

令和4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5年3月

林野庁

目次

はじめに	1
1. 本事業の概要	1
1.1. 背景及び目的	1
1.2. 調査の基本方針	1
1.3. 調査項目及び各年度の調査計画	2
2. 過年度の調査内容及び決定事項	3
2.1. モデル解析・評価に係る基本方針	3
2.1.1. 水源涵養機能の評価を巡る近年の動向に関するレビュー	3
2.1.2. 流域の森林と水資源の管理を統合していく視点の重要性について	4
2.1.3. 評価軸の設定	5
2.2. 流出モデル構築準備	5
2.2.1. 流出モデルの選定	5
2.2.2. 調査対象地の選定	6
2.3.1. 評価項目を踏まえたモデル構築計画	11
2.3.2. シミュレーション条件の設定	12
(1) 各水文プロセスの計算方法	12
(2) シミュレーション期間、時間単位など	13
2.4. モデル構築及び精緻化	14
2.4.1. 令和2年度の実施内容	14
2.4.2. 令和3年度の実施内容	16
2.5. 現地調査	17
2.5.1. 林床面蒸発散量の観測	17
2.5.2. 林分蒸散量の観測	19
2.5.3. 土壌物理性に関する調査	19
2.5.4. 林相調査	20
2.6. 過年度調査の成果及び課題まとめ	21
3. 今年度調査の内容（モデル構築及び精緻化）	22
3.1. 課題と対応方針に関する整理	22
3.2. 作業内容及び手順	23
3.3. インプットデータの収集・調整	24
3.3.1. 雨量データ	25
(1) 雨量データ調整の経緯	25
(2) 手法	25
(3) 結果	26
3.3.2. 雨量以外の気象データ	27

(1) 気温データ	27
(2) 相対湿度データ	28
(3) 風速データ	29
3.3.3. 地形 (DEM) データ	30
3.3.4. 土壌データ	32
3.3.5. 河川流量データ	34
(1) 貝沢流域	34
(2) 道志ダム・三保ダム流域	34
3.3.6. 土地利用 (林相) データ	35
(1) 林相区分に関する整理	35
(2) データ収集	38
3.4. 土地利用 (林相区分) 図の作成	45
3.4.1. 貝沢流域	45
(1) 手法	47
(2) 結果	53
(3) まとめ	56
3.4.2. 道志ダム流域	56
(1) 手法	56
(2) 結果及び時点変化に関する分析及び考察	59
3.4.3. 三保ダム流域	62
(1) 手法	62
(2) 結果及び時点変化に関する分析及び考察	72
3.4.4. 作成した林相区分図の妥当性の確認	76
(1) 検証方法	76
(2) 結果	80
(3) 考察	83
4. 実測の気象・流量データの分析・活用	84
4.1. 対象流域における過去 40 年間の年降雨量の把握	84
4.2. 着目すべき降雨年の選定	84
4.3. 対象流域における流出特性の把握 (モデル推定結果との比較材料として)	85
4.3.1. 流況曲線	85
4.3.2. 流出率	86
5. パラメータ設定	87
5.1. パラメータ調整の流れ	87
5.2. 調整するパラメータの選定	87
5.3. パラメータ初期値の設定	89
5.3.1. 蒸発散関係パラメータ	89

(1) CANMX (樹冠最大貯留量)	89
(2) BLAI (最大葉面積指数)	90
(3) GSI (最大気孔コンダクタンス)	92
(4) CHTMX (最大樹冠高)	93
(5) その他	94
5.3.2. 地表関係パラメータ	94
(1) SURLAG (表面流の遅延度合い)	94
(2) OV_N (粗度係数)	94
5.3.3. 土壌関係パラメータ	95
(1) SOL_BD (仮比重)	96
(2) SOL_K (飽和透水係数)	96
(3) SOL_AWC (有効土壌水分)	96
(4) LAT_TTIME (側方流遅延日数)	97
5.3.4. 地下水関係パラメータ	97
5.3.5. 地形関係パラメータ	97
(1) HRU_SLP	97
(2) SLSUBBSN	97
5.3.6. 河道関係パラメータ	97
5.3.7. パラメータ初期値一覧	97
6. キャリブレーションとバリデーション (パラメータ調整)	98
6.1. 手法	98
6.1.1. 概要及び手順	98
6.1.2. モデル精度の評価指標	98
6.1.3. 主なパラメータ調整の内容	100
6.2. 結果	102
6.2.1. キャリブレーション後のベストパラメータ値	102
6.2.2. キャリブレーション前後のパラメータ適用後のシミュレーション結果	103
(1) 水収支	103
(2) 流量ハイドログラフ、実測値・推定値の比較 (散布図)	114
6.2.3. 流出総量及び流出率の比較	123
6.2.4. まとめと考察	123
7. モデルを用いたシナリオ解析・評価	124
7.1. シナリオ解析・評価の作業フロー	124
7.2. 評価条件 (シナリオ) の整理	124
7.2.1. 評価方法の検討	125
(1) 評価パターン	125
(2) 評価手法	126

7.2.2.	シナリオのモデル実装.....	129
(1)	実態シナリオ.....	129
(2)	仮想シナリオ.....	130
7.3.	結果.....	131
7.3.1.	実態シナリオ.....	131
(1)	水収支.....	131
(2)	洪水緩和機能.....	140
(3)	水資源貯留（水量調節）機能.....	141
7.3.2.	仮想シナリオ.....	143
(1)	水収支.....	143
(2)	洪水緩和機能.....	146
(3)	水資源貯留（水量調節）機能.....	151
8.	森林の水源涵養機能の指標化.....	155
8.1.	森林の水源涵養機能の指標化に関するこれまでの知見.....	155
8.2.	モデルパラメータと林分要素との関連性.....	157
8.3.	パラメータ感度分析の方法.....	158
8.4.	パラメータ感度分析の結果と指標化に向けた考察.....	159
9.	総括 ～流出モデル活用の成果と今後の展望～.....	162
10.	森林の水源涵養機能に係る解説資料等の作成.....	165
10.1.	解説書等作成の目的.....	165
10.2.	作業計画.....	165
10.3.	森林の水源涵養機能に係る解説資料の作成.....	165
10.4.	パンフレットの作成.....	167
11.	検討委員会の開催.....	168
	巻末資料.....	171
I.	SWAT モデルについて	
i.	SWAT モデルの概要	
ii.	SWAT モデルで考慮される各水文プロセスと計算方法	
iii.	SWAT モデルの主要なパラメータ	
iv.	SWAT モデル解析フロー	
II.	SWAT モデル パラメータ初期値一覧	
III.	SWAT モデル 土壌データベース初期値一覧	
IV.	検討委員会議事概要	

はじめに

本事業（山地保全調査(森林の水源涵養機能の評価・発信に関する調査)委託事業）は、令和2年度から令和4年度まで、3年間の継続事業として実施したものである。

事業の最終年度にあたる今年度の報告書は、これまでの調査結果のとりまとめとなるよう、過年度までの調査内容及び結果を第2章に記載し、今年度の調査内容及び結果を第3章にとりまとめる。なお、初年度から継続的に行った一部の作業については、流れを分かりやすくする観点から、第3章に含めた。

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年生以上の成熟した森林が森林全体面積の半分以上を占めることから、森林の水源涵養機能や土壌保全機能等の公益的機能は過去に比べて向上し、昨今、頻発化している豪雨や長雨化がもたらす洪水や山地災害による被害を防止・軽減するものとして、森林の公益的機能の維持・向上に対する国民の期待は高まっている。一方で、森林の水源涵養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懐疑的な見方もある。

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関する広く適切な認知を促し、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のうち特に洪水緩和や水資源貯留（水量調節）に資する効果について定量的に把握するとともに、森林の充実に伴う変化や、施業等、森林管理の影響により異なる状態の林分それぞれが有する水源涵養機能の程度について評価を行い、また、それらの関係性を、森林の水源涵養機能に関する最新の知見と照らし合わせながら分かりやすく整理し、情報発信を行うことを目的として実施する。

1.2. 調査の基本方針

調査の方針は、事業の初年度である令和2（2020）年度に、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・調査の動向に関するレビュー（2.1.1）を行い、本事業の位置づけを明確にした上で、以下のとおり設定した。

- 森林・水・土壌という森林の水源涵養機能に密接に係る要素を一体的に評価する視点を重視し、近年の森林をとりまく複合的な課題への対処に資するものとする。
- 4つの評価軸（水収支、洪水緩和機能、水資源貯留機能、水量調節機能）について評価を行う。
- ダム集水域等、一定の規模のある流域を解析単位として定量的な評価を行う。
- 上記3点の遂行に有効なツールである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関する適切な知識・知見の普及を目的として作成する解説資料は、森林行政に携わる県職員や森林技術者等を対象とした内容とする。

1.3. 調査項目及び各年度の調査計画

本事業における調査項目及び令和2年度から今年度までにかけての各年度の調査計画を図1-1に示す。

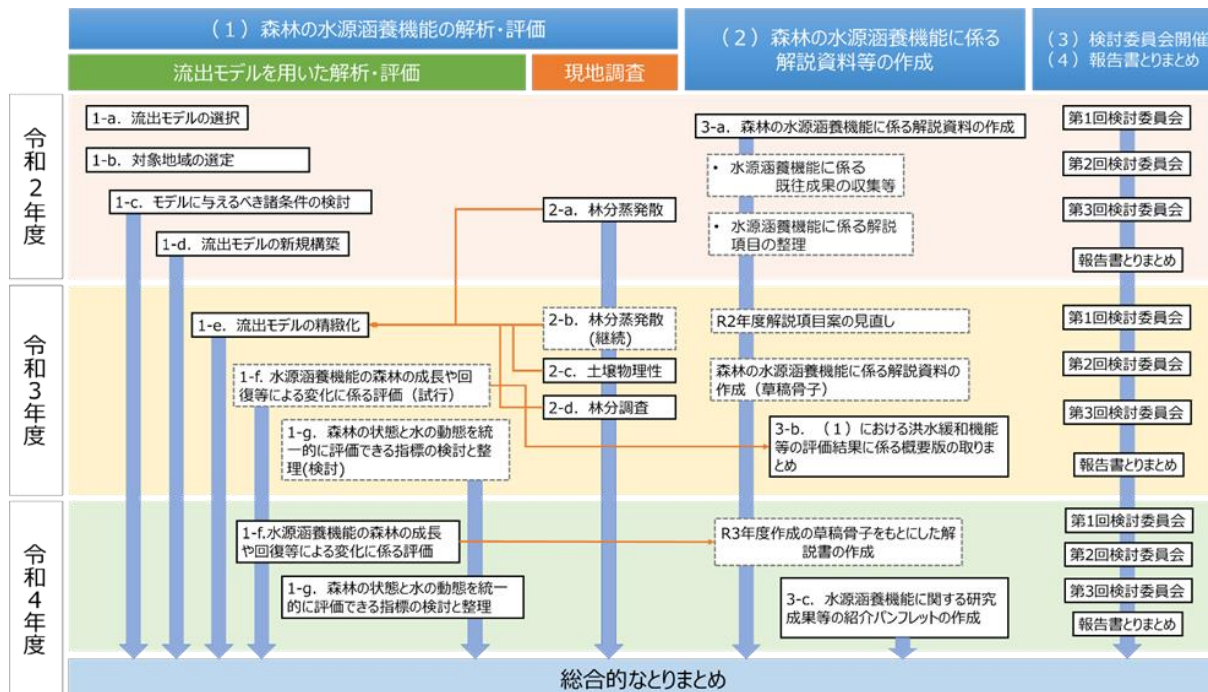


図1-1 本事業における調査項目及び各年度の調査計画

本調査は、「(1) 森林の水源涵養機能の解析・評価」と「森林の水源涵養機能に係る解説資料の作成」の大きく2つの柱で構成される。

(1) の主な調査内容は、流出モデルを用いた解析評価及び現地調査である。前者については、森林の成熟状態や管理状態と水源涵養機能の関係性に関する評価を行うため、図1-1の1-a～1-gの7つの項目に関する作業を実施した。後者は、林分の実態把握や流出モデルの精緻化を図るための補完的なデータの取得を目的に実施した。令和2、3年度に実施した林分蒸発散や土壌物理性に関する調査及びそれらに付随する文献調査の一部は、国立大学法人東京農工大学へ再委託を行い実施した。

(2) は、最新の研究成果等を踏まえた森林の機能について、知識や知見を基に項目案の検討から草稿骨子を作成し、本事業成果の取り込みに至るまで、解説資料に必要な一連の作業を実施した。

また各年ごとに、実施した(1)や(2)の結果をとりまとめるための「(3) 検討委員会の開催」を行うとともに「(4) 報告書とりまとめ」も実施した。

2. 過年度の調査内容及び決定事項

2.1. モデル解析・評価に係る基本方針

2.1.1. 水源涵養機能の評価を巡る近年の動向に関するレビュー

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の評価に係る近年の課題の変化や各研究や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ためのレビューを行った（図2-1）。

文献によると、戦後から平成12（2000）年以前にかけては、裸地化した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。次いで、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、評価の観点が変化を続け、さらに近年は、国内各地で森林の高齢級化に伴う伐採時の未更新や管理不足による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が行われるようになってきた。

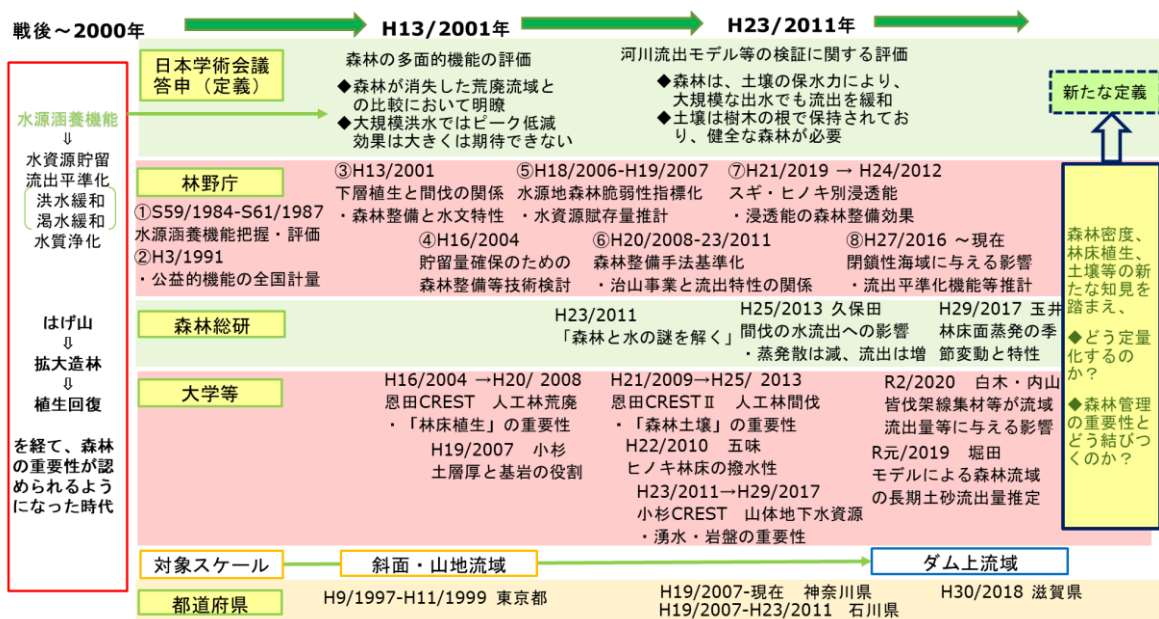


図2-1 森林の水源涵養機能の評価を巡る近年の調査の動向

（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・発信も難しい状況であったが、近年は新たな研究成果が蓄積され、社会実装に向けた動きも活発になってきたところである。

2.1.2. 流域の森林と水資源の管理を統合していく視点の重要性について

前項のレビューのとおり、森林の水源涵養機能の評価においては、森林の有無による違いを主体とした従来の視点から、森林の質、すなわち林齢、樹高、立木密度、収量比数といった林分的な要素と、水、土壌といった森林と密接な関わりのある要素を複合的に考慮していく視点が重要と考えられるようになってきた（図 2-2）。

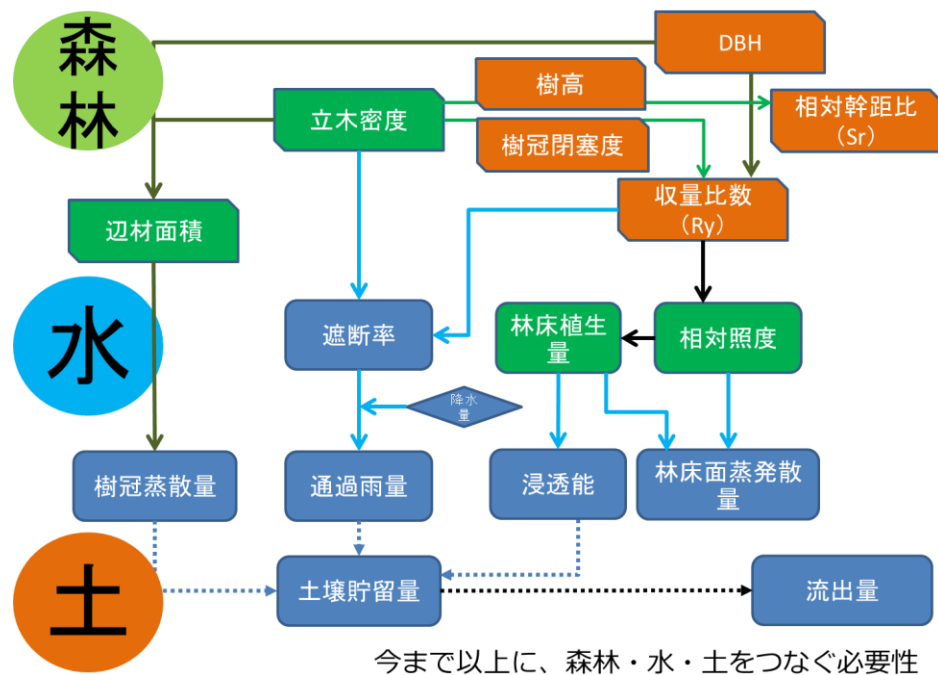


図 2-2 水源涵養機能の評価において考慮すべき複合的な要素

参考文献：「森をとりまく課題の変化と水土保全機能の評価」, 五味

第 55 回治山シンポジウム「森林と水を考える (2017)」

流域内の複合的な要素を考慮した評価においては、様々な要素をパラメータに反映できるシミュレーションモデルの活用が有効と考えられ、近年、流出モデルを用いたシミュレーションにより、森林流域からの長期的な流出傾向の把握を試みる調査事例も増えている。しかし、森林・水・土壌の実態をモデルパラメータに適切に反映する手法については確立されていないことから、更なる検討が必要である。

これを踏まえ、本事業においては、森林・水・土壌の実態をモデルに適切に反映させるために不可欠な情報、データ及び既往知見の整理を行った上で、これらをモデルに適用し、シミュレーションにより、森林の水源涵養機能の評価するための基本的な手法の確立を目指すこととした。

2.1.3. 評価軸の設定

本事業における森林の水源涵養機能の解析・評価に当たっては、近年の頻発化する豪雨によってもたらされる洪水・山地災害や、特定の地域及び季節において発生する水不足（渇水）といった課題に対し、森林整備の観点から、どのように適切に対処していけるかの検討に資するよう、森林の管理状態、成熟状態、荒廃状態の違いが水源涵養機能に及ぼす影響に着目する。その具体的な評価軸としては、水収支、洪水緩和機能、水資源貯留機能、水量調節機能の各機能が挙げられるが、このうち、水資源貯留機能と水量調節機能は同等のものであることから、一つに統合して評価する。

本事業における森林の水源涵養機能の評価の観点と評価軸を整理すると、次のとおりとなる。

【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（成熟林主体の現代の森林／若・壮齢林主体の40年程度前の森林）
- (ハ) 荒廃森林からの回復（荒廃森林／回復森林）

【3つの評価軸】（水資源貯留と水量調節を統合）

- ① 水収支
- ② 洪水緩和機能
- ③ 水資源貯留（水量調節）機能

2.2. 流出モデル構築準備

前項までに述べた基本方針及び評価軸を踏まえ、事業初年度である令和2年度には、使用する流出モデルや調査対象地の選定、評価項目に応じたモデル構築計画等に関する検討を行った。以下に、それらの検討の過程及び結果について記載する。

2.2.1. 流出モデルの選定

ダム上流域など、一定の規模のある流域を一つの解析単位として森林の水源涵養機能の評価するためには、流出モデルの活用が有効である。本事業で使用する流出モデルの選定に当たり、特に考慮したポイントは以下のとおりである。

【ポイント1：分布型（準分布型）モデルであること】

地形、土壌、土地利用や植生などの流域内において様々な形態（タイプ）や規模で存在している各種の要素について、その面的な分布を加味できる分布型（準分布型）モデルであることが望ましい。

【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】

森林の成熟状態や管理状態が水源涵養機能に与える影響の評価を可能とするため、蒸発散量、林床植被率、地表の粗度など、森林状態によって異なると考えられる要素をそれぞれパラメータ

に反映でき、インプットとして実態に近い森林を再現できるモデルであることが望ましい。

【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】

流域における長期的な水収支、豪雨等の単発的なイベントにおける洪水流出特性、渇水期を含めた年間の流況等を把握できることが望ましく、評価の目的に応じて、シミュレーションの時間単位（日・時間単位など）を柔軟に変更できるモデル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】

山地から河川へ流出する特性を把握するため、基岩への浸透などを含む、地下水解析が可能である。

検討の結果、地下水解析はやや簡易的なプログラムとなっているものの、いずれの条件も満たし、世界的にも多くの調査・研究で活用されている SWAT (The Soil & Water Assessment Tool) モデルを採用することとした。SWAT モデルの概要については巻末資料を参照されたい。

2.2.2. 調査対象地の選定

本事業では、調査対象とする流域の規模を2通り設けることとした。一つは、現地調査や航空レーザ解析などを通して、森林の物理的状態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数10ha規模の「モデル小流域」を設定し、もう一つは、小流域モデルでの検証を経て、水源涵養機能の評価を行うための、10,000ha程度の規模の「評価対象流域」で設定した。後者は、図2-3に示すとおり、3つの選定条件を考慮した。

- 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渇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 2-3 評価対象地域の選定条件（令和2年度仕様書より）

これらを踏まえ、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、上記の条件等に係る各候補流域の概況について表2-1に整理した。

- 条件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）の水源域であること
- 条件2：気象やダム流入量データの入手が簡易で活用のしやすいものであること
- 条件3：過去の森林情報が入手しやすいものであること
- 条件4：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があること

条件3：過去の森林情報が入手しやすいものであること

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、過去のある時期と比較し、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
- 森林簿や施業履歴、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

これらについては、神奈川県から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」(<https://mapps.gsi.go.jp/maplibSearch.do#1>)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。

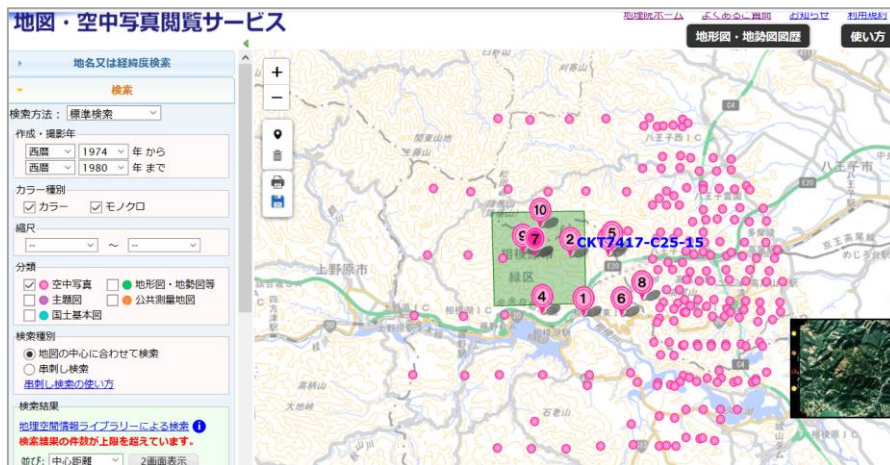


図 2-4 「地図・空中写真閲覧サービス」Web サイト

条件4：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があること

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を有する、本事業委員の五味委員(名古屋大学※当時は東京農工大学に在籍)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、シカ被害の影響も多いことから、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。

これらの検討の結果、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、広域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、森林の情報やダム流入データの入手性等の観点から最適な流域として、支川である道志川ダム流域を選定した。

さらに、台風などの影響により広い面積で崩壊がみられた森林が、時間を経て回復した状態を再現する流域として、検討委員会において、三保ダム流域がふさわしいとの意見が出されたことから、当該流域も調査対象地として追加することとした（図 2-5、表 2-2）。

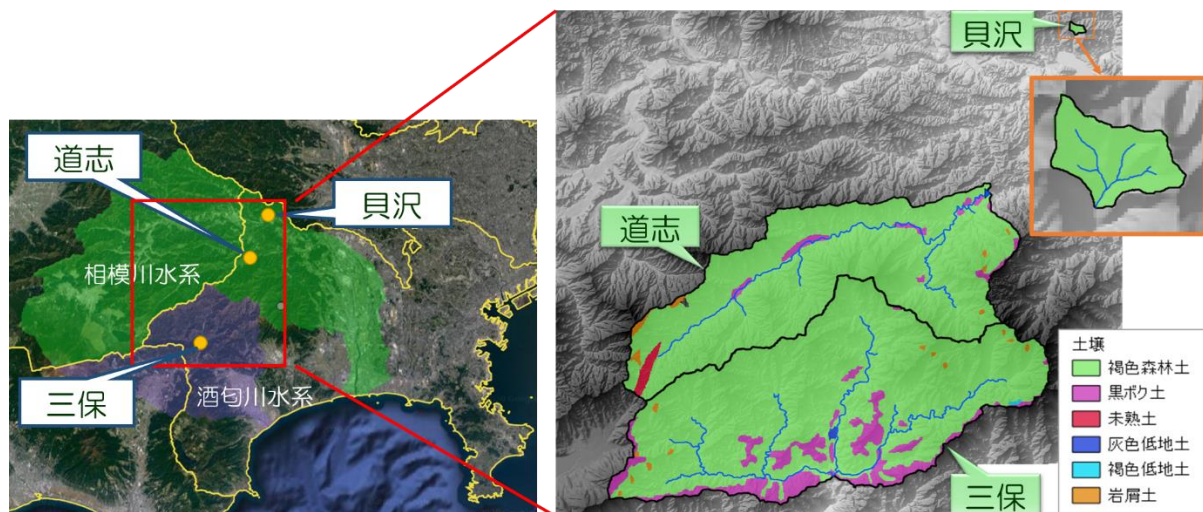
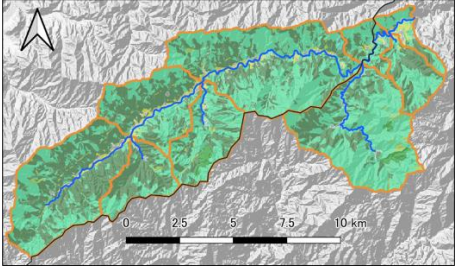
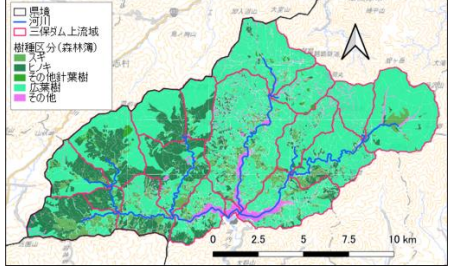


図 2-5 調査対象流域の位置図

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		

以上のように、ダムの水源域であること、既存モニタリングによるデータの入手性、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ある「貝沢流域」、森林の水源涵養機能の評価を行う対象の広域流域として「道志ダム流域」及び「三保ダム流域」を選定することとした。

2.3.1. 評価項目を踏まえたモデル構築計画

2.1 で述べた3つの評価の観点及び3つの評価軸に基づく基本方針と、2.2 で選定したモデル及び調査対象地を踏まえ、各評価項目に応じて構築する必要のあるモデルの種類について整理を行った(表 2-3)。

森林の成熟状態別の評価に当たっては、若齢林の分布が多い過去における時点の林相と水流出量との関係性について、実測データが示す傾向とモデル推定結果との整合を図る必要があり、広域評価の対象流域(道志ダム流域、三保ダム流域)については、林齢を考慮したパラメータ設定が適切になされるよう調整し、「現代モデル」だけでなく、過去時点の林相を反映させた「過去モデル」も構築し、パラメータ調整を行うこととした。

表 2-3 各評価の観点及び評価軸を踏まえて構築するモデル

評価項目	内容	時間単位		評価の観点と踏まえて構築するモデル				
		解析	評価	モデル検証	(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) 崩壊からの回復 (崩壊した森林/ 回復した森林)	
評価対象流域				貝沢流域	道志ダム集水域 三保ダム集水域		三保ダム集水域	
① 水収支	・水収支	年	年	貝沢モデル	道志・現代モデル		三保・現代モデル	三保・過去モデル
② 洪水緩和機能	・ピーク流量 ・流出遅延時間	時間	出水イベント		道志・過去モデル			
③ 水資源貯留 (水量調節) 機能	・渇水時流量	日	年		三保・現代モデル			

評価の観点(イ)「森林の管理状態別」は、間伐等の施業の結果または、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の評価を行うものとして、「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する「過去モデル」から得られる結果を比較し、森林の成長が水流出に及ぼす影響を評価するものとして、対象モデルは、「道志・現代モデル」と「道志・過去モデル」、「三保・現代モデル」と「三保・過去モデル」とした。

評価の観点(ハ)「崩壊からの回復」は、台風に起因して発生した山腹崩壊などにより荒廃した森林が、時間を経て回復した際に水流出へ及ぼす影響を評価するものとして、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)流域を対象として、「三保・現代モデル」と「三保・過去モデル」を構築し、これらを実際に用いることとした。

2.3.2. シミュレーション条件の設定

(1) 各水文プロセスの計算方法

SWAT モデルでは、表 2-4 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、それぞれ表 2-5、表 2-6 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 2-4 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
深層帯水層への浸透	深層浸透量

表 2-5 蒸発散の算出方法

オプション タイプ	概要
ペンマン・モンテース (Penman-Monteith) 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。
ハーブリーグス&サマニ (Hargreaves and Samani) 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。
プリーストリー・テイラー (Priestley-Taylor) 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 2-6 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。

本事業では、時間単位の雨量のほか、日単位での気温、相対湿度、風速などの気象インプットデータが一通り入手済みであったことから、蒸発散の計算には、設定パラメータ数が最も多いペンマン・モンティース法、表面流出・浸透の計算には、時間単位での流量推定を可能とするグリーン&アンプト法を採用することとした。

(2) シミュレーション期間、時間単位など

SWAT モデルのシミュレーション期間や時間単位は、表 2-7 のとおり設定した。

表 2-7 モデルの設定内容

対象モデル	貝沢		道志		三保	
	現在	現在	過去	現在	過去	
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
シミュレーション期間全体	2013-2014	2015-2019	1978-1982	2015-2019	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					
傾斜区分	4 区分 (0-15° /15-30° /30-45° /45° ~)					
最終的に構築された HRU ¹ 数	178	626	630	1,448	1,540	

¹ HRU: Hydrologic Response Unit (水文応答単位) の略。SWAT モデルにおいて、斜面の水文計算がなされる単位。斜面勾配、土地利用タイプ、土壌タイプ等の条件が同一で、似通った水文挙動を示すと考えられる小ブロックに細かく分割されたもの。

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する期間である。

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、表 2-3 に記載のとおり、評価項目に応じて設定することとした。

2.4. モデル構築及び精緻化

以下に、令和 2 年度、3 年度のモデル解析・評価に係る主な実施内容、成果及び課題について概要を記す。実施内容の大半は、本年度（令和 4 年度）まで検討、改善作業を継続したものであることから、内容の詳細及び最終的な結果については、「3.今年度調査の内容（モデル構築及び精緻化）」に集約して記載することとする。

2.4.1. 令和 2 年度の実施内容

事業初年度である令和 2 年度は、主に水源涵養機能評価に求められる新たな視点の確認、本事業の目標設定、流出モデル及び対象流域の選定、林分状態の評価、モデルパラメータに関する調査、貝沢林相区分図の作成を行った。

流出モデルには SWAT モデル、対象流域には貝沢流域、道志ダム流域、三保ダム流域を選定した。

モデルのインプットとして必要な林相区分図については、検討の結果、樹種、林齢、林分密度の 3 つの要素で林相を区分することとした。樹種や林齢と異なり、林分密度は森林簿から情報を得ることが難しかったため、貝沢流域を対象に、航空レーザ計測データを用いた試行的な解析により林分密度の算出を行った。

モデルパラメータの検討においては、SWAT モデルには、蒸発散、表面流出、土壌浸透、地下水流出など、様々な水文プロセスを再現するための計算式が組み込まれており、それらに用いられるパラメータも数多く存在しているが（第 5 章の図 5-2 参照）、令和 2 年度に優先的に調整を行うパラメータとして、成長や施業等による森林状態の違いや変化を反映することができ、比較的考慮のしやすい蒸発散関連パラメータを選定した。SWAT モデルにおける蒸発散量の計算には、LAI（Leaf Area Index; 葉面積指数）が大きく関係していることから、林相と LAI の関係性に関する文献整理を行った。

一連の作業の流れは図 2-6 に示すとおりで、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、その結果を基に、(2) 林相と LAI の関係性に関し、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った。上記 (1)、(2) より得られた知見や情報を、(3) 貝沢流域を対象として構築した SWAT モデルに適用し、シミュレーションを実施した。

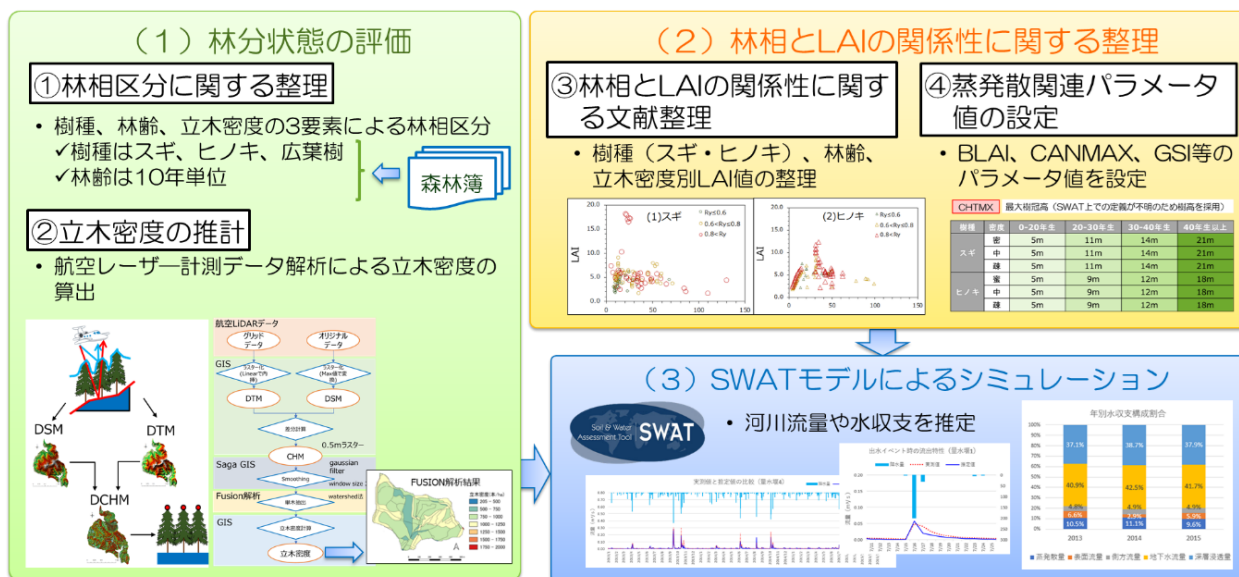


図 2-6 令和 2 年度調査におけるモデル解析・評価の流れ

令和 2 年度調査の結果、以下の課題が残存した。

課題① 林相区分の妥当性検証が不十分である

課題② 一部のシミュレーション結果（水収支、流出量）が妥当でない

課題③ SWAT モデルで考慮されていない水文プロセス（林床面蒸発散等）が存在する

課題④ 土壌に係るインプットデータの妥当性検証が不十分である

2.4.2. 令和3年度の実施内容

図 2-7 に、令和2年度の4つの課題を踏まえ、令和3年度におけるモデル解析・評価に係る作業項目と流れを示す。

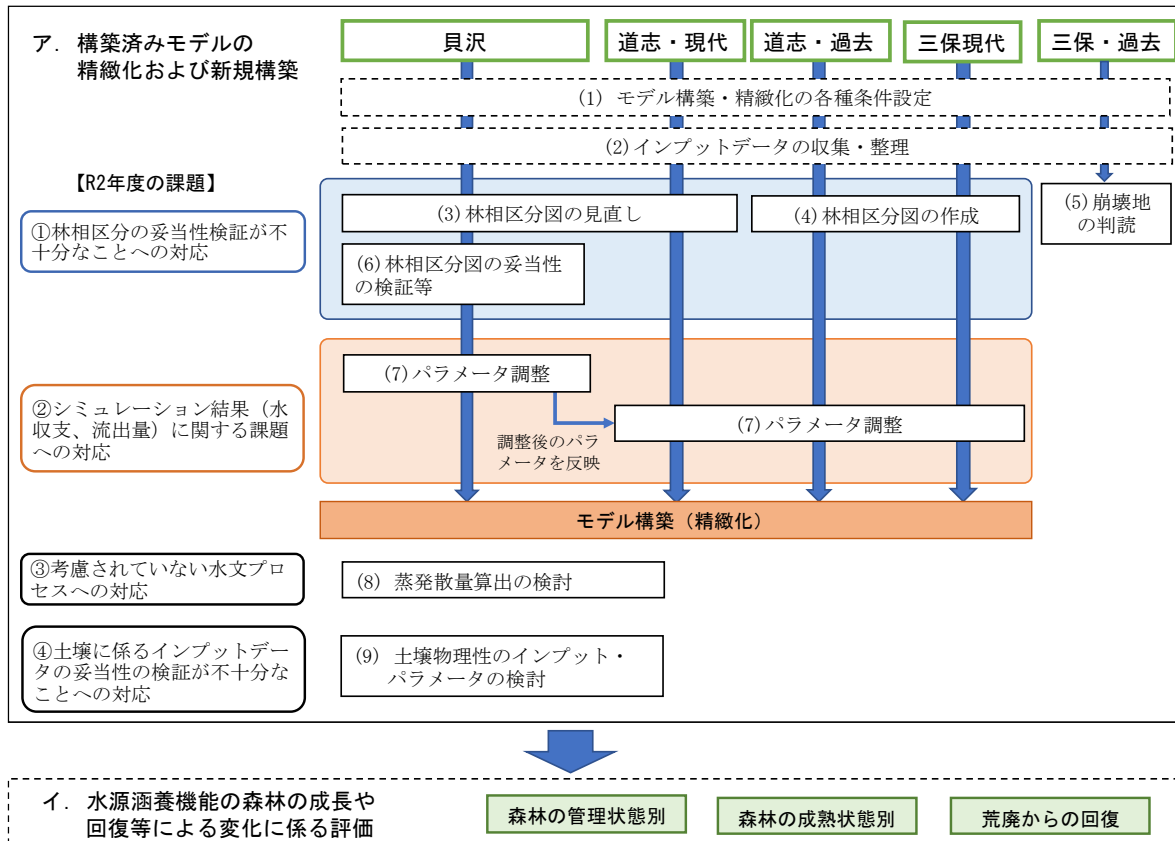


図 2-7 令和3年度調査におけるモデル解析・評価に関する実施項目及び作業の流れ

令和2年度の残存課題を踏まえ、令和3年度に貝沢モデルと道志・現代モデルの精緻化を行ったところ、課題①については、立木密度等の現地調査結果データと照らし合わせ、一定の妥当性が確認されたものの、航空レーザデータを活用した立木密度の推定については、より高精度なデータを用いることで改善が可能と考えられたことから、令和3年度も継続して検証を行った。

課題②については主に土壌や地下水関連のパラメータ調整によりモデルの推定精度を向上させることができたものの、地上部の林相の違いをパラメータに反映させる作業は十分に達成できたとは言えず、引き続き検討、改善が必要と考えられた。

課題③については、具体的には、水収支のうち蒸発散量の割合が、貝沢流域では約 15%、道志・過去モデルや三保・現代モデルでは約 40%と、既往の知見（20～30%）と乖離がみられた。これに関する根本的な課題として、SWAT モデルの蒸発散計算プログラム構造が日本の森林の土地条件に適した計算構造となっていない可能性が指摘された。この対応として、日本の森林土地条件に適させた、LAI ではなく立木密度を指標とした独自の計算プログラムを開発する取組を開始した。

課題④は、②と連動した課題である。現地調査結果との照らし合わせにより、設定した土壌パ

ラメータ値（飽和透水係数、仮比重等）には一定の妥当性が認められたものの、土壌タイプが同じであればその範囲のパラメータ値は同じという設定となっており、「土壌の物理性は地上部の林分状態（樹種、林齢、林種等）によって異なる」という既往知見と照らし合わせると、地上部の違いをパラメータに反映しきれておらず、土壌パラメータの適正化に向けたさらなる調整が必要と考えられた。

全体として、文献情報や現地観測データに基づくパラメータの精緻化は進んだものの、特に表面流出や土壌浸透といったプロセスに関するパラメータについては、樹種や林齢、林分密度による違いを十分に反映できたとはいえず、令和4年度も引き続き調整を行うこととした。

モデル構築の状況としては、令和2年度に構築した貝沢モデルについては、上記のとおり、一定の精緻化は進んだものの、特に小流域を対象としたSWATモデルのシミュレーションにおいて蒸発散量が過少に推定される傾向（課題③に該当）については未改善のままであり、独自の蒸発散プログラムの開発が待たれる状況となった。また、道志・過去モデル、三保・現代モデルを新規構築し、貝沢流域で得られた知見をもとに、一定の精緻化を行うことができた。三保・過去モデルについては、当初令和3年度中に構築予定であったが、検討委員会において、「過去（1970～80年代）の崩壊地規模や分布をより実態に近いものにすべき」という意見が出されたことから、令和3年度は空中写真を用いた崩壊地判読作業に注力することとし、抽出された崩壊地の妥当性の検証やモデルへの反映については令和4年度に行うこととした。

2.5. 現地調査

2.5.1. 林床面蒸発散量の観測

SWATモデルにおいては、林床面蒸発散のプロセスが適切に考慮されていないことから、独自の蒸発散プログラムを構築し、今後の実装を見据え、ペンマン・モンティース式を参考とし、現地の観測データに基づき、針葉樹人工林に適用できる林床面蒸発モデルの構築に取り組んだ。また、林床面蒸発モデルの構築に当たり、貝沢流域で現地の観測データの採取を行った。

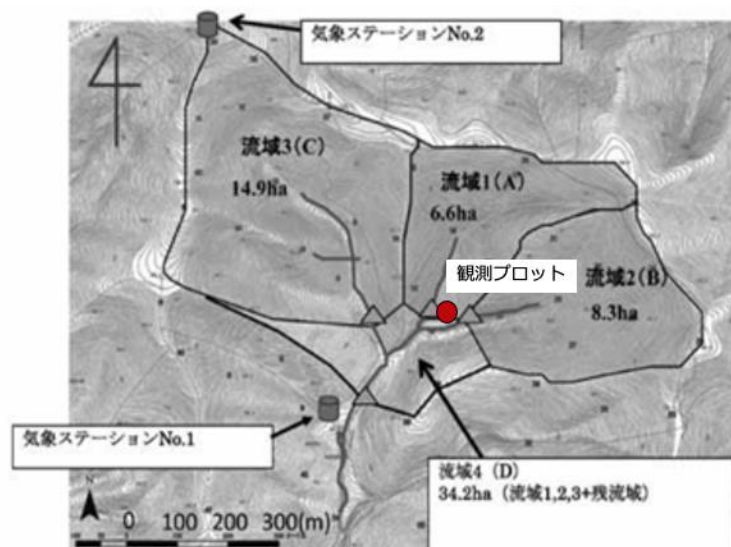


図 2-8 観測プロットの位置

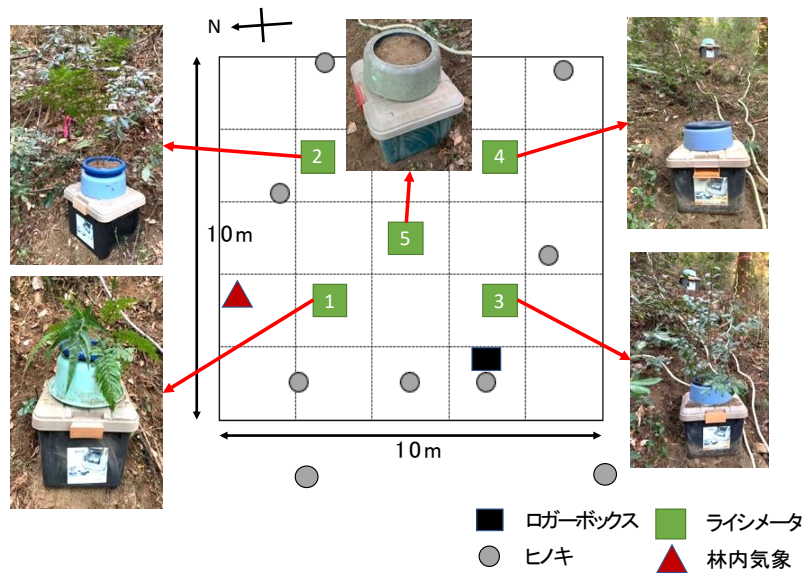


図 2-9 プロット内のライシメータの設置状況

2021年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）の値に近い値となった（図 2-10）。

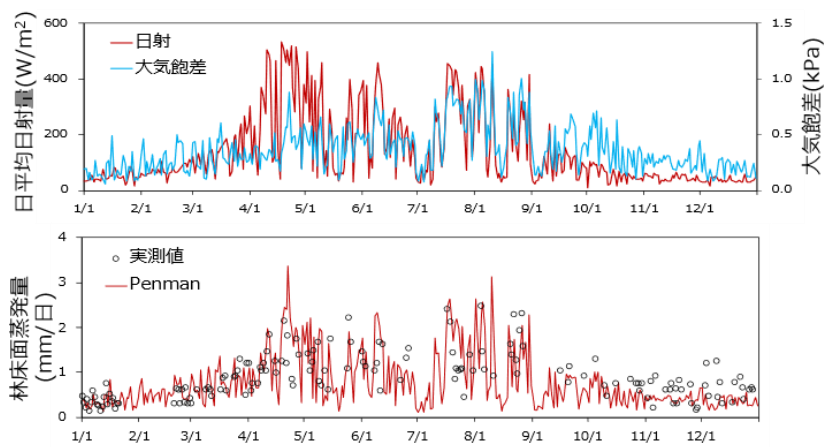


図 2-10 2021年1月～12月における林内気象と林床面蒸発量の日変化

また、構築したモデル式（令和3年度本事業報告書 P95 式 4.14 参照）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、構築した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。

2.5.2. 林分蒸散量の観測

林床面蒸発散量と同様、林分蒸散量についても令和2年度から令和3年度にかけて、貝沢流域を対象に観測を行った。2021年2月～2022年1月の間の林分蒸散量は0.1～2.8 mm/日（平均：1.3±0.6 mm/日）であり、既往研究（Sun et al. 2014）の値に近い値となった（図2-11）。

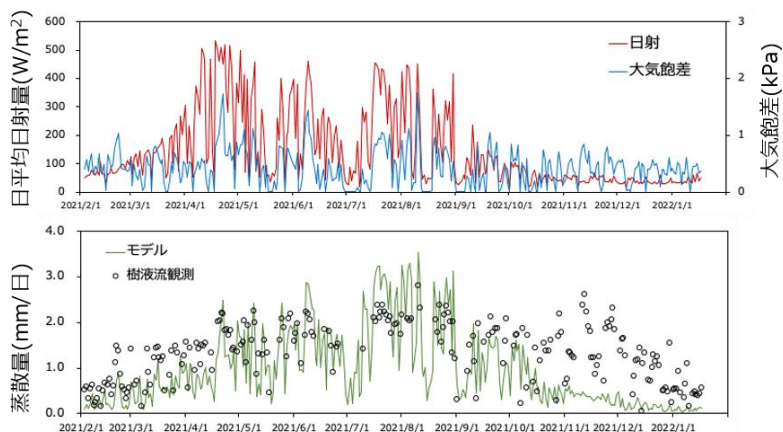


図2-11 2021年2月～2022年1月における林外気象と日蒸散量

また、構築したモデル式（令和3年度本事業報告書 P91 式 4.3、P92 式 4.4 参照）を用いて、日蒸発散量を算出したところ、1.0±0.8 mm/日となり、実測値と近い値が得られた。

2.5.3. 土壌物理性に関する調査

土壌に係るインプット値の妥当性を検証するため、令和3年度に、貝沢流域において選定した5地点で、土壌物理性に関するサンプル調査を行った。

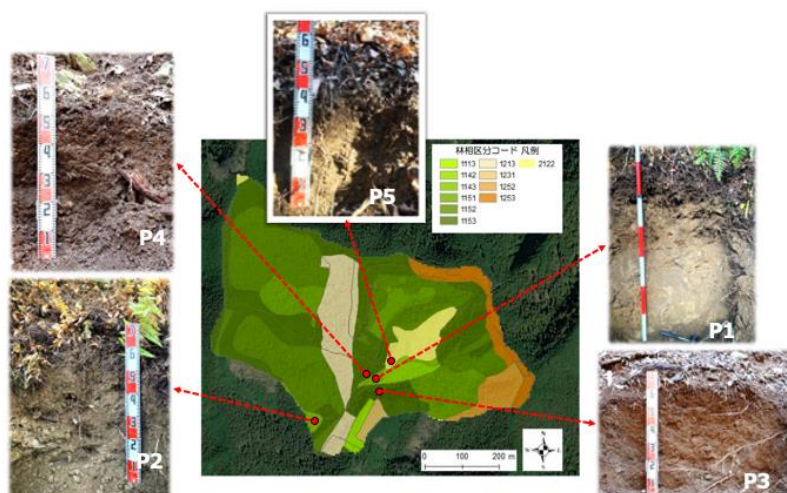


図2-12 土壌サンプルを採取した箇所とその断面図

各地点における土壌サンプルの仮比重と飽和透水係数を表 2-8 に示す。飽和透水係数や仮比重は、SWAT モデルに設定しているパラメータ値と同程度となり、パラメータ値について一定の妥当性が確認できた。

表 2-8 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

なお、土壌調査の一環として、粒径分布の分析も行ったが、詳細については令和 3 年度の本事業報告書を参照されたい。

2.5.4. 林相調査

林相調査は、作成した林相区分図上の立木密度区分の妥当性の検証材料とするため、また、本事業における、森林の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、立木密度以外の林分情報も含めて計測及びデータ収集を行った。

林相調査の調査手法や結果の詳細は、「3.4.4. (1) 1) 現地における林相調査の方法（令和 3 年度実施）」で述べる。

2.6. 過年度調査の成果及び課題まとめ

以上の令和2年度、3年度調査の成果及び課題を表2-9に整理した。

表 2-9 令和2年度及び3年度調査における成果及び課題

	事業内容	事業成果	課題
令和2年	<ul style="list-style-type: none"> 水源涵養機能評価に求められる新たな視点の確認 本事業の目標設定 流出モデル及び対象流域の選定 林分状態の評価 モデルパラメータに関する調査 林分蒸散量、林床蒸発散量の観測 貝沢林相区分図作成 	<ul style="list-style-type: none"> 林相と LAI の関係性ととりまとめとパラメータ化 LiDAR による林分解析試行（貝沢） 貝沢モデルによる流出解析 	<ul style="list-style-type: none"> SWAT モデル構造上の課題（樹幹遮断、林床面蒸発散、側方流の計算） 実測林分データの不足
令和3年	<ul style="list-style-type: none"> 土壌データ（貝沢）、林分データ（貝沢・道志）の現地取得 LiDAR データによる林分解析（貝沢・道志） 道志林相区分図（現代・過去）構築 パラメータの精緻化 	<ul style="list-style-type: none"> 実測林分データ取得と LiDAR データの活用に関する検討 流域毎のパラメータ（表面流出・浸透、土壌、地下水、植物関連）の精緻化 三保崩壊地データの抽出 道志（現代・過去）モデル、三保（現代）モデルによる流出解析 	<ul style="list-style-type: none"> 蒸発散量の推定精度の向上（SWAT-Forest の開発） 林相毎のパラメータの調整（表面流出・浸透、土壌） 三保崩壊地データの妥当性の確認

3. 今年度調査の内容（モデル構築及び精緻化）

3.1. 課題と対応方針に関する整理

過年度までの残存課題及び当年度第1回、第2回検討委員会において指摘のあった事項に対する令和4年度のモデル構築・精緻化の対応方針と対象モデルについて表3-1に整理した。

表3-1 令和4年度のモデル構築・精緻化において対応すべき課題及び対象モデル

No.	項目	課題・指摘事項	対応方針	対象モデル
①	三保ダム流域で抽出した過去崩壊地	<ul style="list-style-type: none"> 三保ダム流域の過去時点の崩壊地を再現した林相区分図における、崩壊箇所や面積の妥当性の確認が必要。 	<ul style="list-style-type: none"> 文献情報と照らし合わせによる崩壊箇所や面積の妥当性の検証。 	<ul style="list-style-type: none"> 三保（過去）
②	林相区分図上の立木密度	<ul style="list-style-type: none"> モデルインプットである林相区分図の構成要素である「林分疎密度」は森林簿の樹冠疎密度で代用しているが、各疎密度（密・中・疎）に応じた実際の立木密度が把握できていない。 	<ul style="list-style-type: none"> 現地調査（貝沢、道志）における林分情報の取得と、森林簿情報との照合。 	<ul style="list-style-type: none"> 貝沢 道志（現代）
③	SWAT内の水文計算プログラム	<ul style="list-style-type: none"> 遮断蒸発や林床面蒸発散などの水文プロセスがモデル内で十分に考慮されていない。 一部の流域について、推定された蒸発散量の割合が妥当でない。 	<ul style="list-style-type: none"> 従来SWATモデルにおける蒸発散及び土壌パラメータの調整。 SWATへの独自蒸発散プログラムの組み込み 	共通
④	実測流量データの流出率	<ul style="list-style-type: none"> 降水量に対する実測流量（ダム流入量）の割合（流出率）が0.8と高い。 	<ul style="list-style-type: none"> 雨量データを標高で補正 	<ul style="list-style-type: none"> 道志（現代・過去） 三保（現代・過去）
⑤	実測値の評価	<ul style="list-style-type: none"> 既往研究や実測値から得られている知見とシミュレーションの結果が一致していないと、将来予測等の面で信頼性が確保できない。 	<ul style="list-style-type: none"> 実測データの分析・評価を行い、その結果とモデル推定結果を照合。 	共通
⑥	パラメータ調整	<ul style="list-style-type: none"> 地表（林床）や土壌物理性に関するインプット・パラメータ値に林相の相違が加味されていない。 	<ul style="list-style-type: none"> 林相毎（樹種別・林齢別・密度別）のパラメータ調整 	共通
		<ul style="list-style-type: none"> 地下水関連パラメータに地質の影響を加味することの有効性について未検証である。 	<ul style="list-style-type: none"> 地下水関連パラメータに地質の影響を加味することの可能性と有効性に関する文献調査、検討 	共通

3.2. 作業内容及び手順

森林の水源涵養機能の解析・評価に係る主な作業項目及び全体フローを図 3-1 に示す。

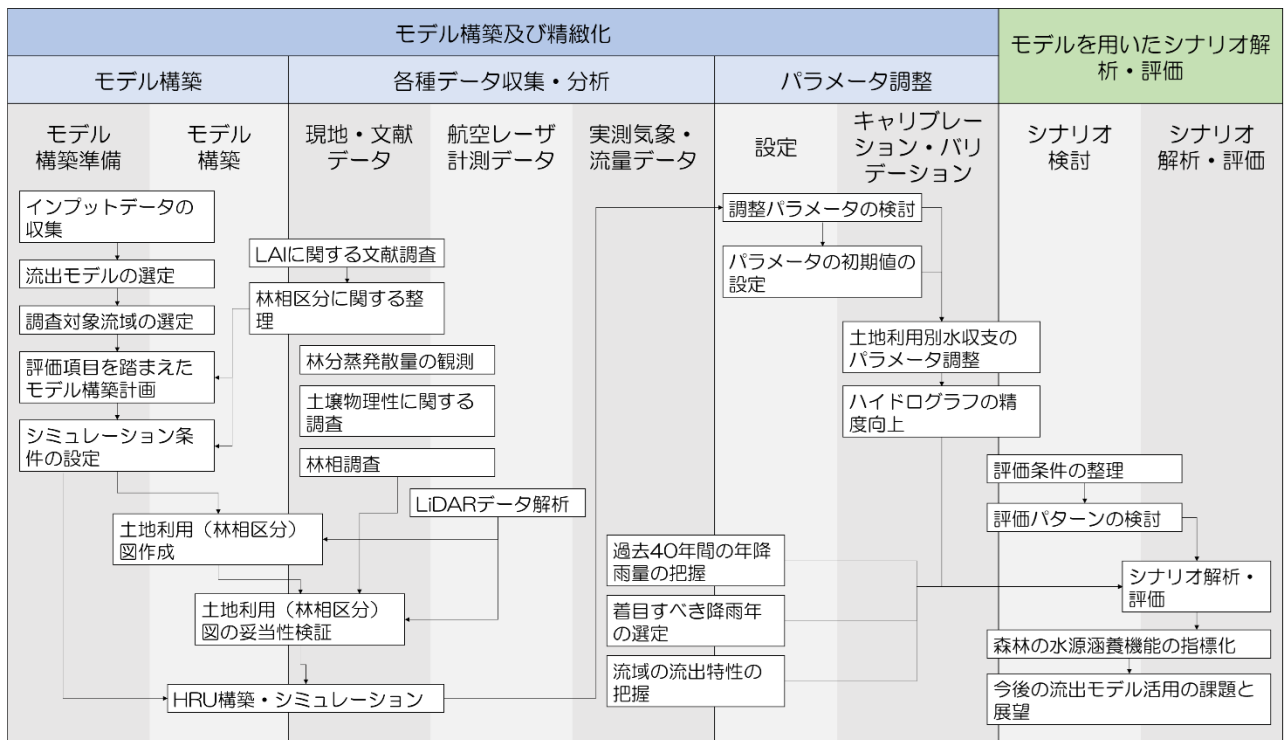


図 3-1 森林の水源涵養機能の解析・評価に係る主な作業項目及び全体フロー

3.3. インプットデータの収集・調整

各モデルのインプットあるいは、キャリブレーション及び、バリデーション並びに、精度検証に必要なデータの一覧を表 3-2 に示し、各データの収集・作成方法について述べる。

表 3-2 モデル構築に必要なデータ及び収集先一覧

分類	収集データ		用途	運用先モデル				
	データ名称	入手先		詳細	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／日射量／気温／風速／相対湿度	神奈川県自然環境保全センター		○	-	-	-	-
	雨量	山梨県		-	-	-	-	-
地形	DEM	国土交通省（5m メッシュを 20m 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 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	○	○	○	○	○
	土層厚	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	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（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）		○	○	-	○	○
	空中写真（単写真）	国土地理院（販売元：日本地図センター）	崩壊地	-	-	-	-	○
2010 年土地被覆分布図	神奈川県（委託業務成果）	-		-	-	-	○	
流量	河川流量（貝沢）	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・バリデーション、精度検証	○				
	道志ダム流入量	山梨県			○	○		
	三保ダム流入量	神奈川県企業庁					○	○

3.3.1. 雨量データ

(1) 雨量データ調整の経緯

山地の奥地流域では、標高が高い地点ほど降水量が大きくなる傾向がある²が、山地に在るアメダス観測所は、維持管理のしやすさの見地から、流域の中でも比較的アクセスのしやすい低標高の箇所に設置されていることもあり、このような観測所の雨量から求める流域平均雨量は、実際よりも過少となる可能性がある。この低標高地点で観測された降水量をSWATモデルのインプットとして観測所の無い高標高地に適用すると、実際よりも少ない降水量が与えられることとなり、河川流出率（＝河川流出量／降水量）が過大に算出されるなど、シミュレーション結果の妥当性を低下させる可能性が考えられた。

このことから、雨量補正前の道志ダム流域と三保ダム流域における流出率を算出し、既往のデータと比較し、検証を行った。現代・過去の各シミュレーション期間における道志ダム流域の流出率は0.81、0.80、三保ダム流域の流出率は0.78、0.82となり、スギ林における年間遮断損失雨量（降水量の20%程度）と蒸発散量とを併せた損失雨量が降雨量全体の30%程度という既往の知見と照らし合わせると、流出率0.80前後はやや過大と認められた（表3-3 ※赤字の部分で流出率が過大）。このため、インプット雨量を増加させる補正を行うこととした。

表 3-3 雨量補正前の流域流出率

モデル流域	道志			三保		
	現代	過去	平均 降雨年	現代	過去	平均 降雨年
期間（年）	2015-2019	1978-1982	2015	2015-2019	1978-1982	2015
降水量（mm）	2,438	2,091	2,445	2,727	2,362	2,739
河川流出量（mm）	1,986	1,681	1,954	2,124	1,944	2,157
流出率	0.81	0.80	0.80	0.78	0.82	0.79

(2) 手法

雨量補正のための参照データとして、道志ダム流域及び三保ダム流域内に設置されているアメダス等の雨量観測所のデータを使用した。具体的には、図3-2に示すとおり、道志ダム流域では下流側の道志観測所、上流側の箒沢観測所、石割観測所の3地点の雨量データを使用し、三保ダム流域では上流側の箒沢観測所、熊木観測所、水ノ木観測所、下流側の三保観測所、丹沢湖観測所の5地点の雨量データを使用することとした。

² 山田ら（1995）「山地流域での降雨特性に関する統計的解析」

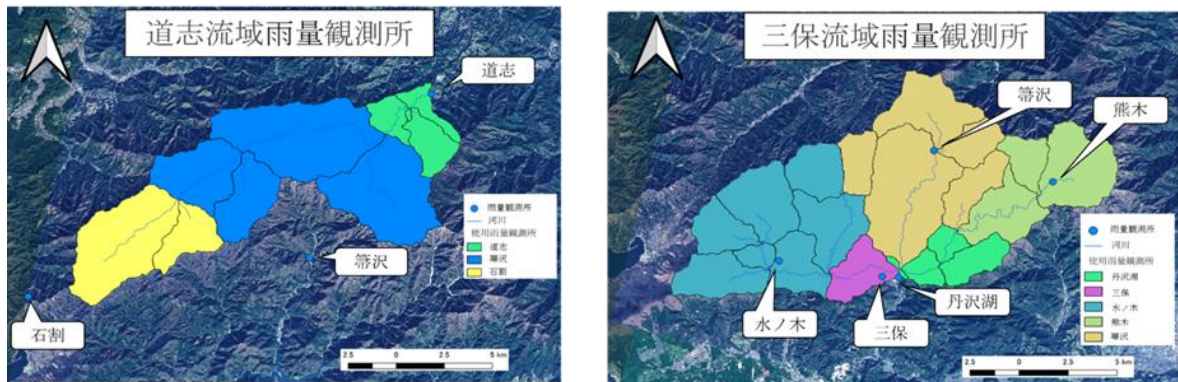


図 3-2 補正に用いた雨量データ観測所の位置 (左：道志ダム流域、右：三保ダム流域)

補正雨量は、既設観測所の標高と実測降雨量をパラメータとした、山田ら (1995)² による以下の計算式を用いて求めた。

$$P = P_0 \{C(z - h_0) + 1\}$$

- P : 推定降雨量 (mm)
- P_0 : 標高 h_0 の実測降雨量 (mm)
- C : 定数 (1.0×10^{-3})
- z : 標高 (m)

P は補正された結果の推定降雨量 (mm)、 P_0 は、標高 h_0 (m) 地点にある既設観測所における実測降雨量 (mm)、 C は定数 (1.0×10^{-3})、 z は補正を行いたい地点の標高 (m) である。SWAT モデルでは降雨量を支流毎にインプットする構成となっていることから、補正雨量は各支流における重心地点の標高を基に算出した。

(3) 結果

大半の支流重心地点の標高は、既設観測所の標高よりも高いことから、補正後の雨量の方が補正前よりも多くなった。その結果、河川流出率も 0.6~0.7 程度と妥当な割合となった (表 3-4 赤枠内)。このことから、SWAT モデルの雨量インプットには、これらの補正された雨量データを適用する。

表 3-4 雨量補正後の流域流出率

モデル流域	道志			三保		
	現代	過去	平均 降雨年	現代	過去	平均 降雨年
期間 (年)	2015-2019	1978-1982	2015	2015-2019	1978-1982	2015
降水量 (mm)	2,998	2,665	3,023	3,179	2,776	3,233
河川流出量 (mm)	1,986	1,681	1,954	2,124	1,944	2,157
流出率	0.66	0.63	0.65	0.67	0.70	0.67

3.3.2. 雨量以外の気象データ

気温、相対湿度、風速、日射量についての気象データを入手した。

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 モデル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、気象インプットの設定には、各観測所の緯度・経度及び標高の情報も必要となるため、それらのデータは DEM から算出した。各気象観測所及び観測項目は、表 3-5、表 3-6 の一覧に示すとおりである。

収集した気温、相対湿度、風速のデータの一部を例として、以下に示す。

表 3-5 気象観測所及び観測項目一覧（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：「×」は当該観測所においては提供されていないデータ。以下同様。

表 3-6 気象観測所及び観測項目一覧（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	篝沢	熊木	水ノ木	三保	須走
雨量	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
気温	○	○	○	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×
相対湿度	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
風速	○	○	○	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×
日射量	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×

(1) 気温データ

収集した気温データの一部として、過去（1978～1982年）と現代（2015～2019年）のシミュレーション期間における気象庁山中観測所の日平均気温の推移を図 3-3 に示す。

過去・現代ともに1月から7月にかけて気温が上昇し、7月、8月頃にピークを迎え、その後、1月にかけて低下する傾向がみられた。冬季における最低気温は約-10℃と共通しているが、最高気温は過去のシミュレーション期間が約 22℃であるのに対し、現代のシミュレーション期間では 25℃程度と明らかに高くなっていることから、過去 40 年間で最高気温が上昇傾向にあることがみられた。

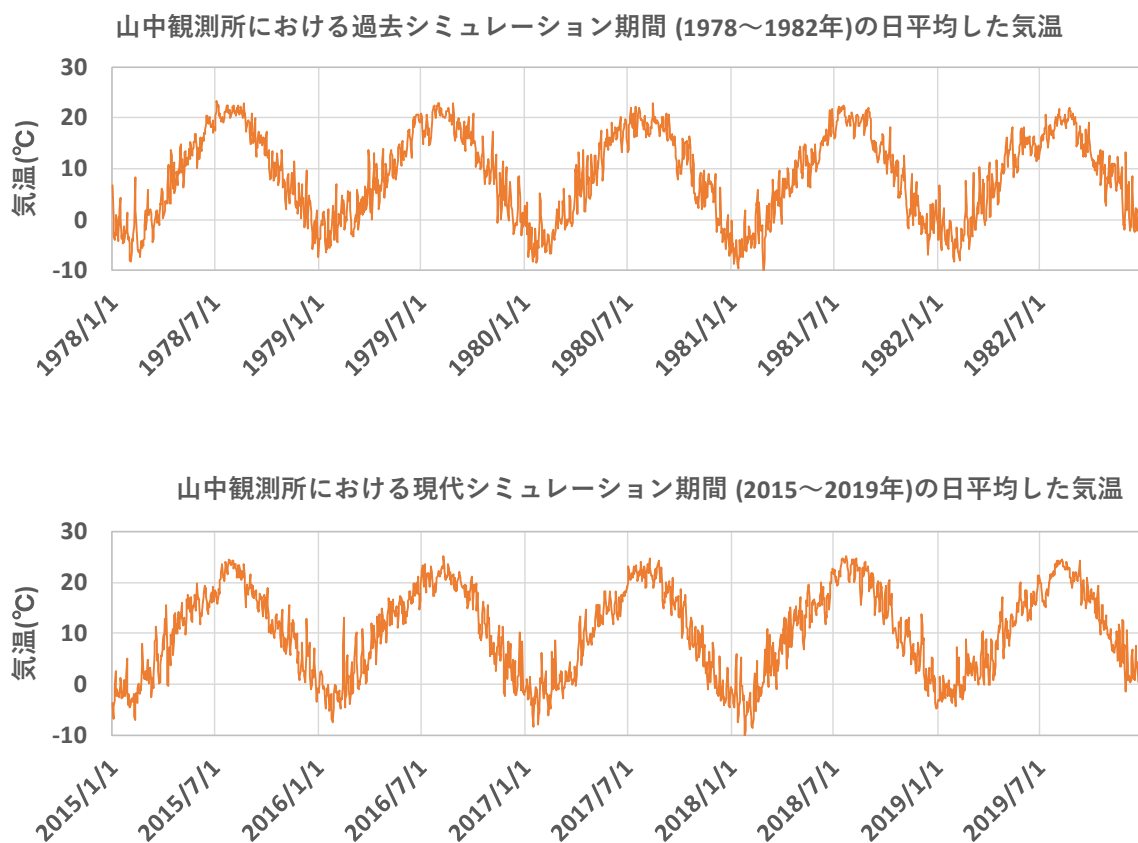


図 3-3 山中観測所における日平均気温の推移
 (上：過去シミュレーション期間、下：現代シミュレーション期間)

