

令和4年度

山地保全調査（水源森林保全調査・有明海等の閉鎖性海域と森林に関する調査）委託事業

報告書

令和5年3月

林野庁

目次

I. 事業の目的.....	1
II. 過年度の成果.....	2
III. 今年度調査の内容.....	5
1. 調査実施項目及び作業全体フロー.....	5
2. 各調査項目の概要.....	6
2.1 計画準備.....	6
2.2 既構築流出モデルの精緻化・シナリオ解析、新規モデルの構築.....	6
(1) 筑後川流域に係る流出モデルの精緻化・シナリオ解析.....	6
(2) 新規モデルの構築.....	7
(3) 現地調査.....	7
(4) 長期的傾向の把握手法の検討.....	7
2.3 成果の公表に係る対応.....	7
2.4 検討委員会の開催.....	7
2.5 とりまとめ.....	7
3. 事業実施体制.....	8
4. 調査対象流域の概況.....	9
4.1 地形.....	9
4.2 地質.....	10
4.3 土地利用.....	10
4.4 土壌.....	11
IV. 球磨川流域における現地調査.....	13
1. 調査概要.....	13
1.1 調査地点.....	14
1.2 調査日の概要.....	16
2. 調査結果.....	17
3. 考察.....	19
V. SWAT モデル構築・精緻化.....	24
1. 課題及び対応方針.....	24
2. 作業の全体フロー.....	25
3. SWAT モデル構築（球磨川モデルの新規構築）.....	26
3.1 構築方針の検討.....	26
3.2 各種インプットデータの作成・設定.....	26
(1) 地形.....	26
(2) 土地利用.....	27

(3)	土壌	28
(4)	気象	29
(5)	流量（河川流量、土砂量、栄養塩量）	31
(6)	河川幅・河川形状.....	37
(7)	ダム諸元.....	38
(8)	ポイントソース.....	42
(9)	耕作シナリオ.....	45
3.2	モデルの各種設定条件等	49
4.	流域における土地利用・地形及び流出特性の実態の把握	50
4.1	土地利用・地形.....	50
4.2	流出特性.....	53
(1)	河川からの流出総量.....	53
(2)	流況曲線及び流出率.....	54
(3)	土地利用の違いと土砂・栄養塩流出量の関係.....	55
5.	SWAT モデル精緻化（筑後川モデルの精緻化）	57
5.1	インプット設定・見直しによる改善状況の確認	57
(1)	ダム設定のアウトプットへの影響.....	57
(2)	ポイントソース由来の物質流出量の改善状況（課題④、⑤に対応）	57
5.2	パラメータ調整（キャリブレーション・バリデーション）	59
(1)	パラメータ調整方法の検討.....	59
(2)	推定精度の評価指標.....	59
(3)	水パラメータの調整.....	60
(4)	土砂パラメータの調整.....	60
(5)	栄養塩パラメータの調整.....	62
6.	結果及び考察.....	63
6.1	調整後のパラメータ値の結果	63
6.2	ベストパラメータ適用後のシミュレーション結果	66
(1)	水収支	66
(2)	河川流量.....	68
(3)	土砂・栄養塩流出量.....	72
6.3	水・土砂・栄養塩流出量の定量的な把握	77
(1)	流域全体に占める森林の寄与率.....	77
(2)	流出量の空間分布.....	78
6.4	まとめと考察.....	81
(1)	水収支	81
(2)	河川流量.....	82

(3) 土砂・栄養塩流出量.....	82
7. モデルを用いたシナリオ解析・評価.....	83
7.1 シナリオ解析・評価の基本方針.....	83
7.2 森林の水源涵養機能等の影響評価.....	83
(1) 洪水緩和機能.....	83
(2) 水資源の貯留（水量調節）.....	85
7.3 まとめと考察.....	85
VI. 長期的傾向の把握手法の検討.....	87
1. 検討方針、前提整理.....	87
2. 調査方法.....	88
3. 検討結果.....	90
3.1 流量観測方法.....	90
3.2 SS・栄養塩類観測方法.....	90
4. 考察.....	91
VII. 成果の公表に係る対応.....	92
1. 第4回アジア太平洋水サミットの概要.....	92
2. 実施内容.....	92
3. 開催結果.....	94
VIII. 検討委員会の開催.....	104
1. 検討委員の選定.....	104
2. 開催概要.....	105
IX. 次年度以降の調査計画.....	106
1. 次年度以降の調査計画（案）.....	106
2. 今後の方針.....	106
X. 巻末資料.....	108
1. SWATモデルについて.....	108
1.1 SWATモデルの概要.....	108
1.2 SWATモデルで考慮される各水文プロセスと計算方法.....	108
1.3 SWATモデルの主要なパラメータ.....	110
1.4 SWATモデル解析フロー.....	112
1.5 キャリブレーション・バリデーション.....	112
2. 第1回検討委員会資料・議事録.....	115
3. 第2回検討委員会資料・議事録.....	115
4. 第3回検討委員会資料・議事録.....	115
5. 現地調査結果.....	115

I. 事業の目的

有明海及び八代海は、国民にとって貴重な自然環境及び水産資源の宝庫であり、その恵沢を国民が等しく享受し、後代の国民に継承すべきものである。しかしながら、海域周辺の経済社会や自然環境の変化にともない、水質の富栄養化、底質の泥化や有機物の堆積等海域の環境が悪化し、赤潮の増加や貧酸素水塊の発生等が見られる中で、二枚貝をはじめとする漁業資源の悪化が進み、海面漁業生産の減少が見られた。これらの状況に鑑み、有明海及び八代海を豊かな海として再生することを目的として、国及び関係県が協力して、海域の環境の保全及び改善並びに水産資源の回復等による漁業の振興を推進するため、平成 14 年に「有明海及び八代海を再生するための特別措置に関する法律」（以下「特措法」という。）が定められた。

特措法第 4 条に基づき定められる「有明海及び八代海等を再生に関する基本方針」においては、「森林の機能の向上に関する事項」として、「造林、保育、林道の整備等の計画的な森林整備や、荒廃山地の復旧整備等を通じて保安林等を適正に保全するためのきめ細かな治山対策を推進するとともに、地域住民等多様な主体の参加と連携による国民参加の森林づくり等の推進に努めるなど、重視すべき機能に応じた適切な森林の整備・保全を図り、有明海及び八代海等に流入する河川流域の森林の有する多面的機能を将来にわたり持続的に発揮させる」とされている。

また、平成 23 年の法改正によって対象地域に橘湾等が追加され、法律名を「有明海及び八代海等を再生するための特別措置に関する法律」に変更されるとともに、国及び関係県が行う調査の一つとして、特措法第 18 条第 1 項第 5 号に「有明海及び八代海等の海域に流入する河川の流域における森林と当該海域の環境との関係に関する調査」が規定された。（さらに、令和 3 年にも同法が改正され、特措法第 25 条第 3 項として「（有明海・八代海等総合調査評価）委員会は、毎年、その所掌事務の遂行の状況を分かりやすい形で公表するものとする」が追加された。）

これを受け、最終的には、当該海域に注ぐ全ての一級河川を調査対象範囲として、森林が海域に及ぼす影響の全容を把握していくことを本事業の目的としている。

II. 過年度の成果

河川を介して森林から海まで移動する土砂やこれらとともに移動する栄養塩類等は、河川水域や海域の生態系に影響を与えうるが、森林による海域の環境への影響を評価するためには、流域全体の水文プロセスや森林域内外からの栄養塩類等の流出について調査・分析を行う必要がある。

このため、平成 24 年度より資料文献調査や分析の方向性の検討等を開始し、平成 27 年度に調査方針の検討、モデル流域の選定及び流出モデルの整理を行った。

同年度では、森林が海域に与える影響を評価するために必要な観点として、以下の 2 点を挙げている。

- ・ 比較的大きな流域を対象として、流出モデルを用いて、マクロ的・演繹的に評価するアプローチが有効である。
- ・ 流域の森林管理に資するという観点からは、小流域で様々な管理状態の森林における栄養塩類等や流量等の定量的調査を行うアプローチも必要である。

これらの観点を踏まえ、森林が海域に及ぼす影響の定量的解析と、下流域での土地利用等による影響も踏まえた流域全体にわたる広範な評価を行うため、計算の精度・効率性が高く、GIS とも連携可能な SWAT モデル¹を採用することとした。平成 28 年度から、有明海及び八代海に注ぐ一級河川のうち、菊池川、筑後川及び矢部川流域を対象とした SWAT モデルの構築・精緻化を進め（図 II-1）、森林の水源涵養機能（洪水緩和機能、水資源貯留・水量調節機能）、土砂流出防止機能に加えて、土壌内での物質貯留に係る機能についての分析・評価を行った。

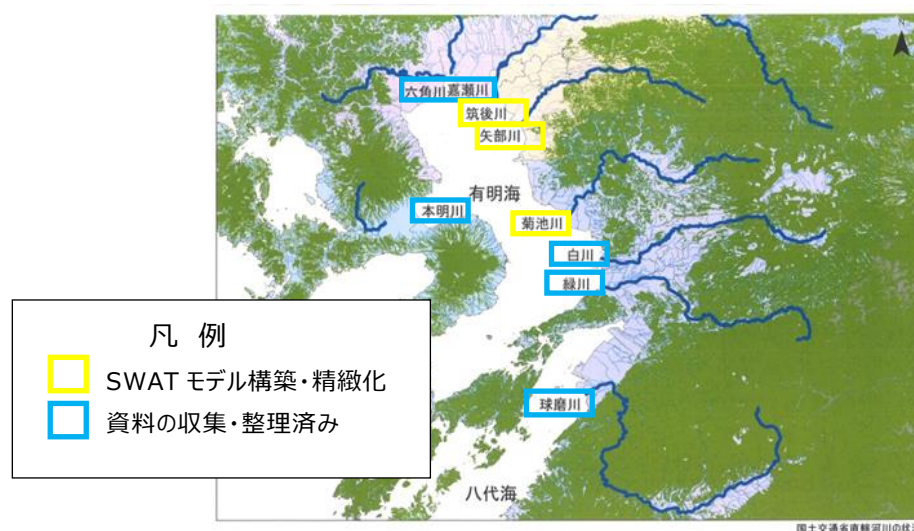


図 II-1 SWAT モデル構築・精緻化の対象一級河川

¹ Soil And Water Assessment Tool : アメリカ農務省農業研究局 (USDA-ARS) によって開発された、農業流域の水・土砂・物質の移動を解析することを目的とした準分布型流出モデル。流域の栄養塩循環の分析・評価のために、1992年から2010年の期間内で最も頻繁に使用されたモデルとされている (Wellen et al. 2015)。

事業の全体像及び個別の作業過程は、図 II-2 本事業の経緯（令和4年度の計画を含む）のとおりである。

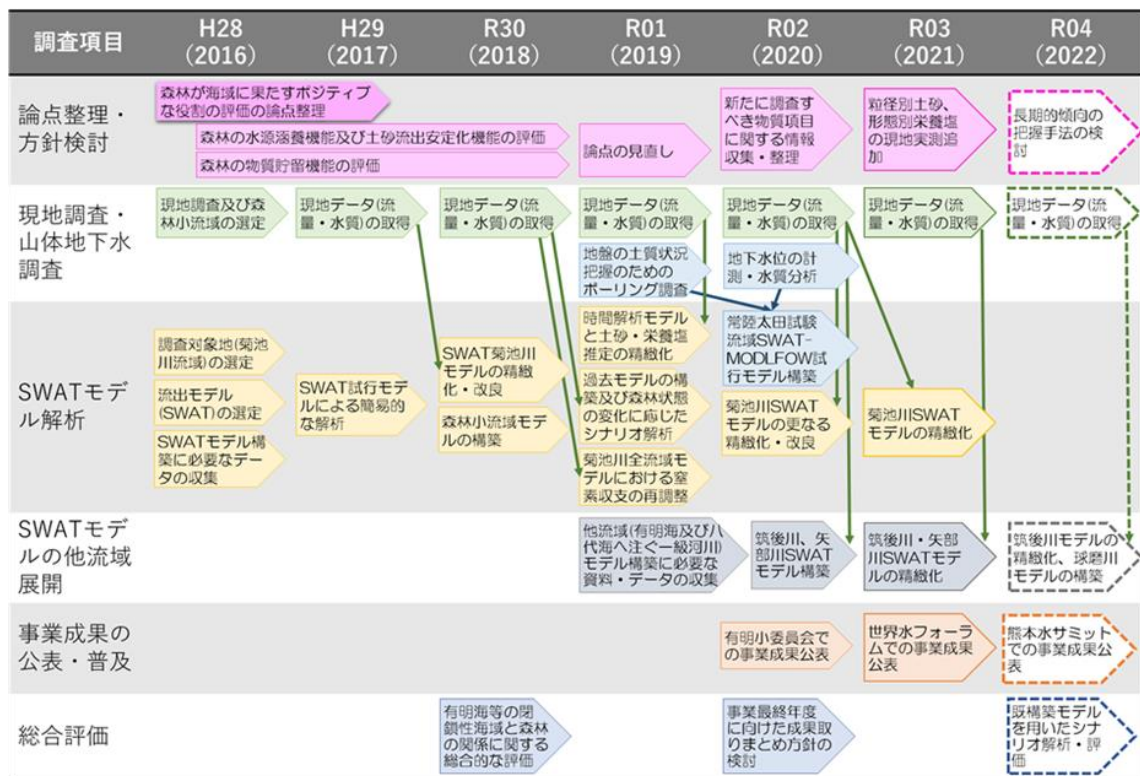


図 II-2 本事業の経緯（令和4年度の計画を含む）

(1) 平成28(2016)年度

解析に使用する流出モデルとして SWAT モデルの採用を決定するとともに、海域に流入する一級河川のうち、流域に係る情報が豊富な一級河川である菊池川流域を調査対象流域として選定した。また、SWAT モデル構築に必要な資料収集、現地調査及び森林小流域の対象箇所を選定を行った。

