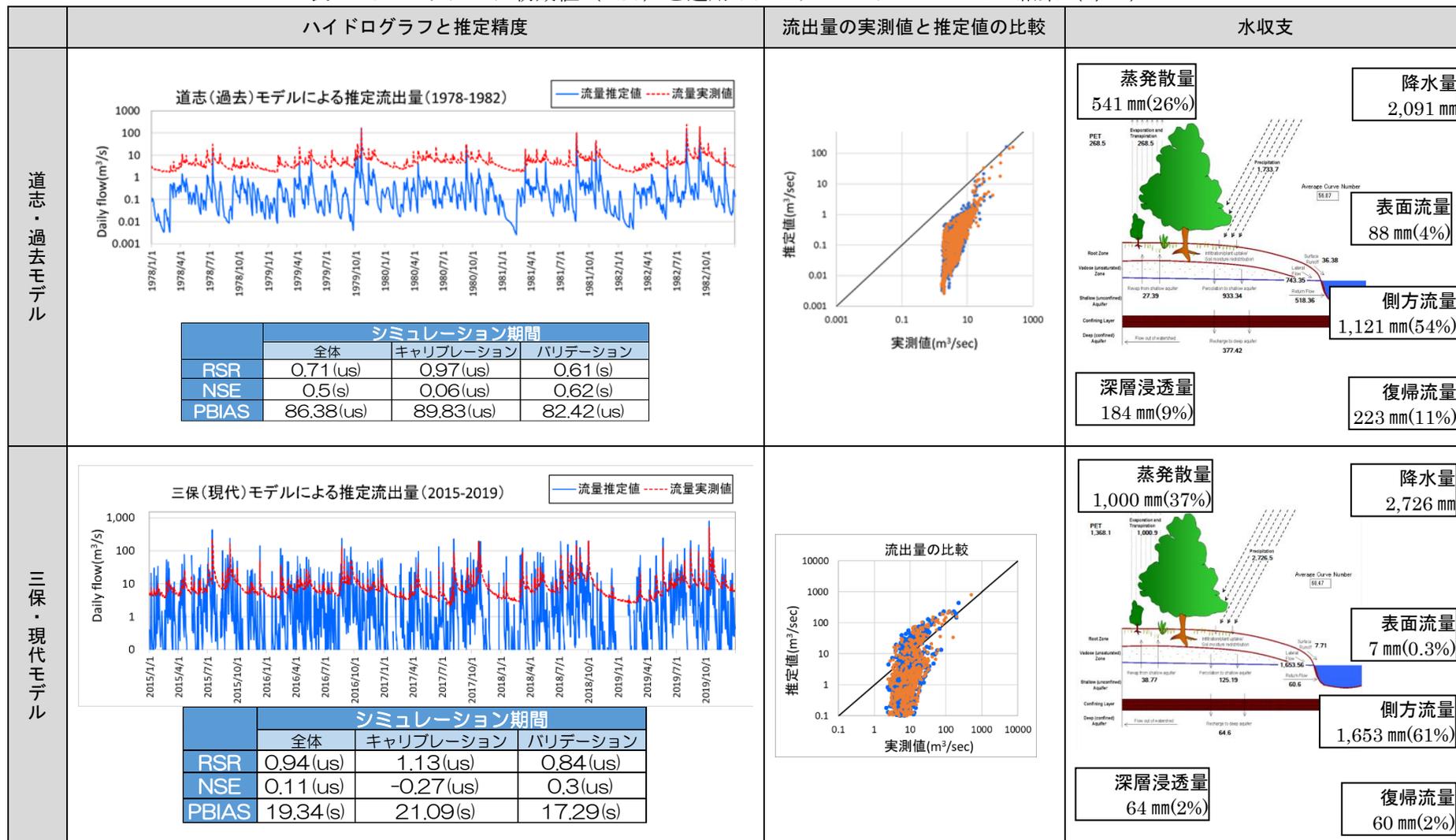


表 4-20 パラメータ初期値 (PS0) を適用したモデルシミュレーション結果 (2/2)



①は、昨年度からの残存課題であり、道志や三保など一定の規模のある流域（1万ha以上）では比較的影響は小さいが、貝沢試験流域（35ha）のような森林小流域スケールでは顕著に現れる。一方で、蒸発散量については、関連するパラメータ調整のみでは改善が難しいことから、SWATモデルの蒸発散プログラムを森林用に独自で改良することにより改善を目指すこととした。

また、②については、本事業の対象流域のみならず、SWATモデルを用いて広域の流出解析を先行的に行っている林野庁有明海調査事業においてもみられる傾向であり、SWATモデルが本来農地用のプログラムで比較的傾斜が緩い地域を分析対象として想定していることに起因するものと推察された。

③についても、②と同様に、SWATモデルが元々農地用のプログラムであることに起因すると考えられる。すなわち、SWATモデルでは土壌中での貯留時間が加味されておらず、単に流出の経路だけをとらえて、土壌層内から河川へ流出する流れを側方流、土壌層を透過し不飽和層を通過したのちに河川に復帰する水の流れを地下水と定義している。しかしながら、特に森林においては、側方流に比べて地下水の流出速度は遅い。

②及び③を踏まえて、以降のキャリブレーションを進めることとした。

2) 貝沢モデルにおけるパラメータ検証（PS1～PS5）

水収支のキャリブレーション方針として、次の2つの方針を定めた。

方針A：側方流の割合を減らすことで土壌層以下への浸透量を増加させる。

方針B：側方流の流出を遅延させることで地下水量を増加させる。

【方針Aに基づく検証】

側方流量の算出方法は以下の式で表される。

$$Q_{lat} = 0.024 \cdot \left(\frac{SW_{ly,excess} \cdot K_{sat} \cdot slp}{\phi_d \cdot L_{hill}} \right) \quad \dots (1)$$

$$SW_{ly,excess} = \frac{1000 \cdot H_0 \cdot \phi_d \cdot L_{hill}}{2} \quad \dots (2)$$

ここで、(1)に(2)を代入すると、

$$Q_{lat} = 12 \cdot H_0 \cdot K_{sat} \cdot slp \quad \dots (3)$$

Q_{lat} : 側方流量
 $SW_{ly,excess}$: 斜面飽和層の排水可能量(単位面積当たり)
 K_{sat} : 飽和透水係数
 slp : 支流域の平均斜面勾配 (DEM から自動算出)
 ϕ_a : 間隙率
 L_{hill} : 傾斜長 (DEM から自動算出)
 H_0 : 飽和土壌の厚さ

式(3)から側方流量は、飽和透水係数 (K_{sat}) 及び支流域の平均斜面勾配 (slp)、飽和土壌の厚さ (H_0) から決定されることが分かる。このため、側方流量を減らす方法として、以下の 3 つの検証を行った。なお、飽和透水係数及び支流域の平均斜面勾配はそれぞれ、SOL_K 及び HRU_SLP というパラメータとして設定できる。

- 検証 1 : 飽和透水係数の調整 (PS1)
- 検証 2 : 斜面勾配の調整 (PS2)
- 検証 3 : 飽和透水係数及び斜面勾配の調整 (PS3)

【方針Bに基づく検証】

SWAT モデルでは、図 4-30 に示すように、側方流の流出に要する日数に応じて流路への流出の割合が決定される。

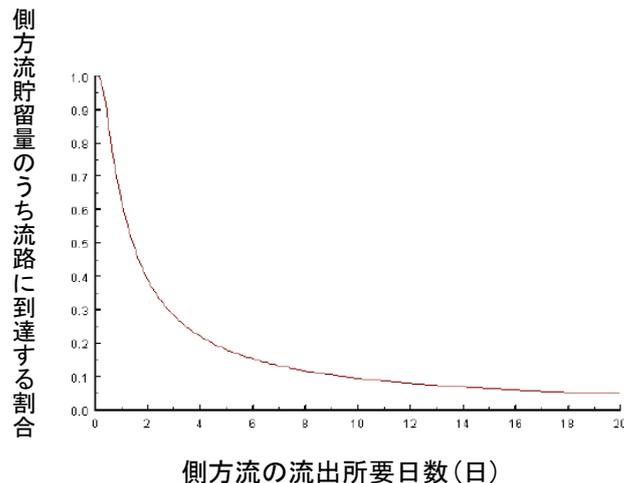


図 4-30 側方流の流出所要日数に応じた流路への流出割合

側方流の流出に要する時間は以下の式で表される。

$$TT_{lag} = 10.4 \frac{L_{hill}}{K_{sat, mx}} \quad \dots (4)$$

TT_{lag} : 側方流の流出所要日数(日)
 $K_{sat, mx}$: 最大の飽和透水係数
 L_{hill} : 傾斜長

側方流量を決定する因子として、最大飽和透水係数 ($K_{sat, mx}$)、傾斜長 (L_{hill}) があり、それぞれ SOL_K、SLSUBBSN というパラメータとして設定できる。初期値では、最大の飽和透水係数は各土壌層に設定された範囲の最大値が、傾斜長は DEM から計算された値が適用されている。また、上記式によらず、側方流の流出所要日数を LAT_TTIME というパラメータとして直接決定することもできる。

以上より、側方流の流出所要日数に関する検証を行うこととする。

<ul style="list-style-type: none">• 検証4 : 側方流の流出所要日数の調整 (PS4)

また、現実の土壌は土壌層と岩盤層は連続しており、SWAT モデルで定義されているように正確に分けることはできない。従って、土壌層を厚くすることによって見かけ上の側方流量のうちの正味の地下水量の割合を増やす検証も行う。

<ul style="list-style-type: none">• 検証5 : 土壌厚の変更及び側方流の流出所要日数の調節 (PS5)

前項 (表 4-20) で、全流域共通で平水時の流出量が実測値よりも過少となった点について改善を図るため、まずは貝沢モデルでパラメータの検証を行った。各検証段階におけるパラメータセット (PS1~PS5) の一覧を表 4-21 に示す。

表 4-21 貝沢モデルの各検証で用いたパラメータセット (PS1~PS5) 一覧

パラメータ	説明	キャリブレーション前	キャリブレーション結果				
		PS0	PS1	PS2	PS3	PS4	PS5
SOL_K	飽和透水係数(mm/hr)第1・2層	2.58~991.48	36.00				
	飽和透水係数(mm/hr)第3層	(土壌別・層別)	3.60	36.00	36.00	36.00	36.00
SOL_Z	土層厚(m)第3層	0.46~1.68	変更なし				8.68~9.46
SOL_BD	仮比重(g/cm ³)	1.30~0.54(土壌別・層別)	0.60~0.77				
HRU_SLP	斜面の平均傾斜勾配	DEMより自動計算	変更なし	0.40倍	0.38倍	変更なし	変更なし
SLSUBBSN	斜面の平均長(m)	DEMより自動計算	変更なし	変更なし	1.07倍	変更なし	変更なし
LAT_TTIME	側方流移動日数(日)	$10.4 \times \text{SLSUBBSN} / \text{SOL_K_max}$	変更なし	変更なし	変更なし	7.00	20.00
ALPHA_BF	降水がない期間の地下水流出度合の指標	0.66	0.05				
GWQMN	浅層帯水層の水深(mmH ₂ O)	215	200	200	1000	1000	200
RCHG_DP	土壌層を通過した水のうち地下浸透する水の割合	0.52	0.40				
GW_DELAY	地下水の遅延(日)	1.7	175.50				
CH_K2	河床における実効透水係数(mm/hr)	116.35	100.00				

なお、PS0 と PS1 の間でパラメータ値に差異があるのは、パラメータ検証（PS1~PS6）の前段階において、キャリブレーション方針の検討も兼ね、まずは、貝沢モデルの水収支とハイドログラフ（図 4-29 中の「精度検証①水収支」、「精度検証②ハイドログラフ」に相当）の精度検証及びパラメータ調整によって一定程度、精緻化を進めた上で、その成果をベースとして検証を進めたことによるものである。

次に、各パラメータセットの適用結果を表 4-22 に示す。

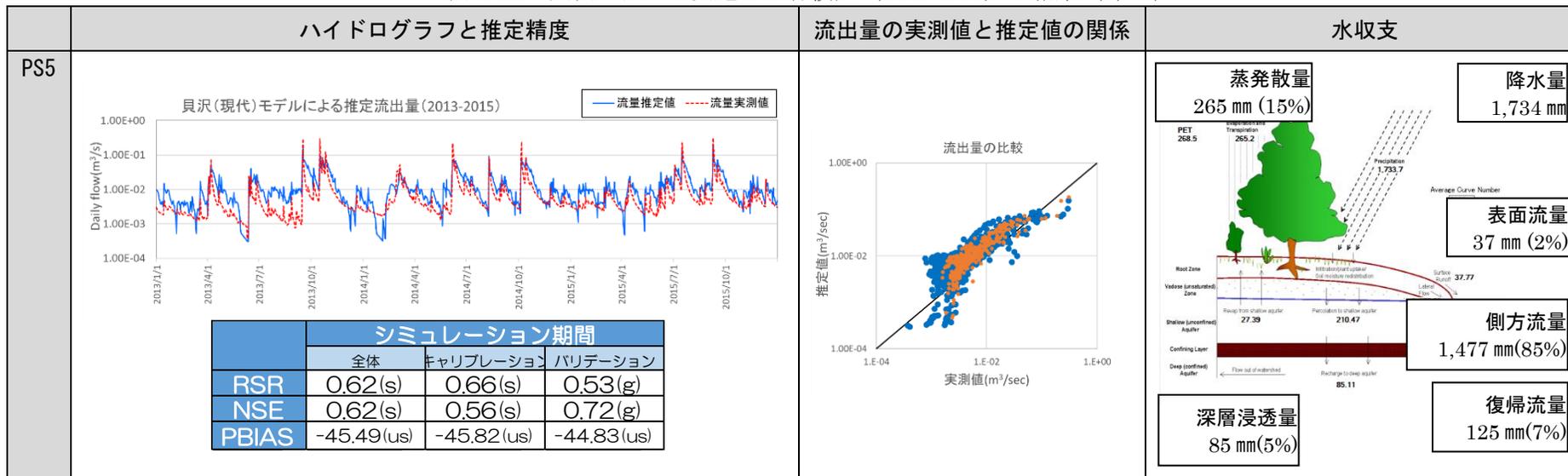
表 4-22 貝沢モデルで実施した各検証 (PS1~PS5) の結果 (1/3)

	ハイドログラフと推定精度	流出量の実測値と推定値の関係	水収支																				
PS1	<p>貝沢(現代)モデルによる推定流出量(2013-2015)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">シミュレーション期間</th> </tr> <tr> <th></th> <th>全体</th> <th>キャリブレーション</th> <th>バリデーション</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>RSR</td> <td>0.4(vg)</td> <td>0.43(vg)</td> <td>0.33(vg)</td> </tr> <tr> <td>NSE</td> <td>0.84(vg)</td> <td>0.81(vg)</td> <td>0.89(vg)</td> </tr> <tr> <td>PBIAS</td> <td>-29.55(us)</td> <td>-29.14(us)</td> <td>-30.36(us)</td> </tr> </tbody> </table>	シミュレーション期間					全体	キャリブレーション	バリデーション	RSR	0.4(vg)	0.43(vg)	0.33(vg)	NSE	0.84(vg)	0.81(vg)	0.89(vg)	PBIAS	-29.55(us)	-29.14(us)	-30.36(us)	<p>流出量の比較</p>	<p>蒸発散量 265 mm (15%)</p> <p>降水量 1,734 mm</p> <p>表面流量 52 mm (3%)</p> <p>側方流量 1,008 mm (58%)</p> <p>深層浸透量 659 mm (38%)</p> <p>復帰流量 266 mm (15%)</p>
シミュレーション期間																							
	全体	キャリブレーション	バリデーション																				
RSR	0.4(vg)	0.43(vg)	0.33(vg)																				
NSE	0.84(vg)	0.81(vg)	0.89(vg)																				
PBIAS	-29.55(us)	-29.14(us)	-30.36(us)																				
PS2	<p>貝沢(現代)モデルによる推定流出量(2013-2015)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">シミュレーション期間</th> </tr> <tr> <th></th> <th>全体</th> <th>キャリブレーション</th> <th>バリデーション</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>RSR</td> <td>0.45(vg)</td> <td>0.48(vg)</td> <td>0.37(vg)</td> </tr> <tr> <td>NSE</td> <td>0.8(vg)</td> <td>0.77(vg)</td> <td>0.86(vg)</td> </tr> <tr> <td>PBIAS</td> <td>-21.17(s)</td> <td>-20.8(s)</td> <td>-21.9(s)</td> </tr> </tbody> </table>	シミュレーション期間					全体	キャリブレーション	バリデーション	RSR	0.45(vg)	0.48(vg)	0.37(vg)	NSE	0.8(vg)	0.77(vg)	0.86(vg)	PBIAS	-21.17(s)	-20.8(s)	-21.9(s)	<p>流出量の比較</p>	<p>蒸発散量 265 mm (15%)</p> <p>降水量 1,734 mm</p> <p>表面流量 33 mm (2%)</p> <p>側方流量 853 mm (49%)</p> <p>深層浸透量 335 mm (20%)</p> <p>復帰流量 493 mm (28%)</p>
シミュレーション期間																							
	全体	キャリブレーション	バリデーション																				
RSR	0.45(vg)	0.48(vg)	0.37(vg)																				
NSE	0.8(vg)	0.77(vg)	0.86(vg)																				
PBIAS	-21.17(s)	-20.8(s)	-21.9(s)																				

表 4-22 貝沢モデルで実施した各検証 (PS1~PS5) の結果 (2/3)

	ハイドログラフと推定精度	流出量の実測値と推定値の関係	水収支																			
PS3	<p>貝沢(現代)モデルによる推定流出量(2013-2015)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2"></th> <th colspan="3">シミュレーション期間</th> </tr> <tr> <th>全体</th> <th>キャリブレーション</th> <th>バリデーション</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>RSR</td> <td>0.46(vg)</td> <td>0.49(vg)</td> <td>0.38(vg)</td> </tr> <tr> <td>NSE</td> <td>0.79(g)</td> <td>0.76(g)</td> <td>0.85(vg)</td> </tr> <tr> <td>PBIAS</td> <td>-16.53(s)</td> <td>-16.00(s)</td> <td>-17.57(s)</td> </tr> </tbody> </table>		シミュレーション期間			全体	キャリブレーション	バリデーション	RSR	0.46(vg)	0.49(vg)	0.38(vg)	NSE	0.79(g)	0.76(g)	0.85(vg)	PBIAS	-16.53(s)	-16.00(s)	-17.57(s)	<p>流出量の比較</p>	<p>蒸発散量 265 mm (15%)</p> <p>降水量 1,734 mm</p> <p>表面流量 33 mm (2%)</p> <p>側方流量 824 mm (48%)</p> <p>深層浸透量 347 mm (20%)</p> <p>復帰流量 482 mm (28%)</p>
	シミュレーション期間																					
	全体	キャリブレーション	バリデーション																			
RSR	0.46(vg)	0.49(vg)	0.38(vg)																			
NSE	0.79(g)	0.76(g)	0.85(vg)																			
PBIAS	-16.53(s)	-16.00(s)	-17.57(s)																			
PS4	<p>貝沢(現代)モデルによる推定流出量(2013-2015)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2"></th> <th colspan="3">シミュレーション期間</th> </tr> <tr> <th>全体</th> <th>キャリブレーション</th> <th>バリデーション</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>RSR</td> <td>0.55(g)</td> <td>0.59(g)</td> <td>0.48(vg)</td> </tr> <tr> <td>NSE</td> <td>0.69(s)</td> <td>0.65(s)</td> <td>0.77(g)</td> </tr> <tr> <td>PBIAS</td> <td>-30.31(us)</td> <td>-30.16(us)</td> <td>-30.61(us)</td> </tr> </tbody> </table>		シミュレーション期間			全体	キャリブレーション	バリデーション	RSR	0.55(g)	0.59(g)	0.48(vg)	NSE	0.69(s)	0.65(s)	0.77(g)	PBIAS	-30.31(us)	-30.16(us)	-30.61(us)	<p>流出量の比較</p>	<p>蒸発散量 265 mm (15%)</p> <p>降水量 1,734 mm</p> <p>表面流量 32 mm (2%)</p> <p>側方流量 1,127 mm (65%)</p> <p>深層浸透量 227 mm (13%)</p> <p>復帰流量 334 mm (19%)</p>
	シミュレーション期間																					
	全体	キャリブレーション	バリデーション																			
RSR	0.55(g)	0.59(g)	0.48(vg)																			
NSE	0.69(s)	0.65(s)	0.77(g)																			
PBIAS	-30.31(us)	-30.16(us)	-30.61(us)																			

表 4-22 貝沢モデルで実施した各検証 (PS1~PS5) の結果 (3/3)



各パラメータセットのモデルの精度評価の結果（左欄の表）をみると、昨年度の結果では Unsatisfactory が多かった NSE 指標も今回は Satisfactory 以上となり、モデルの改善が図られた。

右欄の水収支については、PS1、PS2、PS3 の結果を、PS0 の結果と比較すると、飽和透水係数及び斜面勾配の調整によって、深層浸透量を増加させることができた。一方で、この調整を行うためのパラメータ数が少ないことが影響して、流出量の波形の調整が難しくなり、特に流出量が少ない期間での実測値と推定値の開きが大きくなった。一方で、逡減の傾きについては概ね一致が見られていることから、ある程度モデルの精度が確保されているととらえることもできる。このため、現在参照している評価指標に加えて、他の観点にも着目してモデルの精度を高められる可能性が示唆された。

最後に、流出量（ハイドログラフ）の当てはまり具合や、各評価指標の結果からは、PS4、PS5 よりも PS1、PS2、PS3 のパラメータセットの方が良い結果が得られたこと、また、複数のパラメータによる調整の方が、個々のパラメータの値の偏り（歪み）が小さく抑えられ、今後の更なる調整の幅も広がることから、PS3 を貝沢モデルの最終結果（令和3年度時点のベストパラメータ）とした。

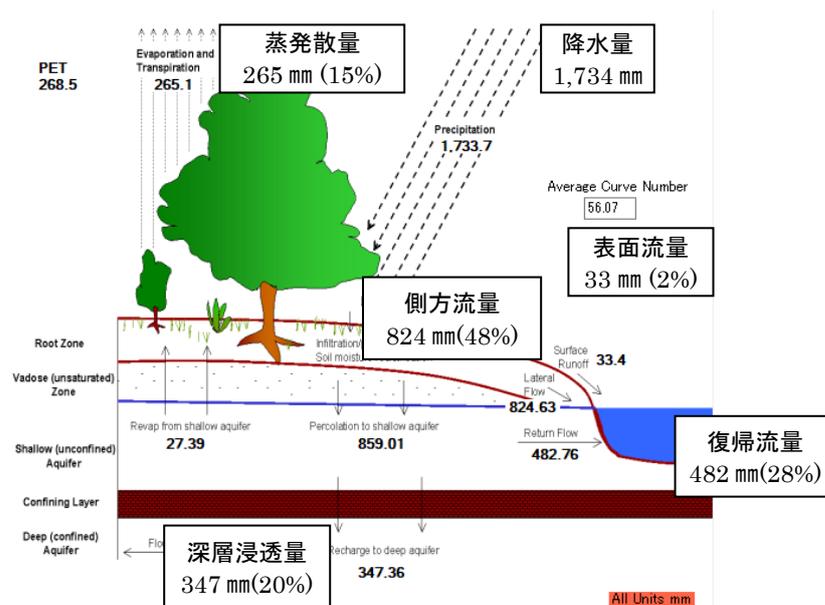


図 4-31 PS3（貝沢ベストパラメータ）を適用した結果の水収支（流域全体）

3) 貝沢ベストパラメータ（PS3）及び各広域モデル個別のベストパラメータ（PS6）適用後のシミュレーション結果

貝沢ベストパラメータ（PS3）（表 4-21）と、当該結果を利用して他のモデルで個別に調整した結果のベストパラメータ（PS6）を表 4-23 に、それらを各モデルに適用した結果を表 4-24 から表 4-26 に示す。

表 4-23 各広域モデルのベストパラメータセット (PS6)

パラメータ	説明	キャリブレーション前			PS6		
		道志現代	道志過去	三保現代	道志現代	道志過去	三保現代
SURLAG	表面流の流出遅延度合いの係数	1.19	1.19	1.19	2.15	2.15	変更なし
OV_N	地表面におけるマンニングの粗度係数 N	0.44	0.44	0.44	0.10	0.10	変更なし
CN2	カーブナンバー	25.00~92.00 (林相・土壌別)	25.00~92.00 (林相・土壌別)	25.00~83.00 (林相・土壌別)	26.25~96.61	26.25~96.61	変更なし
SOL_K	飽和透水係数 (mm/hr)	2.58~36 (土壌別・層別)	2.58~36 (土壌別・層別)	2.58~991.48 (土壌別・層別)	36.00 (一律)	36.00 (一律)	18.18 (一律)
SOL_BD	仮比重(g/cm ³)	0.462~1.5 (土壌別・層別)	0.462~1.5 (土壌別・層別)	1.30~0.54 (土壌別・層別)	変更なし	変更なし	0.26~0.84
SOL_AWC	植物の利用可能容水量 (mmH20/mm_soil)	0.032~0.352 (土壌別~層)	0.032~0.352 (土壌別~層)	0.03~0.32 (土壌別~層)	0.048~0.53	0.048~0.53	0.02~0.24
HRU_SLP	斜面の平均勾配 (※記載値は森林域)	DEM より自動計算	DEM より自動計算	DEM より自動計算	0.00~0.35	0.00~0.35	0.30 倍
SLSUBBSN	斜面の平均長(m)	DEM より自動計算	DEM より自動計算	DEM より自動計算	10.44~139.28	10.44~139.28	1.07 倍
LAT_TTIME	側方流移動日数(日)	0	0	10.4×SLSUBBSN/SOL_Kmax	5.10	5.10	0.38
GW_REVAP	浅層帯水層から土壌層への再蒸発係数	0.102	0.02/0.102 (森林以外/森林)	0.1	0.02	0.02	変更なし
REVAPMN	浅層帯水層から不飽和層及び深層帯水層への浸透がおこる閾値	486.5	750/486.5 (森林以外/森林)	486.5	597.50	597.50	変更なし
ALPHA_BF	降水がない期間の地下水流出度合の指標	0.655	0.048/0.655 (森林以外/森林)	0.66	1.00	1.00	変更なし
GWQMN	浅層帯水層の水深 (mmH20)	215	1000/215 (森林以外/森林)	215	148.25	148.25	変更なし
RCHRG_DP	土壌層を通過した水のうち地下浸透する水の割合	0.516	0.05/0.516 (森林以外/森林)	0.52	0.27	0.27	0.15
GW_DELAY	地下水の遅延(日)	1.7	31/1.7 (森林以外/森林)	1.7	222.50	222.50	84.15
CH_K2	河床における実行透水係数(mm/hr)	116.35	0.19	116.35	0.37	0.37	1.00
CH_N2	水路の流れに対するマンニングの粗度係数 N	0.202	0.202	0.2	0.25	0.25	変更なし

表 4-24 道志・現代モデルに貝沢ベストパラメータ (PS3) と道志・現代ベストパラメータ (PS6) を適用した結果

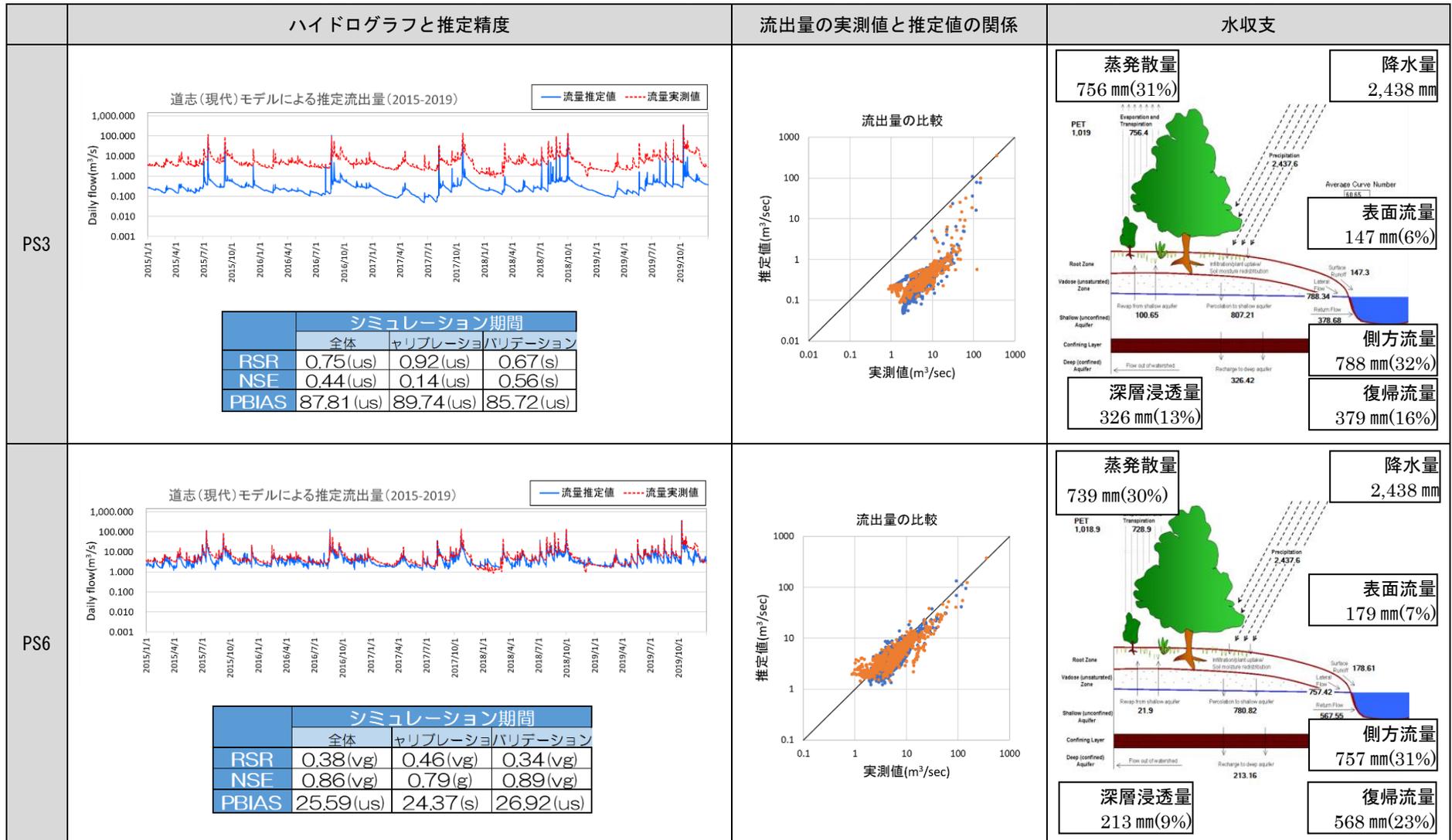


表 4-25 道志・過去モデルに貝沢ベストパラメータ (PS3) と道志・過去ベストパラメータ (PS6) を適用した結果

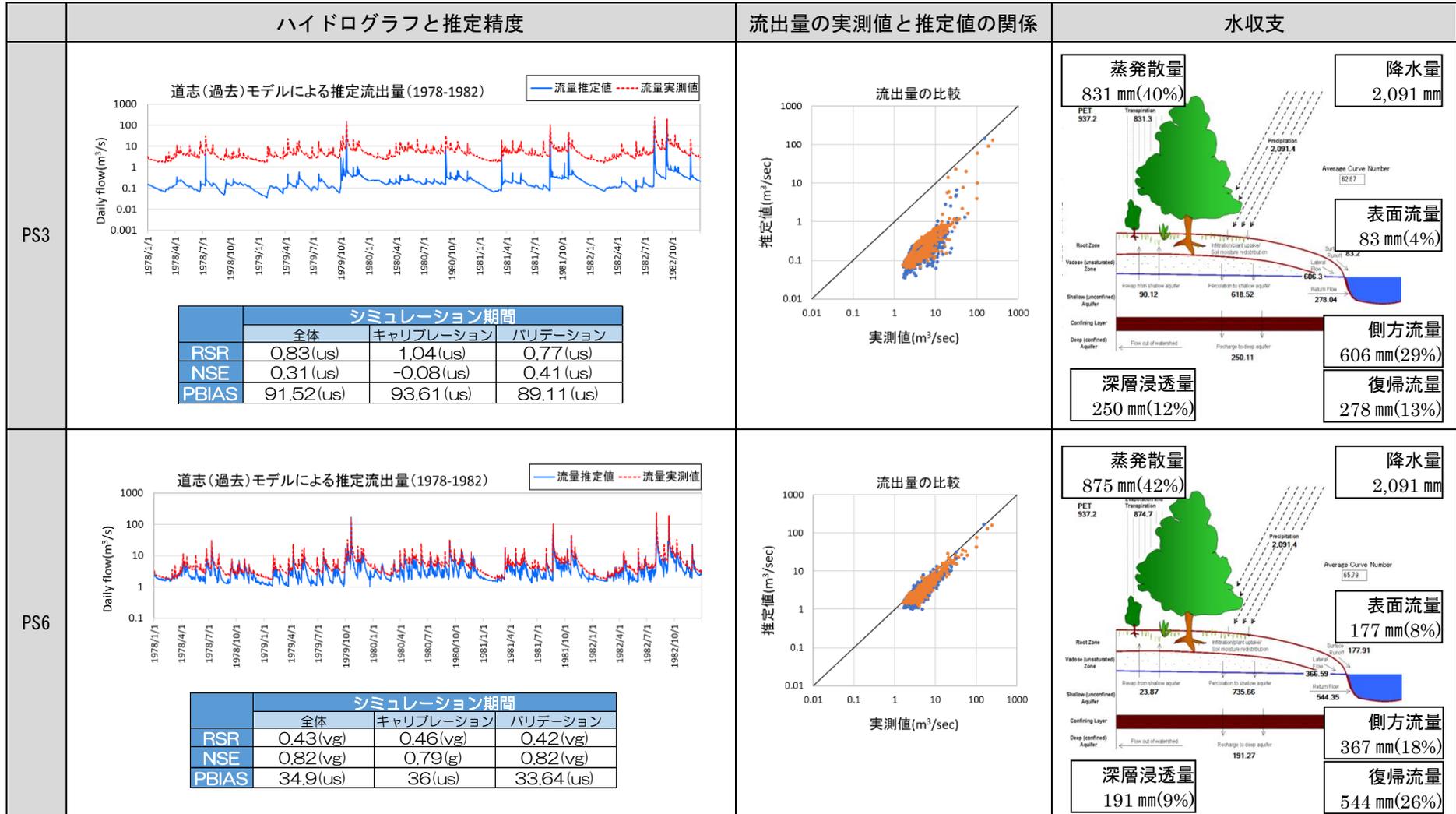
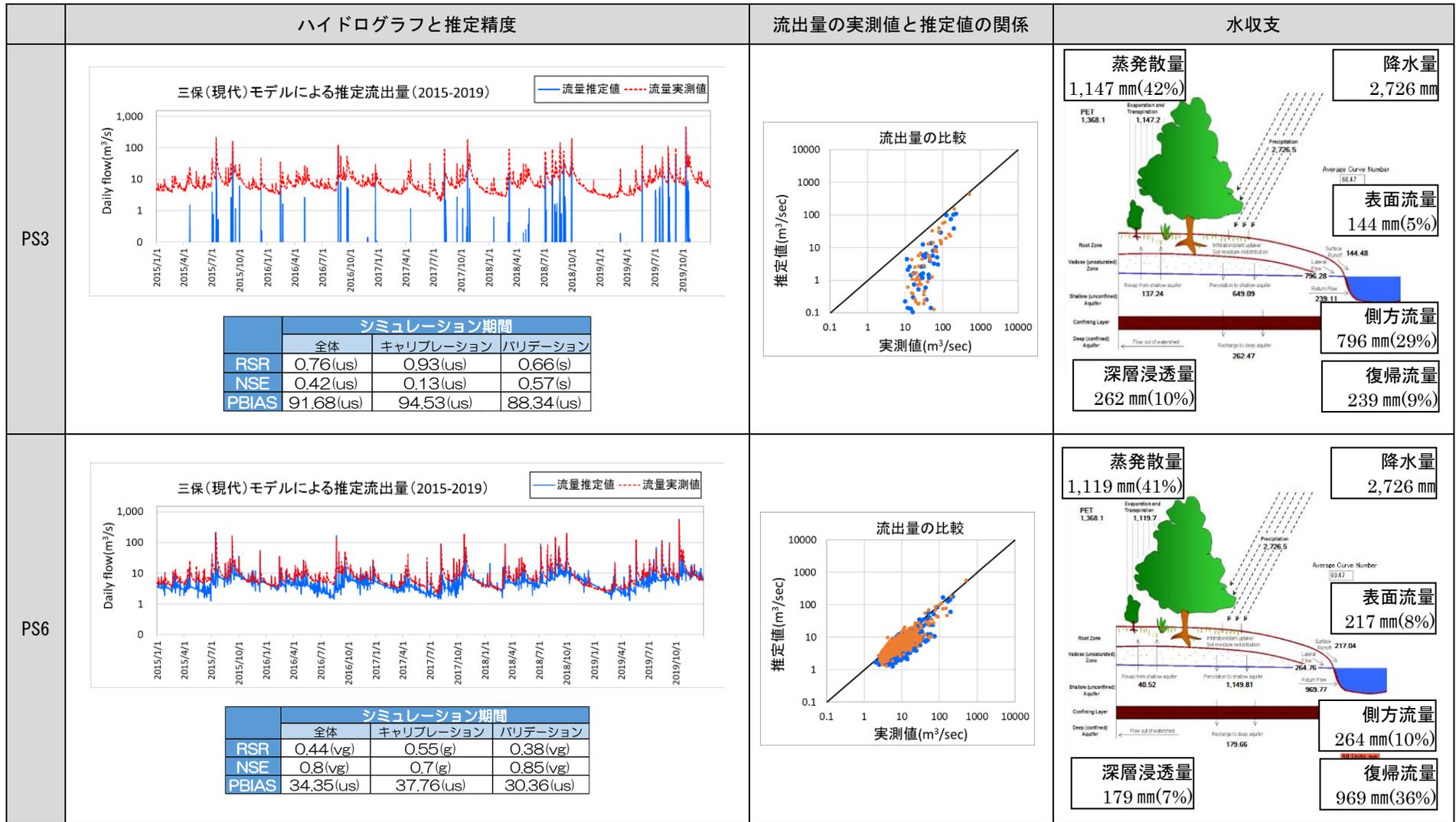


表 4-26 三保・現代モデルに貝沢ベストパラメータ (PS3) と三保・現代ベストパラメータ (PS6) を適用した結果



4) まとめ

新たに調整・作成した林相区分図により、貝沢、道志・現代、道志・過去、三保・現代の4つのモデルを構築した。これらのモデルについて、それぞれベストパラメータを適用した最終的なシミュレーション結果は表4-27のとおりである。

表4-27 令和3年度に構築・精緻化したモデルによる推定結果（水収支）

項目/モデル		貝沢	道志・現代	道志・過去	三保・現代
ハイドログラフ		推定値が実測値に近づいた			
		平水時で やや過剰推定	平水時でやや過少推定		
推定精度	NSE、RSR	very good			
	PBIAS	good	us		
水収支	降水量	1,734 mm	2,438 mm	2,091 mm	2,726 mm
	蒸発散 (蒸発散量/降水量 %)	265 mm (約 15%) 過少	756 mm (約 31%)	831 mm (約 40%) 過大	1,147 mm (約 42%) 過大
	表面流	33 mm	147 mm	83 mm	144 mm
	側方流	824 mm	788 mm	606 mm	796 mm
	復帰流量	482 mm	379 mm	278 mm	239 mm
	深層浸透	347 mm	326 mm	250 mm	262 mm

※各流出量の単位：mm/年

水収支のうち、蒸発散量については、道志・現代モデルにおいては一般的な割合といわれる20～30%の範囲に収まったのに対し、貝沢モデルでは15%程度と低く、道志・過去モデル及び三保・現代モデルでは40%程度と高い結果となった。

次に、各モデルのシミュレーション開始年の1年間の、最下流地点における河川流量実測値と推定値について、モデル推定程度とともに表4-28に示す。

表4-28 令和3年度に構築・精緻化したモデルによる推定結果（河川流量）

モデル		貝沢		道志・現代		道志・過去		三保・現代	
年		2013年		2014年		1978年		2015年	
実測値/推定値		実測	モデル	実測	モデル	実測	モデル	実測	モデル
推定精度	NSE、RSR		very good		very good		very good		very good
	PBIAS		good		unsatisfactory		unsatisfactory		unsatisfactory
降水量 (mm)		1,733		2,438		2,091		2,727	
河川流量 (mm)		758	890	1,953	1,417	1,047	719	2,156	1,368
流出率		0.43	0.51	0.80	0.58	0.50	0.34	0.79	0.50

※各流出量の単位：mm/年

令和3年度に精緻化を進めた貝沢モデルや道志・現代モデルの河川流量の推定結果は、昨年度よりも推定精度が向上し、精緻化が進んだ。ただし、全体のバランスを評価するPBIASについては、道志モデル（現代・過去）、三保・現代モデルは依然としてUnsatisfactory (us)

であり、引き続き、平水時の河川流量の推定について見直しを図る必要がある。

(3) 考察

SWAT の蒸発散計算プログラムには課題があり、プログラム改良に取り組んでいるのは後述のとおりであるが、同じ広域モデルである道志・現代モデルではある程度妥当性のある量が推定されているのに対し、三保・現代モデルでは 1,000 mm を超えるなど非現実的な値となっているのは、パラメータが根本的に適切に設定されていない可能性があり、今後の精査が必要である。

河川流量については、道志・現代、道志・過去、三保・現代の各モデルの年間河川流量の推定値は実測値との乖離があり、特に、三保・現代モデルにおいてその傾向が顕著であるのは、岩質（花崗岩）の影響の可能性も考えられるが、パラメータの再調整によりこの差を小さくすることが可能かどうか、引き続き検証が必要である。

側方流の計算には、キネマティックストレージモデル（Sloan and Moore, 1984）に基づき、SLSUBBSN（平均斜面長）、HRU_SLP（平均斜面勾配）、SOL_K（飽和透水係数）といったパラメータにより計算がなされている。傾斜のパラメータの影響が大きいことから、本来 SWAT モデルが開発された対象である農地ではなく、傾斜が急な森林地にこれを適用すると、側方流が過剰に計算されてしまうことが分かっている（図 4-32）。

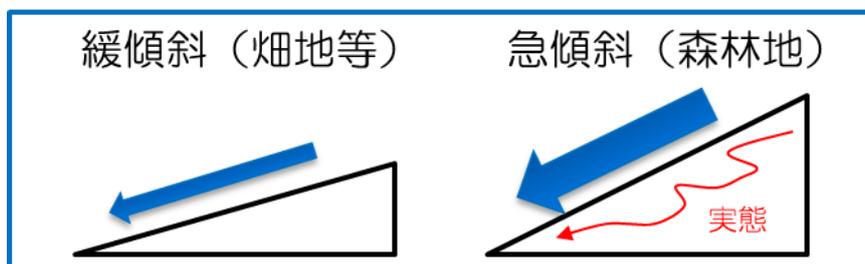


図 4-32 森林地で側方流量が過大になるイメージ

斜面長を長く斜面勾配を緩く調整すると側方流は抑えられるものの、現実とは異なる値に勾配を調整するため、その妥当性が問われる。しかしながら、実際の森林土壌は孔隙に富み、保水力が高く、水は土壌中の複雑な流路を時間をかけてゆっくり移動する（滞留時間が長い）（図 4-32 の赤字表記のイメージ）ことから、そのような水の挙動を反映させるために傾斜パラメータを調整することは、むしろ実態を反映させているとも言える（SWAT モデルのプログラムは、農地以外の土地やアメリカ以外の国の状況にも応じて改良されることを想定して公開されているものである。）。このため、今回調整したパラメータを活用しつつ、他のパラメータ調整による方法についても引き続き検討することが妥当な方法と考えられた。

このように、個々のパラメータ値の適正さに固執しすぎず、水文学的な解釈に基づくパラメータ調整により精度向上につなげていくことも、モデルを扱う上で重要なアプローチであると考えられた。

なお、道志・三保モデルなど、精緻化途中のモデルについては、傾斜パラメータの調整をす

に行っているものの、精度向上を目指してさらなる検証を行う必要がある。

4.3.8. 蒸発散量算出の検討

近年の研究成果¹⁷⁾においては、渇水対策の観点から、間伐等の施業により蒸発散量を抑制することで河川流量を微増させる可能性があることなど、蒸発散が水収支に大きな影響を与える水文プロセスであるとの認識がされている一方で、林相毎の蒸発散量の違い等、その特性については十分な把握がなされていない。