(2) 相対湿度データ

収集した相対湿度データの一例として、過去（1978～1982年）と現代（2015～2019年）のシミュレーション期間における気象庁河口湖観測所の日平均相対湿度の推移を図 3-4 に示す。

過去、現代ともに1月付近では変動が大きく、下限は40%を下回る日もみられたが、7月にかけて徐々に変動が小さくなり、80%を上回る日が多くみられた。その後、1月にかけて変動が大きくなった。

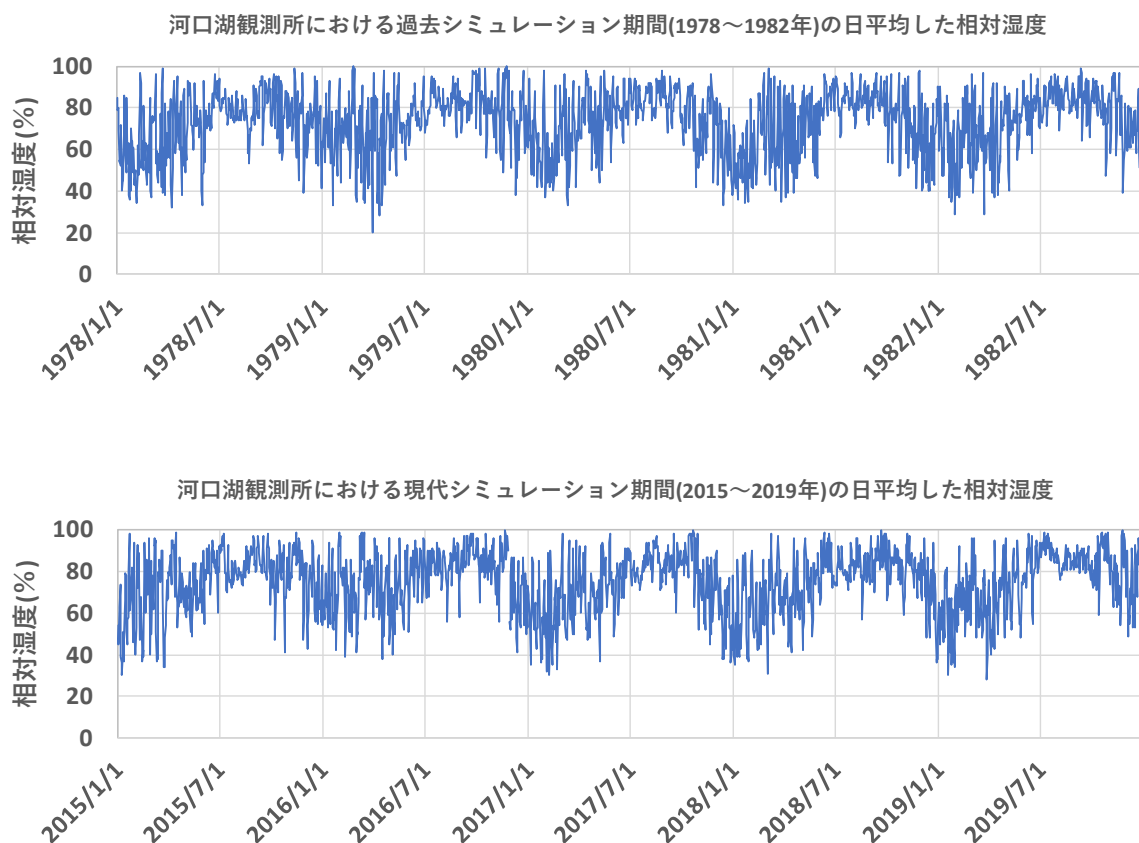


図 3-4 河口湖観測所における日平均相対湿度の推移

(3) 風速データ

収集した風速データの一例として、過去（1978～1982年）と現代（2015～2019年）のシミュレーション期間における気象庁山中観測所の日平均風速の推移を図 3-5 に示す。

現代シミュレーション期間においてはおおむね 1～2 m/s 付近で変動を示し、過去シミュレーション期間においてもおおむね 1～2 m/s 付近で変動しているものの、4 m/s を上回る日も多くみられた。これは過去から現代にかけて裸地面に森林が繁茂したことや若齢木が成長したことによって森林の保持する空気力学的抵抗が高められ、比較的速い風が吹いても森林地で減速するために、現代は過去のシミュレーション期間よりも風速 4 m/s を上回る日が少ない観測結果となったことが考えられる。

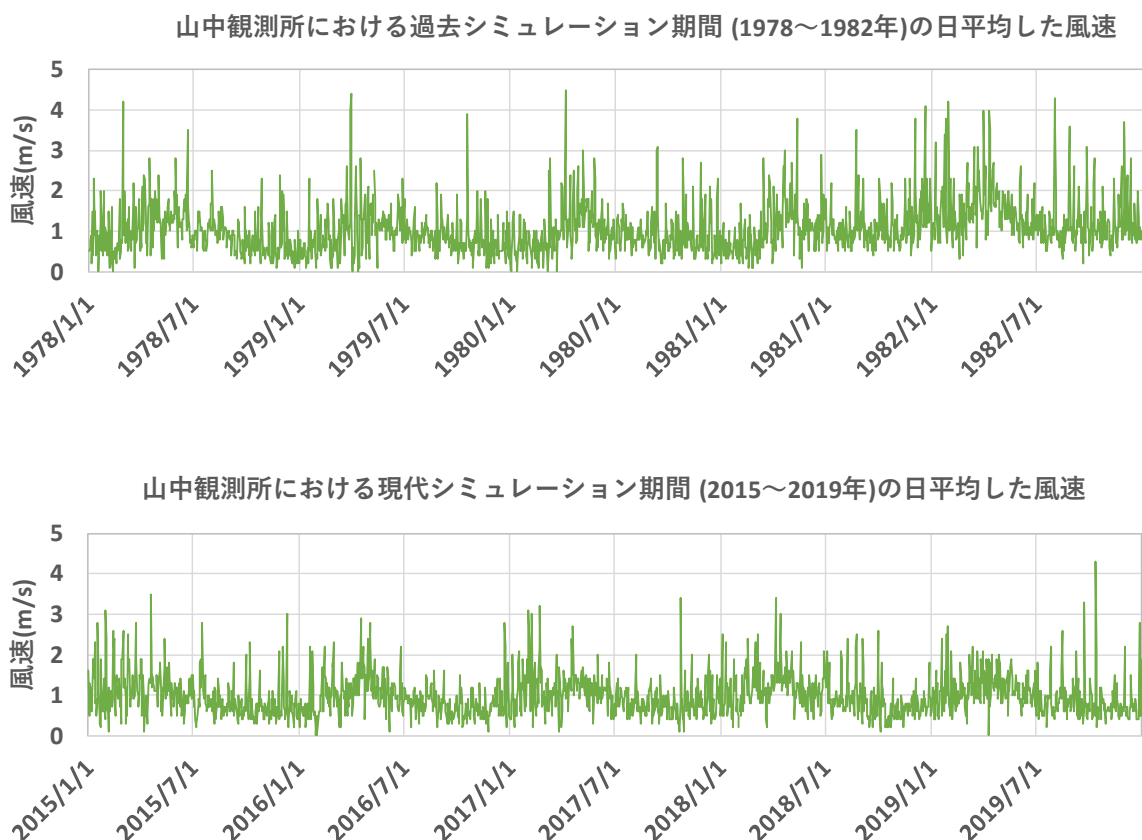


図 3-5 山中観測所における日平均風速の推移
(上：過去シミュレーション期間、下：現代シミュレーション期間)

3.3.3. 地形 (DEM) データ

SWAT モデルでは、DEM データから地表の傾斜角を任意の階級幅で区分し、インプットとして設定することができる。DEM データについては、モデル処理の効率性を高める観点から、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 1 m 解像度の DEM データを 5 m に、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³により入手した 5 m 解像度の DEM データを 20m にリサンプリングして用いることとした。

森林地における斜面区分の考え方として、作業システムに応じた路網計画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 つの斜面に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° の階級幅とし、0～15°、15～30°、30～45°、45° 以上の 4 区分とした (図 3-6)。

³ 基盤地図情報ダウンロードサービス, <https://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php>

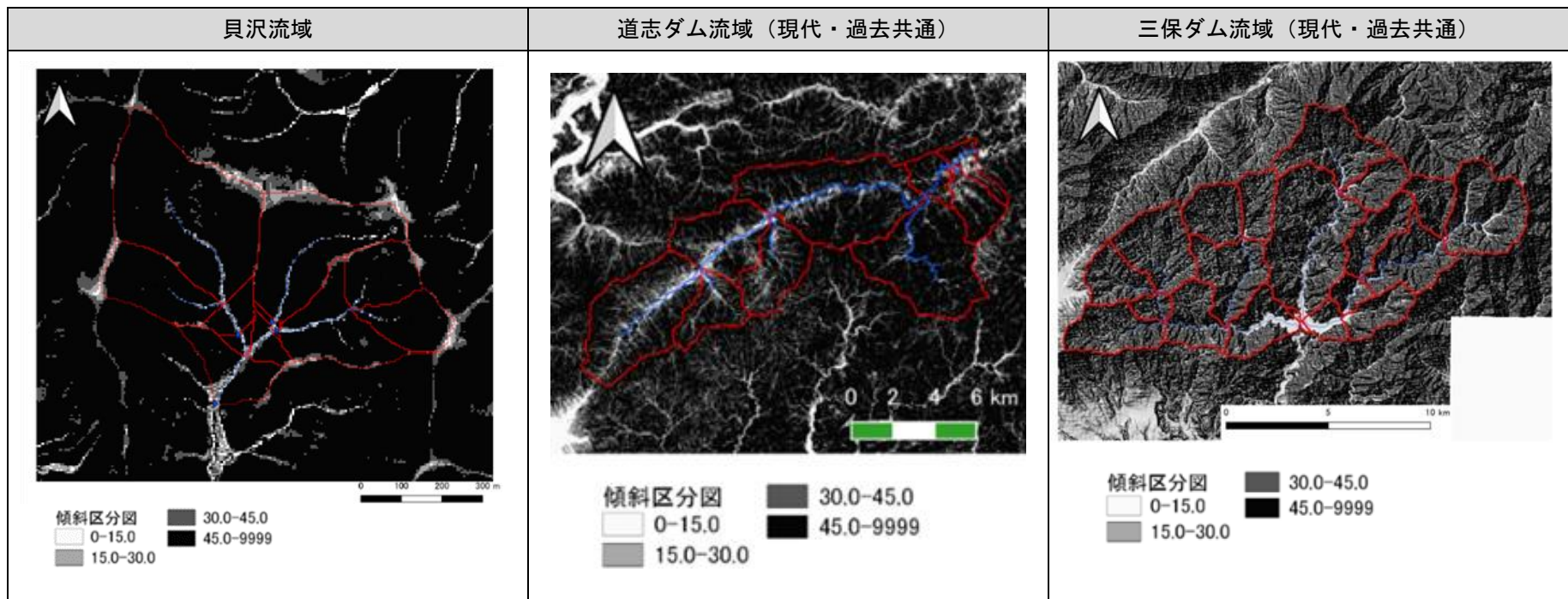


図 3-6 各モデルの傾斜区分図

3.3.4. 土壌データ

土壌データは、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考慮し、国土交通省の国土調査（土地分類調査・水調査）⁴による、20万分の1土地分類基本調査の土壌分類GISデータを使用した。なお、貝沢流域は、同データでは全域が同一の土壌タイプ（褐色森林土）となっていたが、後述する土壌物理性に関するパラメータ調整の可能性を考慮し、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を加味し、より細分化された土壌区分図を作成した。

各モデルで作成した土壌区分図は、図 3-7 のとおりである。なお、この土壌区分図は、SWATモデルに組み込まれている土壌データベースと連動しており、データベース内で土壌区分毎に設定された土壌物理性等に関する数値がモデル入力値として計算に用いられている。これらの入力値は、モデルの推定精度を高めるためのキャリブレーション作業やバリデーション作業により最適な値に調整される場合がある。パラメータ調整の詳細については第 5 章で詳述する。

⁴ 国土調査（土地分類調査・水調査），<https://nlftp.mlit.go.jp/kokjo/inspect/inspect.html>

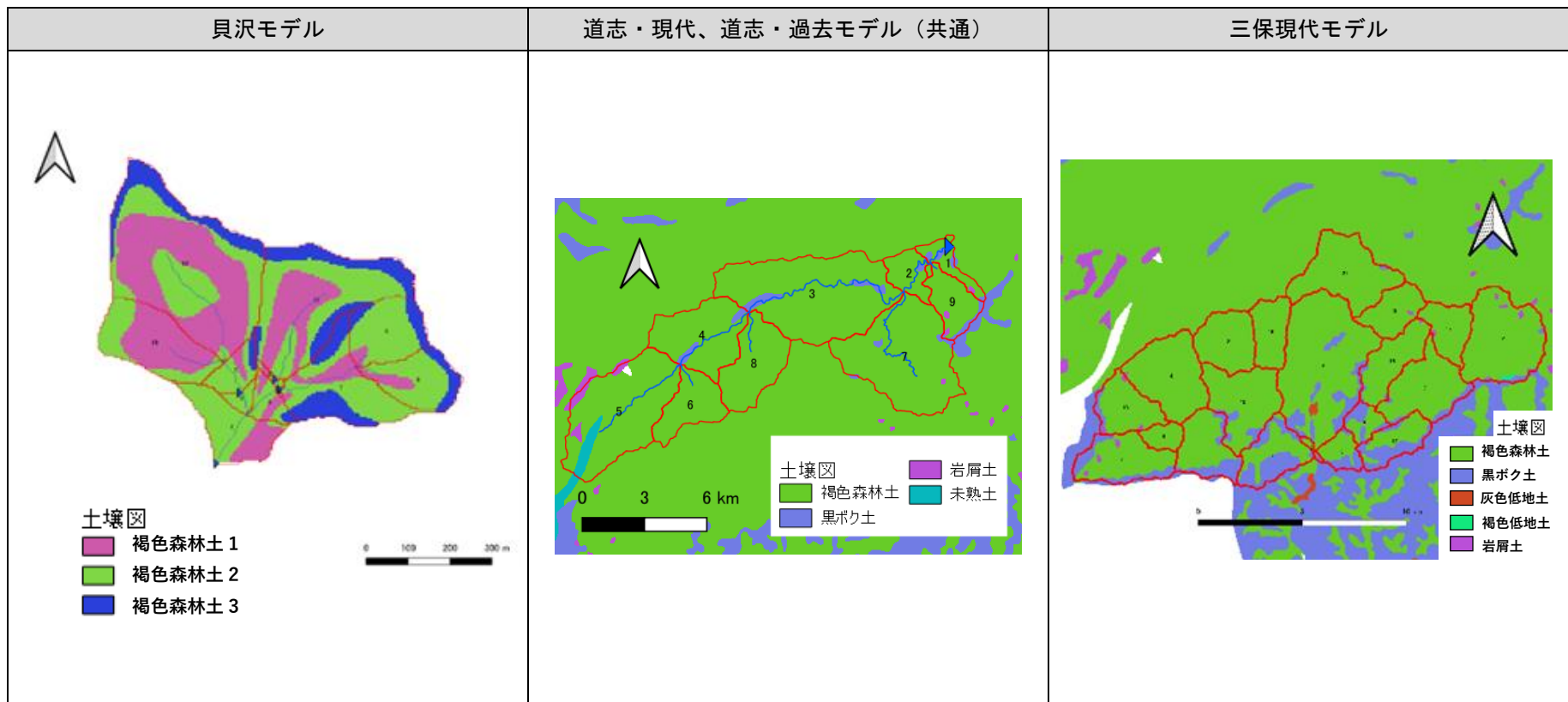


図 3-7 各モデルの土壤区分図

3.3.5. 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た。以下に、貝沢流域、道志ダム流域、三保ダム流域の実測流量データとして用いた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、「4.3 対象流域における流出特性の把握（モデル推定結果との比較材料として）」に記載する。

(1) 貝沢流域

貝沢流域は、神奈川県自然環境保全センターから提供された、同流域内の4つの量水堰の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。(図3-8)モデルの推定精度は、当該流域の最下流点である量水堰No.4の実測値とモデル最下流点(量水堰No.4の位置に相当)における推定値と照らし合わせることで評価した。令和2年度に日単位データを整理し、令和3年度には時間流量データについて整理した。

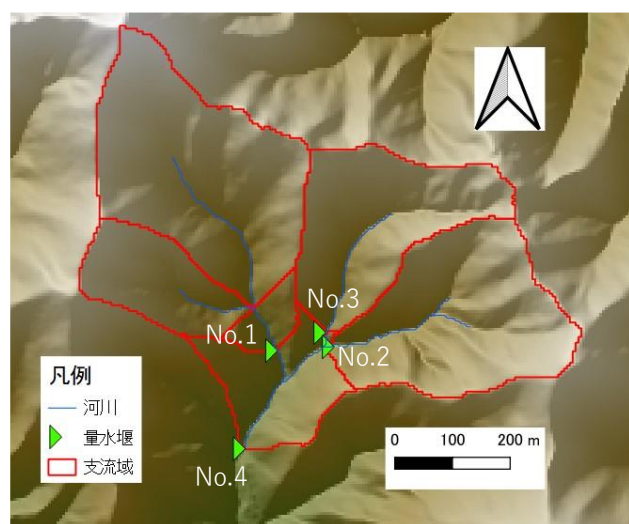


図 3-8 貝沢流域における量水堰位置図

(2) 道志ダム・三保ダム流域

道志ダム及び三保ダム流域は、貝沢流域のように最下流地点に流量堰が存在しないため、山梨県より提供された「ダム流入量」を「最下流地点における流出量」と置き換えて精度検証を行った。貝沢流域と同様に、令和2年度に日単位データを整理し、令和3年度に時間流量データについて整理した。

3.3.6. 土地利用（林相）データ

土地利用図は、傾斜、土壌図と併せて、SWAT モデルの主要なインプットのの一つである。本事業では、流域内において異なる状態で分布している各林分に着目し、このインプットデータの名称を「土地利用図」ではなく、森林を主体とした「林相区分図」に置き換えることとした。図 3-9 には、林相区分図作成に必要な作業項目及び手順を示す。

本事業の SWAT モデル構築・解析に必要な、貝沢流域、道志ダム流域、三保ダム流域の林相区分図の作成作業は、事業初年度である令和 2 年度から進めてきた。本年度は主に、令和 3 年度に航空レーザのデータ解析により林分疎密度の精度向上を図った貝沢林相区分図の妥当性の確認を行い、三保ダム流域の現代林相区分図の見直し・再作成、過去林相区分図の作成、令和 3 年度に判読抽出した崩壊地箇所の妥当性の確認等を行った。

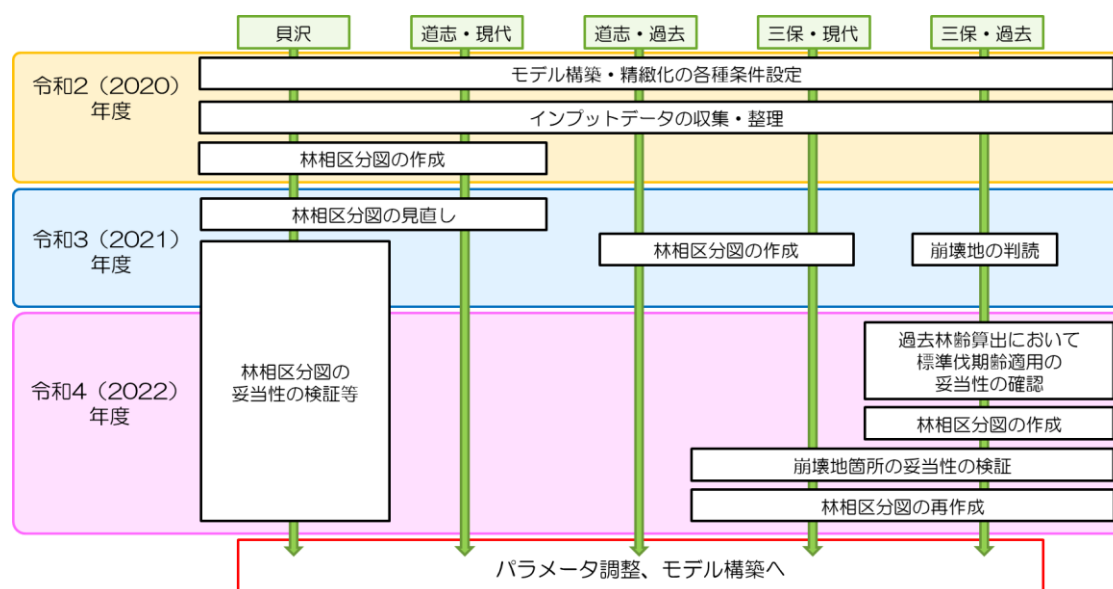


図 3-9 林相区分図作成に係る作業項目及び手順

(1) 林相区分に関する整理

モデルのインプットとして必要な林相区分図については、森林の水源涵養機能に大きな影響を及ぼすと考えられる「樹種」、「林齢」、「林分疎密度」（厳密には収量比数に相当する要素であるが、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 上の処理に要する時間も長くなることから、森林簿の情報を基に、樹種は「スギ」、「ヒノキ」、「広葉樹」の 3 区分、林齢は「0～10 年生」、「10～20 年生」、「30～40 年生」、「40～50 年生」、「50 年生以上」の 5 区分、林分疎密度は「疎」、「中」、「密」の 3 区分とした。

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 3-7 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 毎に植物に関連するパラメータ（LAI 等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当な crop ID を割り当てた。

表 3-7 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		FSAD
	10~20年生	疎	1100	10	1	1111	存在少ない	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		FHAD
	10~20年生	疎	1200	10	1	1211	存在少ない	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、荒廃溪流を含む	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) データ収集

林相区分図の作成には主に森林簿を活用し、森林簿範囲外の箇所や過去の林相の推定には、環境省植生図を補完的に用いることとした。また、過去（1970年代）に三保ダム流域において多く発生していた崩壊地の判読抽出のため、当時の空中写真や神奈川県判読成果を活用したほか、貝沢流域の立木密度の算出には航空レーザデータを用いた。

収集したこれらのデータの概要を以下に記す。

1) 森林簿

道志ダム、三保ダム流域の林相区分図作成において活用した、神奈川県、山梨県及び国有林の各森林簿の範囲を図 3-10 に示す。

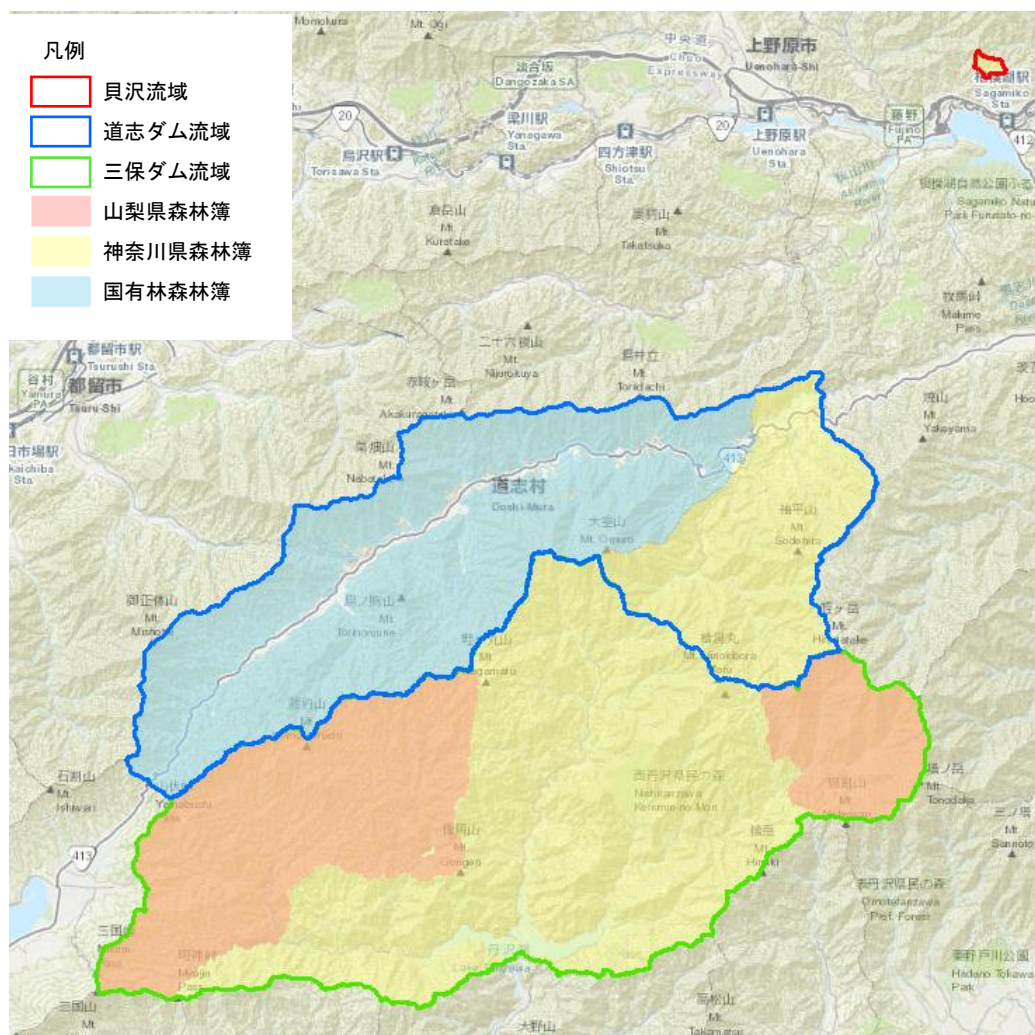


図 3-10 道志ダム、三保ダム流域において活用した森林簿

次に、山梨県の森林簿（図 3-11）と、神奈川県の森林簿（図 3-12）、国有林森林簿（図 3-13）を樹種区分別にそれぞれ示す。

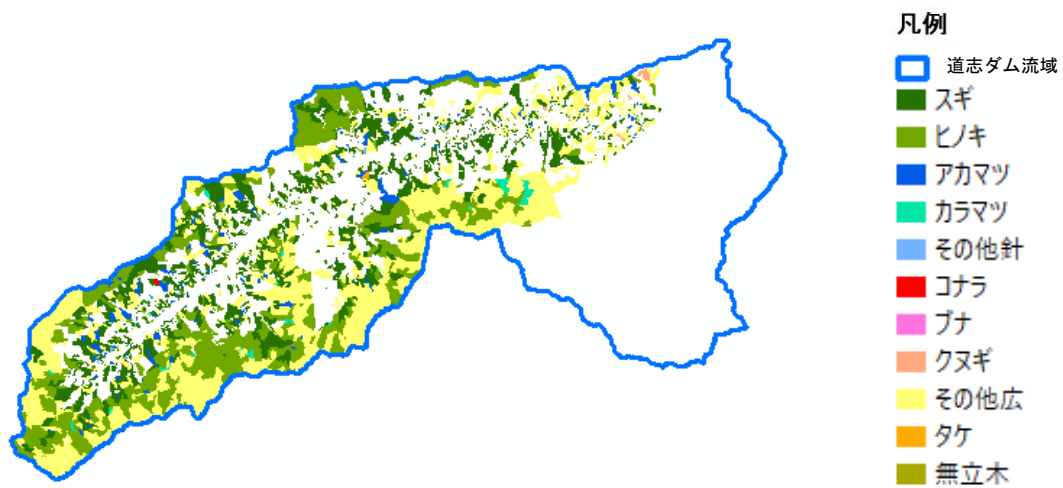


図 3-11 山梨県森林簿

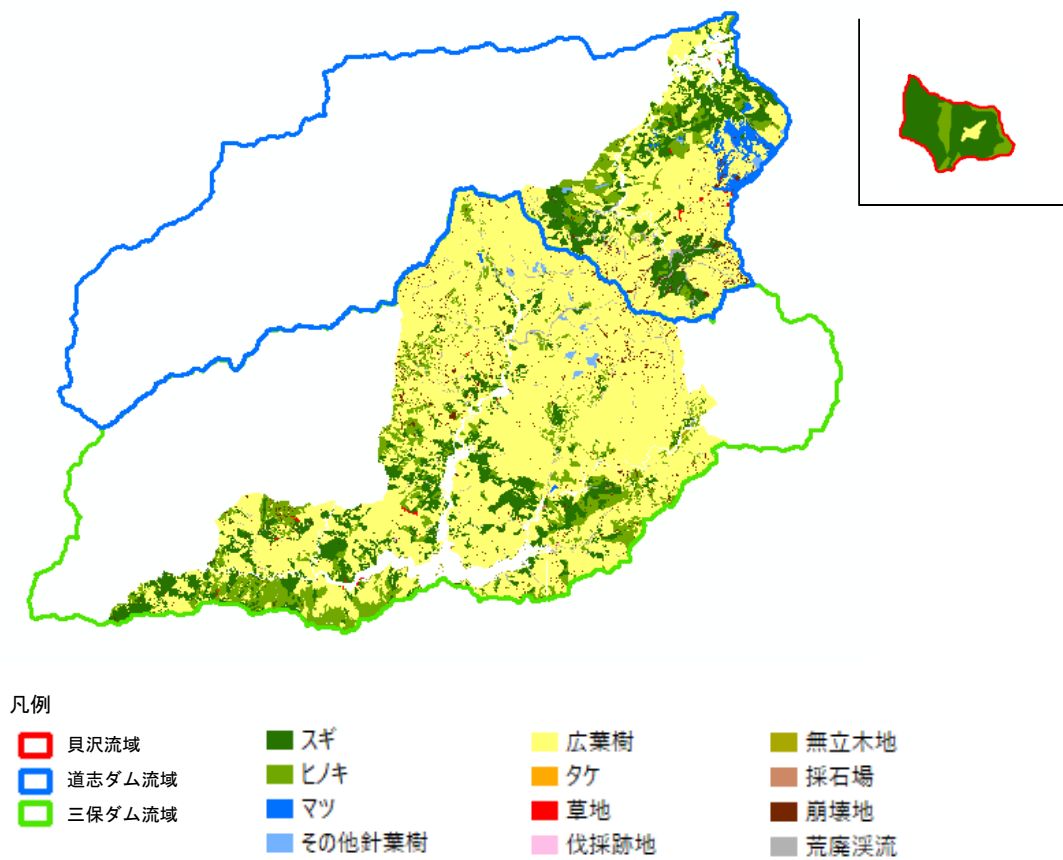


図 3-12 神奈川県森林簿（※右上は貝沢流域）

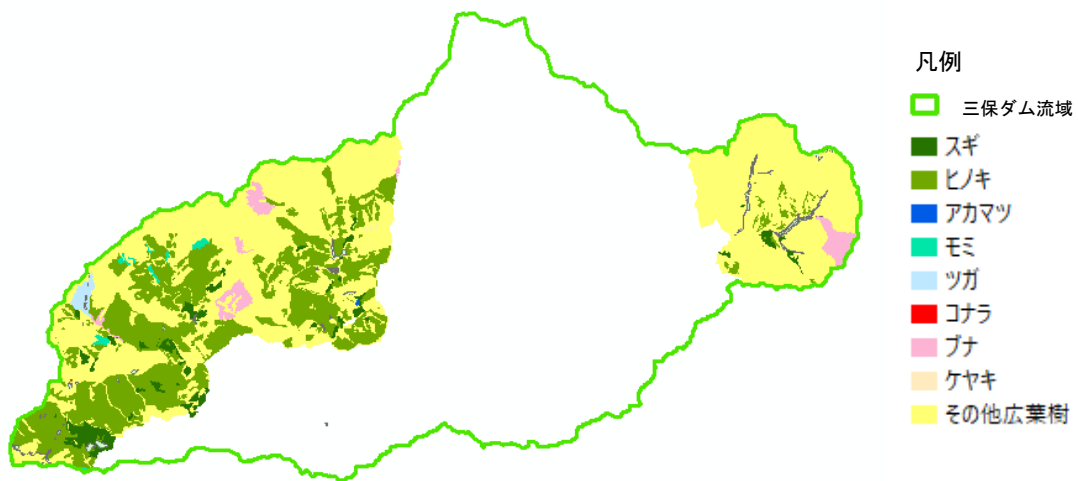
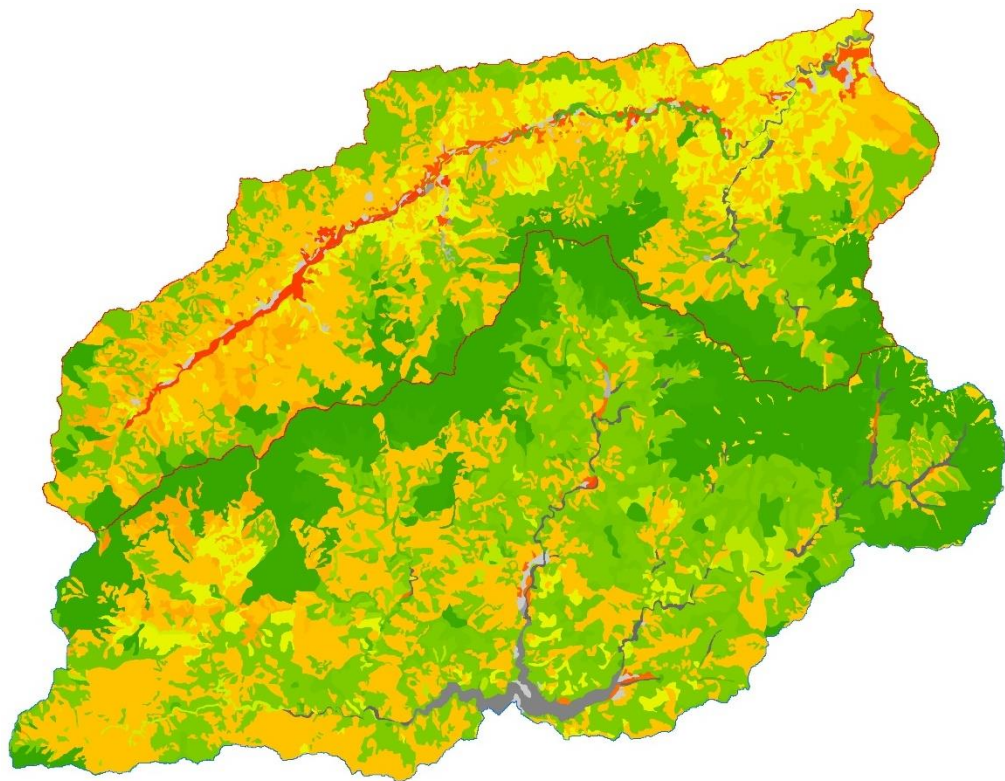


図 3-13 国有林森林簿

2) 環境省植生図

第6回調査環境省 1/2.5 万の現存植生図（1999～2004 年）（図 3-14）と第2回環境省 1/5 万の現存植生図（1981～1982 年）（図 3-15）をそれぞれ示す。現代の林相区分図作成に 1/2.5 万の現存植生図（第6回調査）を、過去の林相区分図の作成には 1/5 万現存植生図（第2回調査）を活用した。



凡例

- | | | |
|-------------|-------------------|------------------|
| 道志ダム流域 | シラカシ群落 | その他植林 |
| 三保ダム流域 | ウラジロガシ群落 | その他植林(常緑針葉樹) |
| スズカケブナ群団 | モミ群落 | ゴルフ場・芝地 |
| イヌブナ群落 | アカマツ群落 | 牧草地 |
| ツガ群落 | フサザクラ群落 | 路傍・空地雑草群落 |
| シオジ群落 | シイ・カシ二次林 | 果樹園 |
| ケヤキ群落 | コナラ群落 | 畑雑草群落 |
| ヤマハンノキ群落 | アカメガシワ-カラスザンショウ群落 | 畑地雑草群落 |
| 河辺ヤシブシ群落 | アズマネザサ群落 | 水田雑草群落 |
| シモツケソウ群落 | 河川敷砂礫地植生 | 市街地 |
| プナ-ミズナラ群落 | 岩壁植生 | 残存・植栽樹群をもった公園、墓地 |
| アカシデ-イヌシデ群落 | ヤマホタルブクロ群落 | 造成地 |
| ハリウツギ群落 | 伐跡群落 | 開放水域 |
| ササ群落 | スギ・ヒノキ・サワラ植林 | 自然裸地 |
| ススキ群団 | アカマツ植林 | |
| | カラマツ植林 | |

図 3-14 第 6 回調査環境省 1/2.5 万現存植生図 (1999~2004 年)

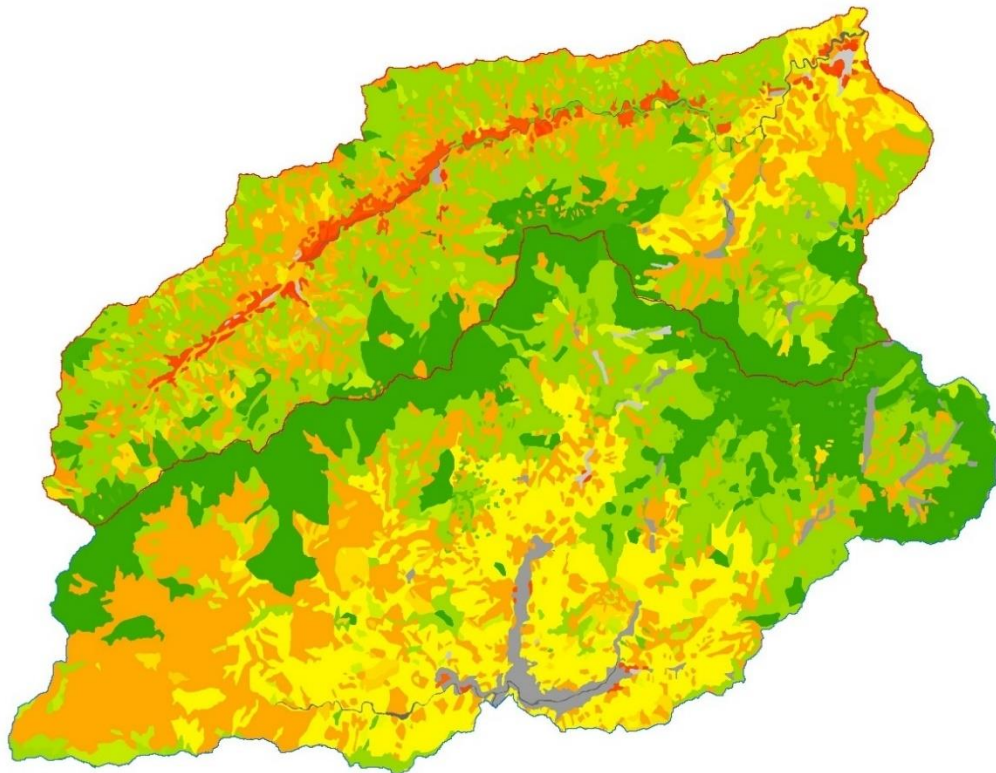
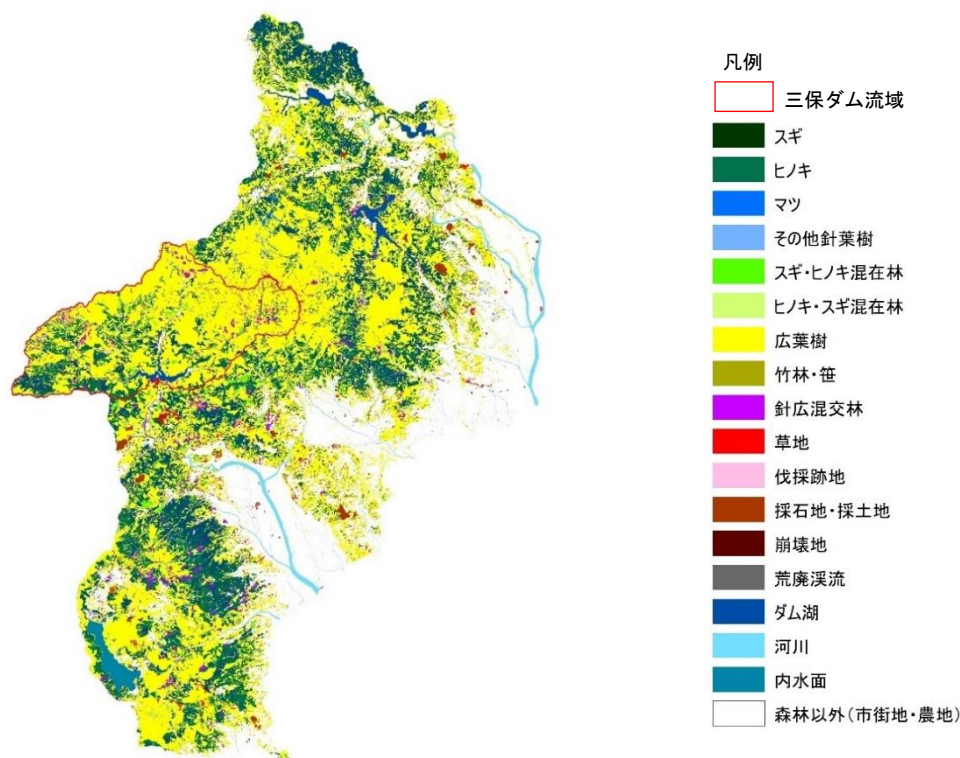


図 3-15 第 2 回環境省 1/5 万現存植生図 (1981~1982 年)

3) 2010年神奈川県作製 空中写真判読による土地被覆分布図

三保ダム流域の崩壊地情報として、神奈川県自然環境保全センターより2010年神奈川県が作製した空中写真判読による土地被覆分布図の提供を受け、当該データに付属の樹種コードのうち、「崩壊地」を抽出して活用した(図3-16)。



データ形態	シェープファイル	
収録内容	航空写真による樹種判読結果(ポリゴン) 属性: 樹種コード ※樹種コードは神奈川県林政情報システム ⁵ の樹種コードに準じていますが、神奈川県林政情報システムで定義されていない以下の項目は追加しています。 15: スギ・ヒノキ混在林 16: ヒノキ・スギ混在林 25: 針広混交林 83: 河川 84: 内水面	
航空写真撮影時期	H22年度	南足柄市、松田町、山北町、小田原市、秦野市、伊勢原市、中井町、大井町、開成町、箱根町、真鶴町、湯河原町
	H23年度	相模原市(旧藤野町、旧相模湖町、旧津久井町、旧城山町)、愛川町、清川村、厚木市
出典	水源の森林推進課(平成23年度樹種判読調査委託業務、平成24年度樹種判読調査委託業務)	

図3-16 2010年神奈川県作製の空中写真判読による土地被覆分布図

⁵ 神奈川県森林簿など森林計画情報の電子データシステム

4) 1970年代空中写真

写真判読により、崩壊地の抽出に用いた1970年代空中写真の一部を図3-17に示す。

なお、地図上に表示している空中写真は、崩壊地抽出作業の際に幾何補正した写真を表示している。

1970年代の空中写真では、「3.4.3. (1) 2) ①崩壊地の判読（三保・過去モデルインプットデータの作成）（令和2年度実施）」に記載されている過去の崩壊地における抽出作業に用いた。

データ名	年代別(1974年～1978年)空中写真
入手先	国土交通省国土地理院
形式	TIFFファイル(位置座標なし)

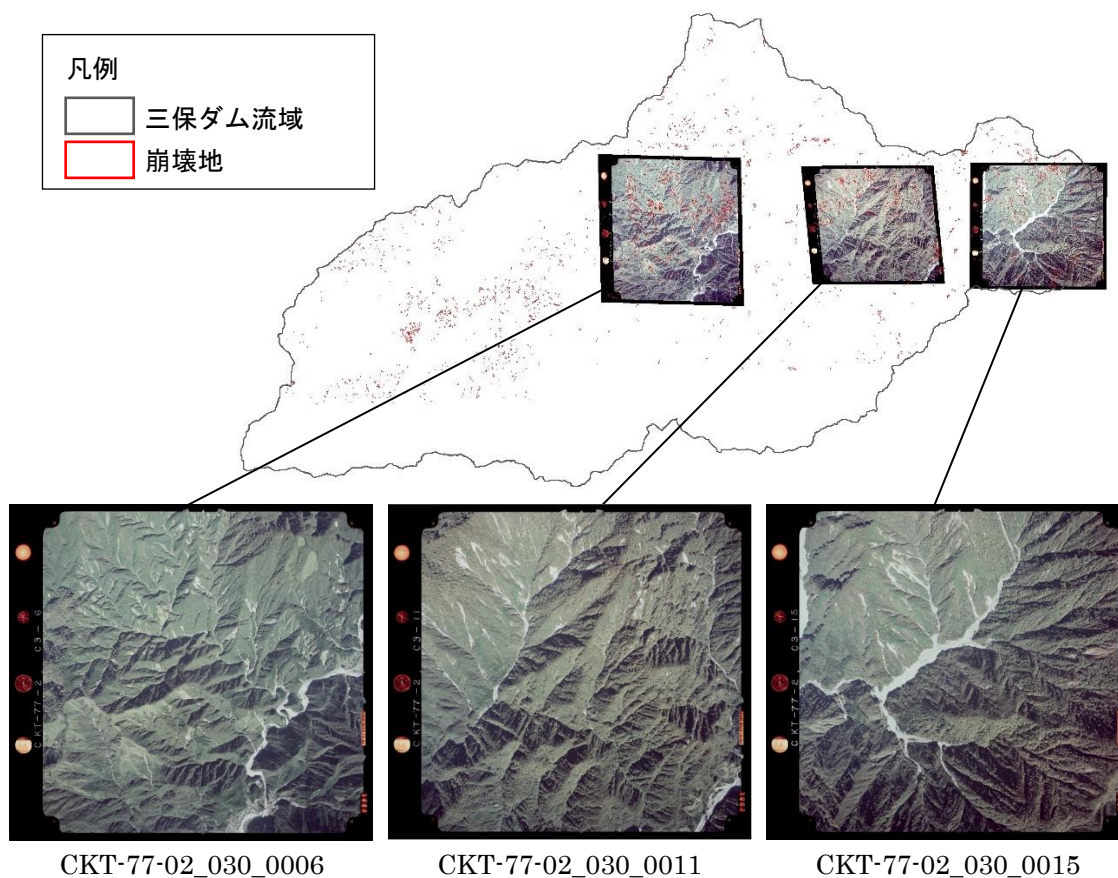


図3-17 年代別(1974年～1978年)空中写真(抜粋)

5) 航空レーザーデータ

貝沢流域においては、1 m² 当たり 1 点以上の点群密度の航空レーザーデータ（国土地理院より提供を受けた「平成 20 年度渡良瀬川流域及び鬼怒川流域航空レーザー計測業務」成果データ）の利用が可能であったことから、事業の初年度に当該データの解析により算出した立木密度を基に、疎密度区分（「密」、「中」、「疎」）の判定を行った。その後、点群密度が 1 m² 当たり 4 点以上のより高精細な航空レーザーデータ（神奈川県より提供を受けた「令和元年度航空レーザー測量及び山地災害重点地域全体計画策定業務委託」成果データ）を入手し、令和 3 年度に再び解析を行った。

3.4. 土地利用（林相区分）図の作成

3.4.1. 貝沢流域

林相区分図を作成するための 3 つの要素のうち、林分疎密度は、樹種や林齢と異なり、森林簿上に記録が無い等、情報を得ることが難しかったことから、検証用のモデル小流域である貝沢流域については、航空レーザーデータ解析により立木密度を推計し、神奈川県の出産比数判定表（スギ・ヒノキ）を基に本事業で作成したスギ、ヒノキ林分疎密度区分判定表（表 3-8、表 3-9）と照らし合わせ、疎密度区分を当てはめることとした。

判定表は、樹高と立木密度の情報から「1＝疎」、「2＝中」、「3＝密」が判定できるようにしたもので、ここで用いる樹高も航空レーザーデータより求めた。

表 3-8 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 3-9 ヒノキの林分疎密度区分判定表（1:疎、2:中、3:密）

立木密度 \ 樹高 (m)	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

なお、道志ダム流域及び三保ダム流域については、全域をカバーできる航空レーザーデータが入手できなかったことから、便宜的に山梨県及び神奈川県から提供を受けた森林簿の樹冠疎密度の値を参考に林分疎密度を割り当てた。しかしながら、道志ダム流域については一部、低密度ではあるものの航空レーザーデータの入手が可能であったことから、森林情報抽出における LiDAR データの活用性の検証を目的として、貝沢流域と同様、道志ダム流域の一部（現地調査を行った小班）についても、立木密度や樹高の推計及びその妥当性の確認を行った。詳細については「3.4.4 作成した林相区分図の妥当性の確認」で述べる。

(1) 手法

1) 低密度 LiDAR データ利用による林分密度推定（令和 2 年度実施）

使用した LiDAR データは、前述のとおり、国土地理院より提供を受けた「平成 20 年度渡良瀬川流域及び鬼怒川流域航空レーザ計測業務成果」によるデータである。

LiDAR データは 3 次元の点群データで構成されており、航空機などから発射されたレーザが地物に反射するまでの時間に基づき、対象物の位置情報を測量することができる。反射したレーザはその性質によって分類され、対象物の表面で反射したものは数値表層モデル（DSM; Digital Surface Model）、地表面に反射したものは数値地形モデル（DTM; Digital Terrain Model）の作成にそれぞれ用いられる（佐々木, 2012）。森林においては DSM と DTM の差分が樹冠の高さを表しており、数値樹冠高モデル（DCHM; Digital Canopy Height Model）として単木の抽出や樹高の推定に用いられている（図 3-18）。

例えば、ある林分における DTM（地表面の標高）が 1,500m、DSM（林冠表面の標高）が 1,520m であった場合、その林分の DCHM（樹冠の高さ）はそれらの差分（1,520m - 1,500m）の 20m と算定される。

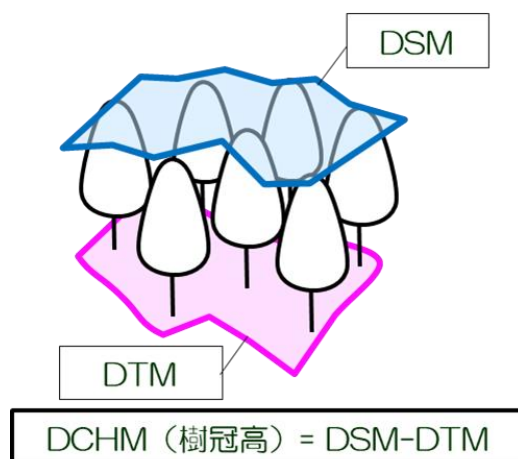


図 3-18 数値樹冠高モデル（DCHM）の算出イメージ

航空レーザより立木密度を求める手法は複数存在するが、本事業では、統計ソフト R の LiDAR データ解析用のスクリプトである「rLiDAR⁶」及びアメリカ合衆国農務省林野局（USDA Forest Service）によって開発され、無償で配布されている森林用 LiDAR データ処理ソフトウェア「FUSION/LDV（v3.70）⁷」を用いた解析を試みた（図 3-19）。

両手法に共通する、解析作業の大きな流れは以下のとおりである。

⁶ R Documentation, rLiDAR version v0.1.1,

<https://www.rdocumentation.org/packages/rLiDAR/versions/0.1.1>

⁷ FUSION, the latest version, <http://forsys.cfr.washington.edu/fusion/fusionlatest.html>

- ① LiDAR データを用いた数値樹冠高モデル(DCHM)の作成
- ② DCHM を用いた単木抽出
- ③ 抽出された単木による樹高・立木密度の計測

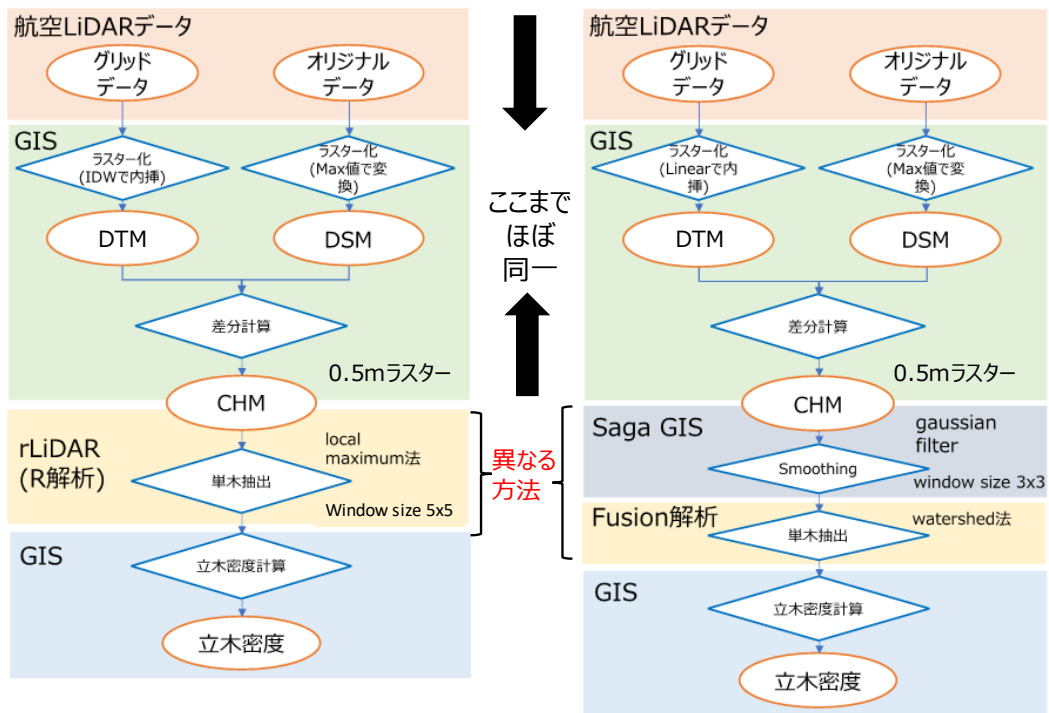


図 3-19 適用した 2 種類の航空レーザ解析手法

次に、解析手順の詳細を示す。

- ① 3次元点群データ (テキストファイル) を las 形式のファイルに変換
- ② DTM 及び DSM を作成
 - ArcGIS の Las dataset to Raster 機能を使用
- ③ DSM と DTM の差を算出
 - ArcGIS のラスタ演算機能を用いて、0.5m メッシュの DCHM ラスタを作成
- ④ DCHM のスムージング化
 - rLiDAR : Gaussian filter、Window size 5×5 でスクリプト処理。
 - FUSION : Saga GIS にて Gaussian filter 処理、Window size 3×3
- ⑤ DCHM ラスタより樹冠の抽出
 - rLiDAR : Local maximum 法
 - FUSION : Watershed 法

⑥ 作成した DCHM を元に単木の抽出

- rLiDAR : スクリプトによりアウトプットされる単木情報 (立木位置、樹高) を集計
- FUSION :
 - ArcGIS の Raster to ASCII 機能を用いて DCHM ラスターを ASCII 形式のテキストファイルに変換
 - コマンドプロンプトの cd 機能で FUSION/LDV ソフトの保存先を指定し、FUSION/LDV の ASCII2DTM 機能のコマンドラインを用いて DCHM を FUSION/LDV で読み込める形式 (DTM 形式) に変換
 - DTM 形式に変換した DCHM を入力ファイルとして、FUSION/LDV の TreeSeg 機能を用いて単木を抽出。
 - FUSION/LDV の TreeSeg 機能には Watershed 法と呼ばれる単木抽出アルゴリズムが搭載されており、任意の値より高い樹木を自動的に抽出することができる (今回は 5 m を閾値として設定)。

⑦ 抽出された単木ポイントデータ (shape 形式) を GIS 上で描画

⑧ 各小班内に含まれる単木ポイントデータ数から立木密度を算定

- 単木ポイントデータ数を各小班の面積 (ha) で除して LiDAR ベースの立木密度を算定

2) DCHM 標準偏差と実測立木密度の回帰式による林分密度推定 (令和 3 年度実施)

令和 2 年度において、貝沢流域内の立木の本数密度の推定は、LiDAR データの DCHM⁸ (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、令和 3 年度で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した。なお、令和 3 年度にて利用した LiDAR の点密度は、令和 2 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 か所の調査プロットを選定し、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る。この調査方法は、調査効率が良く、一定程度の精度の結果が得られることから採用したものである。

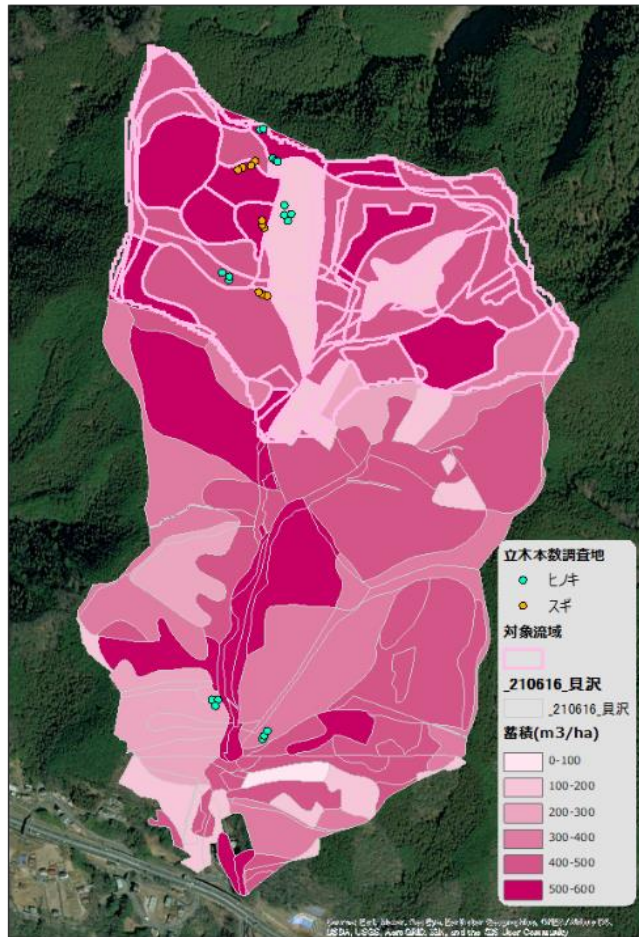
調査対象とする小班は、森林簿に記載されているヘクタール当たり林分蓄積のデータを

⁸ 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。

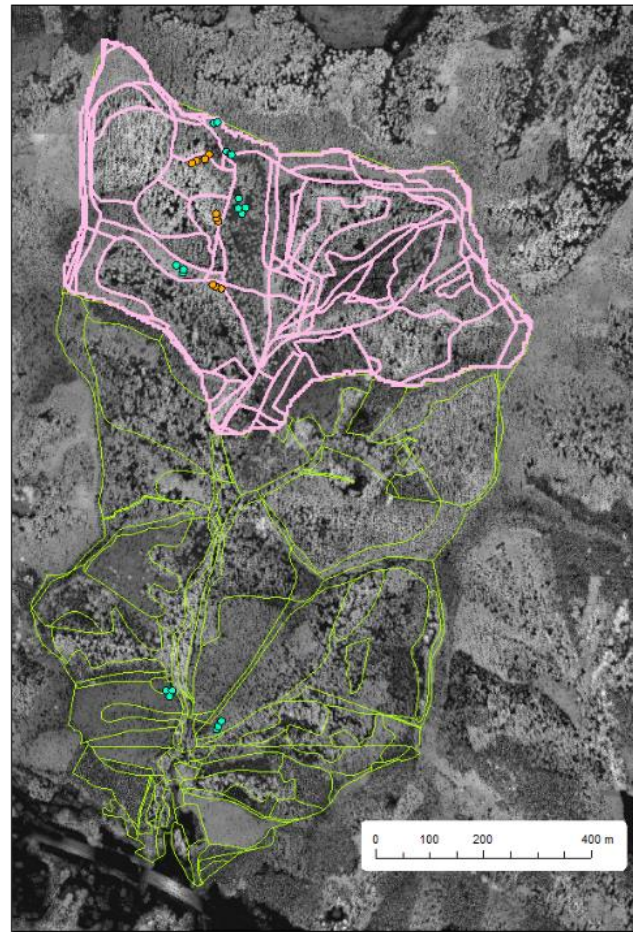
基に貝沢流域全体の小班を6区分（0～100、100～200、200～300、300～400、400～500、500～600m³/ha）に分類した後、スギ・ヒノキの樹種別に各区分から選定した。現地調査は6箇所を実施し、各箇所につき3地点で距離計測を行った。貝沢流域における現地調査結果を表3-10と図3-20に示す。

表 3-10 貝沢流域における現地立木本数調査の結果と
LP データより算出した DCHM（樹冠高）情報

樹種	現地調査による 本数	DCHM 最大値 (m)	DCHM 平均値 (m)	DCHM 標本標準偏差 (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	1031	27.4	13.8	7.7
ヒノキ	1179	30.9	13.9	8.2
ヒノキ	1755	21.3	9.3	5.5



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 3-20 本数調査地点と DCHM 分布図

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 3-21）

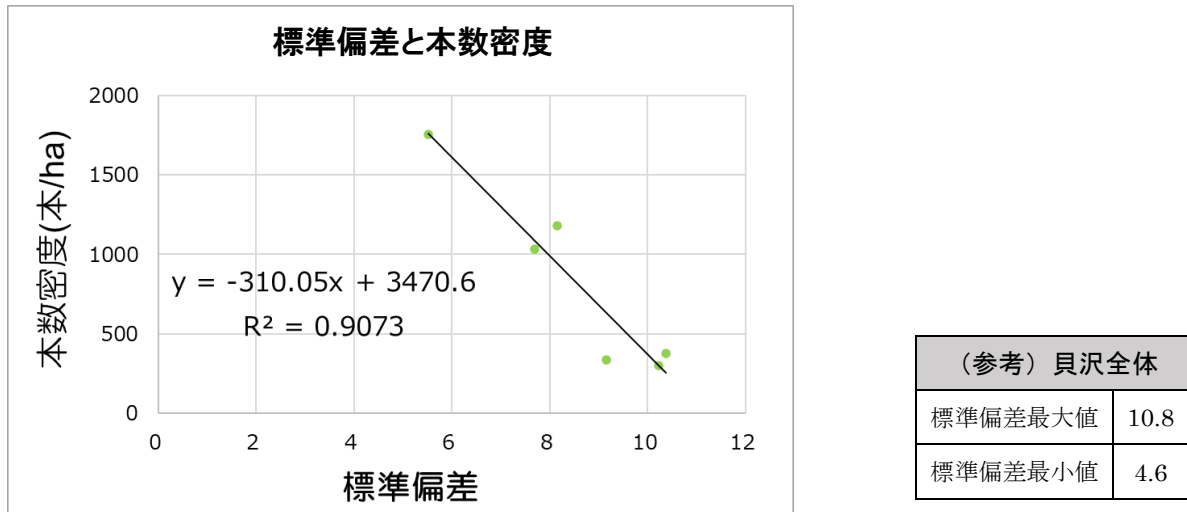


図 3-21 本数密度と調査対象小班の DCHM 標準偏差の関係

上記の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到達しやすいため 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 3-22）。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、上記のように回帰式を用いた。

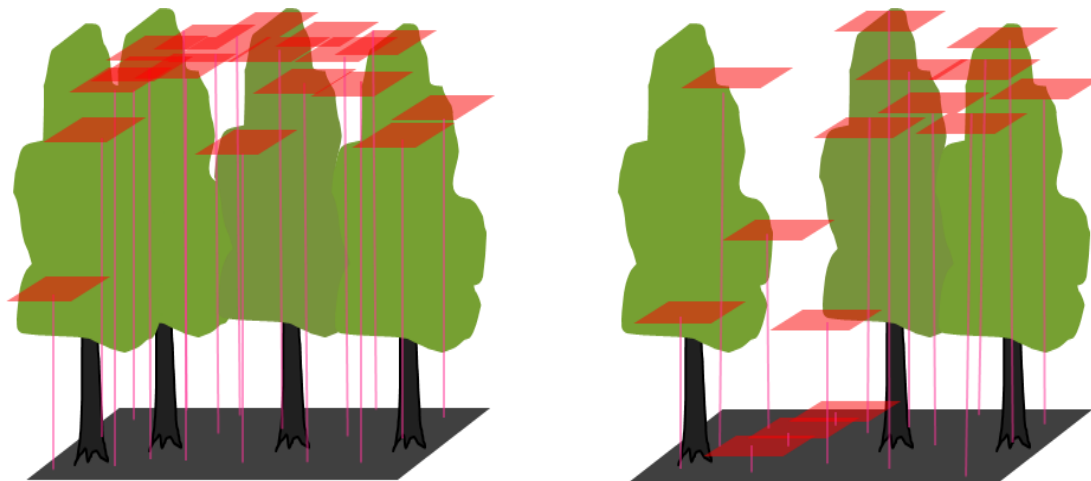


図 3-22 本数密度によるレーザ光反射位置の違いのイメージ

3) 高密度 LiDAR データを利用した林分密度推定（令和 3，4 年度実施）

使用した LiDAR データは、神奈川県より提供を受けた「令和元年度航空レーザ測量及び山地

災害重点地域全体計画策定業務委託」の成果データで、点群密度が 1 m^2 当たり 4 点以上の、より高精細な LiDAR データであり、解析方法は、基本的に前述の「1) 低密度 LiDAR データ利用による林分密度推定（令和 2 年度実施）」と同様とした。

なお、当該成果データには、航空レーザ測量成果を基にした、より高精細な林相（樹種）区分図が含まれていることから、これまで森林簿から取得していた樹種情報の取得先を航空レーザデータ由来の樹種区分図に置換え、樹種の空間分布も含めた林相区分図の精度向上を図った。

(2) 結果

1) 低密度 LiDAR データ解析による林分密度推定（令和 2 年度実施）

低密度 LiDAR データ解析により推計された、貝沢流域の立木密度マップを図 3-23 に示す。

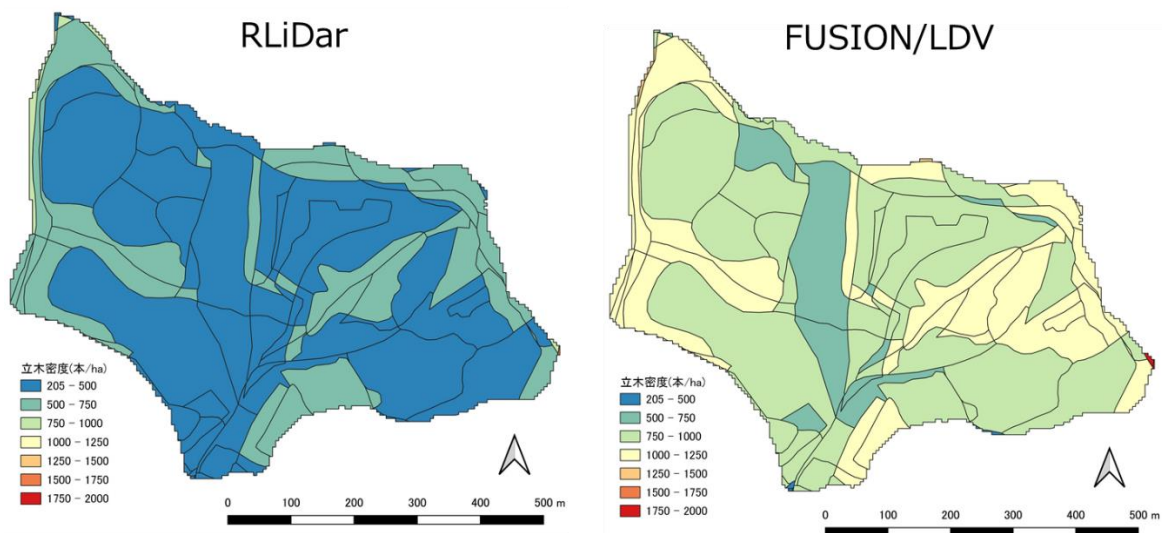


図 3-23 低密度 LiDAR 解析により推計された貝沢流域における小班別の立木密度分布図
(左：RLiDAR、右：FUSION/LDV)

二つの手法を用いた LiDAR データ解析による単木抽出の結果として、小班毎の立木密度に違いがみられた。

RLiDAR の小班別立木密度は、200～500 本/ha の分布が多く、全体的に過少推計の傾向であるのに対し、FUSION/LDV では、750～1,000 本/ha 程度の立木密度分布が多く、白木ら（2020）が示した流域全体の実測ベースの立木密度（710 本/ha）に近い結果ではあったものの、LiDAR による推計結果の方がやや大きい傾向を示した。

立木密度が適切に推計されない要因として、航空レーザデータ解析においては、円筒型の樹冠形状をしているヒノキの樹頂点が適切に抽出されないケースがあることや、Gaussian Filter やウィンドウサイズといった解析処理に用いるパラメータ値の設定が不適切であることが考えられる。今回用いた LiDAR データは、樹頂点解析を行うには解像度がやや低いこともあり、より高密度なデータを用いての再解析、検証が必要と考えられた。高密度データを用いた解析の詳細については、「(1) 3) 高密度 LiDAR データを利用した林分密度推定」にて後述