(2) 平成29(2017)年度

菊池川流域を対象に試行的に SWAT モデルを構築し、簡易的な解析をにより、森林からの流出水や物質についての概況を把握し、有明海等の閉鎖性海域と森林との関係について解析を行った。

(3) 平成30(2018)年度

森林率の高い小流域における現地調査結果を踏まえ、評価モデルの精緻化・改良を行い、モデルの精度を向上させた。当該モデルによるシミュレーション、シナリオ解析により、森林の水源涵養機能等について一定の成果が得られた。

(4) 令和元(2019)年度

菊池川モデル構築で得られたインプットやパラメータ設定に関する知見をもとに、筑後川

及び矢部川モデルを新規に構築したほか、菊池川モデルについては、森林の機能を詳細に分析するため、時間単位での流量解析や過去モデルの構築を行った。

(5) 令和2（2020）年度

菊池川モデル構築で得られた知見をもとに、筑後川及び矢部川モデルを新規に構築したほか、菊池川モデルについては、更なる精緻化に取り組み、3流域の結果を比較・分析し、残存課題や今後の対策について整理した。また、環境省主催の有明海・八代海等総合調査評価委員会環境再生方策検討作業小委員会において、成果の公表を行った。

(6) 令和3（2021）年度

SWAT モデルのバージョン更新にともない、前年度までに構築していた菊池川、筑後川、矢部川モデルの精緻化を図るため、残存課題であった水収支を改善したほか、今後のシナリオ解析による評価を見据え、HRU 設定（急傾斜区分の追加、草地の追加等）の見直しを図った。

また、環境省主催の有明海・八代海等総合調査評価委員会より、中間とりまとめとして全体の調査結果が公表されるとともに、セネガル・ダカールで開催された第9回世界水フォーラムにおいて調査内容の発信を行った。

III. 今年度調査の内容

1. 調査実施項目及び作業全体フロー

今年度は、構築していた筑後川モデルの精緻化とともに、新たに球磨川モデルを図ることを目的として調査を行うとともに、熊本県熊本市で開催される第4回アジア・太平洋水サミットにおいて、サイドイベントのシンポジウムの準備・運営を行う。本年度調査における作業全体フローと基本方針は以下のとおりである（図 III-1）。

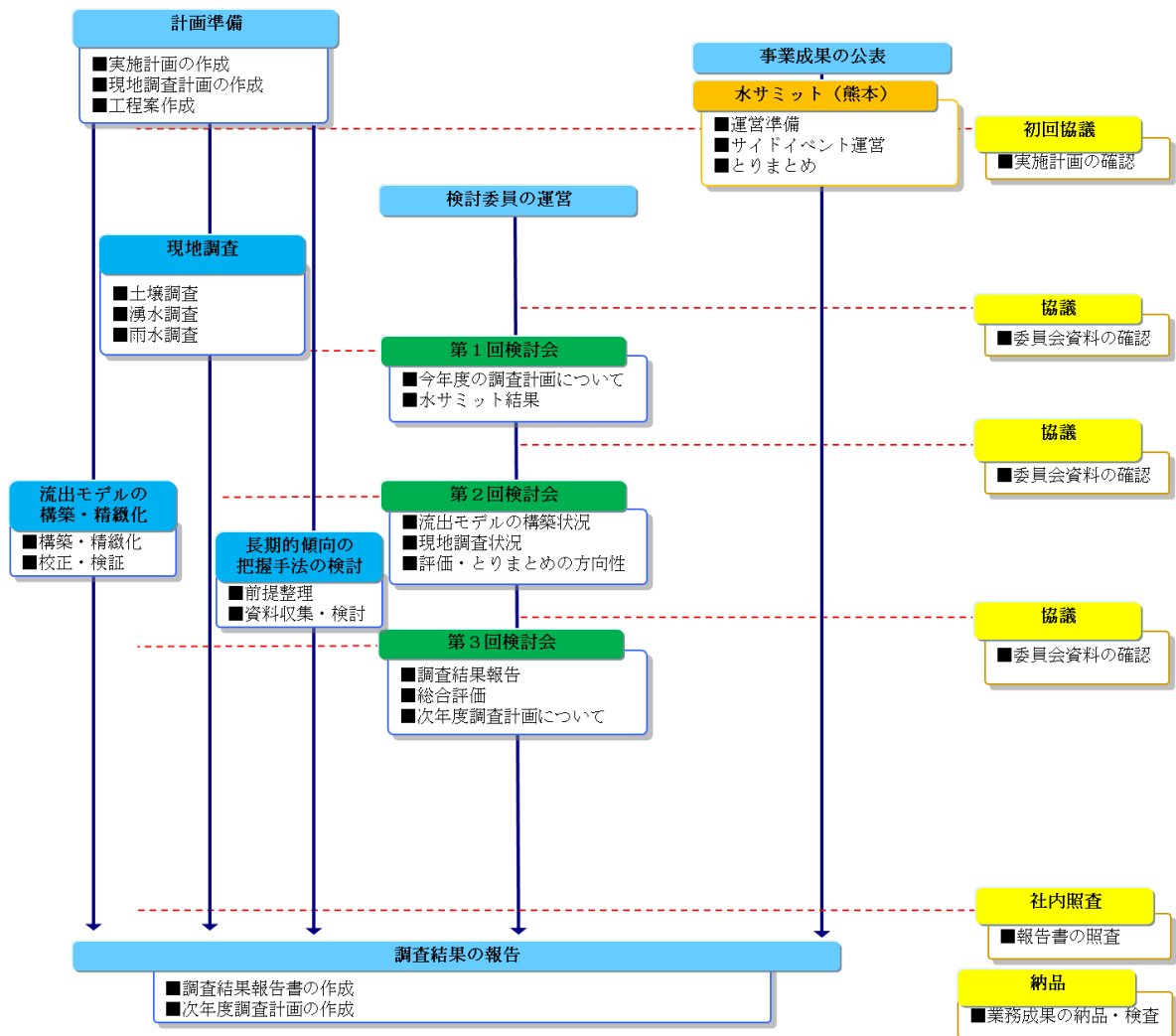


図 III-1 令和4年度調査の作業全体フロー

2. 各調査項目の概要

2.1 計画準備

業務着手に当たり、業務を円滑に推進するため、作業実施計画書及び工程表（表 III-1）を作成した。

現地調査については、昨年度までの知見を踏まえ、雨水を対象とした調査は季節による変化を考慮し7月、11月の2回、土壌及び湧水を対象とした調査は7月を目途とした。各分析データが揃うまでに、順次、筑後川モデルの精緻化・改良に取り組むことで、球磨川モデルを構築するために十分な解析期間を確保し効率性を高めることに努めた。

表 III-1 工程表

実施項目	令和4年 (2022年)										令和5年 (2023年)			
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3		
(1) 既構築流出モデルの精緻化・シナリオ解析、新規モデルの構築														
ア. 筑後川流域に係る流出モデルの精緻化・シナリオ解析	■													
イ. 球磨川流域の流出モデルの構築					■									
ウ. 現地調査				○						○				
エ. 長期的傾向の把握手法の検討						■								
(2) 成果の公表に係る対応	■													
(3) 検討委員会の開催			○					○				○		
(4) 報告書のとりまとめ											■			
打合せ・協議	○		○					○			○	○		

2.2 既構築流出モデルの精緻化・シナリオ解析、新規モデルの構築

(1) 筑後川流域に係る流出モデルの精緻化・シナリオ解析

昨年度までに、菊池川、筑後川、矢部川の3流域のSWATモデルの構築・精緻化を進めたが、これらのモデルについて一定程度の推定精度を確保することはできたものの、土地利用間の水収支や流出割合等が既往の知見や実測（過年度を含む。）等と照らし合わせて、一部合理的でない部分が認識されていた。そのため本年度は、有明海に注ぐ流域の中でも規模が大きく、当該海域への影響が特に大きいとみられる筑後川モデルについて、追加のパラメータ調整を優先的に実施することとした。これにより、より精緻化された筑後川モデルによりシナリオ解析を行い、森林状態の変化が水・土砂・栄養塩の流出に与える影響について評価を行う。

(2) 新規モデルの構築

八代海への森林の影響を評価するため、新たに球磨川流域の流出モデルの構築を行った。構築に当たっては、既構築流出モデルでの条件（分析単位・区画の設定方法、モデル構築に利用するデータ項目等）及び各種パラメータ（水量、土砂量、栄養塩量算出の基礎となる値）との整合を図る。

(3) 現地調査

上記(2)のモデルの構築に当たり、モデルの精度を高めるために必要なデータを取得するために現地調査（雨水2箇所、地下水5箇所、土壌5箇所）を行う。現地調査の対象とするデータ項目・手法等については、既構築流出モデルで実施している内容との整合を図るとともに、検討委員会での意見も踏まえて決定する。

(4) 長期的傾向の把握手法の検討

海域への森林の影響を長期的に把握・分析を行う観点から、定点観測によるデータ蓄積手法を検討した。具体的には、公開データ等（雨量、気温等の気象データ、流量・水質等の河川データ、樹種・林齢・施業履歴等の森林データ）の収集に加えて、現地調査により森林率・面積の大きい区域の直下において、簡易かつ継続的に定量的なデータ収集（流量を想定）が可能な調査方法について検討委員会での意見も踏まえて検討・整理を行う。

2.3 成果の公表に係る対応

第4回アジア・太平洋水サミットにおいて、これまでの成果を公表・普及するため、林野庁が主催するシンポジウムの開催に係る準備・運営等を実施する。

2.4 検討委員会の開催

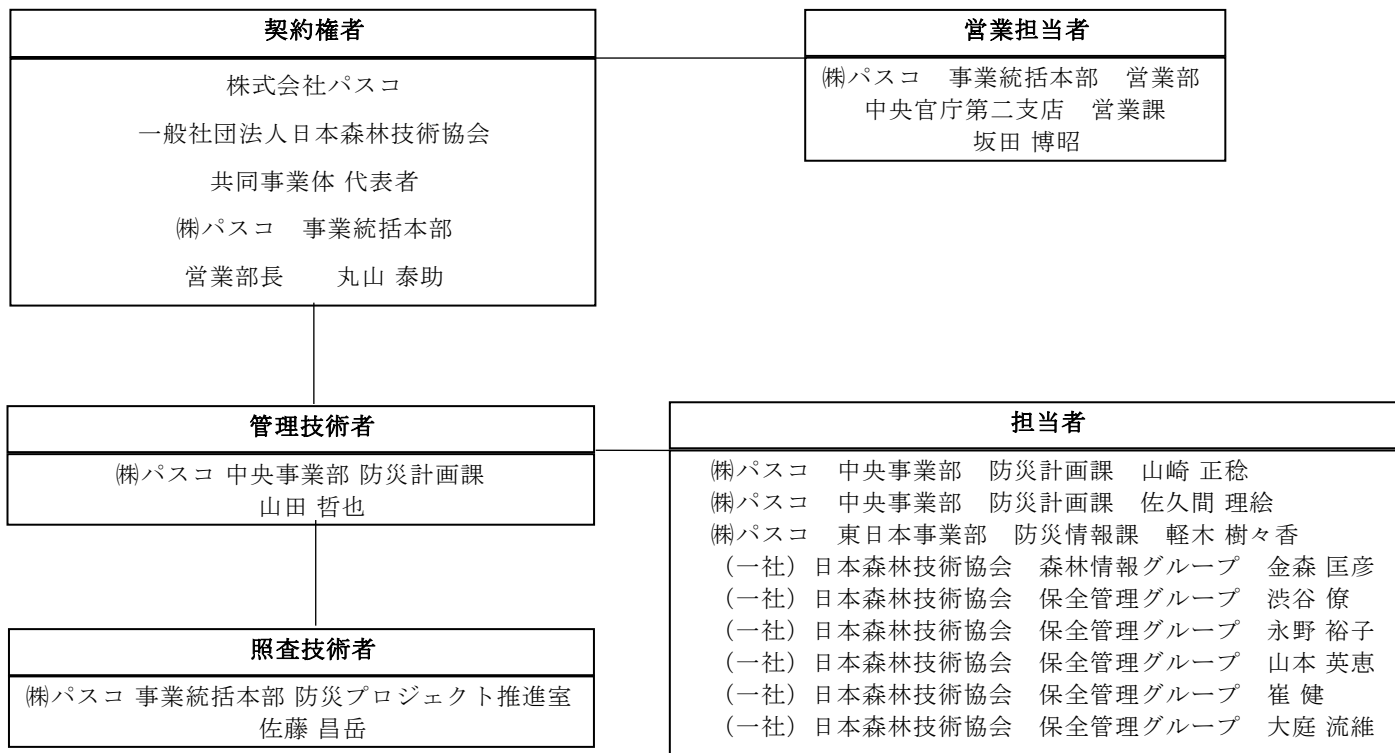
本業務に関する専門的知見を有する有識者4名以上からなる検討委員会を設置し、調査・分析の計画・評価等について適宜助言を得られるよう、年3回程度の検討委員会を開催する。