また、SWAT モデルでの蒸発散量の計算方法には 3 種類あり、本事業では植物生理学のプロセスを付加した計算方法であるペンマン・モンティース法 (Monteith, 1965) を選択して、蒸発散量を「LAI¹⁸⁾/最大 LAI (BLAI)」の比として計算を行っている。しかしながら、本計算式は穀物畑を想定したものであるため、以下の点について森林の実態を反映していない。

- 最大樹冠貯留量(canmax) のパラメータの設定が可能だが、時間単位のシミュレーションには反映されない。
- 森林水文学における一般的な知見である「降水量に対して 20%程度の樹冠遮断損失が生じている」ことについても反映されていない。
- 林床面蒸発散が考慮されていない。

このため、パラメータ調整のみで蒸発散量を改善することは困難とみられたことから、日本の森林に適合するプログラムに改良することが望ましいと考えられた (2.4. (2) 参照)。

このため、まずは既存文献のレビューを通して森林蒸発散推計モデルを構築した上で、現地調査により上層木の蒸散量や林床面蒸発散量の計測を実施し、林相の違いや季節変化がもたらす蒸発散への影響の把握や SWAT モデルの蒸発散プログラム改良に向けた検討を行った。なお、改良に当たっては、検討委員である東京農工大学の白木克繁准教授と、SWAT モデルに関する技術アドバイザーを務める岐阜大学の西健夫准教授の協力を得た。

(1) 手法

1) 森林蒸発散モデルの構造の検討

森林蒸発散 (ET) モデルの構築に当たり、既存のモデル(Shuttleworth and Calder, 1979; Sawano et al., 2015)や蒸発散のプロセス(Stoy et al., 2019)を踏まえて、蒸発散量を降水時の蒸発 (主に遮断損失) と無降水時の蒸発 (主に気孔を通じた蒸散と林床面蒸発散。ここでは、蒸散も「蒸発」の中に入れて整理する。) の 2 つに分類した。この考え方を式にすると以下のとおりとなる。

$$ET = E_{\text{wet}} + E_{\text{dry}} \quad (4.1)$$

¹⁷⁾ 恩田、五味 (2021) 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

¹⁸⁾ LAI : Leaf Area Index (葉面積指数)

ここで、 ET は蒸発散量の合計、 E_{wet} は降水時の蒸発量(mm)、 E_{dry} は 無降水時の蒸発量(mm) である。

なお、特に E_{wet} に係るプロセスは、十分な解明がなされておらず (Van Dijk et al., 2015)、また、熱収支に基づく ET モデル (Penman-Monteith 式など) は、しばしばそれを過小評価する (Schellekens et al., 1999)傾向があることにも留意して、以降では、2つの要素を個別に取り扱ってモデルを構築した。

さらに、林床面蒸発散はこれらとは別にモデルの構築を行った。

2) 降水時蒸発量 (E_{wet}) の推定モデルの構築

E_{wet} は降水量に対する割合として扱った方が、林分構造との関係を把握しやすいとの研究結果 (Komatsu et al., 2008)を踏まえ、以下の式で表現することとした。

$$E_{wet} = E_{wet}^* \times P \quad (4.2)$$

ここで E_{wet} は降水時蒸発量(mm)、 E_{wet}^* は E_{wet} の降水量に対する割合、 P は降水量(mm)である。

E_{wet}^* を推定するために、SWAT モデルでの反映条件も踏まえて、以下に留意して関連する文献・データを収集した。

1. 降雨の測定期間が 3 ヶ月以上の研究 (1 ヶ月などの短い時間スケールでの少量の降雨と、1 ヶ月などの長い時間スケールでの降雨とでは、 E_{wet} の値が大きく異なる可能性があるため (Komatsu et al., 2015))
2. 降雪時の E_{wet} については積雪深が最大またはそれ以前 (つまり融雪期以前) の森林内外の積雪水量の差とした(Nakai et al., 1993; Faria et al., 2000; Lundberg and Halldin, 2001)
3. 間伐などの森林施業直後 (1 年以内) のデータは除外した。
4. 海外研究は温帯林と北方林に由来するものに限定した。

3) 無降水時蒸発量 (E_{dry}) 推定モデルの構築

これまでの研究(McNaughton and Black, 1973; Jarvis and McNaughton, 1986)から、 E_{dry} (mm/s) は、簡略化された以下の Penman-Monteith 方程式を使用して推定されることが知られている。

$$E_{dry} = \frac{\rho C_p G_s D}{\gamma \lambda} \quad (4.3)$$

ここで ρ は空気の密度 (kg^3/m)、 C_p は空気の比熱 (1 g の物質の温度を 1 度上げるのに必要な熱量) ($J / (kg \cdot ^\circ C)$)、 G_s は表面コンダクタンス (気孔からの物質の通過のしやすさ) (m/s)、

Dは大気飽差（吸収可能な水蒸気の程度）（kPa）、 γ は乾湿計定数（ある条件下で湿球表面において蒸発で失われる熱量に係る係数）（kPa/°C）、 λ は水の気化潜熱（気化時に周囲から吸収する熱量）（J/kg）である。この式は E_{dry} は風速の影響をほとんど受けず、日射の影響は G_s と D を通して E_{dry} に反映されると仮定している (McNaughton and Black, 1973)。森林での測定が困難な風速を必要としないため、関連研究で多用されている (e.g. Sato et al., 2018)。

この式において、 G_s は気孔の開閉などの植生からの蒸散の生物学的な制御の程度を表しており (Kelliher et al., 1993; Komatsu, 2003)、その基準値 (G_{sref} 。D=1.0kPa の時の G_s) と (Oren et al., 1999)、 G_s の気象要因に対する反応を表す式で定式化ができる (Jarvis, 1976; Komatsu et al., 2014):

$$G_s = G_{sref} \cdot f(D) \cdot g(R) \cdot h(T_d) \quad (4.4)$$

ここで $f(D)$ 、 $g(R)$ 及び $h(T_d)$ は、それぞれ、日中の平均大気飽差(D)、日中の平均日射量(R)、日中平均気温 (T_d) の応答を表す関数である。

4.3 式及び 4.4 式を踏まえると、 E_{dry} は G_s を決定することで算出され、また、 G_s は G_{sref} とこれらの気象関数を決定することで算出される。気象に係る関数 $f(D)$ 、 $g(R)$ 、 $h(T_d)$ は、それぞれ以下の式でモデル化されている。(Oren et al., 1999; Granier et al., 2000; Nagler et al., 2005; Komatsu et al., 2014):

$$f(D) = 1.00 - \alpha \cdot \ln(D) \quad (4.5)$$

$$g(R) = \left(\frac{R}{\beta_1}\right)^{\beta_2} \quad (4.6)$$

$$h(T_d) = \frac{\gamma_1}{1 + \gamma_2 \cdot \exp(-\gamma_3 T_d)} \quad (4.7)$$

ここで α 、 β_1 、 β_2 、 γ_1 、 γ_2 と γ_3 はパラメータである。パラメータの決定方法は後述する。

G_s を推定するモデルを構築するための方法としては、様々な実測データから、 G_s と $f(D)$ 、 $g(R)$ 、 $h(T_d)$ に関するデータを抽出し、4.4 式に代入することで、 G_{sref} の値を推測する。

具体的には、まず、FLUXNET データベース (<https://fluxnet.org/>) と AsiaFlux データベース (<http://asiaflux.net/>) から、森林におけるデータを収集した。モデル化のためのデータセットとしては 35 サイトが選択され、各サイトで 1~3 年分を使用した。10 年以上のデータが蓄積しているセットもあったが、一部のセットのみが計算結果に強い影響を及ぼすことを回避するため、1 サイトから使用するデータは 3 年分を上限とした。また、無降水時の蒸発散量を求める観点から、日単位データのうち降水日のデータは除外した。

次に、各データセットから G_s (m/s) を算出した。具体的には (簡略化されていない) Penman-Monteith 式を次式のとおり変形した (Penman, 1948; Monteith, 1965):

$$G_s = \frac{\lambda E \gamma G_a}{\Delta(R_n - G) + \rho C_p G_a D - \lambda E(\Delta + \gamma)} \quad (4.8)$$

ここで λE は潜熱フラックス（潜熱の移動量）（ W^2/m ）、 G_a は空気力学的コンダクタンス（植物と大気間での熱量等の移動しやすさ）（ m/s ）、 Δ は飽和水蒸気圧曲線（ある温度において空气中に存在可能な水蒸気量を圧力で示した曲線）の勾配（ $kPa/^\circ C$ ）、 R_n は純放射量（地表面での（太陽）エネルギーの吸収量と放射量の差）（ W^2/m ）、そして G は地中熱フラックス（ W^2/m ）である。 G_a は以下の式で算出した（Businger, 1956）:

$$G_a = \frac{k^2 u}{\left(\ln \frac{z-d}{z_0}\right)^2} \quad (4.9)$$

ここで k はフォン・カルマン定数（乱流流体の速度分布を表す係数）、 u はある高さにおける風速 $z(m/s)$ 、 z は風速の測定高さ (m)、 d は地面修正量（植物群落の存在によって変化する風速分布の高さを補正する係数）（ m ）であり z_0 は粗度長（風速分布に地表・群落の状態が影響を与える程度）（ m ）である。 k は過去の研究(Khatun et al., 2011)を参考に 0.4 とした。 d と z_0 は以下の式で算出した（Campbell and Norman, 2003）。

$$d = 0.65H \quad (4.10)$$

$$z_0 = 0.1H \quad (4.11)$$

ここで H は平均樹高 (m) である。これらにより、4.9 式、ひいては 4.8 式の G_a が算出される。また、4.8 式の Δ は、ボルトンの飽和水蒸気圧曲線（Bolton, 1980; 杉田, 2009）の導出関数に基づき、以下の式で算出される。

$$\Delta = \frac{abc}{(T+b)^2} \exp\left(\frac{aT}{T+b}\right) \quad (4.12)$$

ここで a 、 b 、 c はそれぞれ 17.67、243.5、6.112 の値となる。また、 T は気温 ($^\circ C$) である。以上の式・数値から、4.8 式の G_s を計算した上で 4.4 式から各データサイトの各年の G_{sref} を算出した。なお、ここでは森林の蒸発散が適切に反映されるよう、生育期（6 月～9 月）のデータを用いた。

各年の G_{sref} の算出に当たっては、 G_s と D との間の、以下の回帰式を用いた(Oren et al., 1999)。

$$G_s = -m \cdot \ln(D) + n \quad (4.13)$$

ここで m と n はパラメータであり、 G_{sref} は $D=1(\text{kPa})$ のときの G_s に相当するため、 n の値はすなわち G_{sref} を意味する。このように、簡略化された Penman-Monteith 方程式において G_{sref} は E_{dry} とは線形関係になる (Komatsu et al., 2014)。

以降は、降水時蒸発量 E_{wet} と同様に、関連する文献・データを収集した。

4) 林床面蒸発モデルの構築

森林からの蒸発散は、主に遮断蒸発、樹木蒸散及び林床面蒸発の3つに分けられるが、それぞれの割合は、10～50%、10～50%、3～20%と考えられており、林床面蒸発の占める割合は比較的低い。このような背景もあり、既往研究では、針葉樹人工林における遮断と蒸散を中心に研究が進んでいたが、林床面蒸発についての現地観測及びモデルでの推定に関する研究は少ない。

このため、本調査では、Penman-Monteith 式を参考として、現地観測のデータに基づいて針葉樹人工林に適用できる林床面蒸発モデルを構築することとした。モデルは気象に係る公開データ（降雨、気温、湿度、日射）と、森林簿や航空機レーザ計測から得られる森林情報（樹高、立木密度及び収量指数）から、日単位の林床面蒸発を計算することとし、以下の式で表した。

$$\text{林床面蒸発} = \frac{\Delta(0.75 \times 0.8 \times R_s I_r) + \gamma f(u) D}{(\Delta + \gamma) \lambda} \quad (4.14)$$

$$I_r = 0.723 R y^3 - 0.378 R y^2 - 1.331 R y + 1 \quad (4.15)$$

ここで、 Δ は飽和水蒸気圧曲線の勾配 ($\text{kPa}/^\circ\text{C}$)、 R_s は林外日射量($\text{MJ}/\text{m}^2\text{d}$)、 I_r は林内の相対照度、 γ は乾湿計定数 ($\text{kPa}/^\circ\text{C}$)、 $f(u)$ は風速の関数、 D は大気飽差(kPa)、 λ は水の気化潜熱 (J/kg)、そして Ry は収量比数である。

林内照度については、恩田・五味 (2021) での Ry からの推定式で算出した。また、林内の風速については、実測値の入手が困難ため、 $0.1\text{m}/\text{s}$ とした。

現地観測については、SWAT モデルの計算結果との比較・検証も行えるよう、貝沢試験流域で行った。

調査対象地の貝沢試験地(北緯 $35^\circ 37'$ 、東経 $139^\circ 10'$)は、相模川水系相模川上流、神奈川県相模原市緑区与瀬に位置している。試験地は源流域における隣接した3つの小流域(流域 1, 2, 3) とそれらを内包する流域 (流域 4) で構成されている (図 4-33)。

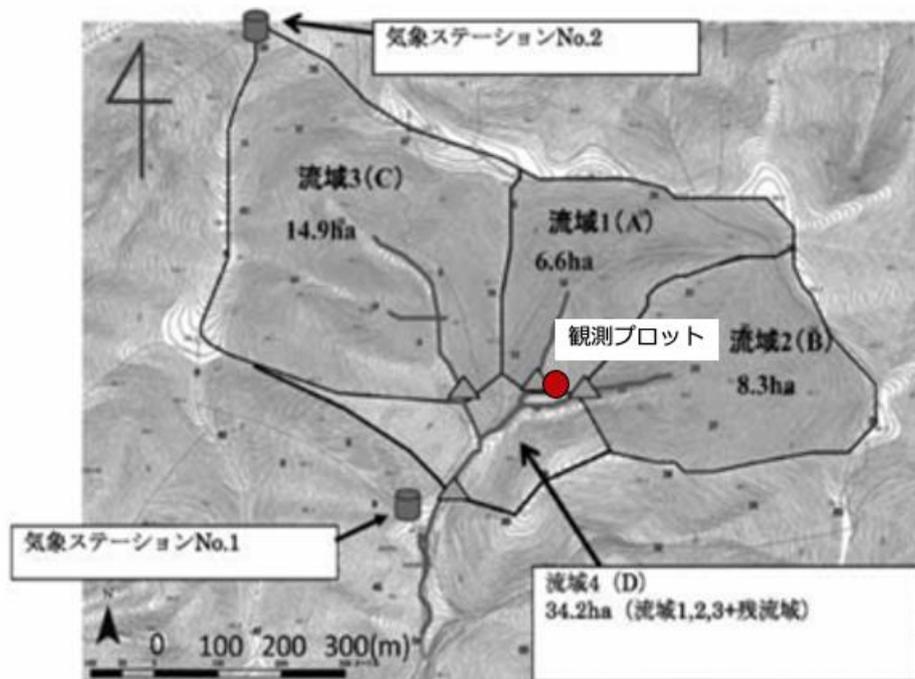


図 4-33 観測プロットの位置

流域 1 の面積は 6.65ha、流域 2 の面積は 8.53ha であり、標高は 363～556m である。流域内の小林班ごとに植栽年が異なるが、概ね 50 年生のスギ・ヒノキ人工林が流域の大半を占め、流域 1 と流域 2 境界尾根の一部はコナラ群落からなる二次林で構成されている。地質は、白亜紀から古第三系の小仏層群に分類され、基岩は堆積岩となっている。土壌は褐色森林土亜群であり、乾性褐色森林土と適潤性褐色森林土が分布している(白木ら 2020)。

試験地から南南東に約 2 km 離れた相模湖アメダスの 1981 年から 2010 年までの平均年降水量は 1,673.5 mm で、最も平均降水量の多い 8 月の降水量は 271.1 mm、最も平均降水量の少ない 12 月の降水量は 46.4 mm である。

観測プロットは貝沢試験流域の NO.1 量水堰横の西向き斜面での約 60 年生ヒノキ人工林を選定し、10m x 10m の区画とした(表 4-29)。

表 4-29 観測プロットの基本情報

樹種	ヒノキ
面積	10m x 10m
斜面方位	263°
傾斜	35°
立木密度	800 本/ha
平均胸高直径	38.8 cm
平均樹高	20.7 m

林床面蒸発量の計測は2020年12月末から行った。最大15kgまで計測できる秤量型ライシメータ(SB-15K10, A&D社)をプロット内に5台を設置して計測した(図4-34)。ライシメータの上に、それぞれ直径20cm、高さ30cmの植木鉢を設置した。ライシメータ5台のうち4台はプロット内の下層植生(シダ2箇所とアオキ2箇所)を入れ、1台は対照として土壌のみ入れた。なお、植木鉢の底からの土壌流出を防ぐため、最初に植木鉢の底に小石を入れ、その上に掘り出したプロット内の土壌を入れた。シダとアオキはプロット周辺で掘り出し、できる限り根とその周辺の土壌をそのまま植木鉢に入れた。

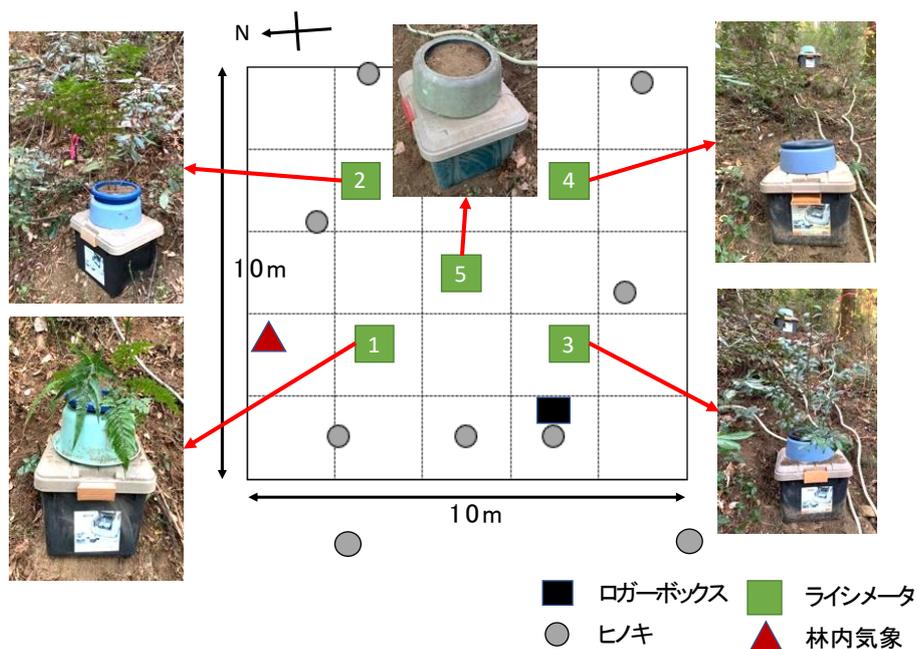


図 4-34 プロット内のライシメータの設置状況

植木鉢の重量はデータロガー(MIJ-01、日本環境計測株式会社)を用いて10分毎で計測した。林内の気象観測(雨量、気温、湿度、光合成有効日射)は、転倒ます型雨量計(1転倒雨量0.2mm; S-RGF-M002, Onset社)、温湿度計(S-THB-M002, Onset社)、光合成有効日射センサー(S-LIA-M003, Onset社)で計測し(図4-34)、10分間隔のデータをデータロガー(U30-NRC, Onset社)で記録した。

また、今後の参考として、単木の蒸散量も計測することとした。2020年12月に行った毎木調査の結果から、プロット内のヒノキ7本とプロット外のヒノキ2本を対象とし、2021年2月から樹液流の計測を行った(図4-35、図4-36)。



図 4-35 観測プロットの様子



図 4-36 作業の様子

樹液流の計測には、辺材の深度方向での変動があるため、直径 2cm、長さ 1cm 又は 2cm のグラニエセンサーを自作し、一对のセンサーを上下に約 15cm の間隔を開けて辺材部へ挿入することで行った。上方のセンサーにはヒーター線が内蔵されており、0.2W(2cm センサー)と 0.15W(1cm センサー)の一定の熱を与え、樹液流により生じた温度差から樹液流速を算出する。計測されたセンサー間の温度差をマルチプレクサー(AM16/32, Campbell Inc.)で秒間隔で計測し、10 分間の平均値をデータロガー(CR300, Campbell Scientific Inc.)で記録した。

辺材の幅の計測は、成長錐で地上高 1.3mの位置で1箇所サンプリングを行い、採取したコアの色の違いから辺材と心材の境界とみなして行った。樹液流速には樹幹の方向での変動を考慮して、ランダムな方向にセンサーを設置した。それぞれの深度での樹液流速を辺材部横断面積で積分することによって、単木蒸散量を算定した。対象とした立木は表 4-30 樹液流速の計測木の特性のとおり。

表 4-30 樹液流速の計測木の特性

NO	樹高(m)	胸高直径(cm)	辺材幅(cm)	計測深度(cm)
1	19.6	31.7	3.0	0-2, 2-3
2	19.8	34.6	3.2	0-2, 2-3
3	21.5	37.3	2.0	0-2
4	21.9	41.0	2.8	0-2, 2-3
5	19.7	43.1	3.2	0-2, 2-3
6	18.8	42.6	3.0	0-2, 2-3
7	22.5	35.1	2.1	0-2
8	20.3	43.5	2.1	0-2
9	21.8	40.5	3.2	0-2, 2-3

(2) 結果

1) 収集文献の概要

最終的に 65 報の論文を収集した。半数以上が日本や中国などの東アジアで実施された調査に基づいており、ドイツやフランスなどのヨーロッパで行われた研究が 17 件、北米（アメリカ、カナダ、メキシコ）で行われた研究が 6 件、中東（イラン）で行われた研究が 3 件と続いている。

収集された論文の大半は、降雨時について調査したものとなった（表 4-31）。降雨時の研究で 33 件が針葉樹林、34 件が着葉期の広葉樹林、10 件が落葉期の広葉樹林におけるものであった。降雪時の研究は、常緑針葉樹林で 10 件、落葉針葉樹林が 2 件、広葉樹林では 3 件であった。

表 4-31 収集文献の針広別・降水形態別内訳

	針葉樹		広葉樹	
	降雨時	降雪時	降雨時	降雪時
着葉期	33	8	34	
落葉期	-	2	10	3

2) 降水時蒸発量 (E_{wet}) に係る文献の整理結果

65 報の論文から E_{wet} 率 (E_{wet}^*) に関する 270 のデータを得た。このうち、193 件のデータが降雨、77 のデータが降雪時のデータである。降雨時のデータについては、*Chamaecyparis* (27 データ) と *Pinus* (12 データ) を主とする針葉樹林が 42% (82 データ)、*Quercus* (35 データ) や *Fagus* (31 データ) などの広葉樹林が 43% (83 データ)、そのほか、ミズナラ (10 データ)、ブナ (12 データ) が主体の落葉期の広葉樹林 (15%、28 データ) のデータがあった。

降雪時のデータでは *Picea* (20 データ)、*Abies* (14 データ)、*Pinus* (13 データ) からなる常緑針葉樹林のデータが 66% (51 データ)、落葉針葉樹林 (*Larix*) が 22% (17 データ) であり、*Betula* 属を主体とする落葉広葉樹林も 9 件 (5 データ) あった。

降雨時と降雪時の E_{wet}^* 比較したところ、針葉樹林では降雨時の E_{wet}^* (青丸) より降雪時の E_{wet}^* (灰丸、黄丸) の方が大きい値が多かった (図 4-37)。また、常緑針葉樹林の降雪時 E_{wet}^* (灰丸。0.20~0.53、平均 0.36 ± 0.08) は、立木密度と樹高が同じであれば降雨時 E_{wet}^* (青丸。0.08~0.32、平均 0.21 ± 0.06) に対して 2 倍程度大きく、落葉針葉樹林の降雪時 E_{wet}^* (黄丸。0.22~0.39、平均 0.30 ± 0.05) も降雨時の約 1.5 倍であった。

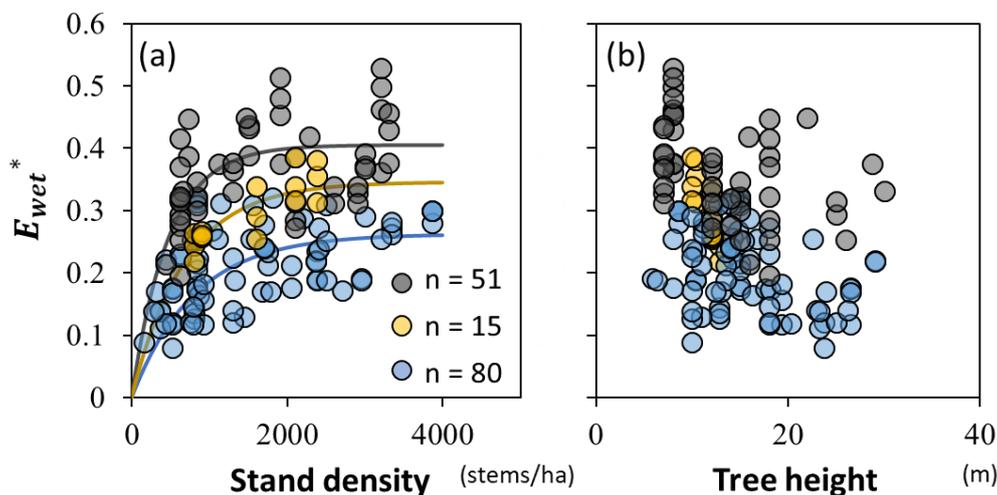


図 4-37 針葉樹林における降水時蒸発量 (E_{wet}^*) と (a) 立木密度 (Stand density)、(b) 樹高 (Tree height) の関係

青丸は降雨遮断、灰丸は常緑針葉樹林の降雪遮断、黄丸は落葉針葉樹林の降雪遮断。線は回帰曲線 (式 4.16)

一方、広葉樹林では降雪時 E_{wet}^* が降雨時よりも概して小さく、針葉樹林とは対照的だった (図 4-38)。広葉樹林の降雪時 E_{wet}^* (黒丸。0.01~0.13、平均 0.06 ± 0.04) は落葉期の降雨時

(黄丸。0.09~0.33、平均 0.22±1.04) の半分以下であった。一方、広葉樹林の着葉期の降水時 E_{wet}^* (緑丸。0.04~0.41、平均: 0.22±0.08) は落葉期の降水時 E_{wet}^* との間には有意差がなかった。

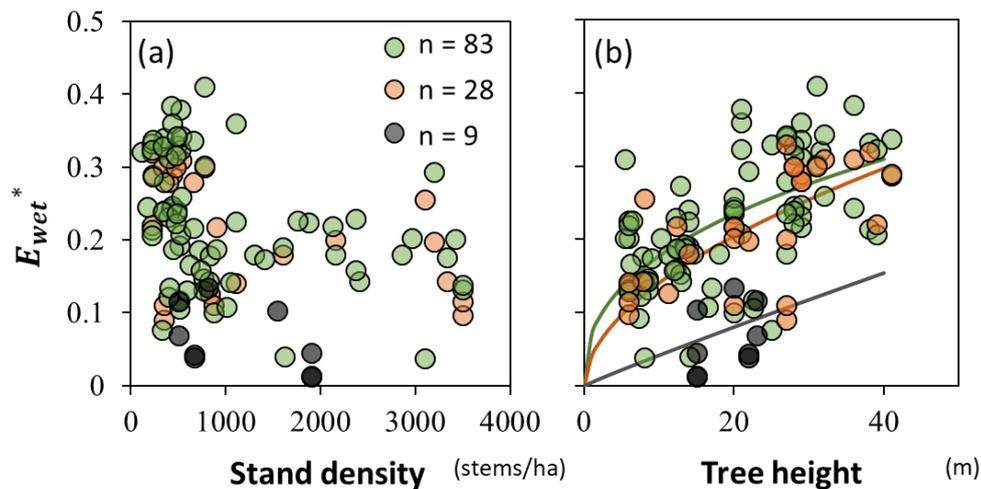


図 4-38 広葉樹林における降水時蒸発量 (E_{wet}^*) と (a) 林冠密度 (Stand density) 及び (b) 樹高 (Tree height) の関係

緑色の丸は着葉期の降雨遮断、黄色の丸は落葉期の降雨遮断、黒色の丸は降雪遮断。線は回帰曲線 (式 4.17)

また、測定期間が 2 年以上かつ各年のデータが提供されている研究から、年ごとの気象条件 E_{wet}^* と立木密度及び樹高との関係を把握するために、Spearman の順位相関を用いて相関分析を行った (Spearman, 1904)。より相関が強かったものに対して、最小二乗法による回帰分析を行い、 E_{wet}^* を推定するモデルを構築した。

この結果、 E_{wet}^* と立木密度や樹高との関係を見ると、針葉樹林では、降雨時と降雪時ともに立木密度間で正の相関が、樹高とは負の相関が見られた (図 4-37)。また、着葉・落葉、降雨・降雪のいずれにおいても、樹高よりも立木密度の方が相関係数が大きく、すべての相関は統計的に有意であった (p 値 < 0.01)。したがって、針葉樹林では樹高よりも立木密度の方が E_{wet}^* をよく説明できる可能性がある。

表 4-32 降水時蒸発と立木密度及び樹高の関係のスピアマンの順位相関係数

			立木密度	樹高
針葉樹林	着葉	降雨時	0.59**	-0.34**
		降雪時	0.48**	-0.41**
	落葉		0.81**	-0.80**
広葉樹林	着葉	降雨時	-0.37**	0.61**
		降雪時	-0.45	0.70**
	落葉		-0.49	0.49

(** p 値 < 0.01、* p 値 < 0.05)

一方、広葉樹林の E_{wet}^* は、降雨・降雪の両方で、立木密度と負の相関、樹高と正の相関があることが確認された(図 4-38)。また、降雨時 E_{wet}^* については立木密度よりも樹高との相関係数が大きく、降雪時 E_{wet}^* については、立木密度がより強い相関を示したが、サンプル数が少なく(9 データ)、有意差は出なかった(p 値 >0.05)。このため、広葉樹林では、樹高が立木密度よりも E_{wet}^* をよく説明できる可能性がある。

これらの結果や Komatsu et al.(2015)の研究結果を踏まえて、針葉樹林では立木密度、広葉樹林では樹高から E_{wet}^* を推定するモデルを開発した。具体的には、針葉樹林では以下の式が得られた:

$$E_{wet}^* = k_1\{1 - \exp(-k_2N)\} \quad (4.16)$$

ここで k_1 (単位なし)と k_2 (ha)の値は、それぞれ、降雨時が 0.263 と 0.00124、常緑針葉樹林の降雪時が 0.406 と 0.00211、落葉針葉樹林の降雪時が 0.346 と 0.00146 であり、 N は立木密度(本/ha)である。

広葉樹林については以下の式が得られた。

$$E_{wet}^* = \left(\frac{H}{j_1}\right)^{j_2} \quad (4.17)$$

ここで j_1 (m)と j_2 (単位なし)の値は、それぞれ、着葉期の降雨時で 743 と 0.401、落葉期の降雨時で 380 と 0.539、降雪時は 293 と 0.941 である。

3) 無降水時蒸発量 (E_{dry}) に係る文献の整理結果

無降水時蒸発量 E_{dry} については、 G_{sref} (表面コンダクタンスの基準値)と樹高・立木密度との相関分析を行った上で、各パラメータを決定した。

まず、落葉針葉樹林については立木密度との関係を示すデータはないものの、全体的に、落葉針葉樹林の G_{sref} の値(黄丸。0.00771~0.01117 m/s、平均 0.00935 ± 0.00121 m/s)が最も高く、次に広葉樹林の値(緑丸。0.00427 ~ 0.00922 m/s、平均 0.00612 ± 0.00131 m/s)、常緑針葉樹林の値(青丸。0.00156~0.00572 m/s、平均 0.0378 ± 0.00098 m/s)の順となった(図 4-39)。

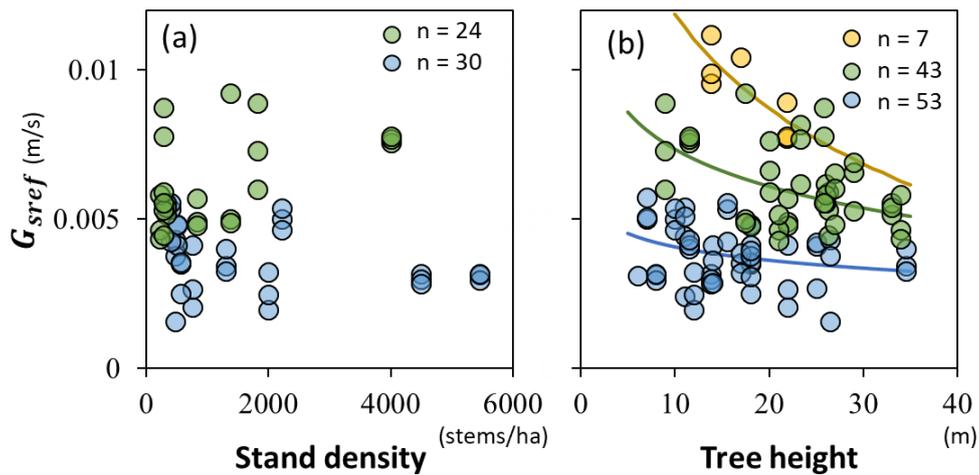


図 4-39 表面コンダクタンス G_{sref} の基準値と(a)立木密度 (Stand density)、(b)樹高 (Tree height) の関係

青丸は常緑針葉樹林、緑丸は広葉樹林、黄丸は落葉針葉樹林。線は回帰曲線 (式 4.18)。落葉広葉樹林は、1カ所しか立木密度のデータがなかったため、図の左側には表示されていない。

いずれの森林においても、 G_{sref} は樹高が上がると漸減する結果となった (表 4-33; 図 4-39)。また、 G_{sref} との相関を確認したところ、常緑針葉樹林と広葉樹林では立木密度と、落葉針葉樹林では樹高との相関が強かった。

表 4-33 各森林タイプにおける G_{sref} と立木密度・樹高との関係のスピアマンの順位相関係数

	立木密度	樹高
常緑針葉樹林	-0.37*	-0.22
落葉針葉樹林	-	-0.77*
広葉樹林	0.49*	-0.33

(** p 値<0.01、* p 値<0.05)

しかし、上記の結果では立木密度のデータのサンプル数が少ないこと、また、いくつかの先行研究でと樹高の間に負の相関があると報告されている ((Schäfer et al., 2000; Komatsu, 2003)ことを踏まえ、今回は樹高との関係を重視して以下の式で整理した(Komatsu, 2005):

$$G_{sref} = -l_1 \ln(H) + l_2 \quad (4.18)$$

ここで l_1 (/s)と l_2 (m/s)は、それぞれ、常緑針葉樹林で 0.000653 と 0.00558、広葉樹林で 0.00180 と 0.0115、落葉針葉樹林で 0.00457 と 0.0224 となる。次に、気象に係る関数のパラメータ (式 4.5-4.7) の算出に当たっては、各サイトで計算した値の平均値を用いた。具体的には、 α は、常緑針葉樹林で 0.900、広葉樹林で 0.520、落葉樹林で 0.760 となった。また、 β_1 と β_2 は、常緑針葉樹林では 250 と 0.403、広葉樹林では 268 と 0.364、落葉針葉樹林では

399 と 0.204 となった。 γ_1 、 γ_2 と γ_3 は、常緑針葉樹林では 1.22、4.33、0.142、広葉樹林では 1.28、9.16、0.142、落葉針葉樹林では 1.35、11.8、0.187 となった。

また、参考として、各関数と因子の関係を図 4-40 に示した。

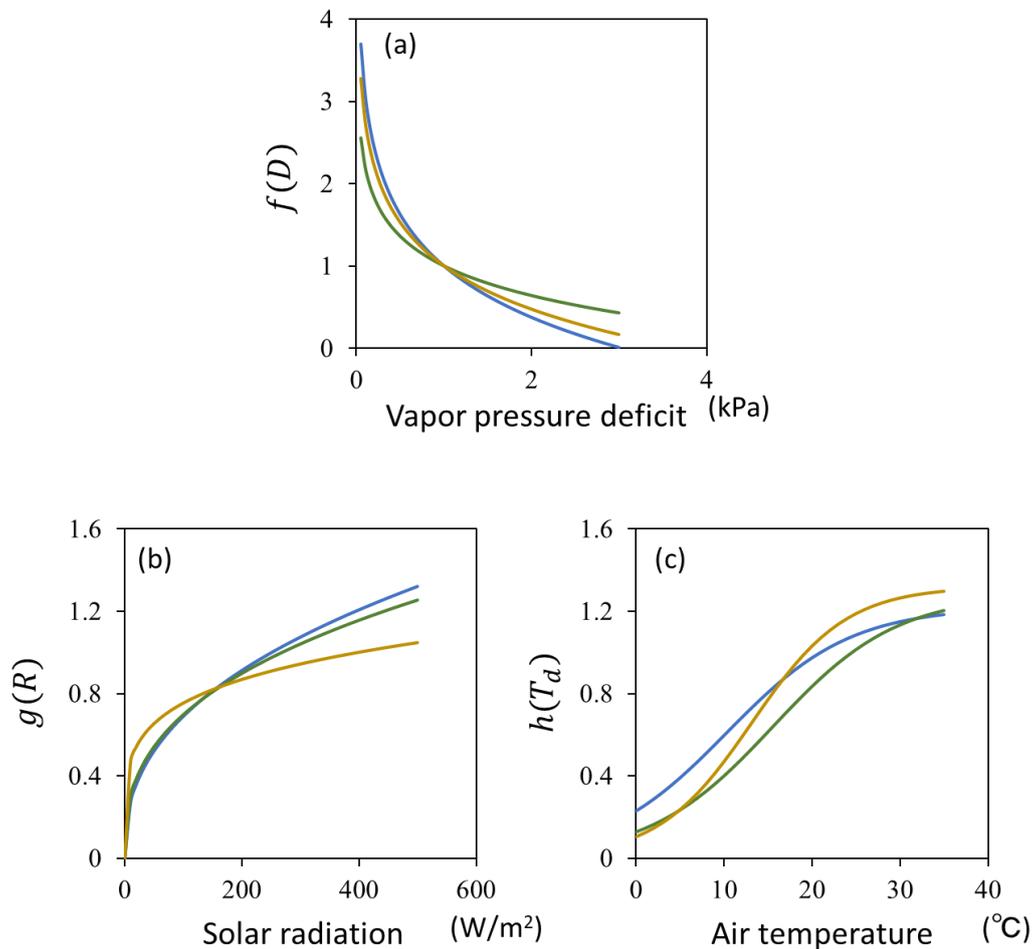


図 4-40 (a) 大気飽差 (Vapor pressure deficit)、(b) 日射量 (Solar radiation)、(c) 気温 (Air temperature) と気象に係る関数の関係

青い線は常緑針葉樹林、緑の線は広葉樹林、黄色の線は落葉針葉樹林。

4) 考察

降雪時の蒸発量 E_{wet}^* が針葉樹林では降雨時の蒸発量より大きい結果となった理由としては、固体である雪は樹冠に保持されやすく、樹幹流を発生しないためと考えられる (Lundberg and Halldin, 2001; Kubota and Okamoto, 2015)。また、広葉樹林で小さい値となったのは、広葉樹林での落葉が原因であると考えられた。

針葉樹林では立木密度が高くなると E_{wet} が増加することは、既に小松 (2007)、Komatsu et al., (2015) の研究で示されている。彼らによると、立木密度の増加に伴い、

LAI と空気力学的コンダクタンスが増加することに起因するとされている。実際に、LAI が大きいほど樹冠の貯留容量が多いため、LAI と E_{wet} の間に正の相関があること (Toba and Ohta, 2005; Deguchi et al, 2006; Llorens and Domingo, 2007; Fathizadeh et al, 2017) や、日本の針葉樹人工林において立木密度と LAI の間にも正の関係があり (Murakami et al., 2000)、林分密度の増加とともに E_{wet} が増加することが報告されている。

また、Teklehaimanot ら (1991) は、林分密度の増加により林冠表面が粗くなり、気流が乱れる (すなわち、空気力学的コンダクタンスが増加する) ため、 E_{wet} が増加することを示している (Kelliher ら、1993 ; Nakai ら、2008)。一般に、針葉樹林では、間伐などの管理作業や立木間での競争により、樹高と林分密度が負の相関を持つと考えられ、このことから、樹高は林分密度とは反対に E_{wet} と負の相関を持つと考えられる。

一方で、広葉樹林の E_{wet}^* は立木密度と負の相関、樹高と正の相関がある結果となった。また、先行研究では、樹高の増加とともに E_{wet} が増加することが示されている (Dietz et al., 2006)。

このような結果は、樹種による樹冠構造の違いに起因するものと推測される。一般に、広葉樹の樹冠は比較的広く、針葉樹は狭いとされており、梅木 (1993) は、北海道の混交林において、広葉樹 (*Betula maximowicziana*, *Magnolia obovate*, *Quercus crispula* Blume など) は針葉樹 (*Picea abies*) よりも、同じ樹高で 1.7 倍大きな冠状突起面積を持っていたと報告している。Russell and Weiskittel (2011) は、米国メイン州の針葉樹 7 種と広葉樹 8 種の最大樹冠幅と DBH の関係を調査し、広葉樹は、同じ DBH の場合、針葉樹の約 1.3 倍の最大樹冠幅を持つことが明らかにした。これらの結果は、針葉樹林の樹冠で覆われる面積 (雨滴を遮る面積) が広葉樹林よりも小さいことを意味し、針葉樹林の E_{wet} が林分密度の変化の影響を受けやすいことを示唆するものとなっている。一方で、広葉樹林は、樹高の増加による空気力学的コンダクタンスの増加の影響が E_{wet} に対して強いと考えられている (Kelliher et al., 1993 ; Dietz et al., 2006 ; Murakami and Toba, 2013)。

また、無降水時蒸発量に関しては、樹液流法を用いたいくつかの研究により、樹高の増加とともに蒸散量が減少することが報告されている。Tsuruta et al. (2008) は、樹高 8 m の針葉樹人工林の 9 月の蒸散量は 2.8 mm/day であり、樹高 11.4 m の人工林の 1.0 mm/day よりも多かったと報告している。Schäfer et al. (2000) は、ドイツ南東部のバイエルン州において、樹高 11~39m の 9 本の広葉樹 (*Fagus sylvatica* L.) の気孔コンダクタンス (G_{sref}/LAI) の基準値 (g_{sref}) について調査し、樹高の増加とともに g_{sref} が指数関数的に減少することが示された。また、Ryan and Yoder (1997) は、重力と水の輸送距離が増加することにより、葉上の気孔に水を取り込む際の抵抗が増加するメカニズムを示している。

一方で、本調査では、樹高と G_{sref} の間に明確な相関は見られなかった。これは、本研究で定義した E_{dry} には林床面蒸発も含んで取り扱われている可能性があるためと推測される。Ryan and Yoder (1997) が提案したメカニズムでは、樹高は樹冠からの蒸散のみを説明することになるものの、一般に樹冠蒸散量の半分より少ないとされる林床面蒸発量 (Daikoku et al., 2008; Sun et al., 2014; Benyon and Doody, 2015) も一定程度影響を与えており、 G_{sref} と樹高の相関を弱めている可能性もある。

一方で、いくつかの先行研究では、LAI の推定値が 3 以上の場合は、林床面蒸発量は E_{dry} の

5分の1以下となることが示されており (Kelliher et al., 1995 ; Daikoku et al., 2008)、このような場合は立木の樹高の影響がより強くなり得ることが示唆されている。なお、Komatsu (2003) は、いくつかの研究手法 (樹液流計測、渦相関法、Bowen 比法) に関する論文のレビューから、針葉樹林では LAI が 3 以上の場合は樹高の増加とともに G_{sref} が指数関数的に減少することも見いだしている

以上のとおり、森林の種類、立木密度、樹高、入手しやすい気象データから ET を推定するモデルを開発し、降水時蒸発量(E_{wet})と無降水時蒸発量(E_{dry})をそれぞれ推定することができた。本モデルを、今後の SWAT モデルの精緻化に活用できるものと考えられる。