する。

2) DCHM 標準偏差と実測立木密度の回帰式による林分密度推定（令和3年度実施）

DCHM 標準偏差と実測立木密度の回帰式により、小班別に本数密度を推定した結果を図 3-24 に示す。

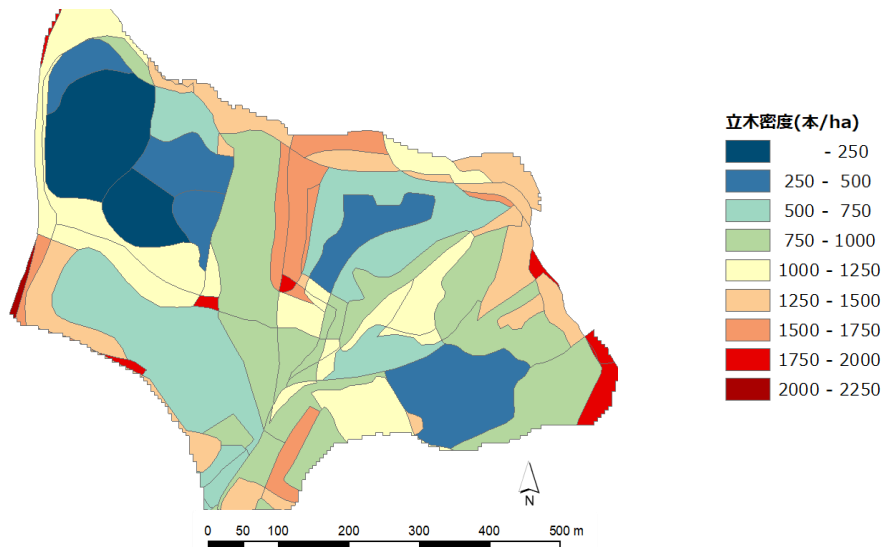


図 3-24 貝沢流域の小班別推定本数密度

また、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 3-25 に示す。なお、林相区分は表 3-11 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。

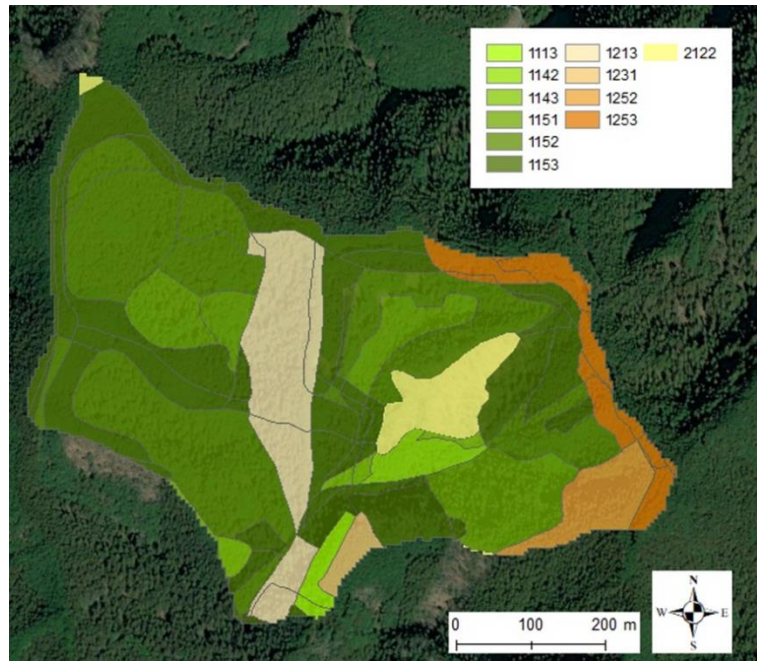


図 3-25 令和 3 年度調査で用いた貝沢流域の林相区分図

表 3-11 林相区分コード構成

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

【林相区分コードの算出例】

林相区分コード = 樹種コード + 林齢コード + 林分密度コード

例) 樹種 : スギ (1100) 林齢 : 10～20 年生 (10) 林分疎密度 : 密 (3)
林相区分コード : 1113

3) 高密度 LiDAR データを利用した林分密度推定（令和3，4年度実施）

高密度 LiDAR データ解析により推計された、貝沢流域の立木密度マップを図 3-26 に示す。

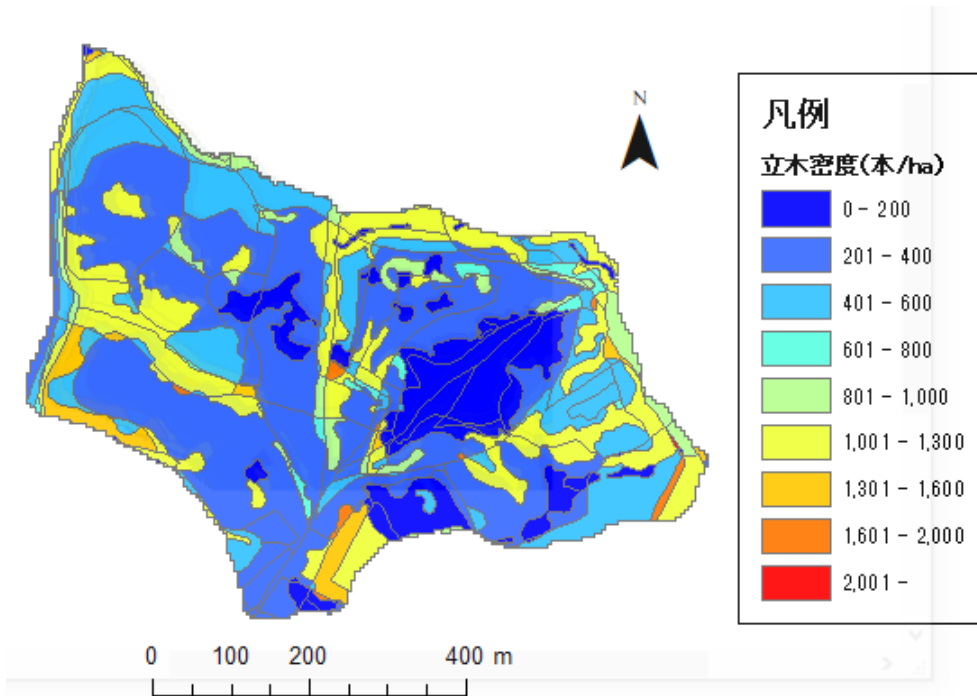


図 3-26 高密度 LiDAR 解析により推計された貝沢流域における小班別の立木密度分布図

(3) まとめ

上記のとおり、各年毎に異なる手法で LiDAR データ解析を行った結果、それぞれ、林小班毎の異なる立木密度が算出された。現地調査により取得した立木密度と比較した結果、「(2) 3) 高密度 LiDAR データを利用した林分密度推定」による方法が最も推計精度が高かったため、当該手法により作成した林相区分図を貝沢流域の林相区分インプットとして用いることとした。解析結果の精度検証の詳細については、「3.4.4 作成した林相区分図の妥当性の確認」に記載する。

3.4.2. 道志ダム流域

(1) 手法

1) 道志・現代モデル（令和2年度実施）

令和2年度に用いた道志ダム流域の現代林相区分図では、森林計画区外にあり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。該当箇所は森林簿での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、詳細化されていないことから、令和3年度において、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作業を行った。

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。判読前後を比較した一例を図3-27に示す。

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。

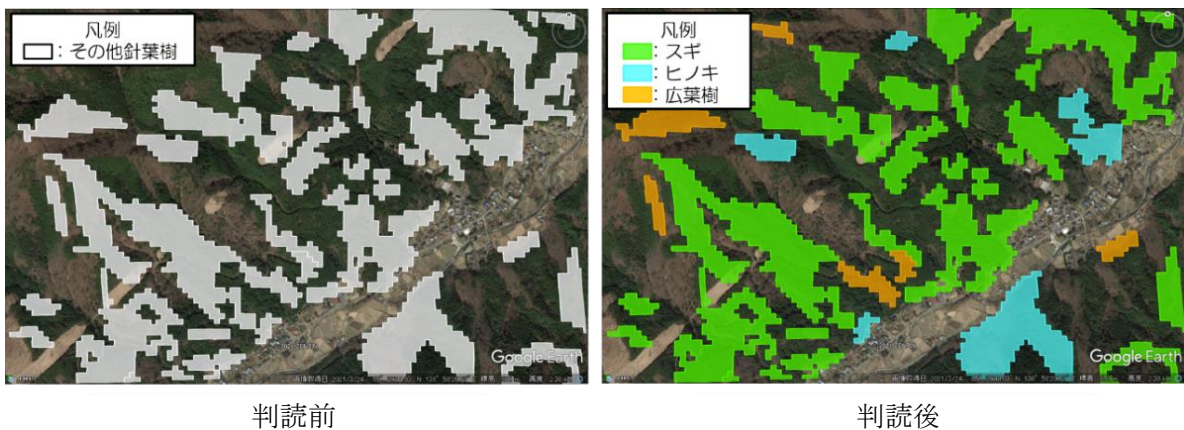


図3-27 「その他針葉樹」の判読前後の比較

2) 道志・過去モデル（令和2年度実施）

まず、モデルの時点（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3-12）。

表3-12 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、第2回環境省1/5万現存植生図（1981～1982年）の樹種や群落名等の情報を元に決定した。

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存在しないため、一律で「中」とした。

林齢については、まず、2016年時点で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、神奈川県の森林については、同県の地域森林計画書9に記載されている標準伐期齢（表 3-13）を、山梨県の森林については、山梨県森林簿10に記載されている標準伐期齢を用いた。

表 3-13 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

伐採され植栽による更新をした苗木については、慣例を踏まえて2年生の苗木を植栽したものと仮定した。さらに、伐採した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年に伐採し、植栽が行われたと想定して、過去林齢を11年生とした（図 3-28）。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。

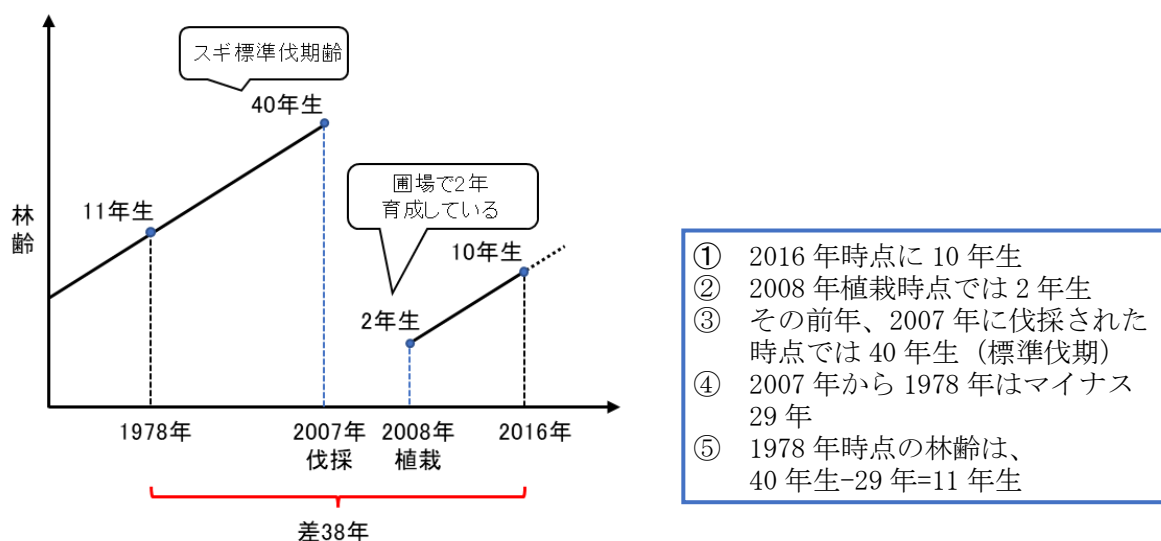


図 3-28 現代10年生のスギの場合の過去林齢計算イメージ

また、上記の例は、現在も過去もスギ（人工林）の例であるが、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ることから、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年生、人工林は針葉樹の最長の伐期齢の50年生を設定した。

⁹ 神奈川県地域森林計画書（神奈川県森林計画区）第1回変更平成31年4月 神奈川県（p.46）より

¹⁰ 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。

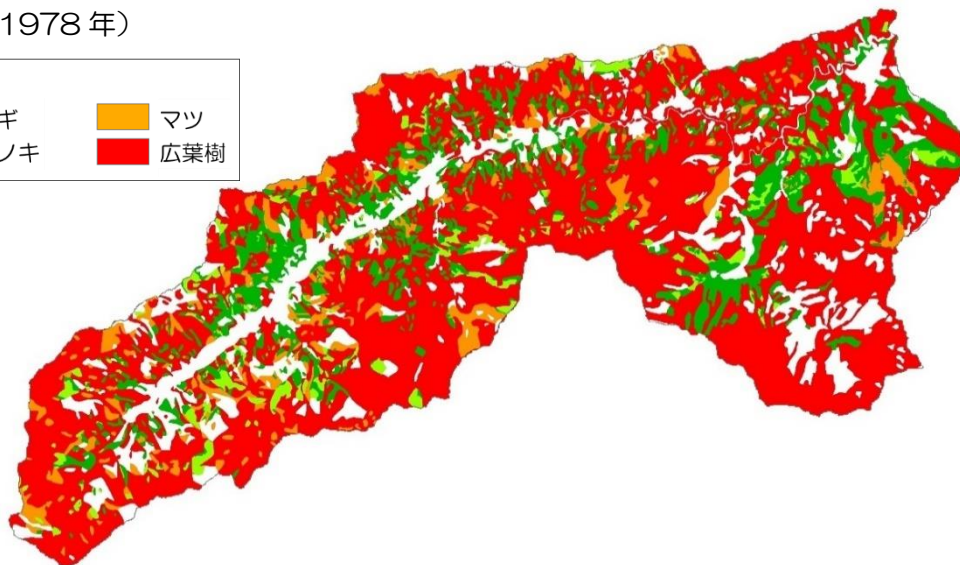
(2) 結果及び時点変化に関する分析及び考察

以上の方法から過去の林相区分図を作成した。過去と現代における樹種の分布を図 3-29 に、面積割合変化グラフを図 3-30 に、面積割合変化表を表 3-14 に示す。なお、過去の樹種分布については、実際にインプットデータとした林相コードではなく、簡略化のため、樹種の分布を示した。

過去と現代を比較すると、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。また、白抜きで示している「無立木地」や「草地」といった森林以外の土地被覆が森林に変化しており、過去から現代にかけて、森林率は増加している。

作成した林相区分図を令和 2 年度の道志モデルのインプットデータとして用いた。なお、後続作業である、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。

過去（1978 年）



現代（2010 年）

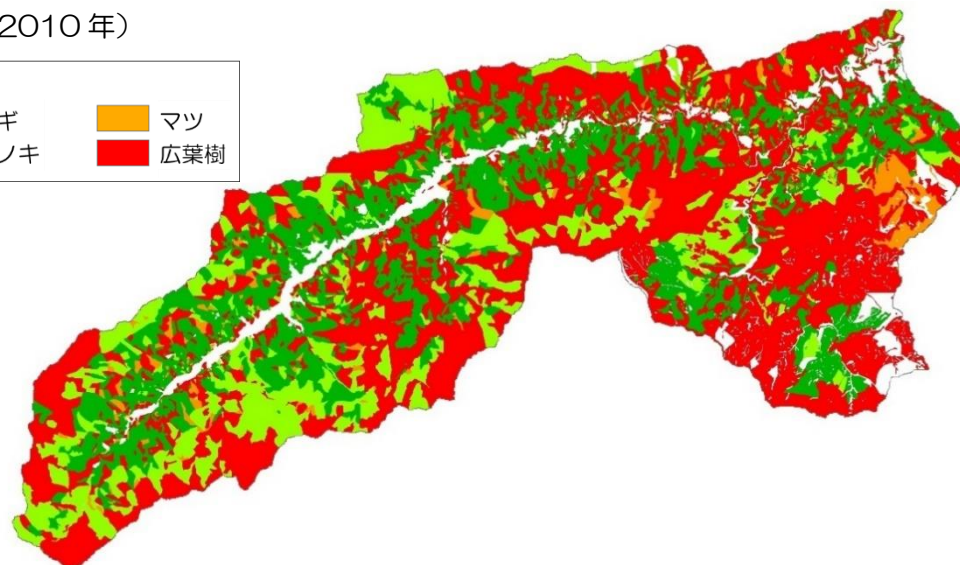
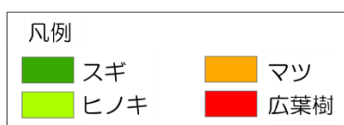


図 3-29 道志モデル流域の過去と現代の樹種分布図

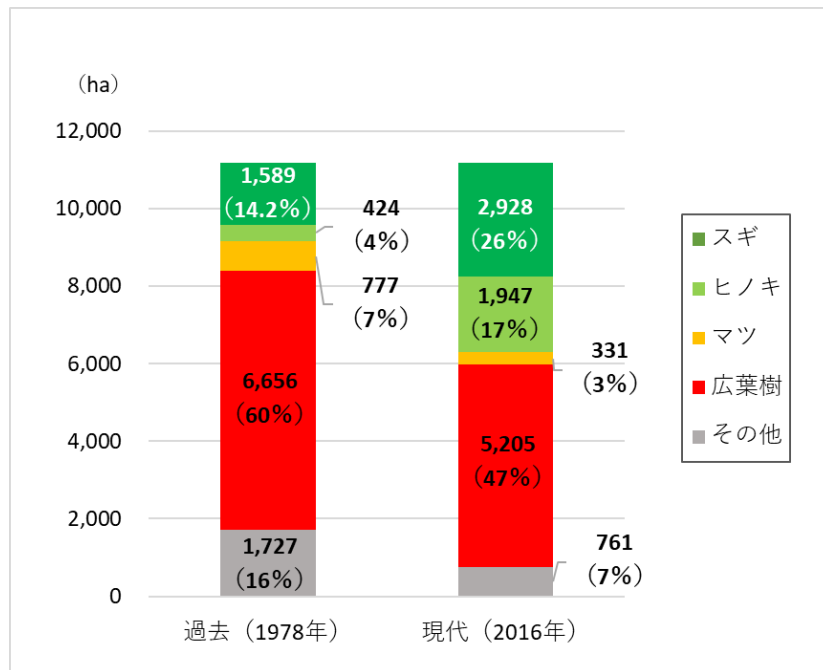


図 3-30 面積割合変化グラフ

表 3-14 過去・現代の土地被覆別面積割合 (%)

土地被覆	過去 (1978年)	現代 (2016年)
森林	84.5	93.2
スギ	14.2	26.2
ヒノキ	3.8	17.4
マツ	7.0	3.0
広葉樹	59.6	46.6
その他	15.5	6.8
総計	100	100

次に樹種別に現代と過去の林齢区分別面積と面積割合を図 3-31 から図 3-34 に示す。

本事業において、過去林相区分図の作成は林齢ではなく、過去の植生図を優先し作成した。そのため、森林簿により作成した現代林相区分図で人工林、過去の植生図では広葉樹の場合など、現代の林齢が必ずしも同じ樹種の過去の林齢に反映されているとは限らず、現代と過去の林齢分布を単純に比較することはできないことに留意する。

林齢区分別面積では現代を緑色で、過去を黄緑色で示している。道志ダム流域では、伐期齢での伐採を行っておらず、いずれの樹種についても森林が高齢級化していると考えられる。

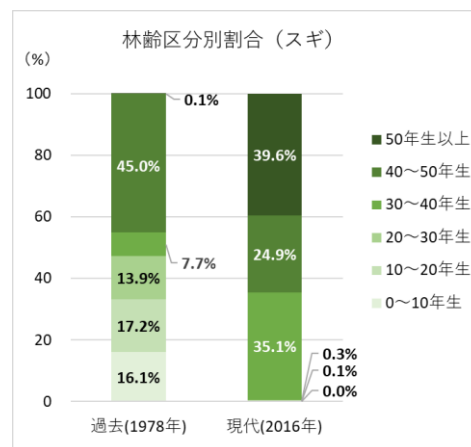
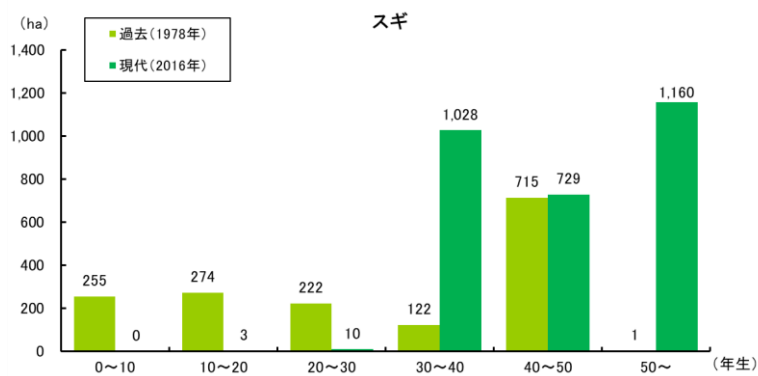


図 3-31 道志ダム流域の過去と現代の林齢構成割合変化と面積割合の比較 (スギ)

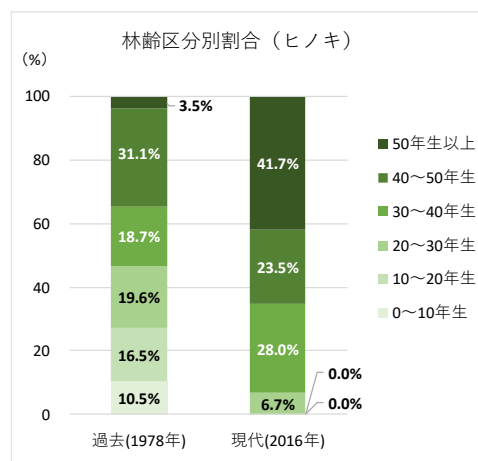
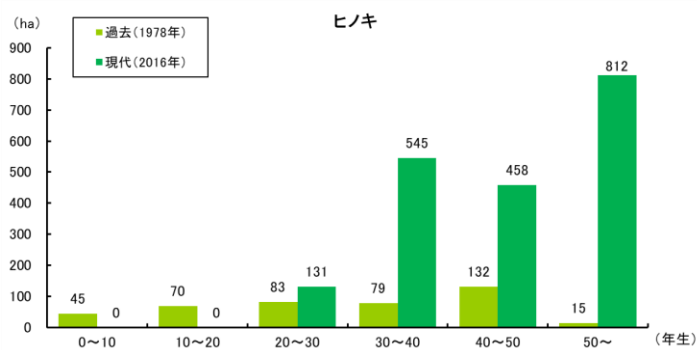


図 3-32 道志ダム流域の過去と現代の林齢構成割合変化と面積割合の比較 (ヒノキ)

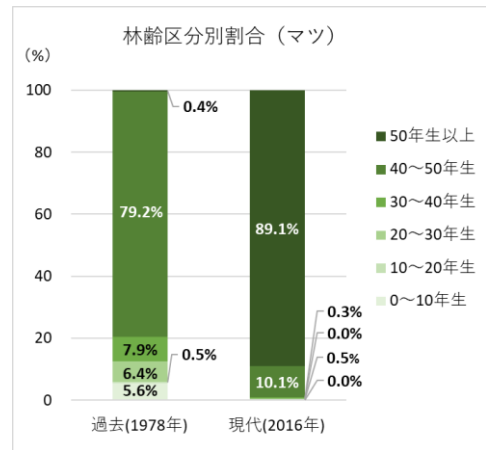
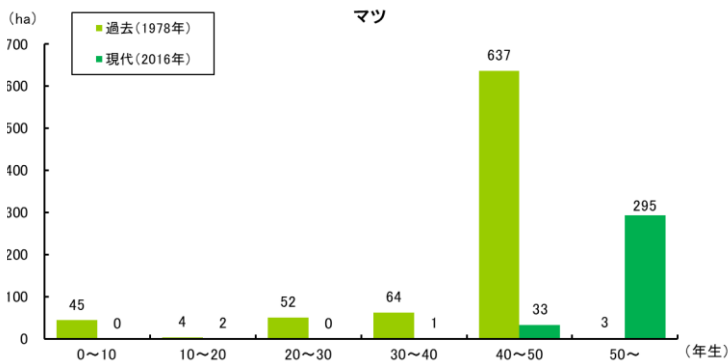


図 3-33 道志ダム流域の過去と現代の林齢構成割合変化と面積割合の比較 (マツ)

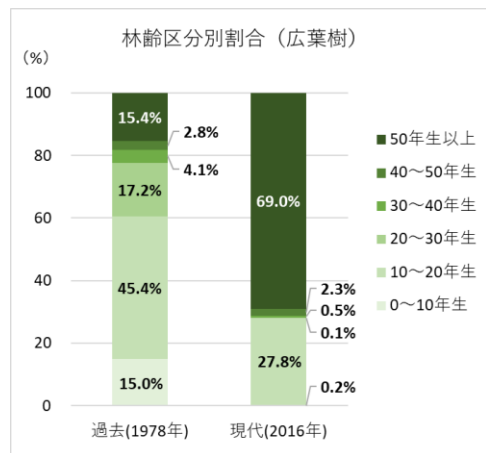
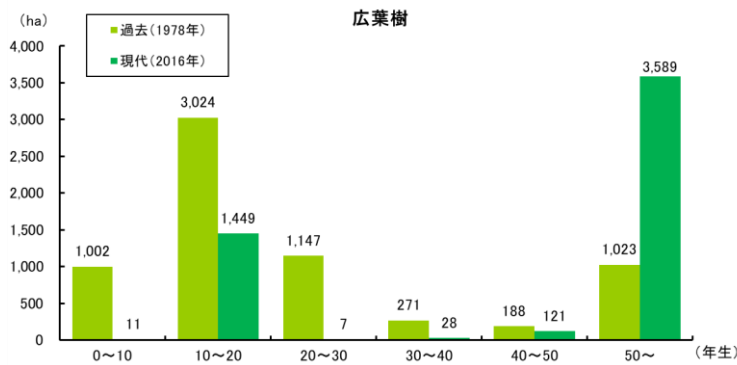


図 3-34 道志ダム流域の過去と現代の林齢構成割合変化と面積割合の比較 (広葉樹)

3.4.3. 三保ダム流域

(1) 手法

1) 三保・現代モデル

令和3年度において、道志ダム現代林相区分図の作成方法と同様の手法で、環境省植生図を補完しながら森林簿の情報を基に、三保ダム現代林相区分図を作成した。

なお、三保ダム流域の範囲は神奈川県内のみであり、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ことから、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基に推定した。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、道志ダム現代林相区分図と同様に、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) 三保・過去モデル

① 崩壊地の判読（三保・過去モデルインプットデータの作成）（令和2年度実施）

令和3年度では過去林相区分図を作成するに当たり、三保ダム流域の分析のため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 3-35）の提供を受けた。データの内訳は、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15,300個作成されているが、崩壊発生の時期についてのデータはなく、さらに、三保ダム流域北西部の国有林部分のデータも含まれていなかった。

このため、本データを基に過去の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、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るとともに、崩壊地の抽出には一定の時間を要することから、令和3年度ではデータの整備にとどめた。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。

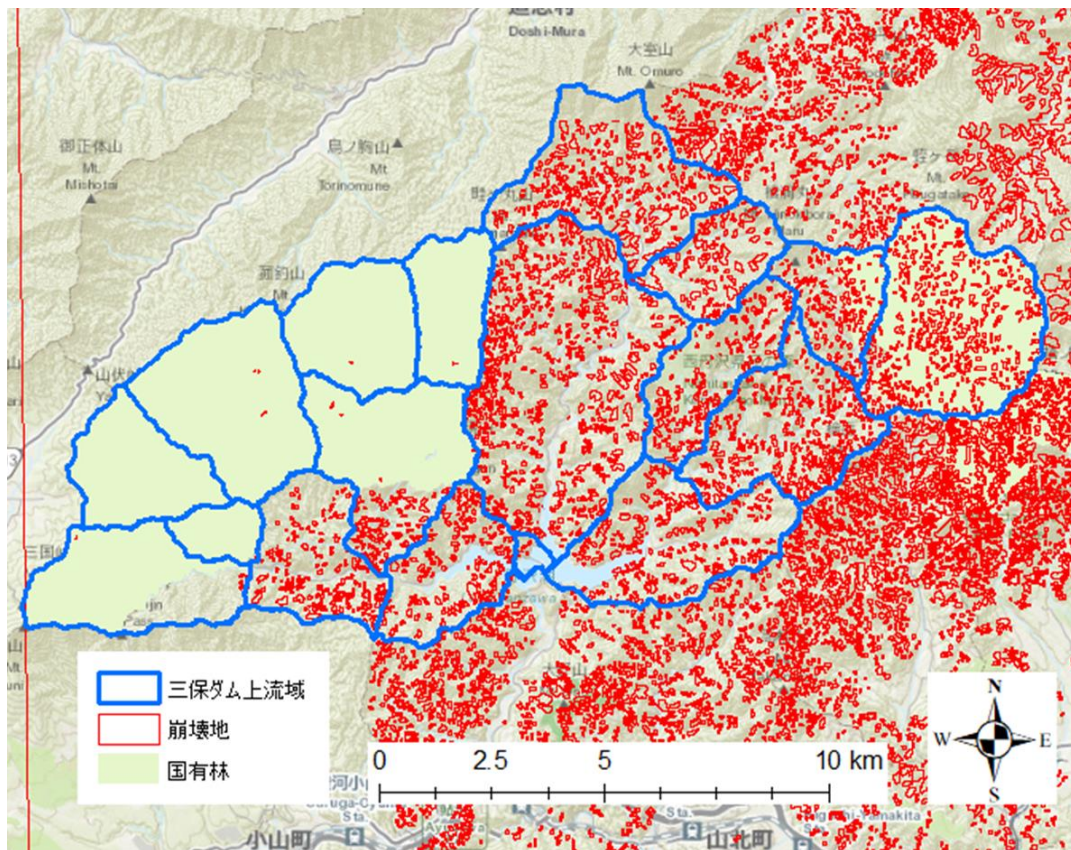


図 3-35 既往の三保ダム流域崩壊地データ

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）の空中写真が利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いことや、空中写真の撮影時期が秋季・冬季であるために、山影となった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（図 3-36）、これを簡易幾何補正を行うことにより判読の補助情報として利用した（図 3-37）。

作業に当たっては、流域を 195 のメッシュ単位で区画し（図 3-38）、おおむね 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 3-15）。

表 3-15 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

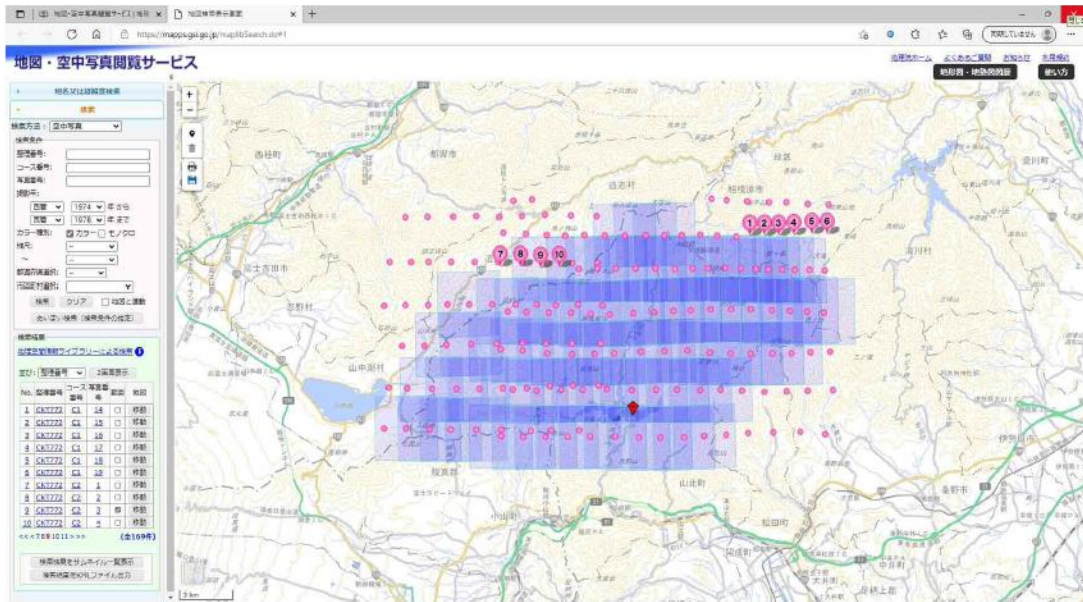


図 3-36 空中写真の入手範囲（日本地図センターのサイトより）

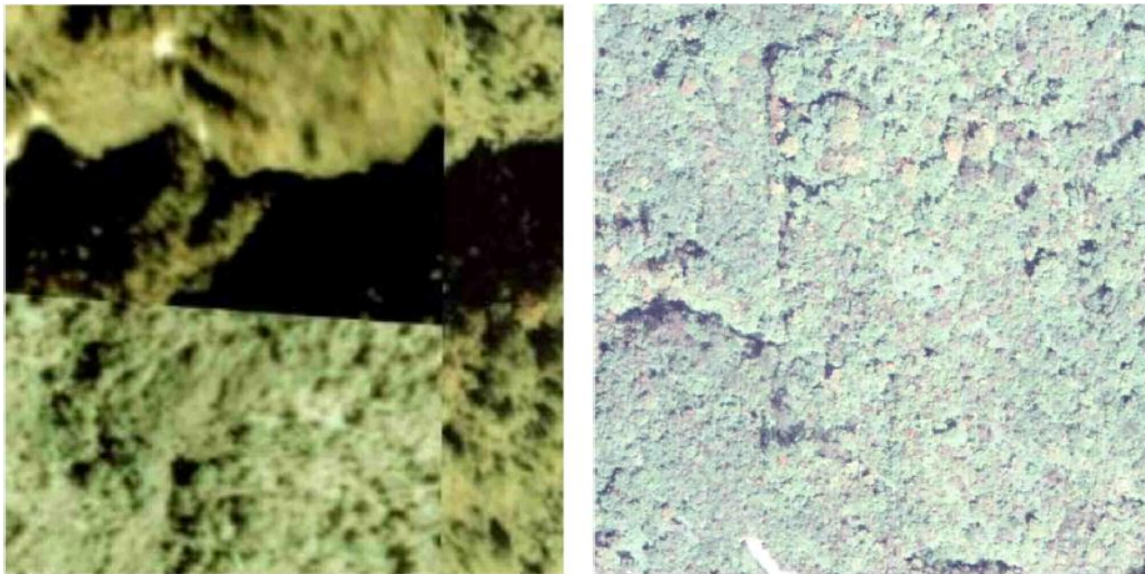


図 3-37 簡易オルソ画像（左）と空中写真（右）の精度の比較（同一縮尺）

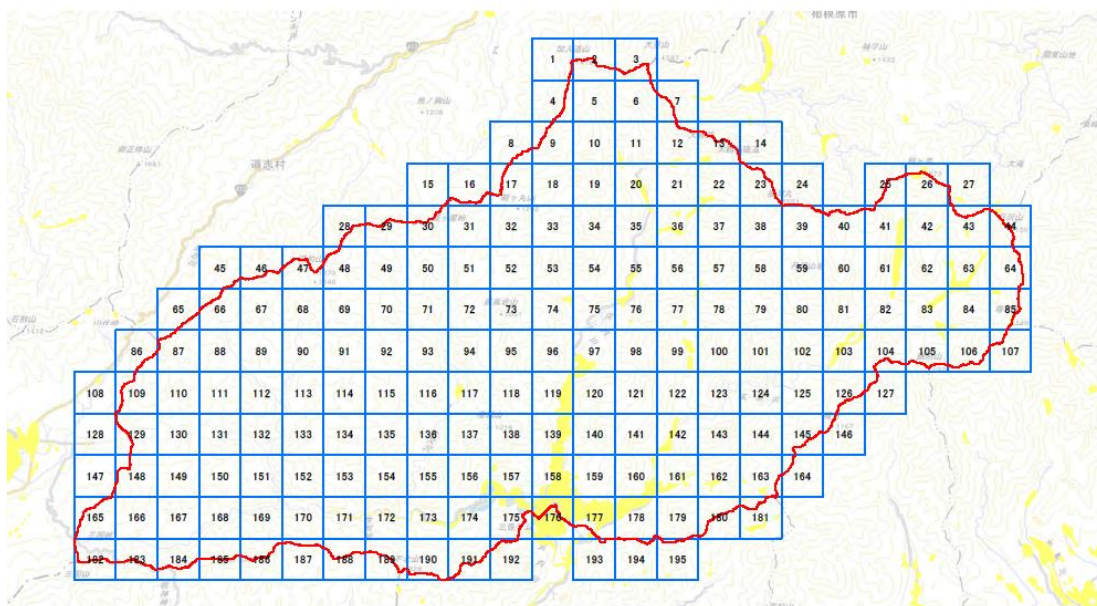
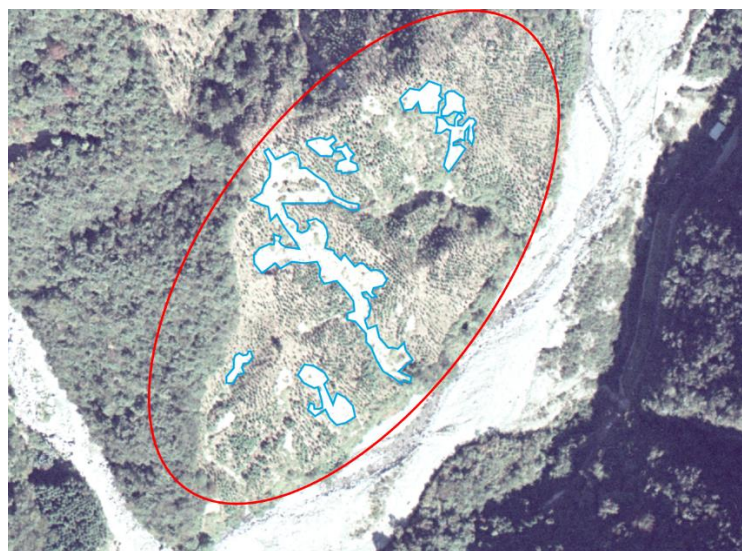


図 3-38 判読作業の区画

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。

判読の一例を図 3-39 に示す。



判読例

- 植生以外の土地被覆
- 新規植林

図 3-39 判読例

抽出結果は図 3-40 に示すとおりである。三保ダム流域 15,642ha（国土数値情報 流域界ポリゴンより集計）中、崩壊地と判定されたのは 1,975 箇所、150.29ha であった。1 か所当たりの平均面積は 770m²、流域に占める割合は 1.0% であった。崩壊地は流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みられ、その多くは、新植の造林地や林道の下斜面等であった。

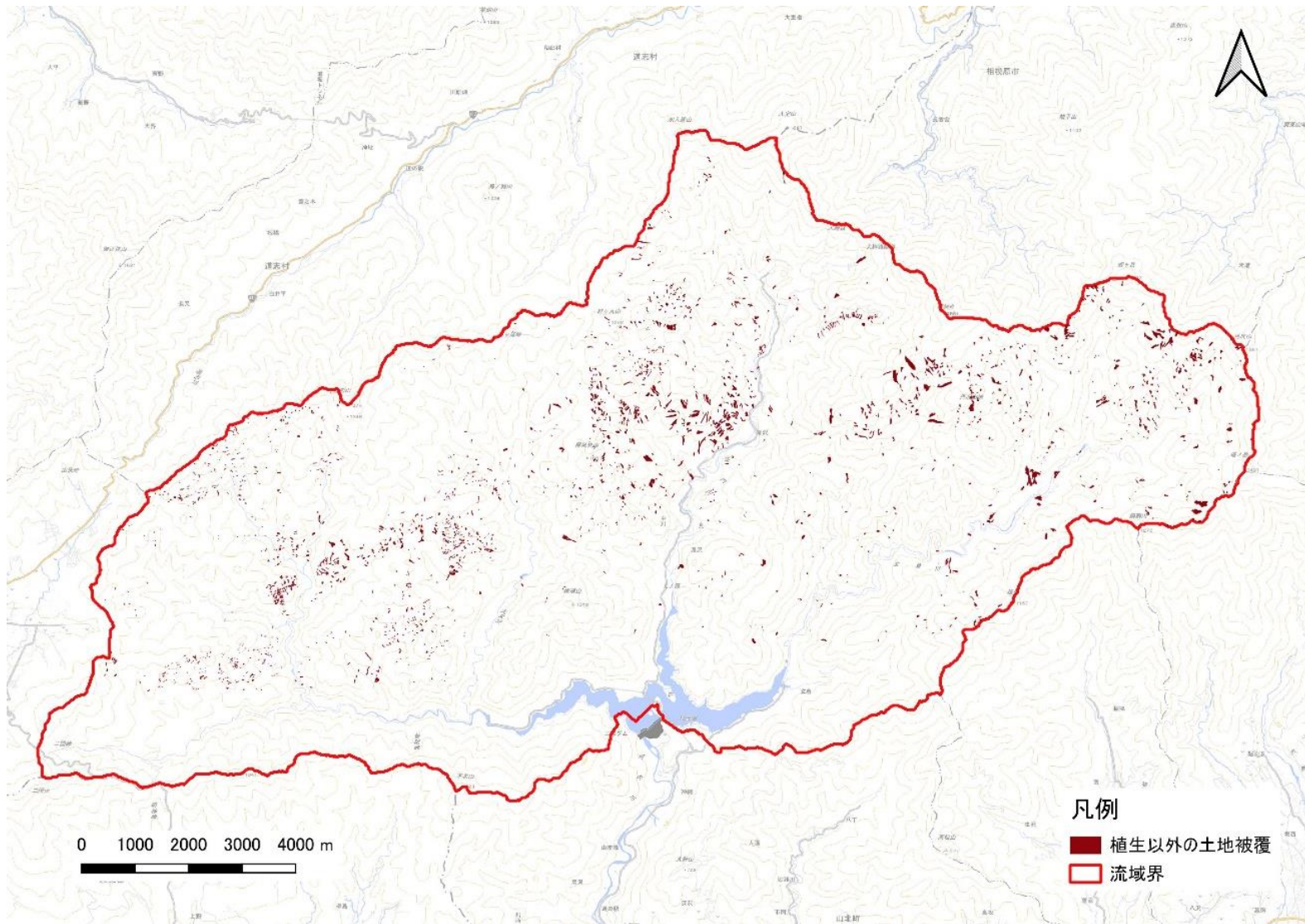


図 3-40 判読結果

② 過去モデルの林相区分における算出林齢の妥当性確認

令和3年度において、道志ダム過去林相区分図を作成した際には、過去の林齢情報を伐期齢に基づき算出していたが、実態の情報が不足しており、妥当性の確認が不十分であった。このことから、三保ダム過去の林相区分図作成する前に、伐期齢を適用する林齢算出方法が妥当であるか、道志ダム・三保ダム流域の森林利用の経緯などについて、森林事業体へのヒアリングを実施した。ヒアリング日程及びヒアリング対象機関を表 3-16 に示す。

表 3-16 伐期齢ヒアリング

日程	2022年8月25日(木)
ヒアリング対象機関	神奈川県森林組合連合会
	神奈川県自然環境保全センター

ヒアリングでは、道志ダム・三保ダム流域は、元々薪炭利用のための入会林野が存在し、前生樹種は広葉樹中心であった。昭和50年代には一部、林業公社によりヒノキの造林が進んだとのことであった。具体的な伐期に関する情報は得られなかったが、長伐期あるいは短伐期といった特徴的な施業は行わず、一般的な施業が行われてきたとの回答があったことから、神奈川県が採用している標準伐期齢を適用しても実際の伐期と大きな開きはないものと考え、過去の林齢算出においては標準伐期齢を適用することは妥当と判断した。

③ 過去林相区分図の作成

以上のことを踏まえ、令和3年度にて空中写真判読により抽出した丹沢エリアにおける、1980年前後の崩壊地結果を三保現代林相区分図に反映させ、今年度三保過去林相区分図を作成することとした。

まずモデルの時点（過去の林相区分図の時点（基準年））は、道志モデルと同様、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 3-17）。

表 3-17 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	バリデーション	基準年
三保ダム	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。決定方法は、道志ダム過去林相区分図と同様の方法で作成した。

林齢については、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、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ることにした。標準伐期齢を適用するにあたり、前述したとおり、神奈川県の森林事業体へのヒアリング結果を踏まえ、過去の林齢算出に標準伐期齢を適用した。標

準伐期齢は、神奈川県地域森林計画書に記載されている標準伐期齢（表 3-13）を用いた。また、国有林における標準伐期齢については、神奈川県国有林の地域別の森林計画書（神奈川県森林計画区）¹¹を参照した結果、神奈川県地域森林計画書と同様の標準伐期齢であったことから、国有林についても同様に神奈川県地域森林計画書記載の標準伐期齢を適用することとした。

3) 三保ダム流域における崩壊地面積の妥当性の確認

現在森林簿から抽出した崩壊地面積（現代林相区分図）と写真判読による過去の崩壊地面積（過去林相区分図）を比較したところ、図 3-41 に示すとおり、現代の崩壊地面積は過去より大きい結果となった。このことにより、三保モデルの目的である、荒廃森林の復旧が水源涵養機能に与える影響を推計するというシナリオに反する結果となったことから、現代林相区分図の見直しが必要となった。

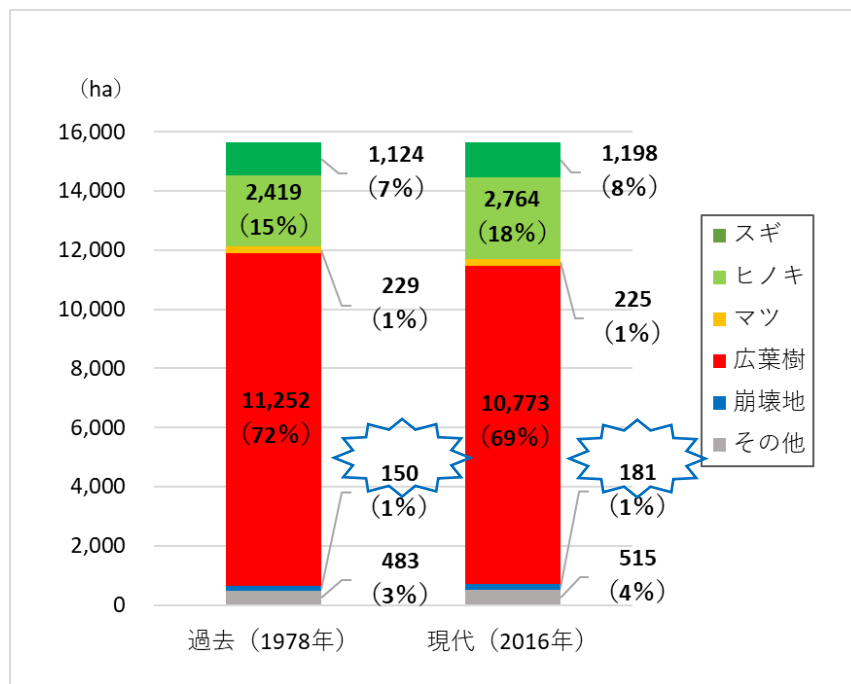


図 3-41 過去と現在の林相区分別面積の比較

まず、現代の崩壊地ポリゴンに現在空中写真（Google Map）を重ね合わせ、実際に崩壊地となっているのかを確認した。図 3-42 に示すとおり、森林簿の情報では崩壊地とされている箇所があり、照査したところ明らかに森林とみなされる場所となっていることが確認された。

¹¹ 神奈川県国有林の地域別の森林計画書（神奈川県森林計画区）関東森林管理局（p.15）より





	空中写真_1974～1978年	現在空中写真 (Google Map)
事例①		
	崩壊跡に植栽	森林が成立
事例②		
	ポリゴンに対応した崩壊地が確認できる	ポリゴン内に低木、灌木が確認でき、徐々に森林が回復している

図 3-42 現代崩壊地の妥当性の確認

原因としては、森林簿の情報では過去に崩壊地とされた箇所が、森林が復旧しても森林簿が更新されずに崩壊地のままになっていた可能性が考えられ、森林簿の崩壊地情報はモデルのインプットデータとして利用することはできないと判断した。このことから現代の林相区分図を再作成することとした。

まず、森林簿の崩壊地情報に代替する情報として、2010年神奈川県作製の空中写真判読による土地被覆分布図（以下「2010年土地被覆分布図」）を用いることを検討した。

2010年土地被覆分布図と現在空中写真（Google Map）を重ね合わせたところ、図 3-43 に示すとおり、現在も確認できる主要な崩壊地はおおむね網羅されており、崩壊地に関する情報は妥当であると考えられた。このことにより 2010年土地被覆分布図を用いて現代の崩壊地箇所を更新することとした。

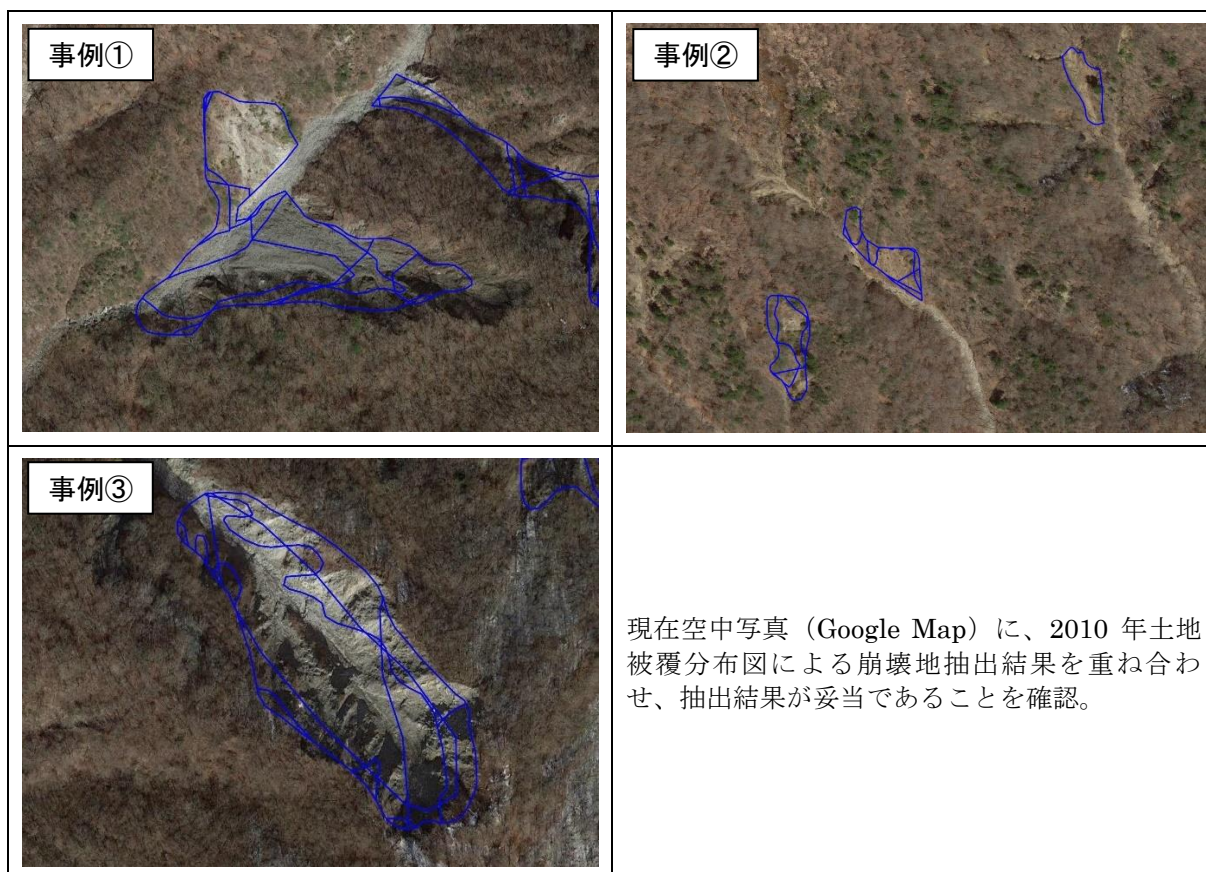


図 3-43 2010 年土地被覆分布図の妥当性の確認

一方、現在は森林に復旧しているのにも関わらず、森林簿上は崩壊地となっている箇所については、何らかの方法で樹種と林齢、林分密度の情報を与える必要があり、次のように設定を行った。樹種について、森林簿で崩壊地であるが 2010 年土地被覆分布図で森林であった場合は、2010 年土地被覆分布図の樹種を当てはめた。次に林齢については、崩壊後に成熟林に回復したとみなし、デフォルト値（スギ、ヒノキ、マツ林 50 年、広葉樹林 20 年）を当てはめた。林分疎密度（疎・中・密）については一律「中」とした。

また、過去林相区分図は現代の林相区分図を用いて作成しているため、過去林相区分図についても再作成を行った。

以上の検証や再設定を行い、図 3-44 に示す手順で三保モデル林相区分図の再作成を行った。令和 3 年度に使用したデータに新たに 2010 年土地被覆分布図を用いて、森林簿の崩壊地箇所について補完し、現代林相コードの更新を行った。再度、過去の林相区分図を作成した。

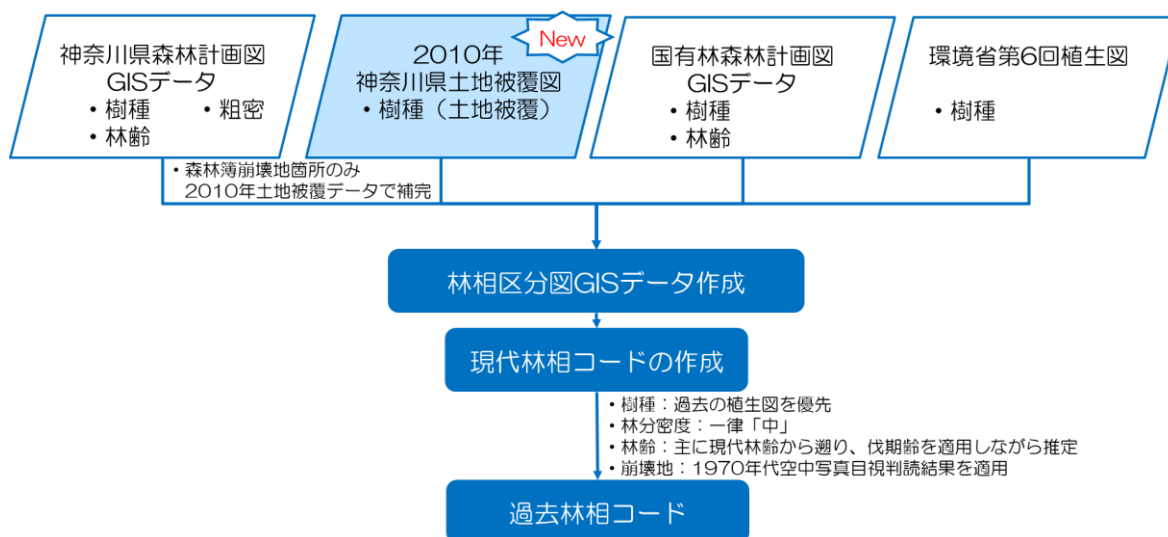


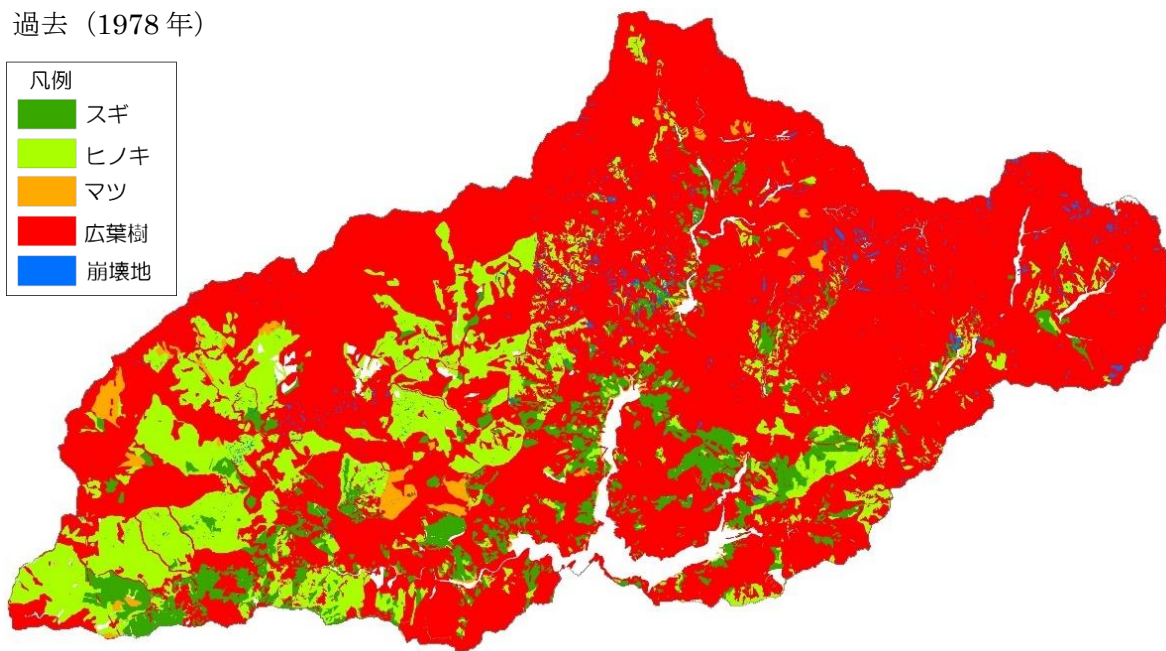
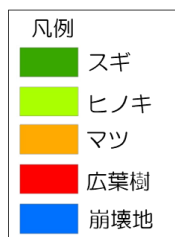
図 3-44 三保ダム林相区分図再作成のながれ

(2) 結果及び時点変化に関する分析及び考察

過去と現代における樹種の分布を図 3-45 に、面積割合変化グラフを図 3-46 に、面積割合変化表を表 3-18 示す。

面積割合に大きな違いはみられず、森林率も過去と現代でほぼ同等であるが、現代では広葉樹が減少し、さらに、崩壊地の見直しにより崩壊地も大きく減少し、過去で点在していた崩壊地が森林に回復したという結果となった。現代の崩壊地面積は過去の崩壊地面積の3割程度となった。この林相区分図を本年度の SWAT 解析に用いることとし、今後のパラメータ調整を効率化する観点から、面積割合が全体の1%と小さいマツについてはスギに統合し、最終的な林相区分図とした。

過去 (1978年)



現代 (2010年)

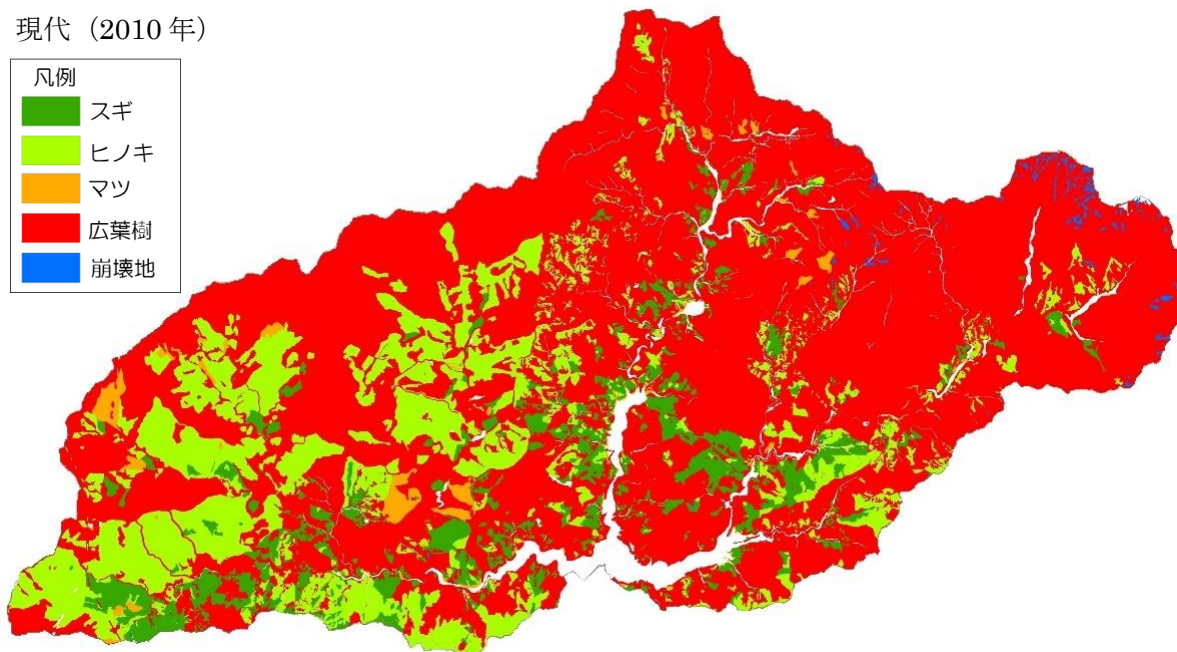
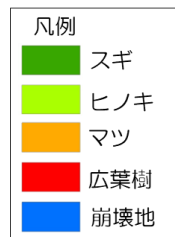


図 3-45 三保モデル流域の過去と現代の樹種分布図

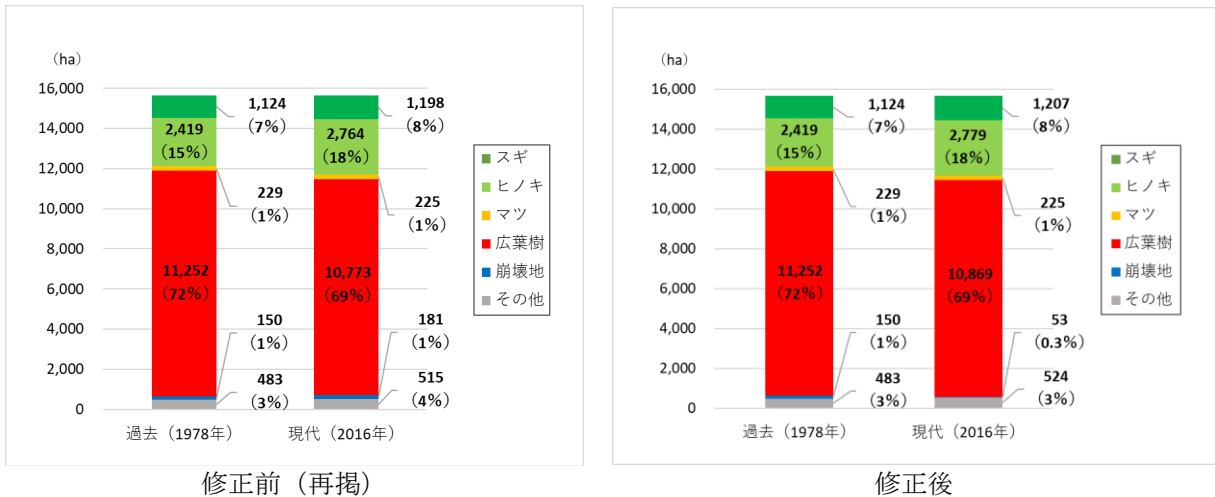


図 3-46 面積割合変化グラフ

表 3-18 修正後の過去・現代の土地被覆別面積割合 (%)

土地被覆	過去 (1978年)	現代 (2016年)
森林	96.0	96.3
スギ	7.2	7.7
ヒノキ	15.5	17.7
マツ	1.5	1.4
広葉樹	71.9	69.4
崩壊地	1.0	0.3
その他	3.1	3.3
総計	100	100

次に、樹種別に現代と過去の林齢区分別面積と面積割合を図 3-47 から図 3-50 に示す。

林齢区分別面積では現代を緑色で、過去を黄緑色で示している。

ヒノキの現代については、30年生以上の樹木が林分の大半を占めていることが分かる。さらにヒノキの現代については、伐期齢についてのヒアリングの際に、昭和50年代に林業公社によるヒノキを造林したとの話もあり、過去の面積割合が10~20年生前後に集中していることは妥当だと考えられる。三保モデル流域では、伐期齢での伐採が進まず、いずれの樹種についても森林が高齢級化していると考えられる。

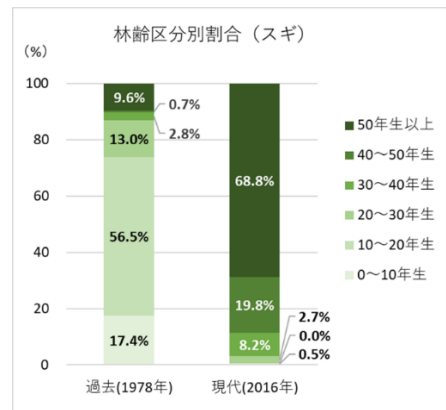
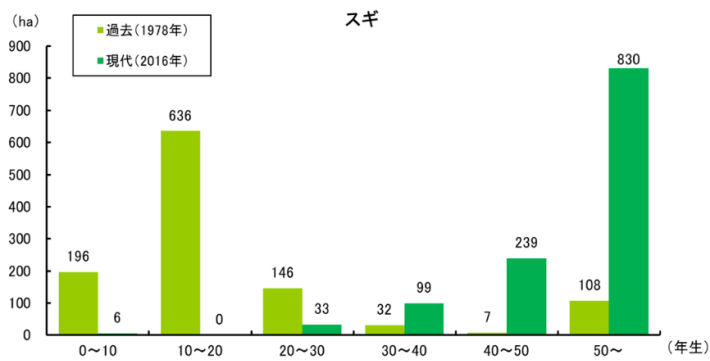


図 3-47 三保ダム流域の過去と現代の林齢区別面積と面積割合の比較 (スギ)

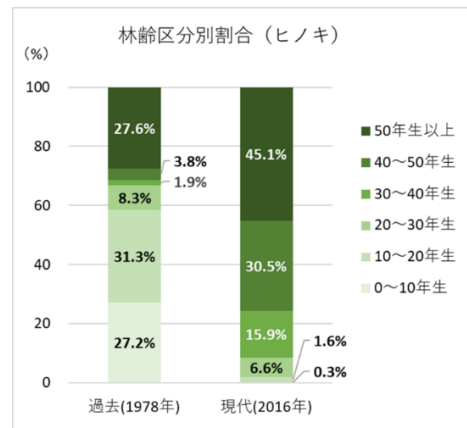
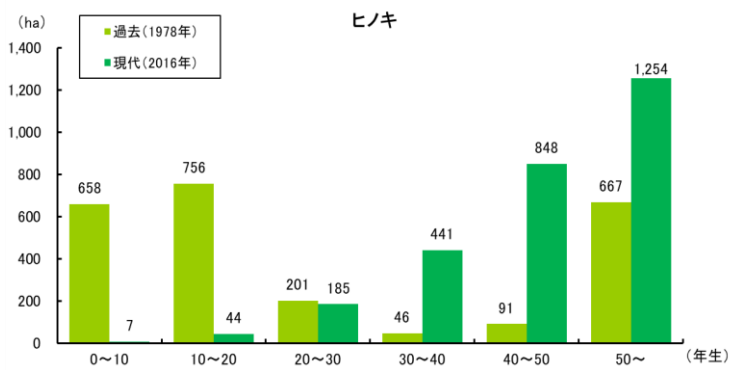


図 3-48 三保ダム流域の過去と現代の林齢区別面積と面積割合の比較 (ヒノキ)

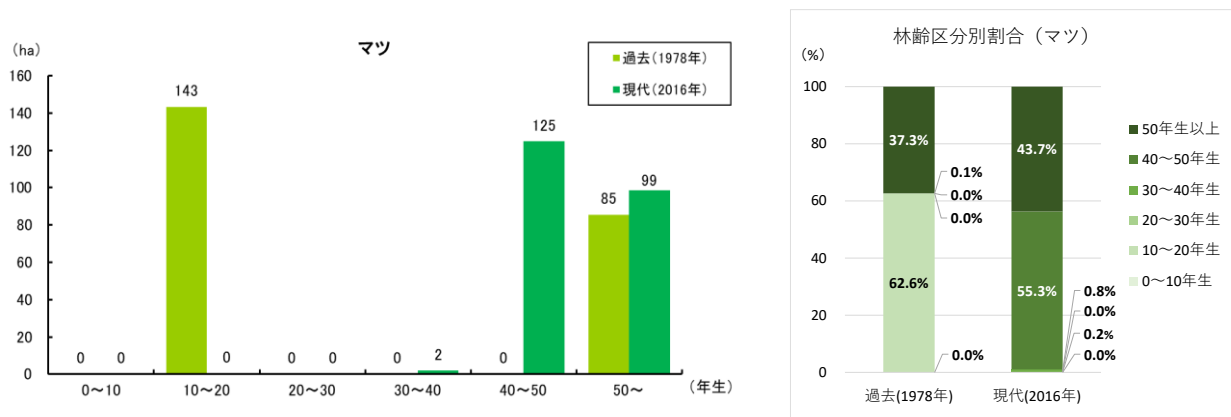


図 3-49 三保ダム流域の現代と過去の林齢区分別面積と面積割合の比較（マツ）

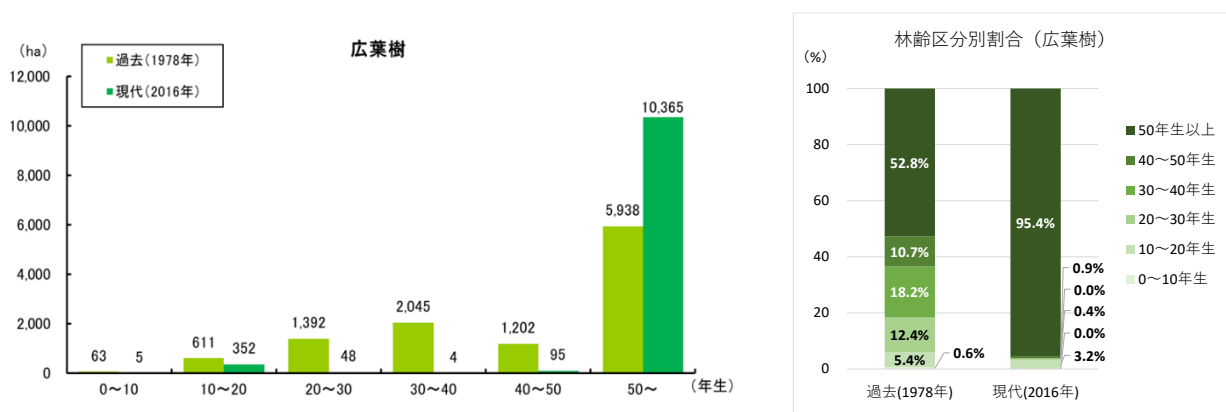


図 3-50 三保ダム流域の現代と過去の林齢区分別面積と面積割合の比較（広葉樹）

3.4.4. 作成した林相区分図の妥当性の確認

(1) 検証方法

作成した林相区分図の妥当性についての確認は、林相区分を構成する要素の一つである林分疎密度が適切に区分されているかどうかの観点から行った。林分疎密度は、貝沢流域においては航空レーザデータ解析により算出した立木密度、道志ダム流域や三保ダム流域においては森林簿の樹冠疎密度の情報を基に、「疎」、「中」、「密」の判定を行っている。これらの判定された疎密度の精度の検証は、現地調査により得られた実測の立木密度と照らし合わせるにより行った。