2.5 とりまとめ

本年度の調査結果については報告書にとりまとめる。

3. 事業実施体制

業務に当たって共同事業体における業務実施体制は以下のとおりとした。また、担当者が所属する組織にバックアップ体制として9名（パスコ2名、日林協7名）を確保した。



4. 調査対象流域の概況

本事業では、有明海・八代海に注ぐ9つの一級河川について、SWATモデルを用いて河川流量や物質流出量を解析し、森林が海域に及ぼす影響の評価を進めるため、各流域の流出モデルを構築している。このうち、令和3年度までにモデル構築・精緻化を行った菊池川、筑後川、矢部川の3流域と、今年度新たにモデルを構築する球磨川流域の計4流域の概況を以下に記す。

4.1 地形

対象4流域を含む範囲の地形概要図を図III-2に、各流域の最低・最高、平均標高（※当事業構築モデルの解析範囲内で算出）を表III-2に示した。

筑後川流域の地形は、流域中央部に位置する荒瀬地点を境に上流部と下流部で変化している。上流部の最高標高が1,700mを超える比較的標高の高い山地には高原地形と盆地が発達しており、下流部は沖積作用によってできた広大な筑紫平野が形成されている。

矢部川流域の上流部は、東側の釈迦ヶ岳山地を中心として矢部川、御側川、星野川などによって浸食された複雑で急峻な山地が形成されており、本流は、筑後川と同じく筑紫平野をへて有明海へ流出している。

菊池川流域の北部は標高700～800mの山脈が連なるやや急な山岳地帯であり、南部は白川に境を接する緩やかな丘陵地帯となっている。中流部の菊鹿盆地は、上流に降った雨が菊鹿盆地に集まりやすい地形となっており、さらに下流域には低平な沖積平野（玉名平野）が広がっている。

球磨川流域は、水上村に端を発する球磨川本流と、八代市東端の国見岳に端を発する、本流より長い川辺川が急峻な山岳地に深い谷を刻んで南に流れ、人吉盆地で合流する。人吉を過ぎると球磨川は西北西に流向を変え、球磨村より下流は山岳地に急峻な谷を刻んでいる。

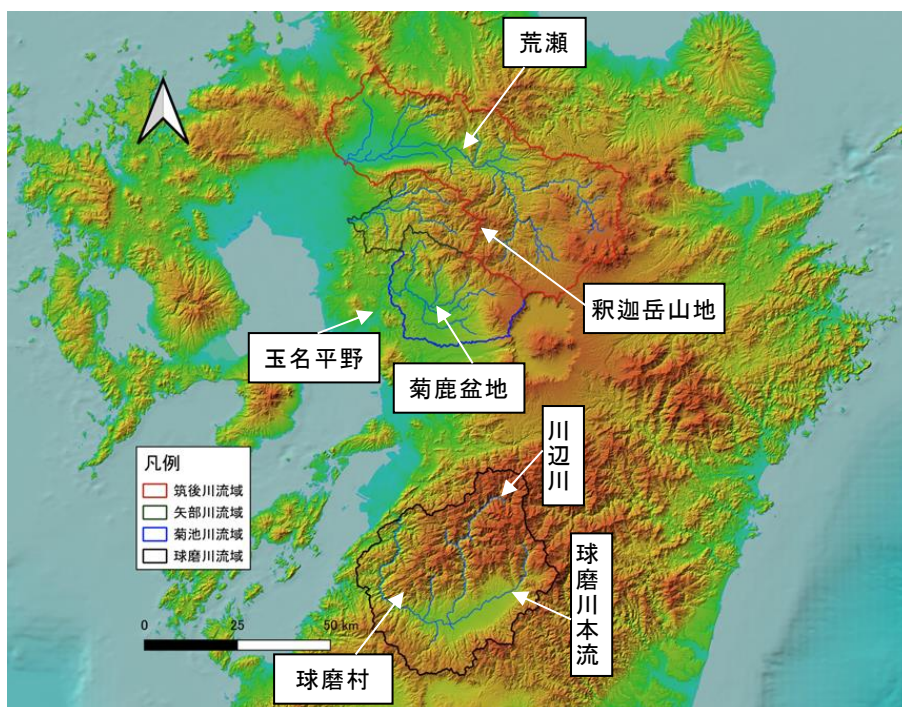


図 III-2 地形概要図

表 III-2 各モデル流域の標高 (m)

標高 (m)	筑後川流域	矢部川流域	菊池川流域	球磨川流域
最低	5	8	-1	-9
最高	1,782	1,211	1,099	1,725
平均	435	378	292	582

4.2 地質

国土調査（土地分類・水調査）5万分の1表層地質図（図 III-3）によると、筑後川流域・矢部川流域・菊池川流域の上流側及び球磨川流域南部では火山性岩石が卓越している。また、筑後川流域及び菊池川流域の下流側には未固結の分布がみられる。球磨川流域では、固結堆積物の占める割合が大きい。

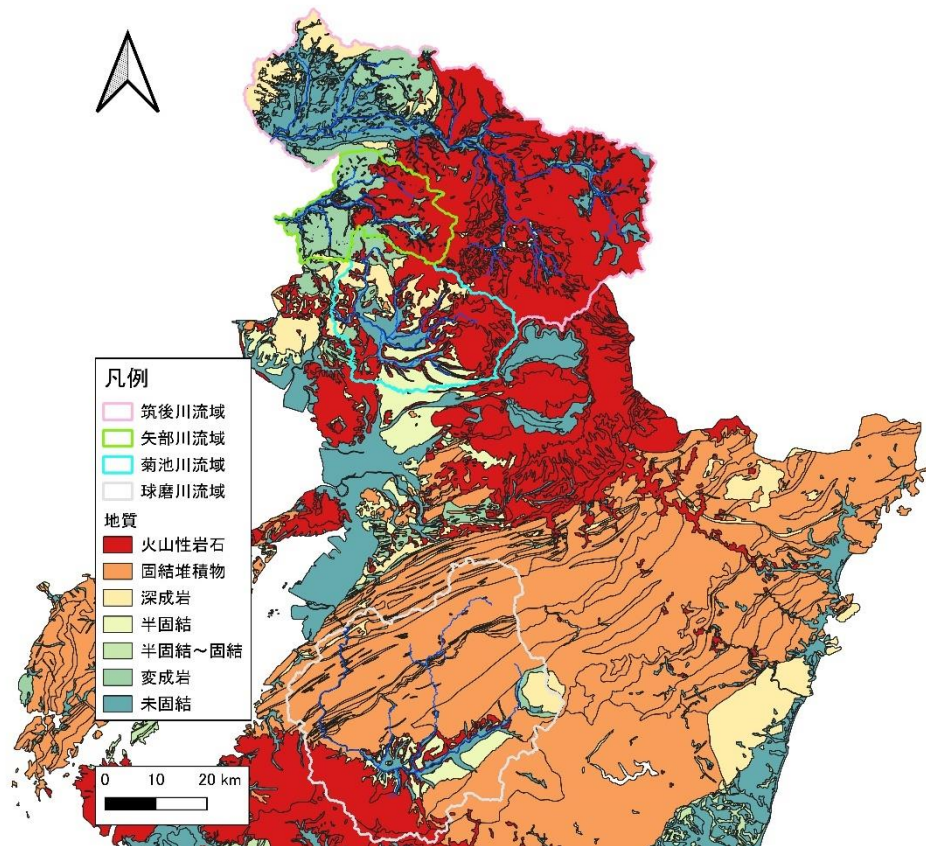


図 III-3 表層地質図

4.3 土地利用

国土数値情報土地利用細分メッシュデータ（100メッシュ）（図 III-4）によると、流域面積に占める土地利用のうち、森林の割合が最も高い流域は球磨川流域で 86.2%、次いで矢部川流域の 72.9%である。菊池川流域は、水田及び農地の占める割合がそれぞれ 16.5%、15.0%と 4 流域の中で最も高い。草地の占める割合は、筑後川流域及び菊池川流域でそれぞれ約 2%、矢部川及び球磨川流域ではそれぞれ約 0.1%、0%となった。また、裸地の占める割合は、筑後川流域及び球磨川流域ではそれぞれ 1.8%、2.3%と 4 流域の中では比較的高く、矢部川流域及び菊池川流域では 0.6%とわずかである。

なお、割合の計算に用いている面積は、当事業の SWAT モデル解析範囲の面積であり、河口まで含む流域全体の面積ではない点を注記しておく。

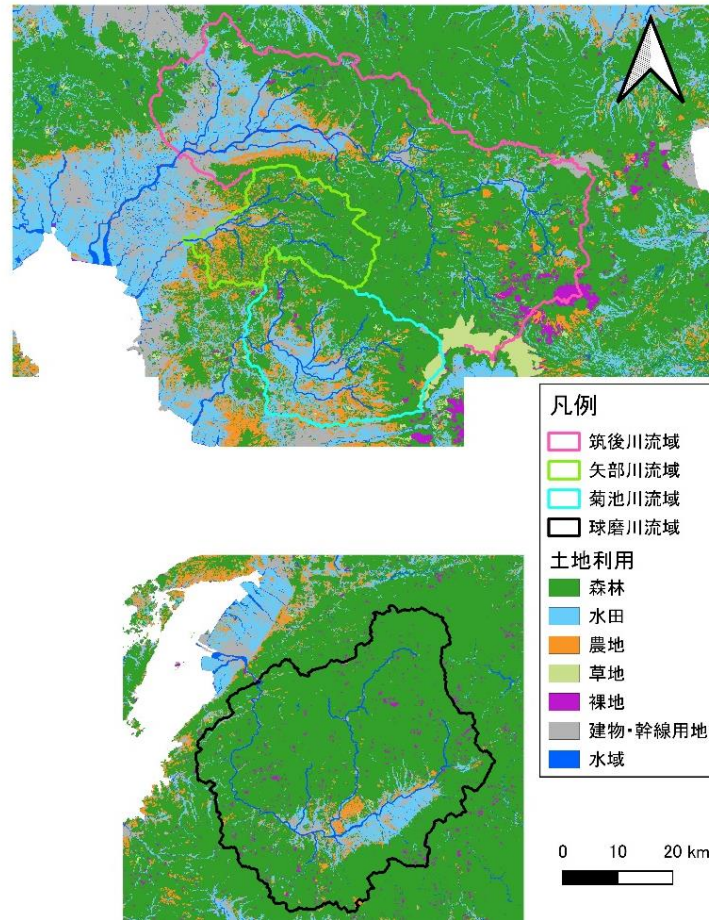


図 III-4 土地利用区分図

表 III-3 流域毎の土地利用別面積割合 (%)

土地利用区分	筑後川流域	矢部川流域	菊池川流域	球磨川流域
森林	70.15	72.89	56.57	86.18
水田	12.13	7.51	16.51	5.39
農地	5.26	14.42	15.03	2.65
草地	2.37	0.14	1.61	0.00
裸地	1.77	0.56	0.57	2.28
建物・幹線用地	7.58	3.17	9.02	2.78
水域	0.75	1.32	0.69	0.72

4.4 土壌

国土数値情報 20 万分の 1 土地分類基本調査の土壌図（図 III-5）によると、土壌タイプとしては、筑後川流域中央部、菊池川流域北部、矢部川流域全域、球磨川流域全域において褐色森林土、筑後川流域上流部に位置する東部及び菊池川流域の南部において黒ボク土が広く分布しており、これらの二つの土壌タイプで対象流域全体の 84%を占めている。

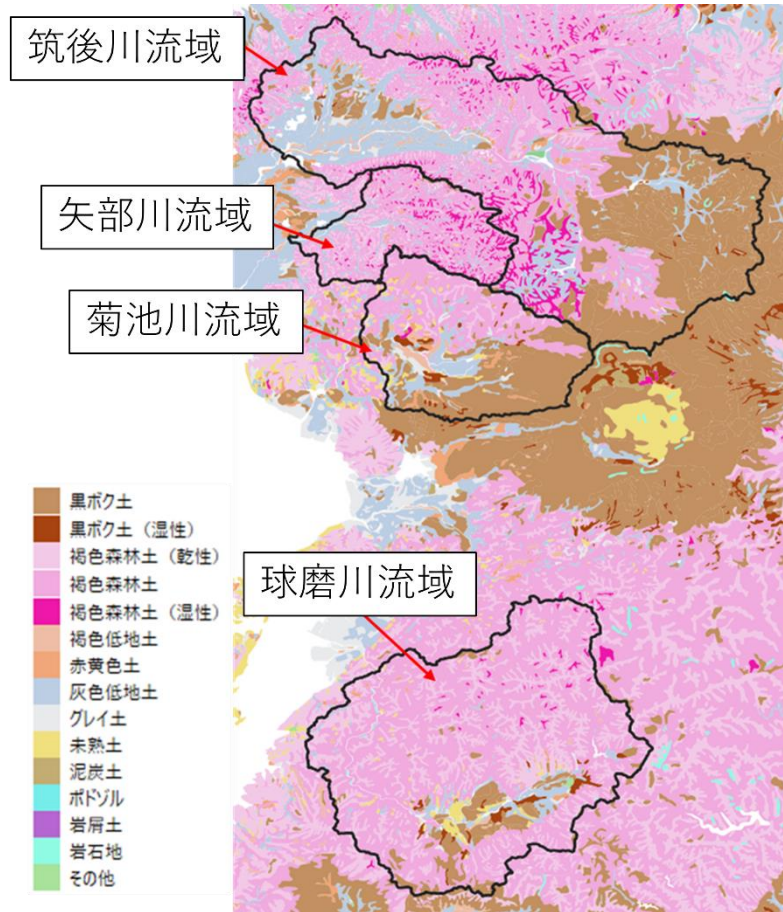


図 III-5 土壤図

IV. 球磨川流域における現地調査

1. 調査概要

球磨川に係る評価モデルの構築とそれをを用いた流出に関する評価のために必要な現地調査を実施した。

球磨川流域における調査方法については、過年度に実施した菊池川、筑後川及び矢部川流域での方法を踏襲した（図IV-1）。雨水については、流域内に設置した雨水採水装置により雨水を採水し、雨水中の窒素、リンの濃度（mg/l）、浮遊物質を分析する。湧水については、現地にて湧水を採水し、窒素、リンの濃度（mg/l）、浮遊物質を分析する。土壌については、現地にて採取し、窒素、リンの濃度（mg/kg）を分析する。現地調査は、項目ごとに年1～2回実施した。現地調査項目の概要を表IV-1及び表IV-2に示す。