5) 林床面蒸発散量モデルの構築

林床面蒸発量は林内の日射や大気飽差との関係が認められた (図 4-41)。また、1 月～12 月の間の林床面蒸発量は 0.13～2.47 mm/日 (平均 : 0.89 ± 0.52 mm/日) であり、既往研究 (Sun et al. 2016) の値 (立木密度 1,098 本/ha のヒノキ人工林における年間の林床面蒸発量は約 0.03～2.10 mm/日 (平均 : 0.79 ± 0.41 mm/日)) に近い数値となっている。

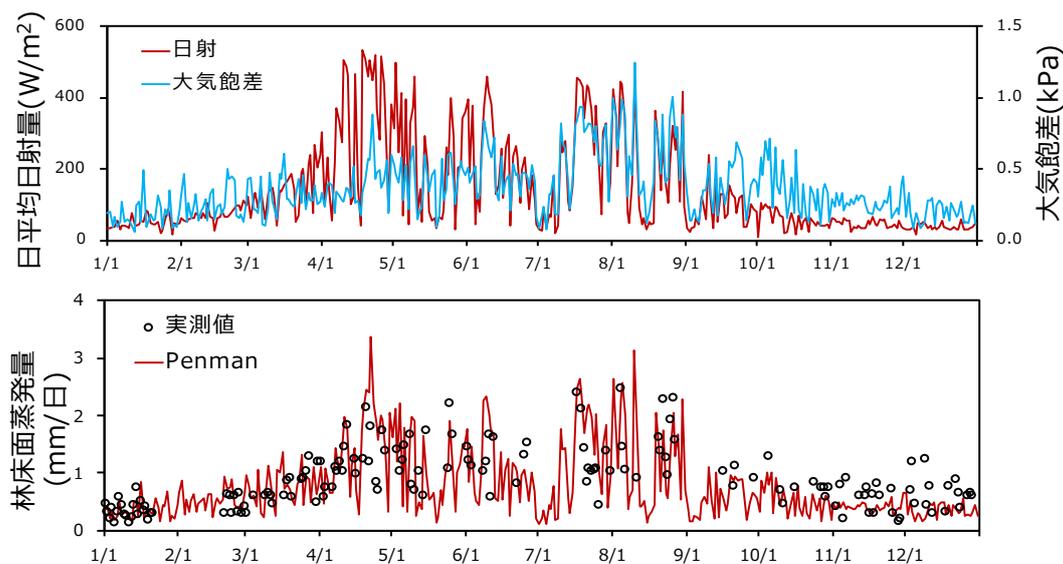


図 4-41 2021 年 1 月～12 月における林内気象と林床面蒸発量の日変化

また、式 4.14 を用いて林床面蒸発量を算出したところ、0.00～3.16 mm/日 (平均 : 0.63 ± 0.55 mm/日) となり、実測値に近い値となった。このため、モデルは実際の林床面蒸発散を一定程度推定することが可能と考えられた。

次に、立木の樹液流速の結果を示す。2021 年 2 月 19 日に 360 度カメラ (Ricoh Thata V) と魚眼レンズ (Nikon FC-E9, Japan) を用いて観測プロット内の全天空写真を撮影した様子を図 4-42 に示す。全天空写真解析ソフト (Gap Light Analyzer V2.0, Simon Fraser University) を用いて解析した結果、当プロットの葉面積指数と開空度について、360 度カメラでは 1.8

m²m⁻² と 16.3%、魚眼レンズでは 1.9 m²m⁻² と 16.0%となった。また、魚眼レンズの撮影結果から、2月から10月までの平均 LAI と開空度を計算した結果、それぞれ 2.2 m²m⁻² (1.7～2.6 m²m⁻²) と 14.6% (11.2～18.4%) となった (図 4-43)。

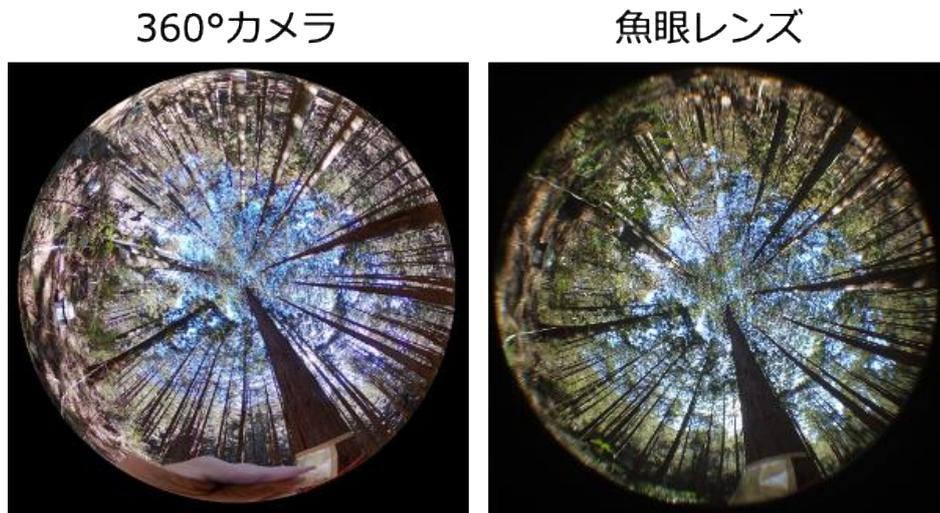


図 4-42 360 度カメラと魚眼レンズを用いて撮影した全天空写真(2021 年 2 月 19 日)

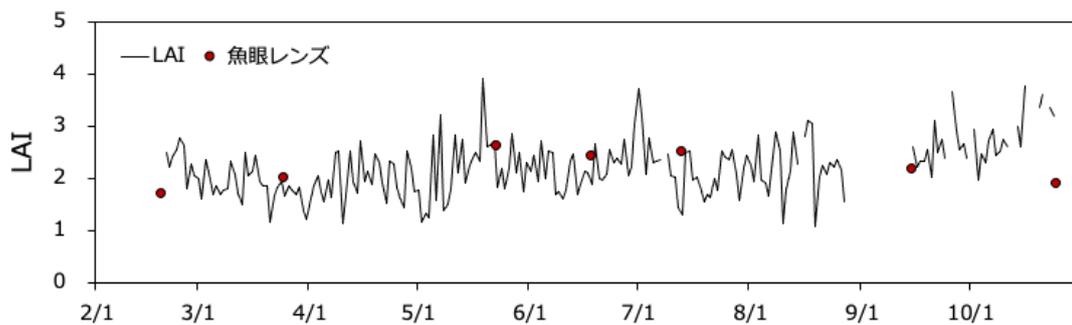


図 4-43 2021 年 2 月～10 月におけるプロット内の LAI 変化

2021 年 2 月 9 日～2 月 18 日の計測木の樹液流速度変化を図 4-44 に示す。まず、本計測で得られた 2 月の樹液流速度は既往研究と同程度であることを確認した(Takagi 2013)。

日中の最大樹液流速度は約 $5\sim 30\text{ cm}^3\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ の範囲であり、計測木間で明らかな違いが見られた。一般的に、個体間の樹液流速度変化の理由は個体サイズの違いや辺材面積の違い、樹冠の位置、樹幹周辺の土壌水分分布などの影響を受ける (Chiu et al. 2016)。

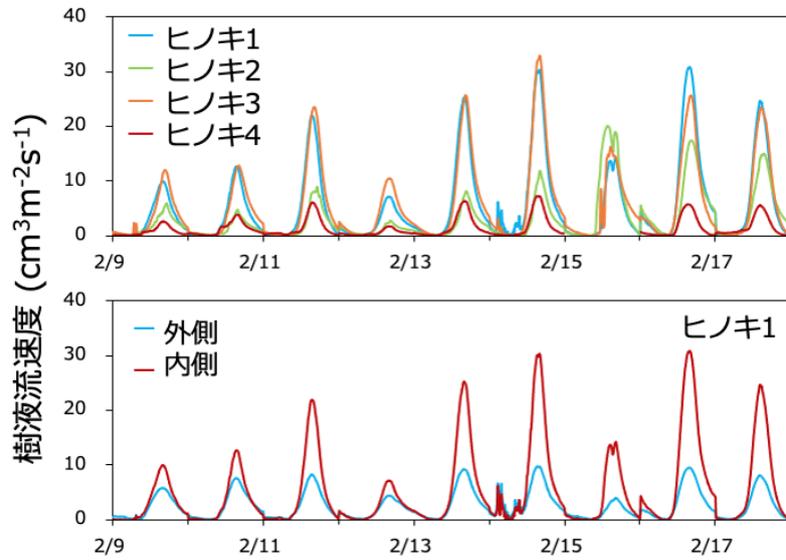


図 4-44 樹液流速の日変動（立木別、測定深度別）

また、辺材の外側の樹液流速は辺材の内側より大きいことがわかった。例えば、計測木 1 の外側辺材の日中最大樹液流速は $10\sim 30\text{ cm}^3/\text{m}^2\text{s}$ であり、内側辺材の速度は $5\sim 10\text{ cm}^3/\text{m}^2\text{s}$ で外側の約 4 割である。このような違いは、辺材の内側に比較的水理抵抗が高い古い仮道管がより多く存在しているためと考えられた (Ford et al. 2004)。

また、2021 年 2 月～2022 年 1 月の間で、 $0.1\sim 2.8\text{ mm}/\text{日}$ の範囲で季節変動も見られたことから（図 4-45。平均は $1.3\pm 0.6\text{ mm}/\text{日}$ ）、樹液流速の日変動には気象も影響していることが推測された。

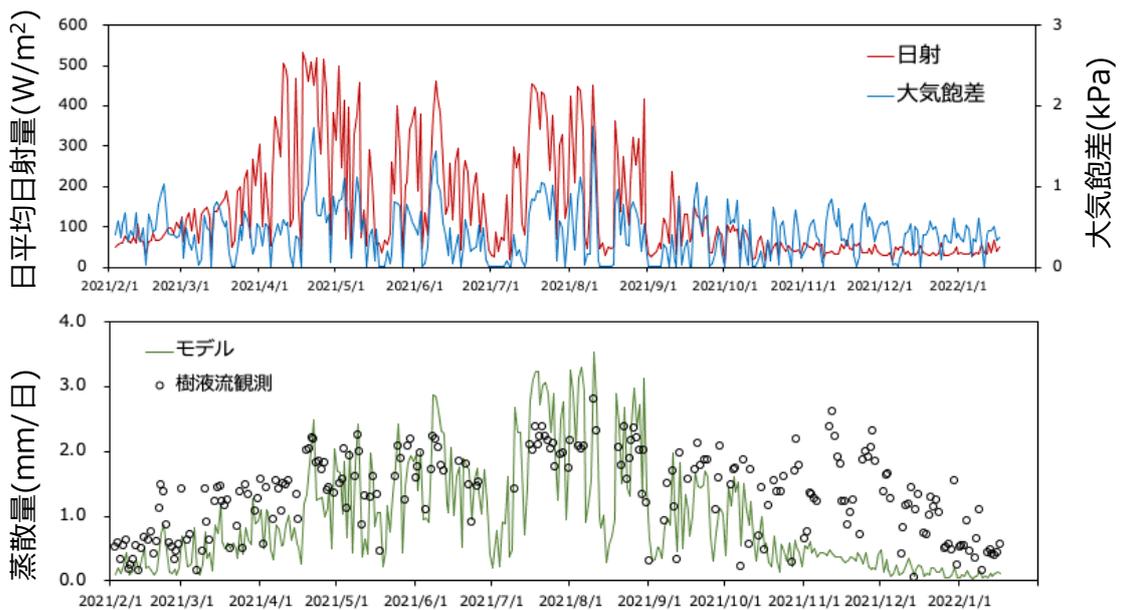


図 4-45 2021 年 2 月～2022 年 1 月における林外気象と日蒸散量

また、4.3 式や 4.4 式を用いて日蒸発散量を算出したところ、 $1.0\pm 0.8\text{ mm}/\text{日}$ となり、実測

値と近い値が得られた。

なお、この計測結果に関連して、白木委員から、プログラム改修の検討に関して報告があった。具体的には、SWAT モデルではサブデイリー（日単位よりも時間解像度の細かい単位）での計算に降雨中の最大樹冠貯留量のパラメータ（CANMAX）が組み入れているため、これに適切な値を与えることによって、樹冠遮断損失量を適切に評価できる可能性を検討した。

しかしながら、貝沢試験流域での調査結果を用いて、CANMAX を 0 mm から 50 mm まで変化させて流出量を試算したところ、CANMAX の増加に伴い蒸発散量は増加するものの増加の度合いは比較的小さく、一方で、減少すると考えられた側方流量と復帰流量（リターンフロー）は増加する結果となった（表 4-34）。

表 4-34 異なる CANMX パラメータ値を適用した場合の各試算結果

最大樹冠貯留量パラメータ (CANMAX) (mm)	降水量 (mm)	蒸発散量 (mm)	側方流 (mm)	リターンフロー (mm)
0	1,766.3	207.4	1,472.2	76.8
5	1,766.3	212.7	1,508.0	82.5
10	1,766.3	214.9	1,521.6	84.9
50	1,766.3	221.0	1,552.4	90.8

今後のモデルの改善に向けては、立木密度や樹高をパラメータとして蒸発散量を計算する樹冠遮断モデル（小松ら、2015）、通称「小松モデル」を活用することについても提案された。

以上のとおり、貝沢試験地において林床面蒸発量と樹液流観測の観測を行い、構築したモデルからは、実測値と近い計算値が得られた。本モデルを用いて、今後、林床面蒸発量や上層木の蒸散量についての推定が可能と考えられ、SWAT モデルの精緻化も図られると考えられた。

4.3.9. 土壌物理性に関する調査

2.4 において課題 2 として記載したとおり、土壌に係るインプットデータの妥当性を検証する必要があることから、貝沢試験流域内で土壌物理性に関するサンプル調査を行い、得られた実測データをもとに妥当性の検討を行うこととした。

(1) 方法

林相毎の土壌物理性の違いを把握するため、対象地域内の林相（樹種、林齢、林分密度）を網羅できるよう、5 地点を選定し、各地点で 3 つのサンプルを採取した。（図 4-46）。

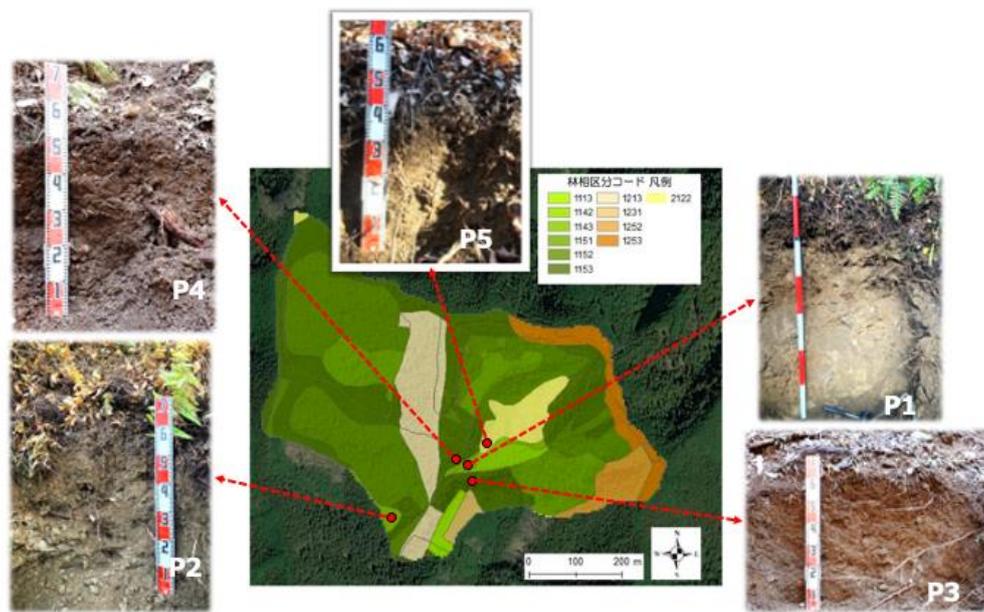


図 4-46 土壌サンプルを採取した箇所とその断面図

なお、本調査では、林相ごとの土壌特性を明らかにして、SWAT モデルに反映することを目的としているため、特に樹木根系が発達し、孔隙量や透水性にも違いが表れると思われる表層 50cm までの浅い層を対象に土壌サンプルを採取することとした。

土壌サンプルは、選定した 5 つの地点すべてにおいて、地下 20cm、50cm の 2 つの深度で採取し、うち 1 地点 (P1) については、より深い層の土壌物理性についても代表値を得るため、80cm 深度での採取も行った。

採取には 100ml の採土円筒を用い、仮比重、飽和透水係数、粒径分布、粒径加積曲線の 50% にあたる中央粒径 (D50)¹⁹ などの土壌物理性の分析を行った。各分析項目は、3 サンプルの平均値を取った。

飽和透水係数は、土壌透水性測定器(大起理化製 DIK-4012)を用いて計測した。なお、今回は変水位法による測定とした。

仮比重は、採取した土壌サンプルのまま 105°C の乾燥機で 24 時間乾燥した重量から求めた。

粒径分布は、ふるい分け試験方法により行った。具体的には、ふるいの目開きの大きなものから順に (26.5、19、9.5、4、2、1、0.85、0.425、0.25、0.106、0.075、0.075mm 以下)、一定時間一定振幅で振動を与えてふるい分け、それぞれのふるい上に残った試料を秤量した上で、粒径加積曲線を作成した。

(2) 結果

5 つの斜面で採取した土壌サンプルの仮比重と飽和透水係数を表 4-35 に、粒径分布を図 4-47 から図 4-51 に示す。なお、粒径分布を示す図中の①、②、③は 3 つのサンプルを意味する。

¹⁹ D50 : 粒径加積曲線における 50% の値を示す中央粒径と呼ばれるもので、粒子径分布を 2 つに分けた際、大きい方と小さい方が等量となる径。サンプルの粒径の特徴を表す値。

表 4-35 各地点、深度の飽和透水係数及び仮比重

場所	深度 (cm)	飽和透水係数 (mm/h)	仮比重 (g/cm ³)	D50 (mm)
P1	20	23.1	1.18	1.9
	50	26.6	1.41	1.9
	80	0.7	1.65	3.0
P2	20	129.3	1.14	2.1
	50	236.4	1.34	2.2
P3	20	37.2	0.97	1.9
	50	43.5	1.02	1.3
P4	20	67.0	1.25	1.6
	50	24.4	1.28	1.9
P5	20	217.7	1.29	1.7
	50	89.4	1.37	2.0

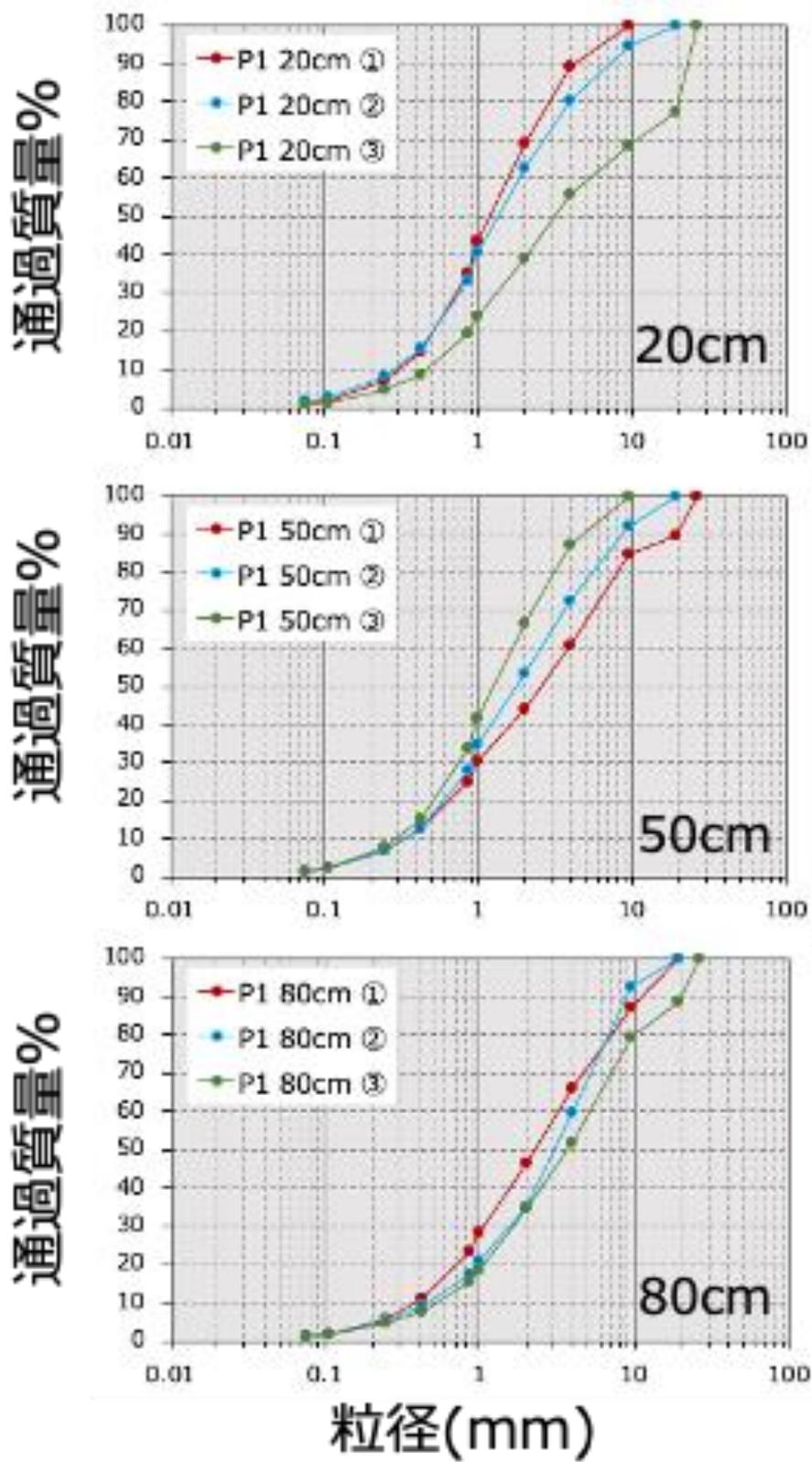


図 4-47 P1 地点の粒径加積曲線

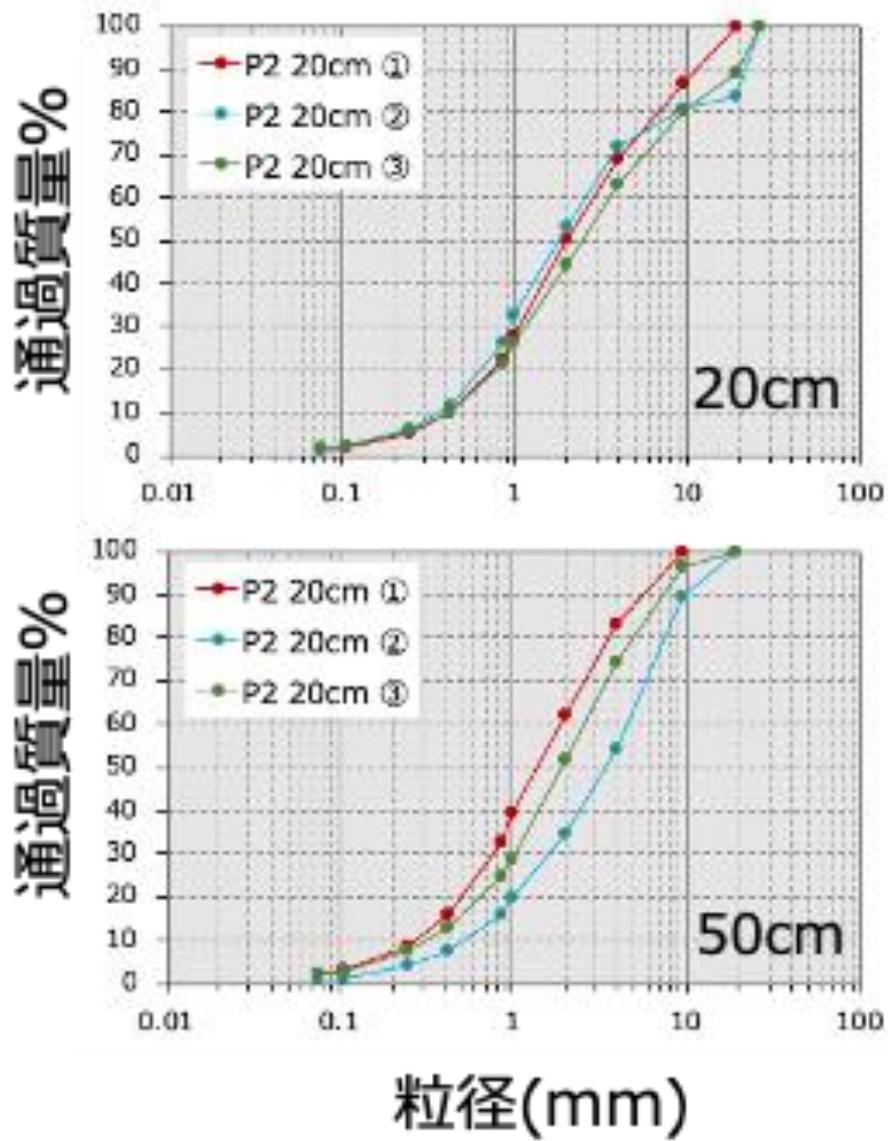


図 4-48 P2 地点の粒径加積曲線

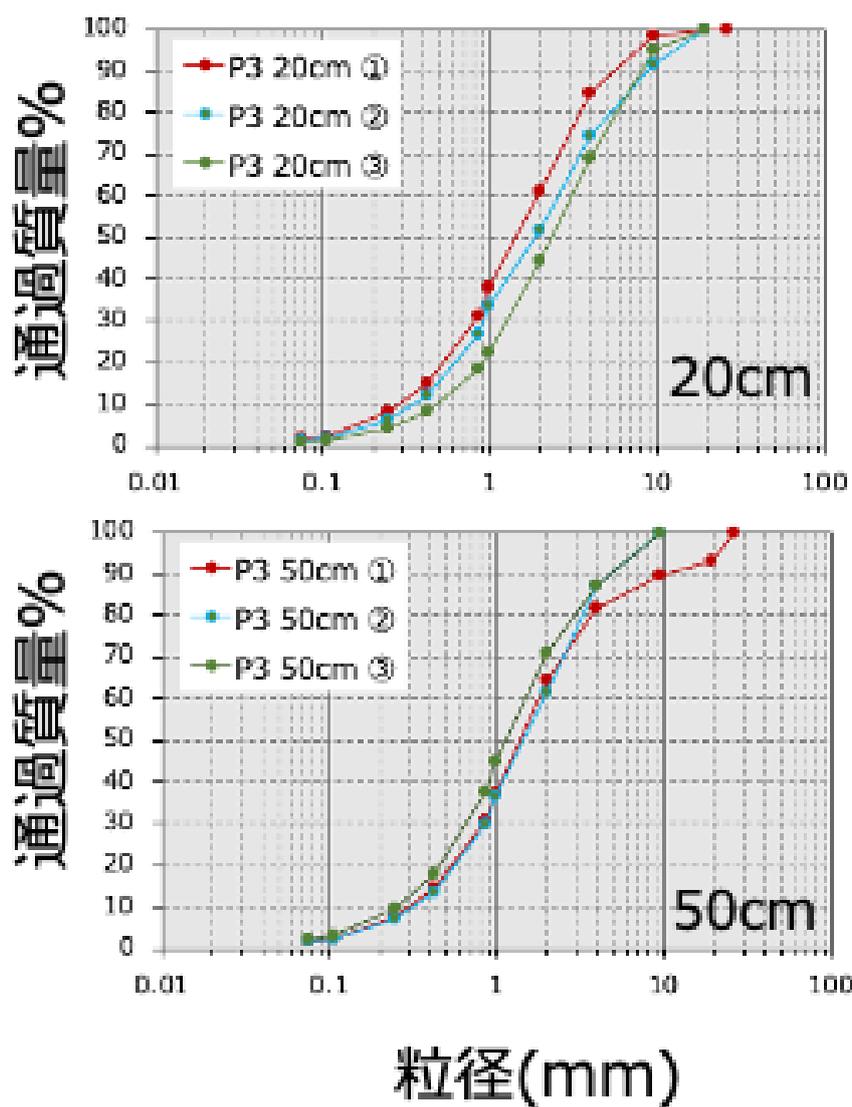


図 4-49 P3 地点の粒径加積曲線

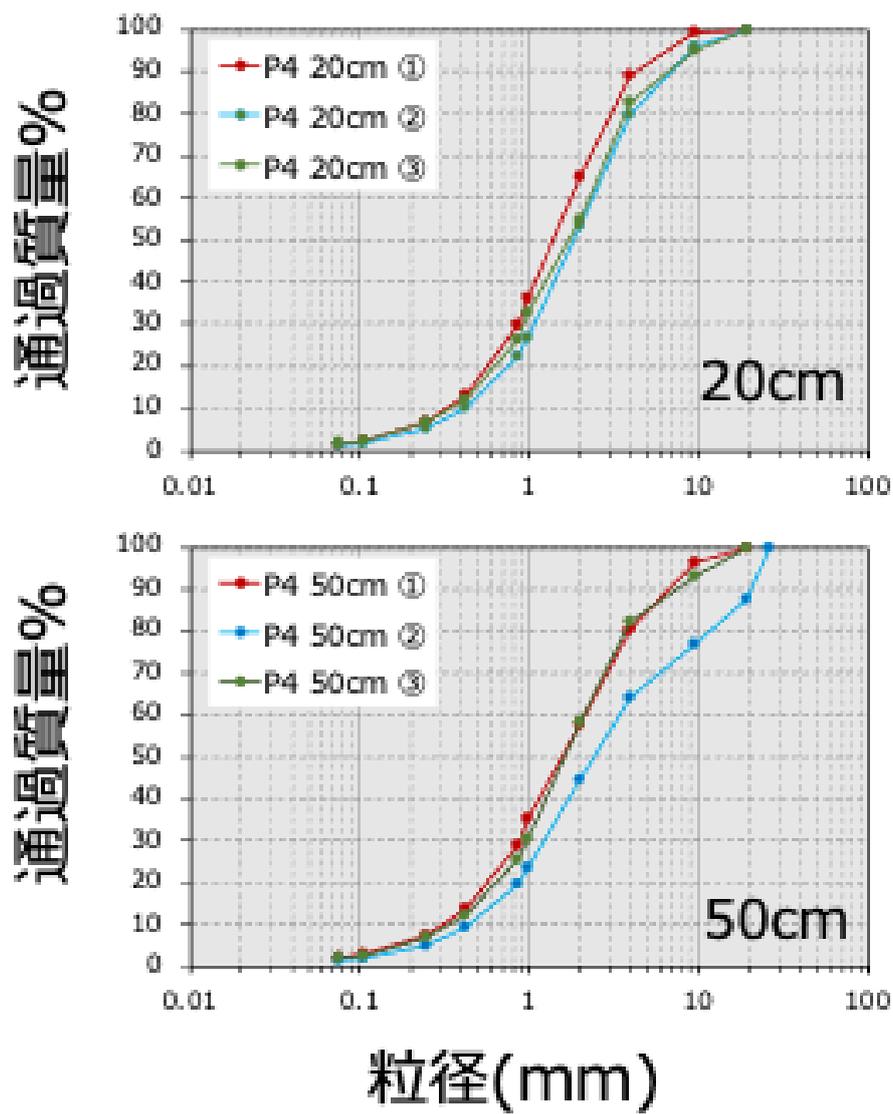


図 4-50 P4 地点の粒径加積曲線

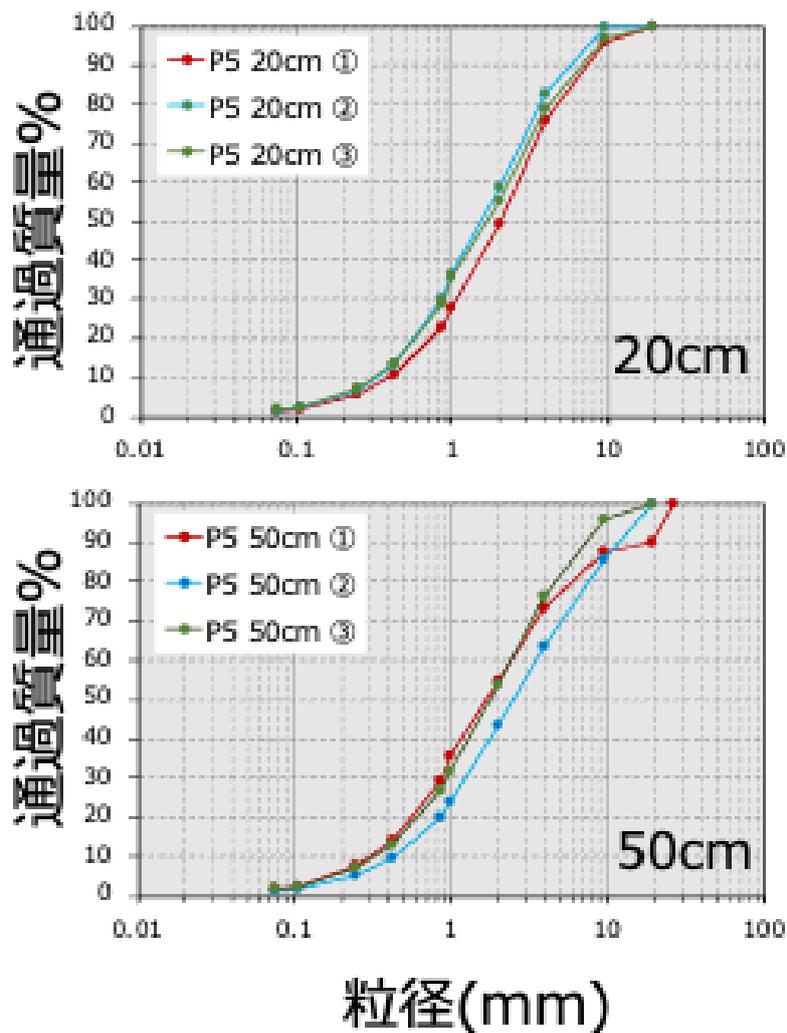


図 4-51 P5 地点の粒径加積曲線

粒径分布の範囲は 0.075~26mm 程度となっており、いずれも砂 (0.074~2mm) と礫 (2mm 以上) を多く含む、孔隙に富む土壌であることが分かった。

また、粒径加積曲線から、通過質量 (%) が 10% の粒径 (D10) で 60% の粒径 (D60) を除すことで均等係数 ($U_c = D60/D10$) が求められる。一般的に U_c が 4~5 以下は「粒径分布が悪い」、10 以上は「粒径分布が良い」とされ、これは、土壌の締固めの難易度に対応している。今回、土壌サンプルを採取した 5 地点では、 U_c は 10 程度であったことから、幅広い粒径が分布した土壌といえる。

既往研究²⁰と比較すると、貝沢流域では砂と礫が多く含まれているものの、粒径の範囲は同程度であった。

これらの結果では、林相間の違いは見られなかったものの、深度別の差は確認された。深度 20cm と 50cm の飽和透水係数は、23~236 mm/h の範囲にあり、現行の SWAT モデルで設定している飽和透水係数パラメータ (SOL_K: 36 mm/h(全層)) と同程度のオーダーであったが、深度

²⁰ 島田博匡. (2019). スギ・ヒノキ人工林における土砂受け箱で捕捉された土壌と地山表層土壌の粒径組成の比較. 三重県林業研究所研究報告 9: 1-11.

80cm では、0.7mm/h と低い値であったことから、SWAT モデルにおける深い層の飽和透水係数の設定については調整の余地があると考えられた。

また、仮比重は 1.0~1.6g/cm³ 程度の範囲にあり、深度 80cm の仮比重が 1.6g/cm³ と最大であったが、こちらも SWAT モデルで設定している仮比重パラメータ (SOL_BD : 0.2~1.5) と同程度のオーダーであった。

以上の結果から、SWAT モデルの土壌パラメータのうち、浸透能の計算パラメータとして特に重要な SOL_K や SOL_BD は、妥当な範囲で設定されていることが確認でき、今後の調整においても値を大きく変更する必要はないことが分かった。

5. 水源涵養機能の森林の成長や回復等による変化に係る評価

ここでは、本事業で構築・精緻化した各流出モデルを用いて、表 5-1 に示す 3 つの観点（イ）～（ロ）及び 4 つの評価軸に基づき、森林の水源涵養機能について分析・評価を行う。ただし、三保・過去モデルについては次年度に構築予定となったことから、観点（ハ）の分析・評価は次年度に予定する。

表 5-1 水源涵養機能の評価の観点及び評価軸（表 4-1 の再掲）

評価軸	内容	評価する アウトプット 時間スケール	評価の観点				
			(イ) 森林の管理 状態別 (整備/未整備)	(ロ) 森林の成熟状態別 (現在の成熟林/ 40年程度前の若齢林)	(ハ) 崩壊からの復旧 (崩壊した森林/ 復旧した森林)		
評価対象流域			貝沢試験 流域	道志ダム 集水域	道志ダム集水域	三保ダム集水域	
① 水収支	・水収支	月・年単位	貝沢・現代 モデル (精緻化)	道志・現代モデル (精緻化)	道志・過 去モデル (新規)	三保・現 代モデル (新規)	三保・過 去モデル (新規)
② 洪水緩和	・ピーク流量 ・流出遅延時間	時間単位					
③ 渇水緩和	・渇水時流量	日単位					
④ 水資源 貯留	・地下水涵養量	月・年単位					

具体的には、以下の項目について分析・評価を行うが、現時点のモデルには課題が残存しており、出力結果は暫定的なものであることから、ここでは、次年度に向けての試行的な分析・考察に留めることとする。

➤ 水収支

- 土地利用別
- 平水時・出水時別
- 森林の管理状態別（樹種別、林分疎密度別）[評価の観点（イ）]
- 森林の成熟状態別（林齢別）[評価の観点（ロ）]

➤ 洪水緩和機能

- 森林管理状態別（樹種別、林分疎密度別）[評価の観点（イ）]
- 森林管理状態別（林齢別）[評価の観点（ロ）]

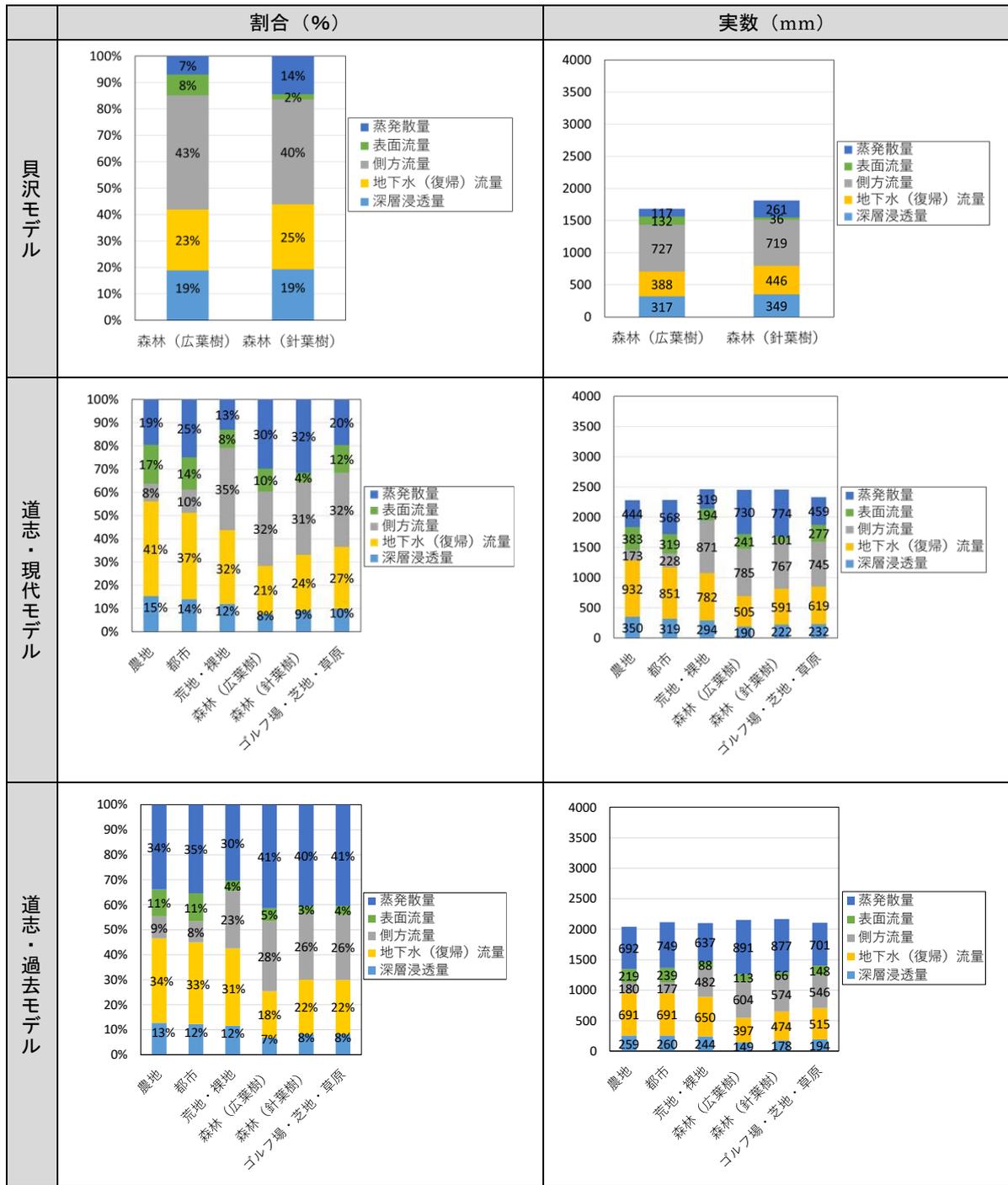
➤ 渇水緩和機能

なお、「4.3.7」に記載したとおり、SWAT モデルでは、土壌中での貯留時間が加味されていないことから、各流量と実測値との間には開きがある可能性について留意されたい。

5.1. 水収支の評価

5.1.1. 土地利用別

図 5-1 に、構築した各モデルのシミュレーション期間全体における土地利用別水収支を、割合と実数でそれぞれ示した。本解析においては、各モデルより日単位で出力したシミュレーション結果を用いた。なお、モデル間における水収支の比較をしやすくするため、実数グラフの縦軸は同一の範囲で設定した。



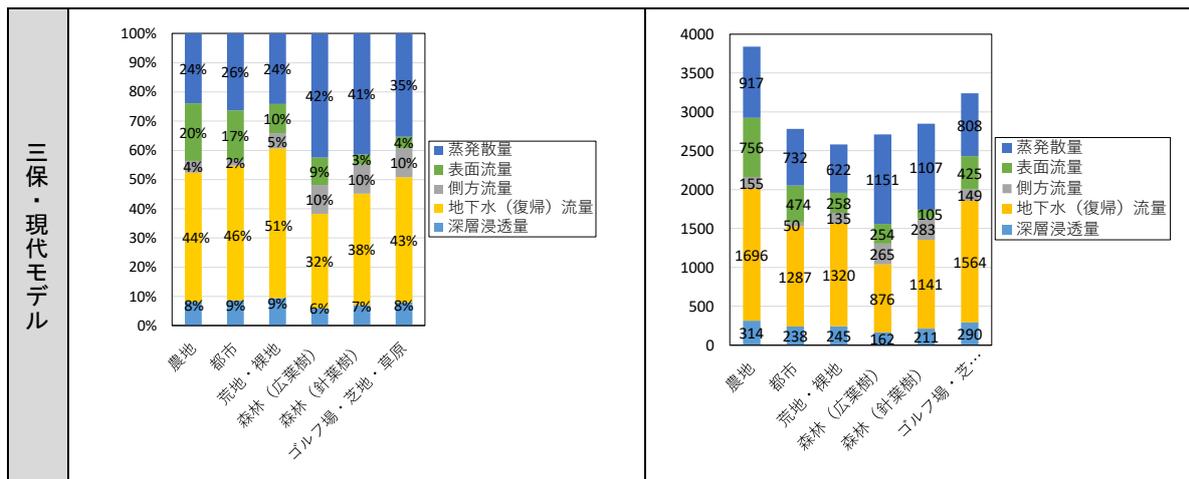


図 5-1 各流域の土地利用別水収支（流域全体）

水収支の構成要素のうち、唯一、観測による実測データがある程度入手可能な蒸発散量については、一般的な知見である「20%程度」に比べて、貝沢モデルでは、広葉樹、針葉樹エリアでそれぞれ7%、14%、実数としても117mm、261mmとかなり低めの値となった。一方で、道志・過去モデル及び三保・現代モデルでは、蒸発散量の割合は40%程度と高めであり、特に三保・現代モデルによる森林地の蒸発散量（実数）は1,000mmを超える等、現実にそぐわない過大な推計となっている。