1) 現地における林相調査の方法（令和3年度実施）

現地調査は、貝沢流域及び道志ダム流域を対象として行った。調査内容は、今後の森林状態と、水の動態を統一的に評価することや指標設定の検討に資するよう、妥当性が得られるために必要な情報以外の森林情報についても、参考データとして収集した。

また、「3.4.1. (1) 手法」で述べたとおり、貝沢流域については、LiDAR データ解析による立木密度算出を試みてきた経緯があることや、検討委員会においても、樹頂点抽出により立木本数（立木位置）を推計する従来の方法について引き続き検証を行うことが望ましいとの意見が出されたことから、LiDAR による解析結果を踏まえた現地調査を計画した。

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 サンプルについて現地での標準地調査を行い、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 3-51 のとおりである。

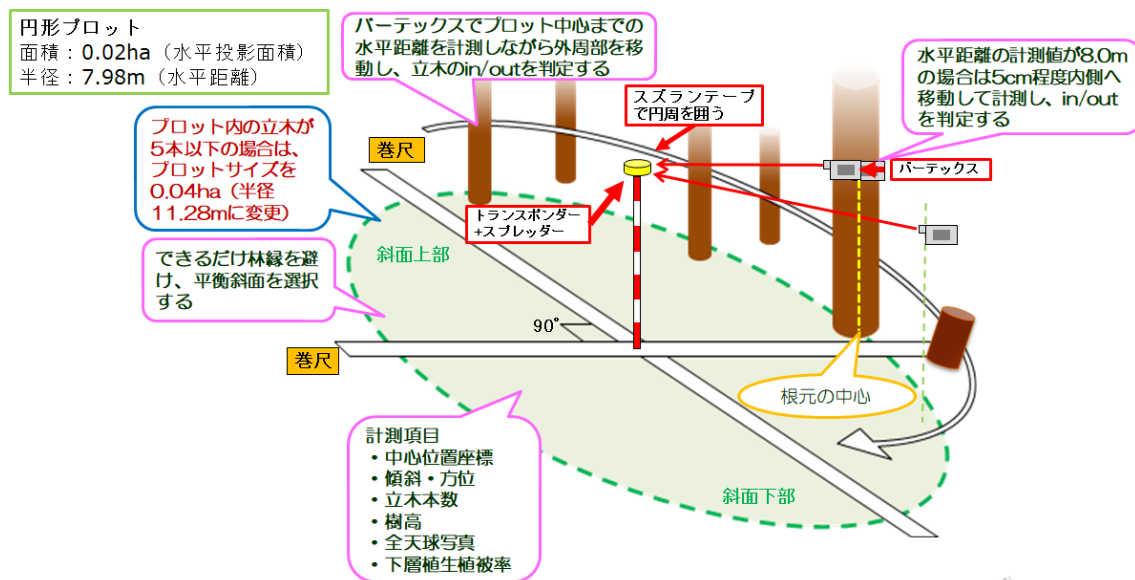


図 3-51 林相調査プロット（標準地）の設定方法

プロットは、貝沢で 7 か所、道志で 10 か所の計 17 か所を設定した（図 3-52、図 3-53）。

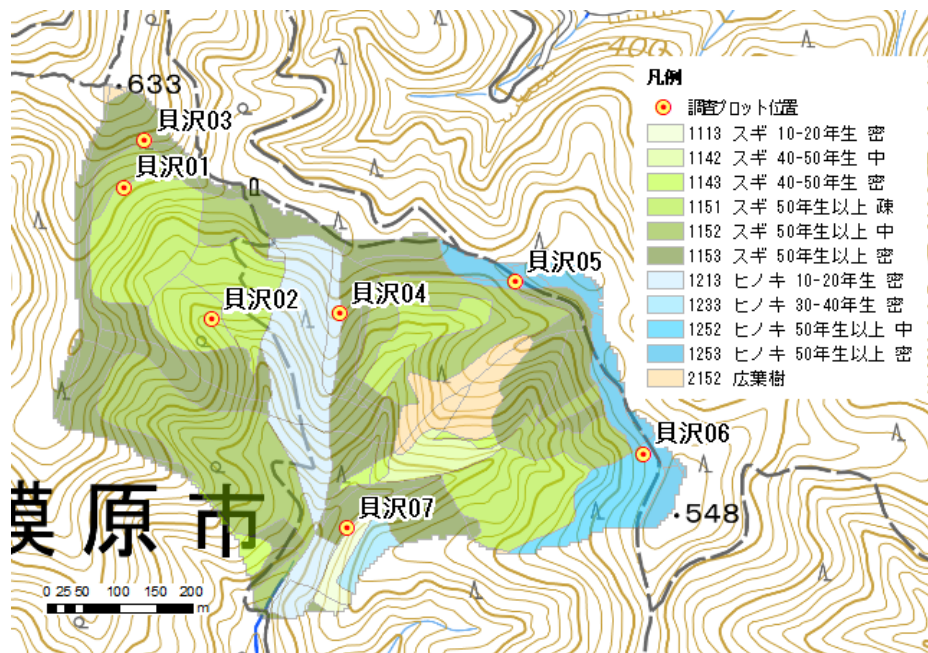


図 3-52 林相調査箇所位置図（貝沢流域）

※図中の林相区分図は、令和 3 年度に用いた解析手法（サンプル小班における DCHM 標準偏差と実測立木密度との回帰式より立木密度を推計）を用いて作成したもの。

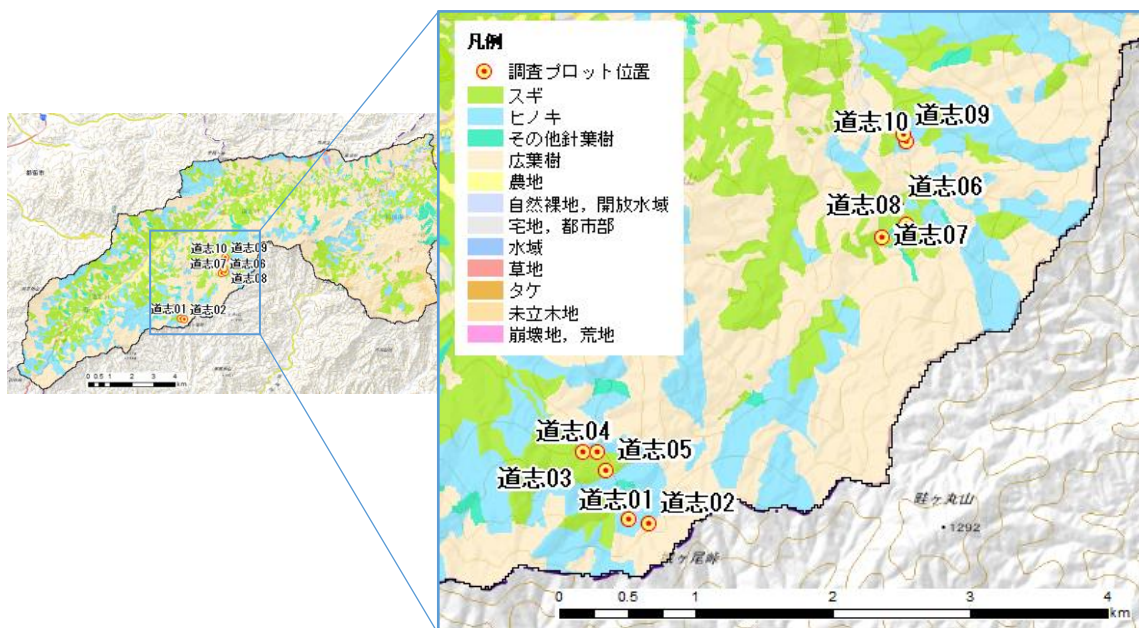


図 3-53 林相調査箇所位置図（道志ダム流域）

2) 現地調査により取得した森林情報との照合による精度検証（令和 3, 4 年度実施）

精度の検証に当たっては、個々の解析手法の精度確認だけでなく、今後、解析手法を選択する際の有用な参考情報となり得るよう、各解析手法の詳細（使用するデータの点群密度レベル、

解析方法、解析単位、設定したパラメータ値等) について整理することとした。今回は、表 3-19 のとおり、①から⑪までの 11 個の解析パターンについて検証を行った。

表 3-19 LiDAR データを用いた立木密度等の算出方法の一覧

使用データ		低密度LiDARデータ (1点/1m ² 以上)					高密度LiDARデータ (4点/1m ² 以上)					
算出方法		①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪
DCHM解析手法		樹頂点抽出 (R解析)		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 (特許第 4279894 号)		
解析単位		プロット	林小班	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
パラメータ	ウィンドウサイズ	5m×5m		3m×3m		-	5m×5m		3m×3m		不明	
	最大樹冠幅 [m]	10m		10m		-	10m		10m		不明	
	最小樹高[m]	5m		5m		-	5m		10m		不明	
適用先		2021 林相区分図		2021 林相区分図		2022 林相区分図	-			(神奈川県 調査等)		

LiDAR データは、大きく低密度 (1 点/m² 以上) と高密度 (4 点/m² 以上) の 2 種類に分けた。①から⑤の低密度データは、貝沢流域の解析では国土地理院「H20 渡良瀬川流域及び鬼怒川流域航空レーザ計測業務」、道志ダム流域の解析では国土地理院「H21 大規模崩壊地対策航空レーザ計測その 3 業務」の成果データを用いた。⑥から⑪の高密度のデータとしては、神奈川県「令和元年度航空レーザ測量及び山地災害重点地域全体計画策定業務委託」の成果データを用いた。

次に、立木密度の解析手法は、統計解析ソフト「R」を用いた樹頂点抽出手法 (①～④、⑥～⑨)、令和 2 年度の本事業で用いた DCHM の標準偏差から回帰式により求める手法 (⑤)、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 (⑩、⑪) の大きく 3 つの手法を検証の対象とした。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ィンドウサイズ (樹頂推定に用いる解析範囲) の設定は、5 m × 5 m と 3 m × 3 m、最小樹高の設定は 5 m、10m とした。

解析単位 (スケール) は、プロットと林小班的の 2 タイプとした。プロットとは、森林調査を実施した標準地プロットのサイズと同等のスケールであり、もう一つは森林簿等で定義されている林小班的の単位である。

なお、精度評価は、各解析パターンを適用した際の立木密度と樹高について行うこととし、本事業の対象流域における立木密度や樹高の推計に当たっては、どの解析パターンがより適切であるか、他のパターンとの比較が可能となるよう、2 乗平均平方根誤差 (RMSE)¹² の指標を用いた評価を行った。

¹² RMSE (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。

(2) 結果

1) 現地における森林調査の結果

各プロットにおける森林調査の結果は表 3-20 のとおりである。貝沢流域のプロット No.01～03 及び道志ダム流域のプロットの No.03、06～08 がスギ林、貝沢流域のプロット No.04～07 及び道志ダム流域の No.01、02、04、05、09、10 がヒノキ林である。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、立木密度以外の林分情報についても参考データとして収集した。

表 3-20 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	1153	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

2) 立木密度の精度検証

立木密度における精度の検証は、表 3-19 に記載の①～⑪までの解析パターンについて、スギ・ヒノキ・人工林全体の3つのグループ毎の RMSE を算出し、その結果を比較することにより行った(表 3-21)。

このうち、林小班単位で解析を行った、②、④、⑤、⑦、⑨、⑪のパターンのうち、現地実測による立木密度との誤差(RMSE)が最も少なかったパターンに「ベスト」と付記した。

表 3-21 立木密度の精度検証結果 (RMSE による評価)
(上：貝沢流域、下：道志ダム流域)

No.	樹種	林齢	立木密度 [本/ha] (標準地プロット)	立木密度 [本/ha] (LiDAR解析)								
				①	②	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪
貝沢01	スギ	50年生以上	425	300	437	125	300	406	450	953	300	341
貝沢02	スギ	50年生以上	450	500	356	215	450	328	1,000	828	450	261
貝沢03	スギ	50年生以上	850	650	635	1,048	550	582	1,200	1,000	400	571
貝沢04	ヒノキ	10~20年生	700	550	580	1,535	750	580	1,150	946	850	574
貝沢05	ヒノキ	50年生以上	1,200	650	589	1,121	750	539	1,350	1,054	700	545
貝沢06	ヒノキ	50年生以上	900	600	446	764	550	408	1,350	920	650	420
貝沢07	ヒノキ	10~20年生	2,050	1,000	647	1,610	750	488	1,500	1,361	950	683
RMSE (二乗平均平方根誤差)			スギ	139	ベスト136	248	188	170	377	385	270	200
			ヒノキ	616	800	478	710	885	427	ベスト373	621	797
			ヒノキ (No.7以外)	372	445	491	330	481	377	ベスト166	334	475
			全体	474	611	396	551	678	406	ベスト378	502	617
			全体 (No.7以外)	281	329	389	ベスト269	360	377	296	304	364

No.	樹種	林齢	立木密度 [本/ha] (標準地プロット)	立木密度 [本/ha] (LiDAR解析)			
				①	②	③	④
道志03	スギ	50年生以上	550	250	148	500	342
道志05	スギ	40-50年生	900	200	179	550	390
道志06	スギ	40-50年生	650	300	157	450	328
道志07	スギ	50年生以上	700	250	135	550	306
道志08	スギ	40-50年生	650	250	157	500	359
道志01	ヒノキ	20-30年生	850	300	174	600	398
道志02	ヒノキ	30-40年生	650	450	146	750	362
道志04	ヒノキ	50年生以上	1,050	350	158	400	350
道志09	ヒノキ	50年生以上	800	100	102	150	266
道志10	ヒノキ	20~30年生	1,250	100	83	550	299
RMSE (二乗平均平方根誤差)			スギ	462	546	205	ベスト360
			ヒノキ	727	819	531	ベスト627
			全体	609	696	402	ベスト511

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において実測した立木密度と相関が高く、精度も高いと予測したが、貝沢流域においては、このような結果は明瞭には表れず、②⑨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、⑧⑨の高密度 LiDAR を用いた R 解析 (ウインドウサイズ 3 m × 3 m、最小樹高 10m) により算出された立木密度の推定誤差が最も小さかったが、スギ林では①②の低密度 LiDAR を用いた R 解析、人工林全体 (スギ+ヒノキ) では、同じく低密度 LiDAR を用いた⑤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 データであっても、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、有効活用できる余地があると思われた。

道志ダム流域においては、低密度 LiDAR による解析のみの実施となったが、本事業のケースにおいては、高密度 LiDAR を用いた R 解析 (ウインドウサイズ 3 m × 3 m、最小樹高 10m) により算出された立木密度が最も精度が高い結果となった。

3) 樹高の精度検証

樹高における精度の検証は、表 3-19 に記載の①～⑪までの解析パターンについて、スギ・ヒノキ・人工林全体の3つのグループ毎の RMSE を算出し、その結果を比較することにより行った(表 3-22)。なお、②、⑤については、樹高算出までの処理過程が同じであるため、結果が同値となっている。

このうち、林小班単位で解析を行った、②、④、⑤、⑦、⑨、⑪のパターンのうち、現地実測による樹高との誤差(RMSE)が最も少なかったパターンに「ベスト」と付記した。

表 3-22 樹高の精度検証結果 (RMSE による評価)
(上：貝沢流域、下：道志ダム流域)

No.	樹種	林齢	樹高 [m] (標準地プロット)	樹高 [m] (LiDAR解析)								
				①	②	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪
貝沢01	スギ	50年生以上	31.4	33.1	30.0	30.0	32.8	31.4	32.0	29.0	33.2	28.6
貝沢02	スギ	50年生以上	32.5	35.0	30.0	30.0	34.6	33.2	32.9	28.3	34.9	29.4
貝沢03	スギ	50年生以上	24.6	25.4	23.0	23.0	26.3	24.7	25.2	22.8	26.9	23.3
貝沢04	ヒノキ	10～20年生	19.6	19.8	19.0	19.0	19.7	19.2	19.3	18.6	19.8	12.8
貝沢05	ヒノキ	50年生以上	20.1	21.9	22.0	22.0	21.9	21.7	21.5	21.4	22.3	15.1
貝沢06	ヒノキ	50年生以上	18.8	20.6	23.0	23.0	21.2	20.5	20.6	22.8	21.0	11.5
貝沢07	ヒノキ	10～20年生	13.0	13.9	17.0	17.0	14.3	14.1	14.1	16.4	13.9	12.6
RMSE (二乗平均平方根誤差)			スギ	1.8	1.9	1.9	1.8	ベスト 0.5	0.6	3.0	2.2	2.5
			ヒノキ	1.4	3.1	3.1	1.6	ベスト 1.3	1.3	2.7	1.6	5.6
			全体	1.6	2.6	2.6	1.7	ベスト 1.0	1.0	2.8	1.9	4.5

No.	樹種	林齢	樹高 [m] (標準地プロット)	樹高 [m] (LiDAR解析)			
				①	②	③	④
道志03	スギ	50年生以上	30.7	22.0	21.5	23.1	20.2
道志05	スギ	40-50年生	18.1	17.4	16.5	16.5	15.8
道志06	スギ	40-50年生	27.4	24.6	23.2	24.4	21.7
道志07	スギ	50年生以上	33.7	30.8	24.9	30.4	23.2
道志08	スギ	40-50年生	28.0	23.9	20.2	23.6	19.0
道志01	ヒノキ	20-30年生	18.6	18.0	16.9	17.4	16.2
道志02	ヒノキ	30-40年生	19.1	14.0	14.3	13.7	13.7
道志04	ヒノキ	50年生以上	20.0	18.8	18.9	18.7	18.1
道志09	ヒノキ	50年生以上	23.8	20.9	17.6	21.1	15.2
道志10	ヒノキ	20～30年生	15.9	12.4	12.9	11.5	12.0
RMSE (二乗平均平方根誤差)			スギ	4.7	7.0	ベスト 4.5	8.2
			ヒノキ	ベスト 3.1	3.8	3.4	5.0
			全体	ベスト 4.0	5.6	ベスト 4.0	6.8

推計された樹高は総じて実測で得た樹高との相関が高く、解析パターン間における RMSE のばらつきも少なかった。特に、高密度 LiDAR データを用いた⑦や⑧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く、低密度の LiDAR データについても適宜活用することが有効と考えられた。

(3) 考察

現地調査に基づく林分データが極めて限られていたことから、本事業の立木密度や樹高の検証の結果から、必ずしも最適な LiDAR データ解析手法を特定するには至らなかった。

立木密度の推計において、高い精度が得られなかった要因として、現地調査時（令和3年度）と航空レーザ計測時（現地調査より10年程度前）の時点のずれがあったことや、低密度 LiDAR データを用いた樹頂点抽出に限界があったことが考えられる。また、現地で林相の調査を行った標準地プロットと、今回の LiDAR 解析単位である林小班毎の単位では規模が異なり、特に規模の大きな林小班においては同一の林小班内であっても林相の均質性に違いがみられるケースがあり、これが立木密度の過大あるいは過少推計の要因となっている可能性もある。

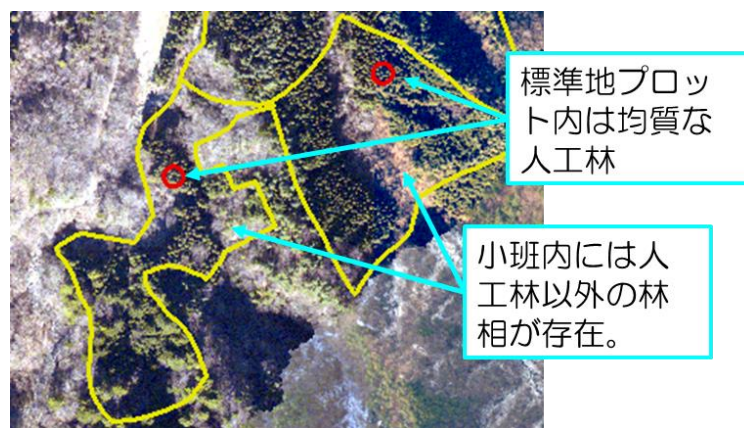


図 3-54 林相が不均一な林小班の例（道志ダム流域）

上記の課題に加え、本事業の対象流域（道志、三保）の範囲においては、4点/1m²以上の高密度 LiDAR データが整備されていなかったこともあり、今回は、林分疎密度区分を行うための参照データとして、比較的入手の容易な森林簿を用いた。このような従来データの活用であっても、モデルパラメータの調整により、森林流域における水収支を一定の精度で再現し、評価することは可能である。ただし、本事業で掲げてきたテーマは、おそらく流域スケールで見ればごく僅かであろうと思われる、森林の成長による変化や間伐等の森林整備が水源涵養機能に及ぼす影響をモデルにより検出、評価することができるかどうかであり、林相区分の構成要素として林分疎密度を加味したところは妥当といえるが、疎密度区分が「疎・中・密」の3段階に留まっていたことで、モデルの活用性、有効性が限定的なものとなった可能性が否めない。

本来、間伐等の施業の効果は、より細かな本数単位（○百本/ha など）でみていく必要があるが、このような微小な森林の変化は森林簿にはリアルタイムには反映されない場合が多く、かつ、更新も頻繁に行われていないのが実態である。今後、モデルの活用性を高めていくためには、より可用性の高い森林の情報基盤を構築し、森林簿を基盤ごとアップデートしていく形で全国的に整備、普及させていくことが有用と考えられる。その基盤データとして、高密度 LiDAR データのより一層の整備、活用が期待される場所である。

4. 実測の気象・流量データの分析・活用

本章では、実測の気象・流量データの分析により、対象流域の基本的な気象・流出特性の把握を行った。

この分析を行う目的の一つ目は、モデルの推定精度を向上させることである。実測データに基づく流域の流出率や河川流量（総量）を把握し、モデルの推定結果がその傾向に沿うようパラメータの調整を行うことで、実態に近い結果が得られることが期待される。

二つ目は、構築したモデルを用いてシナリオ解析・評価を行っていくにあたり、評価する項目（水収支、洪水緩和機能、水資源貯留）に応じて、降雨インプットのパターン（平均年、豊水年、渇水年の別）や時間単位（年、日、時間）を適切に変更する必要がある。それらに該当する降雨の観測された年をあらかじめ抽出し、着目すべき降雨年としてセットしておく必要があるためである。

三つ目は、シナリオ解析結果を比較・評価するためのコントロール値として実測データを整理しておくことである。整理することにより評価の質や確度を高めることが可能と思われるためである。

上記を踏まえ、ここでは、以下の3点について対応することとした。

- 対象流域における過去40年間の年降雨量の把握
- 着目すべき降雨年の抽出
- 対象流域における流出特性の把握（推定結果の比較材料として）

4.1. 対象流域における過去40年間の年降雨量の把握

道志ダム流域及び三保ダム流域における過去40年間（1978年～2019年）の年降雨量変化を示す（図4-1）。全体的には、対象流域が7年～8年の周期的な増加と減少のような変動を繰り返していることがみられた。また、三保ダム流域は道志ダム流域より雨量が多く、特に3,000mm以上の降雨が9年あった。

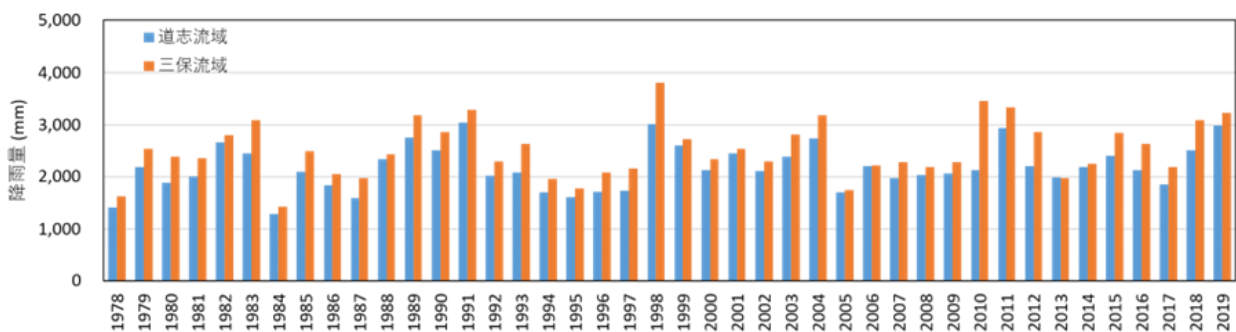


図 4-1 過去42年間の年降水量

4.2. 着目すべき降雨年の選定

図4-2のとおり、着目すべき降雨年の選定を行った。

現代モデルにおける平均年として、現代のシミュレーション期間の間に、1978年～2019年の

平均降雨量と近い年として、2015年を選定した。

豊水年として、過去42年間で降雨量が最大であった1998年を選定した。

渇水年として、過去42年間で降雨量が最小であった1984年を選定した。

豪雨年として、三保ダム流域で日雨量約110mm、最大時間雨量約25mmを記録した台風20号通過時の2018年と、日雨量約560mm、最大時間雨量が約76mmの記録的短時間大雨情報により最大を記録した台風19号通過時の2019年を選定した。

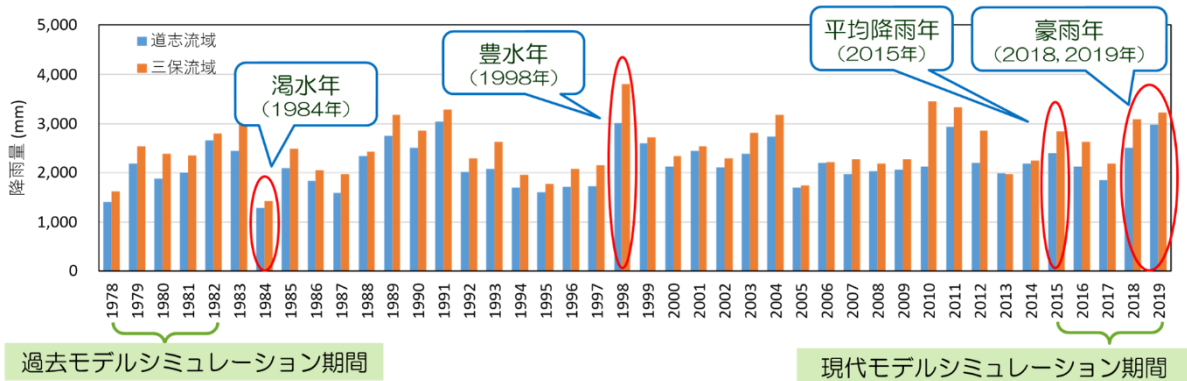


図 4-2 各シナリオに用いる降雨パターンの抽出

4.3. 対象流域における流出特性の把握（モデル推定結果との比較材料として）

4.3.1. 流況曲線

図 4-3 は、道志ダム流域及び三保ダム流域の各降雨年（渇水年、豊水年、平均降雨年）における流況曲線を示す。

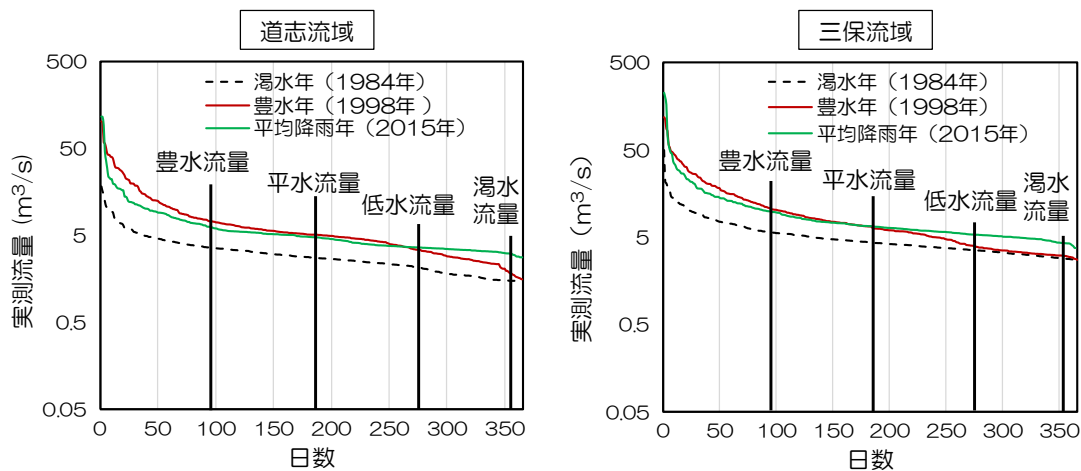


図 4-3 道志ダム流域及び三保ダム流域の各降雨年（渇水年、豊水年、平均降雨年）における流況曲線

流況曲線は、大きい方から 95 日を下らない流量が豊水流量、185 日を下らない流量が平水流量、275 日を下らない流量が低水流量、355 日を下らない流量が渇水流量として定義される。両流域とも、豊水及び平水流量は豊水年のほうが高い。また、低水流量は渇水年と平均降雨年は緩

やかに減少したが、豊水年は急に減少しており、道志ダム流域の方が渇水期の流量方が急激に減少している。

また、年降水量と念流量は高い正の相関関係があるため（R 3年度報告書）、三保ダム流域は道志ダム流域より全般的に流量が多い傾向がみられた。

4.3.2. 流出率

表 4-1 に示したとおり、道志ダム流域・三保ダム流域は雨量が多いほど流出量は多く、流出率も高い傾向がみられた。また、三保ダム流域の方が、道志ダム流域よりやや高い流出率となった。

表 4-1 雨量補正後の流域流出率（再掲）

モデル流域	道志			三保		
	現代	過去	平均 降雨年	現代	過去	平均 降雨年
期間（年）	2015-2019	1978-1982	2015	2015-2019	1978-1982	2015
降水量（mm）	2,998	2,665	3,023	3,179	2,776	3,233
河川流出量（mm）	1,986	1,681	1,954	2,124	1,944	2,157
流出率	0.66	0.63	0.65	0.67	0.70	0.67

5. パラメータ設定

5.1. パラメータ調整の流れ

パラメータ調整の基本的な流れは図 5-1 とおりである。以下に、各ステップの内容について記載する。

○パラメータ調整のフロー

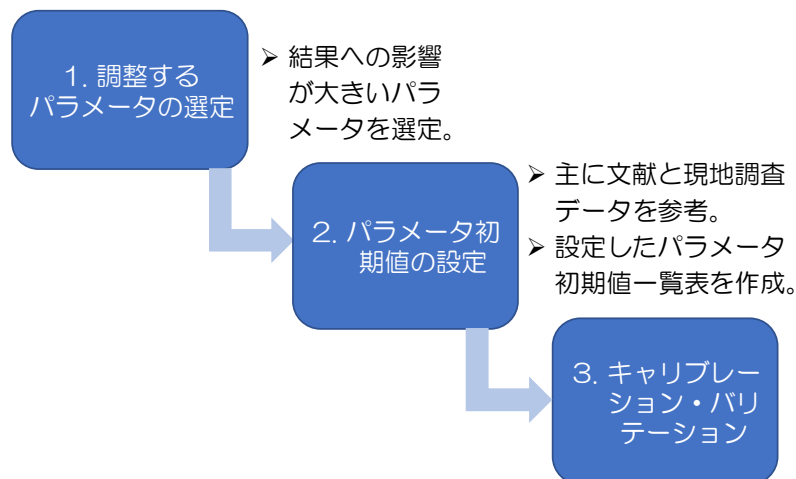


図 5-1 パラメータ調整の基本的な流れ

5.2. 調整するパラメータの選定

はじめに、調整するパラメータの選定を行った。SWAT モデルには、数多くのパラメータが設定されており、これらのパラメータ全てを調整することは困難である。また、調整に当たっては、各パラメータがどの水文計算に用いられており、どういった挙動をするかをあらかじめ把握しておく必要がある。計算式やパラメータの定義に関する詳細は、SWAT の Theoretical Documentation Version 2009 が参考となる。

本事業では、初期値の検討を行うパラメータは、SWAT を用いた既往研究論文などから、比較的容易に情報収集ができるパラメータや、パラメータの実測値に関する情報がフィールド調査や既往文献のデータなどから入手可能なパラメータ等がある程度幅広にとり、キャリブレーションの対象とするパラメータは、文献情報等に基づき、特に感度が高く、計算結果への影響が大きいと思われるパラメータを選定し、調整対象とすることとした。

初期値の検討を行ったパラメータの一覧を表 5-1 に、それらのうち、キャリブレーションの対象として絞り込んだパラメータを図 5-2 に示した。図 5-2 のパラメータについては、パラメータがどの水文プロセスの計算に関係しているかを分かりやすくするため、以下の 3 つのカテゴリに分けて示した。

- 地表面よりも上部の水文プロセスに関係する「蒸発散関連パラメータ」
- 地表や比較的浅い土壌層に関係する「地表・浸透関連パラメータ」
- 土壌層よりも深い層に関係する「地下水関連パラメータ」

表 5-1 初期値の検討を行ったパラメータ一覧

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]
BSN	SURLAG	表面流の流出遅延度合い	4 days(1-24)
GW	GW_DELAY	地下水の流出日数	31[days] (0-500)
	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](0-1)
	GWQMN	浅層地下水が川へ流入する際の閾値	1000[mm H ₂ O](0-5000)
	GW_REVAP	地下水の再蒸発（土壌表層への水の移動）係数。地下水面が高い場合と、深根性植物が生育する場合に顕著となる。値が高いほど移動しやすい。	0.02(0.02-0.2)
	REVAPMN	毛管上昇が生じる浅層地下水の閾値。	750[mm H ₂ O](0-1000)
	RCHRG_DP	地下深層への透過率。	0.05(0-1)
Sol	SOL_K1	一層目土壌の飽和透水係数	-999 [mm/hr](0-2000)
	SOL_K2	二層目土壌の飽和透水係数	
	SOL_K3	三層目土壌の飽和透水係数	
	SOL_AWC1	一層目土壌の有効水分	-999[mm/mm](0-1)
	SOL_AWC2	二層目土壌の有効水分	
	SOL_AWC3	三層目土壌の有効水分	
	SOL_BD1	一層土壌の仮比重	-999 [g/m ³] (0.9-2.5)
	SOL_BD2	二層土壌の仮比重	
SOL_BD3	三層土壌の仮比重		
MGT	PLANT_ID	土地被覆区分のIDコード	0(0-99)
	IGRO	土地利用ステータスコード	0(0-1)
	IURBAN	都市部のシミュレーションコード	0(0-2)
	LAI_INT	葉面積指数（LAI）の初期値	0(0-8)
	BIO_INT	乾重量バイオマスの初期値	0 [kg/ha](0-1000)
	BIOMIX	生態混交率	0.2(0-1)
	PHU_PLT	植物成長の全期間における積算温度	0 [phu](0-3500)
	CN2	カーブナンバー法により表面流出量を計算する際のパラメータ。作物タイプと土壌の透水性(A~D)、土壌の湿潤状態から決定される	-999 (35-98)
HRU	SLSUBBSN	平均斜面長	50 [m](10-150)
	HRU_SLP	平均斜面傾斜	-999[m/m](0-0.6)
	LAT_TTIME	側方流移動日数	0[days](0-180)
	CANMX	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。	0[mm H ₂ O](0-100)
	EPCO	植物による吸水の補償係数。浅い層に十分な水がないとき、より深い層からの吸水を許すかどうか。	1(0-1)
	OV_N	地表面におけるマンギングのN(粗度係数)	-999(0.01-30)
RTE	CH_COV1	河川の浸食されやすさ。0に近いほど浸食されにくく、1に近いほど浸食されやすい	0 (-0.05-0.6)
	CH_COV2	河川の被覆係数。0に近いほど浸食されにくく、1に近いほど浸食されやすい	0 (-0.001-1)
	CH_K2	河床における実効透水係数	0[mm/hr](-0.01-500)
	CH_N2	基幹河川におけるマンギングのN（粗度係数）	0.014(-0.01-0.3)
CROP	BLAI	葉面積指数（Leaf Area Index: LAI）の最大値	(0.5-12.3)
	T_BASE	植物が成長可能な最低気温	[°C] (0-18)
	T_OPT	植物の成長の最適気温	[°C] (11-38)
	GSI	最大気孔コンダクタンス	[m/s] (0-5)
	MAT_YRS	木が成熟するまでに必要な年数	[years](0-100)
	ALAI_MIN	休眠期における最小の葉面積指数	[m ² /m ²] (0-0.99)
	FRGRW1	最適葉面積発達曲線上の第1点上における植物の成長度	(0-1)
	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	(0-1)
	LAIMX2	最適葉面積発達曲線上の第1地点のフラクシオン	(0-1)
	DLAI	最適葉面積発達曲線上の落葉しはじめる地点	(0.15-1)
	BMX_TREES	森林の最大バイオマス	[tons/ha] (0-5000)
	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。	(0-2)
	RSDCO_PL	植物残渣の分解率	(0.01-0.099)
	CHTMX	最大樹冠高	[m] (0.1-20)
	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] (1.5-6)

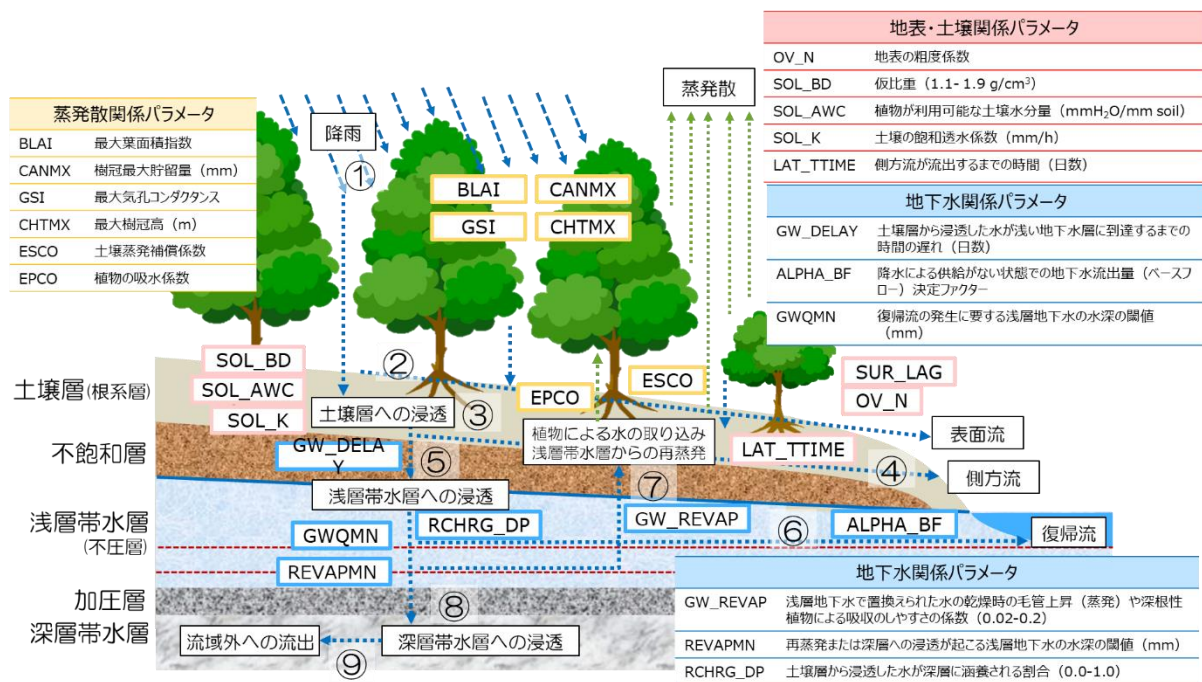


図 5-2 キャリブレーション対象として選定したパラメータ

5.3. パラメータ初期値の設定

5.3.1. 蒸発散関係パラメータ

蒸発散関係パラメータのうち、主なものを表 5-2 に示す。

表 5-2 主な蒸発散関連パラメータ

計算に用いられる 主な水文プロセス	パラメータ	
遮断蒸発	CANMX	樹冠最大貯留量
蒸散	BLAI	最大葉面積指数
	GSI	最大気孔コンダクタンス
	EPCO	植物による水の吸水係数
蒸発散	CHTMX	最大樹冠高
土壌蒸発	ESCO	土壌からの蒸発ファクター

(1) CANMX (樹冠最大貯留量)

図 5-3 は、Iida et al (2017)¹³により観測された、スギ成熟林における降雨中の樹冠遮断量の時間変化である。スギ成熟林においては雨が降り始めるのと同時に樹冠貯留量も多くなり、その後、4 mm 程度で増加がみられなくなり、一定で推移する傾向がみられた。これらの結果を踏ま

¹³ S. Iida et al., 2017. Intrastorm scale rainfall interception dynamics in a mature coniferous forest stand, J. Hydrol. 548 (2017) 770-783.

え、樹種はスギ、樹齢は 30 年生以上、密度は中の場合の樹冠最大貯留量を 4 mm とし、その値を基準としてその他の林相に適用した（表 5-3）。

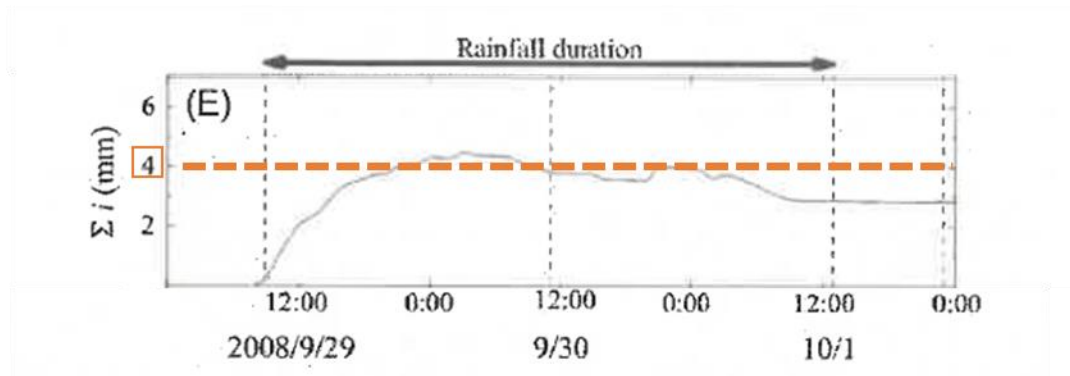


図 5-3 スギ成熟林における降雨中の樹冠遮断量の時間変化
(Iida et al (2017) の図 5 を改編)

表 5-3 CANMX の樹種・疎密度・林齢ごとの設定値

土地被覆	林齢	0-20 年 (低)	20-30 年 (高)	30-40 年 (中)	40 年以上 (中)
	疎密度				
スギ (高)	密 (高) D	4	8	6	6
	中 (中) M	3	6	4	4
	疎 (低) S	2	4	3	3
ヒノキ (中)	密 (高) D	3	6	4	4
	中 (中) M	2	4	3	3
	疎 (低) S	1	3	2	2
広葉樹 (低)	中 (中) M	2			
裸地		1			
崩壊地		0.01			

(2) BLAI (最大葉面積指数)

図 5-4 は林齢と葉面積指数の関係について村上ら¹³によって示され、図中の○(スギ)と△(ヒノキ)であり、それらが大きいほど R_y (収量比数)が高くなる。図 5-5 は(1)スギ及び(2)ヒノキの林齢と葉面積指数の関係について示した。また図中の緑は R_y が 0.6 以下、黄色は R_y が 0.6 より高く、0.8 以下であり、赤は R_y が 0.8 より高いことを示し、林分密度と葉面積指数の関係について示した。林齢が 0~20 年生では林齢が高くなるほど、LAI も高くなり、20~30 年生にピークがみられ、その後はやや低下し、頭打ちとなる傾向がみられた。また 20~30 年生のピ

一ク時においてヒノキよりもスギで高くなる傾向がみられた。同程度の林齢においても R_y が高いほど BLAI が高い傾向を示した。それらの結果を踏まえ、林相別の標準的な BLAI として以下の相対関係を保つよう、表 5-4 のとおり設定した。

- 樹種① 針葉樹 > 広葉樹
 樹種② スギ > ヒノキ
 疎密度 : 密 > 中 > 疎
 林齢区分 (スギ・ヒノキ) : 0-20年 (低)
 20-30年 (高)
 30-40年 (中)
 40年以上 (中)
 広葉樹は一律 (中)

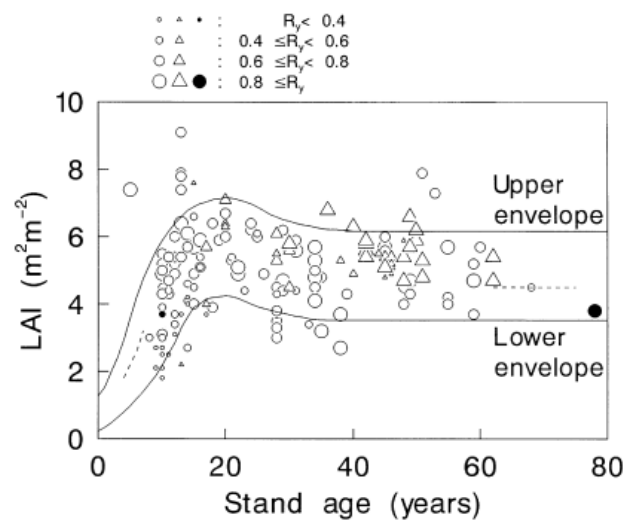


図 5-4 林齢と葉面積指数 (LAI) の関係、△: ヒノキ; ○: スギ (Murakami et al.2000 の図 3 より)

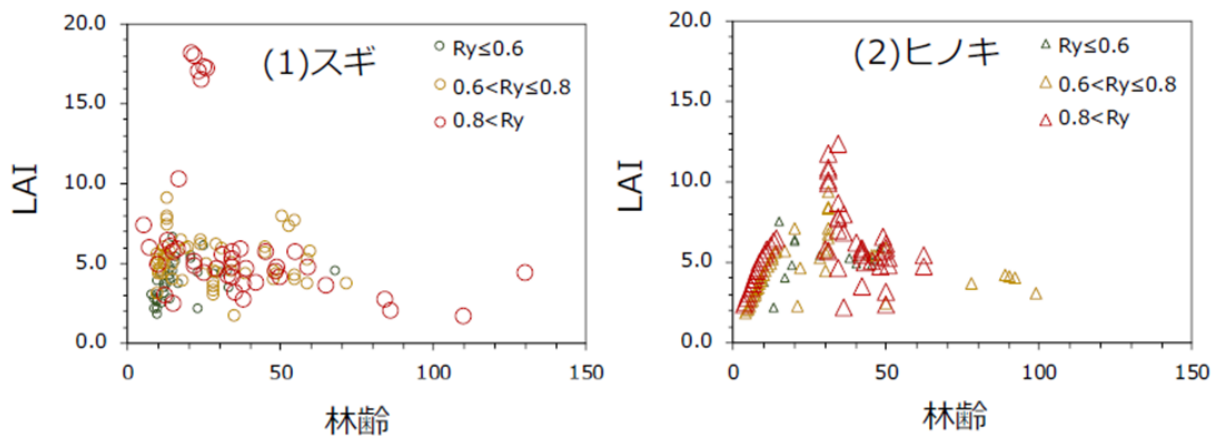


図 5-5 (1) スギ、(2) ヒノキの林齢と葉面積指数の関係 (令和 2 年度本事業報告書より)

表 5-4 BLAI の樹種・疎密度・林齢ごとの設定値

土地被覆	林齢 疎密度	0-20年 (低)	20-30年 (高)	30-40年 (中)	40年以上 (中)
	スギ (高)	密 (高) D	8	12	10
中 (中) M		6	10	8	8
疎 (低) S		4	8	6	6
ヒノキ (中)	密 (高) D	6	10	8	8
	中 (中) M	4	8	6	6
	疎 (低) S	2	6	4	4
広葉樹 (低)	中 (中) M	4			
裸地		2			
崩壊地		0.01			

(3) GSI (最大気孔コンダクタンス)

最大気孔コンダクタンス (GSI) は、スギ・ヒノキは Osone et al. (2000)¹⁴、広葉樹は山崎ら (2006) を参考に、それぞれスギは 0.0209 m/s、ヒノキは 0.0116 m/s、広葉樹は 0.0177 m/s として設定した (表 5-5)。

表 5-5 GSI の樹種ごとの設定値

樹種	パラメータ値 (m/s)	参考文献
スギ	0.0209	Osone et al. (2020)
ヒノキ	0.0116	
広葉樹	0.0177	山崎ら (2006)

¹⁴ Y. Osone et al., 2020. Plant trait database for *Cryptomeria japonica* and *Chamaecyparis obtusa* (SugiHinokiDB): Their physiology, morphology, anatomy and biochemistry, *Ecological Research* 2020;35(1):274-275.

(4) CHTMX（最大樹冠高）

本事業では最大樹冠高（CHTMX）を樹高として用いた。神奈川県「水源林整備の手引き」（平成 29 年 3 月）¹³に示されたスギとヒノキの地位別樹高曲線（図 5-5）よりスギ、ヒノキの林齢がそれぞれ、0-20 年生は 10 年生（赤線）、20-30 年生は 25 年生（黄色線）、30-40 年生は 35 年生（緑線）、40 年生以上は 70 年生（青線）、の樹高を参考に設定した。

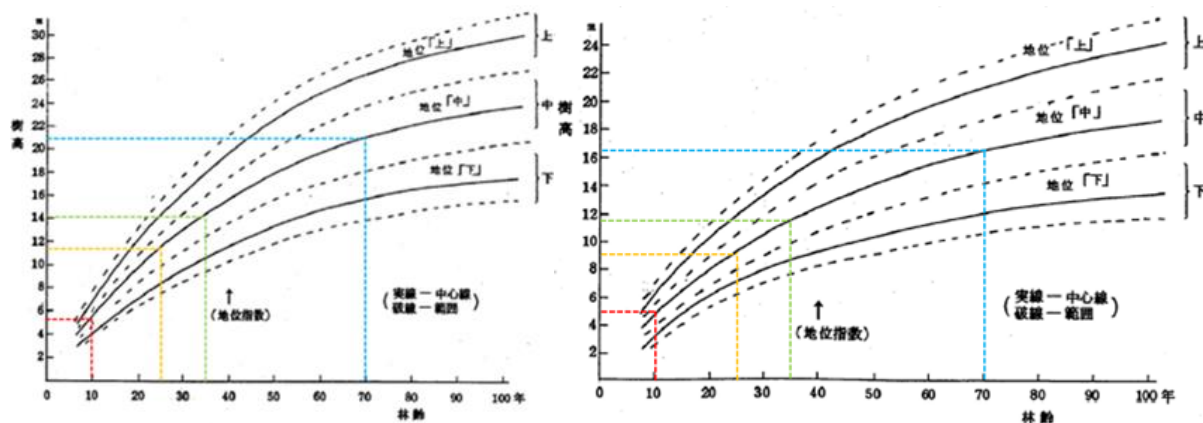


図 5-5 地位別樹高曲線（左図：スギ、右図：ヒノキ）

図 5-6 は、森林生態系多様性基礎調査（全国）¹⁵のデータを基にした広葉樹における樹高曲線である。若齢では林齢が高くなるほど樹高が高くなる傾向がみられ、高齢になるにつれ樹高のばらつきは大きい、その変動は小さくなり一定となった。これを踏まえ、表 5-6 のとおり、広葉樹の CHTMX は、若齢（0-20 年生）と高齢（20 年生以上）に分けて設定した。

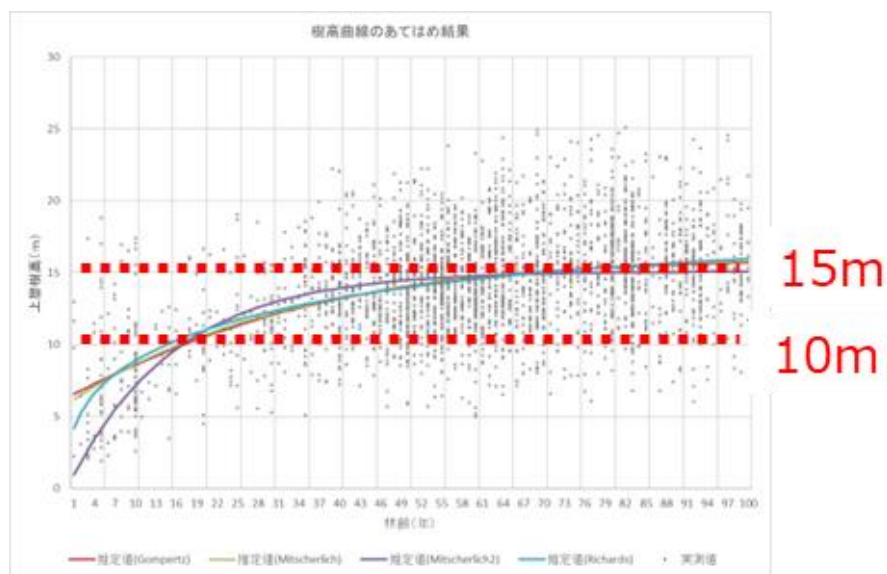


図 5-6 樹高曲線（広葉樹）

¹⁵ 林野庁「平成 30 年度森林吸収源インベントリ情報整備事業（長期戦略イノベーション調査）」報告書

表 5-6 CHTMX の樹種・疎密度・林齢ごとの設定値

土地利用	密度	0-20年 生	20-30年 生	30-40年 生	40年生 以上
スギ	密	5m	11m	14m	21m
	中	5m	11m	14m	21m
	疎	5m	11m	14m	21m
ヒノキ	密	5m	9m	12m	18m
	中	5m	9m	12m	18m
	疎	5m	9m	12m	18m
広葉樹	中	10m	15m		
裸地		1 m			
崩壊地		0.01m			

(5) その他

ESCO (土壌面蒸発の決定因子)及び EPCO(植物による吸水係数)については根拠となる既往文献を得ることができなかつた。そのため、それぞれ ESCO は流域で統一のデフォルト値、EPCO(植物による吸水係数)は土地利用ごとのデフォルト値を適用した。

5.3.2. 地表関係パラメータ

(1) SURLAG (表面流の遅延度合い)

樹冠が閉鎖した林相ほど、林床面に到達する雨量は抑制され、表面流出の速度は緩やかになると考えられる。そのため、BLAI 値が高い林相ほど高くなるよう調整した。また上部に遮るものがない裸地面や崩壊地において、表面流出の速度は森林地に比べ速くなると考えられることから、森林地よりもパラメータを低く調整した。

(2) OV_N (粗度係数)

地表の粗度係数 (OV_N) は下層植生が多いほど高く、下層植生は光が強く当たる場所で多く生育するため、樹冠部の形成状態による影響を強く受ける (Kerby, 1959¹⁶, Y. Wang, 2018¹⁷, SWAT Input/Output Documentation ver.2012¹⁸。

そのため、OV_N を林床被覆率と捉えて、BLAI 値が高い (樹冠が閉鎖した) 林相ほど OV_N

¹⁶ Kerby, W.S. 1959. Time of concentration for overland flow. Journal of Civil Engineering 26(3). Amer. Soc. of Civil Eng., Reston, VA. pp. 6.

¹⁷ Y. L. Wang et al., 2018, Sensitivity Analysis of the Surface Runoff Coefficient of HiPIMS in Simulating Flood Processes in a Large Basin, Water 2018,10, 253.

¹⁸ SWAT Input/Output Documentation ver.2012 (<https://swat.tamu.edu/media/69296/swat-io-documentation-2012.pdf>)

が低く（林床面に到達する光が少なく下層植生が育たず粗度が小さい）なるよう設定した（表 5-7）。

表 5-7 OV_N の樹種ごとの設定値

土地利用	OV_N	BLAI
スギ	0.2	12
	0.3	10
	0.4	8
	0.5	6
	0.6	4
ヒノキ	0.1	10
	0.2	8
	0.3	6
	0.4	4
	0.5	2
広葉樹	0.4	4
草地	0.3	3
農地	0.2	3
裸地	0.1	1.5
崩壊地	0.01	0.01
宅地	0.01	2

5.3.3. 土壌関係パラメータ

既往研究^{19,20,21,22}によると、スギ及び広葉樹はヒノキよりも土壌孔隙量が多く、林齢が高いほど土壌の孔隙量が多いことや、裸地及び崩壊地では森林土壌に比べ、土壌の孔隙量が少ないことが報告されている（図 5-7）。

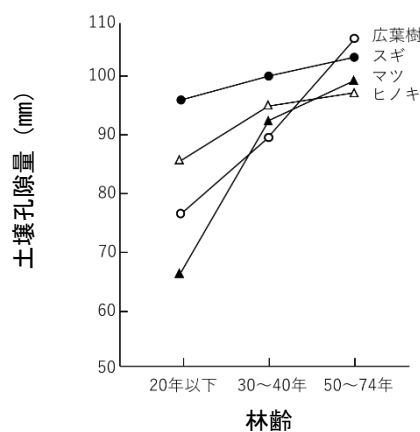


図 5-7 林齢と土壌孔隙量の関係（竹下ら, 1977）

¹⁹ 竹下ら, 1977, 暖帯林地の水保全環境に関する土壌及び地形的研究 福岡県林業試験場時報 26

²⁰ 竹下, 2010, 土壌表層浸透能の物理的構成と植生(I), 水利科学 54 (5), 1-45, 2010

²¹ 竹下, 2011, 土壌表層浸透能の物理的構成と植生(II), 水利科学 54 (6), 51-83, 2011

²² 竹下, 2011, 土壌表層浸透能の物理的構成と植生(III), 水利科学 55(1), 51-67, 2011

また、令和3年度本事業において、貝沢流域を対象として5つの測定地点において土壌の物理性に関する調査を行った結果、飽和透水係数は0.7 mm/h から236.4 mm/h の範囲、仮比重は0.97 g/cm³ から1.65 g/cm³ の範囲で、深度が深くなるほど仮比重の値が大きくなる傾向を示した(表2-8参照)。

以上のことから、SWATモデルにおけるパラメータのSOL_K及びSOL_BDはこれらの範囲内で設定することとした。なお、表5-8は、条件の異なる林相間におけるパラメータの相対関係(値の高い順にA>B>C)を示す。

表5-8 SOL_K、BD、AWC、LAT_TTIMEの林相ごとの設定値

パラメータ	土地利用	0~20年生	20~40年生	40年生以上
SOL_K	スギ	B	A	A
	ヒノキ	C	B	B
	広葉樹	B	A	
	裸地	<C		
	崩壊地	<C		
SOL_BD	スギ	B	C	C
	ヒノキ	A	B	B
	広葉樹	B	C	
	裸地	A<		
	崩壊地	A<		
SOL_AWC	スギ	B	A	A
	ヒノキ	C	B	B
	広葉樹	B	A	
	裸地	<C		
	崩壊地	<C		
LAT_TTIME	森林	C	B	A
	裸地	<C		
	崩壊地	<C		

(1) SOL_BD (仮比重)

スギ及び広葉樹の仮比重を、ヒノキよりも低く林齢が高くなるほど低くなるように設定した。また裸地及び崩壊地は森林地よりも高くなるよう設定した。

(2) SOL_K (飽和透水係数)

スギ及び広葉樹の仮比重を、ヒノキよりも高く、林齢が高くなるほど高く設定した。また裸地及び崩壊地は森林地よりも低くなるよう設定した。

(3) SOL_AWC (有効土壌水分)

スギ及び広葉樹の仮比重を、ヒノキよりも高く、林齢が高くなるほど高く設定した。また裸地及び崩壊地は森林地よりも低くなるよう設定した。

(4) LAT_TTIME (側方流遅延日数)

林齢が高いほど土壌構造（粒径、密度等）が複雑化し、土壌中に水が滞留（流出遅延）しやすいため、LAT_TTIME は 40 年生以上を最も高く、20 年生未満を最も低く設定した。

5.3.4. 地下水関係パラメータ

地下水関係のパラメータについては根拠となる既往文献を得ることができなかつたため、地形地質や土地利用による変化はつけずに流域で統一の値とし、昨年度までに得られたベスト値を適用した。

5.3.5. 地形関係パラメータ

(1) HRU_SLP

SWAT モデルでは急傾斜地における側方流量が過大となるため、平均傾斜 30 度以上の HRU の勾配をより緩やかに設定し、側方流量を抑えた。

(2) SLSUBBSN

HRU_SLP と同様に、平均傾斜 30 度以上の HRU の平均斜面長がより長くなるように設定し、側方流量を抑えた。

5.3.6. 河道関係パラメータ

河道関係のパラメータについては根拠となる既往文献を得ることができなかつたため、地形地質や土地利用による変化はつけずに流域で統一の値とした。

5.3.7. パラメータ初期値一覧

上記のとおり、検討を行ったパラメータの初期値一覧は巻末資料に含める（表 II-1、表 III-1）。

なお、初期値の設定のみでは十分な精度の推定結果が得られなかつたため、キャリブレーション・バリデーションと呼ばれる、モデルの推定精度を向上させるためのパラメータ調整の処理を行った。次章に、キャリブレーション・バリデーション（パラメータ調整）の詳細について記載する。

6. キャリブレーションとバリデーション（パラメータ調整）

6.1. 手法

6.1.1. 概要及び手順

キャリブレーションとは、モデルシミュレーションにより推定された流量と実測の流量データとを比較し、実測した流出量に近づけていくためにパラメータの調整を繰り返す作業であり、キャリブレーションとは異なる期間の実測データを用いて、シミュレーション結果と比較することでパラメータの妥当性を検証する作業をバリデーションという。

キャリブレーションとバリデーションの基本的な作業フローを図 6-1 に示す。

ステップ①として、まず水収支についてキャリブレーションを行い、アウトプットの水収支を構成する各要素（蒸発散量、表面流量、側方流量、地下水浸透量、深層浸透量など）の流出割合が、既往の文献情報から得られる知見と適合するかどうか確認する。

ステップ②として、ハイドログラフや散布図により、実測流量と推定流量が適合しているかどうかを確認する。両者に乖離がある場合には、ステップ①と②を繰り返し、妥当な推定結果が得られるまでこれらの作業を繰り返す。

また、本事業では取り扱っていないが、土砂や栄養塩などの物質流出についても検討する場合は、水流出量の調整（ステップ①、②）において、一定の精度が確保できた後に土砂・栄養塩パラメータの調整を行う。これは、土砂流出量は水収支に、栄養塩量は水収支と土砂流出量に大きく影響されることから、影響の大きいパラメータから順次、値を確定していくためである。

【キャリブレーション・バリデーションの作業フロー】

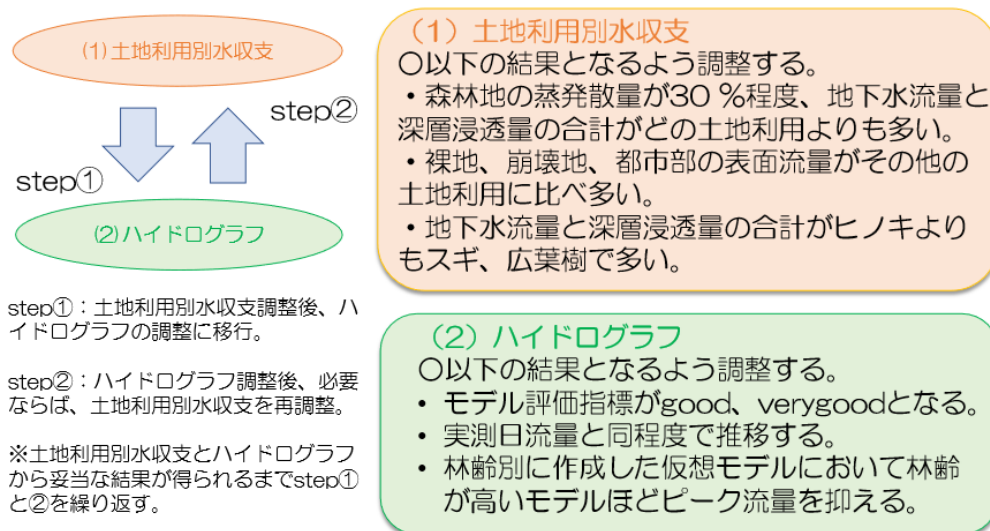


図 6-1 キャリブレーション・バリデーションの作業フロー

6.1.2. モデル精度の評価指標

キャリブレーションとバリデーション結果の良し悪しの判定は、決定係数や Nash Sutcliffe Efficiency (NSE) など、複数の評価指標により行う（表 X 4）。本事業では、RNR、NSE、

PBIAS を用い、Moriassi ら (2015) の評価基準に基づき、アウトプットの精度を Very good (vg)、Good (g)、Satisfactory (s)、Unsatisfactory (us) で判定し、概ね Satisfactory 以上の精度を確保することとした (表 6-1)。Satisfactory よりも評価が下回る場合は、再度キャリブレーションを行うことで、モデルの精度を高めていく。

表 6-1 流出モデルの評価指標と精度評価基準 (Moriassi et al. (2007,2015))

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

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。

キャリブレーションには、専用ソフトウェアである SWAT-CUP2019 を使用した。複数用意されたキャリブレーション アルゴリズムのオプションより、SUFI2 を選択して実施している (図 6-2、図 6-3)。