現地調査により把握した栄養塩濃度等は、SWATモデルの基礎的なインプットデータであるパラメータRCN.bsn（雨水中の窒素濃度(mg/l)）や、SHALLST_N（河川へ流出する地下水中のNO₃濃度(mg/l)）、SOL_LABP（支流域から河川に流出する地下水に含まれる溶存態リン濃度(mg/l)）等の値として入力し、モデルの精緻化に活用する。



図 IV-1 球磨川流域での現地調査（左から雨水・湧水・土壌）

表 IV-1 調査時期及び頻度

項目		調査頻度
球磨川 流域	雨水調査	年2回（7月、11月）に調査実施
	湧水調査	年2回（7月、11月）に調査実施
	土壌調査	年1回（7月）に調査実施

表 IV-2 分析項目

分析項目	
窒素 (N)	全窒素 (T-N) または形態別窒素 有機態窒素、硝酸性窒素 (NO ₃ -N)、 アンモニア性窒素 (NH ₄ -N)、亜硝酸性窒素 (NO ₂ -N)
リン (P)	全リン (T-P) または形態別リン 有機態リン (OP)、無機態リン (IP)
浮遊物質 (SS)	浮遊物質 (SS) ※雨水・湧水のみ

1.1 調査地点

候補地点の選定に当たっては、過年度に実施した菊池川・筑後川・矢部川と同様に、モデルから出力される計算単位である支流域や流域全体でのバランス、土地利用及び土壌区分について、表 IV-3 の留意点を踏まえて行った。

雨水・土壌の調査地点については、流域内で国土交通省が雨量観測を行っている地点を基本として選定した。

表 IV-3 調査候補地の選定に当たっての留意点

項目	留意点
支流域のバランス	各支流域の分布範囲を考慮し、偏りがないようにする。
流域全体のバランス	モデル構築の範囲（潮汐の影響がない流量観測所から上流の流域）において、空間的な分布状況に偏りがないようにする。
土地利用	都市部や森林部といった土地利用について、偏りがないようにする。
土壌区分	褐色森林土や黒ボク土等の土壌について、流域内に占める割合や種類を考慮する。

選定結果を表 IV-4、表 IV-5、図 IV-2、図 IV-3 に示す。

表 IV-4 調査候補地の選定結果

調査対象	選定箇所	選定理由
雨水・土壌	1. 八代	流域の最下流地点である市街地であり、最下流部に代表されるグライ土である。
	2. 神瀬	流域の中下流部である森林であり、流域の多くを占める褐色森林土である。
	3. 田野	南部の中流部である森林であり、平地部で多くを占める黒ボク土である。
	4. 多良木	流域中上流部の平地である耕作地であり、平地に分布する灰色低地土である。
	5. 梶原	流域最上流部の森林であり、流域北部に代表される褐色森林土である。
湧水	1. 上原の井川	流域の下流部にある唯一の湧水である。
	2. 永国寺庭園の池	流域中流の湧水として代表的な湧水である。

	3. 東方湧水 4. 白滝公園 5. 久連子湧水	流域上中流部の湧水として代表的な湧水である。 上流部の湧水として代表的な湧水である。 最上流部の湧水として代表的な湧水である。
--	--------------------------------	---

表 IV-5 調査候補地の状況（抜粋）



雨量（多良木水位・雨量観測所）



土壌（八代）



湧水（上原の井川）

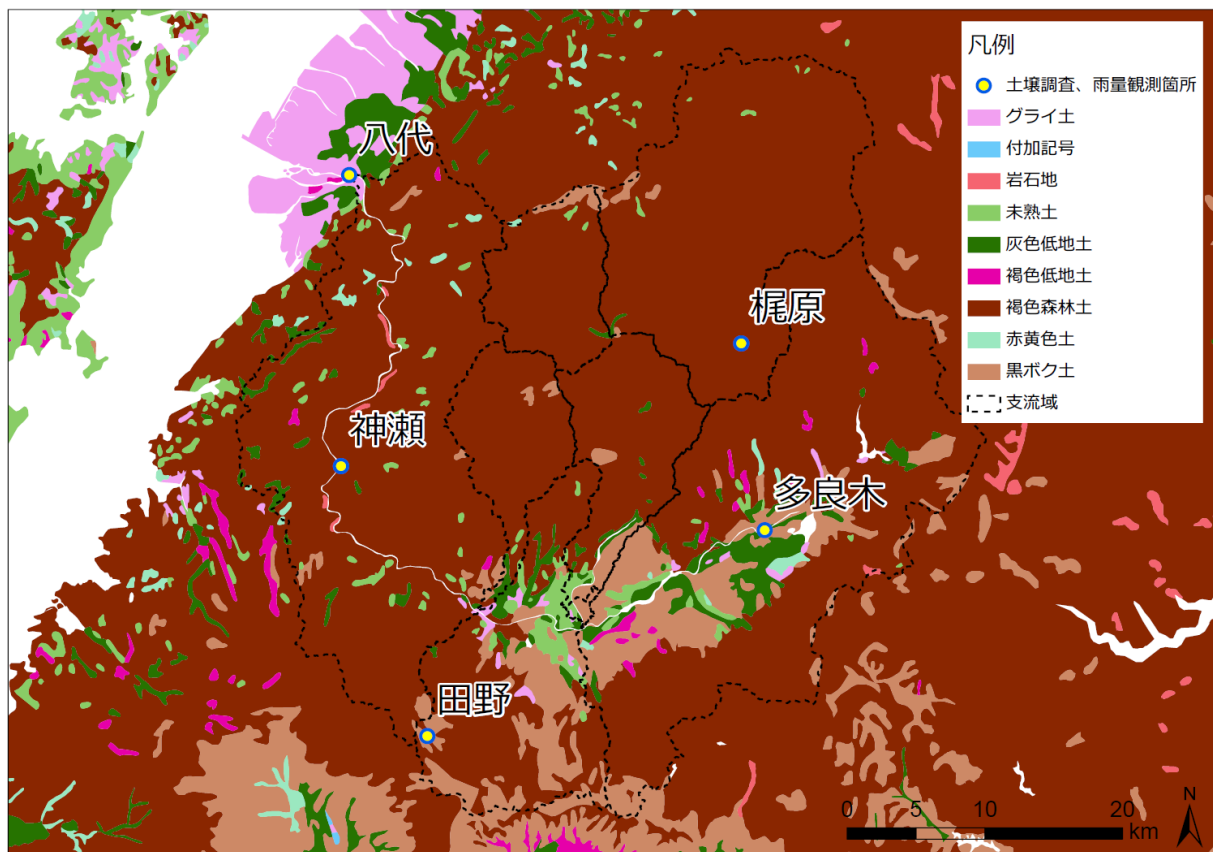


図 IV-2 球磨川流域における雨水・土壌調査の調査実施箇所位置図



図 IV-3 球磨川流域における湧水の調査実施箇所位置図

1.2 調査日の概要

調査は、7月と11月に各1回実施した。調査日の天候や気温等を表 IV-6 に示す。

表 IV-6 調査日概要

調査項目	調査地点	調査日・時刻	天候	気温	水温
雨水 (7月)	神瀬	7/9 13:30	晴	31.5℃	28.4℃
	多良木	7/9 12:00	晴	31.0℃	30.7℃
雨水 (11月)	神瀬	11/17 11:10	曇	14.0℃	10.8℃
	多良木	11/17 13:05	曇	12.5℃	12.6℃
湧水	上原の井川	6/30 10:50	晴	25.0℃	15.1℃
	永国寺庭園の池	6/30 13:55	晴	33.0℃	17.0℃
	東方湧水	6/30 15:45	晴	34.0℃	18.0℃
	白滝公園	7/1 13:20	晴	32.5℃	16.0℃
	久連子湧水	7/1 11:40	晴	31.5℃	15.0℃
土壌	八代	6/30 9:30	晴	-	-
	神瀬	6/30 12:15	晴	-	-
	田野	6/30 14:30	晴	-	-

	多良木	7/1 9:00	晴	-	-
	梶原	7/1 10:30	晴	-	-

2. 調査結果

雨水分析結果を表 IV-7、湧水分析結果を表 IV-8、土壌分析結果を表 IV-9 に示す。

表 IV-7 雨水分析結果 (単位 : mg/ℓ)

試験項目		7月		11月		定量 下限値
		神瀬	多良木	神瀬	多良木	
T-N	全窒素	0.31	0.61	0.35	0.46	0.01
O-N	有機態窒素	0.14	0.27	0.3	0.21	0.01
NO2-N	亜硝酸態窒素	0.002	0.003	0.001	0.002	0.001
NO3-N	硝酸態窒素	0.11	0.18	0.03	0.18	0.01
NH4-N	アンモニア態窒素	0.06	0.16	0.02	0.07	0.01
D-N	溶存態窒素	0.28	0.49	0.25	0.43	0.01
P-N	懸濁態窒素	0.03	0.12	0.1	0.03	0.01
T-P	全リン	-	0.018	0.039	0.017	0.005
O-P	有機態リン	-	0.012	0.012	0.012	0.005
I-P	無機態リン	-	0.006	0.027	0.005	0.005
D-P	溶存態リン	-	0.006	0.03	0.012	0.005
P-P	懸濁態リン	-	0.012	0.009	0.005	0.005
SS	浮遊物質	1	2	4	1	1

※「-」は定量下限値未満を示す。

表 IV-8 湧水分析結果 (単位 : mg/ℓ)

試験項目		上原の 井川	永国寺 庭園の池	東方 湧水	白滝 公園	久連子 湧水	定量 下限値
T-N	全窒素	0.36	0.39	0.32	0.62	0.46	0.01
O-N	有機態窒素	0.06	0.08	0.03	0.03	0.04	0.01
NO2-N	亜硝酸態窒素	-	-	-	-	-	0.001
NO3-N	硝酸態窒素	0.26	0.28	0.26	0.56	0.37	0.01
NH4-N	アンモニア態窒素	0.04	0.03	0.03	0.03	0.05	0.01
D-N	溶存態窒素	0.31	0.32	0.31	0.6	0.44	0.01

試験項目		上原の井川	永国寺庭園の池	東方湧水	白滝公園	久連子湧水	定量下限値
P-N	懸濁態窒素	0.05	0.07	0.01	0.02	0.02	0.01
T-P	全リン	0.045	0.016	0.009	0.026	0.022	0.005
O-P	有機態リン	-	-	-	-	0.005	0.005
I-P	無機態リン	0.041	0.014	0.007	0.024	0.017	0.005
D-P	溶存態リン	0.036	0.008	0.006	0.022	0.016	0.005
P-P	懸濁態リン	0.009	0.008	-	-	0.006	0.005
SS	浮遊物質質量	-	3	1	-	-	1

※「-」は定量下限値未満を示す。

表 IV-9 土壌分析結果（単位：mg/kg・dry）

試験項目		八代	神瀬	田野	多良木	梶原	定量下限値
T-N	全窒素	2610	3430	7850	3510	4730	0.01
T-P	全リン	500	1030	560	820	1390	0.01
NO2-N	亜硝酸態窒素	-	-	-	-	-	0.001
O-N	有機態窒素	2590	3410	7850	3500	4720	0.01
NH4-N	アンモニア態窒素	-	-	-	-	-	0.01
NO3-N	硝酸態窒素	20	20	-	10	10	0.01
O-P	有機態リン	320	680	400	490	880	0.01
I-P	無機態リン	180	350	160	330	510	0.005
参考：土壌分類		グライ土	褐色森林土	黒ボク土	灰色低地土	褐色森林土	

※「-」は定量下限値未満を示す。

3. 考察

球磨川流域における雨水、湧水、土壌の各調査結果は以下の傾向であった。

- 雨水

平野部である多良木の方が、森林である神瀬よりも栄養塩濃度が高い傾向が確認された。

- 湧水

湧水中の SS は少ないが、栄養塩が多く含まれている場合が確認された。また、硝酸性窒素の占める割合は、全窒素の 7 割程度以上であった。

- 土壌

黒ボク土の窒素濃度は、他の土壌に比べて 2 倍程度高かった。また、同じ褐色森林土でも本流の中流に近い森林と上流部の森林では窒素濃度に差がみられた。

また、比較として、過年度に実施した他流域（菊池川流域、筑後川流域、矢部川流域）での雨水、湧水、土壌の各調査結果を以下のとおり示す。表中での値は、調査を複数回実施した平均値である。このとき、定量下限値未満の値が含まれている場合は、その値を 0 として平均した。なお、菊池川流域を対象とした平成 28 年度調査では、ケイ素等を分析対象としていたが、SWAT での分析項目を考慮し、現在は調査対象から外しているため、表からは除いている。