このような結果は、SWATモデル内の計算構造に起因するほか、流域スケールの影響も少なからず受けていることが推測され、引き続き、計算プログラムの綿密な検証及び改修が必要である。

蒸発散量の一般的な値との開きを認識しつつ、「森林」を「針葉樹」と「広葉樹」の別にみると、蒸発散量を含め、各構成成分の割合に顕著な違いはみられないものの、表面流量については、本事業の対象流域においては、針葉樹よりも広葉樹の方が若干多めに推計される結果となった。

また、水収支を土地利用別にみると、「森林」は「農地」、「都市」などの他の土地利用と比べ、蒸発散量と側方流が多い。蒸発散量については、樹木による遮断蒸発の影響が大きく、側方流については、SWATの側方流計算に用いられる「傾斜」パラメータが、森林が存在する山地斜面においては高い値で設定されることが、この原因と考えられた。「荒地・裸地」の表面流が、「森林」、「農地」や「ゴルフ場・芝地・草原」の表面流よりも少ない結果となっているのは、「荒地・裸地」の水収支の調整が不十分である可能性がある。

5.1.2. 平水時・出水時別

図 5-2 に、平水時・出水時別の水収支の結果を示す。ここでは、流域スケールでの比較もするため、貝沢モデルと道志・現代モデルの出力結果を用いることとした。出水時水収支の集計には、貝沢モデルでは2015年7月16日に日雨量200mmが観測された際のデータ、道志・現代モデルでは、アメダス相模湖で総降雨量600mm以上が観測された台風19号（2019年10月12日発生）の際の豪雨イベントのデータを用い、平水時は、出水時と同年の無降雨日のデータのみを用いた。

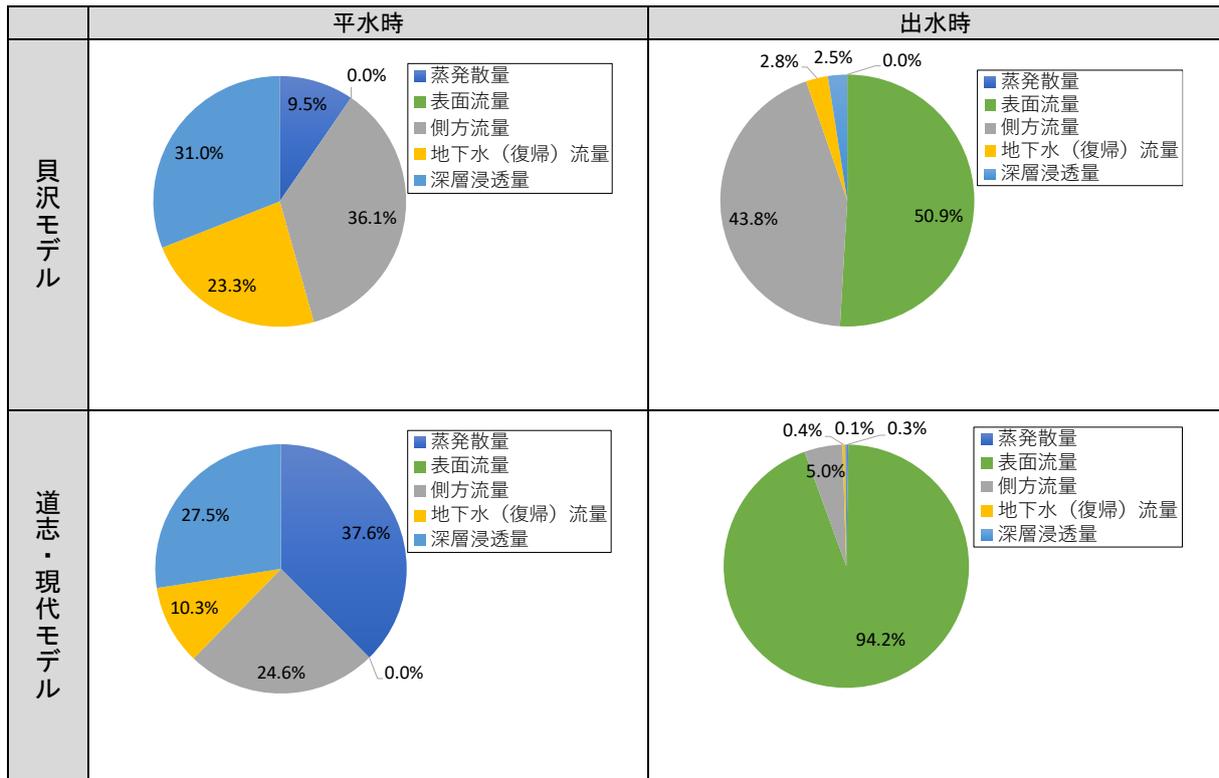


図 5-2 平水時・出水時別水収支（貝沢、道志・現代モデル）

平水時は、2 流域共に表面流量はほとんど発生していないのに対し、出水時は、表面流量が貝沢モデルでは約 5 割、道志・現代モデルでは、9 割以上となった。貝沢と比べ、道志の方が出水時の水収支における表面流量割合の増加が顕著であり、このような水収支の違いは、流下する斜面が広く長い分、表面流量が多くなるなど、流域スケールが影響を及ぼしている可能性も考えられた。ただし、各流域の出水時データの取得日が異なり、降雨規模等、気象条件の違いもあることから、さらなる精査が必要である。

なお、参考として、道志・過去モデルを用いて、小・中・大の降雨イベントに対する時間単位の流出応答を図 5-3 の (1) ～ (3) 示した。モデル推定値のピーク流量とタイミングは概ね再現できているが、逓減の波形は実測値と比べやや急である等、十分な再現ができていない。一方で、(3) のピーク時と逓減時について、時間単位の水収支を見ると、ピーク時には表面流が 87%、逓減時には側方流が 65%を占めており、実態に近い値が得られているものと推察される。

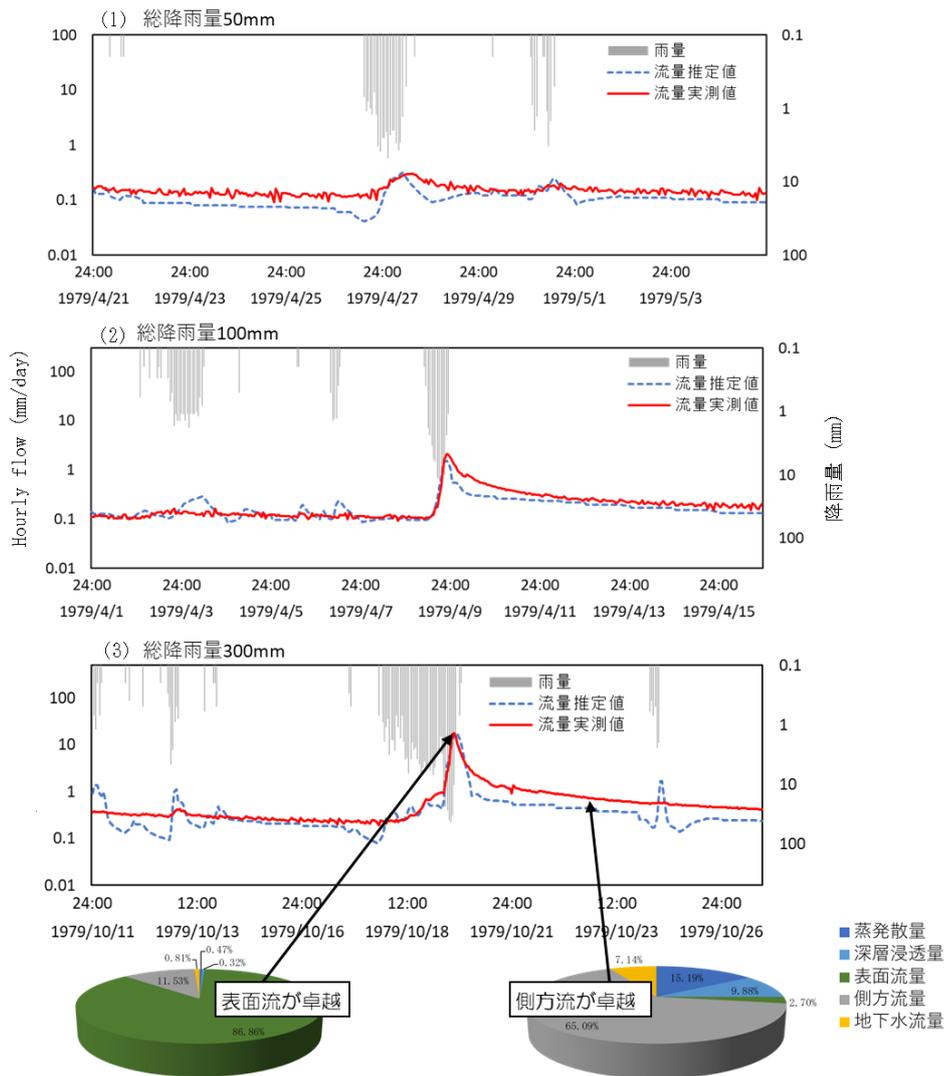


図 5-3 道志・過去モデル出力結果を元にした
 (1) 小、(2) 中、(3) 大の降雨イベントを含む時間流量ハイドログラフ

5.1.3. 森林の管理状態別（樹種別、林分疎密度別）〔評価の観点（イ）〕

次に、森林の管理状態別にみた水源涵養機能について評価するため、樹種別、林分疎密度別に算出した水収支の結果を、図 5-4 及び図 5-5 にそれぞれ示す。

樹種別水収支の分析には、比較的多くの林相が分布している道志・現代と道志・過去モデルの結果を用いた。ただし、道志・過去モデルについては、特に蒸発散量の割合が過大に推計されている可能性があるため、参考値として取り扱った。また、林分疎密度別水収支の分析には、実態に近いデータである道志・現代モデルの結果のみを用いた。

(1) 樹種別水収支

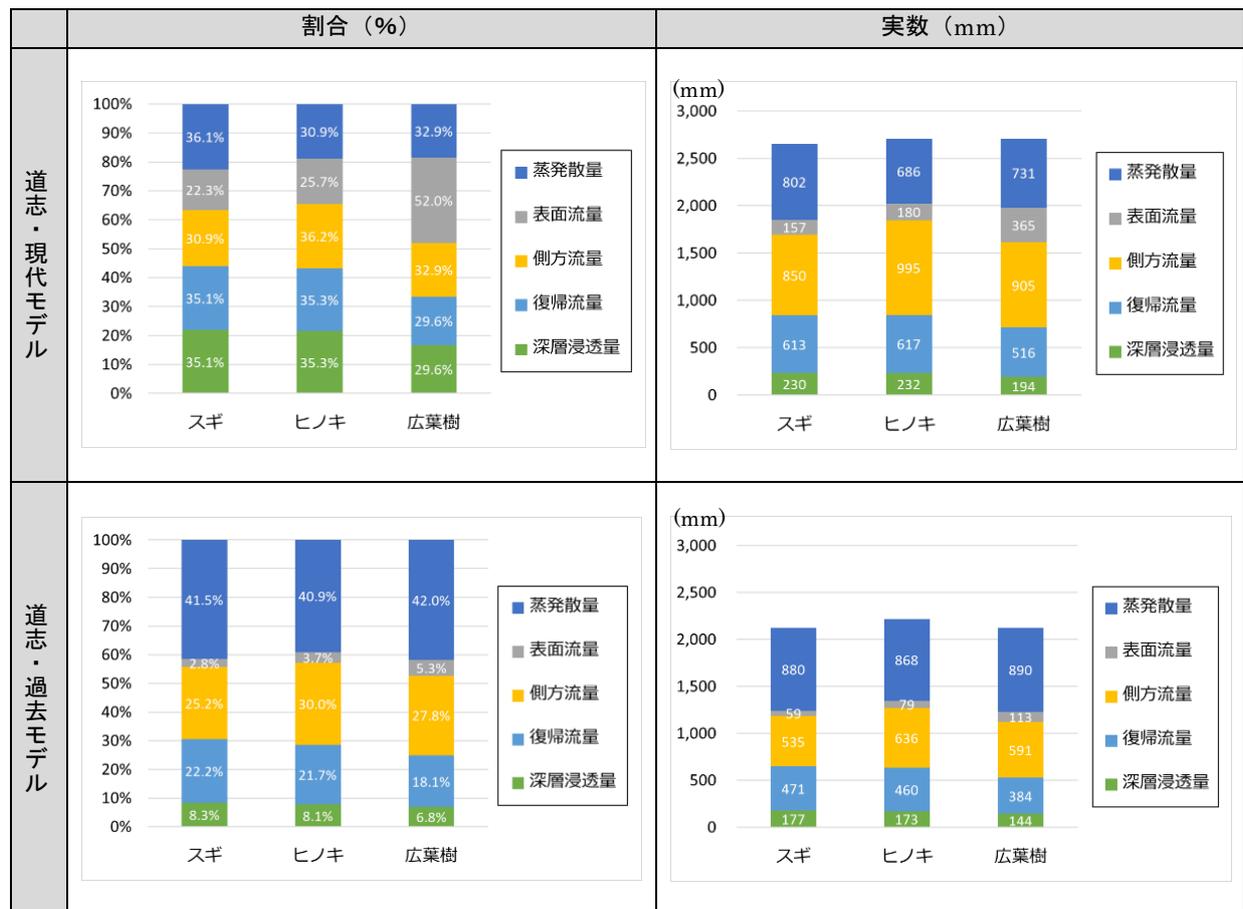


図 5-4 樹種別水収支（上：道志・現代モデル、下：道志・過去モデル）

蒸発散量について樹種別にみると、一般的には広葉樹林よりも葉量が多い針葉樹林の方が蒸発散量も多いと言われているが、道志・現代モデルでは、スギの蒸発散量が最も多く、次いで、広葉樹林、ヒノキとなった。また、道志・過去モデルにおいては、広葉樹、スギ、ヒノキの順で多かった。

道志・現代モデル、道志・過去モデルともに広葉樹林の方がスギ、ヒノキ林よりも表面流量が多くなっていることについては、既往文献等による妥当性の確認が必要である。

(2) 林分疎密度別水収支

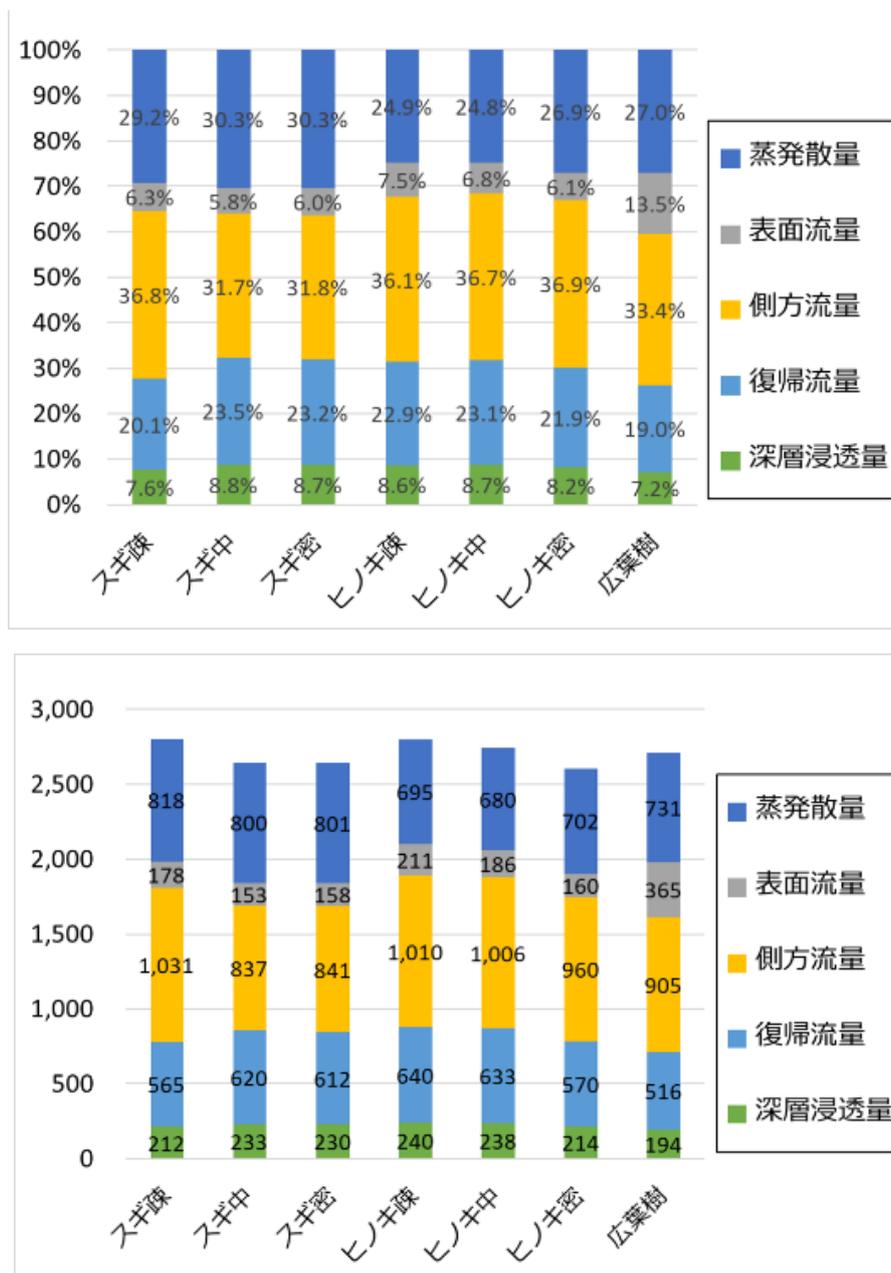


図 5-5 林分疎密度別水収支 (道志・現代モデル)
(上：割合(%)、下：実数(mm))

林相と LAI の関係性に関する調査の中で、特に「スギ 20-30 年生」や「ヒノキ 30-40 年生」など、立木密度が高い林分については LAI 値も高いという知見が得られた。一方で、林分疎密度区分（疎・中・密）のうち、「密」の蒸発散量が「疎」や「中」に比べ、蒸発散量が多くなることが予想されたが、本結果では、さほど明確な差は見られなかった。

また、表面流量は、林分疎密度が「中」や「密」よりも「疎」で若干多くなり、妥当な結果とみられた。

5.1.4. 森林の成熟状態別（林齢別）[評価の観点（ロ）]

次に、道志・現代及び過去モデルについて、林齢別の水収支を比較した（図5-6）。ただし、蒸発散量の推計に課題のある道志・過去モデルは、参考値とした。

(1) 林齢別水収支

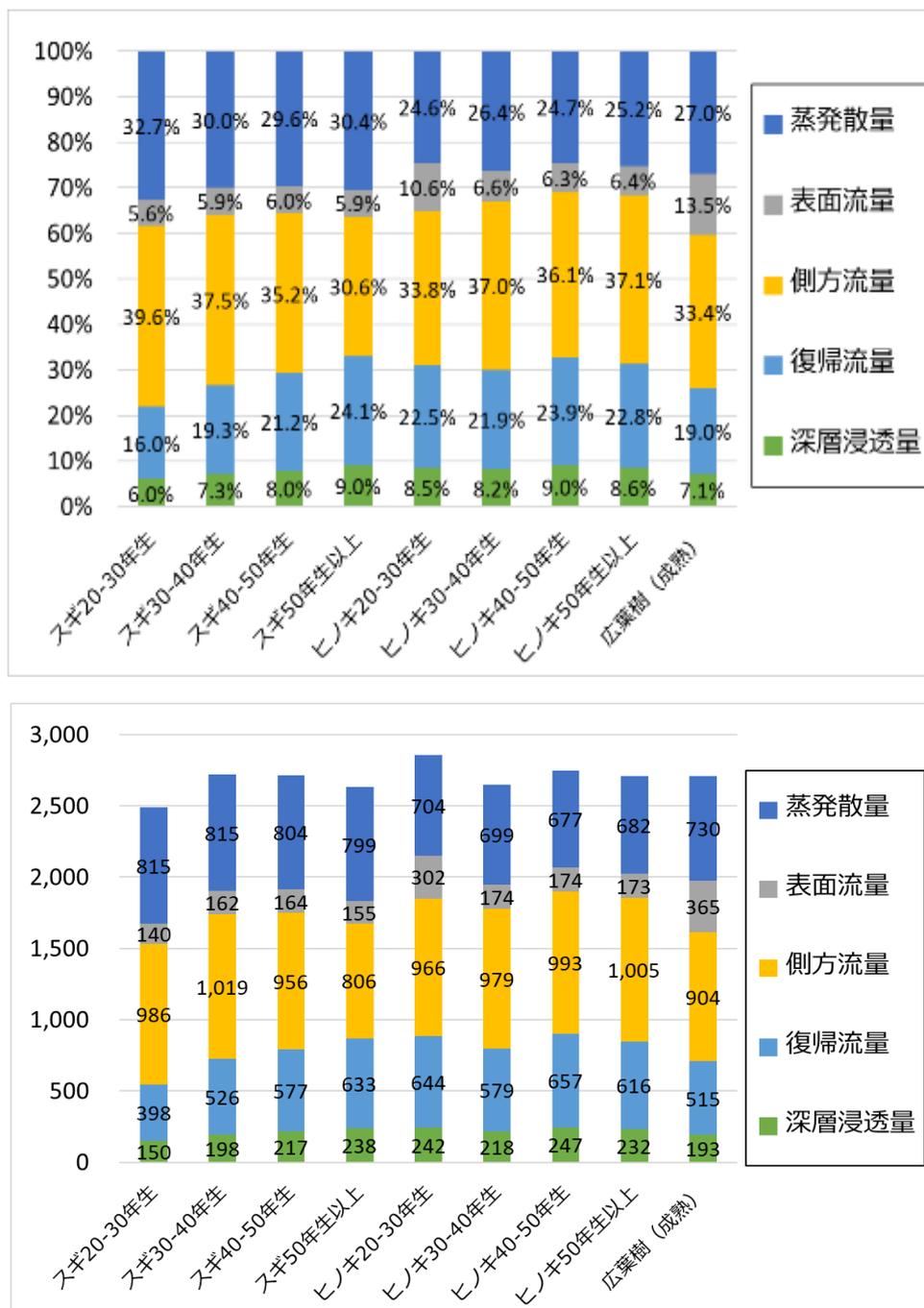


図5-6 林齢別水収支（道志・現代モデル）
（上：割合(%)、下：実数(mm)）

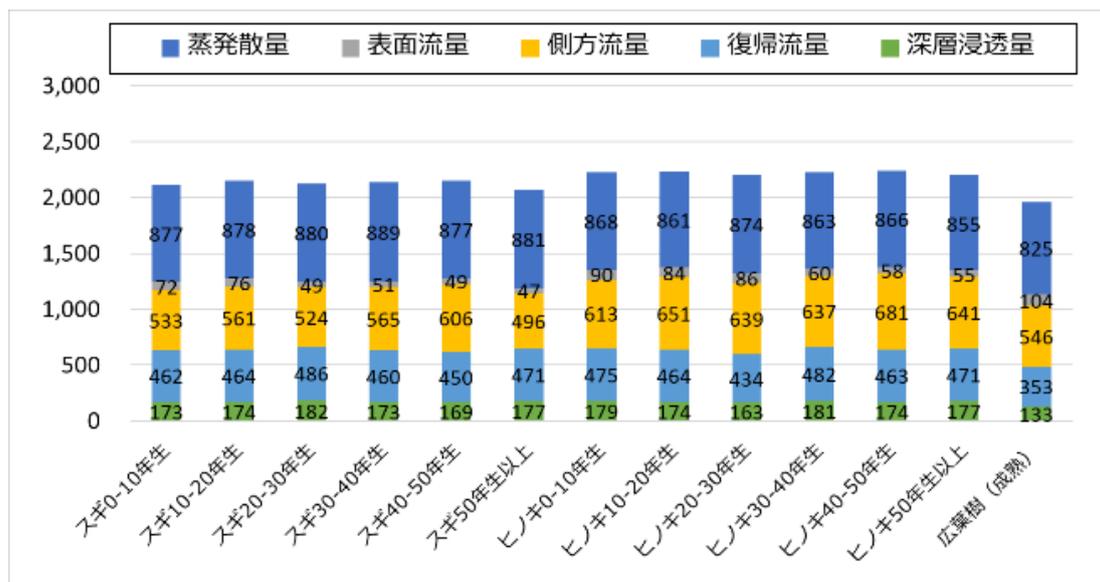
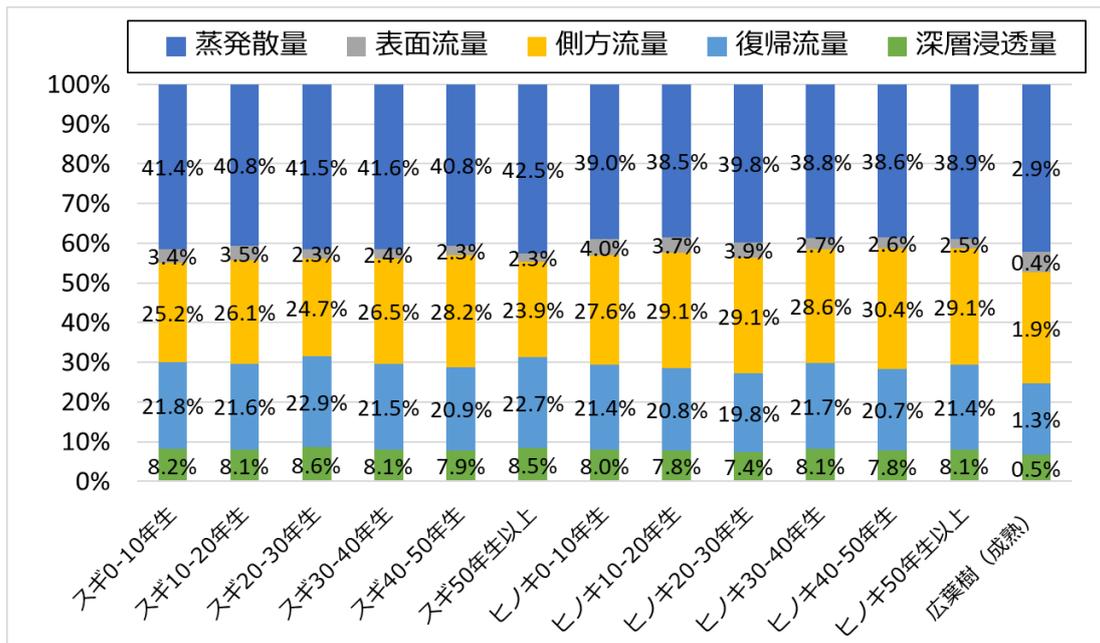


図 5-7 林齢別水収支 (道志・過去モデル)
(上：割合(%)、下：実数(mm))

道志・現代モデルの林齢別の水収支についてみると、特にスギ林における復帰流量や深層浸透量に林齢の影響が表れているともみてとれる。両者は、林齢の高まりとともに増加しており、森林の成熟が流出の安定や水の貯留に貢献している可能性を示唆しているが、一方で、ヒノキ林では顕著な違いはみられなかった。

5.2. 洪水緩和機能の評価

洪水緩和機能の評価に当たっては、2019 年台風 19 号の大出水時の流出特性を把握するため、2019 年の 1 年間を対象として、道志・現代モデルと過去モデルで日単位のシミュレーションを行い、得られた結果を分析に用いることとした。

5.2.1. 森林の管理状態別 [評価の観点 (イ)]

(1) 樹種と蒸発散量の関係

樹種の違いが洪水緩和機能に影響する要因の一つとして、樹冠による遮断蒸発量の相違が考えられた。このため、蒸発散量に着目して分析を行った。図 5-8 の左図は、「降雨日」と「無降雨日」に分けて、日蒸発散量の値の分布を樹種別に表したものの、右図は、各 HRU における日降雨量と日蒸発散量の関係を樹種別に表したものである。

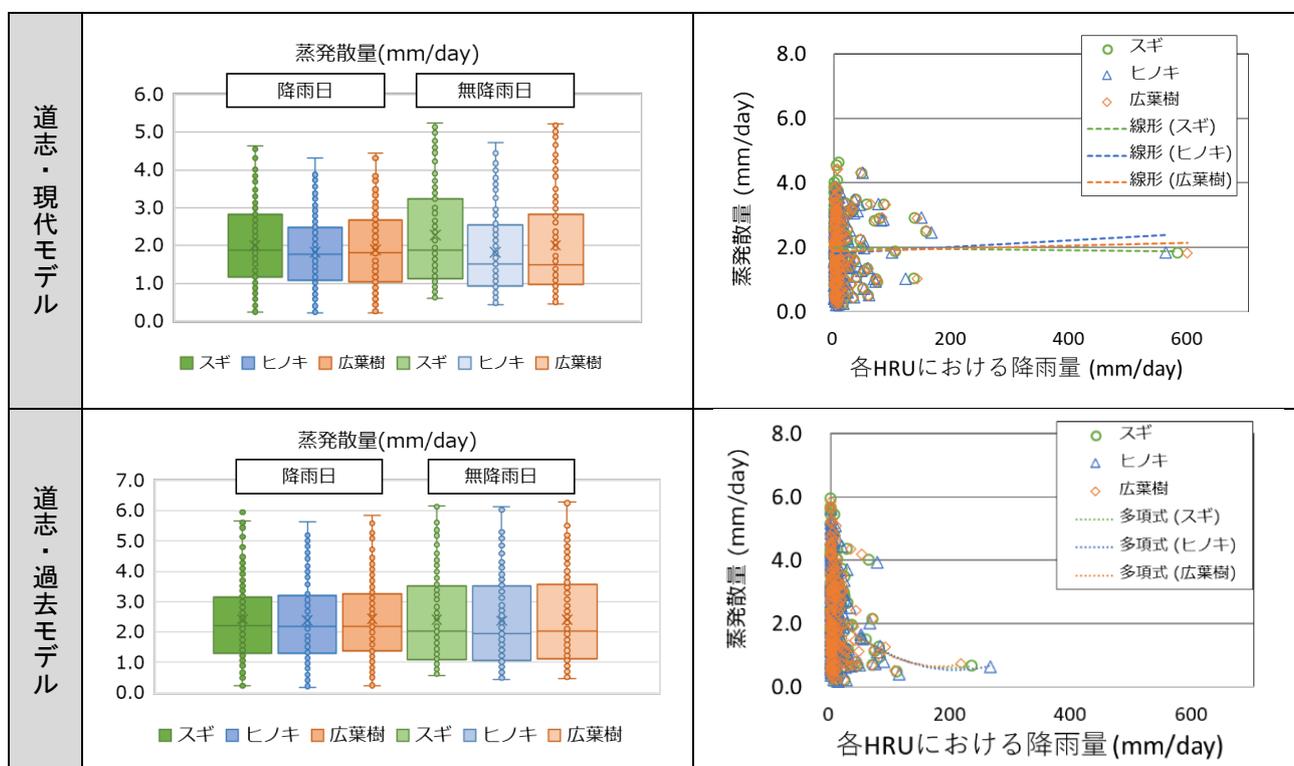


図 5-8 樹種と蒸発散量の関係

(左：樹種別にみる日蒸発散量の分布、右：日降雨量と樹種別日蒸発散量の関係)

左側の図に示すとおり、日蒸発散量の平均値は全体的に 2 mm程度であったが、樹種別にみると、ヒノキ林の蒸発散量が若干低めとなった。降雨日と無降雨日の比較では、無降雨日の方が分布にばらつきがみられた。また、現代モデルと過去モデルとの比較では、過去モデルにより算出された蒸発散量の方がやや大きい値となったが、これは「5.1 水収支の評価」の部分でも述べたとおり、道志・過去モデルの蒸発散量は過大推計の可能性があることから、水収支の再調整が必要と考えられる。

日降雨量と樹種別蒸発散量の関係を表す右図からは、日降雨量がどれだけ大きくても蒸発散量は

2mm を中心としてほぼ変わらないことが見てとれ、無降雨時と変わらず降雨中も遮断蒸発が生じるという研究結果²¹に沿った結果となった。降水量がゼロ付近では、蒸発散量は 0 から 6mm 程度の範囲で、広く分布している理由としては、日射量や風速などの気象条件の影響が大きいとも考えられる。

(2) 林分疎密度と蒸発散量の関係

同様に、林分疎密度と蒸発散量の関係についても、道志・現代モデルの結果を用いて分析を行った (図 5-9)。

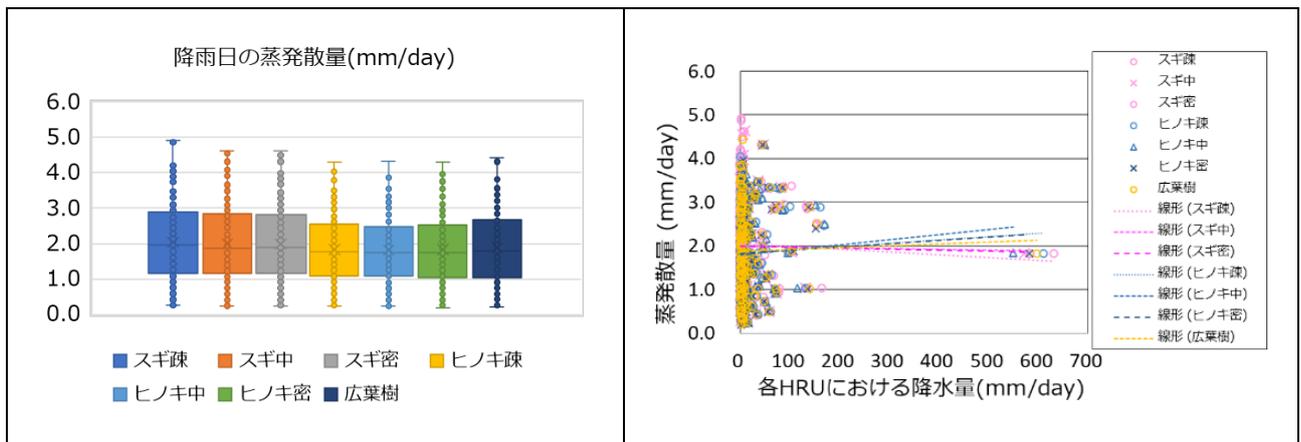


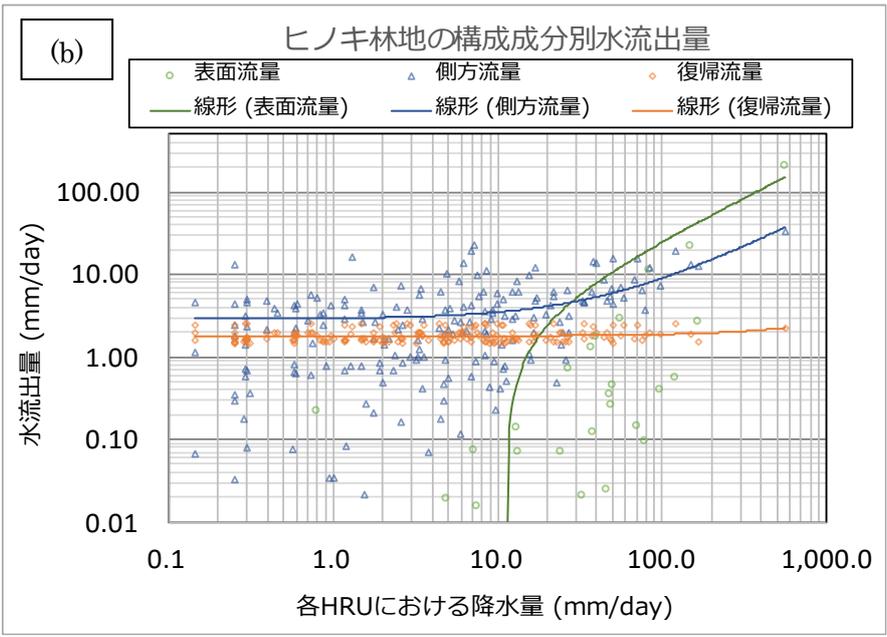
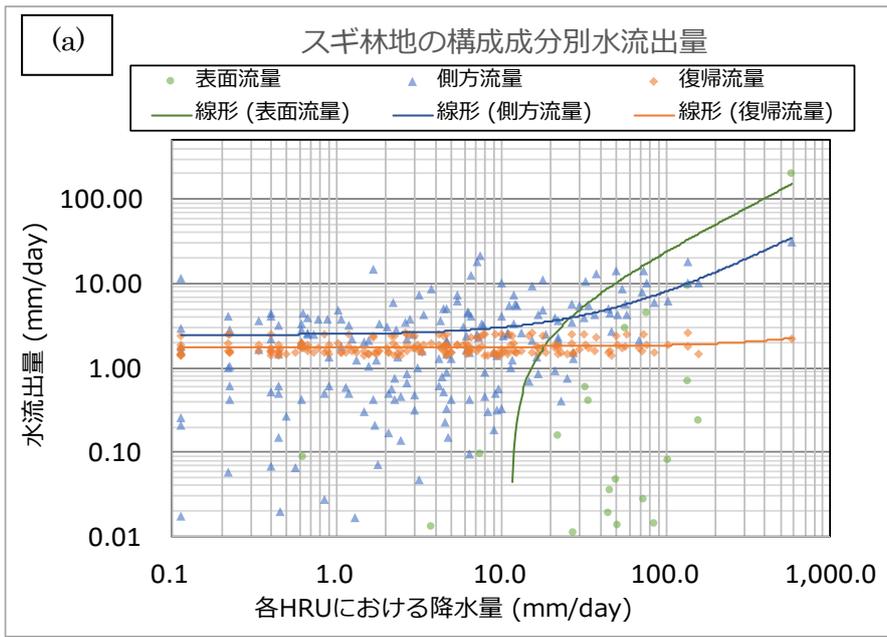
図 5-9 林分疎密度と蒸発散量の関係 (道志・現代モデル)

左図から分かるとおり、樹種による相違は多少認められるものの、林分疎密度の違い (疎・中・密) による蒸発散量の変化はほとんどみられなかった。また、右図からは、樹種別の分析結果と同様、降水量に応じて蒸発散量が増大するような傾向はほとんど見られず、モデルにより算出された蒸発散量は概ね 2mm/日が中心となった。

(3) 樹種と構成成分別流出量の関係

次に、樹種と水収支構成成分別の流出量の関係について分析を行った。ここでは、日降水量当たりの「表面流量」、「側方流量」、「復帰流量」(いずれも最終的には河川へと流出する量)を示した。

²¹ Iida et al. (2017): Intrastorm scale rainfall interception dynamics in a mature coniferous forest stand. Journal of Hydrology, 548, 770-783.