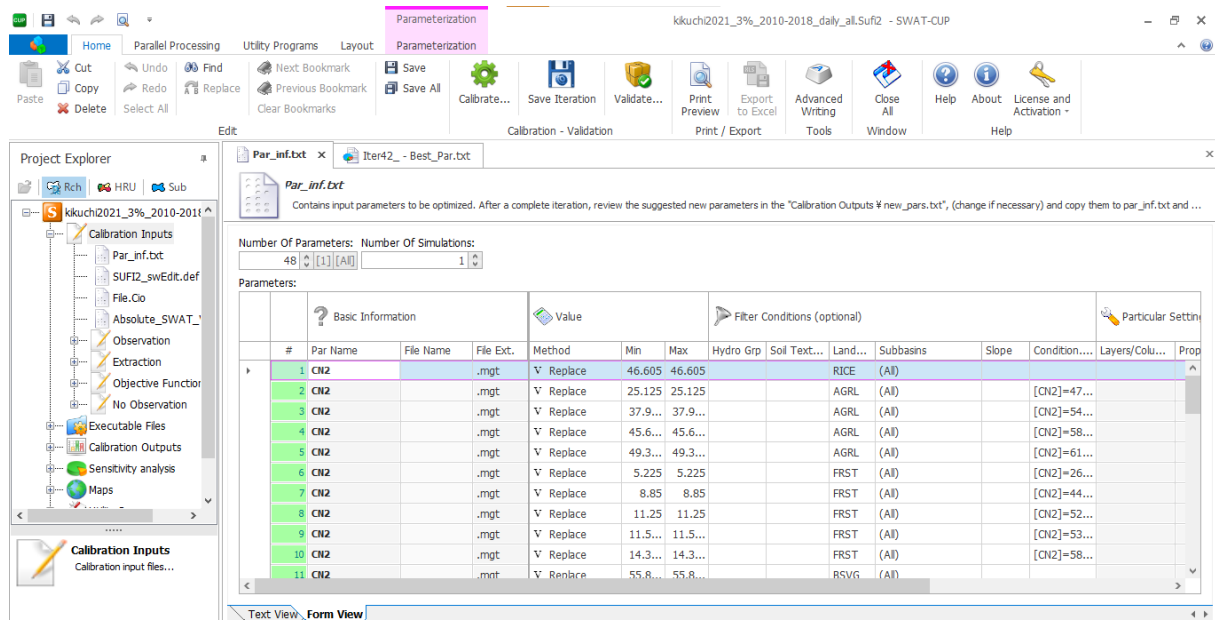


図 6-2 SWAT-CUP を用いたパラメータの設定画面

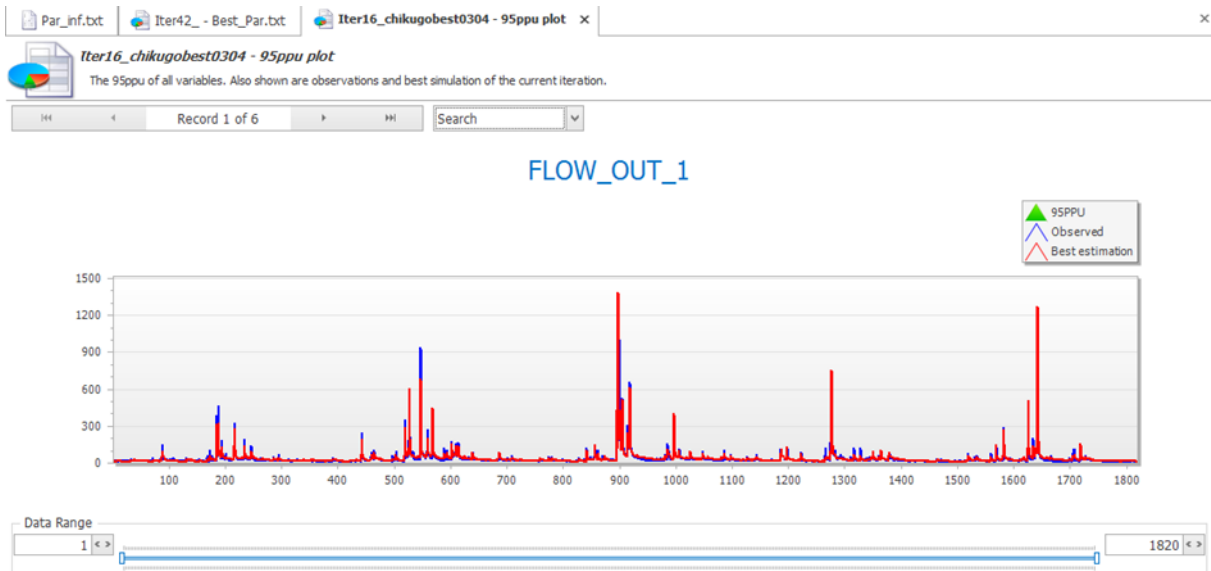
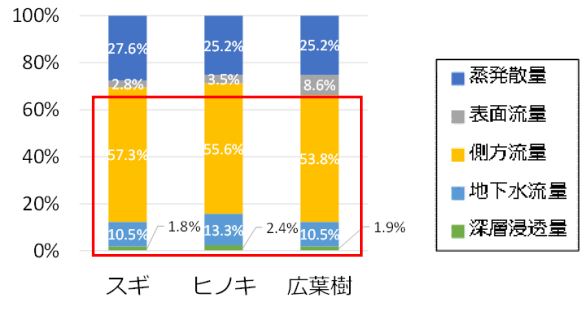
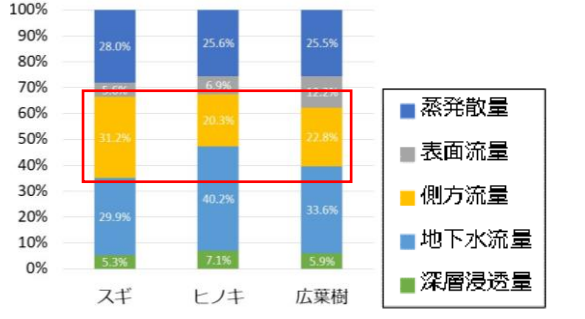
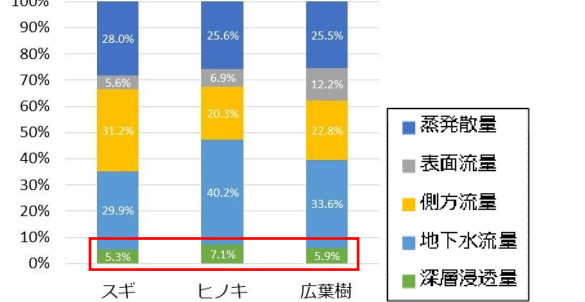
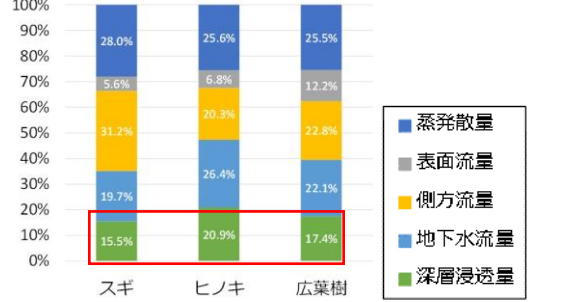
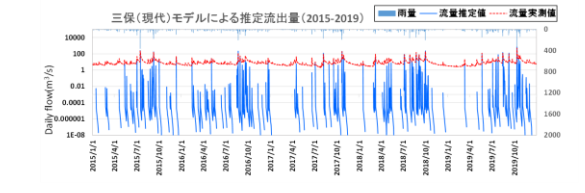
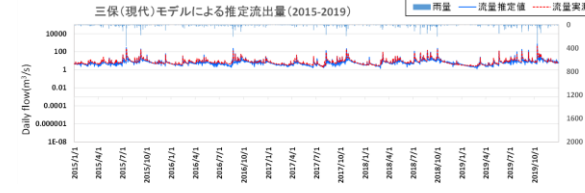
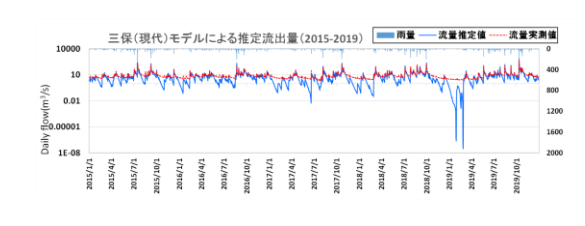
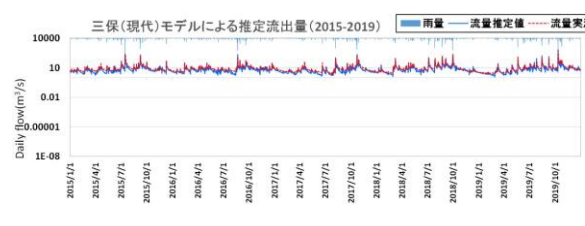


図 6-3 SWAT-CUP を用いた流量実測値と推定値の比較

6.1.3. 主なパラメータ調整の内容

道志・三保モデルに対して実施した主なパラメータ調整の内容を表 6-2 に整理した。

表 6-2 主なパラメータ調整の内容

調整段階	課題	調整内容と結果
水収支	 <p>側方流の割合が全体の 50% を占めており、過大。地下水流量と深層浸透量の割合が小さい。</p>	 <p>平均傾斜 30° 以上の HRU_SLP (斜面傾斜勾配) の値を低く、SLSUBBSN (斜面の平均長) を高くなるよう設定した。その結果、側方流量の割合が小さくなり、地下水流量の割合が大きくなった。</p>
	 <p>深層浸透量の割合が 10% 以下であり、過少。</p>	 <p>RCHG_DP (深層へ浸透する水の割合) の値を高く設定した。その結果、深層浸透量の割合が大きくなった。</p>
ハイドログラフ	 <p>流量が過少</p>	 <p>CH_K2 (河床における実効透水係数) の値を低く設定した。その結果、流出量が多くなり、概ね実測流量と一致した。</p>
	 <p>低水期の流量が過少</p>	 <p>GW_DELAY (地下水の遅延日数) の値を高く設定した。その結果、低水期の流出量が多くなり、概ね実測流量と一致した。</p>

6.2. 結果

6.2.1. キャリブレーション後のベストパラメータ値

キャリブレーション後（ベスト値）のパラメータ値の一覧を表 6-3 に示す。

表 6-3 キャリブレーション前後のパラメータ値一覧

パラメータ 説明		キャリブレーション後（ベスト値）			
		道志・現代	道志・過去	三保・現代	三保・過去
SURLAG	表面流の流出遅延度 合いの係数	0.10~10.00	0.10~10.00	0.50~8.00	0.50~8.00
OV_N	地表面におけるマニ ングの粗度係数 N	0.01~0.50	0.01~0.50	0.01~0.50	0.01~0.50
CN2	カーブナンバー	23.25~199.80 (林相・土壌別)	23.25~152.35 (林相・土壌別)	28.75~148.00 (林相・土壌別)	28.75~136.80 (林相・土壌別)
SOL_K	飽和透水係数 (mm/hr)	0.74~92.13 (土壌別・層別)	0.74~89.23 (土壌別・層別)	0.00~136.49 (土壌別・層別)	0.00~136.49 (土壌別・層別)
SOL_BD	仮比重(g/cm ³)	0.50~9.76 (土壌別・層別)	0.50~9.76 (土壌別・層別)	0.50~2.31 (土壌別・層別)	0.50~2.31 (土壌別・層別)
SOL_AW C	植物の利用可能容水 量(mm H ₂ O/mm soil)	0.01~0.60 (土壌別・層別)	0.01~0.60 (土壌別・層別)	0.00~0.60 (土壌別・層別)	0.00~0.60 (土壌別・層別)
HRU_SL P	斜面の平均勾配 (m/m)(※記載値は森 林域)	0.30 倍 (傾斜 30 度以上)	0.60 倍 (傾斜 30 度以上)	0.30 倍 (傾斜 30 度以上)	0.30 倍 (傾斜 30 度以上)
SLSUBB SN	斜面の平均長 (m)	2.50 倍 (傾斜 30 度以上)	1.55 倍 (傾斜 30 度以上)	2.50 倍 (傾斜 30 度以上)	2.50 倍 (傾斜 30 度以上)
LAT_TTI ME	側方流移動日数 (日)	0~20.00 (林相・土地利用 別)	0~20 (林相・土地利用 別)	0~15 (林相・土地利用 別)	0~15 (林相・土地利用 別)
GW_REV AP	浅層帯水層から土壤 層への再蒸発係数	0.02	0.02	0.10	0.10
REVAP MN	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 (mm H ₂ O)	597.5	597.5	486.5	486.5
ALPHA_ BF	降水がない期間の地 下水流出度合の指標 (1/Days)	変更なし	変更なし	変更なし	変更なし
GWQMN	浅層帯水層の水深 (mm H ₂ O)	148.25	148.25	215.00	215.00
RCHRG_ DP	土壤層を通過した水 のうち地下浸透する 水の割合	0.35~0.516 (土地利用別)	0.35~0.516 (土地利用別)	0.3、0.441 (土地利用別)	0.3、0.441 (土地利用別)
GW_DEL AY	地下水の遅延(日)	222.50	222.50	84.15	84.15
CH_K2	河床における実行透 水係数(mm/hr)	1.00	1.00	1.00	1.00
CH_N2	水路の流れに対する マニングの粗度係数 N	0.25	0.25	0.25	0.25
ALAI_MI N	休眠期における最小 の葉面積指数	0~0.99	0~0.50	変更なし	変更なし
CANMX. hru	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 (mm H ₂ O)	1.00~8.00	1.00~6.00	0.01~6.00	0.01~6.00

6.2.2. キャリブレーション前後のパラメータ適用後のシミュレーション結果

(1) 水収支

1) 道志・現代モデル

道志・現代モデルにおいて流域全体の水収支を図 6-4 に示す。キャリブレーション前後を比較すると、キャリブレーション前の蒸発散量は 794mm であり、キャリブレーション後は 841mm で、やや増えた結果となった。また、キャリブレーション後の側方流は大幅に減少し、地下水涵養量（地下水流量及び深層浸透量）が多くなった。

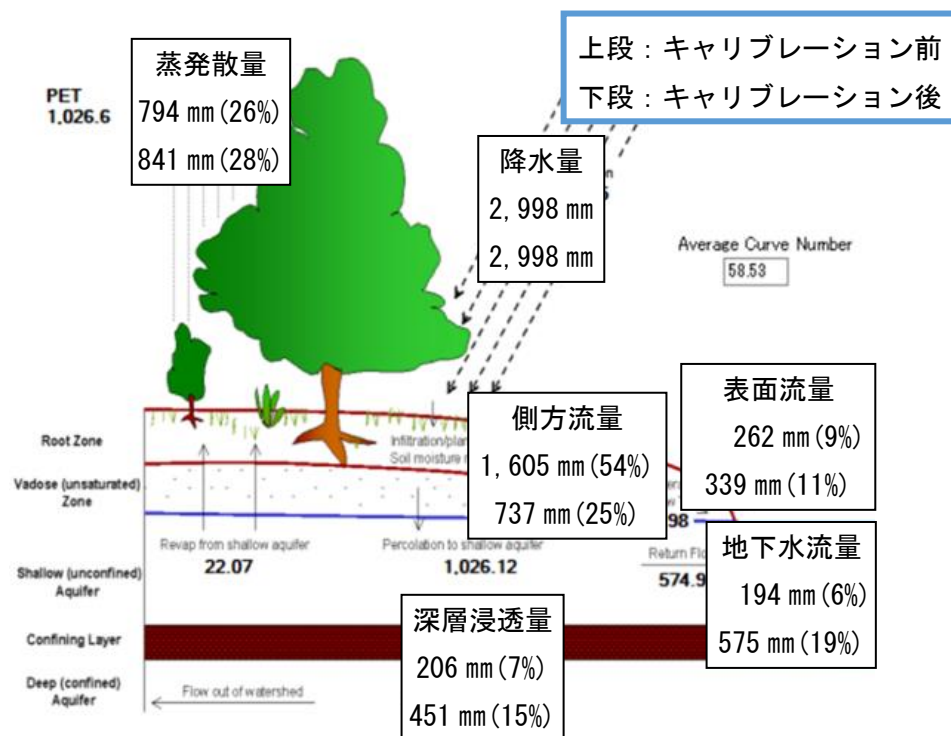


図 6-4 道志・現代モデルによるキャリブレーション前後の水収支（流域全体）

道志・現代モデルにおいてキャリブレーション前後の林相・土地利用別に算出した水収支結果を図 6-5、図 6-6、図 6-7、図 6-8 に示す。キャリブレーションの前後を比較すると、キャリブレーション後の森林（スギ、ヒノキ、広葉樹）及び草地においては、側方流量が大幅に減少した。それに対して、地下水流量と深層浸透量が大きくなった。これは都市部と裸地において、表面流が多くなり、実態に近い値が得られているものと推察される。次に、キャリブレーション後の土地利用別の結果では、森林（スギ、ヒノキ、広葉樹）は他の土地利用より表面流量が少ないが、側方流量、地下水流量、深層浸透量が多い。また、都市部及び裸地の表面流量が他の土地利用より大幅に超えた。一方で、林相別の水収支を見ると、スギの表面流量と側方流量がヒノキよりやや低い、地下水流量と深層浸透量の値がヒノキより高い。また、広葉樹については、いずれの割合がスギ林よりやや大きいとなっているが、ヒノキの方より低かった。

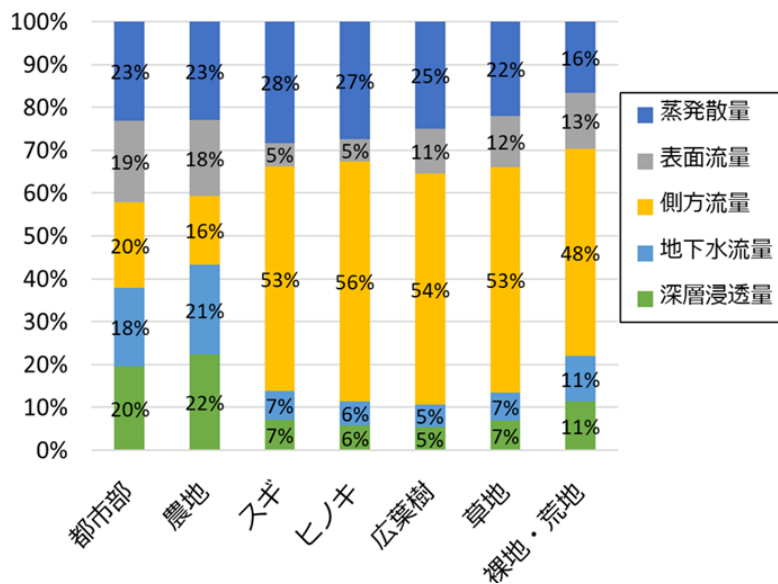


図 6-5 道志・現代モデルによるキャリブレーション前の土地利用別水収支（流出割合）

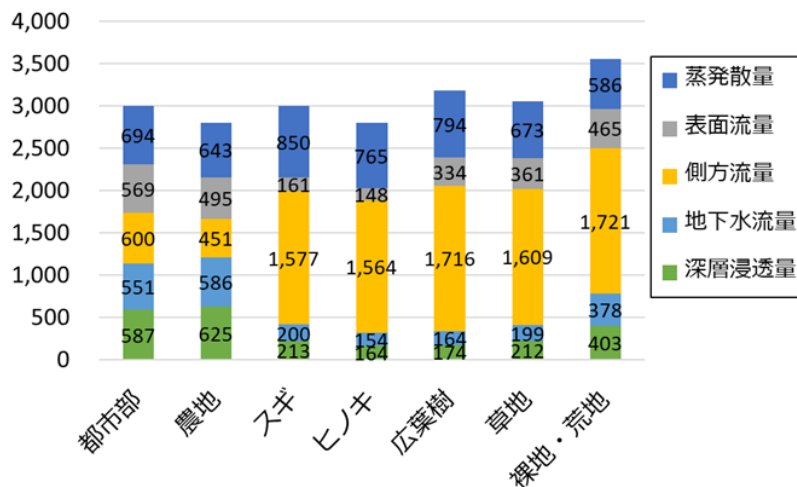


図 6-6 道志・現代モデルによるキャリブレーション前の土地利用別水収支（流出量）

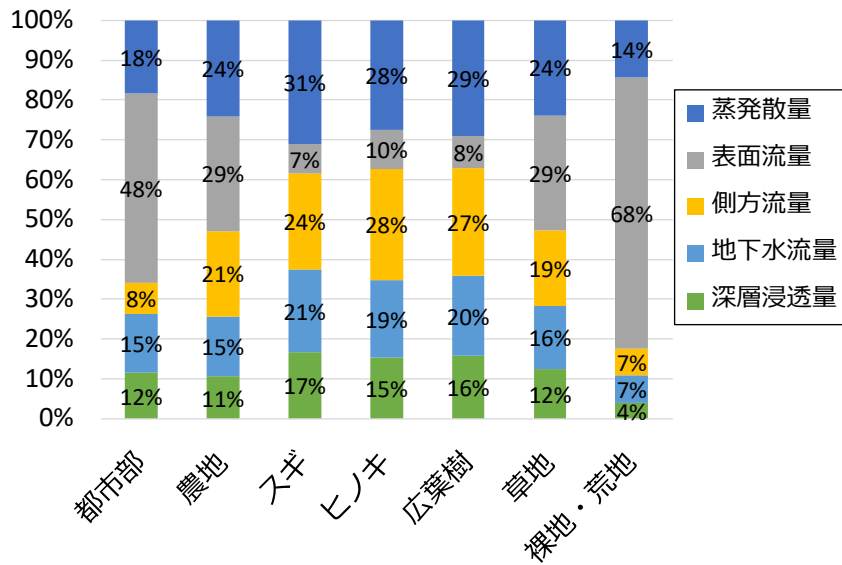


図 6-7 道志・現代モデルによるキャリブレーション後の土地利用別水収支（流出割合）

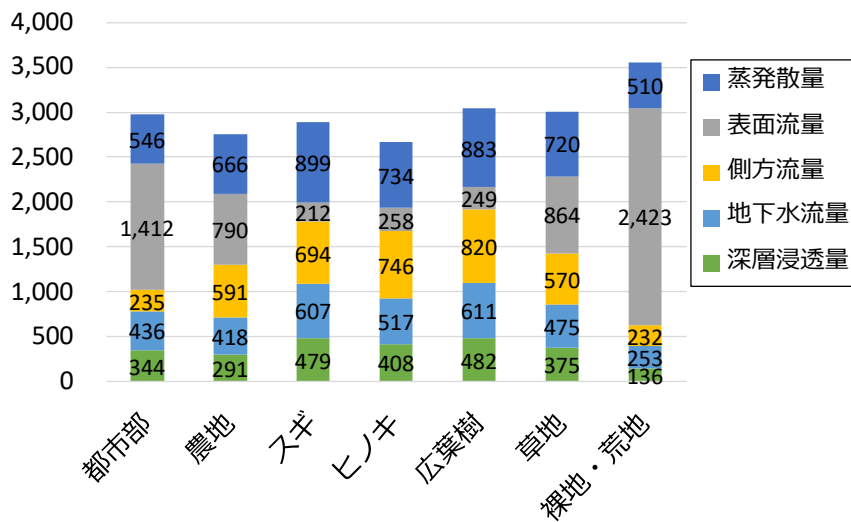


図 6-8 道志・現代モデルによるキャリブレーション後の土地利用別水収支（流出量）

2) 道志・過去モデル

道志・過去モデルにおいて流域全体の水収支を図 6-9 に示す。おおむね前述の現代モデルと同様に水収支を調整したため、側方流が大幅に減少し、地下水及び深層浸透量を多くなった傾向がみられた。ただし、蒸発散量は、32%~42%の程度で、やや過大な推定と考えられた。

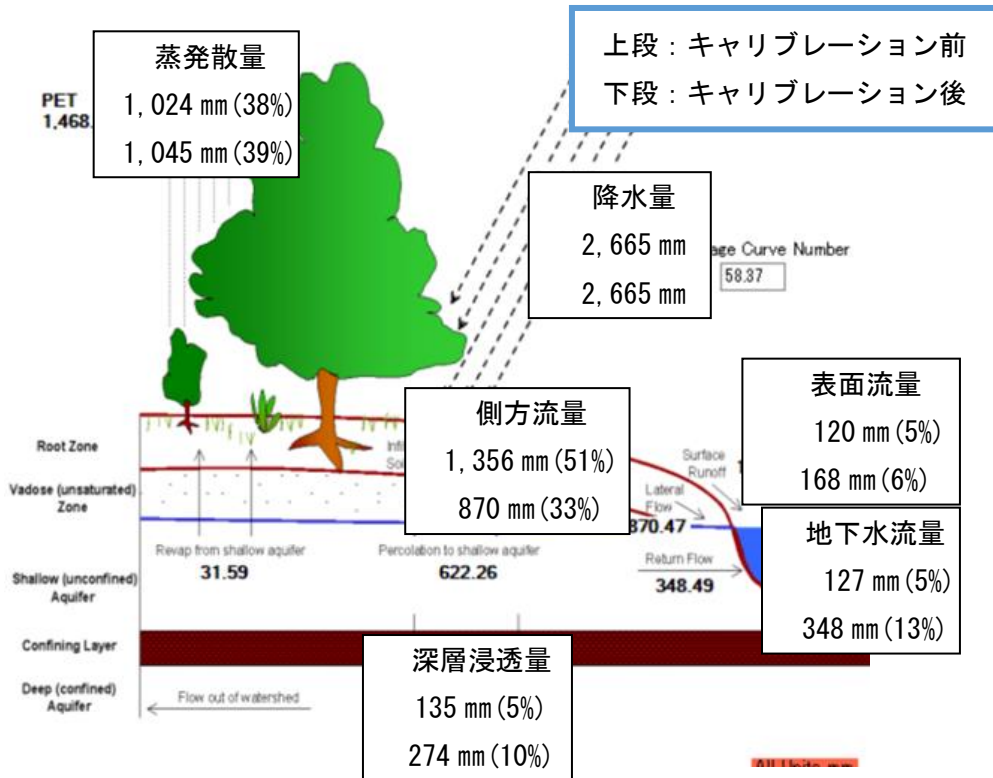


図 6-9 道志・過去モデルによるキャリブレーション前後の水収支（流域全体）

道志・過去モデルにおいてキャリブレーション前後の林相・土地利用別に算出した水収支の結果を図 6-10、図 6-11、図 6-12、図 6-13 に示す。林相別（スギ、ヒノキ、広葉樹）において、表面流が低く、側方流が多い傾向となった。ただし、蒸発散量の割合がいずれも 30%以上で、一般的な知見である「20%程度」に比べて、過大な推定と考えられる。

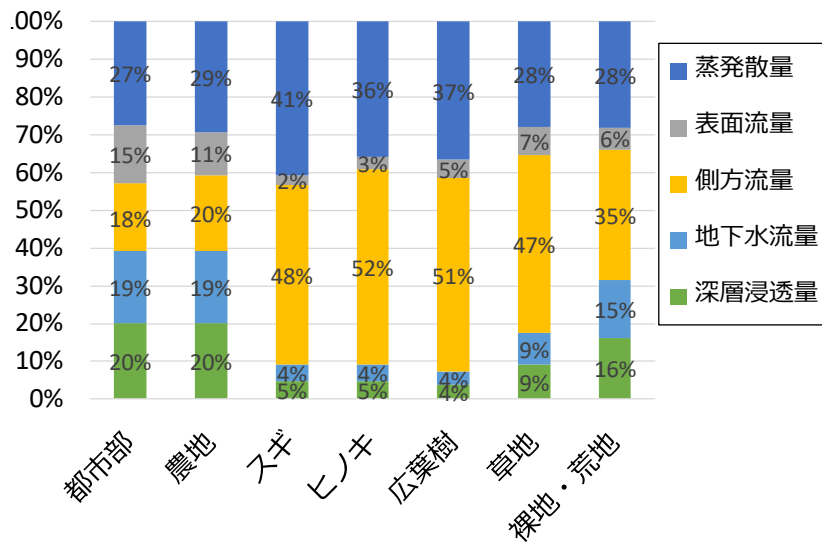


図 6-10 道志・過去モデルによるキャリブレーション前の土地利用別水収支（流出割合）

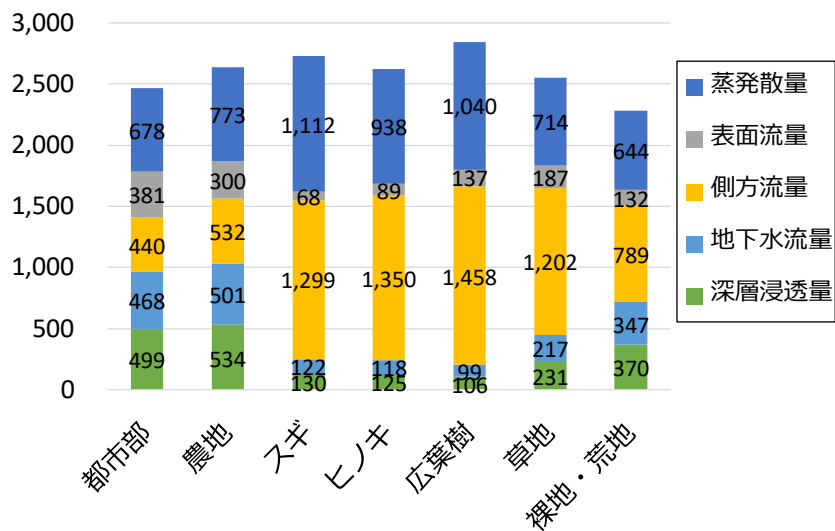


図 6-11 道志・過去モデルによるキャリブレーション前の土地利用別水収支（流出量）

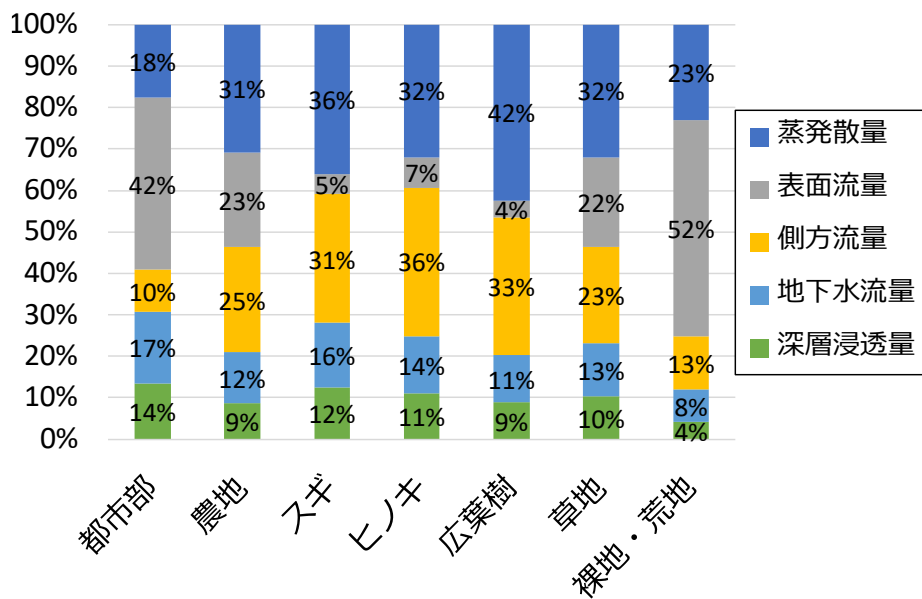


図 6-12 道志・過去モデルによるキャリブレーション後の土地利用別水収支（流出割合）

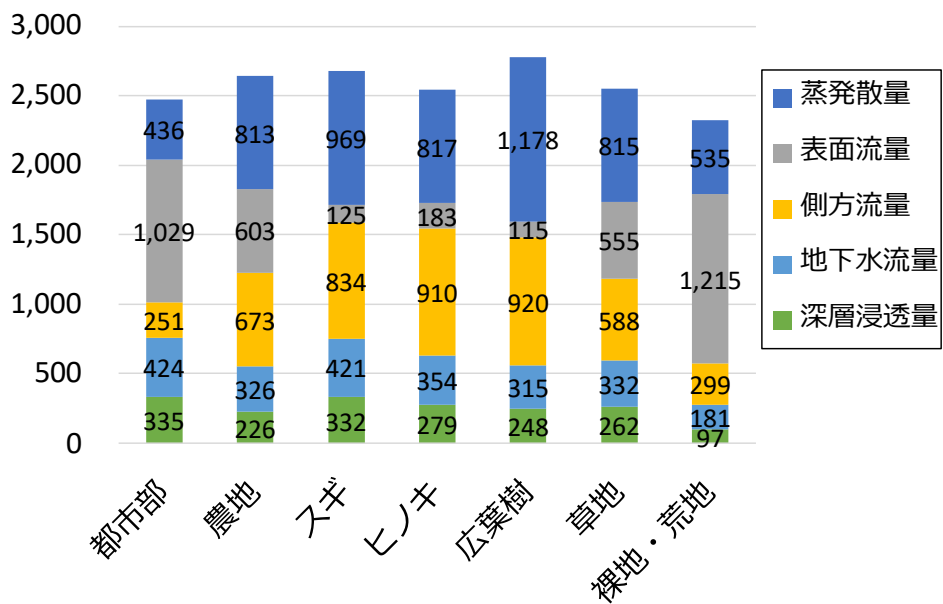


図 6-13 道志・過去モデルによるキャリブレーション後の土地利用別水収支（流出量）

3) 三保・現代モデル

三保・現代モデルにおいて流域全体の水収支を図 6-14 に示す。キャリブレーション後の蒸発散量の割合が 25%程度で、やや高くなった。また、側方流量はキャリブレーション前の 1,717mm に対して、キャリブレーション後では 559mm に大幅に減少したことにより、地下水流量及び深層浸透量が増加した。

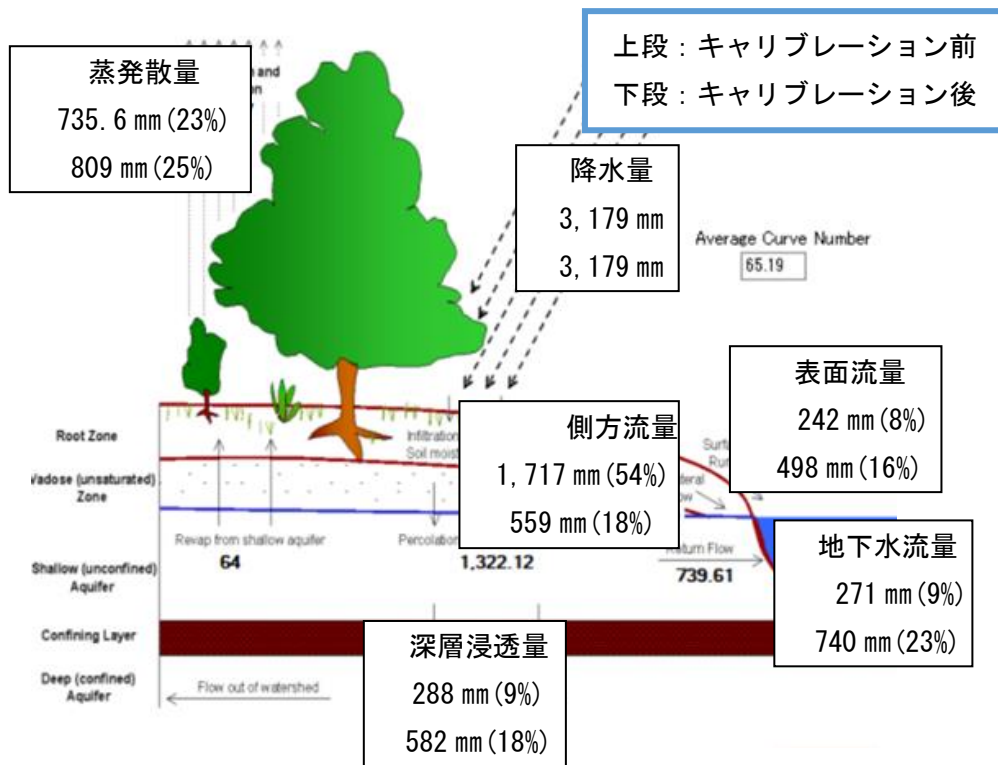


図 6-14 三保・現代モデルによるキャリブレーション前後の水収支（流域全体）

三保・現代モデルにおいてキャリブレーション前後の林相・土地利用別に算出した水収支結果を図 6-15、図 6-16、図 6-17、図 6-18 に示す。おおむね道志ダム流域と同様に水収支を調整した。また、今年度に追加した崩壊地では、最も多い表面流量（割合 73%）となった。

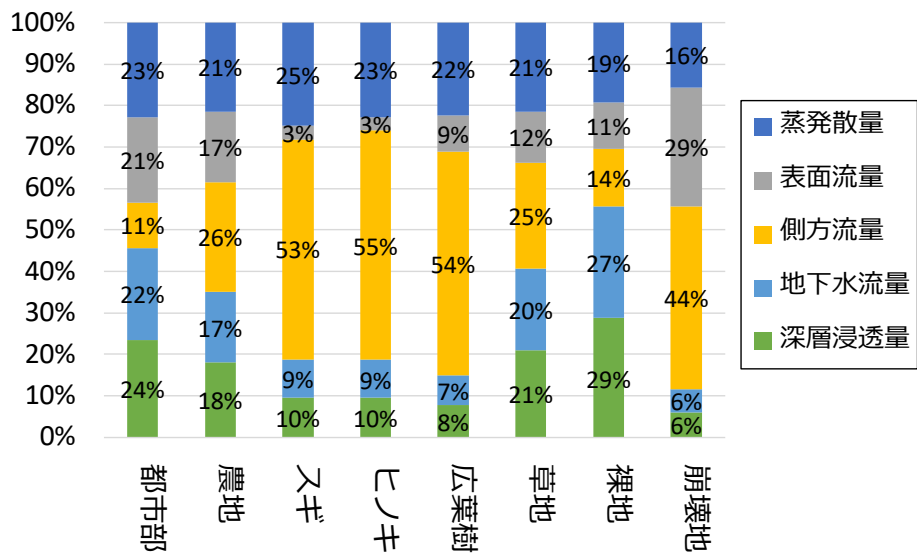


図 6-15 三保・現代モデルによるキャリブレーション前の土地利用別水収支（流出割合）

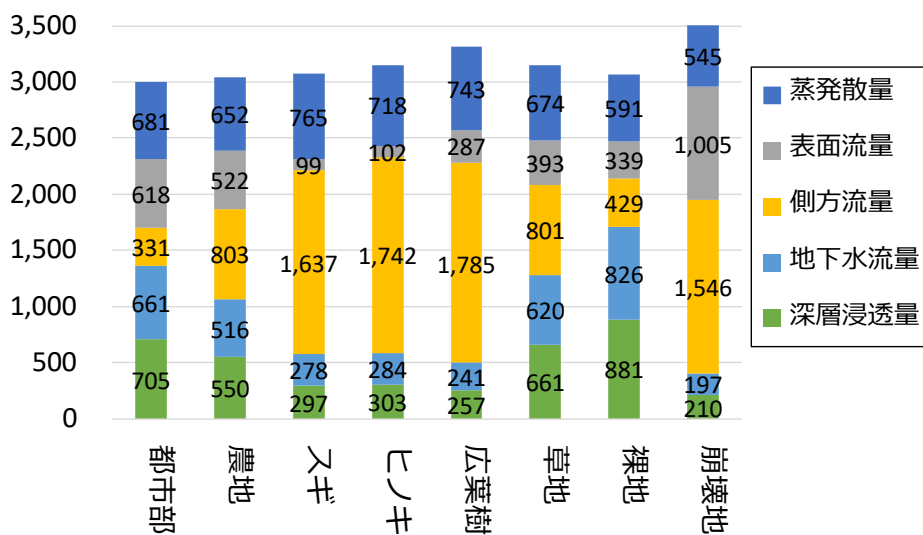


図 6-16 三保・現代モデルによるキャリブレーション前の土地利用別水収支（流出量）

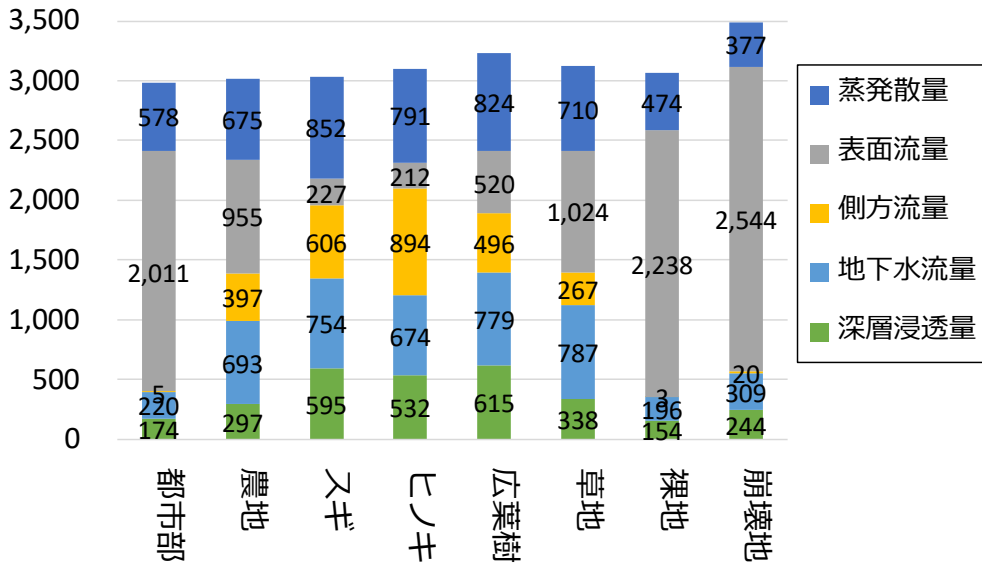


図 6-17 三保・現代モデルによるキャリブレーション後の土地利用別水収支（流出割合）

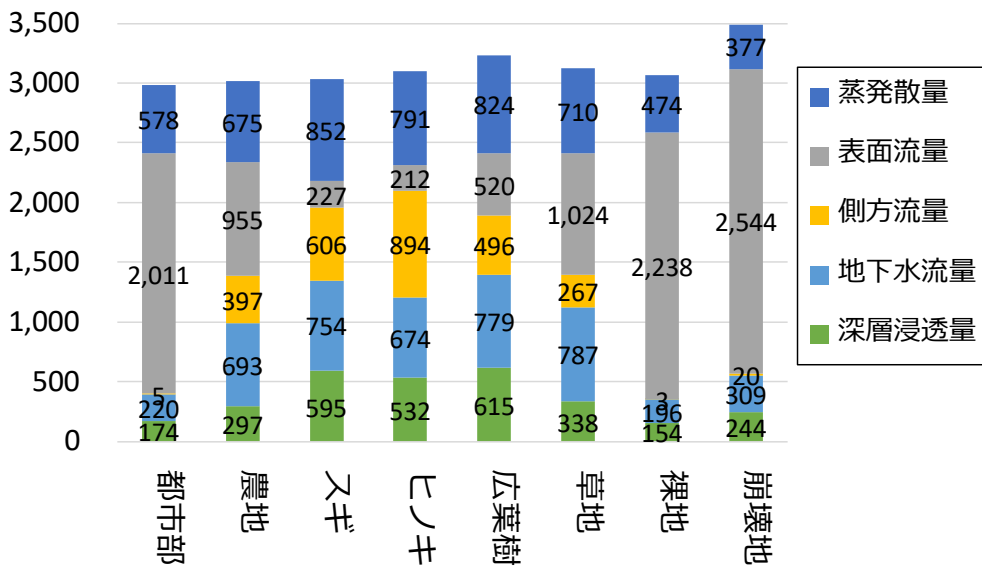


図 6-18 三保・現代モデルによるキャリブレーション後の土地利用別水収支（流出量）

4) 三保・過去モデル

三保・過去モデルにおいて流域全体の水収支を図 6-19 に示す。キャリブレーションによって、降雨量 2776mm に対して、蒸発散量の割合が 27%程度であり、側方流量と地下水流量はそれぞれ 426mm (15%) と 736mm (27%) に推定された。

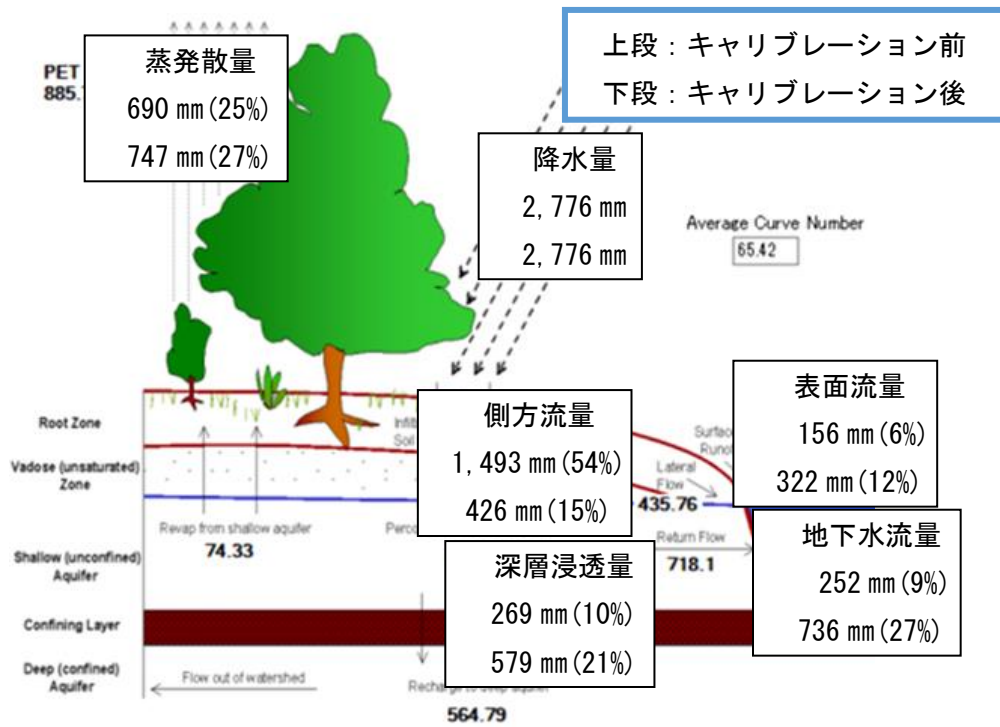


図 6-19 三保・現代モデルによるキャリブレーション前後の水収支（流域全体）

三保・過去モデルにおいてキャリブレーション前後の林相・土地利用別に算出した水収支の結果を図 6-20、図 6-21、図 6-22、図 6-23 に示す。おおむね前述した三保現代モデルと同様に水収支を調整した。崩壊地では、都市部及び裸地と同じ程度（約 60%）の表面流量を推定された。

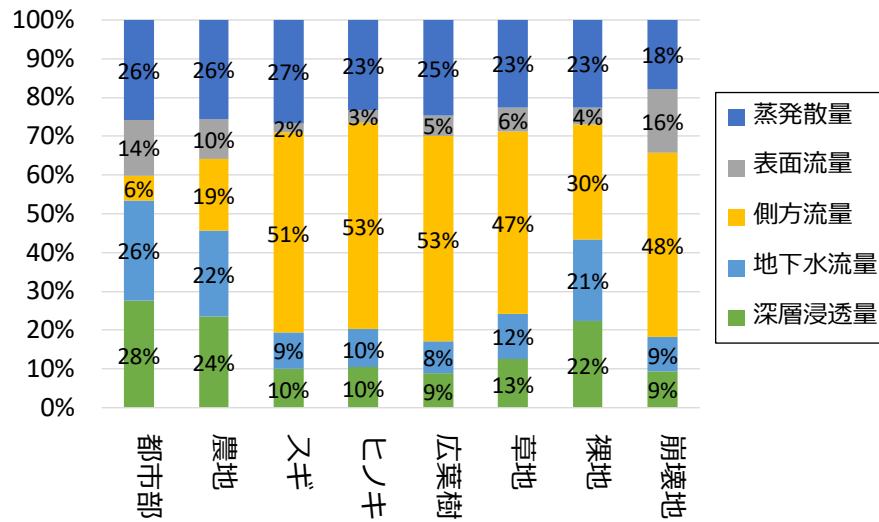


図 6-20 三保・過去モデルによるキャリブレーション前の土地利用別水収支（流出割合）

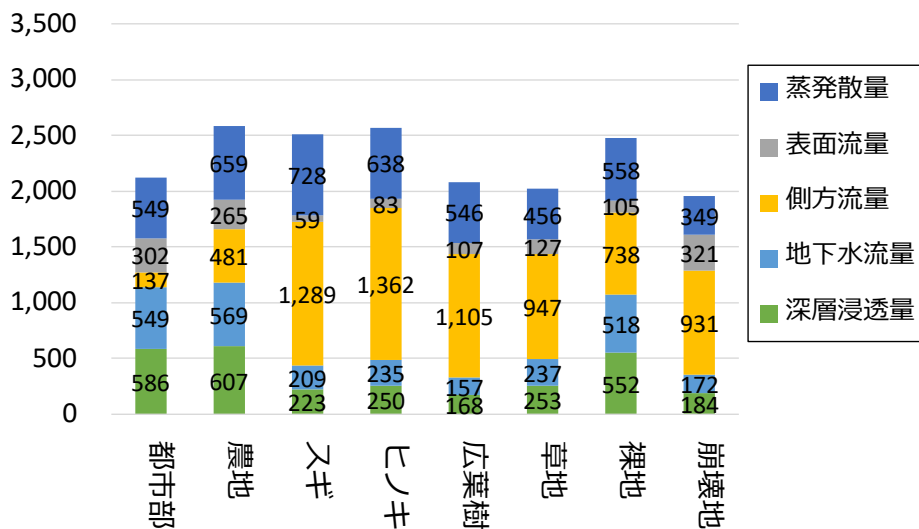


図 6-21 三保・過去モデルによるキャリブレーション前の土地利用別水収支（流出量）

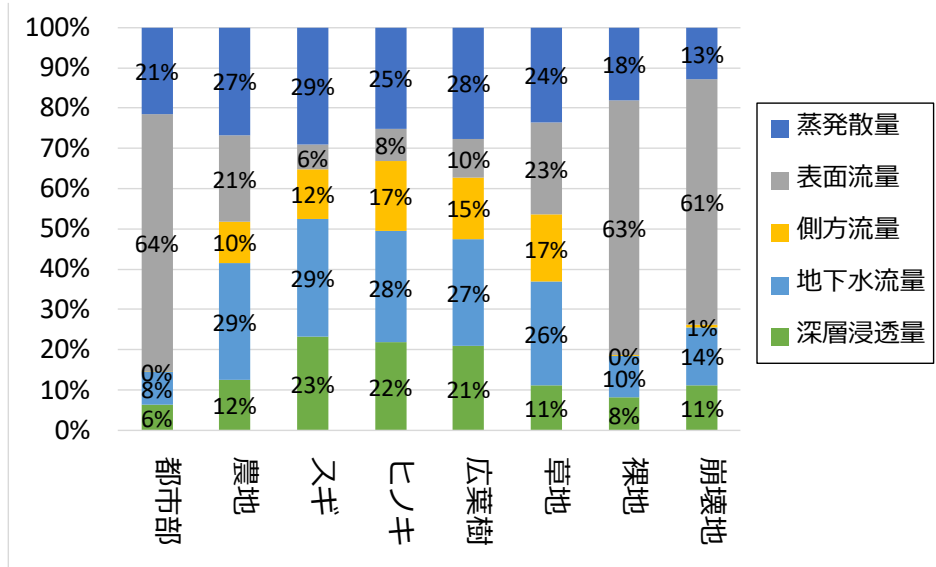


図 6-22 三保・過去モデルによるキャリブレーション後の土地利用別水収支（流出割合）

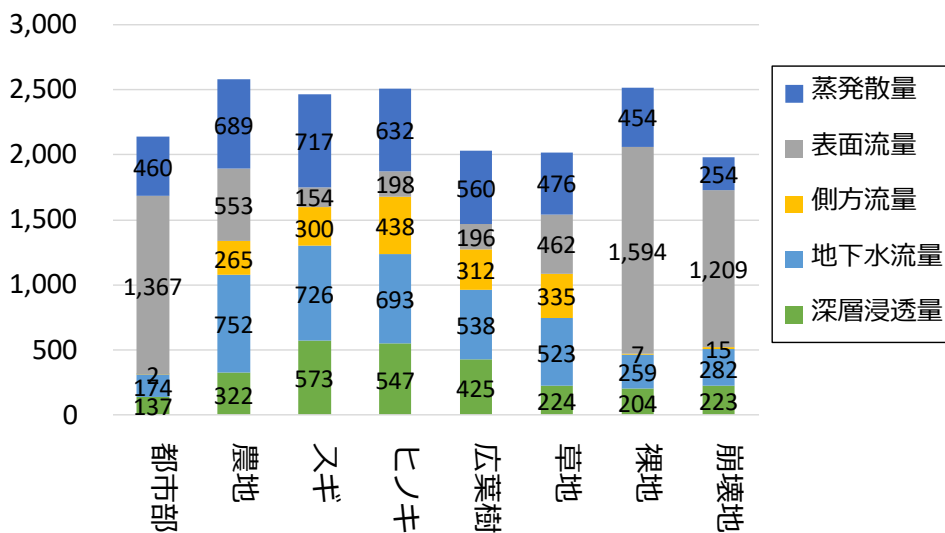


図 6-23 三保・過去モデルによるキャリブレーション後の土地利用別水収支（流出量）

(2) 流量ハイドログラフ、実測値・推定値の比較（散布図）

1) 道志・現代モデル

キャリブレーション前後の道志・現代モデルによる流量推定値のハイドログラフをそれぞれ図 6-24、図 6-25 に、実測値と推定値の比較散布図を図 6-26 に示す。キャリブレーションによって、評価指標の RSR と NSE はいずれ Good、Very Good と高い評価結果が得られた。河川流出の再現性については、全シミュレーション期間はおおむね実測値に近い値が得られた。ただし、平水時の推定流量がやや過大となり、出水時はやや過少となる推定傾向がみられた。期間切り出しハイドログラフ（図 6-25）をみると、ピークのタイミング及びピーク流量は再現できているものの、平水流量は、実測値に比べ過大な傾向がみられた。

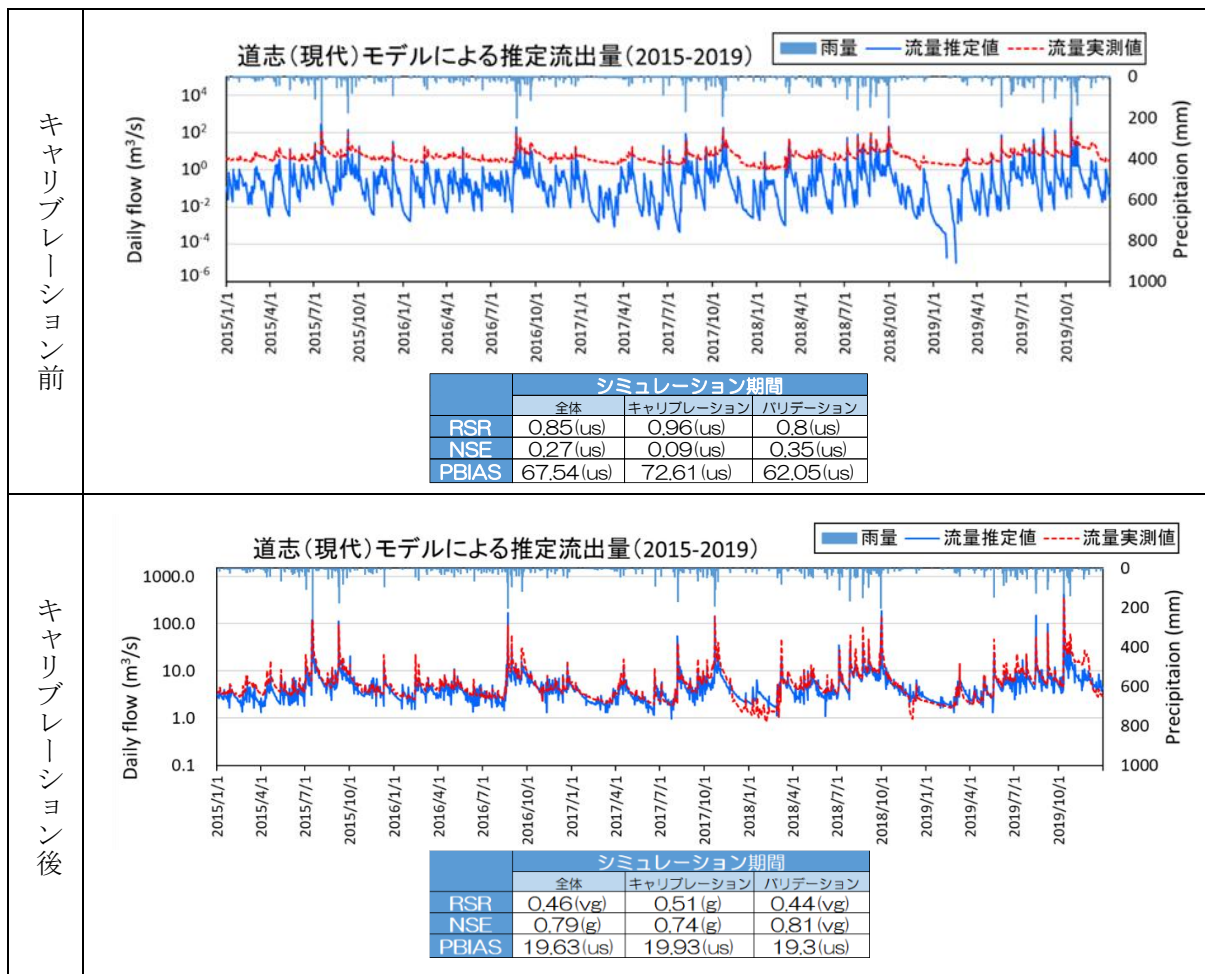


図 6-24 道志・現代モデルによるハイドログラフ (シミュレーション期間全体・対数)

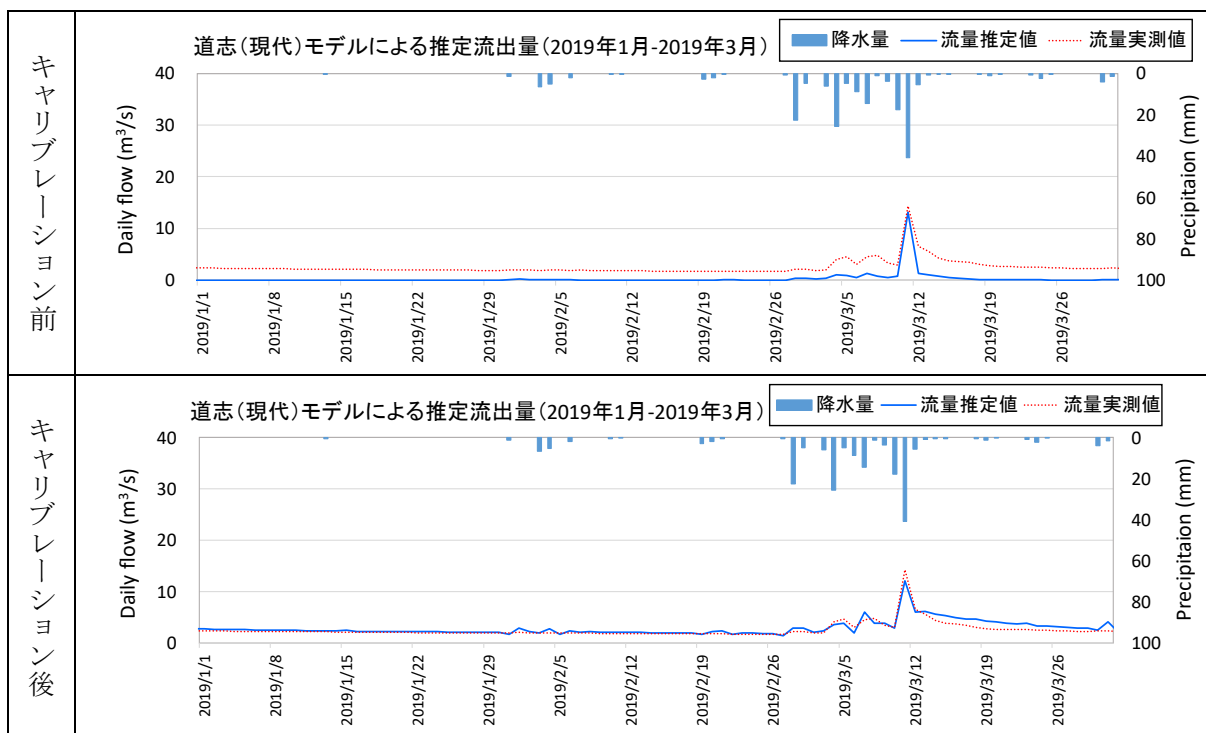


図 6-25 道志・現代モデルによるハイドログラフ（期間切り出し・実数）

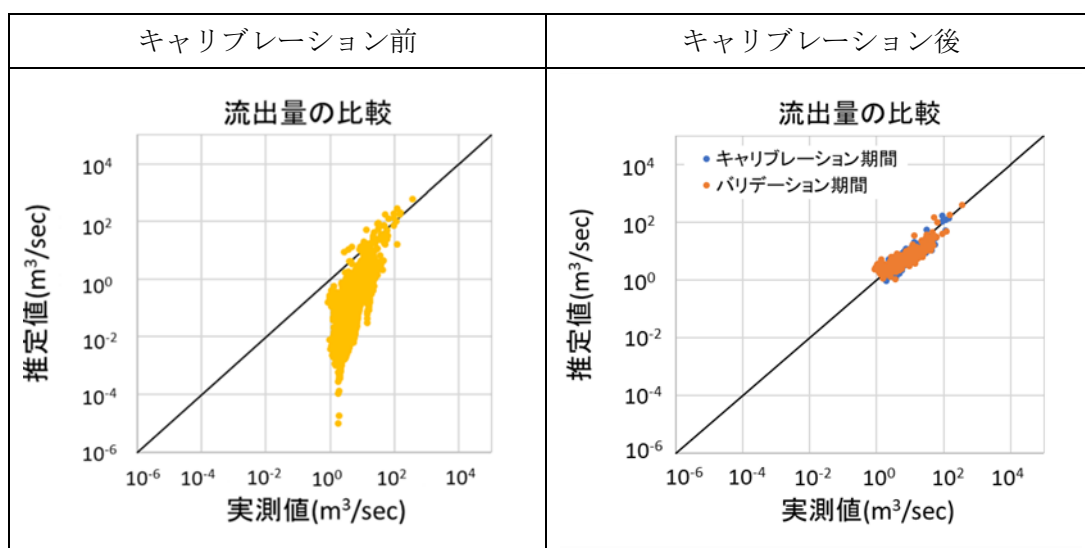


図 6-26 実測値・推定値（道志・現代モデル）の比較

2) 道志・過去モデル

キャリブレーション前後の道志・過去モデルによる流量推定値のヒドログラフをそれぞれ図 6-27、図 6-28 に、実測値と推定値の比較散布図を図 6-29 に示す。キャリブレーション後の道志・過去モデルは、評価指標の RSR、NSE において、いずれも Satisfactory、Very Good とキャリブレーション前よりも改善した。全体的にピーク流量の再現は良好であるが、平水時が過少推定の傾向については改善の余地が残った。

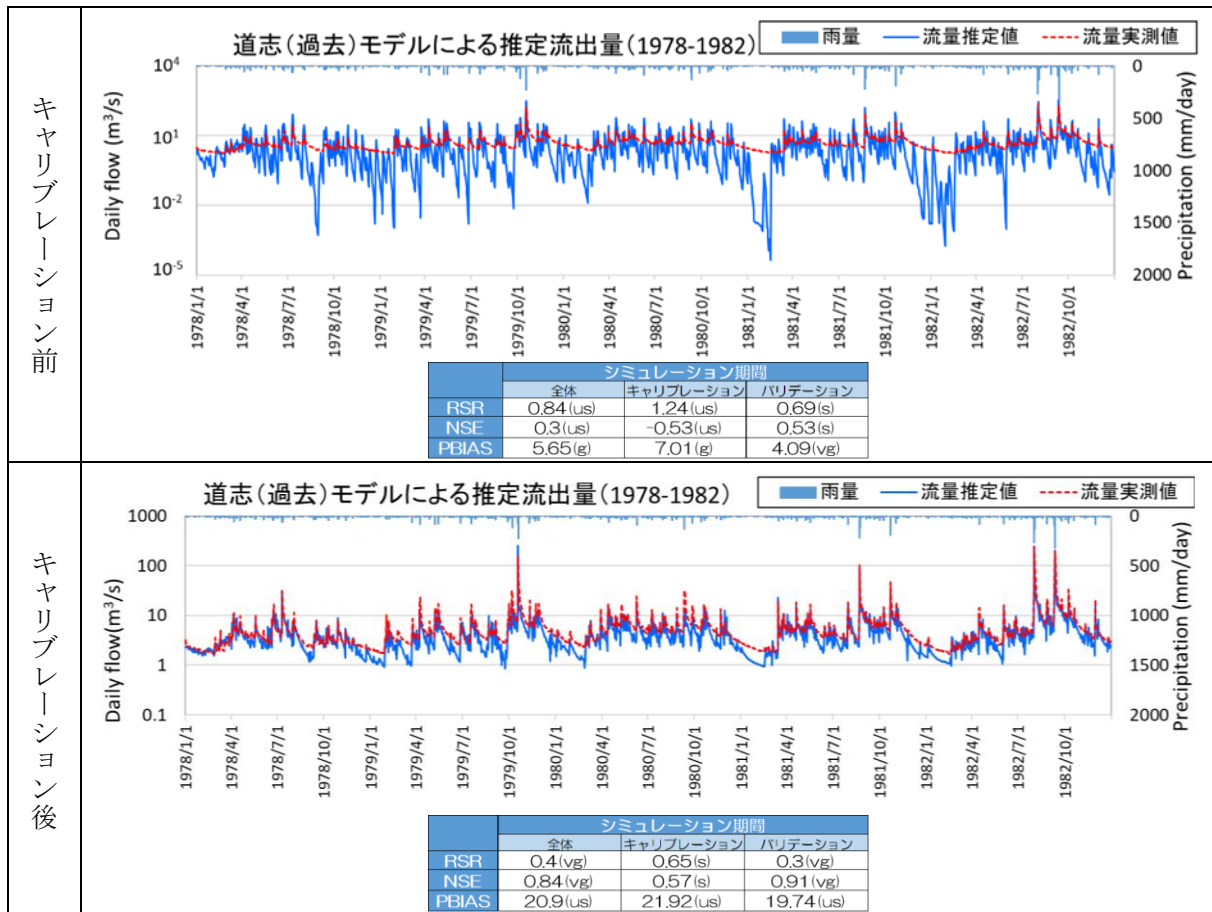


図 6-27 道志・過去モデルによるヒドログラフ (シミュレーション期間全体・対数)

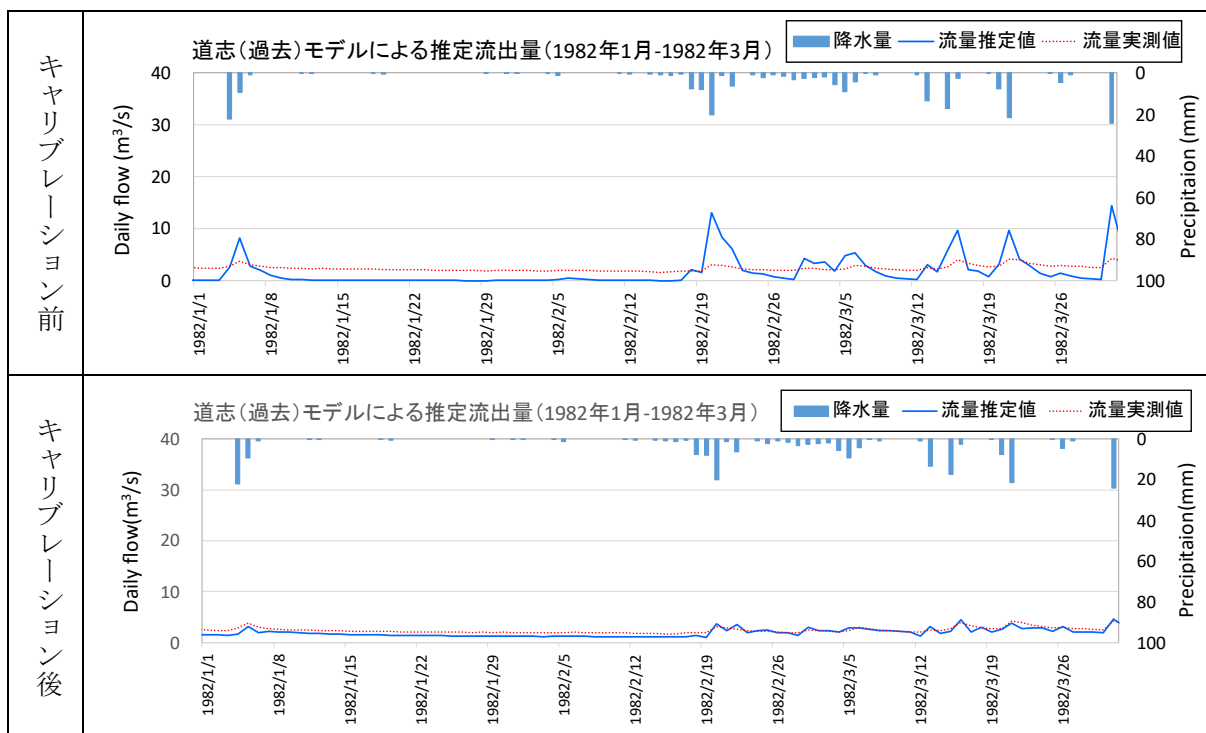


図 6-28 道志・過去モデルによるハイドログラフ（期間切り出し・実数）

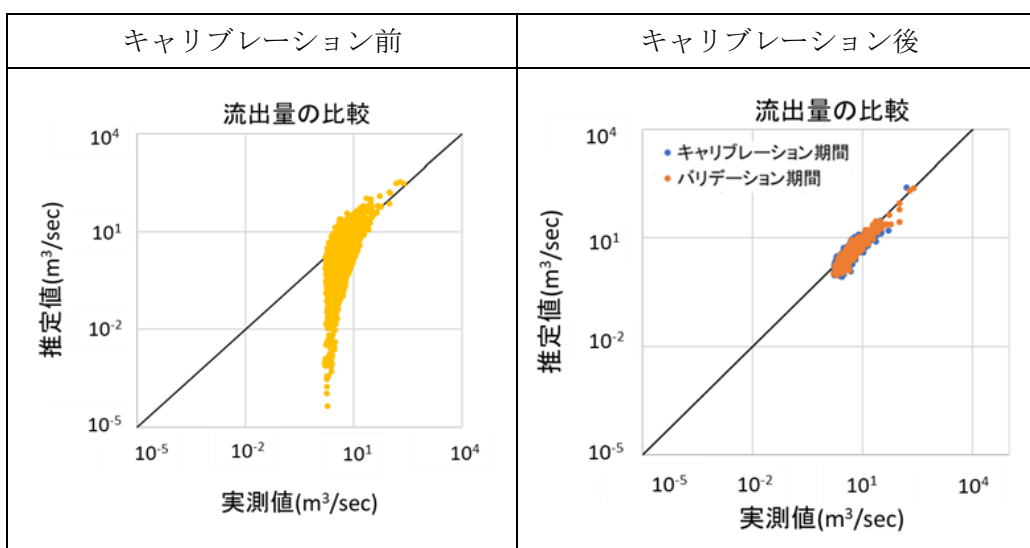


図 6-29 実測値・推定値（道志・過去モデル）の比較

3) 三保・現代モデル

キャリブレーション前後の三保・現代モデルによる流量推定値のハイドログラフをそれぞれ図 6-30、図 6-31 に、実測値と推定値の比較散布図を図 6-32 に示す。キャリブレーション後の三保・現代モデルの再現精度は、評価指標である RSR と NSE において Good 及び Very Good が得られるなど、大幅に改善した。全体的にピーク流量の再現は良好であるが、通減時の推定値が実測値よりやや低い傾向となった。