表 IV-10 他流域での雨水分析結果 (単位 : mg/l)

流域		菊池川					筑後川							矢部川		
調査年度		平成 28 年					令和 2 年							令和 2 年		
調査位置		高瀬	山鹿	立門	内田	合志	神埼	角枝	鶴河内	横畑	山浦	大野	小国	舞鶴	白木	黒木
T-N	全窒素	1.62	1.56	0.84	0.98	1.22	1.02	0.38	0.37	0.26	0.45	0.56	0.53	0.42	0.43	0.62
O-N	有機態窒素	-	-	-	-	-	0.315	0.07	0.158	0.143	0.123	0.183	0.235	0.183	0.127	0.318
NO2-N	亜硝酸態窒素	-	-	-	-	-	0.005	0	0	0.001	0.002	0.001	0.001	0	0.167	0.133
NO3-N	硝酸態窒素	-	-	-	-	-	0.335	0.183	0.17	0.058	0.173	0.165	0.138	0.178	0.107	0.133
NH4-N	アンモニア態窒素	-	-	-	-	-	0.365	0.123	0.045	0.055	0.153	0.213	0.16	0.058	0.031	0.038
T-P	全リン	0.04	0.07	0.02	0.01	0.04	0.053	0.009	0.015	0.014	0.022	0.016	0.017	0.014	0.012	0.035
O-P	有機態リン	-	-	-	-	-	0.0238	0.0088	0.0153	0.0138	0.022	0.0135	0.0173	0.014	0.0117	0.0295
I-P	無機態リン	-	-	-	-	-	0.0293	0	0	0	0	0.0023	0	0	0	0.0053
SS	浮遊物質量	-	-	-	-	-	2.25	1.25	2.25	1.25	1.667	1	6.75	1.25	1.667	3.5

※「-」は未実施を示す。

※定量下限値は、表 IV-6 と同様。

表 IV-11 他流域での湧水分析結果（単位：mg/l）

流域		菊池川						筑後川						矢部川			
調査年度		平成 28 年						令和 2 年						令和 2 年			
調査位置		乙姫湧水	木柑子水源群	鍋田の清水さん	小田瀬戸口公園	大滝	伊倉十三川	立岩水源	竜門の滝近くの湧水	御手洗の滝	清水湧水	御前岳湧水	岩屋湧水	大円寺の湧水	下名の井側	たちばな湧水	杣の里の原水
T-N	全窒素	1.66	2.21	5.48	1.85	0.35	4.24	0.308	0.415	0.383	0.378	0.553	0.83	1.68	3.353	0.1	0.288
O-N	有機態窒素	-	-	-	-	-	-	0.04	0.113	0.033	0.035	0.033	0.038	0.055	0.073	0.048	0.033
NO2-N	亜硝酸態窒素	-	-	-	-	-	-	0	0	0.001	0.08	0	0.001	0.001	0	0	0.001
NO3-N	硝酸態窒素	-	-	-	-	-	-	0.255	0.288	0.34	0.258	0.505	0.785	1.613	3.265	0.043	0.245
NH4-N	アンモニア態窒素	-	-	-	-	-	-	0.013	0.015	0.01	0.005	0.015	0.008	0.013	0.015	0.01	0.01
T-P	全リン	0.04	0.07	0.04	0.02	0.01	0.08	0.046	0.072	0.022	0.044	0.009	0.017	0.055	0.046	0.026	0.023
O-P	有機態リン	-	-	-	-	-	-	0	0.0108	0.0023	0.0023	0.0015	0	0	0	0	0
I-P	無機態リン	-	-	-	-	-	-	0.044	0.06	0.019	0.041	0.006	0.016	0.052	0.045	0.025	0.022
SS	浮遊物質量	0	0	0	0	0.6	0	0	2.75	0	0.25	0	0	0	0	0	0

※「-」は未実施を示す。

※定量下限値は、表 IV-7 と同様。

表 IV-12 他流域での土壌分析結果（単位：mg/kg・dry）

流域	菊池川	筑後川							矢部川			
調査年度	平成 28 年	令和 2 年							令和 2 年			
調査位置	広瀬	神埼	角枝	鶴河内	横畑	山浦	大野	小国	舞鶴	白木	黒木	
T-N	全窒素	2,630	1,130	3,410	1,720	1,180	4,180	1,190	5,400	1,500	3,270	3,780
O-N	有機態窒素	2,630	1,130	3,400	1,720	1,180	4,180	1,190	5,350	1,500	3,250	3,760
NO2-N	亜硝酸態窒素	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NO3-N	硝酸態窒素	0	0	10	0	0	0	0	50	0	20	20
NH4-N	アンモニア態窒素	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T-P	全リン	880	1,060	400	380	160	930	370	2,730	860	760	760
O-P	有機態リン	430	720	350	320	100	700	130	1,470	690	660	520
I-P	無機態リン	450	340	50	60	60	230	240	1,260	170	100	240

※「-」は未実施を示す。

※定量下限値は、表 IV-8 と同様。

球磨川流域での調査結果及び傾向、他流域との比較を踏まえ、雨水、湧水、土壌には以下のことが考えられる。

- 雨水

平地では、空気中の栄養塩が多く溶け込むこと等が原因として、栄養塩濃度が高くなった可能性がある。あわせて、農地等由来の土砂等が巻き上げられ、雨水中に溶け込んでいる可能性が考えられる。

一方で、森林を含む山地では、栄養塩、SSともに低い傾向が示された。山地では栄養塩を含む排出ガス等が少ないため、雨水中に溶け込む量も併せて少なかったためと考えられる。併せて、森林等の植生により土砂等の巻き上げも少なかったと考えられる。

- 湧水

河川水においてはSSと栄養塩が比例関係にあることが知られているが、湧水においては、河川のように比例関係ではないことが確認された。湧水の水質は、地域や地質、採取位置の特性によるものが大きく、傾向を捉えることは難しいと考えられる。

- 土壌

黒ボク土や褐色森林土等の土壌種類によって、大まかに栄養塩濃度等を捉えることができた。一方で、同じ土壌種類でも上流と下流で差がみられたことから、水源に近い上流部の方が多く栄養塩を蓄えている可能性が考えられる。

V. SWAT モデル構築・精緻化

1. 課題及び対応方針

令和3年度までに構築したモデルのシミュレーション結果に関する課題や、今年度の検討委員会において指摘された事項及びそれぞれへの対応方針について表 V-1 のとおり整理した。前述のとおり、今年度、精緻化を優先的に進めるモデルは筑後川モデルであるが、菊池川、矢部川モデルについても同様の課題が介在しているとみられることから、菊池川と矢部川両方のモデルの課題についても表 V-1 に含めた。

なお、表 V-1 に記載の対応方針は、すでに構築している筑後川モデルだけでなく、本年度に新たに構築する球磨川モデルについても同様に適用することとする。

表 V-1 既構築モデルに関する課題および対応方針

課題		対応方針	対象流域		
区分	内容		筑後川	菊池川	矢部川
① インプット設定	シナリオ解析・評価のオプションに柔軟性を持たせるため、傾斜区分や土壌区分の見直しを図ることが望ましい。	想定するシナリオの解析が可能となるよう、適切な細分化を行う。	○	○	○
② 水収支、水流出量	森林域に特化した水や物質の流出量の分析が不十分	森林域直下の流量観測地点でのキャリブレーション、森林域と流域全体との比較・検証	○	○	○
	農地（傾斜地）の蒸発散が森林よりも多い	パラメータ調整	○	—	—
③ ハイドログラフ	通減期における実測値と推定値の乖離がやや大きい	パラメータ調整	○	○	○
④ 土砂	最下流点における土砂量が過剰	ポイントソースの見直し	○	—	○
⑤ 栄養塩	土砂量が過剰となったため、適切に推定されていない可能性がある	土砂量の見直し後、再調整	○	—	○
⑥ 評価方法	時間単位流量（ m^3/s ）だけでなく、流域からの流出総量についても整合が取れているかどうか確認が必要。	各流域における実測値ベースの年間流出総量を把握する。	○	○	○

2. 作業の全体フロー

前述の課題及び対応方針を踏まえ、今年度の SWAT モデル構築・精緻化に係る作業の全体フローを図 V-1 のとおりとした。

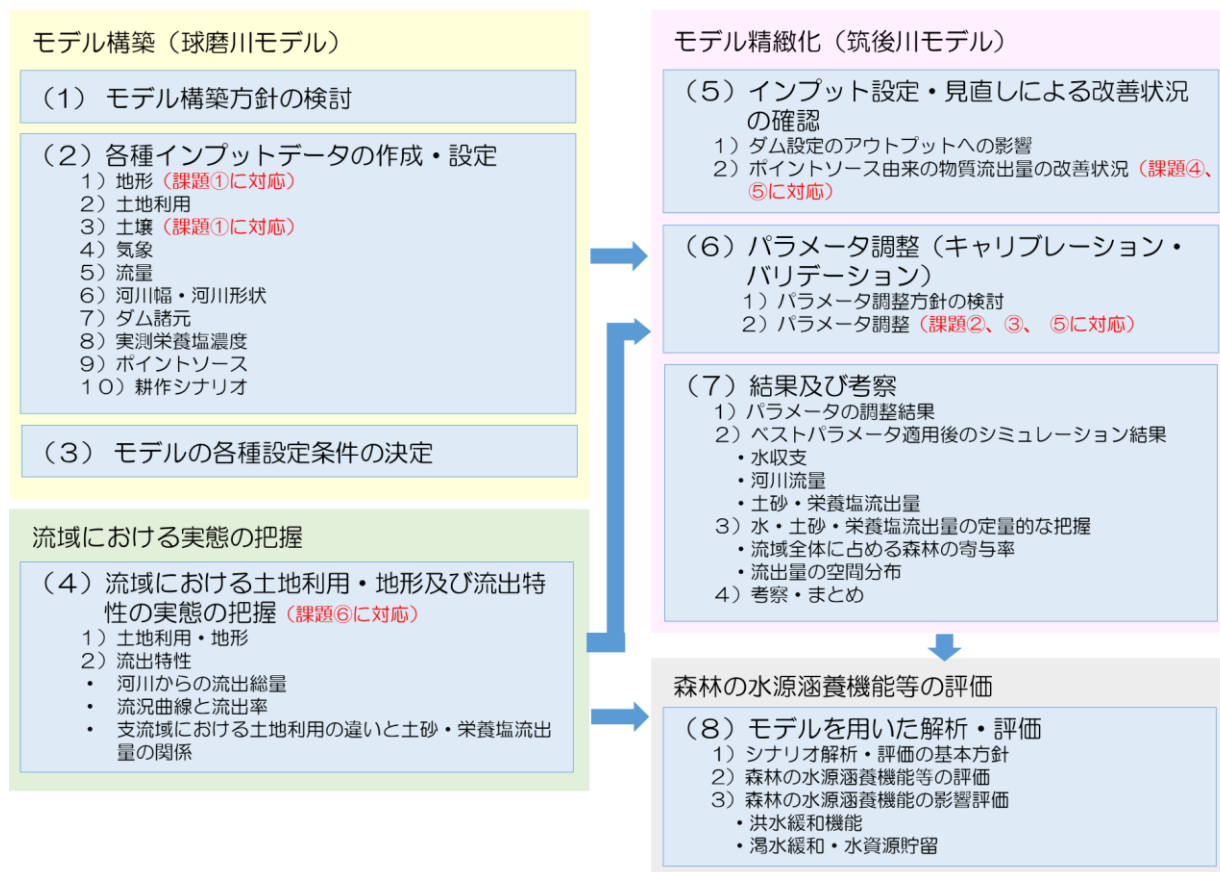


図 V-1 SWAT モデル構築・精緻化から森林の水源涵養機能等の評価までの作業全体フロー

3. SWATモデル構築（球磨川モデルの新規構築）

3.1 構築方針の検討

球磨川モデルの新規構築は、前項までに整理した課題及び対応方針、作業全体フローを踏まえて実施することとする。なお本年度は、筑後川モデルの精緻化を優先に実施することから、球磨川モデルのパラメータ調整は行わず、過年度までに調整された設定値や、本年度、筑後川モデルのキャリブレーションで得られるベスト値を適用することとする。

3.2 各種インプットデータの作成・設定

モデル構築に必要な各種データの収集及び整理を行った（表 V-2）。

表 V-2 主な収集データ

分類	収集資料	入手先	用途	期間
地形	数値標高モデル30m	USGS(米国地質調査所)	入力・評価	衛星写真撮影年:平成28年 調査期間:昭和42~53年度
土地利用	土地利用細分メッシュ	国土交通省 国土数値情報ダウンロードサービス		
土壌	土壌分類	国土交通省 国土調査(土地分類調査・水調査) GISデータ		
気象	雨量	気象庁および国土交通省 水文水質DB	評価	収集期間:2008~2018年
	気温、風速、日照時間	気象庁		
地質	表層地質	国土交通省 国土調査(土地分類調査・水調査) GISデータ	評価	調査期間:昭和42~53年度
河川	流量、窒素・リン・SS濃度	国土交通省 水文水質DB	検証・評価	収集期間:2010~2018年