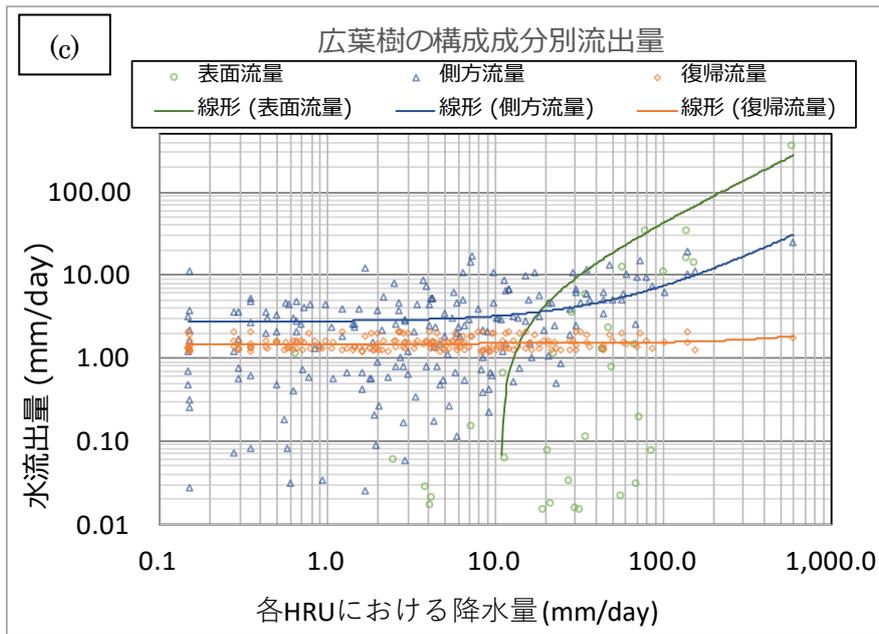


図 5-10 樹種と構成成分別流出量の関係
(a) スギ、(b)ヒノキ、(c)広葉樹

いずれの樹種においても、降水量が約 40 mm以上になると、直接流出である表面流や側方流は増加する一方、基底流出に相当する、地下水からの復帰流量は降水量にほとんど左右されないことが示された。

5.2.2. 森林の成熟状態別 [評価の観点 (ロ)]

ここでは、森林の成熟状態が洪水緩和機能に及ぼす影響を評価するため、道志・現代モデルの結果を用いて林齢と蒸発散量の関係について分析を行った (図 5-11)。

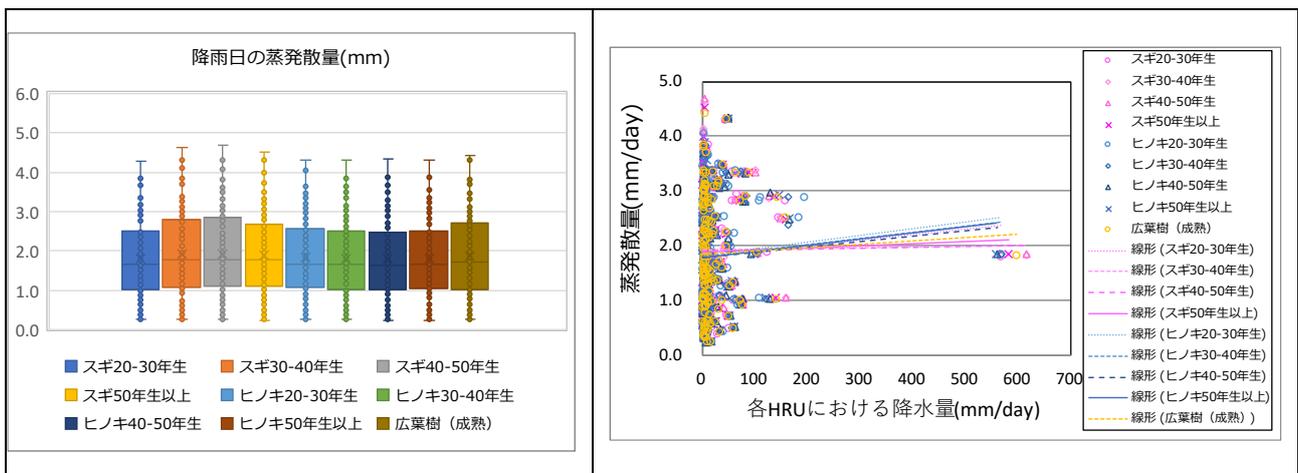


図 5-11 林齢と蒸発散量の関係

樹種や林分疎密度と同様、異なる林齢区分間において、蒸発散量に顕著な違いはみられず、ま

た、降水量に応じた蒸発散量の大きな変化もない結果となった。

5.3. 渇水緩和・水資源貯留機能の評価

今年度は、森林の管理状態別 [評価の観点 (イ)] の評価のみ実施した。

(1) 林分疎密度と浅層浸透量の関係

図 5-12 に、林分疎密度と日単位の浅層浸透量の関係を示した。なお、今回の結果は、洪水緩和機能の分析と同様に、道志・現代モデルの 2019 年のシミュレーション結果に基づいて分析したのだが、長期的な流出を評価する場合には、降水傾向 (多雨年・少雨年) の違いも分析できるよう、より長期間での年ベースのシミュレーション結果を用いることも有効と考えられる。

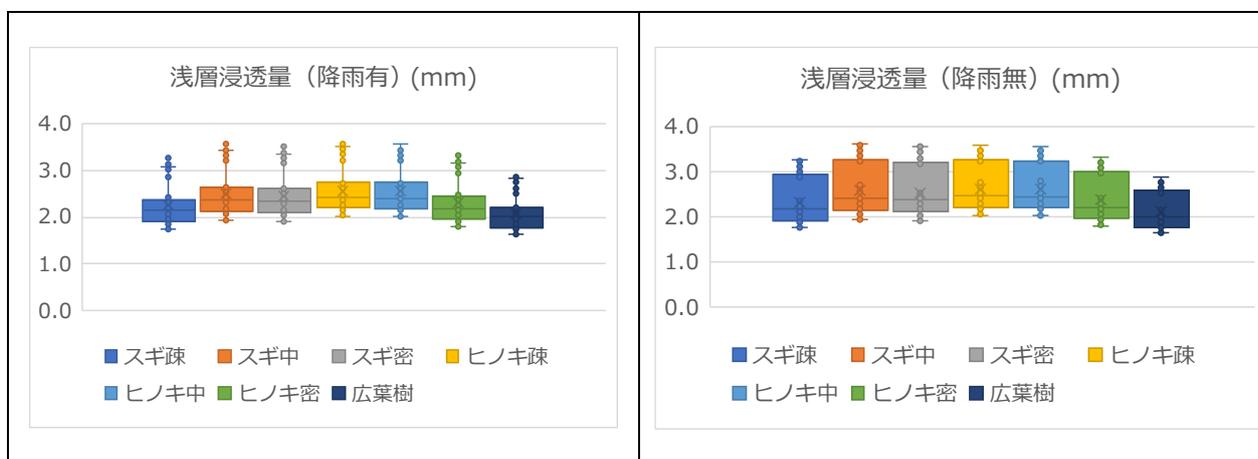


図 5-12 林分疎密度と浅層浸透量の関係 (左：降雨ありの日、右：降雨なしの日)

浅層浸透量の分布は、降雨の有無にかかわらず、1.6 mmから 3.5 mmの範囲にあるが、降雨のない日のバラつきの方が大きかった。また、平均値は降雨ありの日で 2.29 mm、降雨なしの日で 2.45 mmと、後者の方が若干高い傾向がみられた。

林分疎密度別にみると、「スギ・疎」、「ヒノキ・密」、「広葉樹」の浅層浸透量が低めとなった。この要因については、蒸発散量や表面流量などの直接流出が大きく、地下浸透量が抑えられたことが関係しているものと考えられるが、他の期間でも分析を行うことも含め、精査が必要である。

(2) 林分疎密度と深層浸透量の関係

図 5-13 に、林分疎密度と日単位の深層浸透量の関係を示した。

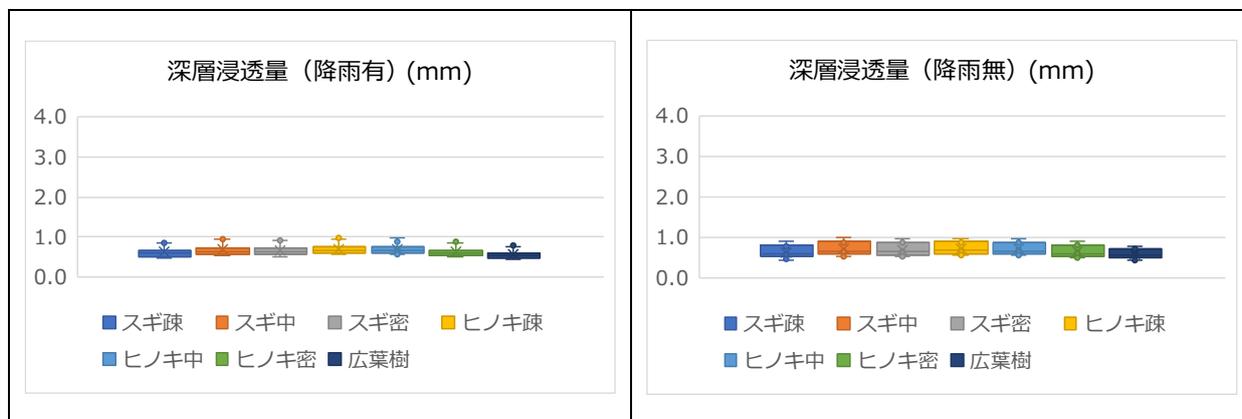


図 5-13 林分疎密度と深層浸透量の関係 (左：降雨ありの日、右：降雨なしの日)

深層浸透量の分布は、降雨の有無にかかわらず、0.45 mmから 0.99 mmの範囲にあるが、降雨のない日のバラつきの方がやや大きかった。平均値は降雨ありの日で 0.65 mm、降雨なしの日で 0.67 mmと、ほとんど差がなかった。

林分疎密度別には、ほとんど違いはみられないが、浅層浸透量と同様、「スギ・疎」、「ヒノキ・密」、「広葉樹」の深層浸透量がやや低めとなったが、浅層浸透量と同様、その要因については精査が必要である。

5.4. 考察

樹種や林齢、林分疎密度といった森林の状態と、水収支や様々な流出量との関係について分析を行ったものの、昨年度と同様に、森林因子の違いによる大きな変化はみられなかった。一方で、小さいものではあるが、ある程度の変化は見られることから、適切な森林整備のあり方を検討する上で引き続き留意する必要がある。今後、林相が異なり、その他の条件はすべて同一とした2つのモデルの結果を比較することで、より詳細な分析ができるものと考えられる。一例として、図 5-14 に、森林の成熟状態が異なる2つの年代間における流況曲線のイメージを記載した。

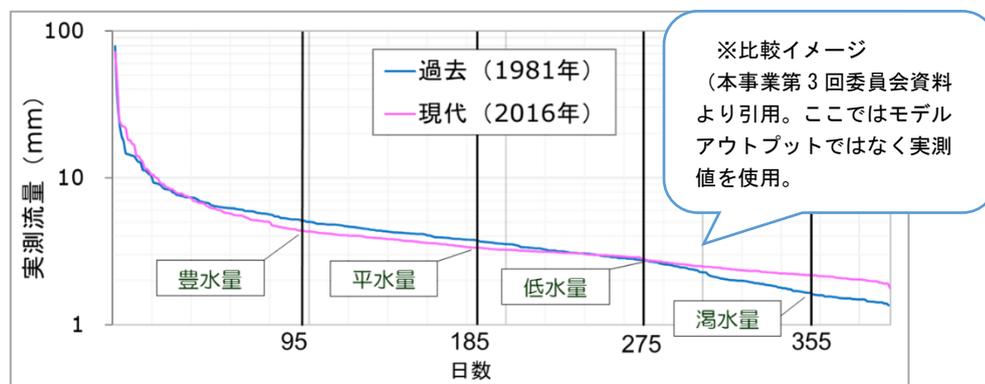


図 5-14 林齢別 (現代・過去) の流況曲線の比較

また、気象条件による影響に関しては、日降水量を含めた分析では、蒸発散量、復帰流量、地下（浅層・深層）浸透量は降水量の多寡の影響をほとんど受けないのに対し、直接流出である表面流と側方流は、日降雨量が40mmを超えるあたりから顕著に増加し、降水量の影響を大きく受けることが示唆された。なお、本年度は時間単位のモデルも構築したため、それを活用して降雨や河川流量のピーク時やピーク後の逡減についても分析を行うことで、より詳細な分析が可能となると考えられる。

今回、傾斜や土壌等、その他の立地因子と流出量との関係の分析までには及ばなかったが、特に、山腹崩壊から復旧した森林の影響評価を行う上では、地形や土壌等の立地因子が重要となってくると考えられることから、次年度、構築・精緻化予定の三保・現代と三保・過去モデルを用いて、崩壊からの回復に伴う水源涵養機能の変化を評価する際に改めての検討が必要と考える。

6. 森林の状態と水の動態を統一的に評価できる指標の検討と整理

6.1. 検討・整理の方向性

本調査の目的は、森林の有する水源涵養機能の状態（程度）に応じた森林管理のあり方の検討に資するよう、森林の公益的機能のうち水源涵養機能（特に洪水緩和や渇水緩和に資する効果）について定量的な把握と森林の充実に伴う変化や森林の管理状態による違い等について評価を行い、その関係性を分かりやすく整理することである。

図 6-1 に示すとおり、将来的には「水源涵養機能の評価基準の作成」等を目指すところではあるが、3 年計画で予定している本事業の中でそれに足る定量的なデータや評価結果を十分に得ることは難しい。このため、本事業では、図 6-1 の青枠の範囲である「森林の水源涵養機能の程度の整理」を行うこととし、第一段階として、本年度は赤枠の範囲で示す「①既存の水源涵養機能評価レビュー」、「②実測をベースとした対象流域の水文特性の把握」、「③SWAT モデル出力結果の活用例」について調査を進めることとした。

「④因子と流出量の関係性の評価」以降は、次年度以降、精緻化したモデルを用いての検討となるが、その検討に当たり、既往の研究においては、どのような因子をベースに水源涵養機能が評価されてきたか（①）、また、本事業の対象流域で実施された実測ベースの調査・研究ではどのような結果が得られているか（②）について本年度に整理した結果を以下に記載する。

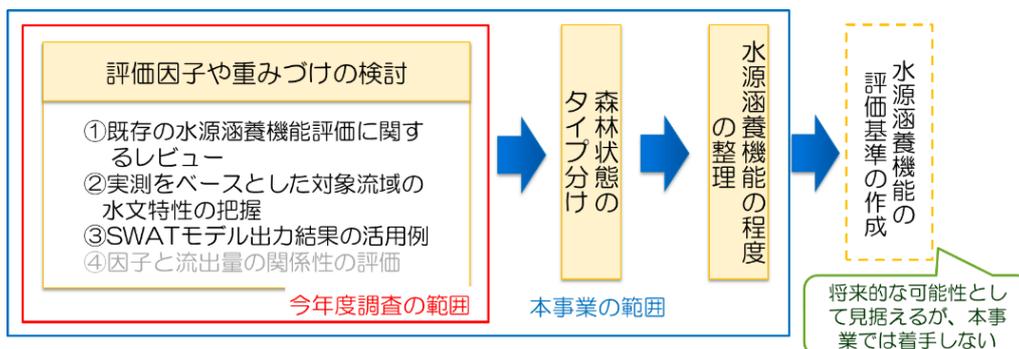


図 6-1 森林の状態と水の動態を統一的に評価できる指標の
検討と整理に係る作業全体像

6.2. 既存の水源涵養機能評価に関するレビュー

(1) 森林管理や森林の成長による影響

森林の伐採によって樹木の遮断蒸発量と蒸散量が変化し、水の流出量は変化する。群馬県の宝川水文試験地における調査では、皆伐によって直接流出量は 1.5～2.0 倍、ピーク時の流出量は 1.1～1.9 倍に増加した。また、帯状伐採によって融雪時の流出量の平準化がみられた（図 6-2、志水ら、1996）。

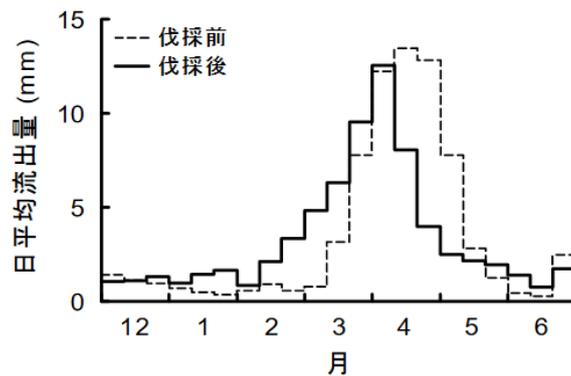


図 6-2 帯状伐採前後における旬流出量の平均値の変化（志水ほか、1996）

強度間伐により渇水期の河川流量が増加することを示す研究もある（図 6-3 福岡サイト（花崗岩流域）における間伐前後の流況曲線）。50%の強度間伐前後の 1 年間の流況曲線では、降水量はほぼ等しいにも関わらず、間伐後の低水・渇水指標は 1.3 倍に増加するとともに、豊水・平水時はやや減少した。

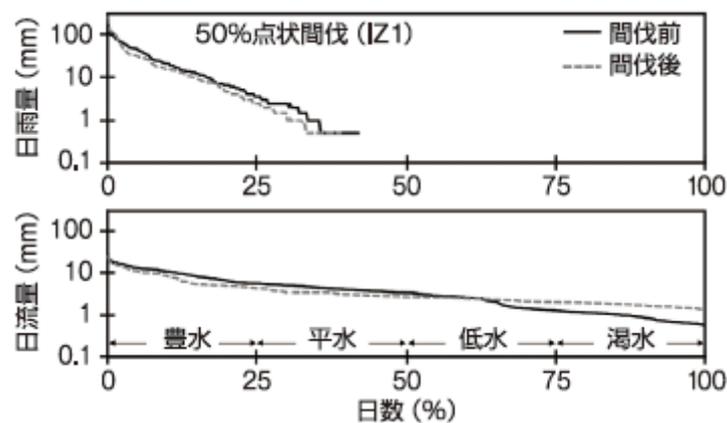


図 6-3 福岡サイト（花崗岩流域）における間伐前後の流況曲線

また、立木密度が高まるにつれて、遮断蒸発が高く、林床面蒸発散が低くなる傾向がある（図 6-4 立木密度と遮断蒸発散率（左）、立木密度と年林床面蒸発散量（右））。

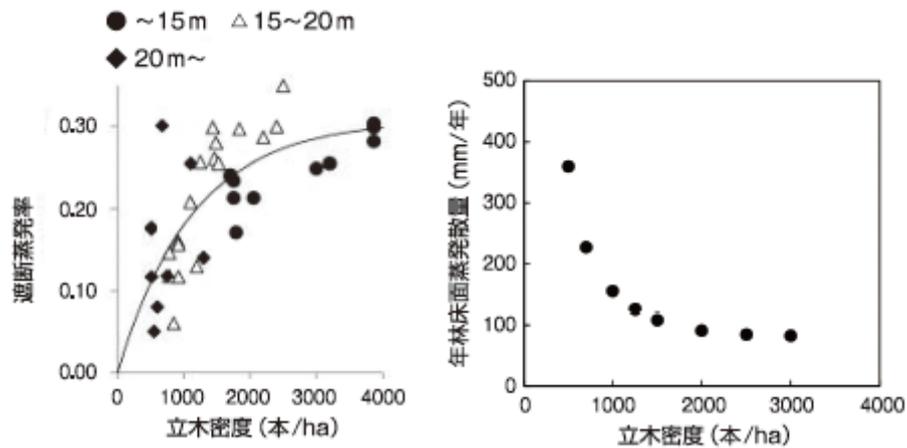


図 6-4 立木密度と遮断蒸発率（左）、立木密度と年林床面蒸発量（右）

また、スギやヒノキの人工林では、樹冠が閉鎖する林齢 15 年生頃までは蒸発散量が増加するため水流出量は減少するが、林齢の増加とともに回復する（図 6-5）。

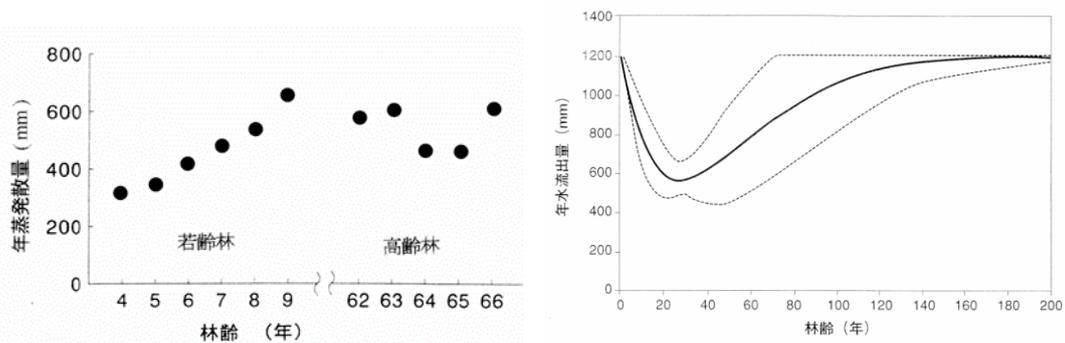


図 6-5 林齢と年蒸発散量（左）、林齢と年水流出量（森林総研、2011）（右）

(2) 下層植生や土壌による影響

森林は裸地などより土壌の透水性が大きいいため、ピーク流量が小さく、その後の通減も緩やかになるとともに、水貯留量も大きい（Ellison ら、2010。恩田、2000）。また、林床被覆がある斜面は裸地化した斜面より、表面流量が小さくなる（五味ら、2010）。しかしながら、大規模な降水イベントでは、流出ピークに達する前に流域の土壌が飽和に近い状態になるため、ピーク流量の通減効果は大きくは期待できず、降った雨の総量が 80mm 超える場合、直接流出量が急激に増加する傾向があるとの報告もある（五味ら、2010）。

森林の浸透能は、下層植生の乾燥重量と相関が高く（図 6-6 下層植生乾燥重量と浸透能の関係（平岡、2010））、地表面の約半分が下層植生で覆われていない場合、浸透能が 50 mm/時を下回り、大雨時に河川流出を増大させる可能性が高いと考えられる。

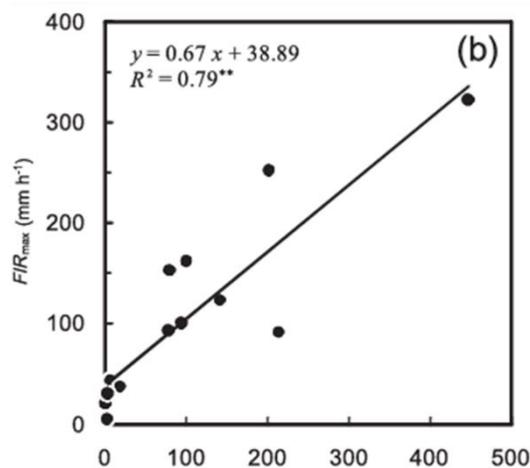


図 6-6 下層植生乾燥重量と浸透能の関係（平岡、2010）

なお、近年の研究では、かなりの量の雨水が基岩に浸透し、山体地下水として貯留・浸透することが明らかになりつつあり（小杉、2007）、地形や地質が洪水緩和機能や渇水緩和機能に与える影響も小さくないと考えられている。

今後、SWAT モデルを用いた水源涵養機能の評価に当たっては、これらの因子に着目した上でシナリオ分析等を行い、森林管理や森林の成長による影響の評価を行っていく必要がある。

6.3. 実測をベースとした対象流域の水文特性の把握

本事業では、モデル解析を通じた森林の水源涵養機能の評価を試みているが、モデルは必ずしも現実的なアウトプットを出力するとは限らないため、モデルによる推計結果が、実測データの示す傾向とかけ離れたものでないことを確認することが不可欠である。例えば、実測値が存在している降水量や流出量については、モデルを介さず、実測値そのもので分析を行うことで、流域本来の流出傾向を的確に把握し、正しい解釈を持ってモデルを調整することが可能になると考えられる。

また、今後、実施予定のシナリオ解析では、年降雨の傾向の違い（多雨・少雨）、季節的な変化、出水イベント等、特定の時点や期間に着目した解析を行うことも想定され、それらを検討する上でも対象流域の基本的な水文特性を把握しておくことは重要である。

このような観点から、以下に、対象流域の実測の水文データを図表により整理・可視化した結果について述べる。

(1) 降雨量と流出量の関係性の分析

以下の表 6-1 と図 6-7 に、各流域のシミュレーション期間における年降水量と月別の降雨量を示す。

年降水量は貝沢で最も少なく、三保・現代で最も多い。年間の変動としては、全ての流域で、6～10月に降雨が多くなる傾向がある。

表 6-1 各流域における月降雨量

流域	年	降雨量 (mm)												合計 (mm)
		1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	
貝沢	2013	56	34	60	223	32	202	73	84	372	446	28	57	1666
	2014	22	180	123	83	89	395	65	206	76	393	74	68	1772
	2015	107	35	99	118	81	182	400	100	391	32	145	68	1756
	平均 (mm)	61	83	94	141	67	260	179	130	280	290	82	64	1731
道志現代	2015	72	36	101	168	111	224	674	176	494	54	165	125	2400
	2016	14	152	100	163	135	145	129	570	348	90	140	138	2125
	2017	11	27	56	170	75	118	86	359	254	632	35	25	1847
	2018	60	22	255	118	199	181	438	423	638	87	41	49	2511
	2019	2	43	146	127	213	320	353	269	248	1052	128	74	2974
	平均 (mm)	32	56	132	149	147	197	336	360	397	383	102	82	2371
道志過去	1978	5	41	108	180	106	195	209	66	210	166	84	35	1403
	1979	53	111	96	184	193	137	240	140	191	521	289	28	2183
	1980	71	13	156	170	220	184	199	180	339	197	128	24	1879
	1981	5	27	192	185	192	122	228	405	177	320	138	12	2004
	1982	33	57	119	168	85	258	162	701	674	219	149	26	2650
	平均 (mm)	33	50	134	178	159	179	207	298	318	285	158	25	2024
三保現代	2015	133	70	113	179	148	205	738	212	567	83	193	129	2770
	2016	87	115	148	202	196	164	188	209	426	167	165	156	2223
	2017	34	55	101	192	84	119	61	488	244	637	46	15	2076
	2018	105	11	309	211	254	165	560	398	562	95	37	73	2780
	2019	15	52	141	172	288	285	307	428	192	867	152	89	2988
	平均 (mm)	75	61	162	191	194	188	371	347	398	370	119	92	2567

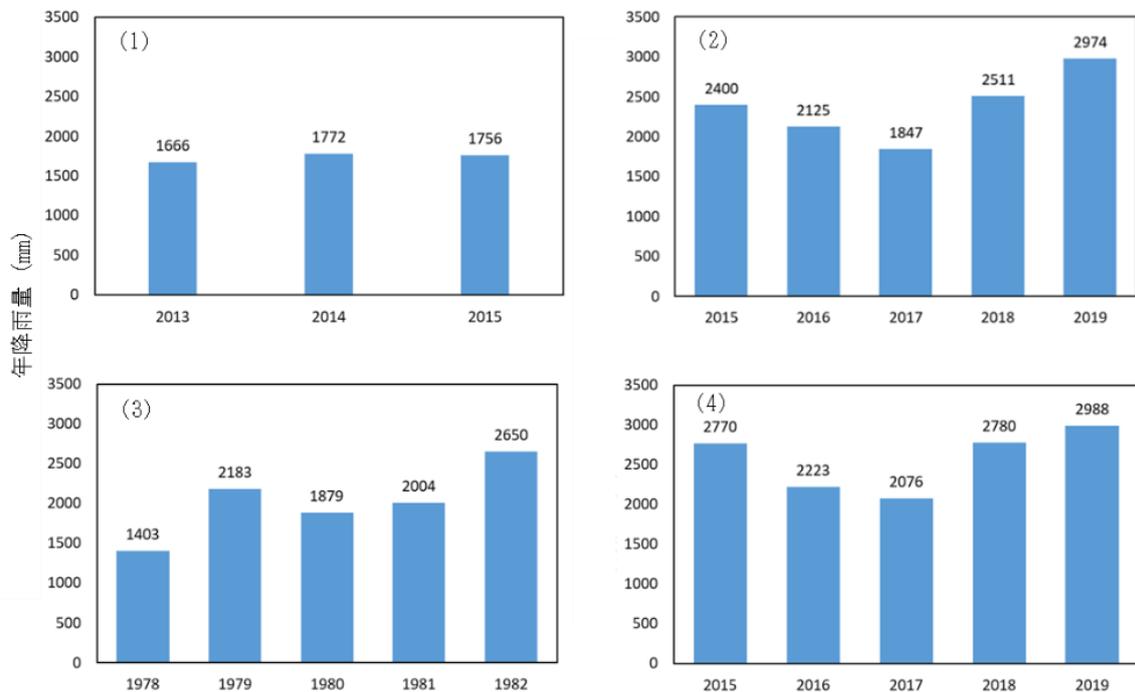


図 6-7 各流域におけるシミュレーション期間の年降水量

(1) 貝沢 (2) 道志・現代 (3) 道志・過去 (4) 三保・現代

また、図 6-8 には、流域別の日降水量と日流量ハイドログラフを示した。

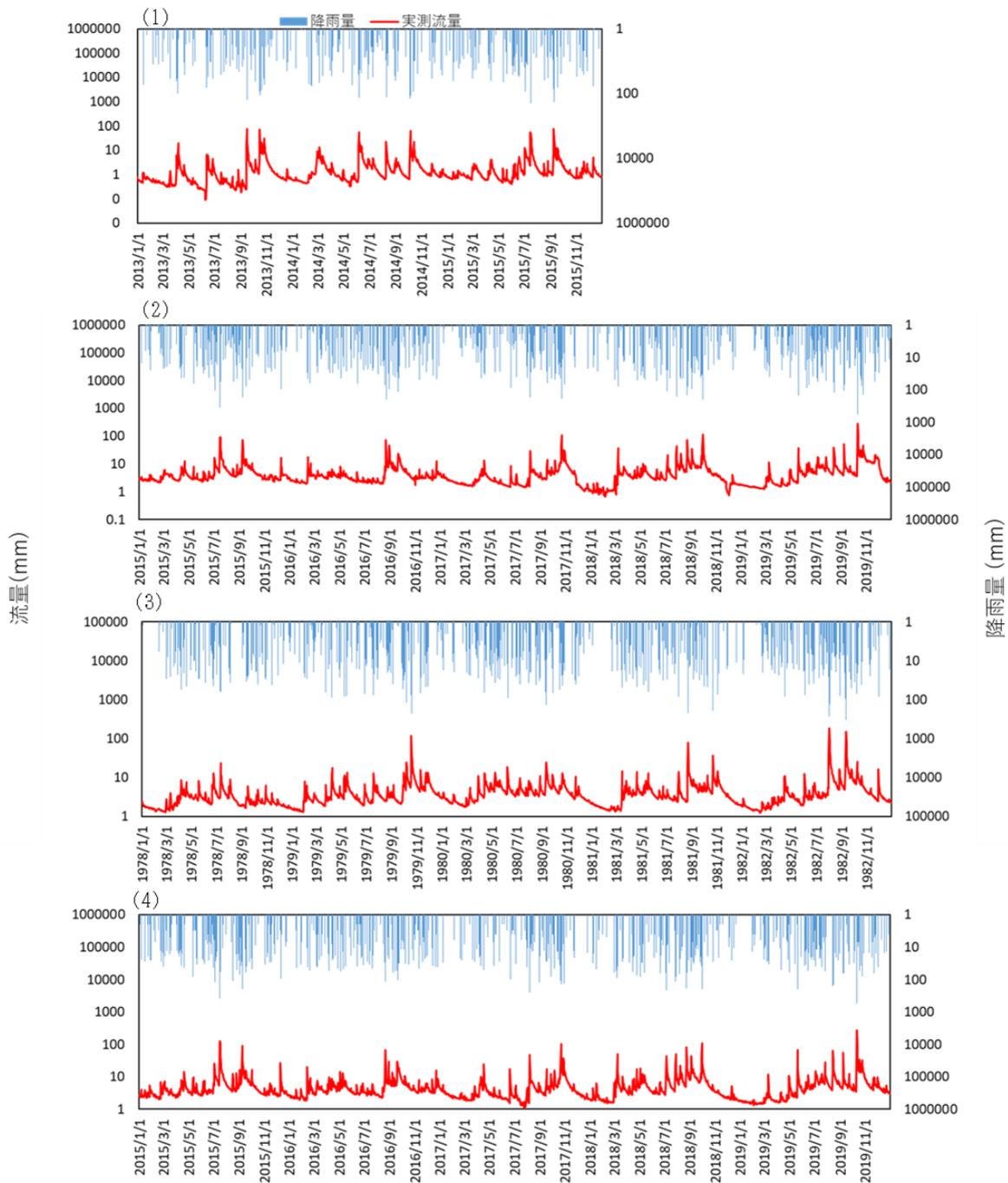


図 6-8 日流量ハイドログラフ

(1) 貝沢 (2) 道志・現代 (3) 道志・過去 (4) 三保・現代

このように、実測の雨量や河川流量（道志ダム集水域、三保ダム集水域についてはダム流入量）等のデータを図表化することで、流域の基本的な降雨・流出応答を把握できるほか、評価軸や評価項目に応じた、適切な解析期間・時点等の検討に役立てることができる。

図 6-9 は、各流域の年間の降水量（流域平均）と実測流量の関係を示したものである。

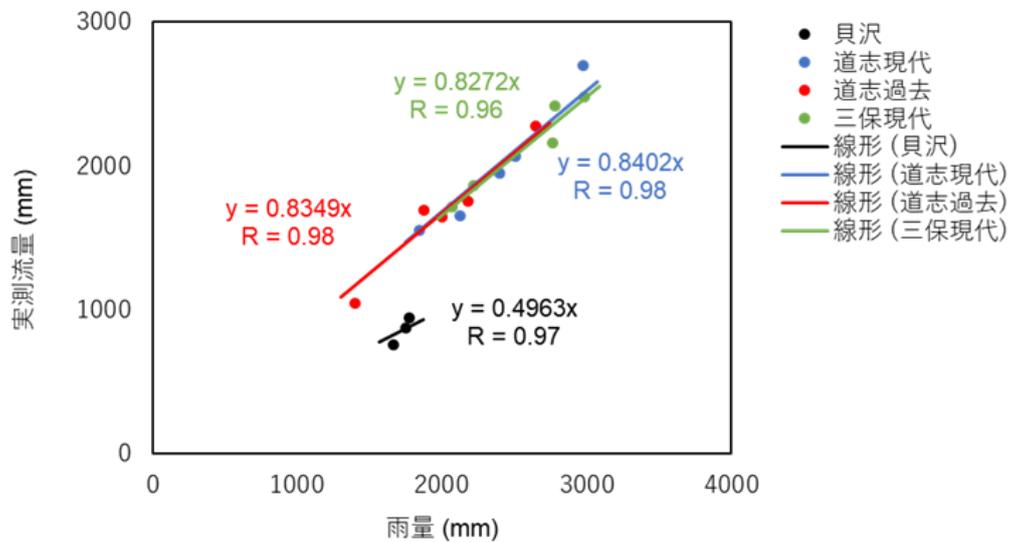


図 6-9 流域毎の年降雨量と流量の関係

年降水量（雨量）と年流量（実測流量）は高い相関関係にあり、流量は年降雨量の増加に応じて増加する。

また、流量は、流域に規模によっても影響されることがみてとれ、例えば、年降水量が 2,000 mm の条件下では、規模の小さい貝沢流域（34ha）の流量は約 990 mm、規模の比較的大きい三保ダム集水域（1 万 ha 超）の流量は約 1,680 mm、流出率（年降雨量に対する年流量）はそれぞれ、50%、84%程度となり、流域の規模が大きいくほど、流出率が高くなる傾向が伺えた。また、近似式の傾きから、その差は流域の規模が大きくなればなるほど顕著に現れることが読み取れる。

(2) 過去・現代の流出傾向の把握

図 6-10 は、森林状態が異なる現代と過去において、豊水時や渇水時の流量に違いがあるのか、すなわち洪水緩和や渇水緩和の機能を評価するため、1970 年から 1979 年までの 10 年間と、2010 年から 2019 年までの 10 年間の道志ダム流入量から作成した流況曲線図である。

平水流量や低水流量は、年別の変動幅が比較的小さいのに対し、豊水流量や渇水流量は、その年の豪雨や少雨の発生頻度の影響を受けるためか、年によってばらつきが大きい。例えば、2019 年に関東地方で発生した台風 19 号は、10 月 10 日から 13 日までの総雨量が 500 mm を超えた観測所が多くみられ、神奈川県箱根町では 1,000 mm を超すなど、記録的な豪雨となった。流況曲線においてもその影響は顕著であり、2019 年の豊水流量は近年の中でも極めて高い。

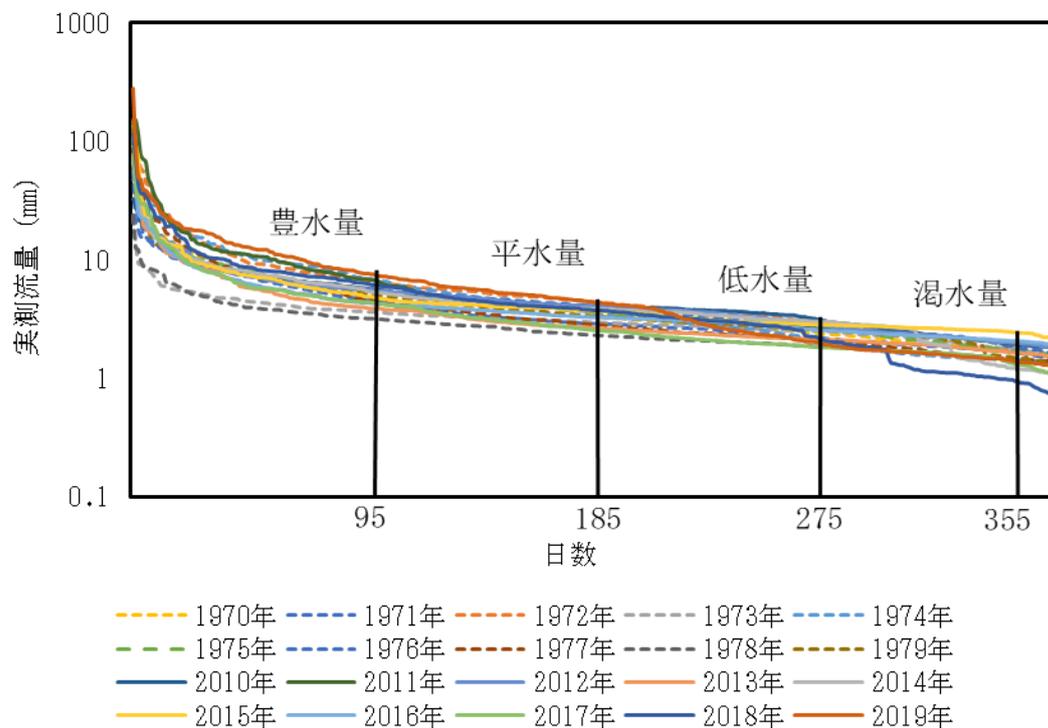


図 6-10 道志ダム流入量から作成した流況曲線（点線が過去、実線が現代。縦軸は対数表示）

現代と過去の異なる森林状態が及ぼす流出への影響を量るという観点においては、年によって降水量が異なるため、図 6-10 の流況曲線から森林のみの影響を読み取ることは難しいが、集水域から道志ダムに年間に流入する量とタイミングの大まかな傾向はみてとれる。

(3) まとめ

流域本来の流出傾向を的確に把握し、モデルに反映させるため、また、年降雨の傾向（多雨、少雨）や季節的な変化、イベント毎の出水傾向など、異なる要素・条件を多角的に解析するためのシナリオ作成に有効な、対象流域の基礎的な水文データについて一定程度、検討・整理することができた。今後は、日・月・年単位のデータ集計だけでなく、洪水緩和評価に資する時間単位のデータについても整理が必要である。

6.4. SWAT モデル出力結果の活用例

SWAT モデル出力結果の活用例については、「5. 水源涵養機能の森林の成長や回復等による変化に係る評価」に記載したグラフ等をもとに作成するものになるが、現時点ではモデルに課題が残っているため、ここでは、利用目的に応じたモデルの精緻化レベルについて整理した（図 6-11）。

SWAT モデルは、組み込みのデータベース等を用いて簡易にシミュレーションを実施できることがメリットであるが、アウトプットの活用目的が、森林の詳細な情報に基づくものであればあるほど、モデル構築段階におけるインプットデータの精細レベルも高くなる。

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	<ul style="list-style-type: none"> 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 	
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解明・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解明や流出量の違いを把握したい場合。

図 6-11 利用目的に応じたモデルの精緻化レベル

例えば、森林・林業基本計画では、自然条件や社会的条件が不利な森林は、針広混交林や複層林への誘導が推奨されており、そのような森林整備がもたらす水源涵養機能への影響についての評価が求められるものの、上図の「一般的」なレベルでモデル構築を行っている本事業では、複雑な森林状態の評価が難しい。

一方で、本事業では、樹種、林齢、林分疎密度（収量比数を基にした疎密度）で細分化した森林状態を反映することまでは可能であること、また、日流量や時間流量での評価も行っていることから、これらの要素を活用し、「高度」なモデルに近づけるための検討を進めていくことが、今後重要となってくるものと考えられる。

7. 森林の水源涵養機能に係る解説資料の作成

7.1. 洪水緩和機能等の評価結果に係る概要版の取りまとめ

主に森林行政職員が一般向けの説明等に用いることを想定し、本業務において、SWAT モデルを用いて行った水源涵養機能の評価結果を基に、科学的なメカニズムと水源涵養機能の発現効果に関連づけられるよう、洪水緩和機能等の評価結果に係る概要版を巻末資料（3）のとおり作成した。なお、前述のとおり、SWAT モデルによる分析・評価は本年度は暫定的なものとなったため、本概要版も暫定のものとした。

7.2. 森林の水源涵養機能の評価に係る解説資料の作成

森林の水源涵養機能に係る解説資料の作成については、調査最終年度において草稿を仕上げることを念頭に、本年度は、過年度調査において検討した項目に関し、検討委員の意見や助言を得るなどにより昨今の森林の状況や最新の研究成果等を踏まえつつ、当年度及び過年度の調査内容を踏まえた草稿の骨子を作成した。

草稿骨子の項目を表 7-1 に、全文を巻末資料に示す。

表 7-1 森林の水源涵養機能に係る解説資料の草稿骨子の項目

1.	森林の水源涵養機能の定義とその重要性
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
1-2	我が国における水循環と森林のはたらき
2.	森林・緑化・保安林管理の歴史と森林景観の変化
2-1	森林の変遷と管理（過去と現在の森林の比較）と災害の歴史、森林と変遷と政策
2-2	今求められる森林景観・林相（人工林管理、混交林化など）
2-3	森林税や水源税の導入と水源管理の取組
2-4	今求められる森林の水源涵養機能の評価軸
3.	森林の水循環の構成要素
3-1	蒸散・遮断・林床面蒸発
3-2	表土の浸透能、土壌水移動
3-3	水流出
3-4	降雨⇒森林⇒土壌⇒河川
4.	森林や流域状態と水源涵養機能の発揮
4-1	多様な水循環の要素と多様な森林状態から流域の水源涵養機能評価の重要性
4-2	土地利用に関する因子
4-3	森林状態に係る因子
4-4	林床植生・土壌表面に係る因子
4-5	土壌や基岩に係る因子
4-6	モデルの重要性
5.	森林状態の変化と水循環の変化
5-1	自然かく乱
5-2	森林施業に係る因子
6.	流域の森林状態と水源涵養機能の評価
6-1	評価軸ごとの森林の水源涵養機能評価
6-2	これからの森林管理シナリオと水源涵養機能評価
7.	水源涵養機能の評価結果から見た、今後の森林のあるべき姿
7-1	流域の視点からみた気候変動と森林管理
7-2	必要な観測やモデル化の取組

上記をもとに、次年度以降は執筆依頼、草稿の作成、引用データの選定、挿入イラストの検討を行う見通しである。

8. 検討委員会の開催

本事業の実施に当たり、専門的な見地から検討を行うため、表 8-1 の有識者 6 名（委員）、技術アドバイザー、オブザーバーから構成される検討委員会を表 8-2 に示す日程及び議事内容にお

いて実施した。

尚、各委員会の議事要旨を巻末資料に添付した。

表 8-1 委員会有識者

氏 名	所 属	専門分野
恩田 裕一	筑波大学 アイソトープ環境動態研究センター センター長 放射性物質環境移行部門 教授	水文学、地形学
小杉 賢一郎	京都大学大学院 農学研究科 森林科学専攻 教授	土壌物理学、山地保全学、森林水文学
五味 高志	東京農工大学 農学研究院 国際環境農学部門 教授	流域水文学、砂防学、流域生態系管理学
白木 克繁	東京農工大学 農学研究院 自然資源保全学部門 准教授	森林水文、砂防工学、地すべり
玉井 幸治	(国研) 森林研究・整備機構 森林総合研究所 森林防災研究領域長	流域水収支、森林火災、林床面環境
堀田 紀文	東京大学大学院 農学生命科学研究科 森林科学専攻 准教授	砂防工学、森林水文学
大西 健夫 (技術アドバイザー)	岐阜大学 応用生物科学部 准教授	陸域水文モデル、気候変動
内山 佳美 (オブザーバー)	神奈川県自然環境保全センター 研究企画部 主任研究員	

(氏名五十音順)

表 8-2 検討委員会の実施日程

検討委員会	日時	場所	議事
第 1 回 検討委員会	令和 2 年 7 月 19 日 (月) 13 : 30 ~ 16 : 00	日本森林技術協会 3 階大会議室 及びオ ンライン	1) 「水源涵養機能の解説・評 価」に関する成果及び課題 2) 「水源涵養機能の解説発信」 に関する成果及び課題 3) その他
第 2 回 検討委員会	令和 3 年 11 月 16 日 (火) 13 : 30 ~ 16 : 00	日本森林技術協会 3 階大会議室 及びオ ンライン	1) 第 1 回検討委員会における指 摘事項 2) 水源涵養機能の解析・評価 3) 水源涵養機能の解説発信 4) 今後の調査計画
第 3 回 検討委員会	令和 4 年 2 月 24 日 (木) 9 : 30 ~ 12 : 30	日本森林技術協会 5 階中会議室及びオン ライン	1) 第 2 回検討委員会における指 摘事項を踏まえた検証・改善 事項 2) 水源涵養機能の解析・評価 3) 水源涵養機能の解説発信

9. 引用文献

- Abe, T., Kubota, T., Noguchi, S., 2016. Characteristics of snow interception and snowmelt at a deciduous broad-leaved stand and a Japanese cedar stand in snowy Tohoku district, in 2013/2014 winter. *Tohoku J. For. Sci.* 21, 6-10.
- Benyon, R.G., Doody, T.M., 2015. Comparison of interception, forest floor evaporation and transpiration in *Pinus radiata* and *Eucalyptus globulus* plantations. *Hydrol. Process.* 29, 1173-1187.
- Businger, J.A., 1956. Some remarks on Penman's equations for the evapotranspiration. *Netherlands J. Agric. Sci.* 4, 77-80.
- Chiu CW, Kume T, Komatsu H, Tseng H, Wey TH, Otsuki K. (2016) Seasonal changes of azimuthal, radial, and tree-to-tree variations in sap flux affect stand transpiration estimates in a *Cryptomeria japonica* forest, central Taiwan. *Journal of Forest Research.* 21 151-160.
- Daikoku, K., Hattori, S., Deguchi, A., Aoki, Y., Miyashita, M., Matsumoto, K., Akiyama, J., Iida, S., Toba, T., Fujita, Y., Ohta, T., 2008. Influence of evaporation from the forest floor on evapotranspiration from the dry canopy. *Hydrol. Process.* 22, 4083-4096.
- Deguchi, A., Hattori, S., Park, H.T., 2006. The influence of seasonal changes in canopy structure on interception loss: Application of the revised Gash model. *J. Hydrol.* 318, 80-102.
- Dietz, J., Hölscher, D., Leuschner, C., Hendrayanto, 2006. Rainfall partitioning in relation to forest structure in differently managed montane forest stands in Central Sulawesi, Indonesia. *For. Ecol. Manage.* 237, 170-178.
- Faria, D.A., Pomeroy, J.W., Essery, R.L.H., 2000. Effect of covariance between ablation and snow water equivalent on depletion of snow-covered area in a forest. *Hydrol. Process.* 14, 2683-2695.
- Fathizadeh, O., Hosseini, S.M., Zimmermann, A., Keim, R.F., Darvishi Bolorani, A., 2017. Estimating linkages between forest structural variables and rainfall interception parameters in semi-arid deciduous oak forest stands. *Sci. Total Environ.* 601-602, 1824-1837.
- Ford C, McGuire M, Mitchell R, Teskey R. (2004) Assessing variation in the radial profile of sap flux density in *Pinus* species and its effect on daily water use. *Tree Physiology.* 24 241-249.
- Granier, A., Biron, P., Lemoine, D., 2000. Water balance, transpiration and canopy conductance in two beech stands. *Agric. For. Meteorol.* 100, 291-308.
- Hamon, W.R., 1961. Estimating Potential Evapotranspiration. *J. Hydraul. Div.* 87.
- 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.
- Jarvis, P.G., 1976. The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. *Philos. Trans. R. Soc. London. B, Biol. Sci.* 273, 593-610.
- Jarvis, P.G., McNaughton, K.G., 1986. Stomatal Control of Transpiration: Scaling Up from Leaf to Region. *Adv. Ecol. Res.* 15, 1-49.