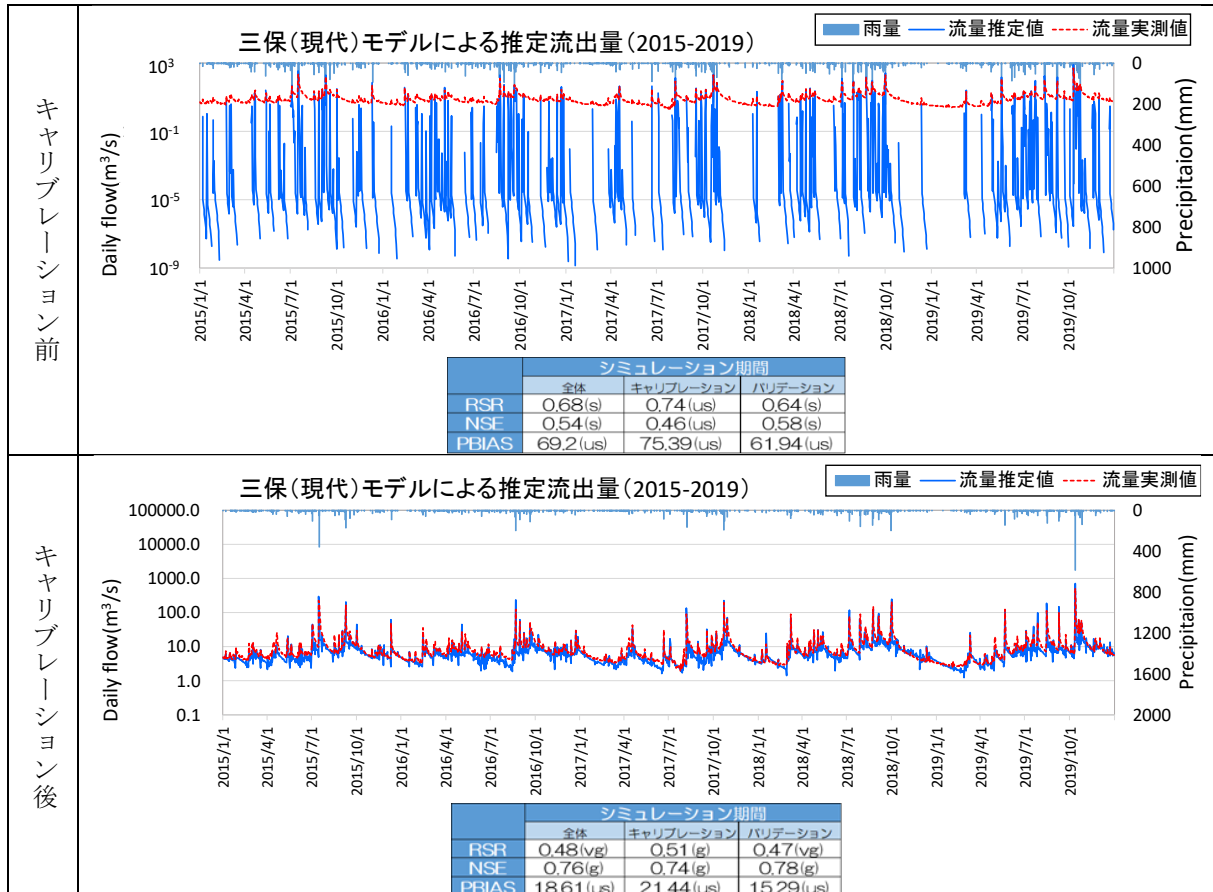


図 6-30 三保・現代モデルによるハイドログラフ (シミュレーション期間全体・対数)

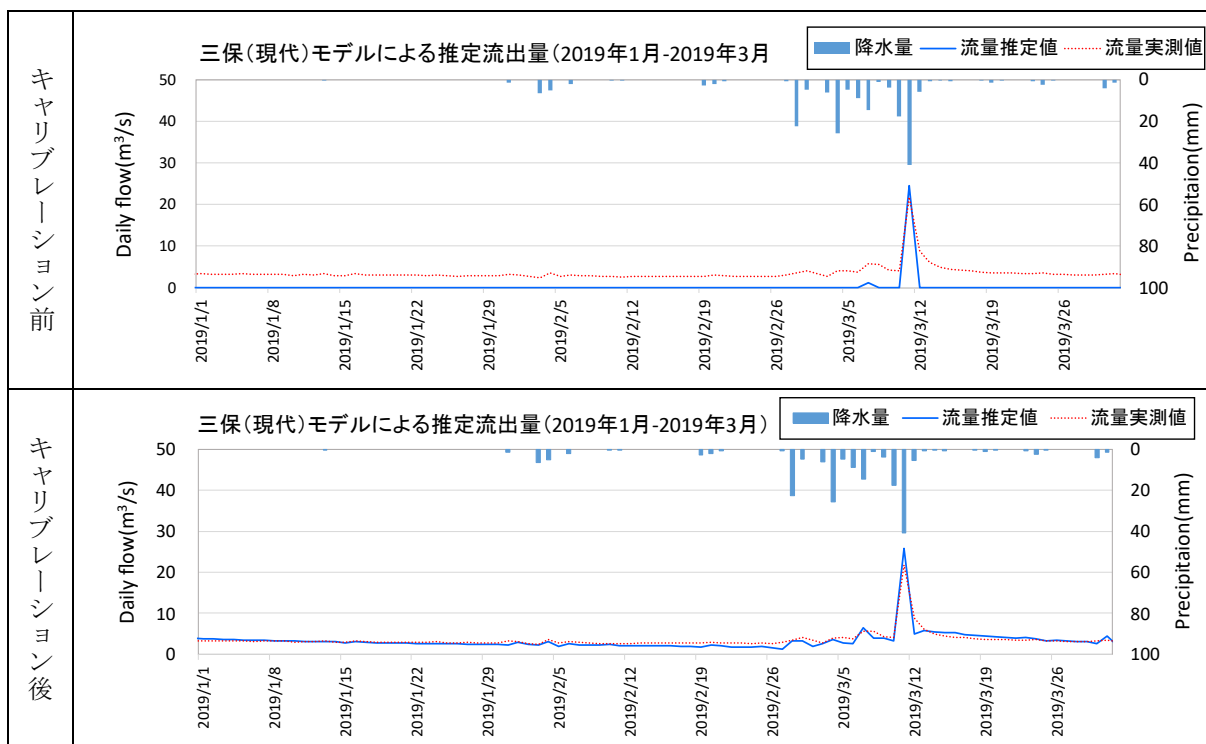


図 6-31 三保・現代モデルによるハイドログラフ（期間切り出し・実数）

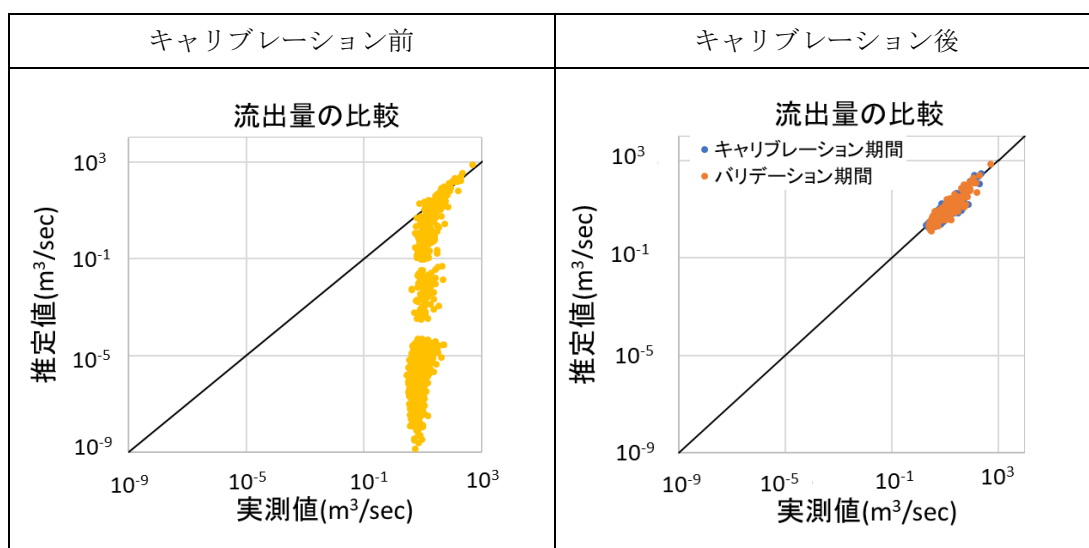


図 6-32 実測値・推定値（三保・現代モデル）の比較

4) 三保・過去モデル

キャリブレーション前後の三保・過去モデルによる流量推定値のハイドログラフをそれぞれ図 6-33、図 6-34 に、実測値と推定値の比較散布図を図 6-35 に示す。過去モデルの評価精度は、いずれも現代モデルより低い評価となった。また、平水時の推定流出量は実測値より、やや低いことを示した。

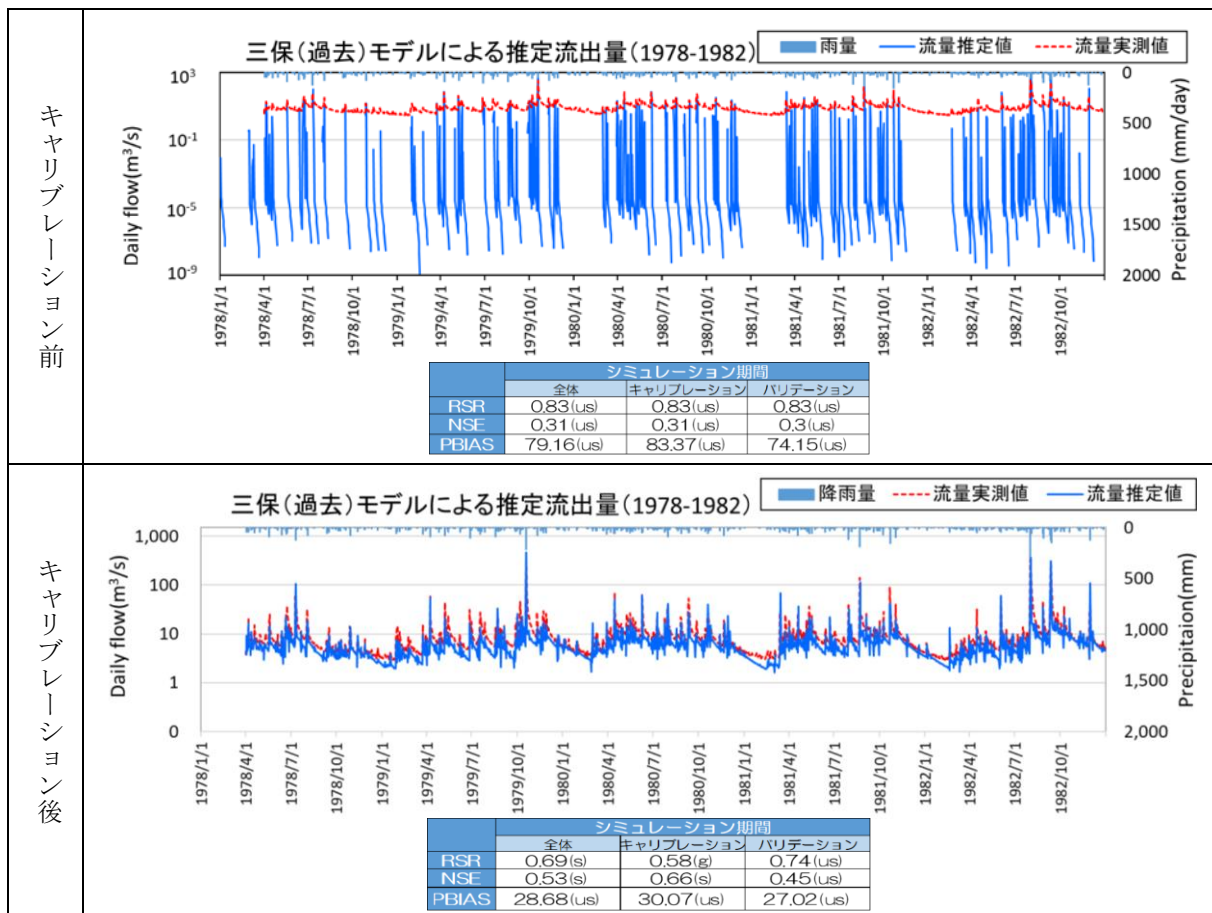


図 6-33 三保・過去モデルによるハイドログラフ (シミュレーション期間全体・対数)

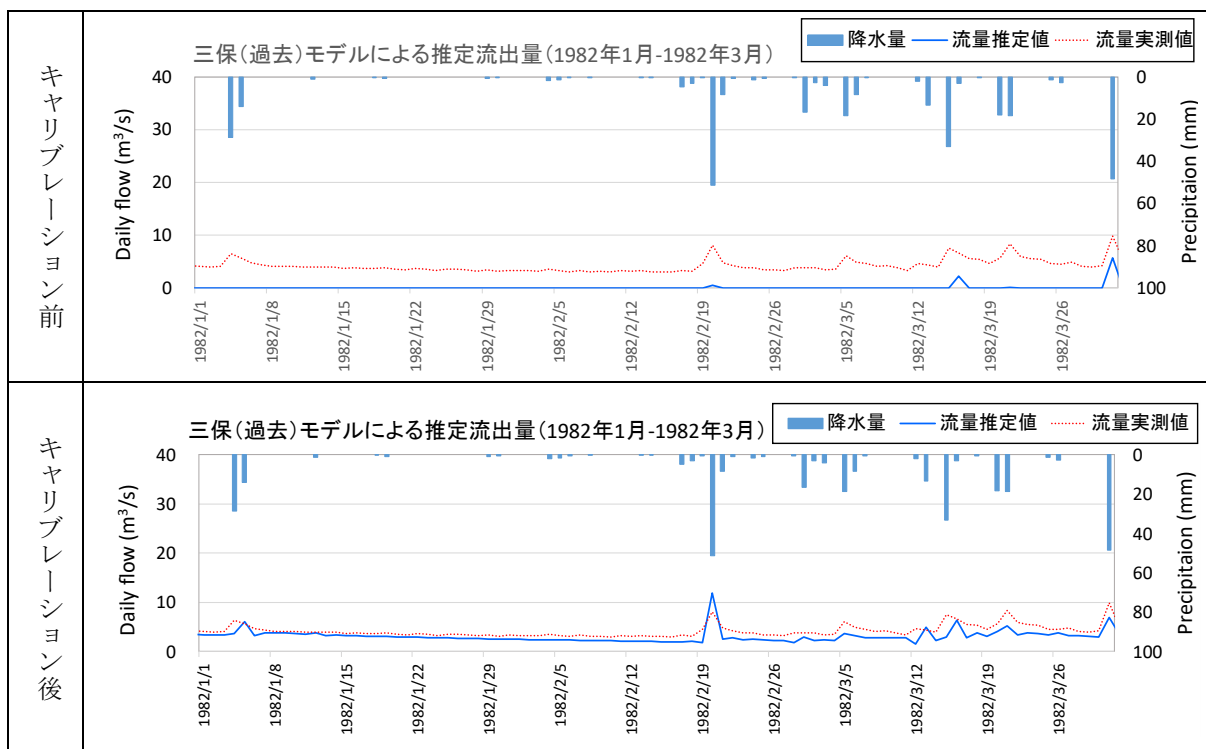


図 6-34 三保・過去モデルによるハイドログラフ (期間切り出し・実数)

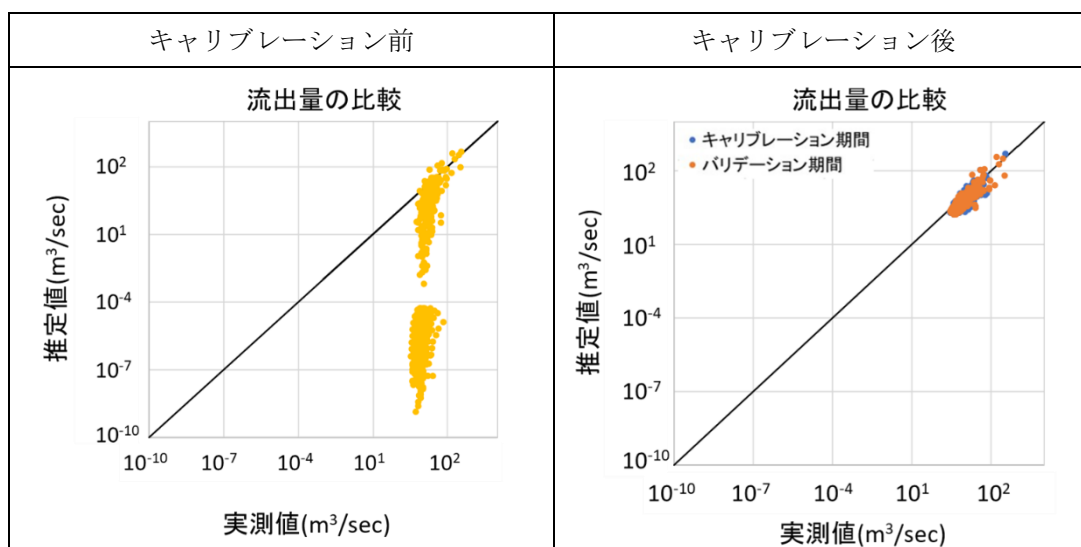


図 6-35 実測値・推定値 (三保・過去モデル) の比較

6.2.3. 流出総量及び流出率の比較

各モデルの最下流地点における河川流量推定値と実測値について、モデル推定精度とともに表 6-4 に示す。河川流量について、道志・現代モデルでは実測値 1,986mm に対し、推定値は 2,085mm であった。道志・過去モデルでは実測値 1,681mm に対し、推定値は 1,659mm であった。実測値と推定値の差はそれぞれが 99mm、22mm であった。一方、三保・現代モデルでは、実測値に 2,124mm に対し、推定値は 2,360mm であった。三保・過去モデルでは、同様に 1,944mm に対し、2,036mm であった。実測値と推定値の差はそれぞれが 236mm、92mm であった。一方、道志モデル及び三保モデルの実測と推定の河川流出率を比較すると、流出率の差は 0.01~0.07 となったため、大きな違いがないことが示唆された。以上の結果から、河川流量の推定値と実測値との差があったが、許容範囲内であると考えられる。

また、年平均降雨量が多いほど、河川流量が多く、流出率が大きくなる傾向がみられた。河川流量及び流出率は降雨量の影響を強く受けると考えられた。

表 6-4 構築・精緻化したモデルによる推定結果（河川流量）

※各流出量の単位：mm/年

モデル	貝沢		道志・現代		道志・過去		三保・現代		三保・過去		
期間 (年)	2013-2015		2015-2019		1978-1982		2015-2019		1978-1982		
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	実測	モデル	
推定 精度	NSE、 RSR		very good		very good		very good		very good、 good		satisfactory
	PBIAS		good		unsatisfactory		unsatisfactory		unsatisfactory		very good
降水量 (mm)	1,733		2,998		2,665		3,179		2,776		
河川流量 (mm)	758	890	1,986	2,085	1,681	1,659	2,124	2,360	1,944	2,036	
流出率	0.43	0.51	0.66	0.70	0.63	0.62	0.67	0.74	0.70	0.73	

※各流出量の単位：mm/年、貝沢モデルは R3 年度に構築・精緻化した

6.2.4. まとめと考察

今年度に精緻化したモデル及び新構築した三保・過去モデルは、主に昨年度と同様な初期値、かつ、今年度に再検討した蒸発散、地表、土壌関係パラメータの値を設定し、シミュレーションを行った。キャリブレーション前の結果は、河川流出量の推定値と実測値に大きな乖離があり、非現実的な水収支が推定された。さらに、キャリブレーションを行うことで、推定値と実測値との乖離が小さくなり、十分な河川流出の再現精度が得られた。水収支については、前述の地形や土壌に関するパラメータを調整したことで、既往の知見に近い割合が得られた。以上から、おおむねモデルの水収支及び、流出特徴を把握することができたと考えられる。

また、モデルの再現性が確保されたことで、調整したパラメータを用いて次の項のシナリオ解析を実施することが可能となった。

7. モデルを用いたシナリオ解析・評価

7.1. シナリオ解析・評価の作業フロー

シナリオ解析・評価は、図 7-1 の作業フローに沿って進めた。

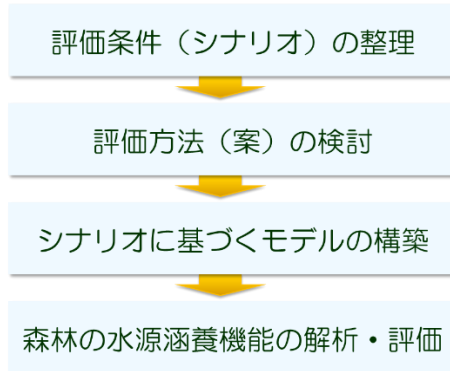


図 7-1 シナリオ解析・評価の作業フロー

7.2. 評価条件（シナリオ）の整理

本事業においては、森林の水源涵養機能を評価する観点を、森林の管理状態、成熟状態、荒廃からの回復状態としている。これらの評価の方法として2つのパターンを検討した。

当該流域における過去 40 年間にわたる森林の変化が水源涵養機能に及ぼす影響について定量的な評価を行うパターン、もう一つは、森林整備の有無により仮想的に変化させ、実態とは異なる林分条件の下において流域の水源涵養機能がどう変化するか予測・評価することを行うパターンである。前者を実態シナリオ、後者を仮想シナリオと表記し、それぞれの特徴について図 7-2 に整理した。

評価の観点	実態シナリオ	仮想シナリオ
	森林の管理状態別	過去40年間にわたる森林の変化が水源涵養機能に及ぼす影響に関する定量的な評価 ✓ 過去・現代の各時点別
森林の成熟状態別	過去・現代の林相（実態）	評価目的に応じて操作した林相（仮想）
森林の荒廃状況別	—	樹種 / 林齢 / 林分密度
適用する気象条件	平均的な降雨年 / 豊水年 / 渇水年	同左（または適宜設定）

図 7-2 シナリオ条件の整理

7.2.1. 評価方法の検討

(1) 評価パターン

評価軸（水収支、洪水緩和機能、水資源貯留（水量調節）機能）毎に、最終的に評価したい観点（異なる森林状態）を踏まえ、シナリオタイプ、林相タイプ、降雨パターンを組み替えた、様々な評価パターンを作成した。図 7-3 は、水収支の評価を行うための各パターンのイメージである。

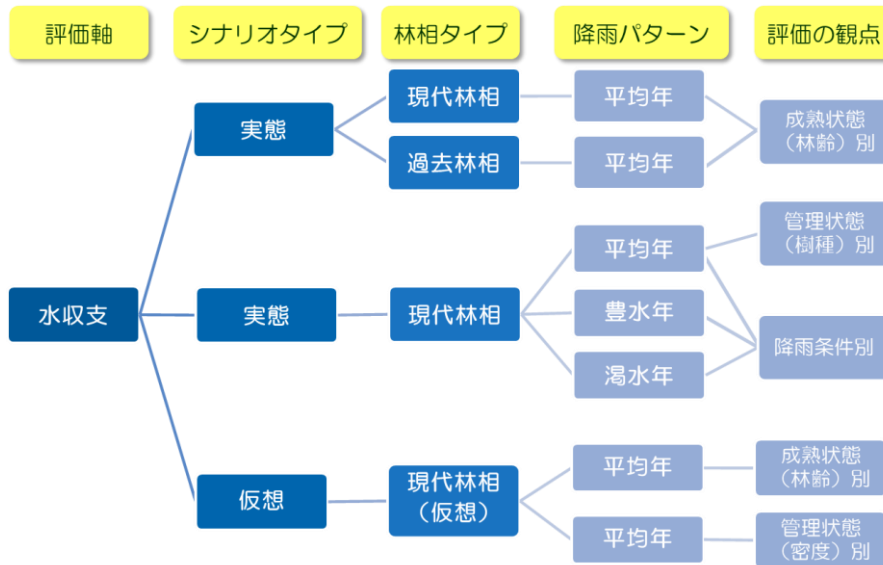


図 7-3 評価軸に応じた評価パターンイメージ（水収支の例）

前述のとおり、シナリオタイプは実態シナリオと仮想シナリオの2タイプとし、実態シナリオでは、現代・過去の各時点における実態の林相が水源涵養機能に及ぼす影響についての定量的な評価を行う。仮想シナリオでは、仮想的に設定した林相が水源涵養機能に及ぼす影響についての予測・評価を行うこととする。評価の観点として、森林の成熟状態（林齢）や管理状態（樹種・密度）のほか、降雨条件の違いについても考慮することとした。

降雨条件は、各評価軸（水収支、洪水緩和機能、水資源貯留（水量調節）機能）の分析・評価に有効な条件を設定する必要があることから、降雨パターンとして、平均年・豊水年・渇水年・豪雨年の4パターンを用意し、評価軸毎に適切な降雨パターンを適用することとした（表 7-1）。

表 7-1 評価軸毎のインプット降雨パターン

評価軸	インプットする降雨パターン
水収支	平均年・豊水年・渇水年
洪水緩和機能	豪雨年
水資源貯留（水量調節）機能	平均年、渇水年

降雨パターン毎のデータは、「4.2 着目すべき降雨年の選定」に記載のとおり、昭和 53（1978）年から令和元（2019）年までの過去 42 年間の降雨データから抽出した。

「平均年」は、当事業の現代モデルシミュレーション期間のうち、過去 42 年間の平均降雨量

と最も近い降雨量がみられた 2015 年、「豊水年」は、過去 42 年間で最も降雨量の多かった 1998 年、「渇水年」は、同期間において最も降雨量の少なかった 1984 年とした。また、「豪雨年」は、三保ダム流域で日雨量約 110 mm、最大時間雨量約 25 mm を記録した台風 20 号通過時の 2018 年と、日雨量約 560 mm、最大時間雨量が約 76 mm の記録的短時間大雨情報により最大を記録した台風 19 号通過時の 2019 年とし、それぞれの年の降雨量を降雨インプットとしてモデルに適用した。

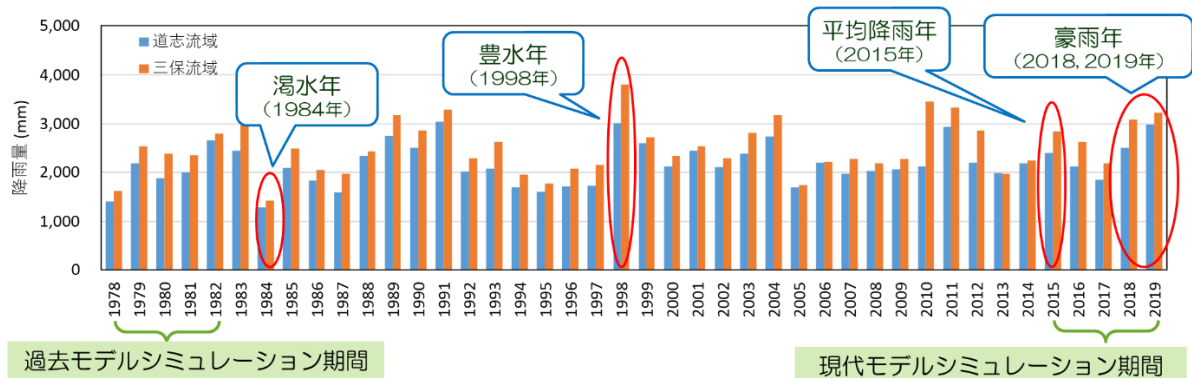


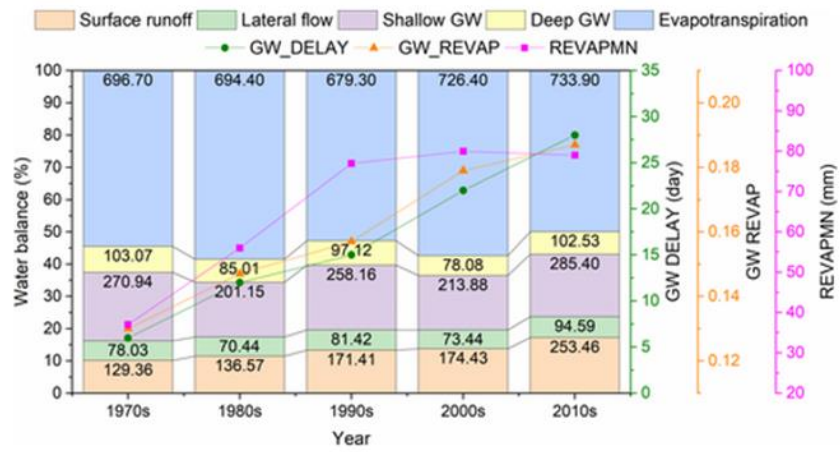
図 7-4 過去 42 年間の年降水量の変化及び抽出した降雨平均年・豊水年・渇水年・豪雨年（図 4-2 の再掲）

(2) 評価手法

モデルのアウトプットについて、的確な評価を行うためには、評価軸毎に適切な分析・可視化し、これらの手法を選択する必要がある。ここでは、既往文献等を参考に、評価軸毎の具体的な評価手法について検討した結果を述べる。

1) 水収支

水収支は、水収支を構成する各流出量（蒸発散量、表面流量、側方流量、地下水流量、深層浸透量）の割合について土地利用別（林相別）に比較を行えるよう、バーチャートなどのグラフで表す。



年代別の水収支を比較するバーチャートのイメージ (Wang, 2021²³)

²³ Wang, K., Onodera, S., Saito, M., Iwata, T. (2022) Effects of forest growth in different vegetation communities on forest catchment water balance. *Science of the Total Environment*, 151159.

2) 洪水緩和機能

洪水緩和機能は、主に森林土壌によって発揮され、森林土壌の状態の違いが、ピーク流量やピークのタイミングに影響を及ぼすと考えられている。そこで、本事業における洪水緩和機能は、流域全体における降雨に対する水の流出応答（降雨量に対する河川からの流出量を散布図で表したもの：図 7-5 参照）より、河川への流出量が急激に増加する降雨量のポイントに着目することや、豪雨イベント前後期間を対象として作成したハイドログラフより、ピーク流量やピークのタイミングの比較を行うこと（図 7-6 参照）により評価を行う。ハイドログラフにおける流出量の時間的な変化をより詳細に把握できるよう、モデル解析は時間単位で行うこととする。

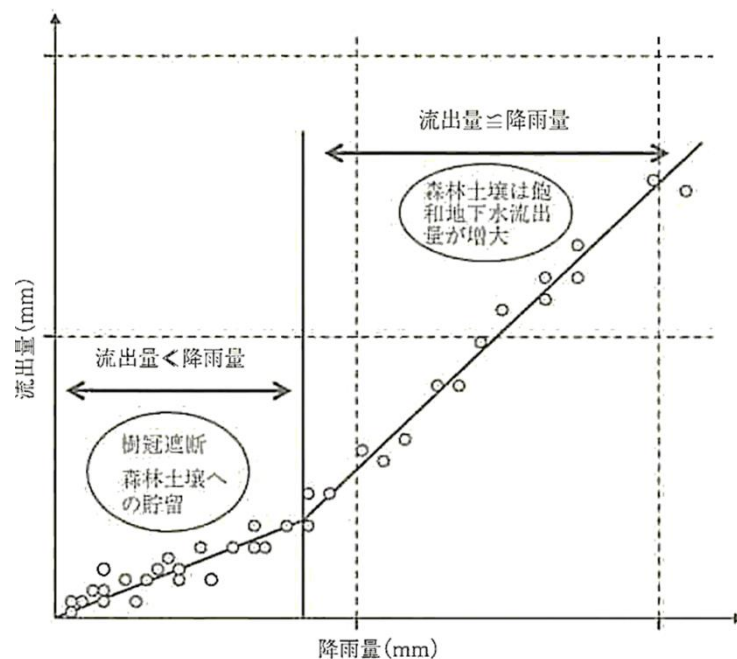


図 7-5 森林流域における降雨に対する水の流出応答の模式図
 (出典：恩田裕一・編「人工林荒廃と水・土砂流出の実態」(2008) 図 3.1.1)

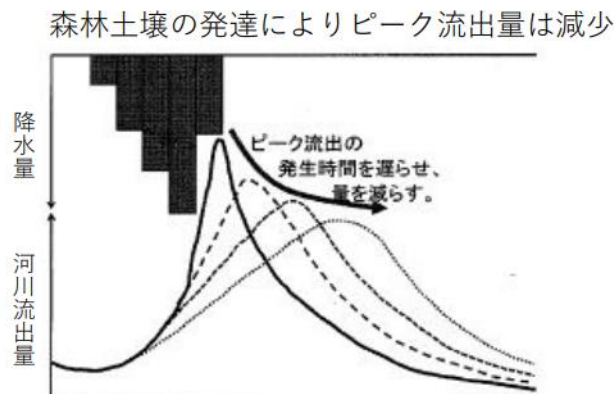


図 7-6 ハイドログラフによるピーク流量、ピークのタイミングの把握
 (出典：玉井幸治「森林の持つ『洪水災害の軽減機能』について」, 山林第 1635 号 (2020))

3) 水資源貯留（水量調節）機能

水資源貯留（水量調節）機能は、流域における日流量を、1年間のうち最も大きい日から、最も小さい日までを順に並べて流況曲線を作成し、特に、年間365日のうち275番目以降の日流量となる低水期、渇水期の流量に着目して評価を行う。

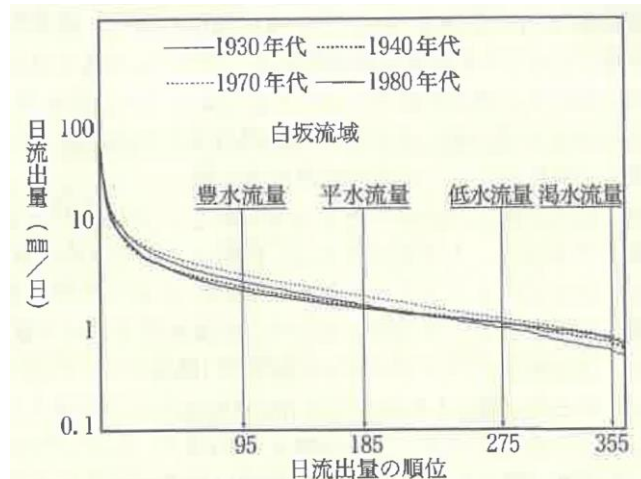


図 7-7 60年間の森林の成長にともなう流況曲線の変化 (Suzuki et al. 1994²⁴)

7.2.2. シナリオのモデル実装

(1) 実態シナリオ

上記の評価手法を踏まえ、検討した実態シナリオの一覧を表 7-2 に示す。表中の「D」は道志モデル、「M」は三保モデルを示しており、それぞれのモデルに評価軸に応じた降雨パターン（平均年、豊水年、渇水年、豪雨年）を適用し、シミュレーションを行う。基本的には同一の降雨条件（平均年、豊水年、渇水年、豪雨年）下において、現代と過去時点における林相の違いが各機能に及ぼす影響に関する評価を行う。

表 7-2 実態シナリオに基づくモデル構築計画

評価軸	時間スケール	評価方法	林相（時点別）と降雨パターン						
			現代モデル				過去モデル		
			平均年 (2015)	豊水年 (1998)	渇水年 (1984)	豪雨年 (2018- 2019)	平均年 (2015)	渇水年 (1984)	豪雨年 (2018- 2019)
①水収支	年	水収支構成割合	D1/M1 D2/M2	D2/M2	D2/M2	—	D1/M1	—	—
②洪水緩和機能	時間 (一降雨)	ハイドログラフ（ピーク 流量/流出遅延）	—	—	—	—	—	—	—
	日 (一降雨)	降雨-流出応答	—	—	—	D3	—	—	D3
③水資源貯留（水 量調節）機能	日	流況曲線（低水期・ 渇水期の流量）	D4/M4	—	D5/M5	—	D4/M4	D5/M5	—

²⁴ Suzuki, M., Liu, R., Nishio, K. and Ohta, T. (1994) Forest influences on ischarge duration curve using a 56-year daily discharge rate in two small watersheds. Proceedings of the International Symposium on Forest Hydrology 1994, 611–617.

(2) 仮想シナリオ

検討した仮想シナリオの一覧を表 7-3 に示す。実態シナリオと同様に、表中の「D」は道志モデル、「M」は三保モデルを示している。林齢別や密度別の評価を行う際には、気象や地形の違いが流出に及ぼす影響を取り除くため、仮想モデルについては流域内の森林地の樹種を同一樹種とすることとした。樹種としては、「スギ」、「ヒノキ」、「広葉樹」を設定可能であるが、今回は林齢別や密度別の評価においては、森林地を一律「スギ」とした「スギモデル」を、崩壊地の多さの評価においては、三保・現代モデルをベースとして、崩壊地率を変化させた複数のモデルを構築することとした。

表 7-3 実態シナリオに基づくモデル構築計画

評価の観点	評価軸	時間スケール	評価方法	林相（成熟状態、管理状態、荒廃状態別）と降雨パターン				
				スギモデル				三保崩壊モデル
				平均年 (2015)	豊水年 (1998)	渇水年 (1984)	豪雨年 (2018- 2019)	豪雨年 (2018-2019)
林齢別 (流域の森林域をすべて 0-10年生、20-30 年生、50年生以上 に変化させた場合)	①水収支	年	水収支構成割合	D11	—	—	—	—
	②洪水緩和機能	時間 (一降雨)	ハイドログラフ（ピーク流量/流出遅延）	—	—	—	M12	—
		日 (一降雨)	降雨-流出応答	—	—	—	—	—
③渇水緩和（水資源貯留）機能	日	流況曲線（低水期・渇水期の流量）	D14/M14	—	D15/M15	—	—	
林分密度別（流域の森林域をすべて疎、 中、密に変化させた場合）	①水収支	年	水収支構成割合	D21	—	—	—	—
	②洪水緩和機能	時間 (一降雨)	ハイドログラフ（ピーク流量/流出遅延）	—	—	—	M22	—
		日 (一降雨)	降雨-流出応答	—	—	—	—	—
③渇水緩和（水資源貯留）機能	日	流況曲線（低水期・渇水期の流量）	D24/M24	—	D25/M25	—	—	
崩壊地多寡別（現代林相で崩壊地率を変化させた場合）	②洪水緩和機能	時間	ハイドログラフ	—	—	—	—	M31

以降に示すシナリオ解析の結果について、シナリオのパターンを参照しやすくするため、各見出しの横に表中の番号（[D11] など）を付記した。

7.3. 結果

7.3.1. 実態シナリオ

(1) 水収支

1) 水収支構成割合（時点別・平均降雨年）[D1/M1]

図 7-8 は、道志ダム流域における現代林相（左図）及び過去林相（右図）に、平均降雨年の雨量を適用した水収支の各流出量を図 7-9 においてそれらの構成割合を示す。

同一雨量の条件下において、現代及び過去林相の蒸発散量は、それぞれ 892.3 mm（29 %）、813.2 mm（28 %）と、現代林相の方が過去林相よりもやや多かった。これは、既往研究を基に林齢が高いほど BLAI（葉量）を高くしたことが結果に反映されたと考えられる。

早期に河川へ流出する量である表面流量と側方流量の合計は、現代及び過去林相でそれぞれ 1,034 mm（36 %）、1,348.4 mm（46 %）であり、緩やかに河川へ流出または涵養される量である地下水流量と深層浸透量の合計は、それぞれ 1,025.4 mm（36 %）、777.5 mm（27 %）であった。早期に河川へ流出する量は、現代林相の方が過去林相よりもやや少なく、緩やかに河川へ流出または涵養される量は、現代林相の方が過去林相よりもやや多かった。これは既往研究を基に林齢が高いほど、表面流出を抑え、土壌及び地下への浸透量を増やしたことが反映された結果と考えられる。

以上の結果から、成熟した森林ほど、流域に降った雨を一時的に土壌中に保留し、緩やかに河川へ流出させたため、森林の水資源貯留機能が定量的に示された。

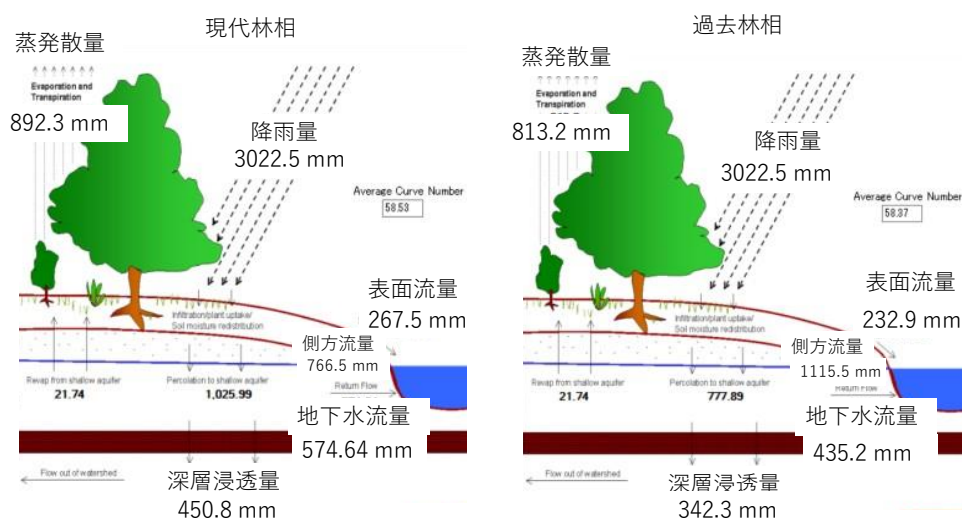


図 7-8 道志ダム流域における現代及び過去林相における水収支の比較 [D1]

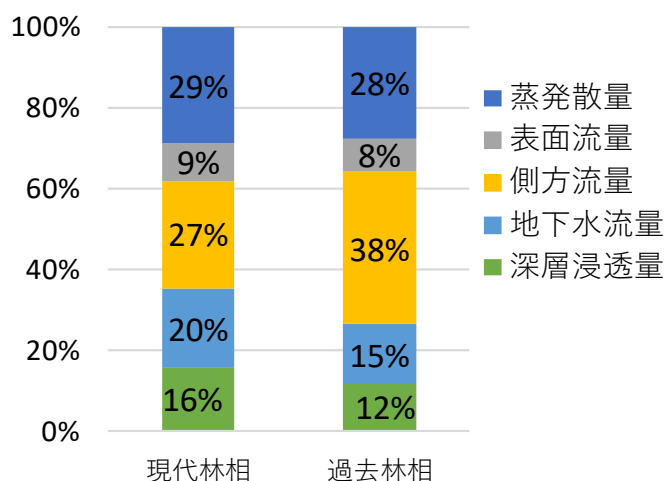


図 7-9 道志ダム流域における現代林相及び過去林相の水収支構成割合

図 7-10 は、三保ダム流域における現代林相（左図）及び過去林相（右図）に平均降雨年の条件で水収支の各流出量を図 7-11 においてそれらの構成割合を示し、崩壊地の有無や林相の違いが水収支に与える影響について評価する。

現代林相及び過去林相の蒸発散量はそれぞれ 792.1 mm（24%）、840.9 mm（26%）であった。現代林相が過去林相よりも蒸発散量がやや少なかった。既往研究を基に林齢が高いほど BLAI を高くし、成熟林の多い現代林相で蒸発散量が多くなると想定したが、今回の結果においてそれとは異なる傾向を示した。

現代林相及び過去林相の表面流量と側方流量の合計はそれぞれ 1,046.4 mm（32%）、991.6 mm（30%）であり、地下水流量と深層浸透量の合計はそれぞれ 1,402.5 mm（43%）、1,417.6 mm（43%）であった。表面流量と側方流量は現代林相の方が過去林相よりもやや多く、地下水流量と深層浸透量は現代林相の方が過去林相よりもやや少なかった。崩壊地及び林齢が低いほど地表からの流出量を促し、地下への浸透量を少なくするよう調整をしたが、崩壊地が多く、林齢が低い過去林相の方が、水資源貯留機能が高い結果になった。

以上の結果から、既往研究を基にパラメータの調整をしたが、想定される結果とは異なり、崩壊地の有無や林相の違いが水収支に与える影響についての有益な知見は得られなかった。

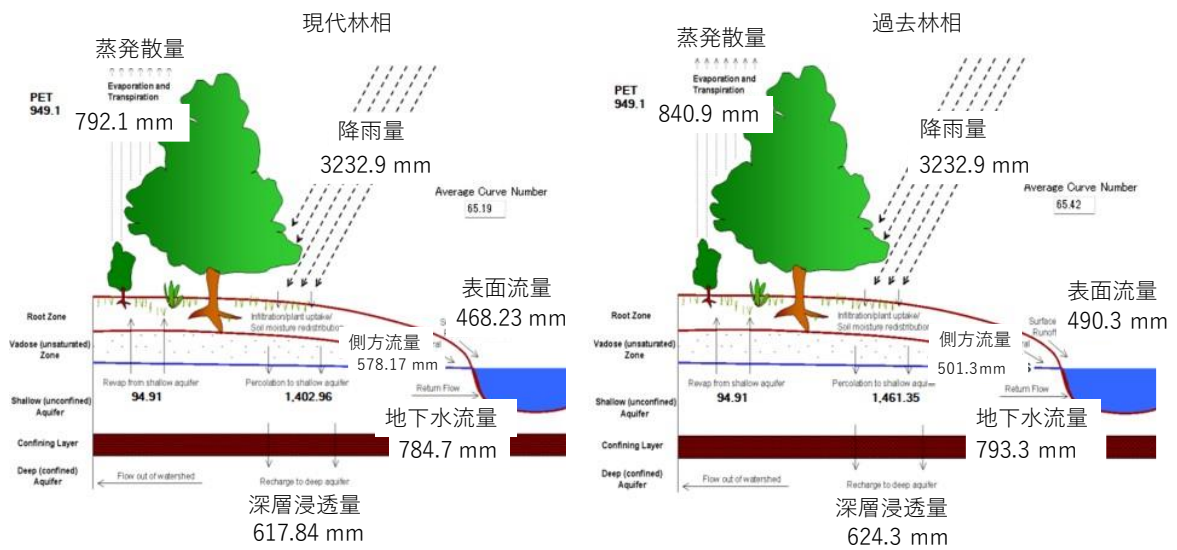


図 7-10 三保ダム流域における現代林相及び過去林相の水収支（流出量）

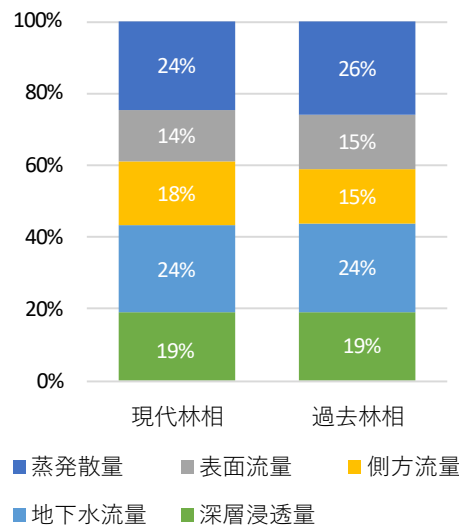


図 7-11 三保流域における現代及び過去林相の水収支（流出割合）

2) 水収支構成割合（現代林相の樹種別・平均降雨年）[D1]

図 7-12 は、道志ダム流域の現代林相における平均降雨年の条件下で、土地利用別における水収支の各流出量を図 7-13 においてそれらの構成割合を示す。

森林（スギ、ヒノキ、広葉樹）の蒸発散量は 800 mm 程度、水収支全体に占めるその割合は 30 %程度であり、その他の土地利用に比べ高かった。森林は蒸散、葉面や幹に付着した水が蒸発するため、その他の土地利用よりも蒸発散量が多くなることが知られているが、その傾向をモデルパラメータに反映させたことで、既往知見と同様の結果が得られたとみられる。

また森林の表面流量の割合は 10 %を下回り、その他の土地利用よりも低く、一方で地下水流量と深層浸透量の合計の割合は 30 %を上回り、その他の土地利用よりも高かった。これは既往研究を基に土壌への浸透機能が高い森林において、地表面への流出を抑え、地下への浸透量を増やしたことが寄与していることが考えられた。

スギ、ヒノキ、広葉樹における水収支の全体に占める蒸発散量の割合はそれぞれ 31 %、30 %、29 %であった。スギはヒノキよりも蒸発散量が多く、広葉樹は針葉樹に比べて少ないという既往研究の結果を反映できた。

また、スギ、ヒノキ、広葉樹の表面流量と側方流量の合計の割合は、それぞれ 30 %、37 %、35 %であり、ヒノキ、広葉樹、スギの順に小さくなり、一方でスギ、ヒノキ、広葉樹の地下水流量と深層浸透量の合計の割合は、それぞれ 39 %、34 %、37 %であり、ヒノキ、広葉樹、スギの順に大きくなった。これはスギ及び広葉樹はヒノキよりも土壌孔隙量が多いという既往研究の知見をモデルに反映させたことが寄与したと考えられる。

以上の結果から、森林は蒸発散量や地下水流量、深層浸透量が多く、表面流量や側方流量が少ない傾向を示したことから、蒸発散が促進され、地下への浸透を促し、地表からの流出量を抑えることが分かった。また、スギは、ヒノキ、広葉樹よりも蒸発散量や地下水流量、深層浸透量が多く、表面流量や側方流量が少ない傾向を示したため、それらの森林タイプよりも、高い水源涵養機能を保持していると捉えることができるものの、流域の立地・地形や植栽方法によっても変化する可能性があるため、留意が必要である。

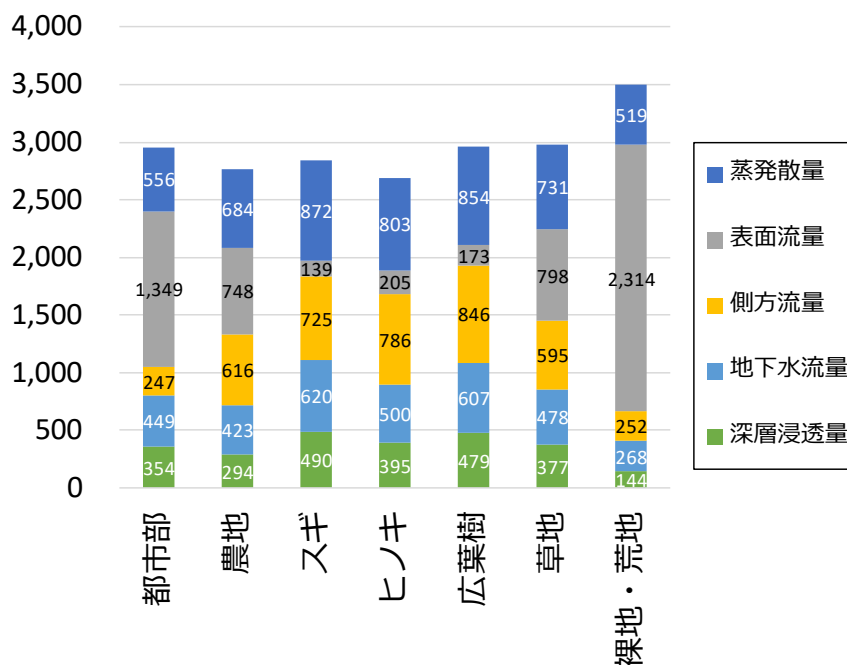


図 7-12 道志ダム流域における現代林相の土地利用別水収支 (各流出量)

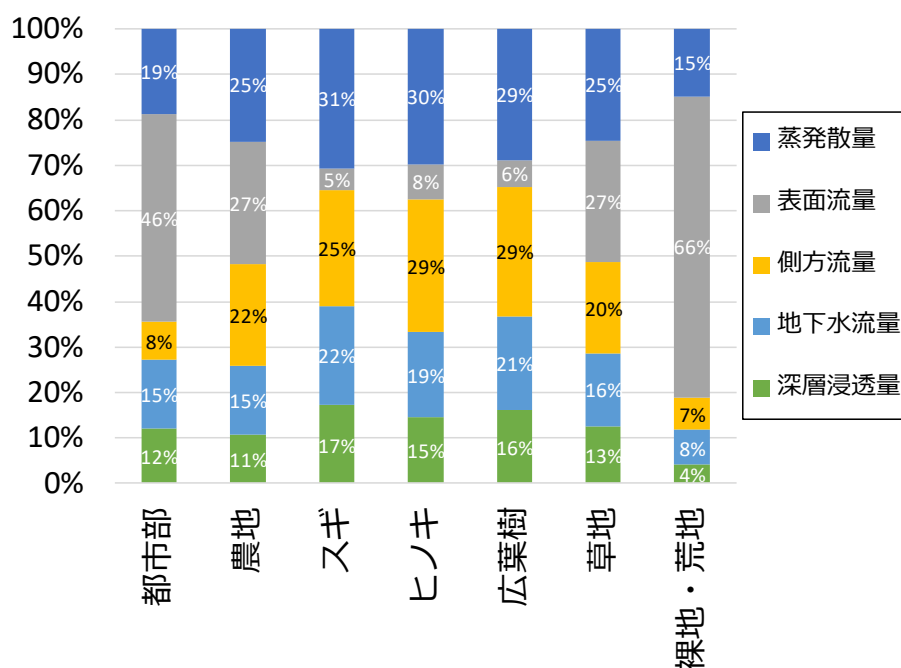


図 7-13 道志ダム流域における現代林相の土地利用別水収支（各流出割合）

図 7-14 は、三保ダム流域の現代林相における、平均降雨年の条件下で、土地利用別における水収支の各流出量を図 7-15 においてそれらの構成割合を示した。道志モデルと異なるのは、土地利用タイプに「崩壊地」が存在している点である。

森林（スギ、ヒノキ、広葉樹）の水収支の全体に占める蒸発散の割合は 25 %と、その他の土地利用に比べ高く、道志ダム流域の蒸発散量の傾向と同様である。

また、森林の表面流量の割合は 20 %未満であり、その他の土地利用よりも低く、一方で地下水流量と深層浸透量の合計の割合はおおむね 40 %前後であり、その他の土地利用よりも高かった。これは、既往研究を基に土壤への浸透機能が高い森林においては、地表面への流出を抑え、地下への浸透量を増やしたことが寄与していると考えられた。

森林以外の土地利用について着目すると、崩壊地の表面流量の割合は 70 %を上回っており、その他の土地利用よりも高かった。これは既往研究を基に、土壤への浸透機能が低い崩壊地において、地表面への流出を促し、地下への浸透量を抑えたことが寄与していると考えられた。

スギ、ヒノキ、広葉樹における水収支全体に占める蒸発散量の割合は、それぞれ 28 %、25 %、25 %であった。スギはヒノキよりも蒸発散量が多く、広葉樹は針葉樹に比べて少ないという既往研究における知見を再現することができた。

スギ、ヒノキ、広葉樹の表面流量と側方流量の合計の割合（早期に河川へ流出する割合）は、それぞれ 27 %、36 %、31 %であり、ヒノキ、広葉樹、スギの順に小さくなった。一方でスギ、ヒノキ、広葉樹の地下水流量と深層浸透量の合計の割合（緩やかに河川へ流出する割合）は、それぞれ 45 %、39 %、43 %であり、ヒノキ、広葉樹、スギの順に大きくなった。これは、スギ及び広葉樹は、ヒノキより土壤孔隙に富むという既往研究の知見をモデルに反映させたことで再現されたと考えられる。

以上の結果から、森林は他の土地利用に比べ、流域に降った雨を緩やかに河川へ流出させる機能があり、特にスギ、広葉樹においてその機能が強く発揮されるということがいえる。

崩壊地においては地下への浸透がほとんどなく、地表からの流出が多くなったことが分かった。

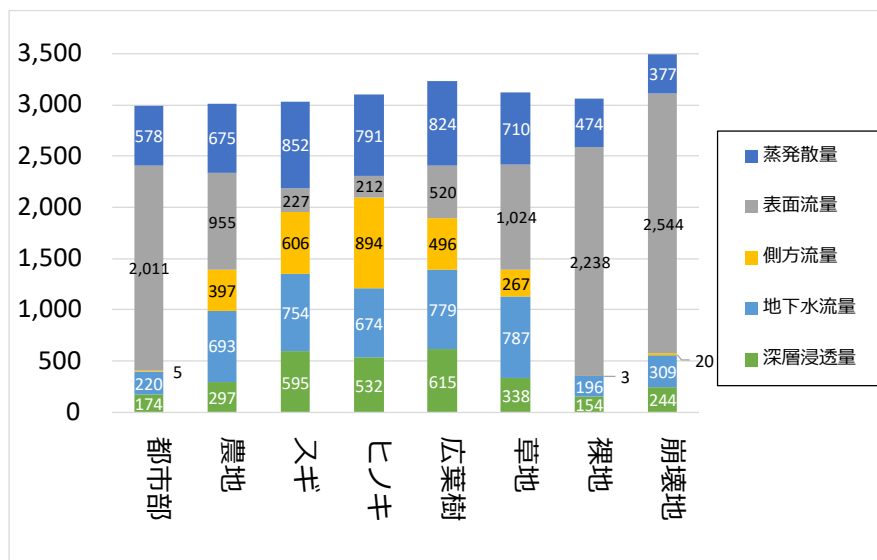


図 7-14 三保ダム流域における現代林相の土地利用別水収支

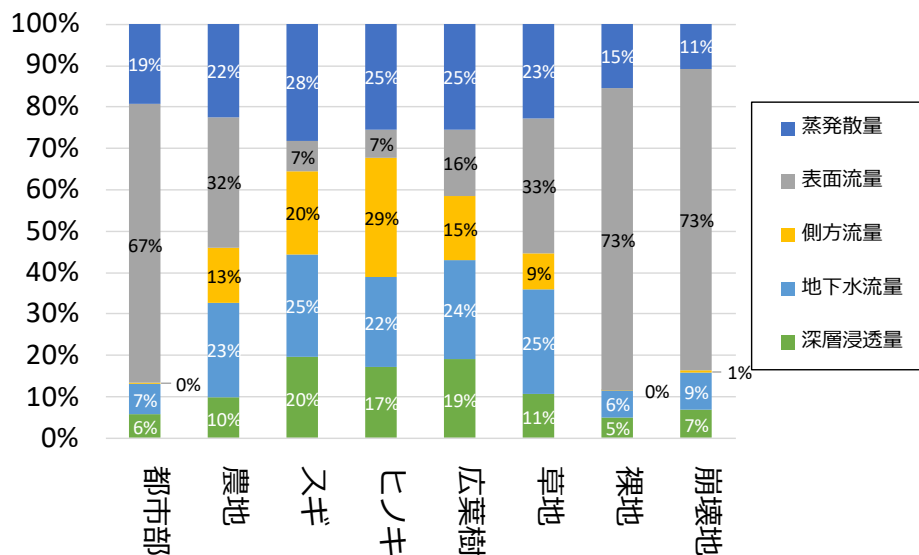


図 7-15 三保ダム流域における現代林相の土地利用別水収支構成割合

3) 水収支構成割合（現代林相・降雨パターン別）[D2/M2]

図 7-16 は、道志ダム流域における降雨パターン別水収支の各流出量を、図 7-17 はその流出割合を示す。また、図 7-18 は三保ダム流域における降雨パターン別水収支の各流出量を、図 7-19 はその流出割合を示す。

道志ダム流域において、平均年及び豊水年、渇水年の蒸発散量はそれぞれ 832 mm (29%)、761 mm (22%)、740 mm (44%) であり、三保ダム流域においてはそれぞれ 792 mm (24%)、746 mm (17%)、729 mm (40%) であった。道志及び三保ダム流域ともに渇水年の蒸発散量は平均年、豊水年よりも低く、水収支全体に占める割合は最も高い割合を示した。これは、渇水年の蒸発散量が割合としては多いが、樹木が生長するためには水を消費し、実際の量としては平均年・豊水年・渇水年により大きな差はなかったためと考えられる。

道志ダム流域において平均年及び豊水年、渇水年の表面流量及び側方流量の合計はそれぞれ 1,033 mm (36%)、1,564 mm (45%)、300 mm (18%) であった。地下水流量及び深層浸透量の合計はそれぞれ 1403 mm (43%)、1,867 mm (43%)、741 mm (42%) であった。三保ダム流域において平均年及び豊水年、渇水年の表面流量及び側方流量の合計はそれぞれ 1,046 mm (32%)、1,776 mm (40%)、336 mm (19%) であった。地下水流量及び深層浸透量の合計は 1,026 mm (36%)、1,213 mm (34%)、638 mm (38%) であった。道志ダム流域及び三保ダム流域ともに表面流量及び側方流量、地下水流量及び深層浸透量は豊水年で最も高い割合を示した。これは豊水年において雨の日が多く、土壌中の水分量が高い状態であったため、地下への浸透がなされず、地表へ流出する量が多くなったことが考えられる。一方で、渇水年において表面流量及び側方流量は最も低い割合を示したが、地下水流量及び深層浸透量は他の年とあまり違いはみられなかった。これは、雨の日が少なく、土壌中の水分量が低い状態であり、多くが地下へ浸透したために地表へ流出する量が少なくなったことが要因の一つとして考えられる。

以上の結果から、道志ダム流域及び三保ダム流域において豊水年は地表面からの流出が多く、渇水年では地表面からの流出が少なくなったため、降雨パターンにより水収支に違いがみられた。

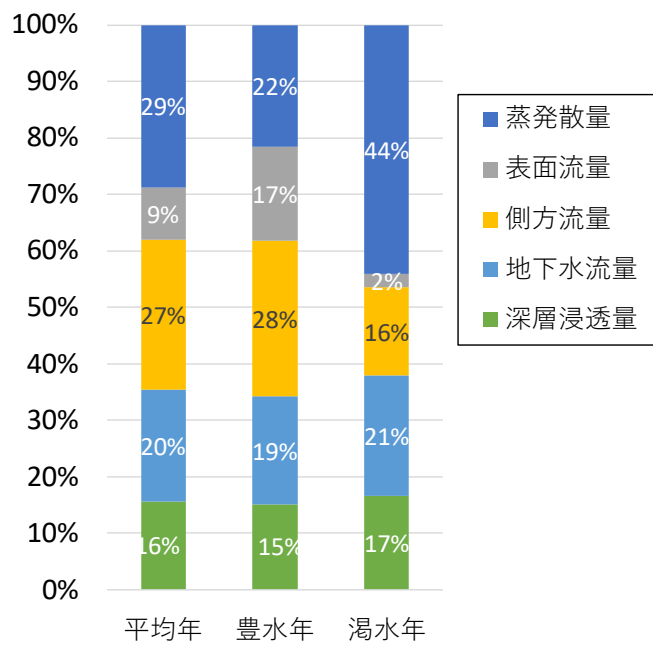


図 7-16 道志ダム流域における降雨パターン別水収支（流出量）

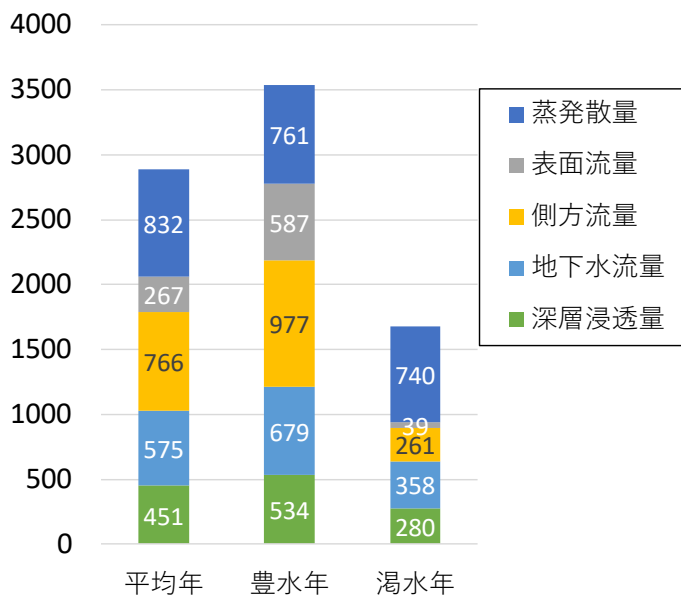


図 7-17 道志ダム流域における降雨パターン別水収支（流出割合）

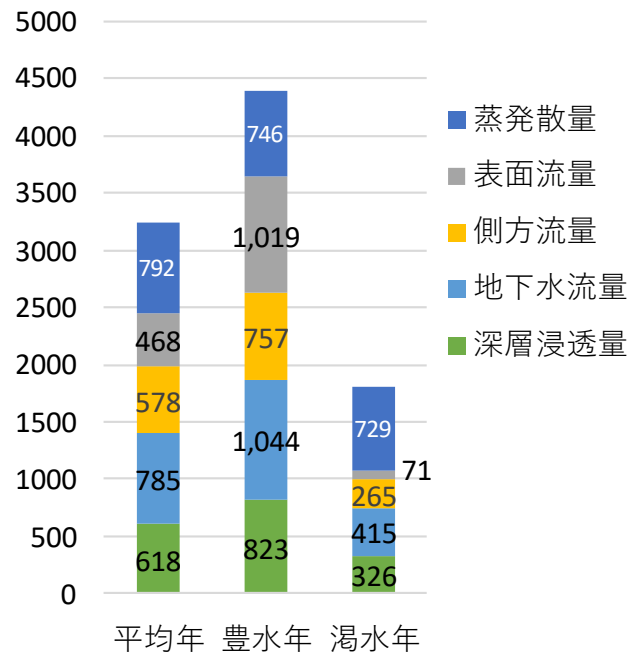


図 7-18 三保ダム流域における降雨パターン別水収支（流出量）

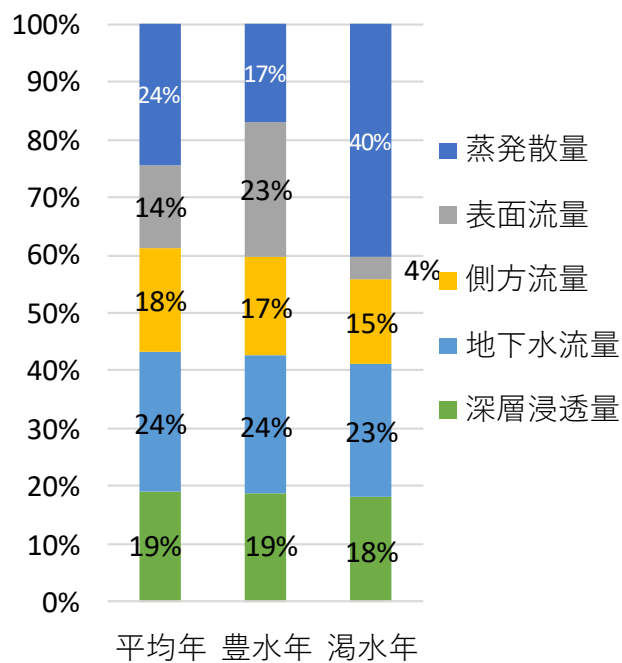


図 7-19 三保ダム流域における降雨パターン別水収支（流出割合）

(2) 洪水緩和機能

1) 降雨-流出応答 [D3]

現代及び過去林相における洪水緩和機能の違いを定量的に把握するために、両モデルに豪雨年の雨量インプット（2018～2019年）を適用し、そのシミュレーション結果を降雨に対する流出応答の散布図によって示した（図 7-20）。

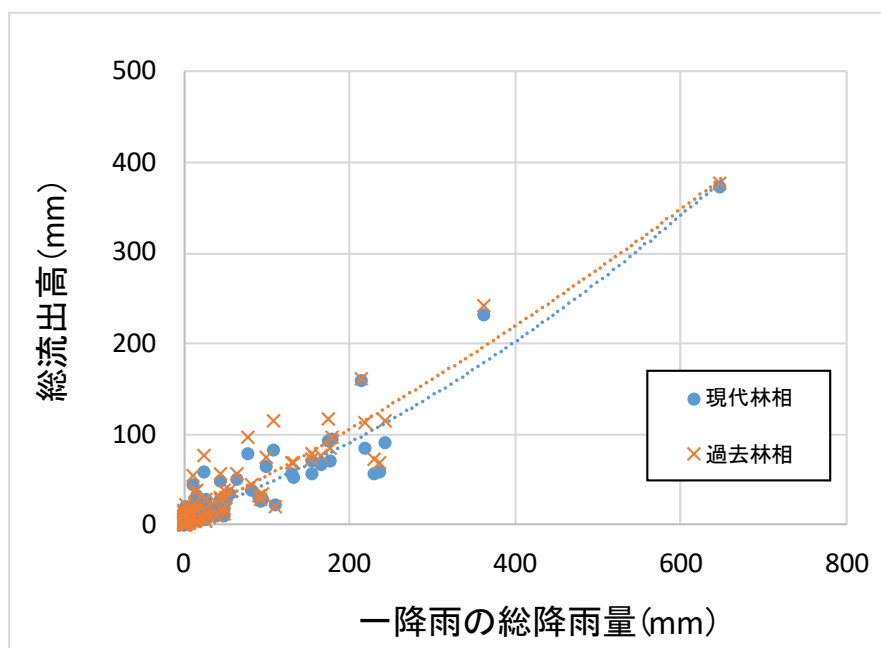


図 7-20 道志ダム流域の現代林相・過去林相における降雨に対する流出応答の違い

一回に降る雨の総降雨量が 600mm を超える大きな豪雨イベント（2019 年台風 19 号）時の総流出高は、現代・過去林相ともに 380mm 程度と同等の総流出高であったのに対し、一回に降る雨の総降雨量が 100 から 400mm 程度の範囲においては、現代林相における流出高が過去林相に比べ低くなっている。これは、100 から 400mm 程度の中出水をもたらす豪雨に対しては、成長した現代の林相の方が、若い森林が主体の過去時点の林相よりも流出量を抑え、洪水緩和機能を発揮していると捉えることができる一方、600mm を超えるような大出水をもたらす豪雨に対しては、その効果は限定的となることを示している。

(3) 水資源貯留（水量調節）機能

1) 流況曲線（時点別・降雨パターン別）[D4/M4, D5/M5]

図 7-21 の①、②は、道志モデルに平均年・渇水年雨量をインプットし、そのシミュレーション結果を流況曲線で表し、③は、参照用として作成した実測の流量に基づく流況曲線である。

同一の気象条件下において、道志・過去林相よりも現代林相の方が低水・渇水期の流出量が高い結果となり、特に渇水年では、低水・渇水流量の差がより顕著となった。

林相の特徴として、過去林相の流域における森林率は 92.8%であり、そのうち、若齢（0～10年生、10～20年生）のスギとヒノキの割合は 16%である。現代林相の森林率は 93.0%と、過去と同等であるものの、40年間で樹木が成長することに伴い、現代林相における若齢のスギ、ヒノキの割合はほぼ 0%である。一方で、50年以上の成熟した森林の割合が過去の 1%から 31%に増加している（図 3-31～図 3-34）。

作成した流況曲線からは、成長した森林において浸透性及び保水性が向上し、低水時や渇水時により多くの水を流出させていることが分かる。また、渇水年と豊水年の流況曲線を比較したグラフからは、年降水量により渇水流量に大きな影響を与える可能性が示唆される。