(1) 地形

ア) データの入手先

地形データは、国土地理院基盤地図情報ダウンロードサービスの基盤地図情報数値標高モデルのうち、10mメッシュ 10B（地形図の等高線）DEMデータを収集した。

イ) DEMデータ（球磨川）

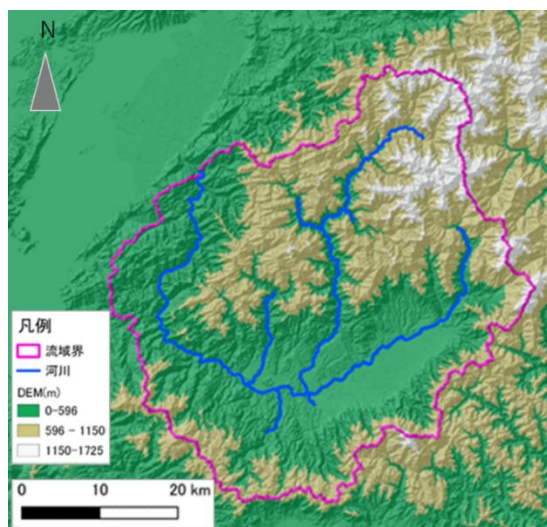


図 V-2 球磨川流域のDEMデータ（陰影図上にオーバーレイ）

ウ) 傾斜区分の見直し

適切な森林整備の検討に資する分析を行うため、各種シナリオ解析に対応可能なモデルとなるよう、傾斜区分の見直しと細分化を行った（表 V-3）。

本事業の開始当初のモデルでは、平坦地、傾斜地、急傾斜地を区分する観点で3区分としていたが、本調査が対象とする森林域の多くが傾斜地に存在することから、令和3年度に傾斜20°以上をさらに20°-30°と30°<に細分し4区分とした。

今年度は、今後流域の森林管理に資するという観点から、「全国森林計画」〔平成30年10月閣議決定（策定） 令和3年6月閣議決定（変更）〕²（表 V-4）を参考に、林業生産システムに対応した5区分とした。

表 V-3 新旧傾斜区分の比較

モデル構築年	区分数	区分閾値
平成29年度	3	0°-10°,10°-20°,20°<
令和3年度	4	0°-10°,10°-20°,20°-30°,30°<
令和4年度（今年度）	5	0°-15°,15°-20°,20°-30°,30°-35°,35°<

表 V-4 路網整備の水準

区分	作業システム	路網密度
緩傾斜地(0°-15°)	車両系作業システム	110m/ha 以上
中傾斜地(15°-20°)	車両系作業システム	85m/ha 以上
	架線系作業システム	25m/ha 以上
急傾斜地(20°-30°)	車両系作業システム	60<50>m/ha 以上
	架線系作業システム	20<15>m/ha 以上
急峻値(35°<)	架線系作業システム	5m/ha 以上

※「急傾斜地」の<>書きは、広葉樹の導入による針広混交林など育成複層林へ誘導する森林における路網密度

(2) 土地利用

ア) データの入手先

土地利用については、国土交通省の国土数値情報ダウンロードサービスより、土地利用細分メッシュデータ（100mメッシュ）を用いた。必要な範囲を統合し、ラスター形式で作成した。

名称：土地利用細分メッシュデータ（100mメッシュ）

データ時点：2016（H28）年（製品仕様 第2.6版）

入手先：国土交通省 国土数値情報ダウンロードサービス

ホームページアドレス：<http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-L03-b.html>

² <https://www.rinya.maff.go.jp/j/press/keikaku/attach/pdf/210615-2.pdf>

イ) 土地利用

本調査における球磨川流域の森林面積は 1,575km²、流域内の森林面積率は 85%である (図 V-3)。

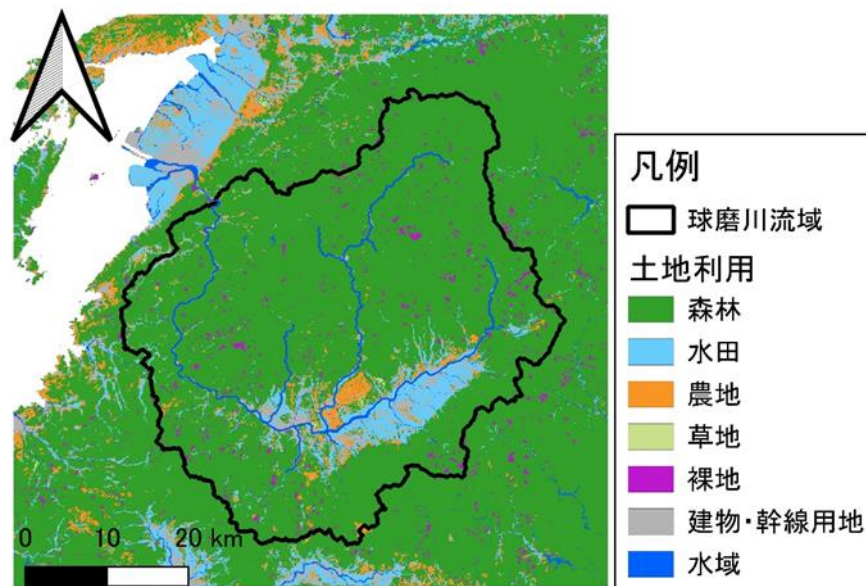


図 V-3 土地利用図

(3) 土壌

ア) データの入手先

土壌図は、国土数値情報ダウンロードサービス (<http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/index.html>) より、20 万分の 1 都道府県土地分類基本調査 (国土交通省) の土壌図を用いた。

イ) 土壌データの修正

土壌データについては、今後適切な森林整備の検討に資するデータを提供していくために必要な各種シナリオ解析に対応可能なモデルとなるよう、土壌区分の見直しと細分化を行った。具体的には、対象流域における面積割合が大きく (図 V-4)、森林域に広く分布している「黒ボク土」及び「褐色森林土」について、水分条件別に区分を細分化した (表 V-5、図 V-5)。

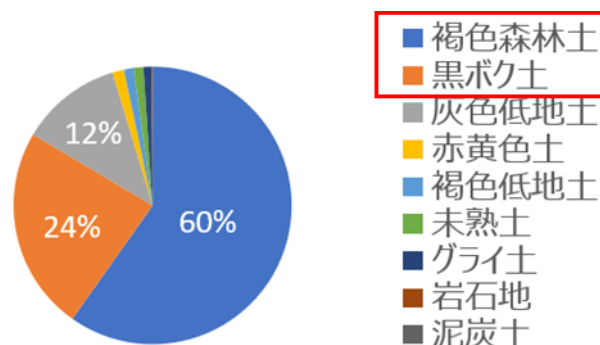


図 V-4 4 流域 (菊池川・筑後川・矢部川・球磨川) における土壌タイプ別面積割合

表 V-5 新旧土壌タイプ区分の比較

土壌タイプ (旧)	土壌タイプ (新)	含まれる土壌タイプ
黒ボク土	黒ボク土	淡色黒ボク土壌、黒ボク土壌、厚層黒ボク土壌
	黒ボク土 (湿性)	多湿黒ボク土壌、黒ボクグライ土壌
褐色森林土	褐色森林土 (乾性)	乾性褐色森林土壌、乾性褐色森林土壌 (黄褐色系)、乾性褐色森林土壌 (赤褐色系)
	褐色森林土	褐色森林土壌、褐色森林土壌 (赤褐色系)、褐色森林土壌 (黄褐色系)
	褐色森林土 (湿性)	湿性褐色森林土壌

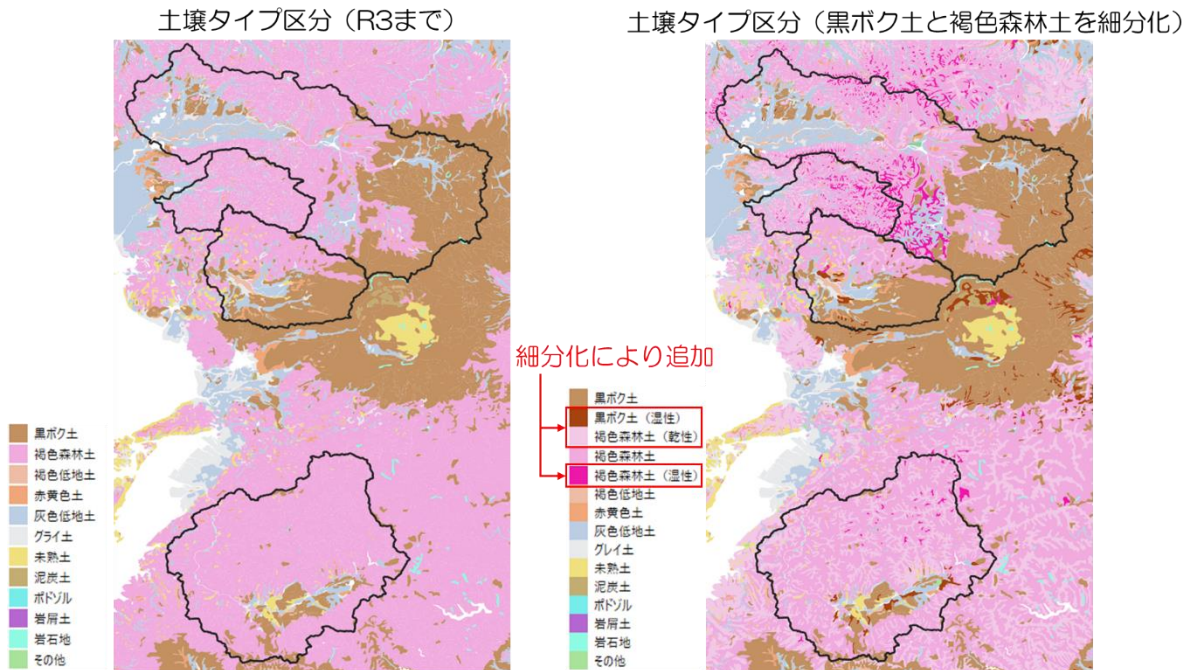


図 V-5 新旧土壌タイプによる土壌図

(4) 気象

ア) 雨量

2008～2018年の雨量データを、気象庁及び国土交通省のサイトから収集した。球磨川流域及び近隣の雨量観測所を図 V-6 に、球磨川流域内に設置されている人吉観測所の 2008～2018年の年間降水量を図 V-7 に示す。

図 V-7 において、各年の年間降水量は 2000～3000 mm 程度であった。

① 発行元：気象庁

入手先：気象庁>各種データ・資料>過去の気象データ・ダウンロード

ホームページアドレス：<http://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/>

② 発行元：国土交通省

入手先：国土交通省>水文水質データベース

ホームページアドレス：<http://www1.river.go.jp/>

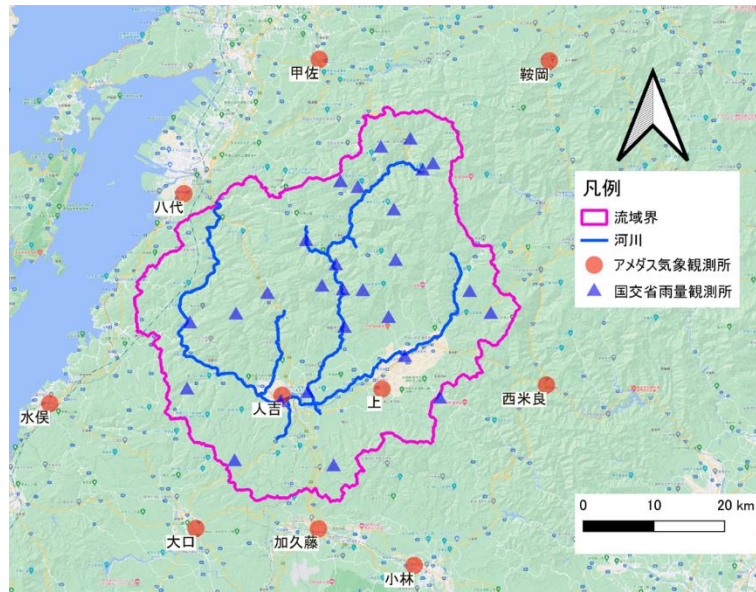


図 V-6 雨量観測所

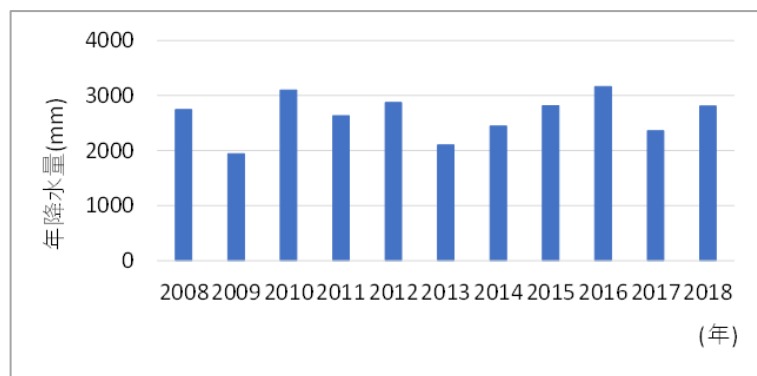


図 V-7 人吉観測所における年降水量 (2008～2018 年)

イ) 気温・風向・風速・日照時間・相対湿度

2008～2018年の気温・風向・風速・日照時間・相対湿度データを、気象庁のサイトから収集した。球磨川流域及び、近隣のアメダス気象観測所は図 V-6 に示すとおりである。またシミュレーション期間における球磨川流域の気象の特徴を把握するため、2008～2018年における人吉観測所の月平均気温及び月降水量を図 V-8 に示す。6月の降水量が他の月に比較して多いことが分かる。