- Kelliher, F.M., Leuning, R., Raupach, M.R., Schulze, E.D., 1995. Maximum conductances for evaporation from global vegetation types. *Agric. For. Meteorol.* 73, 1-16.
- Kelliher, F.M., Leuning, R., Schulze, E.D., 1993. Evaporation and canopy characteristics of coniferous forests and grasslands. *Oecologia* 95, 153-163. <https://doi.org/10.1007/BF00323485>
- Khatun, R., Ohta, T., Kotani, A., Asanuma, J., Gamo, M., Han, S., Hirano, T., Nakai, Y., Saigusa, N., Takagi, K., Wang, H., Yoshifuji, N., 2011. Spatial variations in evapotranspiration over East Asian forest sites. II. Surface conductance and aerodynamic conductance. *Hydrol. Res. Lett.* 5, 88-92.
- Kirchner, J.W., 2006. Getting the right answers for the right reasons: Linking measurements, analyses, and models to advance the science of hydrology. *Water Resour. Res.* 42, 1-5.
- 北原曜. (1998). 森林が表面侵食を防ぐ. *森林科学*, 22, 16-22.
- Komatsu, H., 2020. Modeling evapotranspiration changes with managing Japanese cedar and cypress plantations. *For. Ecol. Manage.* 475, 118395. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118395>
- Komatsu, H., 2007. Relationship between stem density and interception ratio for coniferous plantation forests in Japan. *J. Japanese For. Soc.* 89, 217-220.
- Komatsu, H., 2005. Forest categorization according to dry-canopy evaporation rates in the growing season: Comparison of the Priestley - Taylor coefficient values from various observation sites. *Hydrol. Process.* 19, 3873-3896.
- Komatsu, H., 2003. Relationship between canopy height and the reference value of surface conductance for closed coniferous stands. *Hydrol. Process.* 17, 2503-2512.
- Komatsu, H., Cho, J., Matsumoto, K., Otsuki, K., 2012. Simple modeling of the global variation in annual forest evapotranspiration. *J. Hydrol.* 420-421, 380-390.
- Komatsu, H., Kume, T., 2020. Modeling of evapotranspiration changes with forest management practices: A genealogical review. *J. Hydrol.* 585, 124835.
- Komatsu, H., Kume, T., Otsuki, K., 2010. A simple model to estimate monthly forest evapotranspiration in Japan from monthly temperature. *Hydrol. Process.* 24, 1896-1911.
- Komatsu, H., Shinohara, Y., Kumagai, T., Kume, T., Tsuruta, K., Xiang, Y., Ichihashi, R., Tateishi, M., Shimizu, T., Miyazawa, Y., Nogata, M., Laplace, S., Han, T., Chiu, C.W., Ogura, A., Saito, T., Otsuki, K., 2014. A model relating transpiration for Japanese cedar and cypress plantations with stand structure. *For. Ecol. Manage.* 334, 301-312.
- Komatsu, H., Shinohara, Y., Kume, T., Otsuki, K., 2008. Relationship between annual rainfall and interception ratio for forests across Japan. *For. Ecol. Manage.* 256, 1189-1197.
- 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. *Hydrol. Process.* 29, 5120-5134.
- Kubota, T., Okamoto, T., 2015. The relationship between canopy openness and snow interception at *Cryptomeria japonica* stand in Tohoku Research Center Forestry and Forest Products Research Institute. *Tohoku J. For. Sci.* 20, 27-32.

- Kume, T., Laplace, S., Komatsu, H., Chu, C.R., 2015. Transpiration in response to wind speed: can apparent leaf-type differences between conifer and broadleaf trees be a practical indicator? *Trees - Struct. Funct.* 29, 605-612.
- Launiainen, S., Guan, M., Salmivaara, A., Kieloaho, A.-J., 2019. Modeling forest evapotranspiration and water balance at stand and catchment scales: a spatial approach. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 1-41.
- Llorens, P., Domingo, F., 2007. Rainfall partitioning by vegetation under Mediterranean conditions. A review of studies in Europe. *J. Hydrol.* 335, 37-54.
- Lu, J., Sun, G., McNulty, S.G., Amatya, D.M., 2005. A comparison of six potential evapotranspiration methods for regional use in the southeastern United States. *J. Am. Water Resour. Assoc.* 41, 621-633.
- Lundberg, A., Halldin, S., 2001. Snow interception evaporation. Review of measurement techniques, processes, and models. *Theor. Appl. Climatol.* 70, 117-133.
- McNaughton, K.G., Black, T.A., 1973. A study of Evapotranspiration from a Douglas Fir Forest Using the Energy Balance Approach. *Water Resour. Res.* 9, 1579-1590.
- Mitchell, B., Waltermann, M., Mellin, T., Wilcox, C., Lynch, A.M., Anhold, J., Falk, D.A., Koprowski, J., Laes, D., Evans, D., Fisk, H., 2012. Mapping vegetation structure in the Pinaleño Mountains using lidar - phase 3: forest inventory and modeling. 17.
- Monteith, J., 1965. Evaporation and environment. *Symp. Soc. Exp. Biol.* 205-234.
- Murai, H., 1970. Studies on precipitation interception by forest vegetations. *Bull. Gov. For. Exp. Stn.* 232, 25-64.
- Murakami, S., Toba, T., 2013. Experimental study on canopy interception using artificial Christmas trees to evaluate evaporation during rainfall and the effects of tree height and thinning. *Hydrol. Res. Lett.* 7, 91-96.
- Murakami, S., Tsuboyama, Y., Shimizu, T., Fujieda, M., Noguchi, S., 2000. Variation of evapotranspiration with stand age and climate in a small Japanese forested catchment. *J. Hydrol.* 227, 114-127.
- Nagler, P.L., Scott, R.L., Westenburg, C., Cleverly, J.R., Glenn, E.P., Huete, A.R., 2005. Evapotranspiration on western U.S. rivers estimated using the Enhanced Vegetation Index from MODIS and data from eddy covariance and Bowen ratio flux towers. *Remote Sens. Environ.* 97, 337-351.
- Nakai, T., Sumida, A., Daikoku, K., Matsumoto, K., van der Molen, M.K., Kodama, Y., Kononov, A. V., Maximov, T.C., Dolman, A.J., Yabuki, H., Hara, T., Ohta, T., 2008. Parameterisation of aerodynamic roughness over boreal, cool- and warm-temperate forests. *Agric. For. Meteorol.* 148, 1916-1925.
- Nakai, Y., Kitahara, H., Sakamoto, T., Saito, T., Terajima, T., 1993. Evaporation of snow intercepted by forest canopies. *J. Japanese For. Soc.* 75, 191-200.
- 恩田・五味, 2021. 水資源対策としての森林管理. 東京大学出版会.
- Oono, K., Tsuyuki, S., 2018. Estimating Individual Tree Diameter and Stem Volume Using Airborne LiDAR in Saga Prefecture, Japan. *Open J. For.* 08, 205-228.
- Oren, R., Sperry, J.S., Katul, G.G., Pataki, D.E., Ewers, B.E., Phillips, N., Schäfer, K.V.R., 1999. Survey and synthesis of intra- and interspecific variation in stomatal sensitivity to vapour pressure deficit. *Plant, Cell Environ.* 22, 1515-1526.

- Penman, H.L., 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. R. Soc. A193*, 120-146.
- Russell, M.B., Weiskittel, A.R., 2011. Maximum and largest crown width equations for 15 tree species in Maine. *North. J. Appl. For.* 28, 84-91.
- Ryan, M.G., Yoder, B.J., 1997. Hydraulic Limits to Tree Height and Tree Growth. *Bioscience* 47, 235-242.
- Sato, H., Tachibana, R., Shimojima, H., Izumi, K., Fukunaga, K., 2018. Quantification of Evapotranspiration Change in the Past 100 Years as Estimated by Landcover Data in the Headwaters Region of the Tama River. *Environ. Sci.* 31, 148-163.
- Sawano, S., Hotta, N., Tanaka, N., Tsuboyama, Y., Suzuki, M., 2015. Development of a simple forest evapotranspiration model using a process-oriented model as a reference to parameterize data from a wide range of environmental conditions. *Ecol. Modell.* 309-310, 93-109.
- Schäfer, K.V.R., Oren, R., Tenhunen, J.D., 2000. The effect of tree height on crown level stomatal conductance. *Plant, Cell Environ.* 23, 365-375.
- Schellekens, J., Scatena, F.N., Bruijnzeel, L.A., Wickel, A.J., 1999. Modelling rainfall interception by a lowland tropical rain forest in northeastern Puerto Rico. *J. Hydrol.* 225, 168-184.
- Sharma, M., 2016. Comparing height-diameter relationships of boreal tree species grown in plantations and natural stands. *For. Sci.* 62, 70-77.
- 嶋田純. (2012). モンスーンアジア地域における可能地下水涵養量を考慮した地下水資源管理. *日本水文科学会誌*, 42(2), 33-42.
- Shuttleworth, W.J., Calder, I.R., 1979. Has the Priestley-Taylor equation any relevance to forest evaporation? *J. Appl. Meteorol.* 18, 639-646.
- Sidele, R.C., Gomi, T., Loaiza Usuga, J.C., Jarihani, B., 2017. Hydrogeomorphic processes and scaling issues in the continuum from soil pedons to catchments. *Earth-Science Rev.* 175, 75-96.
- Spearman, C., 1904. The proof and measurement of association between two things. *Am. J. Psychol.* 15, 72-101.
- Stoy, P.C., El-Madany, T.S., Fisher, J.B., Gentine, P., Gerken, T., Good, S.P., Klosterhalfen, A., Liu, S., Miralles, D.G., Perez-Priego, O., Rigden, A.J., Skaggs, T.H., Wohlfahrt, G., Anderson, R.G., Coenders-Gerrits, A.M.J., Jung, M., Maes, W.H., Mammarella, I., Mauder, M., Migliavacca, M., Nelson, J.A., Poyatos, R., Reichstein, M., Scott, R.L., Wolf, S., 2019. Reviews and syntheses: Turning the challenges of partitioning ecosystem evaporation and transpiration into opportunities. *Biogeosciences* 16, 3747-3775.
- Sun, G., Alstad, K., Chen, J., Chen, S., Ford, C.R., Lin, G., Liu, C., Lu, N., McNulty, S.G., Miao, H., Noormets, A., Vose, J.M., Wilske, B., Zeppel, M., Zhang, Y., Zhang, Z., 2011. A general predictive model for estimating monthly ecosystem evapotranspiration. *Ecohydrology* 4, 245-255.
- Sun, X., Onda, Y., Kato, H., Otsuki, K., Gomi, T., 2014. Partitioning of the total evapotranspiration in a Japanese cypress plantation during the growing season. *Ecohydrology* 7, 1042-1053.
- Tagaki M. (2013) Evapotranspiration and deep percolation of a small catchment with a mature Japanese cypress plantation. *Journal of Forest Research.* 18 73-81.

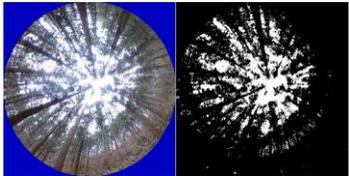
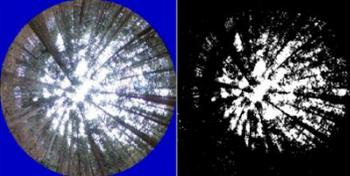
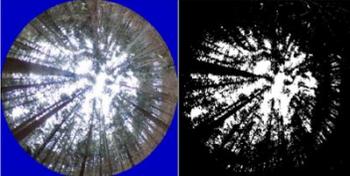
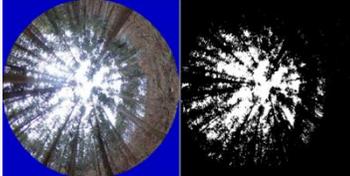
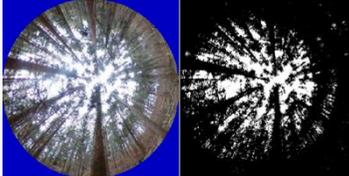
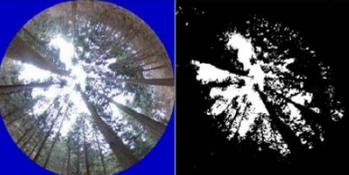
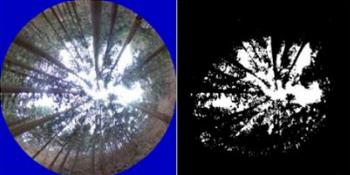
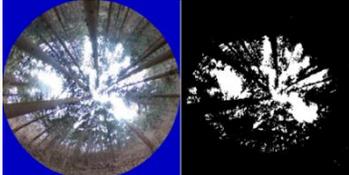
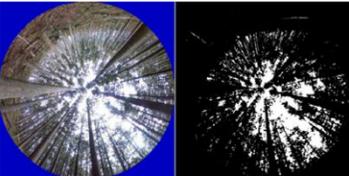
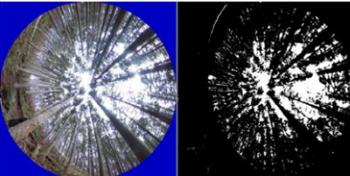
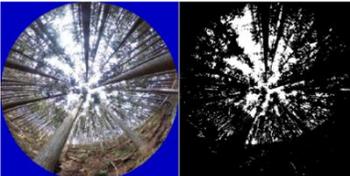
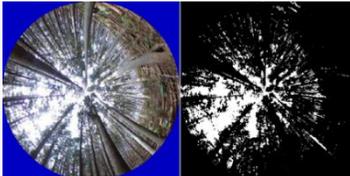
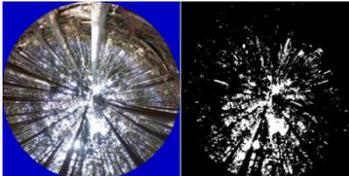
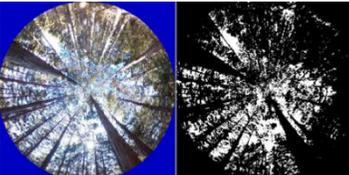
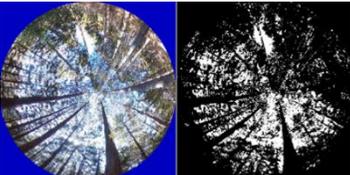
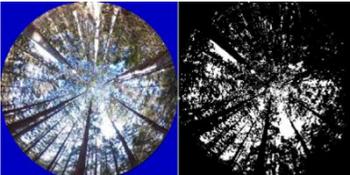
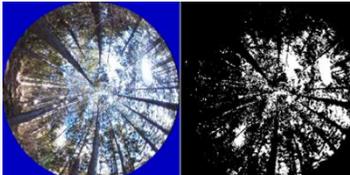
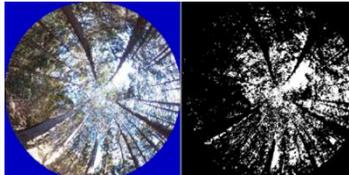
- Teklehaimanot, Z., Jarvis, P.G., Ledger, D.C., 1991. Rainfall interception and boundary layer conductance in relation to tree spacing. *J. Hydrol.* 123, 261-278.
- Thornthwaite, C.W., 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geogr. Rev.* 38, 55-94.
- Toba, T., Ohta, T., 2005. An observational study of the factors that influence interception loss in boreal and temperate forests. *J. Hydrol.* 313, 208-220.
- Tsuruta, K., Kume, T., Komatsu, H., Higashi, N., Kumagai, T., Otsuki, K., 2008. Relationship Between Tree Height and Transpiration for Individual Japanese Cypress (*Chamaecyparis Obtusa*). *J. Japan Soc. Hydrol. Water Resour.* 21, 414-422.
- Umeki, K., 1993. Tree architecture in coniferous-broadleaved mixed forests with different mixing ratios. *Boreal For. Soc.* 41, 243-245.
- Van Dijk, A. I. J. M., Gash, J.H., Van Gorsel, E., Blanken, P.D., Cescatti, A., Emmel, C., Gielen, B., Harman, I.N., Kiely, G., Merbold, L., Montagnani, L., Moors, E., Sottocornola, M., Varlagin, A., Williams, C.A., Wohlfahrt, G., 2015. Rainfall interception and the coupled surface water and energy balance. *Agric. For. Meteorol.* 214-215, 402-415.
- Zhang, L., Dawes, W.R., Walker, G.R., 2001. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water Resour. Res.* 37, 701-708.

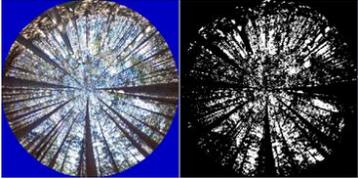
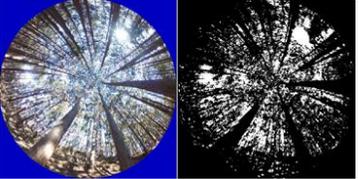
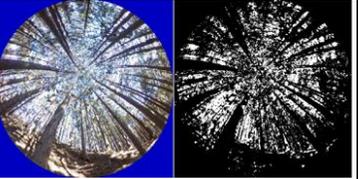
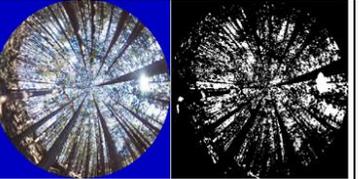
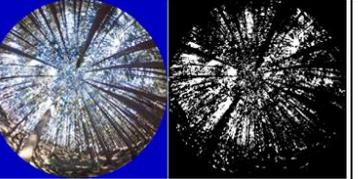
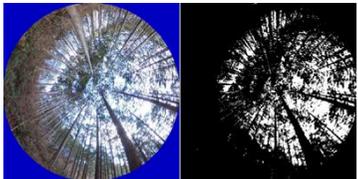
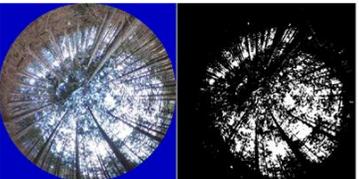
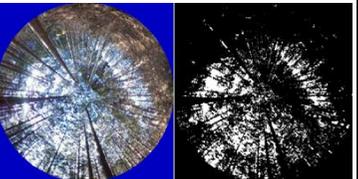
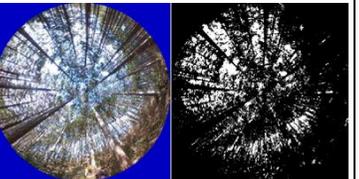
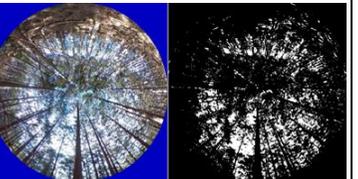
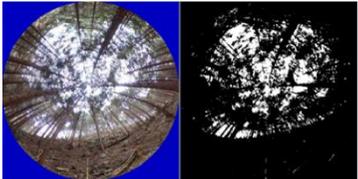
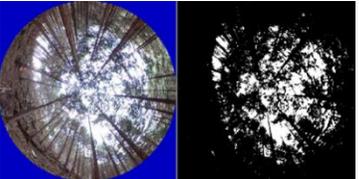
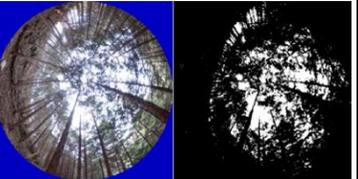
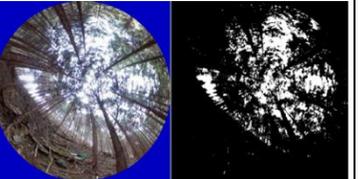
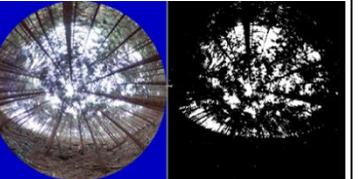
10. 巻末資料

- (1) 各プロットで撮影した全天球写真及び開空率算出結果
- (2) 検討委員会議事概要
- (3) 洪水緩和機能等の評価結果に係る概要版
- (4) 森林の水源涵養機能に係る解説資料草稿骨子
- (5) 解説資料の引用文献候補

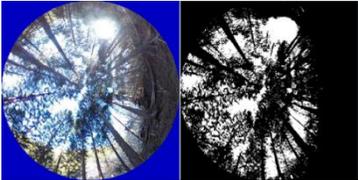
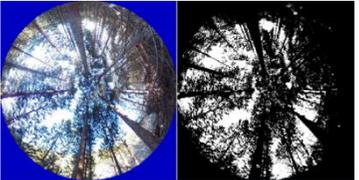
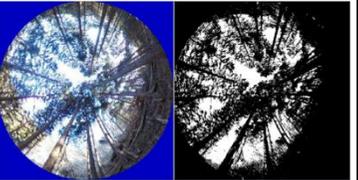
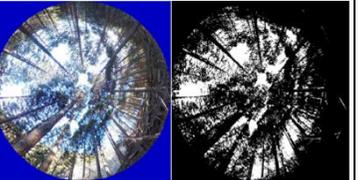
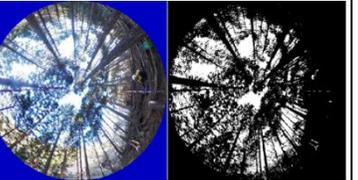
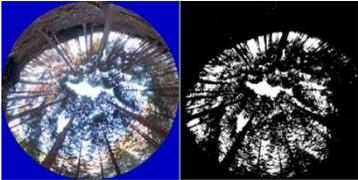
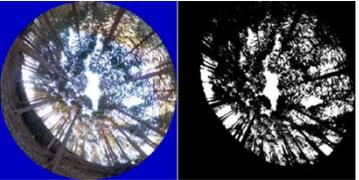
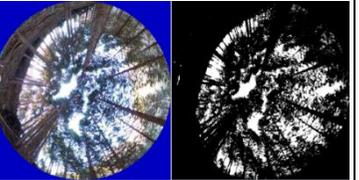
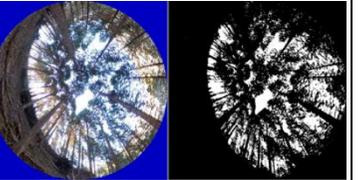
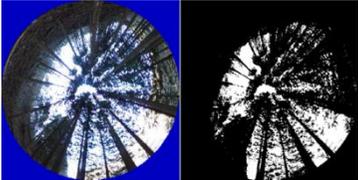
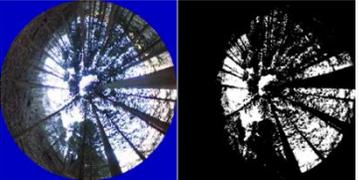
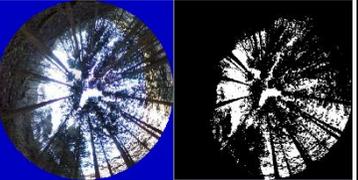
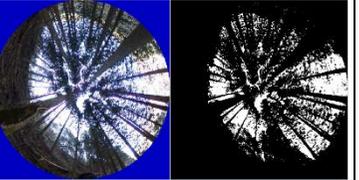
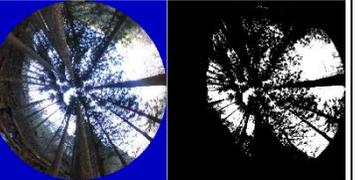
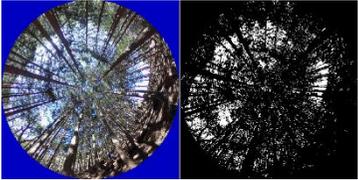
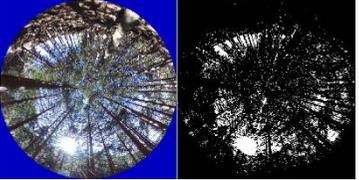
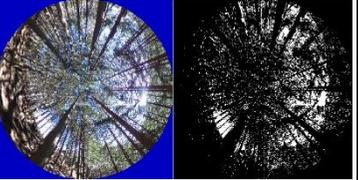
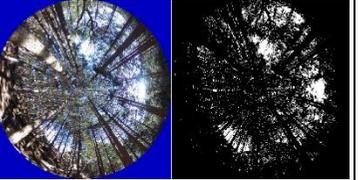
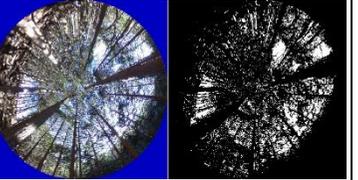
(1) 各プロットで撮影した全天球写真及び開空率算出結果

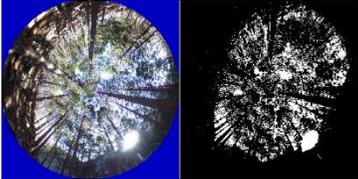
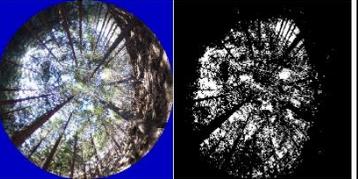
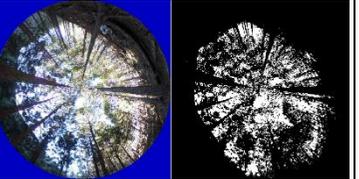
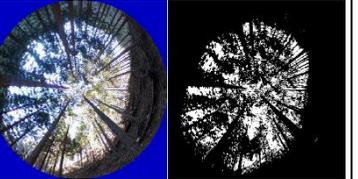
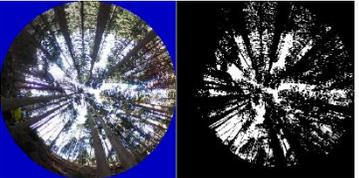
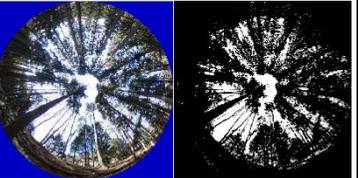
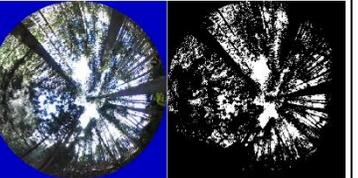
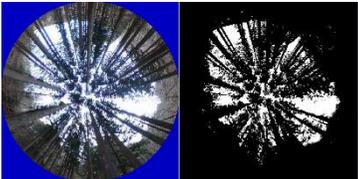
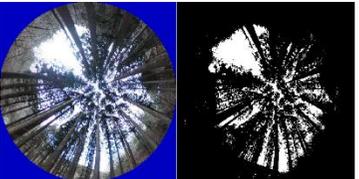
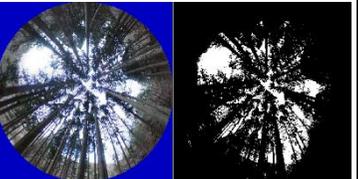
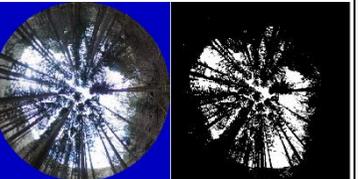
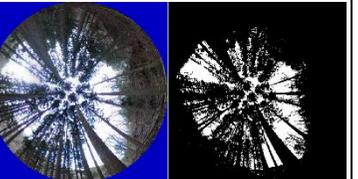
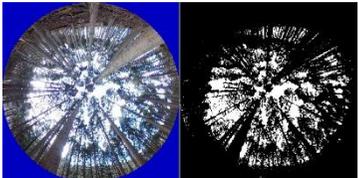
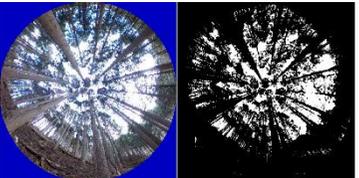
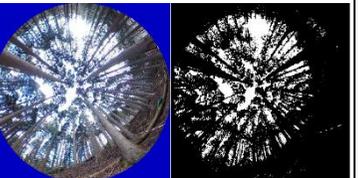
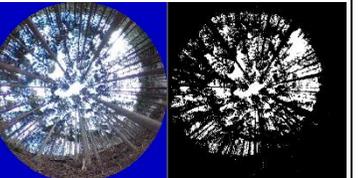
【貝沢試験流域】

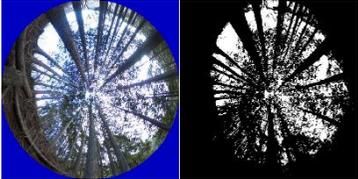
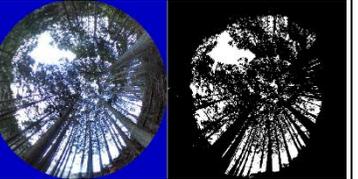
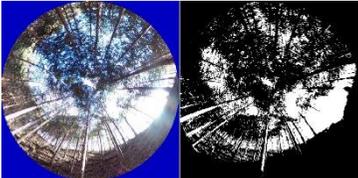
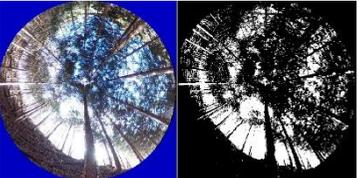
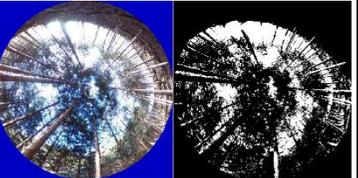
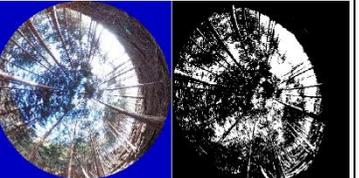
プロット番号	撮影位置 1 開空率 (%)	撮影位置 2 開空率 (%)	撮影位置 3 開空率 (%)	撮影位置 4 開空率 (%)	撮影位置 5 開空率 (%)	開空率 (%、平均)
1	 20.2	 24.6	 24.3	 22.0	 22.5	22.7
2	 22.0	 18.8	 20.3	 20.6	 19.1	20.1
3	 18.2	 20.4	 18.5	 18.5	 15.1	18.2
4	 25.0	 25.2	 22.2	 22.7	 24.0	23.8

プロット番号	撮影位置 1 開空率 (%)	撮影位置 2 開空率 (%)	撮影位置 3 開空率 (%)	撮影位置 4 開空率 (%)	撮影位置 5 開空率 (%)	開空率 (%、平均)
5	 24.1	 23.7	 24.5	 23.1	 21.5	23.4
6	 22.2	 21.2	 19.3	 20.0	 17.9	20.1
7	 18.1	 20.4	 20.0	 18.6	 18.2	19.1

【道志ダム集水域】

プロット番号	撮影位置 1 開空率 (%)	撮影位置 2 開空率 (%)	撮影位置 3 開空率 (%)	撮影位置 4 開空率 (%)	撮影位置 5 開空率 (%)	開空率 (%、平均)
1	 29.3	 30.9	 30.3	 29.2	 29.6	29.9
2	 23.1	 25.6	 23.5	 23.7	 24.4	24.1
3	 24.1	 21.9	 22.3	 21.4	 24.0	22.7
4	 14.5	 14.2	 15.9	 13.7	 17.1	15.1

プロット番号	撮影位置 1 開空率 (%)	撮影位置 2 開空率 (%)	撮影位置 3 開空率 (%)	撮影位置 4 開空率 (%)	撮影位置 5 開空率 (%)	開空率 (%、平均)
5	 20.4	 22.3	 21.1	 24.5	 21.4	21.9
6	 21.8	 21.8	 23.3	 21.8	 23.0	22.4
7	 19.5	 19.4	 18.6	 20.7	 20.4	19.7
8	 22.6	 24.4	 23.7	 22.6	 23.7	23.4

プロット番号	撮影位置 1 開空率 (%)	撮影位置 2 開空率 (%)	撮影位置 3 開空率 (%)	撮影位置 4 開空率 (%)	撮影位置 5 開空率 (%)	開空率 (%、平均)
9	 24.4	 26.4	 24.1	 23.6	 21.1	23.9
10	 30.0	 29.0	 29.7	 30.3	 28.1	29.4

(2) 検討委員会議事概要

【第1回検討委員会】

No.	質問項目	質問者	質問・意見	回答	回答後の質問者コメント	
1	蒸発散量による調整について	白木委員	流出量より、蒸発散量を現実の値に近づけるほうが本業務には適しているのではないか。	蒸発散量の実測値、もしくは実測値を小松式で得られた値で代用してチューニングすることが可能。間伐の影響を評価するためには蒸発散量が重要であると考えているため、これから手法等を検討していきたい。(日林協永野)	樹冠遮断量と林床面蒸発散量を考慮していないSWATの蒸発散量は小松式の蒸発散量と値が近く、蒸発散量としては正しいかもしれない。 今後、樹冠遮断量と林床面蒸発散量をどのような形でモデルに反映させるのかについては、検討が必要。(五味委員)	
2	樹冠遮断量について	五味委員	樹冠遮断量について、白木委員が貝沢で現地観測をされている実測値は、どのくらいか。	15、20%くらいは遮断損失がある。今年度も引き続き、別の検討方法でもう1回、樹冠遮断量を計測している最中。(白木委員)		
3	出水イベント時の流出特性について	恩田委員	出水イベント時の流出特性についてのハイドログラフに関して、実測値との整合性についてこれから時間単位での解析が必要だと資料にあるが、記載のグラフについてはどのような単位で算出したのか。	降雨量を時間単位でインプットし、グリーン・アンプト法により計算し、結果は日単位の流量で得られている。(日林協永野)		
4	土壌層のパラメータ設定について	小杉委員	土壌層毎にパラメータを設定したとあるが、飽和透水係数は全て同じ設定なのか。36mm/hは表層としては小さ過ぎる。また、透水係数以外に何を変化させているのか。	飽和透水係数は、3層で同一の値を用いている。また、各層でSOL_Kを設定することが望ましい。各層に設定する値についてもこれから検討したい。(日林協永野)	・層ごとに1オーダーくらいずつ下がっていくようなイメージで調整してはどうか(五味座長)	
5	三保ダム過去モデルについて	恩田委員	西丹沢が崩れたのは関東大震災時ではなく昭和47年豪雨がメインであるため、震災前壊れ地ではなく神奈川県東部の治山課の治山基本図データを使うとよい。西丹沢の全域にわたる崩壊地のマッピングと詳細なデータがある。	林野庁の事業で昭和50年代に崩壊地調査をしたものだと考えられる。データが現存するか、デジタル化されているかは要問い合わせ。問い合わせ先は神奈川県森林再生課。(オブサーバー内山)	昭和47年のほうが大震災時より、ほかの残存森林の森林状態を過去モデルに戻すときに整合性がつく。崩壊地と土地を合わせて、戦後のほうがやりやすいのでは(五味座長)	
6	LIDARデータについて	恩田委員	レーザ測定の標準偏差について記載があるが、全体の分布系はどうなっているのか。	調査を5点でしか実施しておらず、現地全体の立木本数は不明。DCHMについても、全体の分布系については計算していない。(日林協笹川)	標準偏差を出すなら全体の分布系がわかっていることが前提になる。それがないと妥当だと、妥当でないとも言えない(恩田委員)	
白木委員		LIDARのデータから林相区分の精緻化が可能なら、次段階として木の成長モデルを作れないか。	植物の成長要素を加えることは可能である。 同じモデル内で過去の状態から変化を加えて、現在や未来まで予測できるようなモデルに作れないか、どこまでできるかという調査は進んでいない。現段階では過去と現在という2つのモデルを作って、その2時点での比較する計	密度管理図のようにオートマチックになると面白い(白木委員) 過去の森林の状況を推測するために、標準伐期齢の見積りや、標準的な施業計画の概要などをみたり、組合とか県の関係者に聞き取りをして整理しておくとの良いのでは。(五味座長)		
小杉委員		LIDARデータを使って立木密度を算出する方法について、単木抽出するべきでは。記載されている回帰線をほかの場所へ展開する際には検討が必要となるのでは。	今回の手持ちのデータからでは、樹頂点を探してポリゴンの立木本数にするのは困難。回帰線について、現段階では現在実際に調査を行った範囲内での傾向としてのみ適用できるものである。(日林協笹川)			
五味委員		今回資料中に使われているLIDARデータの調査は、予備調査的な位置づけなのか。点数は増える予定か。 LAIを現地で取る予定はあるか。	今後、森林調査、プロット調査を行うため正確な本数も得られるため、解析の基となるデータは増える予定。(日林協笹川) 作成した林相区分から林分調査を行うプロットの選定を行い、LAIの値を取ることを検討している。(日林協永野)			
10	森林の状態と水の動態を統合的に評価できる指標の検討と整理	恩田委員	指標化イメージについて、保水力というのはどういう意味合いで使っているのか。	降った雨を一時的に貯留して流出遅延に効果をもたらす力を想定している。(日林協永野) 簡易的な土木的工法の組合せによる土壌の保水力だと考えている。(五味委員) 今改めて「豪雨災害に対する治山対策の在り方検討会」の報告書を確認したところ、保水力というのは洪水緩和機能とイコールで使われているようだ。(林野庁中村)	小さな谷止工のようなものをたくさん作り洪水を一時的に緩和するような工夫があったが、そのような工夫は洪水をひきおこすような大雨で効果を発揮するかは慎重に評価した方がよい。(小杉委員) 間伐材により表土を抑える構工の効果は定量評価ができていない。簡易的な土木工法の組み合わせによる森林土壌の保水力維持・向上の関連なのかと思う。(五味座長) 「保水力」を「浸透農」に変えればよいのかもしれない。(恩田委員)	
11	土壌浸透能関連パラメータについて	玉井委員	新規モデル構築の中で過去モデル、崩壊モデルは現状の土壌ではない状態のモデルになる。土壌のパラメータは、客観性を持たせたものをパラメータとして入手することが大切。	また、崩壊地の土壌パラメータの扱いについて検討が着手できていないが、重要な事項になると考えている。(日林協永野)		
12	蒸発散関連パラメータについて	中村課長補佐	8月か9月に下層植生を刈り払って、サンプルを取って下層植生の調査をされるということですが、季節変化(下層植生の有無)を踏まえたモデルにする必要があるのではないか。	季節変動性はあるので評価することは可能だが、現状ではSWATにそれを入れる受け皿ができていない。実測のほうは季節変動の評価はできる。(五味委員)		
13	土壌浸透能関連パラメータについて	小杉委員	これまでの計算結果というと表面流自身が多過ぎ、土層の飽和側方流よりも表面流のほうがたくさん出ている。深層浸透量が多過ぎるのは、下の層の飽和透水係数が高過ぎるという影響も出ているのでは。	いきなり樹種別、林相別の土壌を検討するよりも、まずは全層の飽和透水係数などを適切な値に設定できるように検討したい。(日林協永野)		
日林協永野		土壌層の厚さについて、実測の1mとか1.5mという値を入れているが、これは実測を動かさないほうがよいのか。	透水係数はオーダーで10倍、100倍と値が大きく変わってくるので、土層厚より透水係数をどう与えるかが重要。(小杉委員)			
15	土壌浸透能関連パラメータについて	恩田委員	大きざっぱな透水係数の値は、どういった値が適当なのか。	昔、森林総研や林野庁が全国的に土壌調査して、浸透能調査的なものも多かったので、飽和透水係数に換算できるような値は林野のほうでデータ蓄積があるのでは。(小杉委員) 森林総研で土壌のサンプルも昔見たことがある。昔調査したものが残っていると思われる。(林野庁中村) 林野土壌調査報告という冊子があり、参考になるかもしれない。(小杉委員) 総研で全国的に土壌調査というのは何回も過去やっている。何かデータがあるかもしれないので聞いておく。(玉井委員)	現在、土層深は最大3mとされている。その下の風化基岩を含めて水が通りやすい層を考慮する必要もあるのかもしれない。(五味委員)	
16		その他	白木委員	これから実際にコードを書き換えていくような作業をやるかどうか検討中だが、実施することになった場合はぜひお願いしたい。(日林協永野) SWATの専門家の方とも意見交換しながら進めており、第2回目委員会でコードの書き換えも含めてアドバイスお願いしたい。(五味委員)		
17		草稿骨子の作成について	五味委員	草稿骨子の分量はどのようなイメージか。	現在のものに引用データを追加したようなイメージ。(日林協永野)	簡易書きのようなボツを増やす、引用文献を充実させるイメージ。最終的なアウトプットを作成し来年度に引き継げれば。(五味委員) 委員の先生方にこのプロットを見ていただいても、追加等があればコメントをいただければ。(五味委員)

【第2回検討委員会】

No.	質問項目	質問者	質問・意見	回答	回答後の質問者コメント
1	神奈川県標準伐期齢について	恩田委員	神奈川県データの作成の際、県の標準伐期齢を参考にしたとあるが、実際にこの位の林齢で切られているのか	・すぐには資料もなくお答えできない（オブザーバ：内山氏） ・森林組合に聞けばわかるのではないかと。過去の事も分かる方がいれば聞いてみるとよい（五味委員） ・確認してご報告する（日林協：古田）	
2	地質の影響の考慮について	堀田委員	土層厚も地質も結構聞いてきそうだが、地質の影響は考えなくてもよいのか	土層のパラメータについて検討している。透水係数や空隙率により変化を与えられないか、そこに地質の要素を加えるかどうか検討している段階（日林協：永野）	大西先生からのお話で、例えば土層の3層目（深いところ）を厚く取るとか、そういうような形でどうやって評価していくのか、その部分が湧水量にどう影響していくのかというところの取組とつながってくる（五味委員）
3	SWATモデルにおける湧水量の推定について	堀田委員	p.8について、SWATモデルでは不飽和の土層中の水移動をそれ程丁寧に扱っていないため、湧水緩和機能を評価するのは難しいのではないかと。	流況曲線で違いを見せられるとよいが、結果をみてからまた検討したい（日林協：永野）	GeoWEPPモデルでは湧水量はほとんど出なかったため、そういうことがあるかもしれないと想定しておいた方がよい（堀田委員）
4	降雨インプットの影響について	堀田委員	p.12で、対象流域が結構広いので、植生の影響を考慮する前に、降雨の空間分布の影響について検討してもよいのでは	気象データは流域内に落ちてない遠くのポイントから拾ってきているものもあり、雨量データも標高で補正されているわけではない。補正するともう少し立地に応じたインプットが可能になるかも。（日林協：永野）	・雨はやはり流出と比較するので、実測データで比べないといけない。ここで求めた代表値と実際の降雨分布から出てくる代表値が一致していると安心できる（堀田委員） ・一イベントでも、ある一定期間でも、降雨データと降雨空間分布のデータで、空間分布を考慮した全量とポイントで測っている全量がある程度一緒だという整合性が取れると安心感があるということ（五味委員）
5	林相情報のモデルへの反映方法について	堀田委員	p.19で、樹種や林齢を丁寧にみているが、どのようにモデルに反映されるのか	スライド29、昨年度の結果になるが、林齢毎、密度毎にLAIのパラメータを適用したり、GSIを樹種別に検討したり、林齢と密度を分けてパラメータを設定する（日林協：永野）	・LAIを通してモデルの中に反映されるということですね（堀田委員） ・LAIを通してモデルに反映する方法には限界があり、森林状態をモデル上でどう評価していくのか、後ほど白木委員よりお話をいただく予定（五味委員）
6	現代・過去林相区分図の見せ方について	小杉委員	p.21の現代・過去林相区分図の主な違いは人工林の林齢だと思ってるので、林齢の差の図があればいいのかなと思ってる	林齢がどのように変化したかも次回お示ししたい（日林協：古田）	・広葉樹が針葉樹に変わった変化と、あとは伐期になっても伐採されずに針葉樹がどんどん蓄積されて、その影響を見るという観点もあると思うので、林齢の変化の図があってもよい（小杉委員） ・森林・林業白書に出ているような年齢階級の図や面積率の変化等の数字があってもよい（五味委員）
7	過去の林相情報の取得見込みについて	白木委員	具体的に過去の情報として、林齢の推定はできるところ、立木密度、LAI、バイオマス量、樹冠開空密度なども航空写真等で推定できる見込みはあるのか	過去の密度、空中写真の判読はできることはあると思うが、面積が大きいので全面をやるのは現実的ではない。スギをサンプリングで何点がやってみて、過去の空中写真で何点がやってみて、というところか（日林協：古田）	
8	密度区分毎の具体的な本数密度について	五味委員	密度コードの疎・密・中について、具体的な本数密度は	・道志は森林簿の疎密度をそのまま使用。具沢はLIDARデータを元に分類（日林協：古田） ・神奈川県は高密度の航空レーザのデータがある。山梨県がないかもしれない。入手できる森林簿で作っている。道志も南部の神奈川県で取られたデータ、三保ダムも国有林以外にはデータがあるかも（日林協：永野）	疎、密、中のある程度レンジが分かるかとよい。神奈川県では取ったデータがあるので活用できるとよい（五味委員）
9	三保の過林相区分図作成に用いるデータについて	恩田委員	三保の過去データについて、LANDSATでは難しく、空中写真の方がよい		・1970年の空中写真がカラーであると思う。LANDSATは地上分解度が30mなのでそれで把握できるのか、30m解像度で崩壊地の何割くらいとれるのか分かるかと検討可能かと思う（五味委員）
10	丹沢崩壊地のデータについて	堀田委員	中川川流域、玄倉川流域の4、5時期ぐらいの崩壊地の分布を日大にいらした石垣先生がまとめた。神奈川県の方でお持ちではないか。	・おそろしいではないようでは探してはみが見つからない（オブザーバ：内山氏） ・当時研究されていた元院生の方とも連絡を取ったが、データを格納しているメディアの老朽化によりデータを取り出せない状況とのこと（日林協：永野）	・貴重なデータが失われてしまっているかもしれない。とりあえず中川川流域だけあんなら、そこだけでやってみようというの一手かもしれない（堀田委員） ・当時東大でやってもらったデータはあるのでそちらは活用可能（オブザーバ：内山氏） ・スタートポイントとして、手元にある赤いマップのデータと中川のデータを照合してみても、どれが何年度に該当するか検討するのかもしれない（五味委員）
11	蒸発散モデル改良のうち過蒸散の計算について	堀田委員	・モデルを改良する方針があると思うが、過蒸散と蒸散は一緒に感じるのか ・雨から一律の過蒸散率で過蒸散の部分を抜く形にしないと、間伐とかの話に簡単に結びつけるのは難しいのではないかと ・樹幹貯留のモデルを使わない方が簡単。樹幹貯留は過蒸散を評価するにはあまり向いていない	降雨中でも過蒸散するようにバケツから一定値を差し引くか、最初から降雨から差し引くか、2通りある。今年度中に水収支をとると後者になるが、成長モデルまで検討するという努力目標に向けてあげてほしい（白木委員）	
12	土層厚、飽和透水係数、基岩の設定について	恩田委員	資料4のp30土層の浸透性を36mmとしているのは現実と反している。土層は900mmなり何百mmというのは全然経験的におかしい。問題は、ここに書いていないその下の岩盤層。	・岩盤のような設定はなく、土層層が3層ある設定になっている。3層目に地質や岩盤を反映するようなパラメータを適用してあげる必要があると考えている（日林協：永野）	・1層、2層は36mm/hはやめて、実測のよくあるデータを入れていき、3層目をもう少し厚くできないのか（→調整可能）（恩田委員） ・風化岩盤をせめて2つくらいに分けて、花崗岩とそれ以外の岩石の違いを出して頂くというハイドログラフィも変なことにならないのでは（恩田委員） ・3層、4層のところは第3回にむけて検討する（五味委員）
13	土層厚の設定について	堀田委員	山地流域を対象とする場合土層厚の空間分布はかなり幅広い。それが流出プロセスに影響してくると思われるが、SWATは土層厚は分布を与えることはできるのか。	・土層厚の分布を与えることが可能なため、HRUにも分布を反映させることもできる。具沢は土層厚ごとに分かれた土層分布図を使用している（日林協：永野）	・浸透能の計測をされたデータが100種類以上くらい深さ別に測ったデータがあるので参考になれば。基岩の方は花崗岩についてはボーリング調査で掘ったデータがある（小杉委員） ・基岩のほうの透水性は研究が進んでいないが、花崗岩に関してはボーリングコアで取った風化基岩の透水係数を測ったデータがある（小杉委員）
14	航空レーザデータの活用について	恩田委員	DCHMとは何か	・航空LIDARから得られるDSM（Digital Surface Model）という地表面のデータと、DTM（Digital Terrain Model）という地盤高のデータの差分で計算される高さの情報（日林協：古田） ・点密度の低いLIDARデータではうまく樹頂点を抽出できない場合があり、今回はこのDCHM値の分散から立木密度の推定をし、いい関係性を得られた。（日林協：古田）	・この関係は他の場所で適用できるものとは難しい。その場所で測るアプローチでは意味がないのでは（恩田委員） ・去年の解析結果は1点/m ² 、今年度は4点/m ² 、それが森林の資源量評価の基準になっている。4点/m ² でやった結果が良かったらそれこそこの事業の成果（五味委員） ・標準偏差と密度の関係別の場所でも使えたらいい。これもLIDAR計測の新しい技術開発として重要（五味委員）
15	モデルの暫定結果について	五味委員	道志や三保と比べ具沢流域は蒸発散が少ないが？	SWATモデルは小流域になればなるほど、蒸発散量が少なく、側方流が多くなる傾向がある（日林協：永野）	白木先生から提示していただいた水収支のところと関係していると思われる（五味委員）