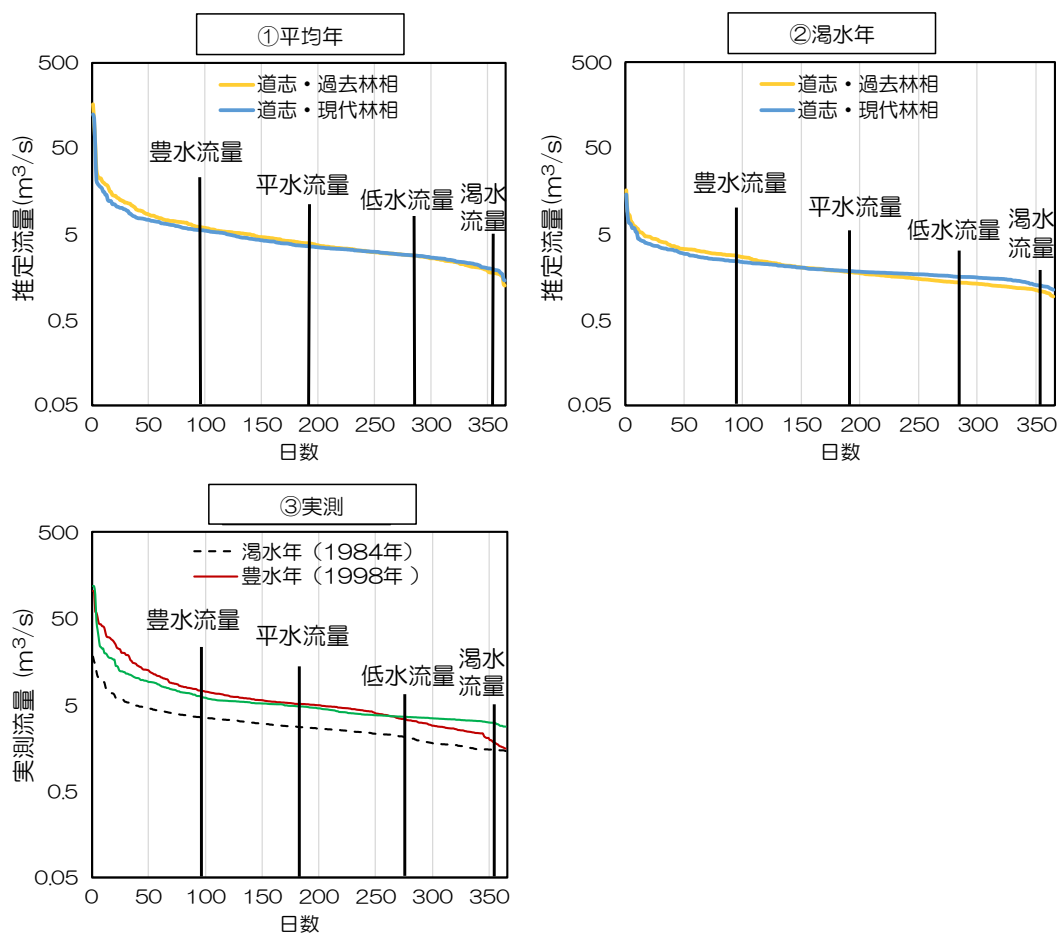


図 7-21 道志ダム流域における平均年・渇水年流況曲線

図 7-22 の①、②は、三保モデルに平均年・渇水年雨量をインプットし、そのシミュレーション結果を流況曲線で表したものの、③は、参照用として作成した実測流量に基づく流況曲線である。現代林相の流量がやや高いが、大きな差がなかった。

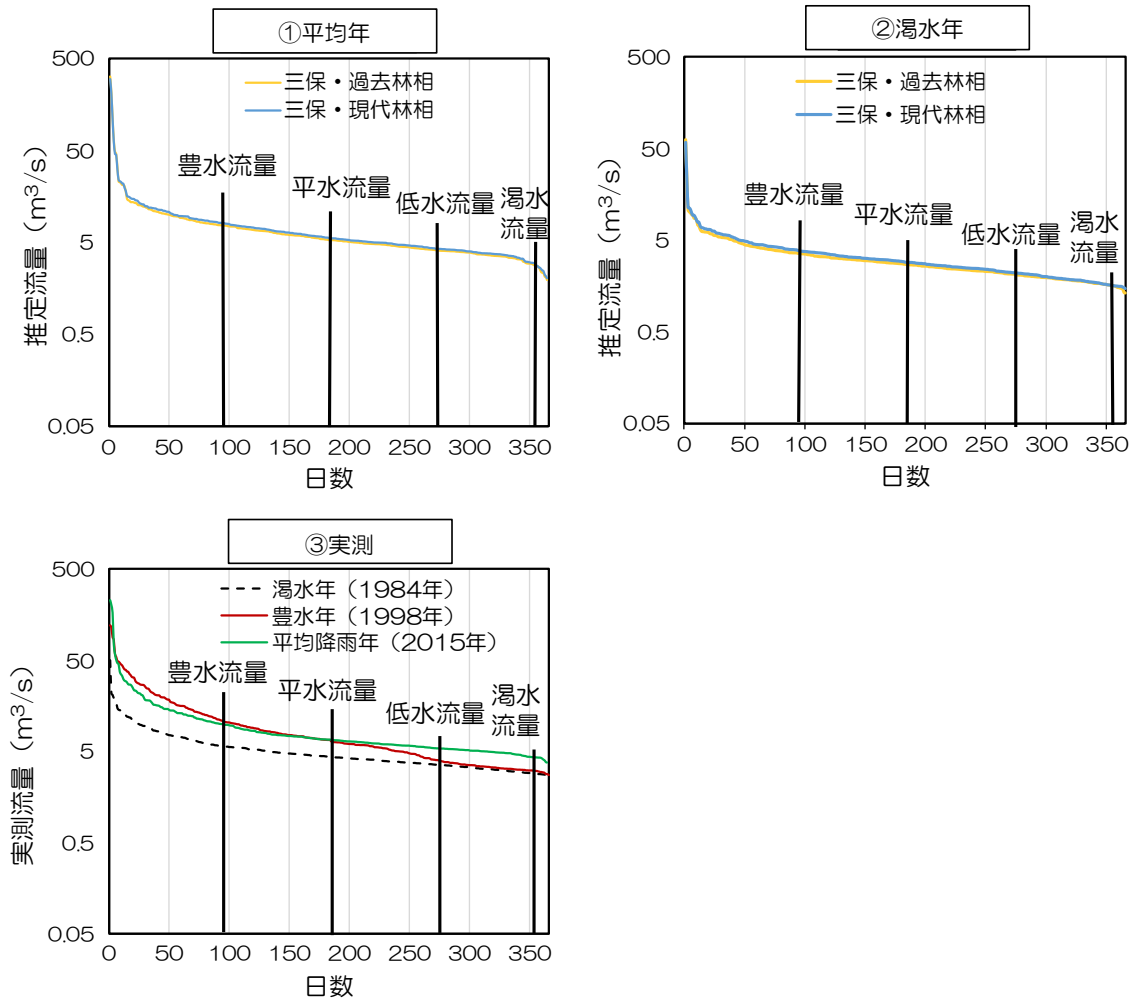


図 7-22 三保ダム流域における平均年・渇水年流況曲線

7.3.2. 仮想シナリオ

(1) 水収支

1) 水収支の構成割合（森林全体スギ・林齢別・平均降雨年）[D11]

図 7-23 は、道志・現代林相の樹種を全てスギ、林齢を 0-10 年生、20-30 年生、50 年生以上の 3 つのパターンで置き換えた仮想モデルによってシミュレーションした結果の水収支であり、図 7-24 はそれらの構成割合を示す。

スギの 0-10 年生、20-30 年生、50 年生以上の各モデルにより算出された蒸発散量はそれぞれ 909 mm、925 mm、930 mm であり、その差は微小ではあるものの、林齢が高いモデルほど蒸発散量が多くなった。これは、林齢が高いほど葉量が多くなり、蒸発散量が増加するとした設定がシミュレーションに反映された結果といえる。

表面流量及び側方流量の合計は、スギ 0-10 年生モデルで 555 mm (23 %)、20-30 年生モデルで 861 mm (30 %)、50 年生以上のモデルで 1,018 mm (35 %) と、より成熟したスギ林において、早期に河川へ流出する水量の割合が最も多い結果となった。

また、地下水流量及び深層浸透量の合計は、スギ 0-10 年生モデルで 1,294 mm (45 %)、20-30 年生モデルで 1,137 mm (39 %)、50 年生以上モデルで 965 mm (34 %) と、より若齢のスギ林において、緩やかに河川へ流出する水量や地下に涵養される水量の割合が最も多い結果となった。

林齢が高いほど土壌孔隙が富み、土壌への浸透や土壌中の貯留が多くなることが想定されたが、それとは反対の結果となった。その要因の一つとして、既往文献を基に、林齢が高いほど土壌の透水性が高くなるよう設定したが、側方流量の遅延に関するパラメータの調整が不足していたことが挙げられる。本来であれば、流域に降った雨は孔隙に富む土壌に一時的に貯留され、地下水流として緩やかに流出することが想定される。その挙動がモデルで再現できていなかったために若齢と逆転したと考えられる。

本仮想シナリオによる解析結果は実態とは異なる傾向を示し、林齢の違いが水収支に与える影響についての評価が十分に行えるほどの知見は得られなかった。

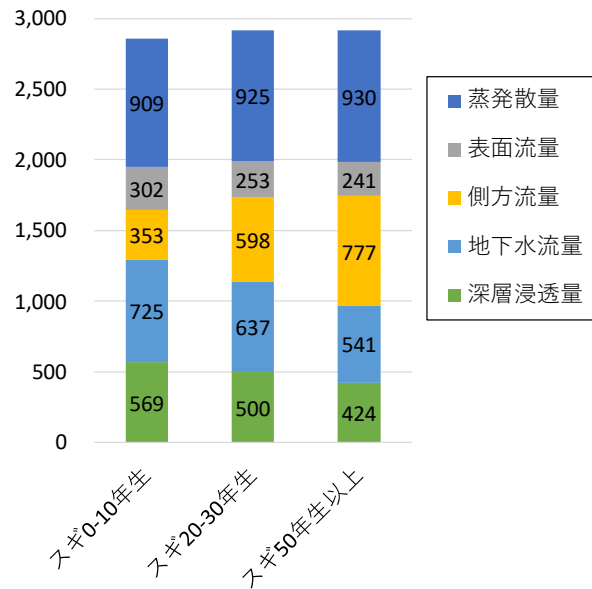


図 7-23 道志スギモデルにおける林齢別の水収支（各流出量）

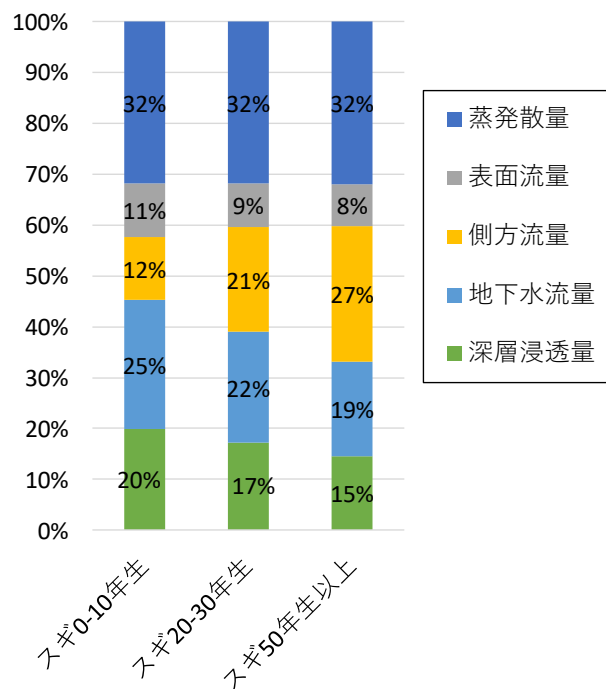


図 7-24 道志スギモデルにおける林齢別の水収支（各流出割合）

2) 水収支構成割合（森林全体スギ・密度別・平均降雨年）[D21]

図 7-25 は道志・現代林相の樹種を全てスギ、林分密度を疎、中、密の3つのパターンで置き換えた仮想モデルによってシミュレーションした結果の水収支を、図 7-26 はそれらの構成割合を示す。

スギの、疎、中、密モデルの蒸発散量、表面流量、側方流量、地下水流量、深層浸透量はおおむね同程度であり、スギの林分密度による水収支の違いはほとんどみられなかった。これは、密度とモデルパラメータとの関連性について、参照できる文献等が乏しく、林分密度による違いをモデルへ十分に反映できなかったことが要因として挙げられる。

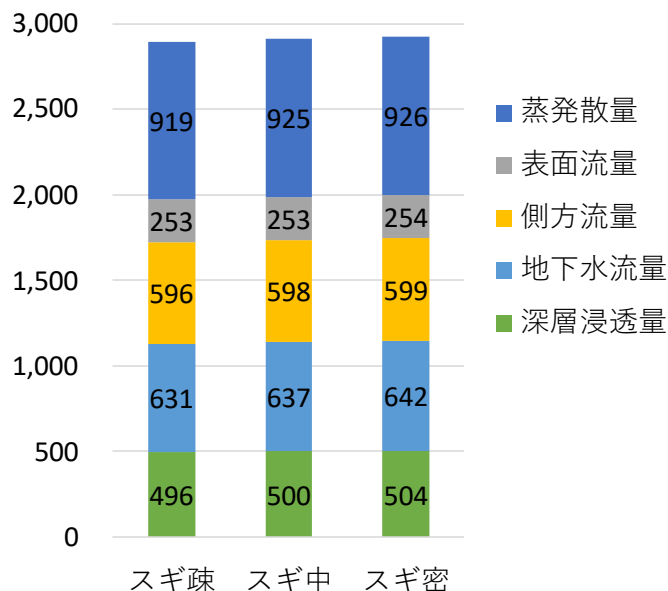


図 7-25 道志スギモデルにおける密度別の水収支（各流出量）

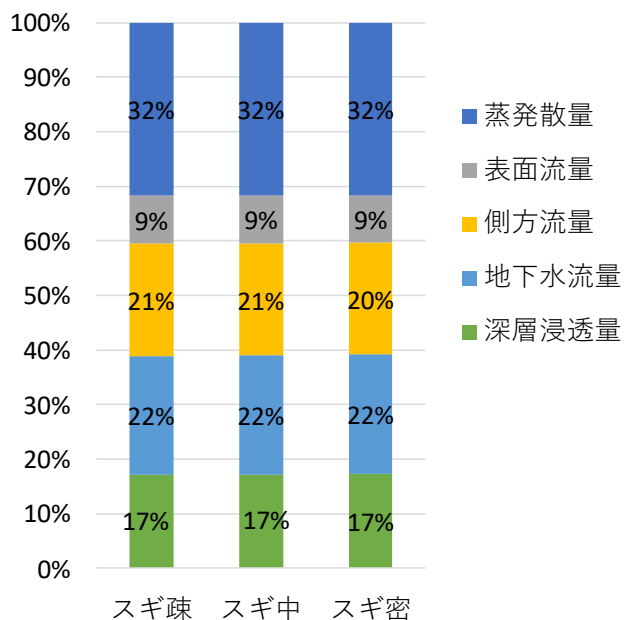


図 7-26 道志スギモデルにおける密度別の水収支（各流出割合）

(2) 洪水緩和機能

【成熟度別】

1) ハイドログラフ (森林全体スギ・林齢別・豪雨年) [M12]

図 7-27 は、三保ダム流域で日雨量が約 110 mm、最大時間雨量が約 25 mm を記録した 2018 年の台風 20 号通過時のハイドログラフであり、図 7-28 は、同じく三保ダム流域で日雨量が約 560 mm、最大時間雨量が約 76 mm の記録的短時間大雨となった 2019 年の台風 19 号通過時の降水量と流出量の時間変化をハイドログラフで示したものである。なお、ここでは森林の成長による変化（林齢の違い）が河川への流出量に与える影響に特化して分析するために、流域内の樹種を一律「スギ」、林分密度を一律「中」、林齢を「10 年生以下」、「20～30 年生」、「50 年生以上」の 3 つのパターンに設定したモデルの結果を比較する。

それぞれの図における青棒グラフは時間雨量を示し、赤線はスギ 0-10 年生、黄線はスギ 20-30 年生、緑線はスギ 50 年生以上、灰色の点線は実測の時間流出量を示す。

図 7-27 及び図 7-28 において、ピーク流量はスギ 0-10 年生で最も多く、50 年生以上で最も少なかった。森林が成長して林齢が高くなるほど、流出量のピークが低下する傾向がみられた。

これは、林齢が高くなるほど樹冠遮断量や蒸発散量が多くなることや、土壌の孔隙が増加し、土壌浸透量が多くなるという既往研究の知見と一致しており、パラメータにもこのような知見を反映させたことから、モデルにおいても同様の結果が再現されたものと考えられる。

また、図 7-27 の時間雨量 30 mm 以下では、林齢によるピーク流量の違いが顕著にみられ、図 7-28 の時間雨量 50 mm を超える場合では、この差異が小さくなった。これは、非常に強い降雨があった場合、50 年生以上の森林であっても土壌に浸透した雨水が短時間で飽和し、浸透できなくなったものが早期に地上へ流出したことが可能性の一つとして考えらえる。

森林の成長による洪水緩和機能の向上については、プロット単位などの小スケールを対象とした研究事例が多いが、一定の広がりをもった流域を単位としたモデル解析結果においても、森林の成長によるピーク流量の低減効果が定量的に示されといえる。

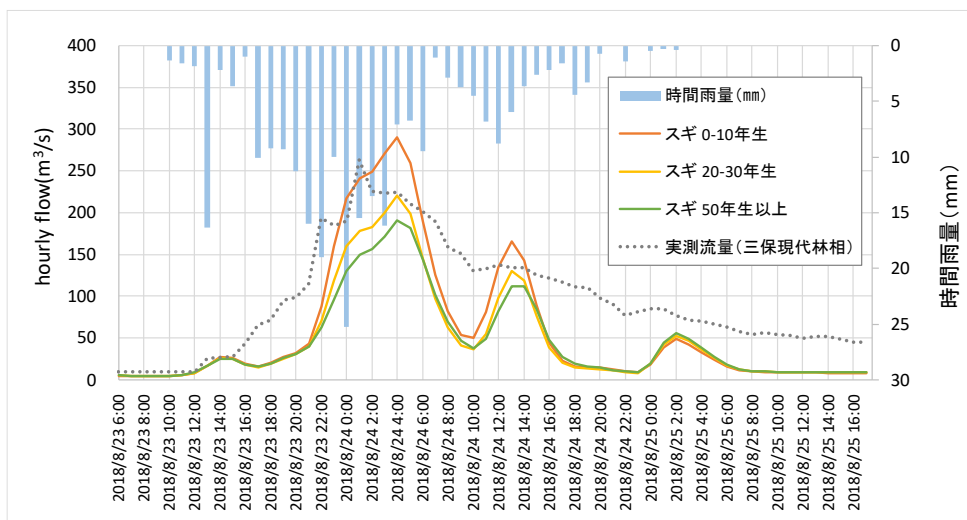


図 7-27 三保ダム流域における出水時ハイドログラフ (林齢別・2018 年台風 20 号通過時)

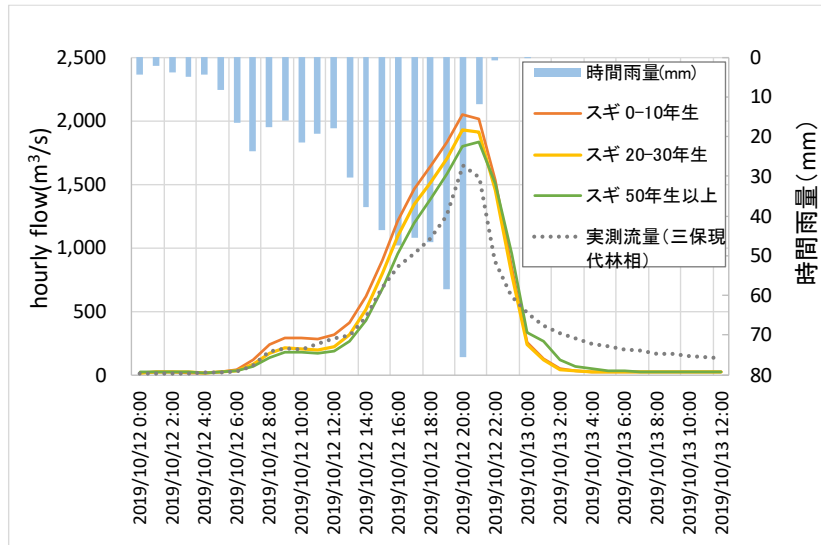


図 7-28 三保ダム流域における出水時ハイドログラフ（林齢別・2019年台風19号通過時）

【管理状態別】

2) ハイドログラフ（森林全体スギ・密度別・豪雨年）[M22]

図 7-29 及び図 7-30 における青棒グラフは時間雨量を示し、赤線はスギの疎、黄線はスギの中、緑線はスギの密、灰色の点線は実測の時間流出量を示し、林分密度の違いがピーク時における河川流出量に与える影響について評価した。また林齢は一律で 20-30 年生を設定した。

図 7-29 及び図 7-30 において、スギの疎密度による流出量の違いはみられなかった。パラメータ設定の段階において参考になる文献が乏しく、十分に疎密度による違いをパラメータ値に反映できなかったことが原因として考えられる。

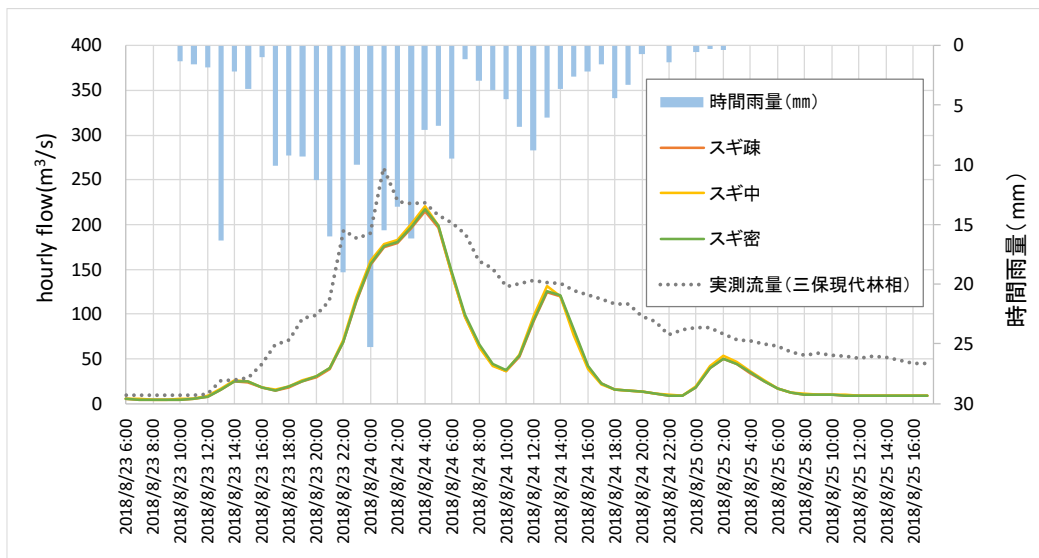


図 7-29 三保ダム流域における出水時ハイドログラフ（密度別・2018年台風20号通過時）

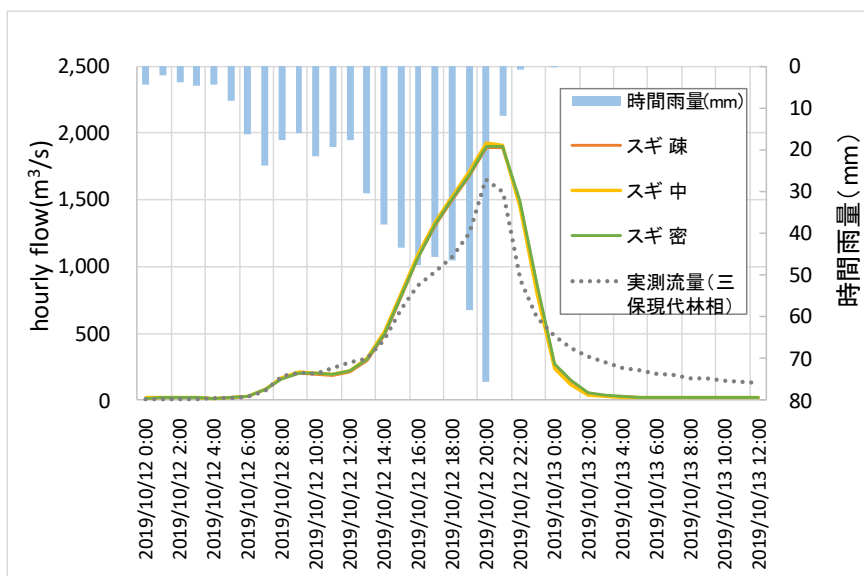


図 7-30 三保ダム流域における出水時ハイドログラフ（密度別・2019年台風19号通過時）

【崩壊面積の多寡別】

3) ハイドログラフ（現代林相・崩壊面積率別・豪雨年）[M31]

図 7-31 及び図 7-32 において、青棒グラフは時間雨量を示し、赤線は崩壊地の面積割合が 10 %、黄色の点線は 5 %、青の点線は 1 %、緑線は 0.3 %、灰色の点線は実測の時間流出量を示し、崩壊地の面積割合の違いがピーク時における河川流出量に与える影響について評価した。

図 7-32 において崩壊地の面積割合の違いによってピーク流量にあまり大きな差異はみられなかったが、図 7-31 では崩壊地の面積割合が 10 %において最もピーク流量が多く、次いで 5 %、1 %の順に多く、0.3 %におけるピーク流量が最も少なく、崩壊地の面積割合の違いによってピーク流量に明瞭な差がみられた。

これは、非常に強い降雨があったとき、崩壊地の面積割合が低い場合であっても、土壤に浸透した雨水が短時間で飽和し、浸透できなくなったものが早期に地上へ流出するため、崩壊地の面積割合の違いによってあまり差がでないことが可能性の一つとして挙げられる。

そのため、豪雨時には崩壊地の多少が流出量に与える影響は小さく、洪水緩和機能には一定の限度があることが示された。

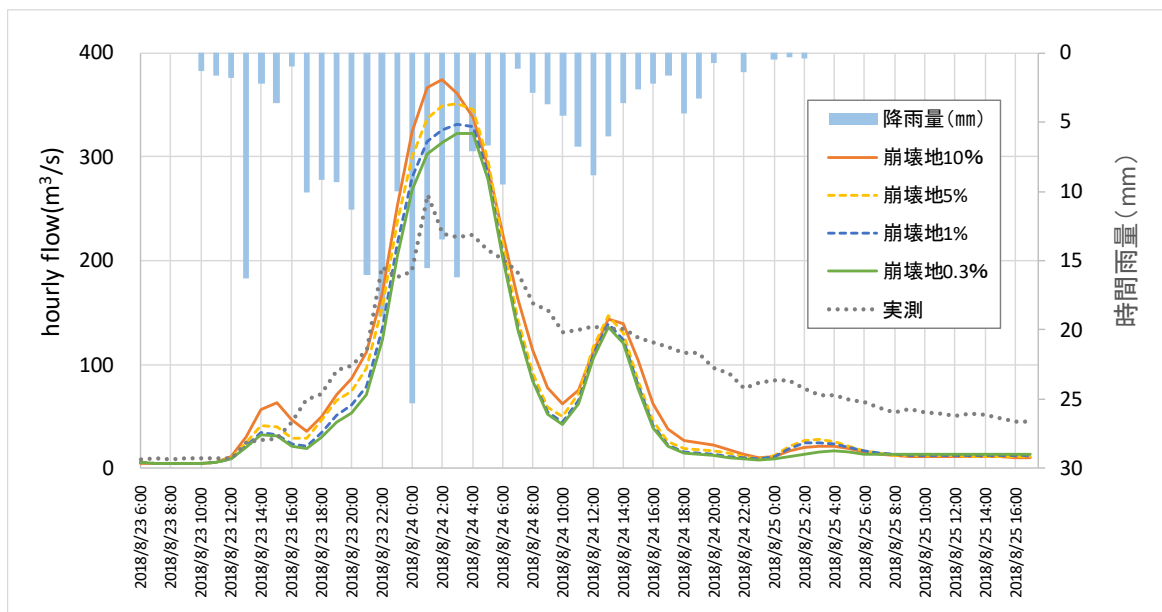


図 7-31 三保ダム流域における出水時ハイドログラフ
(崩壊地の多寡別・2018年台風20号通過時)

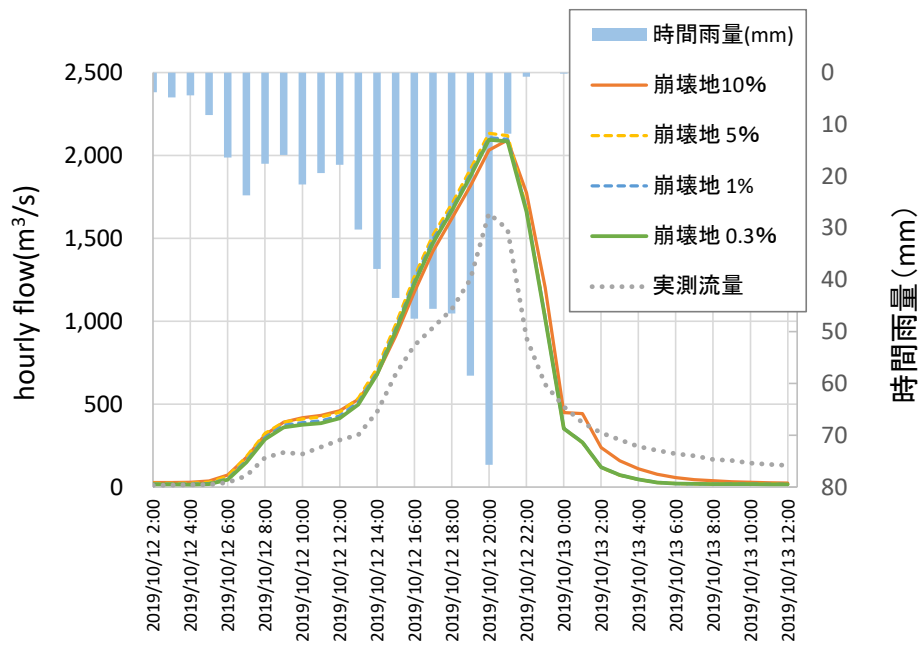


図 7-32 三保ダム流域における出水時ハイドログラフ（密度別・2019年台風19号通過時）

(3) 水資源貯留（水量調節）機能

1) 流況曲線（森林全体スギ・林齢別・降雨パターン別）[D14, D15]

図 7-33 に、道志ダム流域内の樹種をすべてスギ林としたモデルによる、林齢別（0～10 年生、20～30 年生、50 年以上生）の流況曲線の比較結果を示す。図 7-33 の①は平均年の雨量、②は渇水年の雨量をそれぞれ適用した結果の流況曲線であり、③は道志・現代林相に平均年、豊水年、渇水年の雨量を適用した結果の流況曲線を、実測した流量の流況曲線とともに示したものである。

流況曲線からは、スギ林の林齢が高いほど低水流量及び渇水流量が多くなる傾向がみられた。このことは、森林の成熟化により基底流量が増加し、渇水時にも安定的に水供給がなされることが定量的に示されたといえる。

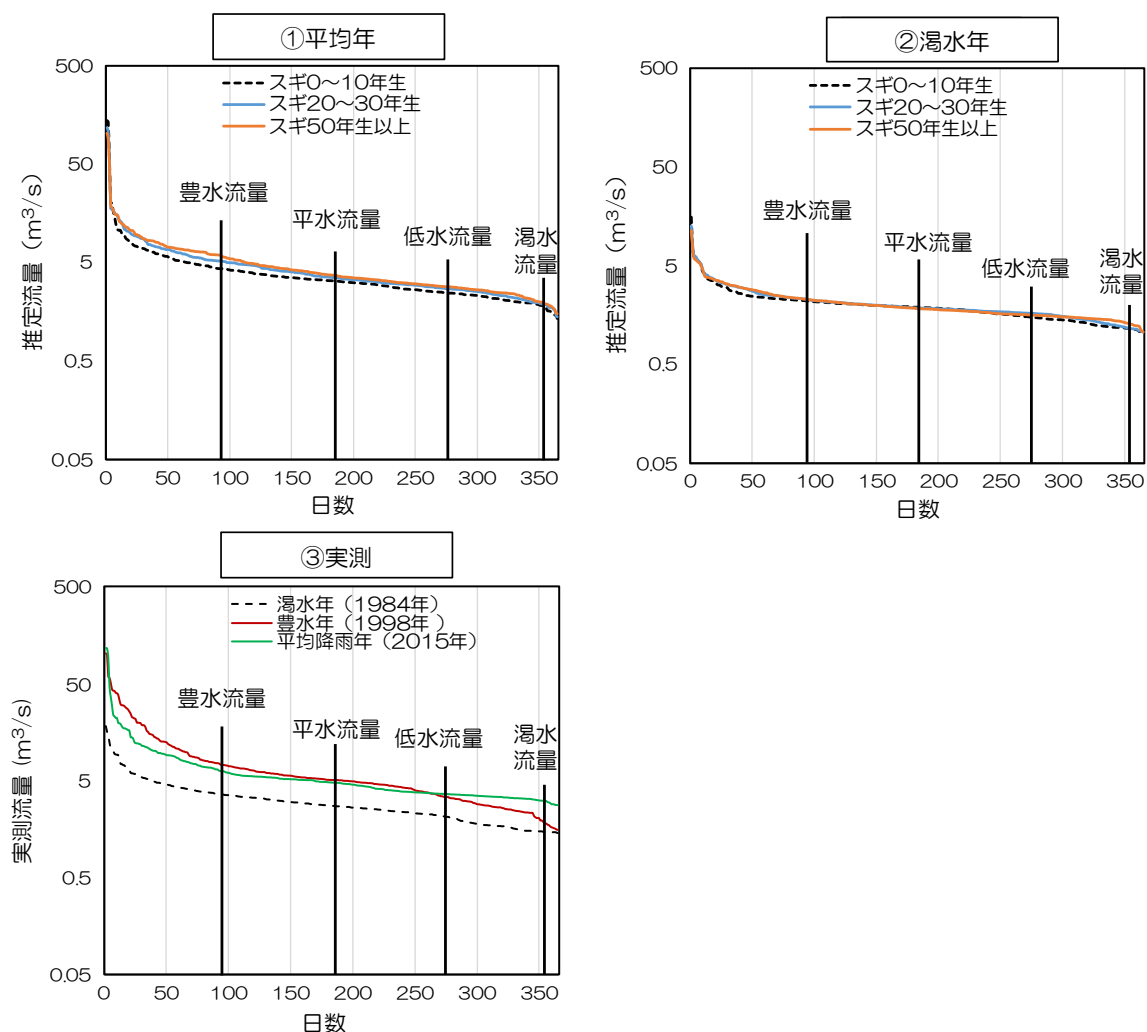


図 7-33 道志ダム流域において平水時年・渇水年林齢別流況曲線

図 7-34 に、三保ダム流域内の樹種をすべてスギ林としたモデルによる、林齢別（0～10 年生、20～30 年生、50 年以上生）の流況曲線について比較の結果を示す。図 7-34 の①は平均年の雨量、②は渇水年の雨量をそれぞれ適用した結果の流況曲線であり、③は三保・現代林相に平均年、豊水年、渇水年の雨量を適用した結果の流況曲線を、実測流量の流況曲線とともに示したものである。

流況曲線からは、林齢 0～10 年生モデルにおいて、低水流量及び渇水流量が最も少なくなる傾向がみられたが、顕著な差は認められなかった。特に、渇水年における低水流量・渇水流量の差はほとんどみられない。平均年や渇水年では、豪雨のような極端な豪雨イベントの回数が比較的少ないため、年間を通して土壌による浸透の効果が現れているものと考えられた。

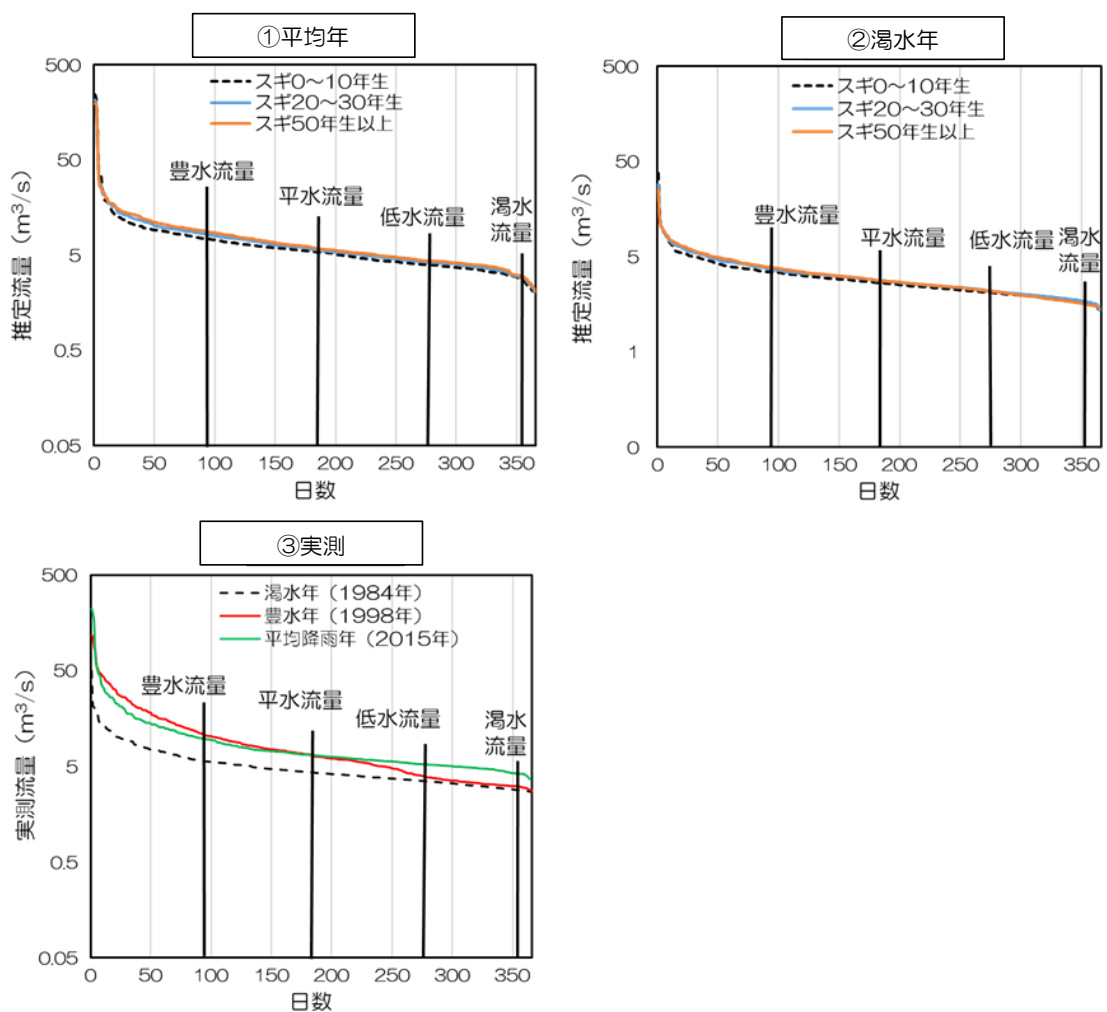


図 7-34 三保ダム流域において平均年・渇水年林齢別流況曲線

2) 流況曲線（森林全体スギ・密度別・降雨パターン別）[M24, M25]

道志ダム流域及び三保ダム流域においてスギ林の密度別流況曲線を図 7-35 及び図 7-36 に示す。図中の③に、実測データから作成した流況曲線を参考として示す。同一の気象条件において「スギ密」がわずかであるが流出量が低い結果となったが、平均年・渇水年ともに大きな差はみられなかった。このため、密度に関わらず、一定の水資源貯留（水量調節）機能が発揮されるものと考えられた。

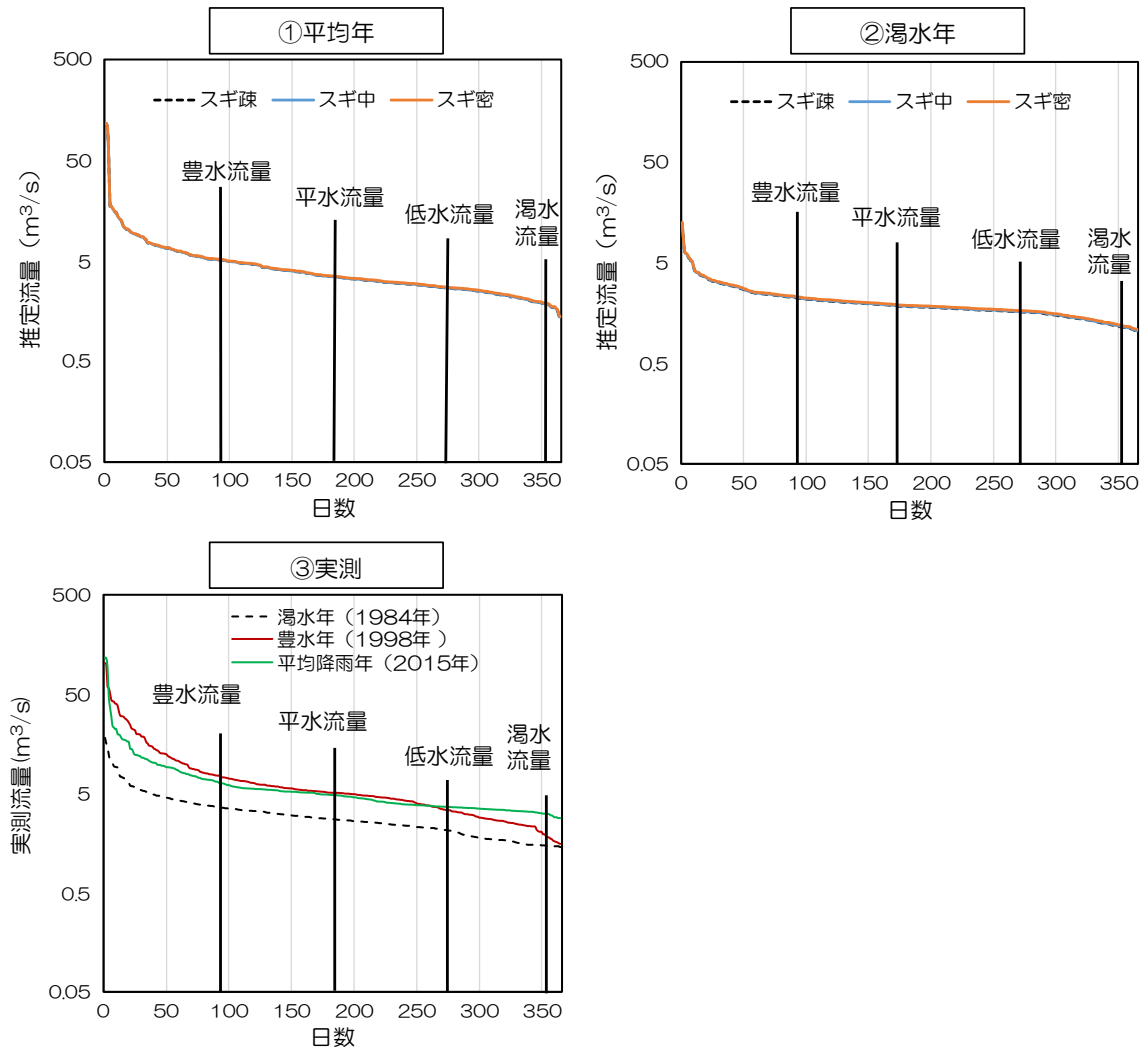


図 7-35 道志ダム流域において平水時年・渇水年密度別流況曲線

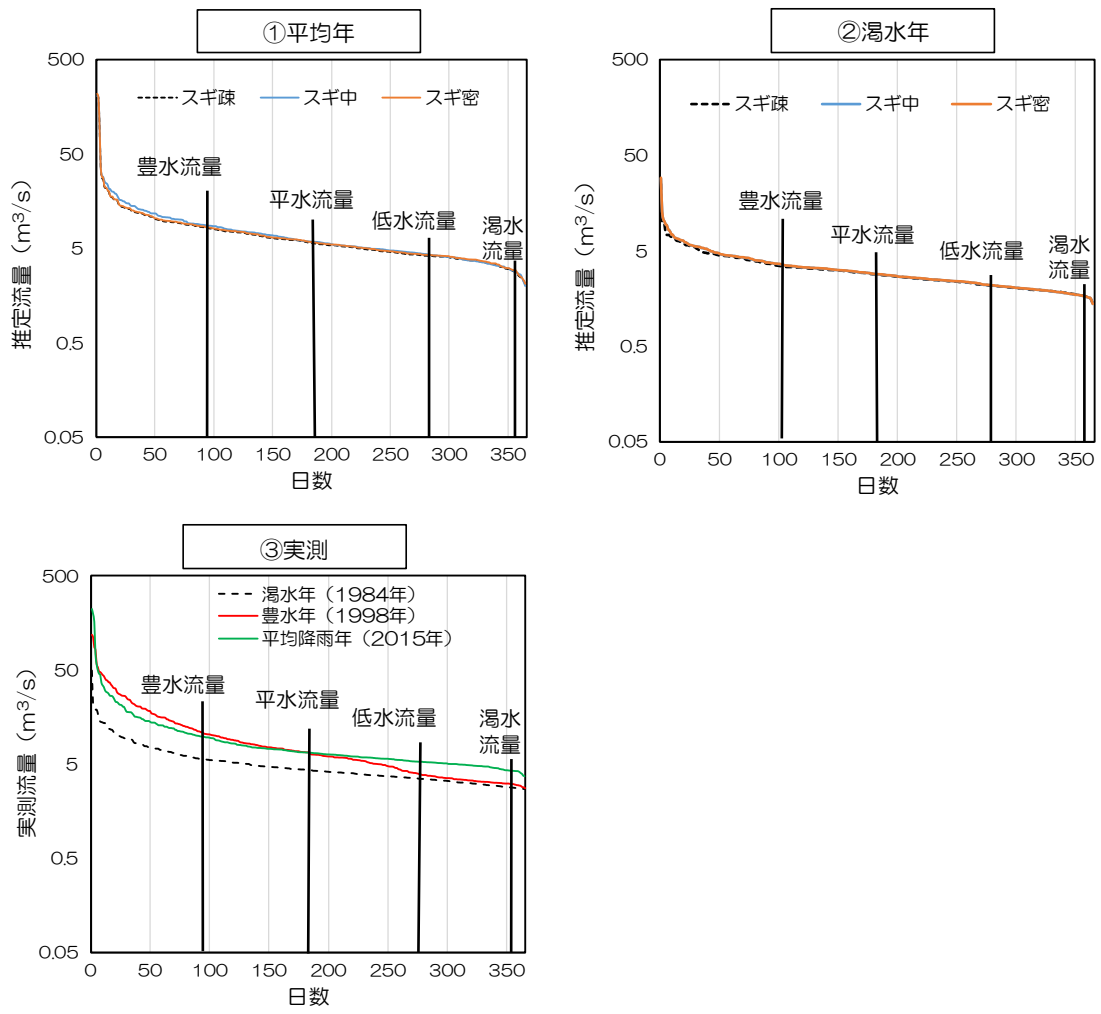


図 7-36 三保ダム流域において平水時年・渇水年密度別流状曲線

8. 森林の水源涵養機能の指標化

8.1. 森林の水源涵養機能の指標化に関するこれまでの知見

森林の洪水緩和機能や水資源貯留（水量調節）機能の程度を指標化により評価可能とすることは、事業実施効果の検証や、重点対策エリアの特定、それらを踏まえた事業計画といった意思決定の場において極めて有効な手段となり得る。

表 8-1 は、「森林の整備水準・機能計量等調査報告書」（平成 2 年、3 年、林野庁）をもとに、「平成 26 年度森林整備保全事業推進調査」において、洪水緩和機能と水資源貯留（水量調節）機能の計量的評価手法についてとりまとめた概要のうち、一部を編集して再掲するものである。

表 8-1 洪水緩和機能と水資源貯留機能に関する計量的評価手法の概要例
 (出典：林野庁「平成 26 年度森林整備保全事業推進調査」報告書の表 2-14 を編集)

		因子	洪水緩和	水資源貯留
機能発揮の機構	(1) 水文学的条件	①土層への浸透量	多	多
		②土層の貯留量	多	多
		③降雨遮断量（蒸散量）	多	少
	(2) 形質	①土壌孔隙構造	発達	発達
		②地中深部まで連続した大孔隙構造	有	有
		③単位面積あたり雨滴付着量（単位面積当たり蒸散量）	多	少
		④樹種の土壌・根茎網	維持発達・深い根茎層	維持発達・深い根茎網
	(3) 望ましい森林像	②葉量・樹冠のうっぺい度	多・高	小・小
		③樹種の降雨遮断量（蒸散量）	多	少
		④樹種の樹冠凸凹度	高	少
		⑤樹種の成長力	旺盛	高齢で適度な成長
		⑥人工林施業	—	強度な除間伐・枝打ちが実施されている
		効果評価因子	①樹高	地位級の高い林分ほど効果大
	②樹冠疎密度・立木密度・凸凹度	密ほど高・高・高（林分の階層別立木本数が多い）	疎ほど高・低・低	
	③林齢	年成長量最大林齢 高い	壮齢期以後の高齢林	
	④森林整備	弱度の間伐 20%定性間伐の繰り返し	強度の除間伐・枝打ち	

前述の報告書作成時期の研究としては、「森林の洪水流出への影響解析では、森林立木そのものの洪水緩和機能はそれほど多くなく、森林土壌層にある」（塚本・太田, 1984²⁵; 太田 1991²⁶）とした見解が主流であり、樹種や林相の相違よりも、土壌特性の違いが機能発揮及ぼす影響の方が高いと考えられてきたことが、表 8-1 に記載の因子の内容をみても分かる。

同時期に行われた、平成 13 年の学術会議の見解においても、「森林は中小洪水においては、洪水緩和機能を発揮するが、大洪水においては顕著な効果は期待できない。大規模な洪水では、洪水がピークに達する前に流域が流出に関して飽和に近い状態になるので、このような場合、ピーク流量の低減効果は大きくは期待できない」とされ、水資源貯留（水量調節）機能に関しては、「渇水流量に近い流況では（無降雨日が長く続くと）、地域や年降水量にもよるが、河川流量はかえって減少する場合がある。このようなことが起こるのは、森林の樹冠部の蒸発散作用により、森林自身がかかり水を消費するからである。森林は水を生み出すわけではないこと、渇水流量が

²⁵ 塚本良則, 太田猛彦(1984)「水管理のための森林施業序論」水利科学 28 巻 3 号, p28-61.

²⁶ 太田猛彦(1991)「森林の水源涵養機能と森林施業のあり方私論」水利科学 34 巻 6 号, p1-33

減少する場合もあること、しかしながら水資源確保上有利であること等一見矛盾する事実を含めて、森林の水源涵養機能を正しく理解することが必要である」と述べられている。

その後、間伐が遅れたヒノキ人工林では地表流（ホートン型地表流）が発生し、表面侵食が起ること（Gomi et al, 2008a²⁷ and 2008b²⁸; 宮田ら, 2009a²⁹ and 2010³⁰; Onda et al., 2010³¹）や、バイオマットフローと呼ばれる、リターや細根などの有機物が密集した地表の上層部分で降雨排出速度が加速する（寺島・平野, 2007）といった短期流出特性に関する新しい知見も報告された。しかしながら、論文数は少なく、森林の多面的機能についての議論が活発となった 1990 年代以降は、間伐が遅れた人工林の水資源貯留機能（貯留量）に関する研究が主たるテーマとなった。

こうした流れから、森林の水源涵養機能を、土壌特性からのみではなく、樹種や林齢といった細分化された森林状態と林内水文環境との関連性を複合的に考慮し、評価する事例も増えてきた。

表 8-2 は、国や自治体などによって実施された、近年の森林の水源涵養機能評価の事例である。

表 8-2 森林の水源涵養機能の評価において考慮されている因子及び指標化・評価方法の事例

事例	目的	機能の種類	考慮されている因子	指標化・評価の方法
森林機能評価基準（北海道, 2006）	<ul style="list-style-type: none"> 客観的な評価基準 森林整備の必要性に関する道民説明 	<ul style="list-style-type: none"> 湧水緩和機能 洪水緩和機能 	<ul style="list-style-type: none"> 下層植生の有無別森林土壌 未固結地質の露出 舗装、基岩など 	<ul style="list-style-type: none"> マイナスと考えられる項目を減点（減点法）
やまぐち森林づくり県民税関連事業評価システム（山口県, 2008）	<ul style="list-style-type: none"> 税関連事業の効果の把握（事業評価） 	<ul style="list-style-type: none"> 水資源貯留機能 洪水緩和機能 	<ul style="list-style-type: none"> 最大浸透量、樹冠遮断量、蒸散量 年降雨量 ピーク流量（降雨強度及び流出係数） 	<ul style="list-style-type: none"> 数値データ化（事業実施前と事業実施後の浸透能の比較） 数値データ化（事業実施前と事業実施後の洪水時のピーク流量の比較）
水源林林況等調査（2021, 神奈川県第55回施策調査専門委員会資料2-1, 2-2）	<ul style="list-style-type: none"> 神奈川水源環境保全・再生施策に必要な基礎データの収集 	<ul style="list-style-type: none"> 水源林の森林管理上のリスク 水源林の土壌流出リスク 	<ul style="list-style-type: none"> 立木密度、樹高、胸高直径、材積、収量比数、相対幹距、形状比、樹冠長率、樹冠疎密度 下層植生被覆率、USLE、土壌流出箇所 	<ul style="list-style-type: none"> 航空レーザーデータ解析による因子の数値データ化 森林管理上リスクと土壌流出リスクのスコア化による巡視優先度評価マップ
森林の機能別調査実施要領（「国有林野関係通達集<経営編>平成13年度」）	<ul style="list-style-type: none"> 機能のポテンシャル評価区分（ゾーニング）による森林整備計画立案 	<ul style="list-style-type: none"> 洪水緩和機能 水資源貯留機能 	<ul style="list-style-type: none"> 傾斜、標高、地形、降雨量、積雪 土壌、地質、傾斜、標高 	<ul style="list-style-type: none"> 評価基準表にも基づく各因子の機能程度（A・B・C）の判定とクロス集計表による得点化
林野庁 平成 27 年度流域山地災害等対策調査（保安林配備状況調査）委託事業	<ul style="list-style-type: none"> 保安林機能の評価技術に関する既往成果レビュー 	<ul style="list-style-type: none"> 洪水緩和 水資源貯留 	<ul style="list-style-type: none"> 土壌孔隙率、流出係数 樹冠貯留量、低減係数、浸透能、損失量、基底流量等 	<ul style="list-style-type: none"> 数値データ化（値の大小の比較）

27 Gomi T., Sidle R.C., Ueno M., Miyata S., Kosugi K.(2008a) Characteristics of overland flow generation on steep forested hillslopes of central japan. Journal of Hydrology. Vol.361, 275-290.

28 Gomi T., Sidle R.C., Miyata S., Kosugi K., Onda Y. (2008b) Dynamic runoff connectivity of overland flow on steep forested hillslopes: Scale effects and runoff transfer. Water Resources Research. Vol.44, W08411, 1-16.

29 Miyata S., Kosugi K., Gomi T., Mizuyama T.(2009a) Effects of forest floor coverage on Overland flow and soil erosion on hillslopes in Japanese cypress plantation forests. Water Resources Research. Vol.45, w06402, 1-17.

30 Miyata S., Kosugi K., Nishi Y., Gomi T., Sidle R.C., Mizuyama T. (2010) Spatial pattern of infiltration rate and its effect on hydrological processes in a small headwater catchment. Hydrological Processes (inpress).

31 Onda Y., Gomi T., Mizugaki S., Nonoda T., Sidle R.C. (2010) An overview of the field and modeling studies on the effect of forest devastation on flooding and environmental issues. Hydrological Processes (inpress).

特に水資源貯留（水量調節）機能に係る因子の指標化・評価においては、樹冠遮断量、蒸散量、立木密度、樹高、林齢、収量比数等といった森林因子が考慮されているケースが多く、一方で洪水緩和機能については、依然として土壌を指標としたものが多い。これは、森林そのものは洪水緩和機能にそれほど大きく影響しないという従来の見解を塗り替えるほどの新しい知見が出てきていないためと思われる。

ここでは、土壌や森林に係る因子が、流域の洪水緩和機能や水資源貯留（水量調節）機能に対し、実際にどの程度影響を及ぼすのか、因子の特徴をパラメータに置換え、その感度を分析することにより、得られた結果が各機能の指標化の検討に有効かどうかを検証することとした。

8.2. モデルパラメータと林分要素との関連性

図8-1は、林分要素（樹種、林齢、密度）とSWATモデルのパラメータとの関連性を示しており、各点線枠内には、SWATモデルにおける各水文プロセスの計算に用いられるパラメータが含まれている。この図から読み取るべき2点について、以下に記す。

一つ目としては、図の左側に示される林分要素のうち、樹種や林齢の要素を反映させているパラメータは、矢印の数からも多数あることが分かるのに対し、密度の要素を反映させているパラメータは少数という点である。これは、密度をパラメータへ反映させるための既往知見や参照データが限られていたことや、知見があったとしてもそれらをSWATモデルのパラメータへ反映する手法の検討が不十分であるため、結果として樹種や林齢とは異なり、シミュレーション結果には密度の要素が十分に加味されていないということになる。

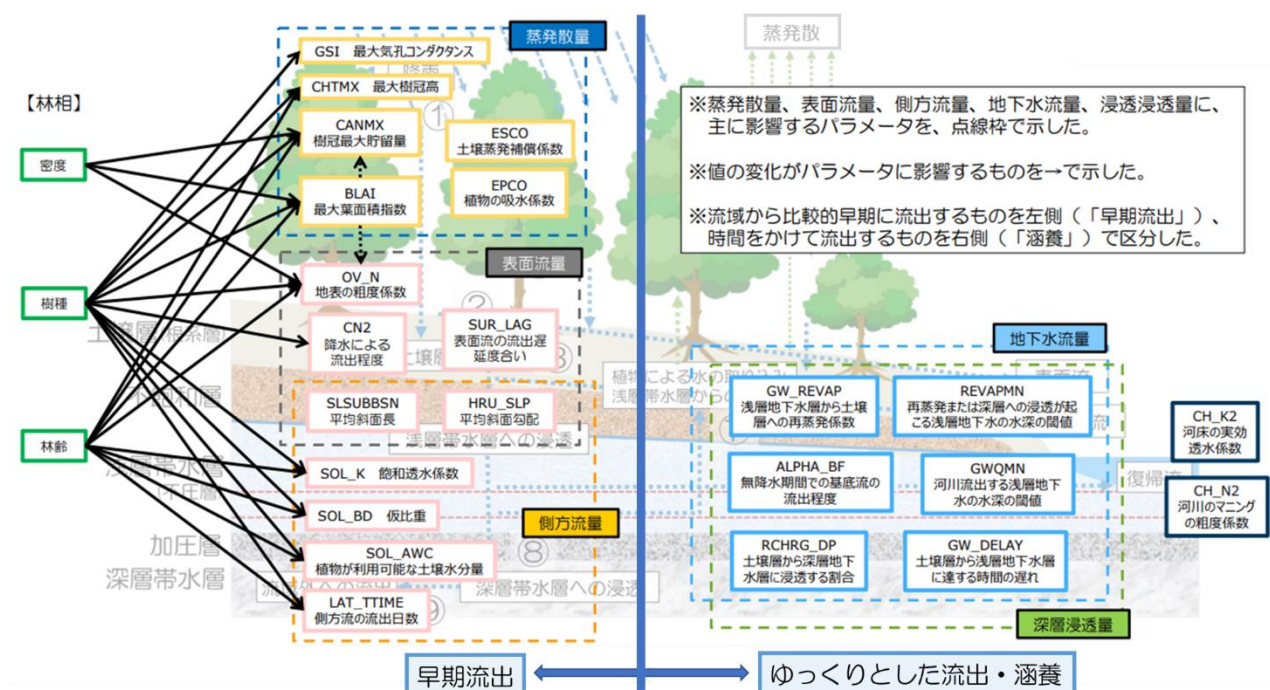


図 8-1 SWATモデルのパラメータと林分要素との関連性

二つ目としては、森林整備等により変化した森林の状態は、パラメータ値の調整により、その

変化をモデル内で再現させることが可能ではあるが、人為的に変化させることのできる要素は、林相や一部の土壌に限られ、地形や地質などに関する要素を変化させることは実質的には難しいという点である。このため、アウトプットに現実的に影響を与えることのできる因子としては、林相や土壌に関するものが主体となり、蒸発散量、表面流量、側方流量などの水文プロセスの計算結果を変化させることができる一方、地形や地質が大きく影響するとされる地下水流量や深層浸透量まで変化させようとすることは妥当とはいえない。

前述のとおり、密度の要素についてはモデルに十分に加味されないものの、樹種や林齢を含め森林の要素の変化をパラメータに反映させ、アウトプットの流出量への影響の度合いを測ることで、各因子が洪水緩和機能や水資源貯留（水量調節）機能に及ぼす影響の程度を定量化できる可能性がある。

次項では、パラメータの感度分析によりアウトプットに影響の大きいパラメータを特定し、それらのパラメータに関連する因子の情報から、各機能の評価に最適な指標を設定することができるかどうか検討を行う。

8.3. パラメータ感度分析の方法

パラメータの感度分析は、通常、入力可能なパラメータの範囲のうち、最小値と最大値をそれぞれ適用したモデルにより出力されるアウトプットの変動の大きさからパラメータの感度を判定するものであるが、そのような幅広なパラメータ値の与え方は、実際に因子が変化する範囲を超え、非現実的となる場合が考えられる。本事業は、森林の成長や管理等による森林の変化が水源涵養機能に及ぼす影響を定量的に評価するものであることから、今回のパラメータの感度分析は、パラメータを人為的に操作可能なレベルの森林変化を再現するために必要な最小値から最大値の範囲に限定し、以下の式（Nearing, 1989）により感度指数を算出することで行った。

$$S = \frac{[(O_2 - O_1) / \bar{O}]}{[(I_2 - I_1) / \bar{I}]}$$

S は感度指数、 I_1 、 I_2 はそれぞれインプットの最小値、最大値、 O_1 、 O_2 はそれぞれアウトプットの最小値、最大値、 \bar{I} は I_1 、 I_2 の幾何平均、 \bar{O} は O_1 、 O_2 の幾何平均である。

感度分析の対象とするパラメータとしては、森林、地表、土壌、地形に関するもののうち、既往文献等より一定の感度が認められているパラメータを選定した（表 8-3）。

表 8-3 感度分析を行うカテゴリ毎の主要なパラメータ及び計算に用いられる水文プロセス

カテゴリ	パラメータ	説明	計算に用いられる水文プロセス
植物（森林）	BLAI	葉面積指数の最大値	蒸発散
	GSI	最大気孔コンダクタンス	蒸発散
地表	CN2	カーブナンバー	地表流、土壌浸透
	OV_N	地表の粗度係数	ピーク流量
土壌	SOL_K	土壌の飽和透水係数	グリーン&アンプト法による地表からの土壌浸透、側方流
	SOL_BD	土壌仮比重	グリーン&アンプト法による地表からの土壌浸透、土壌下層への鉛直浸透
	SOL_AWC	土壌中の有効水分	土壌下層への鉛直浸透
地形	HRU_SLP	平均斜面傾斜	ピーク流量、側方流

各パラメータの範囲（最小値、最大値）の具体的な決め方として、例えば、森林パラメータの一つである BLAI は、現実的には「0-20 年生・密度が疎・ヒノキ林」に設定している最も小さい値である「2」と「20-30 年生・密度が密・スギ」に設定し、最も大きい値である「12」の範囲の中で変化するであろうという想定のもと、BLAI を変化させる範囲は最小値の「2」から最大値の「12」とした。

分析を行うパラメータの最小値・最大値は、モデルに一つずつ適用し、その間、その他のパラメータは固定とした。なお、使用したモデルは、道志・現代モデル（シミュレーション期間：2015-2019）である。

8.4. パラメータ感度分析の結果と指標化に向けた考察

前項の方法にて感度分析を行った結果を図 8-2 に、また、算出された感度指数を表 8-4 に示す。

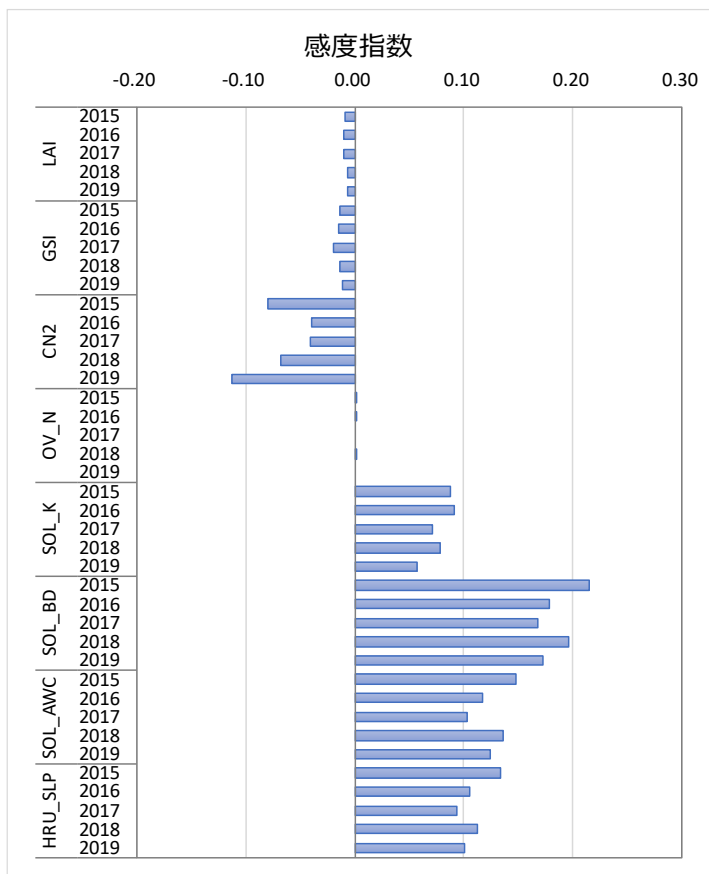


図 8-2 感度分析の結果

パラメータ	シミュレーション年	感度指数	感度指数 (幾何平均)
LAI	2015	-0.0091	-0.0082
	2016	-0.0097	
	2017	-0.0095	
	2018	-0.0067	
	2019	-0.0067	
GSI	2015	-0.0135	-0.0145
	2016	-0.0151	
	2017	-0.0198	
	2018	-0.0137	
	2019	-0.0116	
CN2	2015	-0.0801	-0.0627
	2016	-0.0392	
	2017	-0.0402	
	2018	-0.0677	
	2019	-0.1132	
OV_N	2015	0.0003	0.0000
	2016	0.0003	
	2017	0.0000	
	2018	0.0002	
	2019	0.0000	
SOL_K	2015	0.0874	0.0761
	2016	0.0917	
	2017	0.0712	
	2018	0.0787	
	2019	0.0569	
SOL_BD	2015	0.2153	0.1855
	2016	0.1782	
	2017	0.1685	
	2018	0.1966	
	2019	0.1730	
SOL_AWC	2015	0.1482	0.1246
	2016	0.1168	
	2017	0.1030	
	2018	0.1358	
	2019	0.1242	
HRU_SLP	2015	0.1334	0.1082
	2016	0.1056	
	2017	0.0932	
	2018	0.1129	
	2019	0.1002	

表 8-4 各パラメータの感度指数

表 8-4 に示す各パラメータの感度指数（幾何平均）より、感度が最も高かったのは、SOL_BD（土壌の仮比重）、次いで SOL_AWC（土壌中の有効水分）、SOL_K（土壌の飽和透水係数）であった。土壌に関するパラメータの感度が総じて高く、BLAI や GSI といった植物関連のパラメータの感度は低い結果であった。また、HRU_SLP（平均斜面傾斜）は、地形に関するパラメータではあるものの、土壌層で発生する側方流の流出計算に用いられており、土壌パラメータとしてのふるまいも兼ねていることから、全体的に土壌の要素がアウトプットの流出に大きく影響していることが明示的に示された。今回、表面流出の計算方法として、カーブナンバー法ではなく、グリーン&アンプト法を採用したためか、通常、カーブナンバー法では感度が高いと報告されている CN2 の感度指数は低かった。OV_N（粗度係数）については、アウトプットにほぼ影響していないと捉えられる結果であった。

また、シミュレーション年別にみると、感度指数の大小は年毎に変化しており、大きな豪雨イベントの有無や年降雨量の多寡により、パラメータの感度が変化する可能性も示唆された。

今回、パラメータの感度としても、森林土壌が水源涵養機能に大きく影響していることが明示化され、この結果が従来調査研究による知見と一致していることから、水源涵養機能を評価する上で土壌要素を指標とすることについて、一定の妥当性が示されたといえる。しかしながら、土壌物理性の状態は人為的に簡単に変化させられるものではなく、樹種や林齢、根系の発達具合等に影響を受けるといった報告もあることから、現在ある森林土壌の保全のために、地表を覆う森林を適切な状態で維持・管理してことが重要であり、そうした観点を踏まえた指標を通じて水源