発行元：気象庁

入手先：気象庁>各種データ・資料>過去の気象データ・ダウンロード

ホームページアドレス：<http://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/>

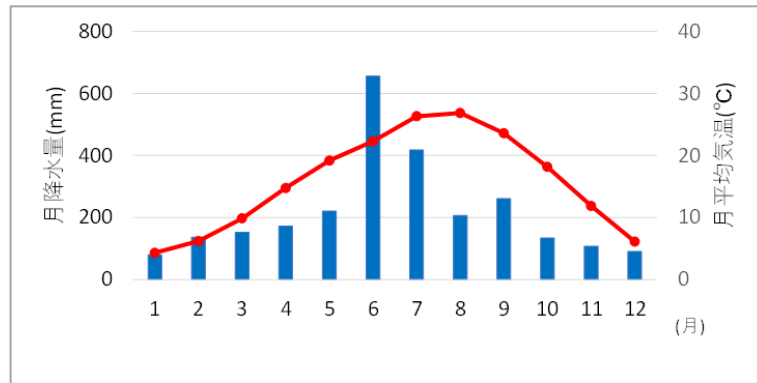


図 V-8 人吉気象観測所における 2008～2018 年の月平均気温と月降水量

(5) 流量 (河川流量、土砂量、栄養塩量)

ア) データの収集

流量 (水位)、水質 (SS、リン、窒素) データは、SWAT モデルの検証に必要となることから、以下に示す国土交通省のサイトから平水時のデータを収集した。球磨川流域最下流地点 (横石観測所) の水流量を図 V-9 に示す。また、平水時の SS、リン、窒素濃度を図 V-10、図 V-11、図 V-12 に示す。

発行元：国土交通省

入手先：国土交通省>水文水質データベース

ホームページアドレス：<http://www1.river.go.jp/>

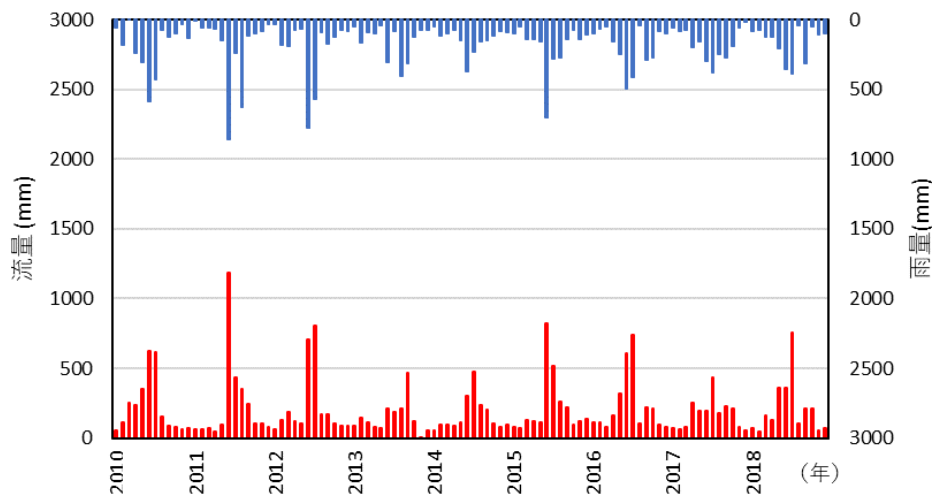


図 V-9 横石観測所における 2008～2018 年の月流量

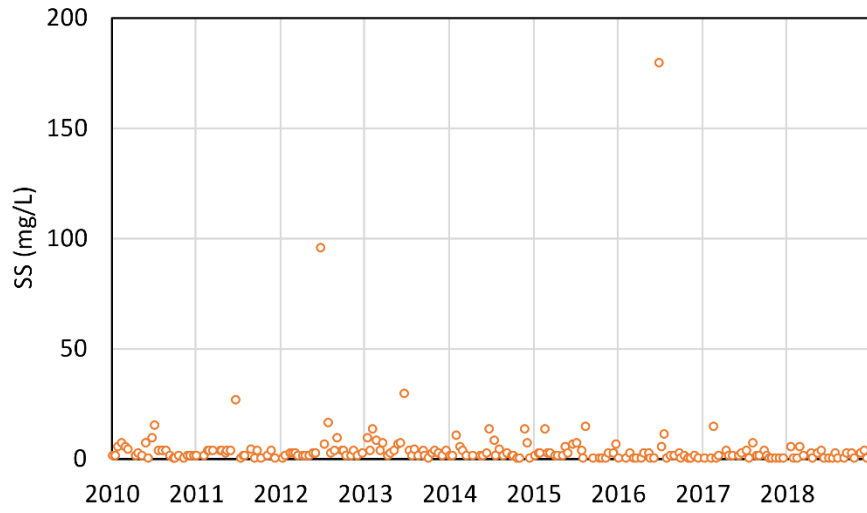


図 V-10 横石観測所における 2010～2018 年の平水時 SS 濃度

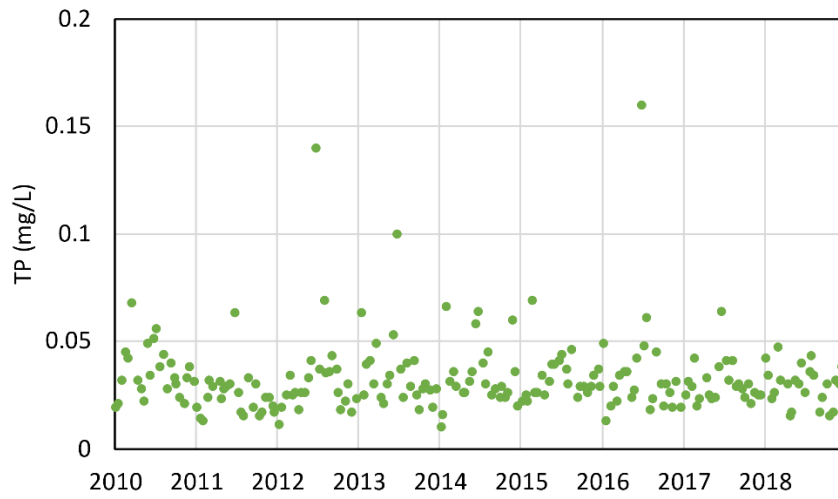


図 V-11 横石観測所における 2010～2018 年の平水時リン濃度

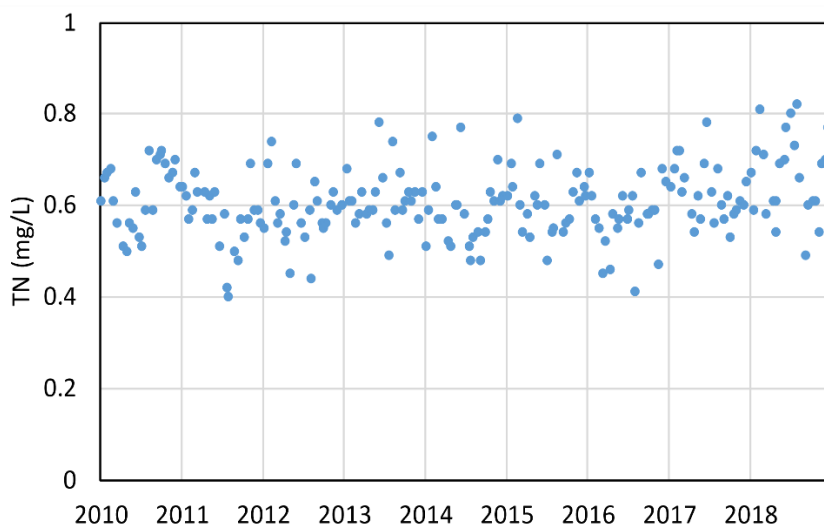


図 V-12 横石観測所における 2010～2018 年の平水時窒素濃度

また、出水時の水質（浮遊物質（SS）、リン、窒素）データを、以下に示す国土交通省九州地方整備局・河川部のサイトから収集した。球磨川流域最下流地点（横石観測所）の出水時 SS、リン、窒素の濃度を図 V-13、図 V-14、図 V-15 に示す。

発行元：国土交通省

入手先：国土交通省＞九州地方整備局・河川部＞有明海・八代海 流入一級河川水質等データ

ホームページアドレス：<https://www.qsr.mlit.go.jp/n-kawa/suisitu/index.html>

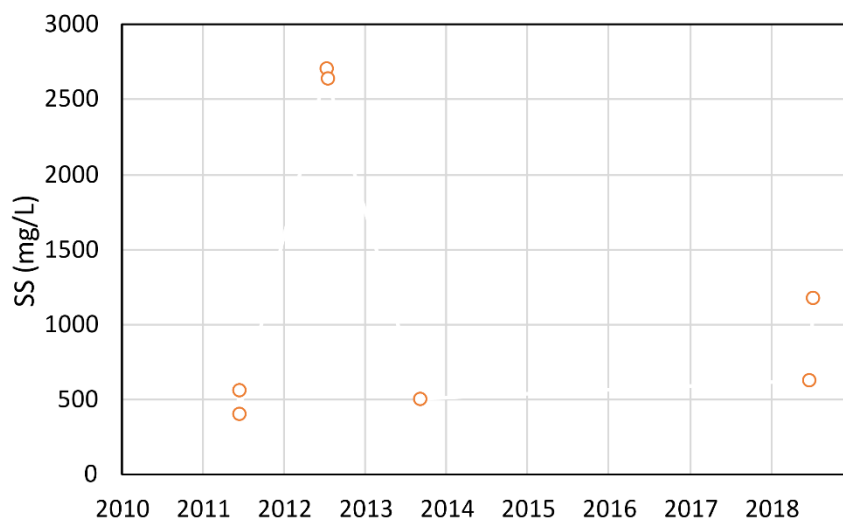


図 V-13 横石観測所における 2010～2018 年の出水時 SS 濃度

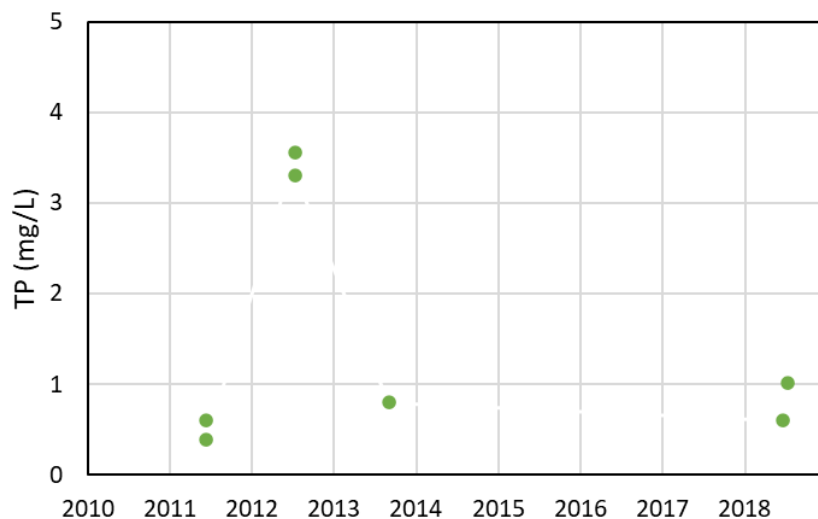


図 V-14 横石観測所における 2010～2018 年の出水時リン濃度

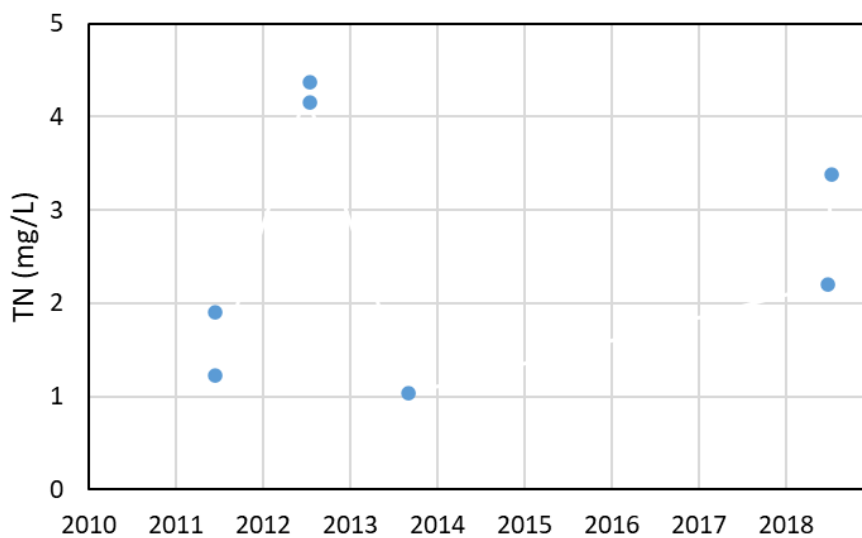


図 V-15 横石観測所における 2010～2018 年の出水時窒素濃度

イ) 観測地点

球磨川モデルにおける観測地点を図 V-16、観測地点毎の観測項目を表 V-6 に示す。今後、球磨川モデルの精緻化を行うことを踏まえ、最下流地点である横石だけではなく、上流側の複数の観測地点をキャリブレーションポイントとして含めることとし、その選定に当たっては、河川流量、土砂・栄養塩濃度の観測データが一式揃っている観測地点であることを考慮した。