No.	質問項目	質問者	質問・意見	回答	回答後の質問者コメント
16	指標化について	五味委員	今年度中の内容は？	評価基準、クロス表の作成は今年度の範囲ではなく、指標を抽出するのが今年度の作業（日林協：永野）	最後のところは非常にアンビシャスな課題。育成単層林から育成複層林、複層林にしたときに多分林床面の話とかが大きくなっていくと思われるが、今現在のSWATのモデルがこういった状態を評価するにはまだ課題がある。（五味委員）
17	指標化について	堀田委員	取組自体はともよい。一方で、こういうものが一回世に出てしまおうと、具体的な方法とともに森林の水源涵養機能を定量的に評価できることになるわけであり、それに対して、今まで林野庁とかで森林整備を行ってきまして事業評価をした結果とこの方法で結構違いが出てくる可能性がある。補足：新しい知見が出てくるときに過去の評価が変わってくる可能性がある（五味委員）	ご指摘のとおり、この話になってくると、現場がどうなのかも含めて、森林計画とか森林整備の担当にも相談をしなければならず、林野庁の中でこれを実際に適用するに当たってどういう方法がスムーズなのか、あり得る方向なのかというのを検討していかなければいけないと思う。仮に不都合な真実が出てきたとすれば、それはそれでその次の基本計画の中で受け止めて、改正するべきは改正するといった方向の指標をもし得られたら、ありがたいなと思っている部分もある（林野庁：中村課長補佐）	非常に重要なポイントで、ここからの情報発信がどう社会に波及するかということとどこかと思う（五味委員）
18	指標化について	小杉委員 恩田委員	方向性としては、いい議論かなと思いますが、この辺の議論を強くできるほどモデルの精度があるのか。 樹種がや林齢が変わるとどうか、そういう細かい結果がモデルで評価できるレベルには到底達していないような気がして、このモデルの結果を踏まえて次の議論にははかり飛躍があり過ぎる。	勇み足はやめ、評価の基準を作るのは時期尚早ということと、いつどこまでできるのかというは事務局を中心に進め、皆様に判断を仰いでいただければと思っている（林野庁：中村課長補佐）	SWATに入れたときに、57ページ目にあるような形でそこまで細かいことができるのかというのは、なかなか厳しいところがある。分からないところがあったということも1つ重要なところ。例えば白木先生の改良の問題、また土壌の問題、いろいろなトライをしてみて、どこまでいけるんだらうかということとをまず明らかにした上で次のステップに進められれば（五味委員）

【第3回検討委員会】

No.	質問項目	質問者	質問・意見	回答	回答後の質問者コメント
1	今後の方針	白木委員	現在は小さな流域を対象としているが、ここでモデルができれば日本全体に適用していくのだったか。	現在の対象地はデータがそろっている。全国展開はできればよいが、データがどれだけそろっているか、また、不適応なところも出てくる考えられるため妥当性や適正についてご助言ください（林野庁中村）	・全国に展開するにはかなり注意が必要。まず事例研究としてやっていき、観測とモデルの組み合わせについては次年度のとりまとめになるのではないかと（五味委員） ・今後、ケース・バイ・ケースで、モデルの精度をどこまで突き詰める必要があるのか、42ページあたりの説明の際にまたご検討、ご助言いただきたい。（林野庁中村）
2	降水量の空間分布	堀田委員	16ページ右の図の色分けについて。また、三保ダム支流流域で降水量が400mm違うのはかなり大きい。森林の操作（密度など）の検討にあたり、流域内の降水量の違いを考慮したほうがよいのかどうか、方針があれば伺いたい。	色分けについては、SWATで実際に使われた雨量で色分けしている。降水量の違いに応じた森林の操作については、現時点で未検討（日林協：篠畑）	色分けについて、SWATで降水量を振り分けていて、自動的にきめ細かい検討が可能になることで了解。
3	ウォームアップ期間	小杉委員	今回の結果には初期値の影響が残っているように見える。一般的に水文モデルでは初期値の影響を出づらくするためにウォームアップ期間を与える処理をするが、初期値の影響についてどのように対応しているのか。	・ウォームアップ期間を与えたらで計算した結果だが、初期値の影響についてさらに考慮していく必要がある。（日林協：篠畑）	
4	傾斜に関するパラメータ	小杉委員	平均斜面長とか平均斜面勾配は側方流の速度や遅れ時間を計算するためだけに使われているパラメータと考えていいのか。	・土砂流出の計算に含まれる。（大西技術アドバイザー）	
5	土壌層以下の透水性	小杉委員	土壌の下にある不飽和層や浅層帯水層の透水性に係るパラメータは設定できるのか。	・不飽和層については、地下水の遅延時間のGW_DELAYというのが不飽和層の流れに関する唯一のパラメータ。それ以下の層のパラメータについては、降水がない期間にどれくらい流出しやすいか、しにくいかなというような値がパラメータとして設定可能。（日林協：篠畑）	
6	過去崩壊地の抽出	恩田委員	三保の崩壊地抽出の判読作業が40%終わっているなら、それをみせて確認することが大事。	4割を割っており、ポリゴンとしてはかなり中途半端な状態のため、今回お見せすることができなかった。（日林協：金森）	担当者の方で迷うことは共有して現状を示すべき（恩田委員） 委員会の後でも共有できるような機会を設けたい。どのようなところで迷うのかは興味があるところ（五味委員）
7	岩盤層の設定	恩田委員	SWATで岩盤層の設定ができない点について、浅層帯水層を使えばよいのではないかと。（恩田委員のコメントの通り）		
8	基岩浸透	白木委員	岩盤層の設定ができていない点について、浅層帯水層を使えばよいのではないかと。（恩田委員のコメントの通り）		
9	浅層帯地下水	五味委員	浅層帯地下水深を2000mmとかなり大きな値を与えているが、浅層帯地下水は出てきているのか。	・地下水として流出している。（日林協：篠畑）	
10	蒸発散	白木委員	貝沢で2012年に行った伐採試験を今回の観測結果と合致するの非常に興味がある。比較をすることでモデル相違みの方針が決定できる。		
11	蒸散	恩田委員	樹液流だと冬場に蒸散量がとても大きいというデータであるという話だが、他の研究結果でもこのような傾向がみられるのか。	・これから別の研究と比較予定。（東京農工大学 邱氏）	
12	LIDAR	五味委員	LIDARの結果として表記している数字は、アジア航測さんのアルゴリズムで計算した結果か。	・アジア航測さんのアルゴリズムで計算した結果。（日林協：永野）	
13	LIDAR	五味委員	スギとヒノキを比較するとヒノキの結果がよくないが、今後どういった検討をしていく予定か。整合性を検証するためには、LIDARのほうもある程度限られた範囲でやっておかないと、アジア航測の結果だけを生で使うわけにはいかない。	・GPS情報をもとに実際にプロット調査を行った範囲のバッファを発生させるなどして検証してみる（日林協：永野）	・ヒノキ林の中にかかなり大きいスギが点々として残っていたことが原因。この状態で林分で代表値を取った結果、純なヒノキ林で行ったプロット調査の値と差が生じたと考えられる。（日林協：金森）
14	貝沢の林相	オブザーバー バー内山氏	（上記のヒノキの精度に関連して）貝沢は過去に雪害の影響で部分的に補植があるため、プロットの取り方によっては少しばらつきが出る可能性がある。	・もとも大きなスギがあって、雪害で折れてしまった場所にヒノキを補植するという形で複層林のような形になっている箇所がある。（白木委員）	
15	林相の調査	五味委員	林分、密度を基準にした水源涵養機能の評価につなげていくには、この部分の精度をどう上げていくかが大変重要。今後の方針として、林相の調査についてはどのようにまとめる方針か。	現在、進められている複層林や混合林など、細かい林分情報に対応した林相区分図を作成する必要があるが、現状のモデルではそこまでのレベルに至っていない。現在は森林簿ベースのデータを使用。立木密度も含めて、来年度どこまで更新するかということも、この委員会の中で少し議論したい。	・航空機レーザ計測の活用は今後重要なところになってくる。来年度の話かもしれないが、こういった形で活用できるのかという方向性を明確にできるとよい。特に4点のLIDARがあるところと、そうでないところどういふふうに使っていくのかということ。（五味委員） ・従来の森林簿の林相区分図のほうがより正しいのであれば、そちらを使ったほうがよい検討ができるかもしれない。何がなんでもLIDARデータを使うという決断は避けたい（堀田委員） ・必要とされるデータの要求性能を検討し、見合った方法を適宜選択するのがよい。（堀田委員） ・上記は重要な点である。特に林分の密度によって使える使えないということや、ドローン、地上も含めて3D計測はいろいろなアプローチがある。精度を上げるためにはどうしたらいいのかの検証も必要。

No.	質問項目	質問者	質問・意見	回答	回答後の質問者コメント
16	小松モデル2015の拡張	堀田委員	(東京農工大学 猪越氏の修士研究成果について) 縦軸 r (逓率) について密度と樹高でそれぞれ出されているが、統合することは可能か。またそれを統合したのであれば、縦軸と横軸に r の観測値、実測値とモデルの推定値を取ったときにどの程度のばらつきが出るのか。	マルチプルに処理、重回帰するというイメージか。おそらくそれも可能。(五味委員)	・樹種によっても分けられているようなので、全部入れた後に、r を縦軸、横軸、実測と計算値で取ったときに、モデルを全部統合したといえると思うが、そのモデルの再現性がどの程度なのかという情報があると見通しが立ちやすい(堀田委員) ・猪越氏と相談して、その方向で発展させたい。(白木氏)
17	小松モデル2015の拡張	恩田委員	広葉樹は高さで評価できるかもしれないが、LAIみたいな形とどうなるのか。	・過去研究を収集した結果では、材積が出ているデータは少ない。LAIが出ているものもどれだけあるかわからないが、それをピックアップしたり、現状LAIを計測したものでどう変化するかといったチェックは可能(白木委員)	・過密化している林分のLAIと林分調査の結果と絡められるといい(五味委員)
18	グラフの表示方法	五味委員	水収支を全部一覽表にパーセントではなくてミリで表示しておくとい。		
19	SWATモデルにおける流出過程の名称	原田委員	SWATの流出過程の名称について蒸発散、表面流、側方流、復帰流という記載があるが、実際の現象と同意ではない。早い流出、遅い流出、基底流など限定的でない名称を記載すべき。	・あくまでSWATの定義している名称ということに留意し、記載の際には十分注意する。(日林協:永野)	
20	モデルの評価	恩田委員	モデルの評価について、一体何をもちって合っているかと判断するのか、平時ではなく減速期について評価を行うべきではないか。	・SWATのキャリブレーション機能を使って検討するのは難しいが、減速期のモデルと実測値の整合について検討していく。(日林協:篠畑)	
21	モデルの評価	堀田委員	水収支と、ある閾値を設けた流量以上の流量のハイドログラフの波形と水収支を評価すべきであって、河水流量については気にしないほうがいいのでは。	・検討していく。(日林協:篠畑)	
22	モデルの評価	白木委員	モデルの正確さの評価方法は、獲得目標で変わる。本事業では水源涵養の評価という形でモデルを使用することを踏まえ、森林変化による水源涵養機能を表現できるかどうか重要。		
23	減速の曲線	大西技術アドバイザー	モデルのコーディング上からの認識では、減速の曲線のカーブが少し立ちきみになってしまっているのはモデルの構造上どうしても避けたい。流出量が下がり過ぎてしまうようなところで、浅層地下水からの基底流をどう表現するのかというところが1つのモデルの構造上の課題。	減速期のカーブを合わせた上で浅層地下水深を変えたらどうなるかという点を検討するとよい。(五味委員)	目標に応じて、高水のところと低水のところそれぞれ別の指標で評価していくのがよい(大西技術アドバイザー)
24	モデルの精度評価	五味委員	解析の方針を決定したうえで、解析目的に合ったモデルキャリブレーションを実施すべき。次年度に向けて一貫性がある方針を検討する必要がある。		
25	モデル結果	五味委員	モデル結果について、貝沢を基準にしてパラメータをそれぞれ当てはめているということか。	・使用しているパラメータ値は、貝沢で使っているパラメータを基に各モデルでキャリブレーションを行ったため、貝沢とは少し異なる値となっている。道志・現代と道志・過去については、全く同じパラメータを充てている。(篠畑)	
26	モデル結果(貝沢)	五味委員	貝沢のシミュレーション結果は、どのような検討結果をベースにしているのか。	傾斜と斜面長の値をDEMの値から変更した検討結果が現状の評価指標で使っている評価について一番よい結果となったため、そのときに使用したキャリブレーションの結果を使用している。(篠畑)	
27	モデル結果(貝沢)	白木委員	コードを見る限り、貝沢の蒸発散が269mmというのは少なすぎるため、コーディングエラーがあると考えられる。		
28	モデル結果(三保現代)	堀田委員	蒸発散量について、気象条件で決まるもので上限がある値なので1000mmを超えるというのはいくつ多い。	・小松先生の2020の論文などから計算した結果なども検証する必要がある(五味委員)	
29	モデル解析	恩田委員	0	・若齢部分については既存の成長モデルとも照らし合わせるなど、使用の範囲には注意してみたい(永野)	
30	モデル結果の活用	堀田委員	モデルの結果についてどこまで精緻に解析ができるのかという部分について事前に検討すべき。		
31	流況曲線	小杉委員	今後のモデル解析において流況曲線を使用する場合、流況曲線がモデルで再現できるかどうかモデルの評価指標となる。	・現状だと流況曲線は実測とモデルで乖離があるが、実測値がどうなっているのか知見を得ることは重要(日林協:永野)	
32	流況曲線	堀田委員	流況曲線の比較は、流量を比較する前に降雨量の変化について検討すべき。		
33	対象流域の水文特性の比較	五味委員	対象流域の水文特性について1981と2016の2年の比較により、現代の林相のほうが濁水流量が多いというのはいくつ不足。データはもっと長期間あるのでは。	・過去モデルは78年から82年までの5年間分、現代は2016年前後のおよそ5年間分のデータがある(日林協:永野)	・長期的なデータがあればもう少し別の観点で解析して、短期水収支がよいのかかかいいのか、いろいろな方法を検討することが重要。過去の状態で、例えば先ほど白木先生からお話があった猪越さんのモデルを使って過去の状態で蒸発散量の推定も可能であり、それとの対応も重要。
34	SWAT出力項目の表現について	原田委員	P54にある蒸発散、表面流、側方流、復帰流という言葉について、これは実際の本当の表面流等ではなく、SWATのパラメータ。早い流出、遅い流出、基底流のような表現に置換えたほうが良い。	表面流、側方流等は、あくまでSWAT定義上での表現であるということ前提にしなければならない。	言葉が独り歩きするのを避け、SWATで推定した結果こんな感じになりましたという翻訳の仕方が。
35	SWAT出力項目について	五味委員	林齢と樹高の関係例えば標準的な成長モデルと合わせたらどうなるかということも少し見ていくと、この流域における特徴をもう少し把握できる。		
36	解説資料の分量について	堀田委員	解説資料について、出来上がりまで何ページぐらいのものを想定しているか。	・1項目は1ページ、あるいは見開き2ページ程度。(五味座長) ・当初は全体で約50ページぐらいを想定していたが、グラフや引用文献を入れると、どのぐらいのページ数になるか、明確な数字は無い。(林野庁:中村課長補佐)	全体は50ページ程度を考えると、全部で17項目があるので、1項目は2〜3ページでよいと思います(五味座長)
37	想定読者	堀田委員	想定する読者は県の職員や専門家になるということでのよいのか 一般向けの教科書的なものではなく、内部資料的なもので、科学的な根拠のある説明を行うような解説資料か。	一般向けに考えているのは、本事業の結果を整理した概要版の方。 基本的には森林行政職員などが閲覧、活用できるもので、一般の方にも理解できるような内容もしたい(林野庁:中村課長補佐)	
38	執筆作業	堀田委員	各項目に2〜3ページの分量で書くのは、全体的に検討しながら執筆をする必要がある。	何ページ以内の決めはない、実際の内容による正確な表現をできる適宜ページ数でよい(林野庁:中村課長補佐)	
39	(解説発信) 執筆作業の進行管理	原田委員	Google DriveやMicrosoft Teamsなどを使って、執筆者の進行を見えるような形で進めていく。	ご提案の通りにする(五味座長)	
40	執筆作業の担当	小杉委員	委員の方が執筆担当になるのは、役割分担が少し不合理かも。	別紙2の内容を膨らませて、各担当先生の方に内容を確認・指摘のやり取りをする(五味座長) 学術的な内容を書くため、研究者の方々に執筆をしていただきたい(日林協:高橋)	

(3) 洪水緩和機能等の評価結果に係る概要版

「森林の水源涵養機能の評価・発信に関する調査」の概要 (①調査の背景・過程)

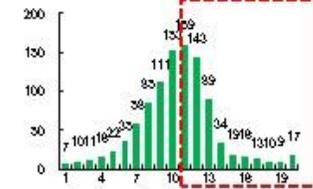
調査の背景

- 森林の水源涵養機能（洪水緩和機能、水資源貯留・水量調節機能等）については、過去の研究においても一定の効果がある旨の報告がなされているとともに、日本学術会議の答申（※）においても、多面的機能の一つとして位置づけられているところ。
 （※「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」（平成13年11月））
- 一方で、近年、気候変動に伴い短時間豪雨の増加や強度の強い豪雨が長時間継続するなど豪雨形態の変化により激甚な災害が頻発し、山地災害も多発。森林の水源涵養機能の更なる発揮が求められるとともに、森林資源の充実を踏まえた機能の再評価が重要。
- このような状況を踏まえ、現在の森林における水源涵養機能の定量的な把握や、森林の管理状態による差異等の分析を行い、今後の森林管理のあり方について指針を得る。また、最新の知見を整理・発信することで、森林の水源涵養機能についての更なる理解と、機能の高度発揮に向けた森林整備の推進を図る。

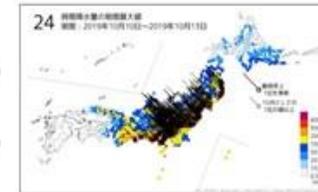
水源涵養に資する森林



人工林の成熟



豪雨の増加



山地災害の多発



アプローチ

水源涵養機能の定量的な解析・評価

- ・ 水源涵養機能の定量的な把握のため、精度の高い分析が可能なSWAT(※)モデルにより、森林内での水の動態を解明。
- ・ 調査対象地として、森林の成長・回復による効果のデータを取得しやすい相模川水系（神奈川県）を選定。



(※Soil and Water Assessment Tool: 農業等の土地利用による、水・土砂・物質の影響を解析・評価するために米国農務省で開発されたモデル)

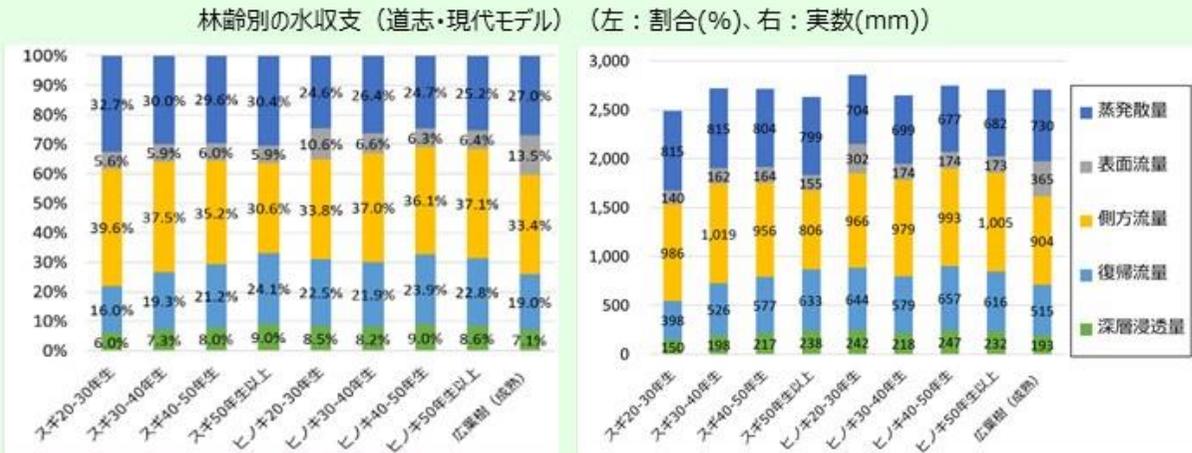
水源涵養機能の解説資料の作成

- ・ 令和4年度に、森林のもつ水源涵養機能（洪水緩和機能、水資源貯留・水量調節機能）のメカニズム・効果について解説する資料を公表予定。
- ・ このため、森林の水源涵養機能に関する昨今の研究成果を収集・整理し、解説資料の草稿の作成を行う。なお、令和3年度においては、草稿の骨子を作成。

「森林の水源涵養機能の評価・発信に関する調査」の概要 (②これまでの調査・分析結果)

分析結果のポイント

- モデルは引き続き調整が必要な状態のため、暫定的な結果となるが、道志ダム集水域での分析結果からは、特にスギについて、林齢が高い林分ほど、地下に浸透する水量（深層浸透量、復帰流量）も高い傾向が見られた。
- このことから、森林の成熟により、水源涵養機能が向上することが示唆されたが、今後、過去モデル等の精緻化・比較やシミュレーション等により、更なる分析・検証を行う予定。



注：今後の更なるモデルの精緻化・分析により、各結果の数値は変更される可能性あり。

利用目的に応じたモデルの検討

- SWATモデルは比較的簡易な手法やデータ収集により、モデルの構築やシミュレーションができるため、各流域におけるおおまかな流出量の把握・推定には有用である。また、森林とその他の土地（田畑、市街地等）との比較にも利用しやすい。
- 一方で、個々の森林施業がもたらす効果や、針広混交林や複層林といった比較的林分の構造が複雑な森林について評価を行う場合には、LiDAR等の高精細なデータの収集や多くのパラメータの微調整等が必要となり、構築・分析に時間を要する。
- このため、用途を踏まえたモデルの構築・精緻化を行うことで、より効率的・効果的な利用が可能になり、適用可能性も広がると考えられる。

構築手法	一般的	高度
雨量	気象庁や国交省の地点雨量データを使用	雨量の空間分布を考慮。標高などで加重。
林相区分図	<ul style="list-style-type: none"> 入手可能な公的機関データ 土地利用種別メッシュ 環境省植生図 	
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	モデルに組み込まれた計算方法から選択	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解明・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解明や流出量の違いを把握したい場合。

(4) 森林の水源涵養機能に係る解説資料草稿骨子

項目案	【R3 事業に向けたたき台】記載内容のイメージ (太字は伝えたいメッセージ)	キーワード/主 なコンテンツ	引用論文・既往の知見等のイメージ
はじめに	本書の位置づけ、各章の説明等を記載		
1. 森林の水源涵養機能の定義とその重要性	○森林の有する水源涵養機能と、その重要性を改めて説明。	レビューと解説	・平成13年及び平成23年学術会議答申
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	<ul style="list-style-type: none"> ・社会的背景と森林の水源涵養機能（最近のトピック） ・極端気象・線状降水帯・近年の土砂洪水の発生、過密人工林（森林管理の課題） ・流木災害、人口減少や農山村の地域計画など（流域治水も入れるか?） ・①日本列島は南北に長いこと、亜寒帯気候から亜熱帯まで気候区分は様々である。②多様な林分構造により水源涵養機能が異なる。③多様な地質が存在し、急峻な地形も多いことから山地災害の素因となる箇所が多い。④降雨パターン（降雨や降雪）の変化、豪雨の発生頻度などの変化が起こり、災害も多発化・激甚化している。そのため、⑤森林の水源涵養機能（洪水緩和機能）への国民からの期待も大きく、その維持・向上が求められている。さらに、⑥森林と居住地が隣接している農山村が多いことにより、森林状態や森林管理が農村社会基盤の維持を含めて生活の場（災害や水資源管理）にも大きな影響を及ぼす可能性がある。⑦樹種や管理履歴などの多様な森林や地形に対応した水源涵養機能の評価が求められる。 		森林・林業実務必携 森林学の百科事典など 中村太子・菊沢 喜八郎編『森林と災害』共立出版、2018 太田猛彦『森林飽和—国土の変貌を考える』NHK ブックス、2012
1-2 ・我が国における水循環と森林のはたらき	<ul style="list-style-type: none"> ・森林率が高く、山地上流域は重要な水源域であり、水資源を豊富に貯留することが可能である。流域的な視点では、上流森林域からの水は中下流域の農業・工業・飲料水等の利用に寄与している。地域住民などの森林と水に関する意識も高く、国民が期待する多面的機能として水源涵養機能が一位になる。企業や自治体では、良質な水の確保への期待は大きい。 ・世界や国内での森林率のデータ、天然林と人工林の面積割合、材積割合など。 ・学術会議答申の内容を転記・説明し、水源涵養機能（洪水緩和、水資源貯留・水量調節、水質浄化の各機能）の定義・内容の説明（ただし、2-4などに移動の可能性もあり）。 ・本書のねらいとして、「洪水緩和、水資源貯留、水量調節」の3点に絞る。 		水循環白書（R3：「第1部 水循環施策をめぐる動向」「第1章 水循環と我々の関わり」 https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/mizu_junkan/materials/materials/white_paper.html ）森林・林業白書（H25：「第1章 森林の多面的機能と我が国の森林整備」 「1. 森林の多面的機能と森林整備」 http://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/hakusyo/25hakusyo/pdf/6hon1-2.pdf ）など
2. 森林・緑化・保安林管理の歴史と森林景観の変化	○これまでの経緯を振り返るとともに、 水源涵養機能を改めて評価し直す必要性を提示する。 (水源涵養機能を評価し直す：定量的・科学的な知見を政策に反映させようとしていること(2-4で述べる)、モデルを使う意義(4-6で述べる)) (はげ山からの回復の意味で「緑化」と表現)	レビューと解説	
2-1 ・森林の変遷と管理（過去と現在の森林の比較）と災害の歴史 ・森林と変遷と政策	<ul style="list-style-type: none"> ・森林と水に関する議論は古くからある（江戸時代くらいから） ・熊沢蕃山や「諸国山川掟」、明治の治水三法の1つとしての「森林法」についても適宜紹介。ハゲ山からの回復が洪水防止に繋がることやそれを支える技術体系（治山工事）についての重要性の認識が広がる。 ・第二次世界大戦中の乱伐・過伐により森林は著しく荒廃、戦争直後の相次ぐ大型台風襲来により激甚な山地災害（斜面崩壊）や洪水被害が多発していた（多田、2018）。公共事業としての森林整備の必要性。 ・保安林整備緊急措置法（1954年） 保安林整備や治山事業の推進を通じた森林再生により、その後は被害軽減。森林が水害対策として大きく寄与してきたことを説明する。 ・国内産木材の需要と供給のバランスの変化、農山村の過疎化（里山林が維持整備されなく 	伐採 植栽 斜面崩壊	玉井先生資料など（災害の発生と被害者数の推移のグラフ） 森林・林業白書（H25「第1章 森林の多面的機能と我が国の森林整備」 「2. 我が国の森林整備を巡る歴史」 http://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/hakusyo/25hakusyo/pdf/6hon1-2.pdf ） 多田泰之。（2018）. 国土の変遷と災害. 水利科学, 62(4), 121-137. 玉井幸治。（2019）. 近年に発生した災害から森林の防災減災機能を考える. 山林, (1618), 34-42. 徳川林政史研究所編 『森林の江戸学 II-徳川の歴史再発見-』 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

項目案	【R3 事業に向けたたき台】記載内容のイメージ (太字は伝えたいメッセージ)	キーワード/主なコンテンツ	引用論文・既往の知見等のイメージ
	<p>なった)、林業労働者の高齢化と減少などの木材利用をとりまく状況の変化により森林状態が変化、人工林の過密化(間伐遅れ)⇒森林の役割の変化</p> <ul style="list-style-type: none"> 森林税や水源税の導入と森林管理:「参加型税制」としての森林整備のための新たな税負担の必要性和水源林管理への住民の関心を高めるとともに、事業評価やモニタリングを実施する方向性が定着しつつある。 政策として求められる森林の姿 <p>森林・林業基本計画の方針:(※森林・林業基本計画から引用)「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」</p> <ul style="list-style-type: none"> (※「豪雨災害に関する今後の治山対策の在り方検討会(とりまとめ)」から引用)「戦後以降の計画的な森林整備・治山対策の取組により、森林資源が面的に充実し、成熟化するとともに森林土壌や根系の発達が促されたことにより洪水緩和機能や土砂流出防止機能が高まり、現在、森林全体としての機能発揮は歴史的にみて良好な状態」 		
2-2	<ul style="list-style-type: none"> 今求められる森林景観・林相(人工林管理、混交林化など) <ul style="list-style-type: none"> 具体的な森林の姿を示す これまでの森林林相のイメージとこれからのイメージを示す 人工林の管理 混交林化(針葉樹と広葉樹):混交林誘導施業 林床植生の導入と管理(小規模人工ギャップ⇒貝沢などの事例) これからの森林管理において、流域や水・土砂災害対策は大きなテーマの一つとなっている。 今後主伐一再造林の循環型林業へシフト ゾーニング等への議論 <p>一方で、このような林相に対応した森林の水循環に関する情報が示されていない⇒森林のイメージを持ってもらうようなイラストがあると良い</p> <ul style="list-style-type: none"> (※全国森林計画から引用)「洪水の緩和や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。ダム等の利水施設上流部等において、水源かん涵養の機能が十全に発揮されるよう、保安林の指定やその適切な管理を推進することを基本とする。」 (※「豪雨災害に関する今後の治山対策の在り方検討会(とりまとめ)」から引用)「今後の災害の激甚化を見据え、森林の土砂流出防止機能、洪水緩和機能を維持・向上させ、地域の安全性向上に貢献していくためには、機能が低下した森林をターゲットに対策を強化することで、流域全体の森林の機能を更に高めていくことが重要」「人工林が本格的な利用期を迎える中、今後主伐一再造林の循環型林業へシフトしていくこととなる。(中略)森林土壌を継続的に保持していくため、土壌の攪乱をできる限り抑えるよう努めることや、伐採箇所の選定に当たっては崩壊が発生しやすい微地形の把握に努めることが必要」(※「景観」を含めた趣旨は要確認) 	間伐 皆伐 再造林	<p>林野庁関係資料(森林・林業基本計画、全国森林計画等: http://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/plan/index.html http://www.rinya.maff.go.jp/j/keikaku/sinrin_keikaku/con_3.html) 白書関係書類 藤平拓志.(2021).奈良県が取り組む新たな森林環境管理.森林応用研究,30(1),17-21. 田中和博・吉田茂二郎・白石則彦・松村直人 編『森林計画学入門』2020年</p>
2-3	<ul style="list-style-type: none"> 森林税や水源税の導入と水源管理の取組 <ul style="list-style-type: none"> 森林税と水源税の構造。 森林環境譲与税や、それを活用する森林経営管理制度を紹介し、「手入れの行き届いていない森林について、市町村が森林所有者から経営管理の委託(経営管理権の設定)を受け、林業経営に適した森林は地域の林業経営者に再委託(経営管理実施権の設定)するとともに、林業経営に適さない森林は市町村が公的に管理(市町村森林経営管理事業)をする」旨を記載。 全国同じ補助事業メニューではカバーしきれない地域課題のために独自財源で取り組むという部分に着目。用途の使い分けによる森林管理のメニュー。 譲与税と管理制度によって森林管理主体のすそ野が市町村に広がり、林業経営に適さない 	水源税 森林環境税 都道府県 国	<p>神奈川の事例 森林・林業白書(H30:「第1部 森林及び林業の動向」「第2章 森林の整備・保全」「1.森林の適正な整備・保全の推進」「(3)森林経営管理制度及び森林環境税の創設」 http://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/hakusyo/30hakusyo_h/all/chap2_1_3.html) など 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,</p>

項目案	【R3 事業に向けたたき台】記載内容のイメージ (太字は伝えたいメッセージ)	キーワード/主なコンテンツ	引用論文・既往の知見等のイメージ
	<p>森林の公的管理など、これまで以上に、森林と水源涵養機能の関係を多くの方にご理解いただかなければならなくなった。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・当初、「水源税」を要望してきたことから、森林環境税・森林環境譲与税の導入に至る経緯（賛否の議論や状況の変化等を踏まえた要望内容の変遷等）等を紹介？ （かつて「水源税」の導入が進まなかった背景の1つに課税根拠についての理解が十分に得られなかったことがあるが、近年、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の変化や産業構造の変化があった。一方で、森林の水源涵養機能の科学的・技術的な根拠・メカニズムについてはまだ未解明な部分が多いことにも留意が必要） ・一方で、鈴木ら（2020）からもわかるように、市町村レベルでの技術者、土壌や水士保全についての知識や技術の不足についての懸念が指摘されている→本書の意味や位置づけの重要性とも関連する。 ・森林環境譲与税や森林経営管理制度、森林整備等を目的とした都道府県の独自課税による取組をいくつか紹介し、各地域で森林整備の取組が進んでいる／今後活発になる見込み（期待）について説明。 <p>（※「水源管理」は保安林や水源地治山対策（水源地域整備事業）や水源林造成事業等？）</p>		<p>66(1), 51-60. 其田茂樹. (2020). 森林環境譲与税をめぐる動向—自治体別譲与額と2020年度地方財政計画による制度変更—. 自治総研, 46(500), 48-78.</p>
2-4	<ul style="list-style-type: none"> ・今求められる森林の水源涵養機能の評価軸 ・豪雨や台風による被害や、「今求められる林相」、森林経営管理制度の導入、森林資源の充実等、昨今の状況の変化を踏まえて、洪水緩和や水資源貯留等の機能を改めてどのように評価することが求められているかについて説明する。 ・政策の側面から求められる評価の観点・評価軸に対して、水源税なども含めて森林整備事業としての水源涵養機能を“定量的に”評価して示すことが求められている。 ・水源涵養機能のそれぞれについての定量評価：「洪水緩和、水資源貯留、水量調節」の定義を示す。そのためには、個別現象の解明とそれを統合する視点が重要である（モデル化など）。 ・流域スケールでの視点の重要性について説明する：既往の知見であるプロットの視点から流域への展開の必要性について（森林税の事業評価としても重要である） 出来る限り定量化することが重要で求められている方針を示す。森林管理指標や多面的機能の指標としての水や土壌の指標は適切に考慮させていない現状（山田，2019）。 2章までは概要・教科書的な話を示す。 地域性の重要性は「おわりに」やまとめて述べる。 	<p>管理状態 成熟度 荒廃からの回復</p>	<p>神奈川県取組など 豊田市の取組など 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. 日本水文学会誌, 49(3), 135-159. 山田祐亮. (2019). 市町村で森林管理に関する指標を策定する際の方策の類型化と課題の抽出. 森林計画学会誌, 52(2), 49-57.</p>
3. 森林の水循環の構成要素	<p>○水循環のプロセスの説明</p>	<p>方法論の例示</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・有明海等の閉鎖性海域と森林に関する調査（林野庁） ・森林総研の小流域モニタリングの状況（情報提供または執筆を相談） ・谷（2016）水と土と森の科学 ・恩田裕一，五味高志（編集）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
3-1	<ul style="list-style-type: none"> ・蒸散・遮断・林床面蒸発 ・地上部での水の動態・メカニズムとして、降水が樹冠に到達すると、樹冠に貯留されるものと大気に戻るものがあるあり、樹冠による遮断がある（樹冠遮断）。林冠を通過した降雨は、林内雨と樹幹流として地上に到達する。林床面に植生がある場合、その植生による遮断が存在する。 ・樹種や密度により遮断や蒸散は異なる。また、降雨と積雪では遮断量は異なる。 ・土壌中に浸透した雨水は根から吸収されることで、蒸散として大気に戻る。 ・一般的な森林の遮断量や蒸散の数値を示す。 （イラストを入れる） 		<ul style="list-style-type: none"> ・樹冠通過雨、林内雨、樹幹流：服部（1992）、Murakami（2006）、佐藤（2007） ・蒸発散量：Iida, S. et al. (2006)、熊谷（2007）、鈴木（1992）

項目案		【R3 事業に向けたたき台】記載内容のイメージ (太字は伝えたいメッセージ)	キーワード/主 なコンテンツ	引用論文・既往の知見等のイメージ
3-2	・表土の浸透能、 土壌水移動	<ul style="list-style-type: none"> ・土壌表面の浸透能により、浸透しない成分は、地表流となる。一般的に森林土壌の浸透能は高く、表面流の発生はないとされているが、ヒノキ林斜面における浸透能の発生事例も報告されている。 ・土壌の存在とその厚さなどが、土壌と森林、土壌と岩盤の水移動に影響を及ぼす。 ・土壌中の水は、土壌のマトリックスによる浸透とともに、土壌中に空隙を選択的に流れるなどで、土壌中から岩盤への水の移動について、地中流、地下水流（山体地下水？）として移動する。 ・土壌の生成や根系等による土壌構造の複雑さが水移動に影響を及ぼす。 ・岩盤にも水が浸み込んでおり、岩盤中の水の移動も山地の水源涵養機能では重要である。 ・地質により、土壌や岩盤への水の配分が異なる。 		<ul style="list-style-type: none"> ・保水力：有光（1987）、野口（1981） ・保水力の調べ方：有光ら（1995） ・母材・母岩の保水力：Ohnuki Y. et al.（1999）、塩崎ら（1992）、上杉ら（1999） ・流域の保水力：藤枝（2007）、日本学術会議（2001）、山本・高橋（1987） 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.
3-3	・水流出	<ul style="list-style-type: none"> ・河川や溪流の水流出 ・降雨に対する河川流出の特徴。ハイトグラフとハイドログラフとは何か？ ・降雨量の観測と流域における降雨量（空間的な降雨量評価、標高による違いなど） ・量水堰について ・データの収集方法（データロガーなどと時間分解能と精度） ・降雨から河川への変換（土壌や岩盤を介した時間的な遅れ） ・流出率とは（基底流出、洪水流出について） ・地質による配分の違いについて 	流出量 地質 森林伐採 長期モニタリ ング	<ul style="list-style-type: none"> ・水の移動：久保田ら（2007） ・水の流出：木村・山田（1914） ・塚本良則（1998）森林・水・土の保全一湿润変動帯の水文地形学
3-4	降雨⇒森林⇒土壌 ⇒河川	個々の水文プロセスの要素の組合から水循環へ展開する説明 個別から連環した視点が重要性和スケール	タンクモデル 分布型モデル	小川滋（2015）森林環境と流域生態圏管理
4. 森林や流域状態と水源涵養機能の発揮		○異なる森林状態での森林内での水の動態の実態とその影響因子について、最新の知見・研究成果を織り交ぜつつ紹介。 (※タイトルの「発揮」については、「6」「7」等で検討するため、「機能の評価に向けて」とする?) 4章では時間は固定、空間と状態による違いを示す（5章で時間による違いを示す）	既往研究 レビュー	
4-1	・多様な水循環の 要素と多様な森林 状態から流域の水 源涵養機能評価の 重要性	<ul style="list-style-type: none"> ・さまざまな因子があるという説明を行う。 ・土地利用、森林、土壌、岩盤、地形など 	流域スケール 流域治水	
4-2	土地利用に関する 因子	<ul style="list-style-type: none"> ・森林、草地、農地、裸地の比較 ・ハゲ山からの緑化と回復 ・草地化と森林の違いについて ・根系の効果と違い 		<ul style="list-style-type: none"> ・農地と森林の流出量比較：小林ら（1984） ・森林と採石流域の洪水到達時間：森林と水研究会（1996） ・地種と水資源貯留：小杉（1999）、佐藤（1993）、イアン・カルダー（2005）、藤枝（2015） ・地種と蒸発散：イアン・カルダー（2005）、佐藤ら（1999）、谷ら（2012） ・地種と浸透能：村井ら（1975）、C・O・ウイスラー、E・F・ブレーター（1973） ・地種と保水能・洪水緩和機能：藤枝（2007）、有光ら（1995）、角屋（1988）
4-3	森林状態に係る因 子	<ul style="list-style-type: none"> ・地上部のうち、立木に関する因子を紹介。 ・樹種、季節（落葉期と着葉期）、密度などの評価 ・単木レベルと林分レベルの両方で捉えることの必要性を説明。 	SWAT モデルマニ ュアルから引用	SOIL&WATER ASSESSMENT TOOL Theoretical Documentation Version 2009