涵養機能の評価がなされていくことが望ましい。

9. 総括 ～流出モデル活用の成果と今後の展望～

本事業では、モデルシミュレーションを通じて、森林の水源涵養機能のうち特に洪水緩和や水資源貯留（水量調節）に資する効果について定量的に把握するとともに、森林の充実に伴う変化や、施業等、森林管理の影響により異なる状態の林分それぞれが有する水源涵養機能の程度について評価を行った。その結果、第7章で詳細を述べたとおり、森林の洪水緩和機能、水資源貯留（水量調節）機能を包括的に評価することができ、流出モデル活用の有効性が示せた。

一方で、水源涵養機能の背景にあるメカニズムには未解明な部分も多く、細かな施業方法の違いによる水源涵養機能への影響評価を行うには、モデルの高度化が必要であり、求めるアウトプットのレベルによっては、モデルの構造や技術的な側面から限界もあると考えられる。

以下に、森林流域への流出モデルの適用に関し、本事業において集約された知見を踏まえ、今後も流出モデルを用いて森林の機能をより適切に評価していくために、最終的には森林の管理・森林整備計画の検討に積極的に活用していくために留意しておくべき点について述べる。

- 森林流域における水循環や流出量を短期的、長期的に把握するためにモデルを利用することは効果的であるが、実際に個々の流域でモデルを構築するに当たっては、その目的や対象範囲について十分な検討を行う必要がある。まずはモデルから得ようとするアウトプットがどのようなものであるかを整理した上で、その種類やスケール、求める精度や時間単位等を選定していく必要がある。
- 本事業では、図9-1の評価目的のうち「林相別」として示したレベルのモデル構築を行った。このレベルの範囲内でのモデル構築であれば比較的容易に行えるものの、針広混交林や複層林など、より細かな森林について評価したい場合には、参照可能な既往知見や観測データが限られ、モデル構築は現時点では難しいことが予想される。アウトプットとして求める精度が高いほど、モデルの構築に必要なインプットデータの解像度も高いものが求められ、モデルの精緻化に係る時間や労力が増すことに留意が必要である。

評価目的	土地利用別 (流域全体からみた森林の 効果に関する評価)	林相別 (管理別、成熟別・荒廃状況別にした 森林の効果に関する評価)	施業体系別 (単層林・複層林・針広混交林等別に みた森林の効果)
解析スケール	大流域 (数万ha)	中流域 (数百～1万ha程度)	小流域 (数十～百ha程度)
林野庁事業にて同スケールで解析した事例	有明調査事業 ・菊池川、筑後川、球磨川流域	本事業 ・道志、三保、貝沢流域	本事業 ・貝沢流域 有明調査事業 ・常陸太田試験流域
データレベル	傾斜区分図 DEM (10～30m)	林相区分図 DEM (5～20m)	土壌図 DEM (0.5～5m)
不足データ	オープンソース (国土数値情報、森林簿等) + 現地調査		航空レーザ、地上レーザデータ等 + 現地調査
不足データの補完方法	有明調査事業等で検討		未検討
モデルによる再現性	立木密度、崩壊地の情報 立木密度：4点/m ² LIDARデータ未整備のエリアは森林簿の疎密度等で代用 崩壊地：空中写真より判読 パラメータ調整により、林相別の評価は可能。ただし、疎・中・密より細かい立木密度単位での評価は困難。		
メリット	<ul style="list-style-type: none"> 一般的に入手可能なデータを利用可能 モデル構築やインプットデータ準備に係る時間を押さえられる。 同一のインプットを用いることで、複数モデル間での比較が可能 		<ul style="list-style-type: none"> より複雑な林分構造を反映させることが可能 水文プロセスを林分状態別により詳細に分析・評価することが可能
デメリット	<ul style="list-style-type: none"> データの解像度が低い場合、間違ったインプット入力となってしまっている場合がある。 単層林や複層林のような複雑な林相の評価はできない。 		<ul style="list-style-type: none"> LiDARデータが存在しないエリアもある。 扱える技術者が確保できないリスク

図 9-1 利用目的に応じたモデルの精緻化レベル

- 上記のような複雑な林相や、将来の気候変動を踏まえた森林の機能評価を発展させていくためには、継続的な観測及びデータ収集が必須である。観測においては、出水時のピーク流量やピークのタイミングに着目する必要性を考慮し、時間単位などのできるだけ細かな単位で、平水時だけでなく、出水時も含めてデータ収集をしていくことが望ましい。
- SWAT モデルはもともと、傾斜の少ない大規模な農地を対象として開発されたプログラムであり、急傾斜地の多い日本の森林流域へ適用した際には、過少な蒸発散量が算出される傾向にある。SWAT モデルによる蒸発散量は、BLAI (最大葉面積指数) を主なパラメータとして、ペンマン・モンティース法により求められるが、国内の森林のBLAIと蒸発散量の相関はそれほど高いとはいえず、このことも蒸発散量の推定精度の低さに起因している可能性もある。本事業では、検討委員である東京農工大学白木克繁准教授や技術アドバイザーである岐阜大学大西健夫教授の御協力の下、スギ、ヒノキなどの人工林について、立木密度や森林の成長を加味して蒸発散量を計算する独自のプログラム開発 (SWAT-Forest) を試みた。SWAT-Forest については、現在も開発中ではあるものの、SWAT モデルオリジナルの計算方法よりも高い精度で蒸発散量が推定されることが確認されており、今後、立木密度のコントロールを中心として、様々なシナリオ条件下における水源涵養機能の変化をシミュレートすることにより、国や各自治体などにおける山地流域の森林整備計画策定の意思決定に有効に役立てられることが期待される。
- 各種の森林情報は、森林簿から比較的容易に入手が可能であるが、森林簿には、正しい林齢の情報や、間伐・伐採といった細かな施業の履歴が反映されてないケースもみられることから、必ずしも森林簿の林小班毎の境が林相の境目となっているわけではないこ

と等から、実際とは異なる情報がモデルにインプットされてしまう可能性があり、モデルの結果が誤った解釈につながってしまう恐れがある。一方で、多少の不一致はあるが、森林簿の樹種や林齢、樹冠疎密度といった情報から林分の細分化を行うことは一定程度可能であることが本事業を通して実証されており、今後は航空レーザのデータ等の活用・拡大と併せて、より精度の高い森林情報の基盤が全国的に整備・推進されることが望まれる。

- 高度なモデルを構築・運用するには、森林・水文・治山に関する知識・経験に加え、GISやデータベース等の情報処理能力をもつ人材の確保が必須であり、技術者の育成も課題といえる。

10. 森林の水源涵養機能に係る解説資料等の作成

10.1. 解説書等作成の目的

森林の水源涵養機能についてはまだ未解明な点も多く、現時点で「水源涵養機能を高めるためにはこのような森林管理が最も望ましい」等の、確定的な見解が得られているわけではない。また、実際の森林施業においては、地域差や立地、スケール等の条件によって、施業上の細やかな工夫をしても、明確な効果が得られないこともある。

しかしながら、これまでも多くの研究成果が積み重ねられており、これらから得られる基礎的な知見は、都道府県や市町村の林務担当職員が地域の森林管理や施策の方向性を検討するに当たって、十分ではなくとも一定程度の判断基準にはなり得るものと考えられる。

また、かねてより世論調査でも森林の水源涵養機能の維持・発揮への期待が高いことに加えて、近年では森林環境税及び森林環境譲与税も導入される等、森林整備の効果等に係る定量的・科学的な知見を明らかにして示すことが求められており、地域の森林管理を行う上で、水源涵養機能の科学的知見や機能評価についての理解が欠かせないものとなってきている。

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

さらに、近年では広域や流域レベルの視点での評価も求められているため、広域・長期間での評価に向けた最新技術や研究事例についても紹介し、将来に向けて研究の展望・課題について説明することにより、地方自治体の林務担当職員のほか、森林整備等の取組を行う団体や森林に関心のある人にも、基礎的な知見を参照しつつ、将来への期待を抱いていただけるものとする。

10.2. 作業計画

事業期間における解説書作成の作業計画・手順を表 10-2 示す。

表 10-1 解説書作成の計画・手順 (R2~R4)

R2	R3	R4
<ul style="list-style-type: none">情報発信の方向性の確認項目の選定	<ul style="list-style-type: none">各項目のコンテンツ調整進め方の確認	<ul style="list-style-type: none">コンテンツ作成最終的な仕上がり

10.3. 森林の水源涵養機能に係る解説資料の作成

調査の最終年度である本年度事業においては、過年度調査において検討した項目に関して検討委員から得た意見や助言、昨今の森林の状況や最新の研究成果等、さらには本事業のこれまでの調査内容を踏まえ、森林の水源涵養機能に係る解説資料を作成した。

解説資料の項目を表 10-2 に示す。

表 10-2 森林の水源涵養機能に係る解説資料の項目

はじめに (序章)	
1. 森林の水源涵養機能の重要性	1-1 日本の地理、地形、気象条件を踏まえた森林の位置づけ
	1-2 日本の森林と水循環の関係
	1-3 水源涵養機能とは
2. 森林の変遷と新たな評価の必要性	2-1 森林の変遷と政策
	2-1-1 江戸時代から戦前までの動き
	2-1-2 戦後の動き
	2-1-3 近年までの動き
	2-2 森林環境税等の導入と水源涵養機能の説明の必要性
2-3 今求められる森林の姿と水源涵養機能の評価の観点	
3. 森林における水循環のプロセス	3-1 一般的な流域での降雨-流出プロセス
	3-2 樹冠遮断、蒸散、林床面蒸発
	3-3 土壌での浸透・貯留
	3-4 河川等への流出
4. 水源涵養機能に係る因子	4-1 土地利用形態に関する因子
	4-2 立木に関する因子
	4-3 下層植生・土壌表面に関する因子
	4-3-1 下層植生による遮断・蒸散
	4-3-2 下層植生が浸透・表面流に与える影響
	4-4 土壌や基岩に関する因子
	4-4-1 土壌や地形条件
	4-4-2 樹木根系の影響
	4-4-3 基岩への浸透
	4-4-4 基岩の透水性
5. 森林状態の変化が水循環に及ぼす影響	5-1 自然撓乱による影響
	5-2 森林施業による影響
	5-2-1 間伐・主伐による影響 (短期的影響)
	5-2-2 森林の成立・成長による影響 (長期的影響)
6. モデルによる水源涵養機能の評価	6-1 モデルによる評価の重要性
	6-2 モデルによる水源涵養機能の評価例
	6-2-1 森林の管理状態による影響
	6-2-2 森林の成熟による影響
	6-2-3 森林の回復による影響
	6-3 今後望まれる森林管理の方向性
7. 今後の課題	7-1 気候変動も踏まえた流域単位での森林管理
	7-2 今後必要となる観測やモデルの高度化
	7-3 今後の展望

10.4. パンフレットの作成

解説書資料の概要も含め、近年の水源涵養機能に関する研究成果等を一般向けに分かりやすく紹介するためのパンフレット（表紙を含めて全8ページ）を作成した（図10-1）。



図10-1 パンフレット「森林の水源涵養機能の発揮に向けて」の抜粋

11. 検討委員会の開催

本事業の実施に当たり、専門的な見解から検討を行うため、表 11-1 の有識者 6 名（委員）と技術アドバイザー 1 名並びに、オブザーバー 1 名から構成される検討委員会を表 11-2 に示す日程及び議事内容において実施した。

なお、各委員会の議事要旨を巻末資料に添付した。

表 11-1 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 賢一朗	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	名古屋大学 生命農学研究科 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 研究ディレクター (国土保 全・水資源研究担当)	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 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 11-2 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4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) これまでの課題及び指摘事項 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) その他
第2回 検討委員会	令和4年 12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) 事業概要と課題及び指摘事項 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) その他
第3回 検討委員会	令和5年 1月27日(金) 15:00~18:00	日本森林技術協会 5 階中会議室 及びオ ンライン	1) モデル構築・精緻化 2) モデルを用いたシナリオ解析・ 評価 3) 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 4) 今後の森林・流域管理計画等 における流出モデル活用に関する課 題及び留意点 5) 森林の水源涵養機能に係る解説 資料等の作成

巻末資料

- I. SWAT モデルについて
- II. SWAT モデル パラメータ初期値一覧
- III. SWAT モデル 土壌データベース初期値一覧
- IV. 検討委員会議事概要

I. SWAT モデルについて

本事業で流出モデルに用いた SWAT (Soil-Water Assessment Tool) モデルの概要を記す。

i. SWAT モデルの概要

SWAT (Soil-Water Assessment Tool) モデルとは、アメリカ農務省農業研究局 (USDA-ARS) によって開発された準分布型流出モデルである。SWAT モデルは地形 (傾斜)、土地利用、土壌等の条件が同一で、似通った水文的挙動を示す HRU (Hydrologic Response Unit : 水文応答単位) と呼ばれる領域毎に、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モデルであり (図 I-1)、Wellen et al. (2015) 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である。近年では、日本でも SWAT モデルを利用して、流域の水や物質流出解析の事例が報告されている (清水ら, 2013)。また、SWAT モデルのコードは公開されており、必要に応じて計算プログラムを改良することが可能である。

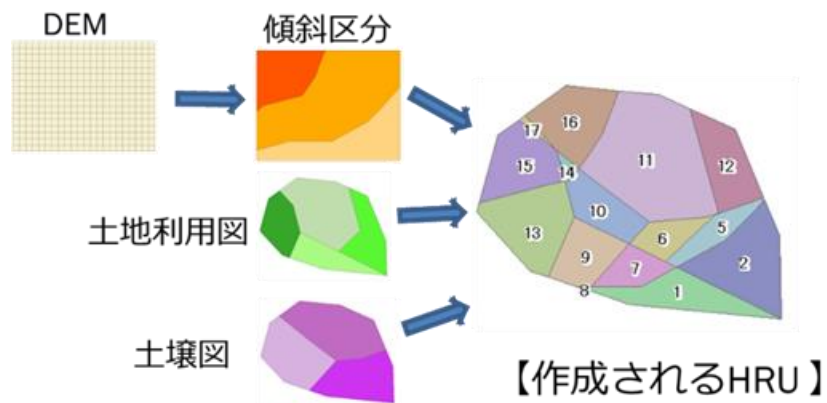


図 I-1 HRU の概略図

ii. SWATモデルで考慮される各水文プロセスと計算方法

SWATモデルには、水文プロセスを表す計算式が組み込まれており、それぞれのプロセスに水や物質の移動量等がHRU単位で算出される。具体的には、表I-1と図I-2のとおりである。

表 I-1 SWATモデルにおける主な水文プロセス及びアウトプット

水文プロセス	アウトプット
蒸発散 (遮断蒸発+蒸散+土壤蒸発)	蒸発散量
表面流出	表面流量
土壤層への浸透	土壤中の水分量、側方流量
浅層帯水層への浸透	浅層涵養量、復帰流量 (リターンフロー)
深層帯水層への浸透	深層浸透量

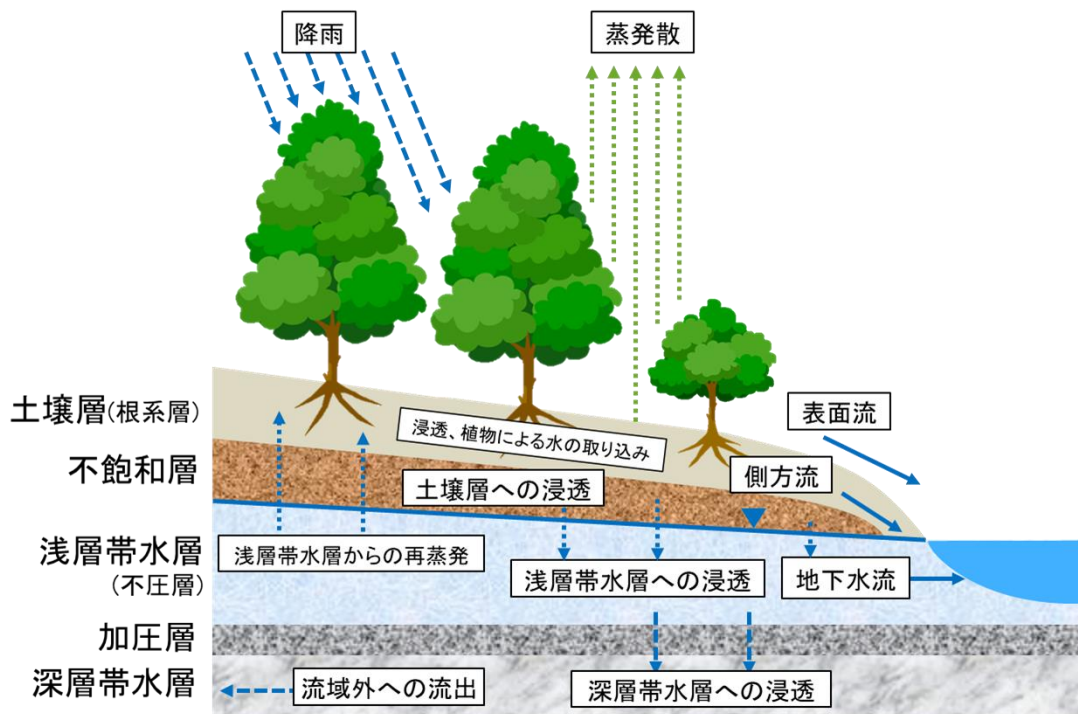


図 I-2 SWATモデルで考慮される水文プロセスのイメージ

SWATモデルにおいては、まずHRU毎に、降雨から深層浸透までの鉛直方向の層間移動と、斜面最下部までの横方向の層内移動に係る水量が計算される。そして、各HRUにおける計算結果が支流域単位で合算され、地形データに基づいて集水され、河川に流下する仕組みとなっている。

なお、蒸発散と表面流出の算出方法は、表I-2と表I-3に示す複数のオプションから選択することが可能である。

表 I-2 蒸発散の算出方法

算出方法	概要
Penman-Monteith (ペンマン・モンテイス) 法	<ul style="list-style-type: none"> 水面蒸発量の測定法である Penman 式に植物生理学の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とき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 の推定法が重要、群落抵抗は葉面積指数 LAI の使用を用いる方法あり。 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あり。 日射量、気温、相対湿度、風速データを使用。
Hargreaves and Samani (ハーブリーグス&サマニ) 法	<ul style="list-style-type: none"> 牧草のライシメータの観測から導かれた方法。 日毎の最高・最低・平均気温から日蒸発散量を計算。
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、相対湿度データを使用。

表 I-3 表面流の算出方法

算出方法	概要
Curve Number (カーブナンバー) 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計算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) によって計算される。 この方法では土壌表面からの降雨の浸透過程を直接計算することはできない。 日、月、年単位での出力が可能。
Green&Ampt (グリーン&アンプト) 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が関与する複雑な式を用いた計算方法。 インプットデータとして時間雨量のデータが必要となるが、降雨の浸透過程を直接計算することができる。 土壌の物理性に関するパラメータが浸透量及び表面流出量に強く影響してくるため、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。

iii. SWAT モデルの主要なパラメータ

SWAT モデルの計算には、多数のパラメータが用いられている。主なパラメータのうち、地表面よりも上部の水文プロセスに関するものを「a) 蒸発散関連パラメータ」、比較的浅い土層に関するものを「b) 浸透・保水関連パラメータ」、さらに深い層（基岩層に相当する層と捉えることもできる）に関するものを「c) 地下水関連パラメータ」として整理したものを図 I-3 に示す。



図 I-3 SWAT モデルの各水文プロセスに関連するパラメータ

このうち、「c) 地下水関連パラメータ」については、実測ベースのデータを得ることが難しいため、既往の文献を基にキャリブレーションを行い、適切なパラメータ値を設定するケースが多い。一方、「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、個別の森林状態を反映できることから、本事業において特に留意すべきパラメータといえる。

iv. SWAT モデル解析フロー

モデル構築の手順は、モデル設計、校正（キャリブレーション）、検証（バリデーション）、予測・評価及び新たな知見の蓄積による事後評価となっている。基本的なモデル構築フローを図 I-4 に示す。

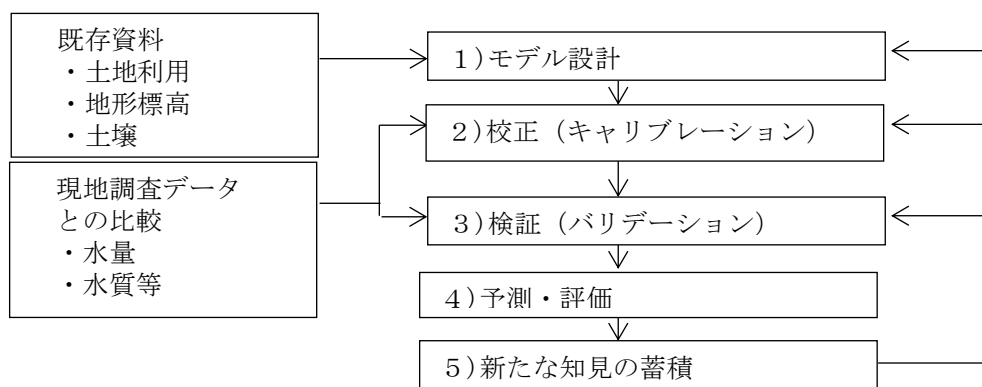


図 I-4 基本的なモデル構築フロー

III. SWAT モデル 土壌データベース初期値一覧

表 III-1 土壌データベース初期値一覧

国土数値情報 土壌分類	SWATNAME	NLAYERS	HYDGRP	SOL_ZMX	ANION_EXCL	SOL_CRK	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)	(% soil weight)	(% soil weight)	(% soil weight)	(% 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/ 黒ボク土 (攪乱)	ANDOSOL/ DISTURB_ANDOSOL	3	A	2000	0.5	0.5	310	0.462	0.3191	99.1432	3.92	17	31.8	51.2	5.55	0.01	0.0104
							590	0.543	0.3185	24.7705	3.283	29.6	27.3	43.1	4.82		0.5
							1130	0.52	0.3833	0.3833	3.022	27.1	33.7	39.2	4.51		
褐色森林土/ 褐色森林土 (攪乱)	BROWNFESTSOIL/ DISTURB_BROWNFESTSOIL	3	B	2000	0.5	0.5	200	1.07	0.1257	79.6386	1.58	21.06	36.37	42.45	12.33	0.01	0.0253
							600	1.34	20	0.989	18.7	32.15	49.2	13.53	0.5		
							1100	1.37	0.8191	0.729	28.235	23.53	48.235	10.68			
未熟土	IMMATURESOIL	3	B	2000	0.5	0.5	215	1.2	0.0298	15.6154	1.498	23.78	27.275	48.94	20.16	0.01	0.017
							447	1.3235	15.2796	0.68	29.9	27.43	42.658	16.339	0.5		
							696	1.35	0.1679	0.83	25.7	21.03	53.23	21.02			
褐色低地土	BROWNLOWLANDSOIL	3	C	2000	0.5	0.5	184	1.118	0.12	14.7	1.916	22.25	27.3	48.44	9.448	0.01	0.5
							424	1.318	17	1.018	24.476	25.84	49.68	9.068			
							639	1.347	0.2	0.76	20.8	23.06	56.13	11.324			
灰色低地土	GLEYSLOWLANDSOIL	3	C	2000	0.5	0.5	168	1.155	0.05	13.0595	2.4	23.197	27.51	49.535	4.79	0.01	0.0491
							374	1.26	15.1028	1.24	21.95	25.5	53.7	7.306	0.5		
							620	1.233	0.1777	1.003	18.74	21.04	60.19	9.164			
岩屑土/ 岩屑土 (攪乱)	ROCKSOIL/ DISTURB_ROCKSOIL	2	D	460	0.5	0.5	200	1.3	0.078	0.821	1.2	23	35	42	0	0.0484	0.2449
							400	1.5	0.258	0.6	34	30	36	0.154			

参考文献：

【黒ボク土】

筑波共同試験地理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。

IV. 検討委員会議事概要

【第1回検討委員会】(1/3)

質問項目	質問者	質問・意見	回答	回答後の質問者コメント	対応・検討すべき事項
1 目的・手法	堀田委員	事業目的は水源涵養機能（特に洪水緩和や濁水緩和）の定量的な把握及び評価であるが、SWATに用いられているG&A法は濁水緩和の評価には向かないのではないか。洪水と濁水を同じ重みでやるというより、洪水のほうが主体だから今回はグリーン&アンプト法だけを考えるという理解でよろしいか。	・グリーン&アンプト法はSWATモデルに組み込みになっている。表面流と分離し、貯留量として計算されたあとに、横流れ、ゆっくり流れるものを考慮すれば、（濁水時の）水文過程も表現できるのでは。グリーン&アンプト法は、まず表面流がどれくらい出るとかという関値的なもので、その後も別途サブルーチンがある。（白木委員） ・P43に記載の通り、洪水緩和機能に重きを置いて進めようというイメージで考えている。（林野庁）	毎年春先に濁水の話が出てくるが、まず今回は洪水をメインということ。洪水をどこまでできるのかという議論については、もう少し議論していくという方向性か。（五味委員）	洪水をどこまで評価するかについて、引き続き検討。
2 林相区分図（道志現代・過去）	五味委員	道志の現代と過去の林相区分図について、過去から現代が変わっていく過程では、奥山の施策が非常に明確に出ている。広葉樹林からヒノキ林への置き換わりが多そうだが、スギ林も拡大しているか。モデルとは別に、どういところが奥山の森林として変わっていったかをまとめていくことも、非常に貴重な情報であり、解説発信とも関連しにくる。	標高が少し高いため、ヒノキになっているところが多い印象はある。（事務局）	-	一見、過去と現在で林相に大きな違いがみられなくても、林齢の置き換えが進んでいること、特に奥山ではヒノキ林の増加がみとれること等、40年間の林相変化の具体的な中身について報告書等で言及する。
3 崩壊地の抽出（三保・過去）	小杉委員	三保・過去モデルにおける崩壊地の抽出対象期間が1978～1982年であること理由は何か。	・気象データ等利用できるリソースとの兼ね合いという意味合いもあるが、1970～1980年代の丹沢地域では、台風などによる山腹崩壊が現在よりも頻発していたという記録もあり、その時期の崩壊が反映できていると思われる。（事務局）	-	・三保で崩壊の要因となった可能性のある事象の整理 1923年以降における西丹沢山地での崩壊地発生の特徴－中川川・玄倉川流域－ (http://www.pref.kanagawa.jp/uploaded/attachment/10247.pdf)
4 崩壊地の抽出（三保・現代）	小杉委員	三保・現代モデルにおいても同様に崩壊地を抽出しているのか。	現代モデルでは崩壊地の抽出は実施していない。森林簿で崩壊地とされている箇所は崩壊地として残っている。（事務局）	-	-
5 崩壊地の抽出（崩壊イベント）	堀田委員	内山さんから補足が入るかもしれないが、1972年に47災という、山北豪雨の大きな崩壊イベントがあったので、1974年から1978年というのはその47災の崩壊を拾っているのかと思う。	そうである（内山氏）	-	-
6 新植地の評価	五味委員	新植地で崩壊発生がみられたという話が出ていたが、過去林相区分図と重ね合わせて、一般的に言われる伐採・植栽後何年後に崩壊が起きているという情報も出てくるという理解でよろしいか。	作業はしていないが、林相区分図と崩壊地の重ね合わせにより、どの林齢のところで崩壊が集中しているかといった分析も可能と思われる。（事務局）	そういった施策との関わりと、先ほどの1972年の山北災害の関連のところが三保モデルの中で2つの重要な柱になると感じた（五味委員）	崩壊地の分析は本事業の本筋ではないため優先度は低い、分析することが望ましい項目の一つ。
7 新植地の評価	堀田委員	スライドP14で、新規植林地で崩壊がよくみられたという話があったか	-	-	裸地、崩壊地だけでなく、新植地（≒若齢に区分されている林分）の蒸発散等にも着目した評価を行う。
8 遮断蒸発モデル	堀田委員	18ページで、遮断蒸発について、針葉樹は小松さんの成果に従っているか。	Inokoshi2022という、猪越氏が書いている論文がある。立木密度よりも樹高のほうが相関がいいという結果になったため、樹高を使っている。プロセスを考えたときに、スギ・ヒノキ等を含めたものは立木密度で調整できるが、広葉樹は植え方や生育状況が密度依存性ではなく、単木当たりの葉の広がりなどを含めたところが非常に効いてくるため、樹高を使うこととした。（五味委員）	-	-
9 蒸散モデル	堀田委員	蒸散のほうも樹高で差別化できる余地があるため、蒸散も樹高を考慮してはどうか。 大きく育った針葉樹は、水の消費量が少ないため水源涵養機能の観点では有利であり、広葉樹は水をどんどん消費するという話にもつながり、話題に奥行きが出る。樹頂点抽出の際に樹高も比較的検出しやすいため、親和性も高いのでは。	蒸散について、樹高との兼ね合いも含め、白木委員のモデル改良においてどう考慮していくか。4点LiDARにより樹高のパラメータがしっかり出せると、パラメータとしての確なものとなる。現在、林野庁も含めて各都道府県で森林DXでの4点LiDAR整備を進めている。その整備が進んでいくと、4点LiDARの活用（手法②など）につながる。（五味委員）	モデルとも関連して、非常に重要な点である（五味委員）	小松先生の論文を要確認。 小松、森林群落で計測される乖離率（decoupling factor）の値、水文・水資源学会誌16、423-438、2003。 https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjshwr/16/4/16_4_423/_pdf-char/ja

【第1回検討委員会】(2/3)

質問項目	質問者	質問・意見	回答	回答後の質問者コメント	対応・検討すべき事項	
10	パラメータ	小杉委員	道志では過去と現代で植生が変わったことによる流量の変化について	事務局も同様に考えている。現時点では、道志の過去・現代モデルのパラメータは、結果がフィットするように合わせているのみであり、各時点の状態に即したパラメータ値に調整できているとは言い難い。今年度は変化させるパラメータ（植生、浅い土壌層の物理性等）と固定するパラメータ（深い層の地下水等）を分けて考慮していきたい（事務局）	・モデルが完成した後、将来、植生管理をしたときにどう変わるのかという議論がその次に来るはず。そのときに植生に関するパラメータや浅いところのパラメータは変わるけれども、深いところは固定したまま議論しないとおかしくなるため、その辺りが今後の課題。（小杉委員） ・現状では、現代、過去はそれぞれSWAT-CUPで合わせているところがあるため、それも含めて結果がどうなっているのか、現代と過去の状態を横並びで見る必要はある（五味委員）	変動パラメータと固定パラメータの整理、調整。
11	パラメータ	五味委員	現代の状態を使って過去の流出を予測させたときにどう波形になるか、検証をしたことはあるか。現代パラメータを使い、雨だけを変えて。	P42に記載の通り、（パターンとしては逆ではあるが）同一の気象インプットを現代、過去モデルにそれぞれ適用した場合のシミュレーション結果を比較することを計画している（事務局）	現代のパラメータをそのまま過去に適用して、気象もだが、森林の状態が過去も変わっていないと想定したときにどれだけ差が出てくるのか。仮想的な計算でその差を検証できるという感じはした（五味委員）	現代のパラメータをそのまま過去に適用した際の結果の検証。
12	気象データ	五味委員	現代と過去の年間降水量が400mm違う。今は4年間の平均値を使っているが、気象データをどう取り扱うかは今後の課題。	-	-	要検討。
13	実測流量データ	五味委員	道志の過去・現代で、ハイドログラフは合っているように見えるが、流出率については実測が0.8、推定が0.58と、実測値の流出率が高い気がする。	確認する。（事務局）	-	道志や三保は、流量堰で観測された河川流量ではなく、ダム流入量で代用していることが原因か。
14	林相区分図（三保過去・現代）	五味委員	流域全体で見ると、道志のほうは広葉樹から針葉樹に大きく転換したが、三保の場合、それは明瞭ではない。（変化したのは）部、ダム周辺の地域のみといったところか。	（ダム西側の）公社の造林が昭和50年代にあり、拡大造林ということで樹種が転換しているところが割とはっきりと見えている。それ以外は、林相の変化はあまり顕著ではないというのがつくってみた印象。（事務局）	細かく見ると、先ほどの崩壊の話もそうだが、林齢的には中で置き換わりが起きている、伐採と再造林は進んでいるけれども、区分としてはあまり変わらない。それはまた違いとしては面白い。（五味委員）	-
15	SWATの改良	堀田委員	疎密度の区分は重要であり、間伐等の施業の効果の変化を経年的に追っていくことにもつながる。改良したSWATを今後どのように使っていくか、現時点のイメージがあると分かりやすい。	・評価する段階になって、もともとの林相区分図に適切な密度が反映されていないと、評価そのものにずれが生じてしまうため、できるだけ精度よく林相区分図を構築したい。（事務局） ・本事業は本年度でいったん終了するが、年限のない有明事業でSWATの改良を進めたい。使い方は次年度以降何かできるとよい。（林野庁）	森林の施業と森林の特性量の評価、モニタリング、モデルによる森林機能の定量的評価、三位一体で進めていくというのでは。（堀田委員コメント）	貝沢流域では、小面積皆伐後の流量変化をみた調査事例がある（白木，2020） （ https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjshwr/33/2/33_47/_pdf ）。 →間伐など施業（及びその後の林分の経年変化）が流出に及ぼす影響についてモデルで再現できるかどうか、当該調査時の実測流量データを用いて貝沢モデルで検証することは可能（案）
16	林相区分（疎密度）	五味委員	密度は非常に重要。データベース化を、治山課だけではなく森林行政そのものでどう方向づけるか。疎密度判定表に最適密度曲線は入るか。	密度管理図をベースに収量比数表がつけられているため、最適密度曲線を入れることは可能。（事務局）	モデル密度管理みたいなものが入ってくると、初期段階から樹高がここまでになったら間伐して、この密度に落として、最終的な収穫にいくという流れはこの表の中でできる。そういうところを出していけると、現場の人たちにも分かりやすいものになる。（五味委員）	本事業のアウトプットの一つとして、適切な密度管理につながる検討材料を提供することを考慮。
17	林相区分（樹種、林齢）	五味委員	神奈川県の人工林現況調査成果図を用いる事は可能か。	樹種区分としては採用可能だが、林齢の情報がないため林齢は現状の森林簿のままとなる。（事務局）	-	貝沢モデルの林相区分図を、神奈川県の人工林現況調査成果の林相区分図を元に再作成。林齢は据え置き。
18	新しい技術	堀田委員	今年度の対応は難しいと思うが、ドローンレーザーでは200点/m ² くらいのデータが取れる。下層の植被率や樹高、LAIが出るものもある。今あるデータに固執せずとも、数年後にはそういう時代が来ることを見越して検討を進めてはどうか。林齢が無くても水源涵養機能の評価に必要な情報は得られそう気がする。	-	地上レーザーも非常に簡便になってきており、技術開発も含めてそういった可能性も視野に入れたい。この委員会でもなくともどこかで勉強会ができればよい。（五味委員）	・LiDAR解析による林分疎密度推計の過程で取得できる樹高の情報も検証・評価に活用可能。 ・本事業のアウトプットの一つとして、今後の調査手法等に関する提言を残す。
19	森林簿の妥当性（疎密度）	五味委員	道志の「疎・中・密」は現地データとの照合はしているか。	道志の方は、昨年度に取得した現地調査結果のデータがある。現在の森林簿の「疎・中・密」とどのような対比になるか、これから検証予定。（事務局）	森林簿上の「疎・中・密」の妥当性をどこかで検証しておいたほうがよい。このデータだけではなく、例えば神奈川県さんの中にあるLiDARデータで一部分林分を抽出してやってみようというやり方もある（五味委員）	道志の現地立木密度データと森林簿上の樹冠疎密度データとの照合。神奈川県データも活用。

【第1回検討委員会】(3/3)

質問項目	質問者	質問・意見	回答	回答後の質問者コメント	対応・検討すべき事項	
20	五味委員	標準伐期齢を整理した方法論をアウトプットとしてモデルにどうもっていくか、方法論そのもの自体もしっかりと整理していくことが重要。	-	-	標準伐期齢を整理した方法論の整理。	
21	白木委員	遮断蒸発と樹皮表面積の関係グラフについて、常陸太田試験地のデータを用いて試してみたい。	常陸太田の試験地を管理している久保田多余子さんに問い合わせるとよい。(玉井委員)	-	-	
22	実測値の評価	小杉委員	裸地を森林化することによって洪水流出が減る。それがシミュレーションモデルで再現できて、定量評価ができる。そのシミュレーションモデルが今後の予測に使える、というのが理想。観測結果がシミュレーションで再現できていないと、モデルの信頼性の面で問題がある。	今一度、実測データを分析し、モデルで評価が行えるかどうかを見極めたい(事務局)	R3報告書の中で、実測データの分析を行っている部分をこの委員会の後で、メール等で共有してはどうか。モデルを精緻化するためにこの改善を目指しているのか、ターゲットとなるパラメータを明確にすることが重要(五味委員)	・R3報告書の該当箇所を委員に送付 ・実測データの分析(継続) ・ターゲットとするパラメータの明確化
23	流域管理	小杉委員	森林の管理状態の変化による水源涵養機能への影響はそれほど大きくない。流域管理としては、林道施設や皆伐施業、カーボンニュートラル等の問題にも少し踏み込んで、その影響がどうなるかということの評価していくことがより重要と考えるが、林野庁はどう考えるのか。	・(本事業の内容とは)別のところでインパクトが大きいのではないかとするのはまさに御指摘のとおり。作業道の影響など、この事業以外の部分でもそれぞれ手分けをしながら引き続き進めていきたい。(林野庁) ・担当としては、議員等から問われた場合に、公益的機能がきちんと発揮されている(Om3貯めている、ダムと比較してどうか等)と答えられる裏付けが欲しい。(林野庁)	・ダムと比較する必要はない。皆伐や路網敷設など、もとの機能がマイナスになってしまうところ、砂防や森林水文の技術でどうマイナスを0に戻すような施業をしていくか、そういう技術をつくっていくか、という議論のほうが本質的であり重要。こういったモデルや手法をもっと意味のあるほうへどんどん活用していけるとよいのでは(小杉委員) ・実際に流域という観点から、今ある様々なことを主伐・再造林も含めて林業全体で考えると、次のステップとして、現在挙がっている社会課題(九州地方で起こっているような伐採、放棄林等)に対して答えを出していくことも大事。モデルとしてバーチャルでもトライアルしていくのかということは今後考えていく必要がある(五味委員)	・(本事業の主体である)森林状態の変化にともなう水収支の変化等については今後も示していく。 ・現在の社会課題の解決に資する検討・評価(シナリオ解析等)についても行っていかどうか要検討。 ・モデルによるバーチャルな評価も含めるかどうかについても要検討。
24	解説発進	林野庁中村	【解説発信について検討委員へご協力いただきたいことの概要】 解説書作成のため、各委員とのヒアリングの機会を設けたい。具体的には、 ・11月から12月の間に1~2度程度。時間は30分~1時間以内程度。 ・Teamsベースで文章を見ながら、文章をその場で修正もしくは見直しや図の追加が必要な部分についてご助言をいただく。 ・前回、責任編集者という形でご提示した分野の担当をお願いしたい。 ・それぞれの先生方のお名前をいただき、監修という形で出版したい。	-	-	-
25	解説発信	堀田委員	改めて検討したい(林野庁)	(欠席・退席されていた)恩田委員と小杉委員にしっかりと説明する機会も必要(五味委員)	従来の定性的な評価に対し、本事業は、 ・モデルでダム上流域にスケールアップさせた場合にどういった変化が検出できるのか、できないか。 ・広域評価において、既存のリソース(森林簿等)、新しいリソース(LiDAR、地上レーザ等)をどこまで活用できるのか、課題はなにか etc.	
26	解説発信	堀田委員	・この委員会は、水源涵養機能を評価するためにある。現在の解説発信の項目ではその部分(6章)が乖離しており、この委員会の名前では出版することは適当でないと考えられる。 ・今までの理解はパーツ、パーツで、かつ定性的なものであり、そのまま事業評価や森林機能を定量的に評価する形にはうまく活用されてこなかった。 ・流域スケールで科学的評価を行い、それを活用していくためのトライアルの1つであり、機能評価が大事だという論調であれば、この委員会の趣旨に沿っている。	-	-	といった論点で検討を進めており、広域評価のトライアルの一つ。そうした論調をベースとしていくか(要検討)。
27	解説発信	堀田委員	・今までやってきた事業評価に対して違う値が出てしまったときに、それをどうエクスキューズするかという問題はある。一方で、例えばSWATやGeoWEPPはもともと土壌浸食モデルであるため、このようなモデルの活用により、例えば太陽光発電の影響なども簡単に評価できる。このような形で、水源涵養機能をきっかけにして森林にまつわる様々な問題を、こういう手法で定量的に妥当な形で評価・可視化でき、評価のサポートツールになるということをどんどん発信していくことは重要。	-	-	後日、恩田委員と小杉委員にも説明する機会を設ける。

【第2回検討委員会】(1/4)

質問項目	質問者	質問・意見	回答	回答後の質問者コメント	対応・検討すべき事項	
1	広葉樹の林齢 (林相区分図)	白木委員	(林相区分図由来の年齢構成をみて) 自然林だと何年生というの分からないと思うが、森林簿に記載があるのか。	森林簿に林齢の記載があるものについてはそちらを適用。それ以外のものはおそらく成熟している者であろうという想定で20年生以上としている。(事務局)	被災後何年や、ほぼ極相林というような林齢の取り扱いの区分もあるかと思った。SWATモデルのプログラム絡みで色々考えていたため、その辺りの情報が積み重なるとよい。	
2	崩壊地判読	恩田委員	(崩壊地面積割合1%などの) 割合の分母はなにか。1987年の状況で1%というのは少なく感じる。この数字はどこから出てきたか。	崩壊地は写真判読で求めたもの。(事務局)	西丹沢だけではなく、流域全体であれば割合は減って来ると思うが。判読結果を見てほしい。(恩田委員)	委員会後に追加情報を委員に共有。
3		五味委員	P23, 24 (地表の粗度係数や、土壌関係パラメータ) についてはまだ入れ込まれていない(シミュレーション結果に反映されていない)という理解でよいか。	土地利用別にパラメータの差異をつけられているところもあるが、林相別のパラメータ調整はまだ十分とはいえない。(事務局)	承認した。(五味委員)	
4	土壌パラメータ	五味委員	土壌関係パラメータ値の相対関係(大小)は分かったが、具体的な数値もあれば。例えば側方流遅延日数とか、そういったところも含めて。	(作業中につき) 値が流動的なところもあるが、巻末に調整後のパラメータ設定値一覧表をつけている。例えば仮比重(SOL_BD)は「1」前後で、昨年度の目沢現地調査で得た値に近い範囲で設定されている。土壌水分量(SOL_AWC)が低めの設定となっており、うまくいっていないところの1つ。LAT_TTIMEという側方流の移動日数は、実測の値が得られにくくパラメータのため、(キャリブレーションでの)調整パラメータと考えている。飽和透水係数は昨年度から引き続き、一律36という設定。	土壌の関係は目沢では調整済みというところか。(五味委員) 目沢は、昨年度の調整後、特に変更していない。(事務局)	土壌パラメータ調整
5		白木委員	土壌関係パラメータの調整では、例えば40~50年経った林分が伐採整備に入り、植えたらまたゼロにすばんと戻るというイメージか。切っても(整備しても)地面は変わらないという判断か、あるいは重機で圧縮されてということがあって、またゼロにリセットされるというイメージか。	伐採された後一定の期間土壌は同じような状態が保たれるというのは実際にはあると思うが、細かな施業の影響まではパラメータとしては考慮できていない。(事務局)	その辺り、パラメータを変えて試せるのがこのモデルのいいところ。(白木委員)	
6	パラメータ(LAI)	小杉委員	P21のLAIの表では、例えばヒノキで疎から密にしていってだんだんLAIが増えてくるといったようなストーリーとは逆行するような形もみられるのは、たまたま参照した実測データがそうだったからという理解でよろしいか。最終的な結論のばらつきに効いてしまう可能性があるため、後のシミュレーション結果の議論のためにも、もう少し連続的に変わる値としたほうがよいのでは。	モデル結果の評価の際に(実際の密度とは逆行するようなLAI値の設定が)効いてきてしまうかもしれないというのは大いに危惧していたところ。もう少し教科書的な設定にするか検討していきたい。(事務局)	(LAI表)ある程度、施業による密度コントロール(Ry)の情報も入れながら、いろいろな地域のもを集計した結果。小杉委員がおっしゃったところも含めて、このデータはこのデータとして使いつつ、神奈川県における疎密とか、収量、収穫表などを含めて考えていくのもあり。(五味委員)	
7	パラメータ(粗度係数、土壌パラメータ)	五味委員	P23, 24 (地表の粗度係数や、土壌関係パラメータ)で岩盤の深層帯水層への話というのはどうなるのか。	SWATのほうにはインプットとしての地質関係のパラメータもないので、支流域ごとに主要な地質を判別して差をつけるのか、それとも細かくHRUごとにつけるのか、土壌タイプで分けるのか、なかなか検討が進んでいないところ。(事務局)	昨年も岩盤に関しては小杉委員からのアドバイスもあり、そこはあまり突っ込まずというようにことだった。とはいえ、第3回目は最終回になるので、具体的にどの程度どういうふうにするか。最終的に整理したものを第3回の前に共有する必要がある。(五味委員)	
8		五味委員	スケジュール的にはどのような感じで進められているか。第3回の最後のところで出てくるのかどうか。	大西先生頼りですけれども、1月ぐらいにはプロトタイプ的なものができるのではということがありますので、それでトライアル計算というふうなことは出せるかと。(白木委員)	概ね可。ただ、十分な検証にはいたらないかもしれない。(大西技術アドバイザー)	
10	モデル改良(SWAT-Forest)	五味委員	もしかすると目沢のところでは検証が可能になってくるということでしょうか。いずれにしても道志、三保の解析はこの改良型SWATモデルを組み込まない形で進めるのか、事務局側の予定としては、第3回に向けてこの改良版はどんな感じになるのでしょうか。(五味委員)	1月中ぐらいにはプロトタイプができるというお話のため、でき次第試してみても、オリジナルのモデルのほうと、両方併用し、違いをみていく形になるかと思う。(事務局)		
11	モデル改良(SWAT-Forest)	五味委員	林相コードから決めていくという話ですが、モデルそのものが密度とか樹高ですけれども、林相コード、林齢、樹齢からどのような形で密度もしくは樹高に変換していくのかというところをどうお考えか。	神奈川県の収量比数判定表を参考に、樹高と立木密度から林分密度を求められる。あるいは林齢と林分密度(疎・中・密)が分かれば大体の立木密度が分かるという算出の仕方。収穫表に近いようなもの。(事務局)	将来的には航空機レーザとかのデータも使えるとは思いますが、まずはHRUで林相コードからシステム収穫表を使って判定していくという流れになること。(五味委員)	
12		林野庁中村	改良モデルのプログラムは、SWAT以外のモデルにも適用可能な知見であるという理解でよろしいか。	SWATモデルでなければできないというわけではなく、SWATモデルの雨が降って林床に水が行くまでのところのセクションにかぶせるような形のもの。実はほかのプロジェクトでもやっているのだが、もっと単純な水流出モデルの雨のところは樹冠遮断モデルのところを加えたらどうかということを精査して、新しく入れたモデルがどれだけ有用であるかということを試していきたい。(白木委員)	樹冠遮断により地下への浸透量は下がるが、洪水緩和の観点では有効なため、できるだけいるところで活用できれば。(林野庁 中村)	

【第2回検討委員会】(2/4)

	質問項目	質問者	質問・意見	回答	回答後の質問者コメント	対応・検討すべき事項	
13	航空機レーザの活用	五味委員	道志ダム上流には4点LiDARがないのか。	南部のほうに一部神奈川県のエリアがあり、そのデータはある。山梨県のほうは調べた限りではなさそうである。(事務局)	今回現地検証したところが、4点LiDARがなかったところをやったということですね(五味委員) 森林簿が示している密度みたいなものが現地で見たらどうかというような検証というような位置づけというか、そういったこともあって調査位置をそこまで深く検討が及んでいなかった。(事務局)		
14		五味委員	日本林野測量協会さんの航空機レーザマニュアルに加え、ここでは、水源涵養機能の評価に必要な情報の整理が必要。最終的には航空機レーザ計測で密度の計測がどういった形でできるのかという話も大事になってくるが、例えばモデルが必要となる最終的には疎・中・密という単位、これより細かな評価は困難と書いてあるが、こういう形でいいのかどうか。もう少し航空機レーザの活用も考えた形でこのモデルとどうつなげていくのかということを示していけたほうがいいのではないかと。			航空レーザデータがないところ、森林簿しかないところでの水源涵養機能評価手法についても整理も行う。	
15	ダム流入量	五味委員	ダムの流入量が多めになっているという解釈は、これでよいのか。	ダム流入量は水位と地形の情報から計算して算出しているとダム管理事務所より向った。通常の量水堰で取得する流量データとは異なるためか。(事務局)	流入口でオーダーを取っている。(内山氏)		
16	雨量の補正	五味委員(玉井委員)	降水量の問題は前の委員会でもあったと思うが、雨量計からティーン法が何かで割りつけてやっているという感じか。道志や三保の実測流出率が0.8で収支がおかしい。ダム流入量は変更できないので雨量で調整する必要がある。	ダム流入量のデータと一緒に流域の平均降雨量というデータを入力し、それを用いている。(事務局)	森林総研がやっている宝川試験地の観測では、標高が高いところほど降水量が多いと出ている。宝川は谷川岳も含み標高はすごく高いのだが、道志でもそういう傾向があればある程度は大きいかもしれない。雨量計を設置しているところは標高が低いところが多いため、標高が高いところも含めたとすると降水量が過少評価になる可能性がある。(玉井委員)	道志、三保の雨量を標高でWeightをかけた計算式で補正。補正後は流域毎の雨量インプットを更新。	
17				小杉委員	42ページ、ここで豊水年ということで比較をされていると思うが、解析期間が現代のほうで全体的に雨が多くて、過去のほうが雨が少ない時期にたまたまなっているかと思う。それぞれの年の豊水年を選ぶよりも、年間の総雨量が同じ年を選んで比較をするなど、基のデータをきちんと確認してから作業されるのがいいのでは。	記載の間違いがあり、過去のほうが1978年から1982年のデータで、現代が2015年から2019年のデータになっている。(事務局)	シミュレーションをするとき入力データは肝であるため、高度効果の従来の式を用いるとか、そもそも相手方が何をもちって流域平均と言っていたのか、その辺はちゃんと吟味しておいたほうがよい。(恩田委員)
18		小杉委員	43ページ、他の先生からも御指摘があった道志の河川流出量ですけれども、年間の損失量が480~490と少し少ない。流出率が0.8ですので、樹冠遮断率のデータが、立木密度が高いと0.2とか0.3という損失率だったと思うので、0.8の流出率ということは樹冠遮断だけで全ての損失が起きてしまっていて、蒸散で抜ける分が全くゼロになってしまうので、遮断率のデータを入れている議論するとき、この蒸散量を含めた損失率0.2というのはちょっと少な過ぎると思う。		雨量データ、アメダスも含めて、アメダス地点からの標高差を使って全体のGISデータから流域降雨量の計算は、何点か降雨データが道志の中にあっただろうかと可能と思われる。(五味委員)	過去と現代のシミュレーション期間でどのくらいの降雨量があるのかはP47のグラフで示されており、例えば過去モデルの1981年と現代モデルの2017年では大体同じ降水量のため、これらと比較すれば良いのではないかとと思う。(林野庁 中村課長補佐) 同意見。同じ年降水量の年を引っ張り出してきて比較をしたほうが分かりやすい比較になると思った。(小杉委員)	標高をパラメータとして雨量の補正を図る。
19	ハイドログラフ(洪水逓減)	大西アドバイザー	若干否定的な意見となるが、逓減の部分が含まないというのは、プログラムの構造上、土壌層の一番下層から地下水に浸透していく水量が少なくなってしまうこと、また、式の形上、地下水に入ったやつが水収支的にいずれは流出していくという形になっておらず、どうしても失われてしまうものがあるという2つのモデルの構造上の問題によって、中間流や地下水、湧水のときの基底流出を支えるような地下水流出がなくなってしまう傾向がある。それはパラメータの調整ではどうしようもなく、モデルを少し変えるしかないが、まだ解決策を提示できない状況ではあるが、ポイントとして指摘。	大変貴重な情報。土壌のパラメータを調整で森林の違いを無理くり出す必要もないかなという気はする。モデルのそもそもの特性を踏まえて、現状でどう評価できるのかというところをしっかりとここでまとめていくことが大事。(五味委員) もう一つは、湧水年のところも含めて、スギ、ヒノキ、樹種ごとの違いを早急に明確化しなくてもいいのではないかと印象。(五味委員)			

【第2回検討委員会】(3/4)

質問項目	質問者	質問・意見	回答	回答後の質問者コメント	対応・検討すべき事項
20	白木委員	D2(豊水年)は道志・過去モデルの方の比較はないのか。(白木委員)	現代と過去の比較は流域全体のほうでは行っているが、林相別の比較がなぜ現代モデルのみになっているかという、過去モデルのほうでは林分密度の区分がされていないため、過去の林相区分図は立木密度の情報がないので、全部「中」という設定になっており、疎・密・中の分析には現代モデルしか使えないという状況。		
21	白木委員	恩田先生が少ないと言っていた崩壊地について、パラメータはなにか設定されているのか。今回は実態シナリオでの比較だが、仮想モデルをやるときに、例えば全部崩壊地とか、全部ヒノキというような仮想シナリオでもっとドラスティックに変えとよい。崩壊地のパラメータがあるとよい。	崩壊地パラメータはこれから検討予定。(事務局)		崩壊地パラメータの検討。
22	白木委員	64ページ、結果としてすぐきれいに出ていなと思ったのが一番右の図の濁水年で、過去より成熟した今の林相のほうで濁水流量が少ないという標準教科書的なものが出ている。 今の林相からこれだけ切ると濁水のやつもこう復活するとか、次はこんなシナリオにしたらこうなるというものがよく見えてくる。64ページの一番右の図の取りまとめがモデルでやった成功例。			
23	白木委員	シミュレーションのほうは観測値と非常によく合ってきているので、見せ方として、SWATモデルの出でくる数字そのものはまず一つ大事だが、その次に、基の流量データに戻って、現代と過去、例えば直接流出分離をしてみても、直接流出、基底流出という割合の観測されたもの、シミュレーションでやったときの流量も評価してみるとよい。 モデルの流量も遅い成分、遅い成分があるかもしれないが、ハイドログラフに立ち返って比較してみる。特に観測流量の過去と現代は、直接流出分離してみても、過去のやつはこう、現代のやつはこうと、確実に観測データから流出成分の特徴という性質の違いが出てくると思うため、それがSWATモデルを介しても表現できているかどうか、そういう解析方法もあると思った。		例えば直接流出分離とか、ベースフロー分離とか、そういったところも踏まえて、今、日データで出ているのでどういふにやるかというもまた考えなければいけないところですけども、できないことはないということ(五味) P56や58で、樹種、密度、林齢等の条件を変えてハイドログラフを示しており、P57や61で、どの程度のスピード感かを示している。シナリオ解析をやる前にまず実態ベースで、道志と三保の現代・過去モデルのハイドログラフや応答関係を確認し、一定の妥当性が把握できれば、その後シナリオ解析を進めて良いのではと考えている。十分な結果が得られなければ精緻化が必要ということになるのでは。(林野庁中村課長補佐) 後ほどシナリオのところでも出てくる妥当性の現状の評価をもう少し丁寧にやったほうがいいという白木委員のコメントだった。第3回に向けて整理できれば。(五味委員)	観測流量のハイドログラフで直接流出分離を行い、それがSWATで表現できているかどうかを評価できるとよい。
24	恩田委員	(No.21に関連して) 崩壊地パラメータは何か検討しているか。	これから検討予定。現状、裸地という土地利用とそのパラメータセットはあるが、崩壊地はまた別途考慮する必要があると考える(事務局)	崩壊地は森林は全くなし、表面流がたくさんでというふうな設定をつくとよい。(白木委員)	
25	恩田委員	デフォルトの裸地と崩壊地は水の強度が全く異なり、崩壊地の場合はほぼ表面的な、浸透しないと考えてパラメータをつくとよい。一方で、データとして特に広葉樹は表面流が多く出ているが、どうい設定になっているのか。	広葉樹については(一部人工林と差をつけているパラメータもあるが)それほど綿密にパラメータ調整できていない現状。人工林のほうのパラメータの差が、どのパラメータが効いてこうい結果になっているかというところはまだ検証が不十分。(事務局)	全体的にもうちょっと浸透させるようにしていただかないと、崩壊地も含んでいるのかなと思ったのです。そうでないすれば表面流出はあまり起こってほくないので、そこはもう少しみ込ませてほしい。 この後ろのほうに小流域別に崩壊面積率が出ているので、私が調べていたのは崩壊面積率5%ぐらいの流域だったのですけれども、全体では1.5%ぐらいはありますけれども、そんな感じ(恩田委員) 事務局に追加の資料作成をお願いしたい。(五味委員)	中筋さんの関係論文 砂防学会誌
26	小杉委員	例えば65ページで、スギ、ヒノキの違いとか、同じスギでも何年生という違いを示しているが、これは道志谷の流域全体を例えばスギにしたらこうなる、ヒノキにしたらこうなる、広葉樹にしたらこうなるという話でよいか。	仮想的に道志全体をというわけではなく、道志の中にある、スギならスギのHRU(水文応答単位)を集めてきて算出した結果。(事務局)		流域全体でどう仮想的なシナリオを適用するかに重きを置く。 (地形や降水量のパラつきを排除する方法としては、同じ降雨量、傾斜のHRUだけを取り出して集計することも可能)。

【第2回検討委員会】(4/4)

質問項目	質問者	質問・意見	回答	回答後の質問者コメント	対応・検討すべき事項	
27	シミュレーション、シナリオ解析	小杉委員	スギ、ヒノキ、広葉樹という違いでくっついていいのか、それぞれ地形や降水量の違いが結果的に出ているだけで、何ら植生の違いを表していない可能性がある。林齢の違いも同様。同じ地形同士や同じ入力降雨同士を比較しているわけではないので、純粋に種別や林齢の違いが表れているわけではないと思われる。(小杉委員)	ご指摘の通り、同じスギ林でも傾斜が全く異なるところを含みため、純粋にスギの林齢的に見た結果ということにはならない。分析の際、注意したい。(事務局)	地形や降水量の分布などの要素が非常にばらつきに効いていて、林齢とか樹種の違いはあまり関係ないというような結果にこの分析ではなってしまうのではないかと。平均値だけ取ってこれば当然違いはあるだろうが、この線がどれだけばらついていっているか、この違いに意味があるかどうか、そこを十分検討しておかないと、この結果だけ見ると、いかにも樹種の違いで結果が変わりますよという誤解を与えてしまうおそれがある。そうすると結局、後のほうの仮想シナリオで、全部スギとか、全部ヒノキとか、そういう話にする。シナリオをつくって議論するという意味ではそちらがメインになるのかなと。実態シナリオのこの分析は、そういう意味ではあまり意味がないのかなという気もしました。(小杉委員)	
				(上記、小杉委員の意見に対し) 私もそのとおりかと思う。スギ・ヒノキに比べて広葉樹とか、それだけで言ってしまうと非常に問題。違いを出すのであれば、流域全体を仮想的にどうして見るかというやり方にする必要があり、それについても慎重に考えていく必要がある。そもそも適地適木で植えてきているところの違いが出てきている可能性はある。(五味委員)		
				今お示したのはコントロールとして扱い、それに対して仮想的なシナリオでどのように変わるかを示すことになるかと思う。一方で、いろいろな他の要素が影響を及ぼしているかと思うので、実態ベースの地形等も十分踏まえた上で、シナリオ解析を進める必要があるのかと思った。(中村課長補佐)		
				草地にすればいいというだけではなく、貯留量が増えるという土壌の話も崩壊のほうは関わってくると思うので、少しその辺りは丁寧に検討していかないといけない。(五味委員)		
28	貝沢流域のとりまとめ	五味委員	貝沢のこれまでの成果が資料から消えていることを含め、過去に行った検討も巻末等に残してレビュー可能とすべき。		過年度の成果も巻末に残す。	
29	BLAIパラメータ	小杉委員	収集した文献のLAI値の寄せ集めであるため、LAIが疎密度に対応しておらず、逆転している場合もあり、モデル結果への影響が危惧される。		・LAIが疎密度に対応するようグループ分けを単純化する(LAI:疎<中<密) ・同様の処理を行っている文献を参照。	
30	地下水パラメータ	五味委員(小杉委員)	・複数文献で、流域保留量は地質によると報告されており、その関係性は「保留量:花崗岩・火山灰流域 > 変成岩類流域 > 堆積岩・火山岩流域」といわれている(そこまでは検討済み)が、実際にモデルパラメータに反映できていない。 ・モデルに反映させるとしたらどう反映させるか?		・パラメータへの反映方法 ① 流域毎の主要な地質を判別し、流域毎にパラメータに差をつける。 ② 土壌タイプ区分を利用して差をつける。 ・小杉委員からは地下水の方はあまりいじらなくてよいとも言われており、流域スケールもそこまで大きくないことから、今回は地下水パラメータの地質考慮はせずに一定値にするという対応もあり。 ・地質を差をつけても、そのアウトプットの精度を確認できる「流域毎の実測流量」がない。	
31	解説発信	五味委員	事務局のから作業上の観点からなにかあるか。	業に関しまして先生方に御負担いただく部分もあると思うが、中村課長補佐からもおっしゃっていただいたように、体裁を整えとか、そのあたりはできるだけ事務局のほうでやらせていただくので、中身をみてもらえれば。(事務局)		

4ページ目

【第3回検討委員会】(1/2)

質問項目	質問者	質問・意見	回答	回答後の質問者コメント	対応・検討すべき事項	
1	ハイドログラフ (基底流量)	恩田委員	三保のハイドログラフは基底流量が合っておらず、渇水期の水源涵養機能の評価においては致命的。地下水流をもと出さないといけない。	崩壊地と裸地の飽和透水係数が過大となつていたため修正する。また、GW (※Groundwater:地下水) のパラメータ調整で対応 (事務局)	地下水の割合 (RCHG_DP) が基底流量が出ていない原因か (堀田委員)	三保崩壊地および裸地の飽和透水係数の修正他による、基底流量の調整。
2	ピーク解析	堀田委員	裸地の有無によってハイドログラフや水収支が変わったのか、何か分かったことはあるか。またそれは土壌のパラメータが効いているのか、森林の有無の影響か?	崩壊地割合5%と1%では、崩壊地割合0.3%と比べると少し高いピークが出ています。蒸発散と土壌のパラメータの両方でパラメータ値に違いをつけているため、どちらの影響が大きいのかはわからない。(事務局)	遮断が効いているのか、土壌のパラメータが効いているのかを整理するには、この辺りのデータの解釈、整理が明になる。(堀田委員)	流量のアウトプットを時間単位とし、遮断と土壌パラメータのどちらが効いているのかを確認するか。
3	崩壊地面積割合	五味委員	崩壊地を5%にした根拠は何か。	特になし。10%は非現実的かと作成してなかった (事務局)	胆振東部で15-16%、九州北部豪雨で10%弱程度の崩壊事例はある。(五味委員)	崩壊面積10%のモデルを作成する。
4	崩壊地からの流出量	恩田委員	崩壊地では水をもう少し出すこと。	対応する。(事務局)		
5	モデル改良 (SWAT-Forest)	恩田委員	まず樹高を加味したモデルとするのはどうか。	樹高はきちんと調査できていない。ただ、広葉樹では樹高がかなり効いている。針葉樹についても、シンプルに成長モデルで樹高も検討したい。(白木委員)		
6	水源涵養機能の指標について	堀田委員	土壌がしっかり保全されていれば大丈夫という話になると、森林整備などは水源涵養機能に全く効かないという話に取れてしまうが大丈夫か。	森林を少々間伐しても影響はそんなに大きくない。長い目で見れば、森林があることによって水源涵養機能が保たれているということと言える。(林野庁)	森林が成長しても土壌と同じパラメータを与えれば当然変わらないので、土壌が原因であるというの間違っている(恩田委員) 見せ方の順序を変え、立木密度をうまく組み込めば森林の影響とも評価できるはずのような形で終わればいいものではないか。(堀田委員)	SWATでできたところ、できなかったところを整理し、無理やり土壌が大事、という結論にならないようにする。
7	Return Flowの日本語訳	小杉委員	Return Flowや復帰流量は、通常は飽和側方向が流しきれなくなって表面流にわいてくるようなイメージだが、この図では地下水流出のように見える。	Return Flowを直訳して復帰流と記載していたが、SWATの中にはBase Flowとの表記もあり、地下水からの基底流出のようなものか。(事務局)	「復帰流」と日本語で書く誤解がある。(小杉委員)	Return Flow (Base Flow) の日本語表記を検討 (基底流出?)。
8	パラメータ	恩田委員	森林の成長に伴い、パラメータをどのように変化させたのか。	(別紙1パラメータ設定根拠) 森林で差をつけたパラメータは主に蒸発散関係。樹冠最大貯留量は一律。BLAIは、20年~30年生の辺り一番容量が多くなる。最大気孔コンダクタンスは、成長に伴う変化は設定していない。樹高は林齢ごとに変化させている (事務局)	森林が成長すると遮断が増えるが、それが反映されていない。本数によって樹冠遮断が降雨に対して30%位あるという知見と矛盾している。このような設定では森林の成長に伴う変化は生じない。(恩田委員)	とりまとめにおいては、SWATでは遮断を中心とした蒸発散の部分をつまみ組み込まず、森林の成長をうまく表現できなかった、のように記載する。
9	パラメータ	小杉委員	LAIが一番効くという議論だと思いが、感度分析ではLAIは関係ないことになっている。解析の方法に問題があるのではないか。	感度分析についての検討が不十分だった。(事務局)	各パラメータの最大、最小範囲を検討しないと、機械的な感度分析には意味がない (小杉委員)	
10	パラメータ	小杉委員	p29のパラメータ設定で密度が密になるほど表面流出が少なくなっている。	マングの粗度係数が表面流出のパラメータとして使われている。密では下層植生が発達しているため表面流出が少なくなるという意味。(事務局)	樹冠が密だと下層植生は発達しない。密になると、浸透能が低くなって表面流出が多くなるという感じだと思う。(小杉委員)	樹冠が密になると表面流出が増えるという設定となっていることを確認する。
11	パラメータ	小杉委員	落葉広葉樹だと季節変化を考えないといけないのではないか。	SWATにデフォルトで入っている落葉広葉樹の設定がされている。BLAI (最大葉面積指数) 等で落葉するような設定がされている。(事務局)	森林に関する林野庁の業務でもあり、広葉樹が落葉なのか、常緑なのか、は重要なのではないか。現場を確認したほうが良い。(小杉委員) 現地は落葉広葉樹が主体。(白木委員・内山氏) 結果のまとめに、落葉広葉樹は樹種別にパラメータ設定と記載されているが、最初のデータの精査に入れておけばここには記載しなくてもよいのではないか (五味委員)	
12	感度分析	五味委員	SWAT-CUPの感度分析ではなく、例えばBLAI等のアウトプットのレンジを変えた時に、どのような値になるか、仮想シナリオ的な検討が必要。	対応する。(事務局)		
13	実態・仮想シナリオ	五味委員	恩田先生からのハイドログラフについての質問、堀田先生からのピーク解析についての質問を踏まえ、今の結果のまとめや各所での結論は大きく変わる可能性があるのではないか。	先はご御指摘いただいた点をこれから改善すると、少し結果が変わってくると考えられる。(事務局)		改善後の結果は報告書でまとめる。
14	実態シナリオ	堀田委員	(P19~21) 過去と現在で植生がどのように変わり、パラメータがどのように変わったのか。現状では植生の変化は結果に影響していないようだが、それではよいのか。	現代と過去で樹種別の割合は大きく変化しておらず、人工林の林齢は変化しているが、流域内では広葉樹が大部分を占める。(19、21Pのハイドログラフ、流出曲線の結果が実際と合っているかどうかについては)精査する。(事務局)	20ページは、植生が変わらないのであれば、これで良い。19ページや21ページで、そもそも植生の影響を議論する前に、モデルと実測値がどの程度合っているのか、合っていないのかをしっかりと確認してもらいたい。(堀田委員)	確認する。
15	実態シナリオ	小杉委員	p18の水収支の棒グラフは現代と過去ほとんど差がないが、19ページのハイドログラフは現代と過去で流量が結構違う。	p18は道志、p19は三保の結果。道志と三保で状況はさほど変わらないが、三保では差が出ている (事務局)	集計は合っているのか。これだけ差があると、P18の道志の棒グラフでも差が出ていいのではないか。(小杉委員)	集計を確認する。

【第3回検討委員会】(2/2)

	質問項目	質問者	質問・意見	回答	回答後の質問者コメント	対応・検討すべき事項
16	仮想シナリオ	白木委員	P31、32のグラフについて、X軸の同じところのパターンかと思うが、微妙にずれているのは違う雨を挙げているのか。	樹種や林齢別にしているため、HRUに降る雨の量が、流域が違えば雨量にも違いがでる。ただし、これからは例えば植栽は全てスギ、のようなモデルによる検討となるため、こうした雨の影響は排除できるようになる(事務局)	納得した。(白木委員)	
17	情報発信	五味委員	モデルのアウトプットには現状課題があり、まだ難しいという部分はこの情報発信には入らない。この3年間で議論してきた点を含めて出せるところは出す。			
18	まとめ案	五味委員	指標化のまとめ、結果のまとめについては、本日の所ではオーソライズに至っていない。どのようにまとめるのか先生方に確認して頂く必要がある。	2月上旬位にはモデルの最終的な結果を出して、SWATモデルでできること・できないことを整理し、解説発信の作業につなげていきたい。過程と結果についても1度か2度、先生方に資料をお送りしてご確認、ご助言を頂きたい(事務局)		まとめ案の検討と、委員への確認を実施する。