項目案	【R3 事業に向けたたき台】記載内容のイメージ (太字は伝えたいメッセージ)	キーワード/主なコンテンツ	引用論文・既往の知見等のイメージ	
4-3-1	樹冠や林分状態と蒸散・遮断	<ul style="list-style-type: none"> どのような因子があるか？葉面積指数(LAI)や密度 樹種(針葉樹・広葉樹) LAI や密度と蒸散や遮断の相関についての解説や事例紹介・LAI とは何か？：植生群落の単位地表面積(例えば 1m²)当たりの葉の投影面積の総和である。m²/m² などとなることから無次元化されている。植生の放射吸収、光合成・蒸散量、炭素吸収能力などを示す指標ともなる。 なぜ、LAI と蒸散や遮断が相関するのかそのメカニズムを解説 立木密度、樹冠開空、収量比数など LAI との関係性について 蒸散や遮断のメカニズム(物理性や生物生理特性)と樹種や LAI との関係性 樹冠貯留、気孔コンダクタンス等のパラメータ解説 気孔コンダクタンスとは、気孔のガスの通りやすさである。水蒸気は CO2 よりも分子量が小さく、より拡散しやすい。 	最大樹幹貯留量 最大気孔コンダクタンス 最大樹冠高	<ul style="list-style-type: none"> 葉面積指数：Osone et al. (2020)、山崎ら(2006) 樹幹貯留量：Iida et al. (2017)、大竹ら(2007) 蒸発散量：小松ら(2005)、Komatsu et al. (2015) 樹種と水流出：木村・山田(1914) Bosch, L.M. and Hewlett, J.D. (1982) 林冠の面積と遮断量：鳥羽ら(2008) 樹種と水資源貯留：湯川ら(1995)、服部ら(2001)、小松ら(2005)、谷ら(2012)、久田ら(2011) 林相構造の違いと水資源貯留：小林(1982)、小野(2014)、服部ら(2001) 年齢と水資源貯留：村上(2003)、細田ら(2005) 優占樹種と蒸発散：太田・服部(2002)、谷ら(2012)、小松(2005)、村井(1993) 林相構造と蒸発散量：村井(1993)、久田ら(2011) 年齢と蒸発散量：谷ら(2012)、村上(2002)、小松(2005) 優占樹種、林相構造と浸透能：藤枝(2012)、湯川ら(1995)、平岡ら(2010) 年齢と浸透能：岸岡ら(1945)、真下(2005)、宮前ら(2013) 優占樹種と保水能：諫本(2002)、村井(1933)、金子ら(2010) 林相構造と保水能：小野(2014)、真板ら(2005) 年齢と保水能：諫本(2002)、村井(1933)、佐伯(2003) 樹種と洪水緩和機能：斎藤(2010)、近嵐(1987) 林相構造と洪水緩和機能：真板ら(2008) 年齢と洪水緩和機能：児島ら(2013)、五名ら(2012)、細田ら(2002) (参考) 整備保全事業推進調査(林野庁)問 05-5~8
4-4	林床植生・土壌表面に係る因子	<ul style="list-style-type: none"> 地上部のうち、林床植生(下層植生)に関する因子を紹介 下層植生の有無・程度が、水循環の評価において無視できないことを説明。 	SWAT モデル解説を中心として説明	
4-4-1	林床植生量と遮断や蒸散	<ul style="list-style-type: none"> 下層植生が降水の一部を遮断することを解説する。 遮断の程度等について研究成果を紹介。下層植生による蒸散を説明。 蒸散の程度等について研究成果を紹介。 林床の光環境の変化とバイオマス量 木本と草本の違い(多年生と単年生の違い) リター遮断と貯留 土壌からの蒸発の評価 	バイオマス量	<ul style="list-style-type: none"> 下層植生からの蒸発： 土壌孔隙：服部ら(2001)、藤枝(2001)、服部(2003) 林床被覆：恩田(2007) 清野嘉之。(1990). ヒノキ人工林における下層植物群落の動態と制御に関する研究. 森林総研研報, 359, 1-122.
4-4-2	林床植生や被覆と表面流の発生	<ul style="list-style-type: none"> 下層植生が表面流や土壌浸透に与える影響を解説する。 林床植生やリター量と浸透能の関係 下層植生が土壌の孔隙を発達させて土壌の浸透能を向上させること(乾燥した土壌の撥水性も抑える)や、雨滴の衝撃を抑える等により土壌の流亡を防ぐこと、表面流の速度の緩和すること等を、研究成果も用いて説明。 	浸透能 土壌孔隙の違い 撥水性 雨滴衝撃	<ul style="list-style-type: none"> 林床植生と浸透能：平岡(2013) 林床被覆と地表流：海虎(2012) 下層植生の効果：Mizuno et al. (2021) 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—。森林科学, 47, 10-14.
4-5	土壌や基岩に係る因子	<ul style="list-style-type: none"> 地下部(土壌、根系)に関する因子を紹介。 土壌の生成とそのプロセス、土壌特性の不均質性 鉛直根と水平根の存在 土質や根系の広がり等が浸透や地下水流に影響を与えること、地上部に比べて分析・評価が難しいことを説明。 	SWAT モデル解説を中心として説明	<ul style="list-style-type: none"> 恩田先生 CREST 1 石川ら(2007) 飽和透水係数：森林総研土壌の保水・排水特性の斜面位置による違い 森林総研(2012)、大貫ら(1995) (参考) 整備保全調査問 05-1~4, 05-9~17 (参考) 水源森林保全調査(林野庁) 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

項目案		【R3 事業向けのたき台】記載内容のイメージ (太字は伝えたいメッセージ)	キーワード/主 なコンテンツ	引用論文・既往の知見等のイメージ
				影響. 砂防学会誌, 55(4), 12-22.
4-5-1	・土壌や地形条件	<ul style="list-style-type: none"> ・土壌条件(土層の厚さや土質)や地形・勾配により飽和・不飽和透水係数や保水性が大きく変わること等を、研究成果も用いて説明。 ・土壌の厚さの違い ・土壌の質・団粒構造など ・選択流のように土壌中の水流が複雑で調査・分析が難しい面があることも説明。 ・一般的な土壌の厚さ ・土壌の浸透能の数値 	土壌の厚さ 飽和透水係数 選択流	・団粒構造と貯留能力: 小杉 (1999)
4-5-2	・樹木根系の役割	<ul style="list-style-type: none"> ・根系の広がり・発達度合いが浸透能に与える影響を説明。 ・根の深さにより吸水量が変化すること(吸水深度)や、根系が土壌の崩壊・流出を防止することで、水源涵養機能の発揮に寄与していることを説明。 ・土壌の深さと根の深さの関係と蒸散量・選択流の発生と根茎の関係(未解明の部分が多い) ・具体的な吸水深さの数値 ・Hydraulic Lift: 根系を介した土壌水の再配分のこと。土壌深部から土壌浅部への、土壌水の持ち上げ。Hydraulic lift で再配分される土壌水量は、蒸散量の14~33%という報告もある。 	吸水深度	山中勤, 松尾大悟, 矢野翠, 角張順一, 飯田真一, 涌井久司, 田中正. (2005). 遷移過程のアカマツ二次林における植物種間の根系分布の差異. 陸域環境研究センター報告, 1950. 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. 日本林學會誌, 82(3), 287-294. Fan, Y., Miguez-Macho, G., Jobbágy, E. G., Jackson, R. B., & Otero-Casal, C. (2017). Hydrologic regulation of plant rooting depth. Proceedings of the National Academy of Sciences, 114(40), 10572-10577.
4-5-3	・基岩浸透や地下水に係る因子	<ul style="list-style-type: none"> ・基岩にも浸透が及ぶことを説明し、地下水流よりも速度が小さいこと等、浸透能の違いや、水源涵養機能の評価に当たり無視できないことを説明。 ・土壌と岩盤の相互作用。土壌があることにより岩盤への浸透が促される。 ・岩盤を構成する地質やその風化度合いにより岩盤への浸透量が異なる。 ・岩盤への浸透能の数値や岩盤へ配分される水の数値などを示す。 	基岩の透水係数	・小杉先生 CREST ・小杉 (2007) ・谷 (2017)
4-6	モデルの重要性	<p>因子の数が多くメカニズムが複雑であること、流域単位で把握する際には各因子を適切に加味する必要性を提示。(マイクロレベル・マクロレベルの両面で評価することの重要性に触れる)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・「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水災害対策を行う考え方」として、流域治水とも連携する観点から、森林の水源涵養機能も適切に評価することが必要な旨を説明。(マイクロな取組の積み上げがマクロに効果を発揮すること、一方で、マクロレベルの効果こそ重要であるため、マイクロな視点にとらわれすぎること禁物であることにも留意) 		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.
5. 森林状態の変化と水循環の変化		<p>○森林の変化が森林内水循環に与える影響を説明。 時間によって変わるものの説明 森林の状態が変化することとは何か⇒自然現象による攪乱・人為的な攪乱 自然現象: 風倒、山火事、獣害、病虫害など 人為的現象: 施業や土地利用の変化</p>	既往研究 レビュー	
5-1	自然かく乱	<ul style="list-style-type: none"> ・人手以外の要因による変化が与える影響の説明。 ・森林の水源涵養機能に及ぼす自然現象 		

項目案		【R3 事業に向けたたき台】記載内容のイメージ (太字は伝えたいメッセージ)	キーワード/主 なコンテンツ	引用論文・既往の知見等のイメージ
5-1-1	自然撓乱とは	<ul style="list-style-type: none"> ・風倒、山火事、獣害、病虫害などによる森林の変化 ・プロットスケールの研究と流域スケールの研究 ・上層木の変化と林床状態の変化 ・山火事跡地における植生変化の特徴とその回復過程（芳賀さんの研究、竜ノ口試験地） ・風倒害（北海道？）や病虫害（桐生試験地）と水循環（日本には研究がないかも？） ・シカの食害などによる林床植生の変化（京大芦生演習林、丹沢のプロット） ・風害や山火事、シカ・病虫害による森林の消失・劣化が水循環に与える影響を説明。（対策を講じることが可能な災害を対象とするため、豪雨や地震は対象外とする。台風は風害を含む） ・水循環に負の影響を与えることが多いため、被害の防止・軽減等が重要であることを説明。 		<ul style="list-style-type: none"> ・風倒：松村・高浜（1999）、松村（2003）、鏡原ら（2013） ・山火事：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 年間に於ける基底流出の変化。水文・水資源学会誌, 15(6), 584-593. ・病虫害：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。日本林学会誌, 86(4), 375-379. 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. 日本林学会誌, 67(7), 261-270. （参考）整備保全調査問 03-1~6 （参考）森林利水機能調査（森林整備手法等基準化調査）
5-2	森林施業に係る因子	<ul style="list-style-type: none"> ・人手による変化が与える影響の説明。 ・間伐・皆伐による影響 		（参考）整備保全調査問 03-7, 問 05-12, 16, 20, 24
5-2-1	・立木の密度と機能の関係・間伐の影響・主伐の影響（短期的影響）	<ul style="list-style-type: none"> ・間伐・主伐前、伐採直後、伐採後一定年数の経過後の各段階で、立木密度や下層植生が変化することによる水循環への影響を説明。 ・適時適切な施業により、水循環に良い影響を与えることを説明。伐採・搬出の際に土壌の流出を押さえることが必要なことも説明。 ・プロットスケールと流域スケールの研究 ・35%~50%程度の間伐の影響評価（森林総研、三重、唐沢などの成果） ・積雪地の間伐の影響評価（森林総研の研究事例）宝川（清水さん） ・主伐の影響評価について⇒皆伐の影響（森林総研の結果？） ・東大千葉演習林・釜口流域（山形） 	皆伐・間伐 植生変化後の回復	<ul style="list-style-type: none"> ・伐採による流出量の変化：近嵐ら（1987）、中野（1976）、志水（1994）、Dungら（2013）、Dungら（2015） ・皆伐の影響：Stendnick J. (2008ab)、Dungら（2003）、真坂（2005） ・間伐前後の蒸発散量の変化：久保田ら（2013） ・間伐による水収支の変化（積雪）：岩谷ら（2013）、野口ら（2010）、Troendle CA (1987) ・間伐と流出量：Bosch, J.M. & Hewlett, J.D. (1982) ・立木密度と遮断率：小松（2007） ・間伐と土壌中の水貯留量：五味ら（2010） ・洪水低減：田村ら（2020） ・野口正二, 金子智紀, 和田覚, & 石川具視. (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.
5-2-2	・森林の成長（時間の経過や森林の成熟）による影響（長期的影響）	<ul style="list-style-type: none"> ・植栽から主伐までの長期にわたる森林の成熟と、それによる水循環の変化を説明。 ・伐採からの回復過程についての研究（東大千葉演習林の研究） ・森林総研の研究（長期的な観測結果）竜ノ口試験地 ・モデル解析による森林状態の変化などを解説する。 		<ul style="list-style-type: none"> ・林齢と蒸発量：森林総研（2000） ・林齢と流出量：Vertessy, R.A. et al. (2001) ・蒸発量の経年変化：細田(2009) ・人工林化：Dungら（2013）、Hebbert（1965）、長塚ら（2014）、Namら（2016）、Dungら（2015）、久保田ら（2013） ・高齢級化；鈴木ら（2005）谷・細田（2012）
6. 流域の森林状態と水源涵養機能の評価		○森林の状態の変化について、 複数のシナリオを想定して、水源涵養機能について評価 。 本章では SWAT の結果を用いた考察・解説を示す 例えば貝沢の事例を用いて、将来や過去の変化が示せるとよい（来年度時点の結果による） 主なケース事例を示す。 複合的な森林の機能をモデルとして表現していくツールとしてモデルを用いる。 少なくとも、サイエンスベースの評価手法を将来的な機能評価や施業にも発展させていくことができる手法である。	SWAT モデル結果	既往の S W A T モデルを用いた取り組みと、本取組の違いについて少し説明する。 Marin, M., et al. (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.
6-1	評価軸ごとの森林の水源涵養機能評価	・「2」の「 今求められる森林の水源涵養機能の評価軸 」（ 水収支、洪水緩和、濁水緩和、水資源貯留 ）を踏まえた 評価結果 を説明。	水収支 洪水緩和 濁水緩和 水資源貯留	
6-1-1	・森林の管理状態	・針広混交林等、 森林の林相の変化が水源涵養機能に与える影響 を説明。		

項目案		【R3 事業向けのたき台】記載内容のイメージ (太字は伝えたいメッセージ)	キーワード/主なコンテンツ	引用論文・既往の知見等のイメージ
	と機能			
6-1-2	・森林の成熟度と機能	・高齢林化等、 森林の成熟が水源涵養機能に与える影響 を説明。		
6-1-3	・森林の荒廃から回復	・「5①自然かく乱による変化」を受けて、 森林を荒廃から回復させるための方策とそれが水源涵養機能に与える影響 について説明。		
6-2	これからの森林管理シナリオと水源涵養機能評価	・伐期に達した林分が多い現状から、主伐・再造林を進めた場合や、長伐期化・針広混交林化が進んだ場合等、 シナリオごとの水源涵養機能の程度を比較・評価 。		
6-2-1	・2050年の森林の姿と水源涵養機能	・(同上) ・森林経営管理制度が進んだ場合・進まなかった場合、再造林が進まなかった場合、保安林指定を積極的に行った場合のシナリオも比較。	管理放棄 積極的木材生産 保安林	
7. 水源涵養機能の評価結果から見た、今後の森林のあるべき姿		○現時点での見通しを踏まえた、 水源涵養機能の更なる向上の方策 について提言。 ・「林野公共事業における事業評価マニュアル」との整合に留意(モデル) ・現行の森林整備は、国民に広く支持を得ており、方針としては是であるものの、水源涵養機能の背景にあるメカニズムは未解明な部分も多いことから、事業評価への反映や細かなの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ったところ。 ・将来的に、国民や地域住民の意見をより適切・的確に反映した森林整備の方針を定めていくためには、施業の効果を可視化することができるツール(ここでは SWAT モデル)が必要である。 ・このため、終章では、当該ツールの有効性(様々なシナリオでの分析・評価と、それに基づく将来予測の可視化)を確認した上で、より適切・効果的な評価手法の追求のための方向性の提示を試みたい。		
7-1	・流域の視点からみた気候変動と森林管理	・ 気候変動による豪雨・台風の増加を踏まえ 、水源涵養機能の維持・向上のための森林管理のあり方を提言。 (なお、ここで、水源涵養機能の維持について述べるに当たっては、適切な管理(施業)が行われなかった場合での水源涵養機能に関する各パラメータ(蒸散量や遮断率、浸透能や地表面蒸発など)の変化の有無・程度についての分析・シナリオ検討を行っておく必要がある。5-2や6-2で根拠となる情報や検討結果の提示をしておくことが必要)		・水源かん養機能を高める森林の概念図：太田・服部(2002) (参考：・土砂災害の発生する危険性の高い雨の降り方：Tsunetaka et al. (2021))
7-2	・必要な観測やモデル化の取組	・気候変動を踏まえた森林管理を進めていく上で、 必要となる観測方法や評価手法、モデル構築 について説明。 時間スケールの問題 流域サイズスケールの問題 (貝次スケールの観測とモデルの整合性の確認) パラメータの使い分けについて		
おわりに		将来的には、森林施業が流出に及ぼす影響を「定量的に」評価していくような技術確立していく。水源涵養機能と森林施業の計画を検討できるツールを活用することで、施業を行う箇所や林分の設定を考慮することができる。		

注) 各項目は組替え可能性あり

・項目案の「・」は記述要素のイメージを事例的に記載

(5) 解説資料の引用文献候補

章	略称	正式名称など
1	平成 13 年及び 平成 23 年学術会議答申・回答	H13：「Ⅲ 森林の多面的機能」「12 森林の多面的な機能各論」「(4) 水源涵養機能」 https://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/shimon-18-1.pdf H23：「4 貯留関数法の利根川へ適用」「(1) 貯留関数法の利根川への適用における留意事項」「③ 森林の変化による河川流出への影響についての考察」 https://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/kohyo-21-k133.html
1-1	中村・菊澤編 (2018)	中村太子・菊沢 喜八郎編『森林と災害』共立出版, 2018
1-1	太田 (2012)	太田猛彦『森林飽和一国土の変貌を考える』NHK ブックス, 2012
2-1	多田 (2018)	多田泰之 (2018) 水利科学/62 巻(2018) 4 号 日本治山治水協会創立 80 周年記念特集：地球温暖化と治山・治水・利水「国土の変遷と災害」
3	谷 (2016)	谷誠 (2016) 水と土と森の科学
3-1	服部 (1992)	服部重昭 (1992) 塚本良則編「森林水文学」、文永堂出版
3-1	Murakami (2006)	Murakami, S. (2006) Journal of Hydrology, 319, 72~82
3-1	佐藤 (2007)	佐藤嘉展 (2007) 森林水文学編集委員会編「森林水文学」、森北出版
3-1	Iida, S. et al. (2006)	Iida, S. et al. (2006) Journal of Hydrology, 326, 166-180
3-1	熊谷 (2007)	熊谷朝臣 (2007) 森林水文学編集委員会編「森林水文学」、森北出版
3-1	鈴木 (1992)	鈴木雅一 (1992) 塚本良則編「森林水文学」、文永堂出版
3-2	有光 (1987)	有光一登 編著 (1987) 森林土壌の保水のしくみ、創文
3-2	野口 (1981)	野口陽一 (1981) 森林水文学用語事典、水利科学研究所
3-2	有光ら (1995)	有光一登ら (1995) 森林立地学会誌 37、49~58
3-2	Ohnuki Y. et al. (1999)	Ohnuki Y. et al. (1999) Journal of Forest Research 4 (3)、207~215
3-2	塩崎ら (1992)	塩崎正雄ら (1992) 103 回日林論、263~264
3-2	上杉ら (1999)	上杉大輔ら (1999) 高知大演習林報告 26、25~89
3-2	藤枝 (2007)	藤枝基久 (2007) 森林総研研究報告 No.403、101~110
3-2	日本学術会議 (2001)	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目的機能の評価について (答申)
3-2	山本・高橋 (1987)	山本莊毅・高橋裕 (1987) 図説水文学、共立出版
3-3	久保田ら (2007)	久保田ら (2007) 関東森林研究 58、163~165
3-3	木村・山田 (1914)	木村喬顯・山田熹一 (1914) 林業試験場報告 12、1~84
4-2	小林ら (1984)	小林慎太郎ら (1984) 農土論集 113、1~3
4-2	森林と水研究会 (1996)	森林と水研究会 (1996) 森林と水、日本治山治水協会
4-2	小杉 (1999)	発表年：1999/著者：小杉賢一朗/掲載誌：日本林学会誌 81 (3)、226-235/タイトル：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
4-2	佐藤 (1993)	発表年：1993/著者：佐藤幸一/掲載誌：日草誌 39 (3)、349-358/タイトル：草地土壌の孔隙構造に関する研究
4-2	イアン・カルダー (2005)	発表年：2005/著者：イアン・カルダー/掲載誌：「水の革命」(蔵治光一郎・林裕美子監訳)、築地書館、269 頁/タイトル：森林は流出量を増加させるか？
4-2	藤枝 (2015)	発表年：2015/著者：藤枝基久/掲載誌：山林 1575、2-10 第 904 号/タイトル：水源林を考える
4-2	佐藤ら (1999)	発表年：1999/著者：佐藤嘉展ほか/掲載誌：日本林学会誌 81 (3)、250-253/タイトル：リター層による雨水遮断と土壌蒸発抑制
4-2	谷ら (2012)	発表年：2012/著者：谷誠ほか/掲載誌：水文・水資源学会誌 25 (2)、71-88/タイトル：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
4-2	村井ら (1975)	発表年：1975/著者：村井宏ほか/掲載誌：林業試験場研究報告 274、23-84/タイトル：林地の水及び土壌保全機能に関する研究 1) - 森林状態の差異が地表流下及び侵食に及ぼす影響 -
4-2	C・O・ウイスラー、E・F・ブレーター (1973)	発表年：1973/著者：C・O・ウイスラー、E・F・ブレーター/掲載誌：水文学入門 (五十嵐政次訳)、彰国社/タイトル：人工散水型侵入計

4-2	藤枝 (2007)	発表年:2007/著者:藤枝基久/掲載誌:森林総合研究所研究報告 403、101-110/タイトル:森林流域の保水容量と流域貯留量
4-2	有光ら (1995)	発表年:1995/著者:有光一登ほか/掲載誌:森林立地学会誌森林立地 37 (2), 1995pp .49 ~58/タイトル: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号沢及び2号沢の比較
4-2	角屋 (1988)	発表年:1988/著者:角屋 睦/掲載誌:農業土木学会誌 56 (11)、1061-1065/タイトル:土地利用変化に伴う流出特性の変化
4-3-1	Osone et al. (2020)	Osone et al.2020: Plant trait database for Cryptomeria japonica and Chamaecyparis obtusa (SugiHinoki DB)—their physiology, morphology, anatomy and biochemistry. Ecological Research 35(1):274-275
4-3-1	山崎ら (2006)	潜在的応答特性を用いた北方林での水・熱フラックスのシミュレーション (第19回 (2006年度) 水文・水資源学会総会・研究発表会)
4-3-1	Iida et al. (2017)	Intrastorm scale rainfall interception dynamics in a mature coniferous forest stand, Journal of Hydrology, 548: 770-783, May 2017
4-3-1	大竹ら (2007)	発表年:2007/著者:大竹奈津子他2名/掲載誌:水文水資源学会誌/タイトル:樹形モデルを用いたスギ・ヒノキの枝貯留容量の推定
4-3-1	小松 (2005)	発表年:2005/著者:小松光/掲載誌:日本森林学会誌 87 (2)、170 -185/タイトル:森林の特性と蒸発散量の関係
4-3-1	Komatsu et al. (2015)	Models to predict changes in annual runoff with thinning and clearcutting of Japanese cedar and cypress plantations in Japan/Hydrological Processes/Volume29, Issue24
4-3-1	木村・山田 (1914)	木村喬顯・山田熹一 (1914) 林業試験場報告 12、1~84
4-3-1	Bosch, L.M. and Hewlett, J.D. (1982)	Bosch, L.M. and Hewlett, J.D. (1982) Journal of Hydrology 55, 3~23
4-3-1	鳥羽ら (2008)	発表年:2008/著者:鳥羽ほか/掲載誌:Hydrological Processes/タイトル:Factors affecting rainfall interception determined by a forest simulator and numerical model
4-3-1	湯川ら (1995)	発表年:1995/筆著者:湯川典子ほか/掲載誌:日林誌 77 (3)、224-231/タイトル: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 1) 散水型浸透計による野外実験
4-3-1	服部ら (2001)	発表年:2001/著者:服部重昭ほか(分担者:小杉賢一朗)/掲載誌:水利科学 45 (4)、48 -74/タイトル: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・工場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
4-3-1	谷ら (2012)	発表年:2012/著者:谷誠ほか/掲載誌:水文・水資源学会誌 25 (2)、71 -88/タイトル: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
4-3-1	久田ら (2011)	発表年:2011/著者:久田重太ほか/掲載誌:農業農村工学会論文集 271、1-7/タイトル: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
4-3-1	小林 (1982)	発表年:1982/筆著者:小林繁男/掲載誌:ペドロジスト 26 (2)、150 -163/タイトル:森林の皆伐に伴う土壌の変化
4-3-1	小野 (2014)	発表年:2014/著者:小野裕/掲載誌:信州大学博士論文 (乙第14号)/タイトル: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
4-3-1	服部ら (2001)	発表年:2001/著者:服部重昭ほか(分担者:荒木誠)/掲載誌:水利科学 45 (3)、1-40/タイトル: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・工場のための森林整備のあり方 (I) 湯水地域上流森林整備指針策定調査報告
4-3-1	村上 (2003)	発表年:2003/著者:村上茂樹/掲載誌:水利科学 46 (6)、1-28/タイトル:森林からの蒸発散と林齢・葉量・林分構造との関係:森林からの蒸発散と林齢・葉量・林分構造との関係
4-3-1	細田ら (2005)	発表年:2005/著者:細田育弘ほか/掲載誌:第6回水資源シンポジウム論文集、241-546/タイトル:釜淵森林理水試験地60年間の水流出年々変動
4-3-1	太田・服部 (2002)	発表年:2002/著者:太田猛彦・服部重昭監修/掲載誌:地球環境時代の水と森、日本林業調査会、221頁/タイトル:長期流出と森林のかかわり
4-3-1	村井 (1993)	発表年:1993/著者:村井宏/掲載誌:水利科学 271、1-40/タイトル:広葉樹林地、針葉樹林地及び草生地の水文特性の比較
4-3-1	村上 (2002)	発表年:2002/著者:村上茂樹/掲載誌:水文・水資源学会誌 15 (5)、461 -471/タイトル:スギ・ヒノキ人工林におけるL A Iと蒸発散の林齢依存性及びその水源林管理への応用の可能性
4-3-1	藤枝 (2012)	発表年:2012/著者:藤枝基久/掲載誌:山林、67 -73/タイトル:林地の浸透能
4-3-1	湯川ら (1995)	発表年:1995/著者:湯川典子ほか/掲載誌:日林誌 77 (3)、224-231/タイトル: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 (1) 散水型浸透計による野外実験
4-3-1	平岡ら (2010)	発表年:2010/著者:平岡真合乃ほか/掲載誌:日林誌 92、145-150/タイトル:ヒノキ人工林における浸透能に対する下層植生の影響
4-3-1	岸岡ら (1945)	発表年:1945/著者:岸岡孝ほか/掲載誌:昭和50年度林業試験場関西支場年報、59-63/タイトル:吉野地方スギ人工林と尾鷲地方ヒノキ人工林における林地浸透能曲線の調査例
4-3-1	真下 (2005)	発表年:2005/著者:真下育久/掲載誌:林野土壌調査報告 11、1-182/タイトル:森林土壌の理学的性質とスギヒノキの成長に関する研究
4-3-1	宮前ら (2013)	発表年:2013/著者:宮前崇ほか/掲載誌:信州大学農学部紀要 49、20 -42/タイトル:地質の差異による斜面土層内の雨水挙動に及ぼす樹木根系の影響
4-3-1	諫本 (2002)	発表年:2002/著者:諫本信義/掲載誌:森林立地 44 (2)、31 -36/タイトル:土壌孔隙組成を用いた森林の保水容量の推定とその要因解析
4-3-1	金子ら (2010)	発表年:2010/著者:金子智紀ほか/掲載誌:日本森林学会誌 92 (4)、208 -216/タイトル:積雪地帯の近接したスギ人工林3小流域における流出特性の比較
4-3-1	真板ら (2005)	発表年:2005/著者:真板英一ほか/掲載誌:日本森林学会誌 87 (2)、124 -132/タイトル: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
4-3-1	佐伯 (2003)	発表年:2003/著者:佐伯響一/掲載誌:信州大学農学部紀要 45 (1-2)、11 -20/タイトル: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

4-3-1	齋藤 (2010)	発表年:2010/著者:齋藤泰久/掲載誌:千葉大学博士論文/タイトル:針葉樹人工林の生育がもたらす森林の水資源涵養機能への影響
4-3-1	近嵐 (1987)	発表年:1987/著者:近嵐広栄/掲載誌:林業試験場研究報告 346、1-92/タイトル:山地流域における増水曲線の推定に関する基礎的研究
4-3-1	真板ら (2008)	発表年:2008/著者:真板英一ほか/掲載誌:日林誌 90 (1)、36-45/タイトル:森林植生の伐採が山地小流域の劉牧曲線に与える影響 - 流況の流域間変動に対する植生要因の大きさの検討 -
4-3-1	児島ら (2013)	発表年:2013/著者:児島利治ほか/掲載誌:土木学会誌 65 (5) I_137-I_144/タイトル: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
4-3-1	五名ら (2012)	発表年:2012/著者:五名美江ほか/掲載誌: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/タイトル:日本森林学会誌 94 (5) 214-222
4-3-1	細田ら (2002)	発表年:2002/著者:細田育弘ほか/掲載誌:第6回水資源に関するシンポジウム論文集、241-246/タイトル:釜淵森林理水試験地 60年間の水流出年々変動
4-4-1	服部ら (2001)	森林の水資源涵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) (水利科学/45巻(2001)4号/書誌)
4-4-1	藤枝 (2001)	藤枝基久 (2001) 森林の水資源涵養機能とその評価、林業技術 711、12~17
4-4-1	服部 (2003)	森林流域における水循環特性と森林管理 第4回水文・水資源セミナー
4-4-1	恩田 (2007)	「人工林の荒廃と地表流発生メカニズム」、久米篤ほか編『森林水文学 - 森林の水のゆくえを科学する -』、65-81、森北出版、352 pp.
4-4-2	平岡 (2013)	発表年:2013/著者:平岡真合乃/掲載誌:/タイトル:ヒノキ人工林における浸透能に対する下層植生の影響
4-4-2	海虎 (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巻(2012)4号)
4-4-2	Mizuno et al. (2021)	The risk reduction effect of sediment production rate by understory coverage rate in granite area mountain forest (Scientific Reports volume 11, Article number: 14415 (2021))
4-5	石川ら (2007)	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))
4-5	森林総研 (2012)	
4-5	大貫ら (1995)	大貫靖浩・吉永秀一郎:「筑波共同試験地地理水流域における土壌の分布とその保水・流出特性にかかわる物理的特性」森林総研研報 Bull. For. & For. Prod. Res. Inst. No.369,1995(189-207)
4-5-1	小杉 (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巻・3号、p.226-235(1999-08))
4-5-3	小杉 (2007)	森林の水資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巻(2007)3号)
4-5-3	谷 (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) No.55、41-50)
5-1-1	松村・高浜 (1999)	風倒木地における表層崩壊機構に関する考察 (砂防学会誌)
5-1-1	松村 (2003)	風倒木地における山腹表層崩壊に関する研究 (東京大学学位論文)
5-1-1	鏡原ら (2013)	兵庫県西部地域における 2009 年台風 9 号による山腹斜面崩壊の実体と発生メカニズムについて (地盤工学ジャーナル/8巻(2013)3号)
5-1-1	久保田ら (2013)	発表年:2013/著者:久保田ほか/掲載誌:日本森林学会/タイトル:常陸太田試験地における間伐による蒸発散量の変化 (2013年95巻第1号 p.37-41)
5-1-1	白木ら (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巻(2020)2号
5-1-1	Xinchao Sun et al. (2014)	The effect of strip thinning on tree transpiration in Japanese cypress (Agricultural and Forest Meteorology 197 123-.)
5-1-1	Xinchao Sun et al. (2015)	The effect of thinning on forest floor evaporation in a Japanese cypress plantation (Agricultural and Forest Meteorology 216:48-57)
5-2-1	近嵐ら (1987)	近嵐弘栄ら (1987) 森林の間伐と水収支、第3回水資源シンポジウム前刷集、589~594
5-2-1	中野 (1976)	中野秀章 (1976) 森林水文学、共立出版
5-2-1	志水 (1994)	志水俊夫 (1994) 林野時報 41(9)、24~28
5-2-1	Dung ら (2013)	発表年:2013/著者:Dung ほか/掲載誌:Journal of Hydrology/タイトル:Runoff responses to forest thinning at plot and catchment scales in a headwater catchment draining Japanese cypress forest
5-2-1	Dung ら (2015)	発表年:2015/著者:Dung ほか/掲載誌:Journal of Hydrological Processes/タイトル:Peak flow responses to strip thinning in a nested, forested headwater catchment
5-2-1	Stendnick J. (2008a)	発表年:2008/著者:Stendnick J. J./掲載誌:Hydrological and biological responses to forest practices/タイトル:of timber harvesting on streamflow in Alsea Watershed Study
5-2-1	Stendnick J. (2008b)	発表年:2008/著者:Stendnick J./掲載誌:Hydrological and biological responses to forest practices/タイトル:Long-term streamflow changes following timber harvesting
5-2-1	Dung ら (2003)	発表年:2003/著者:Dung ほか/掲載誌:Journal of Hydrology/タイトル:Runoff responses to forest thinning at plot and catchment scales in a headwater catchment draining Japanese cypress forest
5-2-1	真板 (2005)	発表年:2005/著者:真板英一/掲載誌:森林学会誌/タイトル: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
5-2-1	久保田ら (2013)	発表年:2013/著者:久保田ほか/掲載誌:日本森林学会/タイトル:常陸太田試験地における間伐による蒸発散量の変化 (2013年95巻第1号 p.37-41)
5-2-1	岩谷ら (2013)	岩谷綾子ら (2013) 東北森林科学会誌、18(2):38-42

5-2-1	野口ら (2010)	野口正二ら (2010) 水文・水資源学会誌、23(4) : 339-346
5-2-1	Troendle CA (1987)	発表年: 1987 / 著者: Troendle CA / 掲載誌: USDA FS Research Paper RM -274 / タイトル: The potential effect of partial cutting and thinning on streamflow from the subalpine forest
5-2-1	Bosch, J.M. & Hewlett, J.D. (1982)	Bosch, J.M. & Hewlett, J.D. (1982) Journal of Hydrology 55:3-23
5-2-1	小松 (2007)	発表年: 2007 / 著者: 小松光 / 掲載誌: 日本森林学会 / タイトル: 日本の針葉樹人工林における立木密度と遮断率の関係 10113
5-2-1	五味ら (2010)	発表年: 2010 / 著者: 五味高志ほか / 掲載誌: Journal of Hydrological Processes / タイトル: Evaluation of storm runoff pathway in steep nested catchments draining a Japanese cypress forest in central Japan: A hydrometric, geochemical, and isotopic approaches
5-2-1	田村ら (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 巻 (2020) 2 号) 水工学論文集第 65 巻
5-2-2	森林総研 (2000)	森林総合研究所 (2000) 研究の森から No.88
5-2-2	Vertessy, R.A. et al. (2001)	Vertessy, R.A. et al., (2001) Forest Ecology and Management 143, 13~26
5-2-2	細田 (2009)	細田育広 (2009) 森林総合研究所平成 21 年版研究成果選集 : 26-27
5-2-2	Dung ら (2013)	発表年: 2013 / 著者: Dung 他 / 掲載誌: Journal of Hydrology / タイトル: Runoff responses to forest thinning at plot and catchment scales in a headwater catchment draining Japanese cypress forest
5-2-2	Hebbert (1965)	発表年: 1965 / 著者: Hebbert / 掲載誌: 森林学会誌 / タイトル: Forest treatment effect for water y
5-2-2	長塚ら (2014)	発表年: 2014 / 著者: 長塚ほか / 掲載誌: Water Resources Research 39, 1168. doi: 10.1029/2001 WR001227, 2003 / タイトル: 林道路面の浸透能と水流出特性
5-2-2	Nam ら (2016)	発表年: 2016 / 著者: Nam ほか / 掲載誌: Landscape and Ecological Engineering / タイトル: Suspended-sediment responses after strip thinning in headwater catchments
5-2-2	Dung ら (2015)	発表年: 2015 / 著者: Dung ほか / 掲載誌: Journal of Hydrological Processes / タイトル: Peak flow responses to strip thinning in a nested, forested headwater catchment
5-2-2	久保田ら (2013)	発表年: 2013 / 著者: 久保田ほか / 掲載誌: 日本森林学会 / タイトル: 常陸太田試験地における間伐による蒸発散量の変化 (2013 年 95 巻第 1 号 p.37-41)
5-2-2	鈴木ら (2005)	発表年: 2005 / 著者: 鈴木和次郎ほか / 掲載誌: 森林学会誌 / タイトル: 高齢級化に伴う人工林の発達様式
5-2-2	谷・細田 (2012)	発表年: 2012 / 著者: 谷・細田 / 掲載誌: 水文水資源学会誌 / タイトル: 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
7-1	太田・服部 (2002)	太田猛彦・服部重昭 監修 (2002) 地球環境時代の水と森、日本林業調査会
7-1	Haruka et al. (2021)	Comparison of the return period for landslide-triggering rainfall events in Japan based on standardization of the rainfall period (Earth Surface Processes and Landforms Volume46, Issue14)
右欄参照	恩田・五味 (2021)	<p>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</p> <p>1-2/7-1・森林流域とコンクリート被覆流域とを比較した渇水シミュレーションでは、年間を通じて利用可能な水量の設定値がある閾値を超えると、森林流域に必要なダムが大きさが、コンクリート流域のそれよりも大きくなる。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るが、その減少量は樹冠が閉鎖した放置人工林で最大。(p144)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・森林管理と同等の流量増加効果をもたらす利水ダムを想定し、ダムの建設費で森林を評価すると、流量 1 m3/秒当たり 213 億円 (平均値)、1 mm/日の増加に対して約 1,000 万円/年の便益 (p218-222) ・森林管理で渇水時の流量が増強されるとし、森林で軽減される渇水被害軽減額で評価すると、流量 1 m3/秒当たり約 4~805 億円、中央値は 34 億円 (p222-226) <p>2-2・森林流域とコンクリート被覆流域とを比較した渇水シミュレーションでは、年間を通じて利用可能な水量の設定値がある閾値を超えると、森林流域に必要なダムの大きさが、コンクリート流域のそれよりも大きくなる。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るが、その減少量は樹冠が閉鎖した放置人工林で最大。(p144)</p> <p>4-4-1・樹冠遮断量は降水量の 20~30%。(p1)</p> <p>4-4-2・ヒノキ人工林での人工降雨実験 (樹冠上に達する高さ 12m のやぐらから散水するため、雨滴径が大きく実際の降雨に近い)での土壌の浸透能の平均値は 31.2mm/時と、従来の報告値 (258mm/時) より一桁低い。霧雨散水や冠水型浸透計での測定では 200mm 以上の値で、従来と同様に高い。(p9-10)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ヒノキ人工林での浸透能は、下層植生の乾燥重量と相関が高い (下層植生が多いと浸透能が上昇)。地表面の約半分が下層植生で覆われていないと多くの地点で 50mm/時以下 (p12) ・下層植生の繁茂には林内相対照度を理想的には 20% (材積間伐率 40%)、少なくとも 10% (材積間伐率 20%) とする必要。(p173) ・森林の総光合成量が 40~60 t の場合、光合成に消費される水は 2.4~3.6mm に対し、蒸散量は 100 倍以上の 400~500mm。(p2) ・スギ・ヒノキ林での遮断蒸発率の研究例では、降水後ではなく降水中の蒸発が遮断蒸発の主成分だった。(p99) <p>4-5-3・森林斜面では降水はほとんど直接に流出せず、以前の降水が流出。地中に浸透した水の多くは岩盤を通っている。森林土壌の下部の風化土層や岩盤の亀裂が地下水を貯留する本体。(p4-7)</p> <p>5-2-1・30%の本数間伐率では林床に新たな植生を導入するのに必要な相対照度に達せず、50%程度が必要。(p13)</p>

		<ul style="list-style-type: none"> ・一方、スギ林ではヒノキ林よりも最大最終浸透能は高く、特に林床被覆物量が 1000g/m² より少ない場合はヒノキ林の数倍以上。(p13) ・立木密度が高いと樹冠遮断率も高く、間伐による本数減少は地下水涵養量を増加させる (p14) ・間伐前後 (本数間伐率 40~50%) の樹冠通過雨量の変化について、総雨量が 25mm 未満では間伐後に顕著に増加 (総雨量が大きい降雨は風の影響等により大きな変化はなかった)。樹幹流量は半分程度に減少するが、樹冠通過雨量がその減少量を上回って増加するため、結果的に林内雨量は平均 6% 増加。(p31-34) ・7 m² のシートを広げた大型雨量計での樹冠遮断率の調査では、強度間伐区で平均 12%、過密区で 25% となり、間伐により遮断率は 13% 減少。(p34-35) ・間伐により林分の平均林内雨量が増加すると、林床に供給される雨水の空間的ばらつき (標準偏差) は減少。(p40-41) ・樹木からの蒸散は降水量の 19~75% を占める。(41p) ・林分単位での蒸散量を間伐前後で比較すると、本数の減少に伴い間伐後に減少。(p43) ・間伐によって人工林の下層植生が繁茂した場合、間伐前後の下層植生の蒸発散比は 1.2~1.3 程度。(p49) ・福岡 (花崗岩流域) での間伐前後で流出量を比較すると、高水期では間伐後の方が流量は低いが、低水期になると間伐後の方が流量は高くなった。また、栃木 (堆積岩流域) では深度 15m、30m の地下水位が間伐後に上昇。これらから、間伐後に地下水の涵養量が増加し、地下水位の上昇がもたらされていると考えられる。(p54) ・間伐後の日流出量の増加について、列状間伐 (材積間伐率 46%) では 8.4 倍、点状間伐 (同 25%) では 1.2 倍。(p59) ・2000 本程度の過密林分を 50% 間伐した場合の林床面蒸発散量の増加量は小さいが、1000 本程度の林分に 50% 間伐を施すと、林床面蒸発散量が急激に増加する。(119p) ・間伐により直接流出と基底流出の両方が、間伐前より上乘せされるが、雨の少ない年ほど基底流出への上乗せの配分が多くなる。そもそもの雨量が少ないことにより、「基岩タンク」に十分な空き容量が確保されていたためと推定。(p128-129) <p>(参考)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・間伐した森林の土砂崩壊防止機能は、間伐していない森林の約 2 倍。これは、間伐前の人工林は各樹木の根の占める割合が小さく、斜面が崩れないように支える力が弱い、間伐により 1 本当たりの根の占める面積が増えるため。(p154) ・間伐後 (本数間伐率 50%) は間伐前と同程度の降雨に対して浮遊土砂流出量が減少する傾向。原因として、下層植生の回復により地表面に伝わる雨滴衝撃力が減少したこと、リター層と土壌表面からの微細土砂の剥離が抑制された可能性が考えられる。(p69) ・針葉樹人工林の樹冠下では、林外雨に比べて林内雨の雨滴径・雨滴衝撃力が大きくなる。これは、樹冠に捕捉された雨水が集合すること、枝下高が高いことに起因。強度間伐により直達雨が増加することで表面流発生が減少する可能性。(p70-71) ・伐採直後から 1 年程度では浮遊土砂濃度が高い傾向 (作業道での土壌侵食や、土壌攪乱跡地での植生回復が十分ではないため)。作業道・林道の設置を河川から一定の距離を保つこと、排水施設の設置が必要。(p73-74) ・強度間伐 (2 残 2 伐の列状間伐) 後 2 年目は、間伐前の林床植生の発達度合いに関わらず、林内植被率はほぼ 80% に達する。種数も増加する (強度間伐が皆伐に近い影響を持つ)。(p85-87) ・間伐により林外日射量も高くなり、溪流内の付着藻類成長量も増加し、これを餌とする底生生物も増加。間伐中・間伐直後に増加した浮遊土砂が河床に堆積し、生息環境となる砂泥が発生したことも影響。(p88-91)
--	--	---