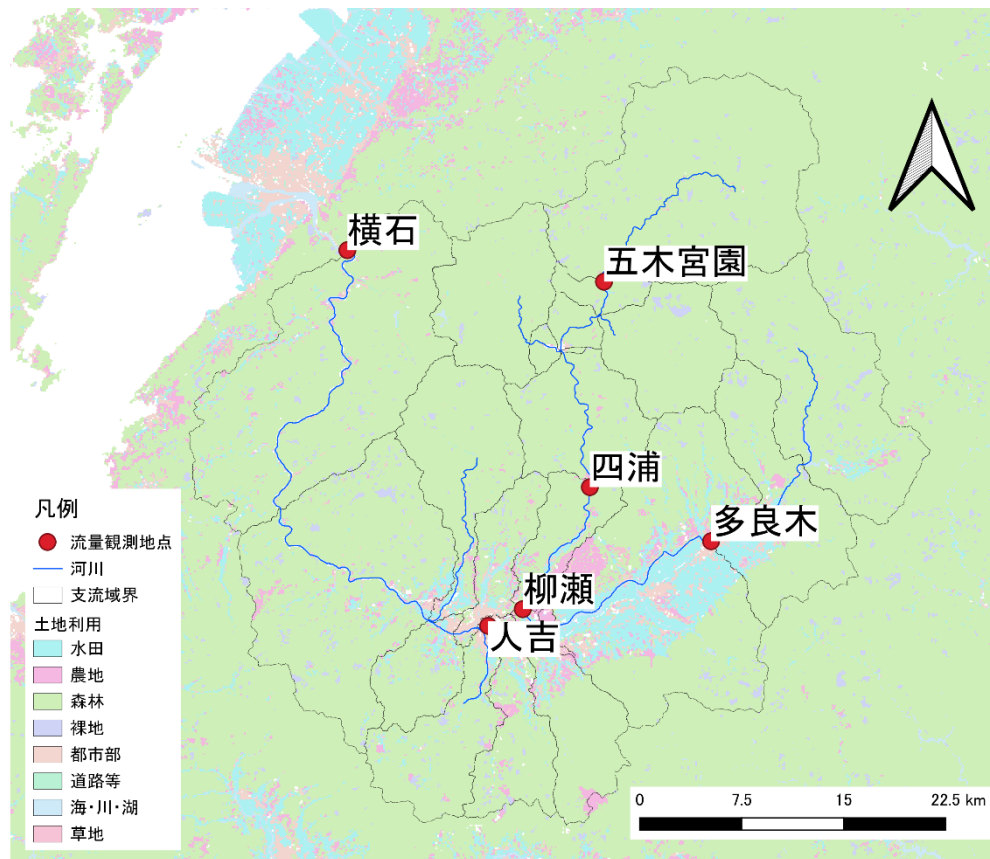


図 V-16 流量観測地点

表 V-6 観測所毎の観測項目

観測所名	平水時		出水時	備考
	流量 (水位)	水質 (SS、 窒素、リン)	水質 (SS、 窒素、リン)	
横石	○	○	○	最下流のキャリブレーション地点
五木宮園	○	○	—	森林直下のキャリブレーション地点
四浦	○	○	—	
柳瀬	○	○	—	
多良木	○	○	—	
人吉	○	○	—	

ウ) 各流域の窒素・リンのデータの補完

球磨川モデルでは、前年度までに河川水の実測データが得られていないことから、国土交通省 水門水質データベースより取得した菊池川の平水時の実測データ及び、過年度業務より得られている菊池川の実測値により、窒素とリンの窒素・リンなどの割合を推定し、入力データを作成した。また、筑後川モデルについても、国土交通省 水門水質データベースより取得した筑後川の平水時の実測データ及び令和3年度業務より得られている筑後川の実測値から同様に求めた窒素・リンなどの割合を元に推定値し求め、入力データを作成した。菊池川ならびに筑後川モデルにおける平水時の窒素・リンなどの各物質における割合を表 V-7 に示す。

表 V-7 各流域における平水時の窒素 (N) ・リン (P) などの割合

モデル名	O-N	NO3-N	NH4-N	NO2-N	O-P(有機態)	I-P(無機態)
菊池川モデル	0.38	0.59	0.03	0.002	0.68	0.32
筑後川モデル	0.25	0.69	0.04	0.017	0.37	0.63

国土交通省九州地方整備局により公表されている出水時の水質データは、時間毎に測定されているが（時間データ）、24 時間連続で測定されているものではないため、日単位で計算している SWAT モデルと比較するためには、単位を揃える必要がある。そのため、実測データから未測定時間の流出量を推定して補完した（図 V-17）。

採水されていない時間の推定値について、窒素は A、SS と T-P は B の方法で計算した。

A) 平水時のそれぞれの物質の流出量の平均濃度を実測値の代わりに用いて、上記と同様の計算により時間流出量 (tons/hour, kg/hour) を計算する。

※ 実際は計算よりも多く流出していると想定されるが、最低限の流出量を採用することで、安全側によった計算方法としている。

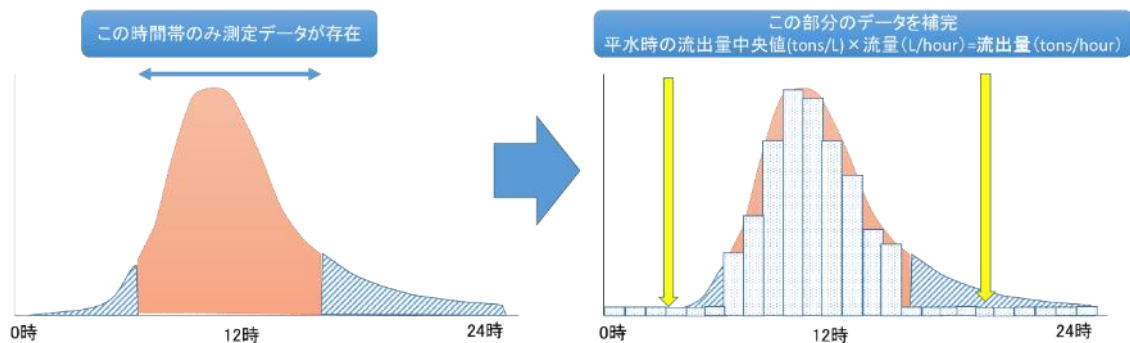


図 V-17 出水時測定データの補正方法

B) 実測値と水位について関係式を作成し、それに基づき未測定時間の流出量を推定する。

筑後川流域の瀬ノ下観測所における水質データについては、上記 A の方法で 2008～2018 年の実測データから近似式を作成した結果、T-N については決定係数 $R^2=0.2464$ と低い値であったため、T-N については平均濃度 (A)、T-P と SS は近似式(B)を用いて未測定時間の測定値を補完し、日量の推定値を得た。この T-N 及び T-P の推定値と、過年度業務より得られた菊池川の実測値から求めた形態別割合より窒素とリンの各種形態別割合を推定し、入力データとして整理した。

表 V-8 出水時の窒素 (N) ・リン (P) 形態別割合

モデル名	O-N	NO3-N	NH4-N	NO2-N	O-P (有機態)	I-P (無機態)
菊池川モデル	0.9507*(T-N)-0.5742	(T-N)-(O-N+NH4-N+NO2-N)	0.02	0.003	0.8361*(T-P)-0.0165	(T-P)-(O-P)
筑後川モデル	0.5457	0.4539	TN-(ON+NH4+NO3)	0.0007	0.5088	TP-OP

(6) 河川幅・河川形状

河川の形状は、河川における水の流速に影響を与え、それに応じて土砂・栄養塩の流出量も変化する。そのため、各河川には実態に合った適切な形状（河川の幅・深さ）をパラメータとして与える必要がある。

河川形状と河川幅について、既構築モデルと同様の設定を行った。

ア) 河川形状

SWAT モデルでは、DEM データから地形を判読し、自動的に河川の位置を決定することができるが、治水や利水の目的で河川形状が変化している場合があるため、実際の河川形状と一致しない事もある。

そのため、GIS 上に衛星画像を表示し、DEM で判読された河川形状と実際の河川形状が異なる箇所を目視で確認し、GIS 上で形状を修正した（図 V-18）。

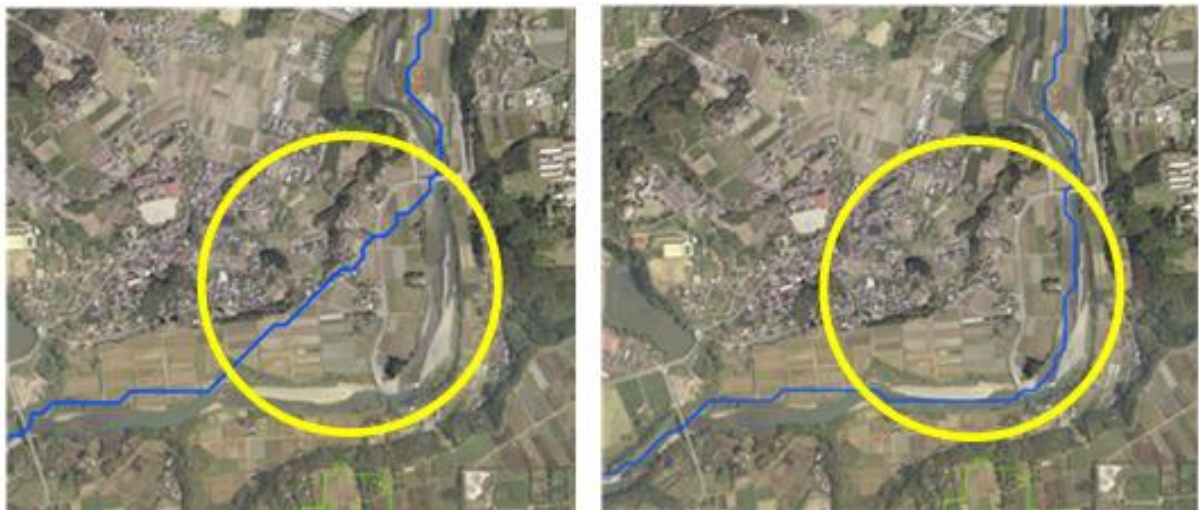


図 V-18 河川形状（左：修正前 右：修正後）

イ) 河川幅

各支流の中央付近で、かつその支流の平均的な河川幅とみられる箇所をその支流を代表する点として河川幅の計測を行った。河川幅は、SWAT モデルの定義に従い、兩岸の土手の頂点間として、GIS の計測ツールを用いて計測し、河川幅のパラメータ（CH_W2）として各支流域に与えた（図 V-19、表 V-9）。



図 V-19 河川幅の計測

表 V-9 支流域ごとの河川幅

支流域 No.	河川幅 (m)
1	119
2	119
3	138
4	162
5	221
6	153
7	82
8	57
9	113
10	124
11	76
12	76
13	143
14	97
15	84
16	72
17	124
18	40
19	83
20	41
21	29
22	38
23	32
24	50

(7) ダム諸元

本年度は、球磨川流域に存在する市房ダムについてパラメータを設定した。また、昨年度までに構築した菊池川流域及び筑後川流域の「初期土砂濃度」と「平衡時の土砂濃度」についても再計算により、より適切な値に更新した（表 V-10）。

表 V-10 令和4年度に更新・設定したダムインプットデータ（パラメータ）一覧

パラメータ名	単位	菊池川	筑後川								球磨川
		竜門ダム	下笠ダム	松原ダム	合所ダム	江川ダム	寺内ダム	山神ダム	大山ダム	夜明ダム	市房ダム
湛水面積 (RES_ESA)	ha	130	200	190	38	86	90	18	60	85	165
最大貯水量 (RES_EVOL)	10 ⁴ m ³	4,250	5,930	5,460	7,660	2,533	1,800	298	1,960	405	4,020
通常時の表面積 (RES_PSA)	ha	114	112	126	21	68	80	18	60	48	97
通常時の貯水量 (RES_PVOL)	10 ⁴ m ³	2,931	2,456	2,583	3,173	1,891	808	279	1,796	168	2,059
開始時の貯水量 (RES_VOL)	10 ⁴ m ³	1,913	3,825	3,870	4,941	1,357	713	278	1,786	261	1,239
初期土砂濃度 (RES_SED)	mg/L	6	2	1	1	1	1	1	1	1	4
平衡時の土砂濃度 (RES_NSED)	mg/L	2	2	3	1	1	7	5	3	1	12
日平均放出量 (RES_RR)	m ³ /s	3	12	28	12	2	2	1	2	1	14
非洪水期開始月 (IFLOOD1R)	月	Oct	Oct	Oct	Oct	Oct	Oct	Oct	Oct	Oct	Oct
非洪水期終了月 (IFLOOD2R)	月	May	June	June	June	June	June	June	June	June	June

注記 1

- 1) 出典：国土交通省水文水質データベース (<http://www1.river.go.jp/>) 中の「ダム諸量データベース (<http://mudam.nilim.go.jp/home>)」
- 2) 最大貯水量：ダム諸量データベースに総貯水量と有効貯水量の記載があり、菊池川と同様に総貯水量を使用。
- 3) 通常時の表面積：湛水面積に通常時の貯水率を乗じて算出。
- 4) 通常時の貯水量：2010年、2014年、2018年の時間当たり平均値を算出。
- 5) 開始時の貯水量：2010年1月1日01:00の貯水量を使用。
- 6) 日平均放出量：2010年、2014年、2018年の時間当たり平均値を算出。
- 7) 初期土砂濃度：2010年1月から、土砂濃度の測定記録がある日のデータを使用。
- 8) 平衡時の土砂濃度：2010～2018年の平均値を使用。

注記 2

筑後川流域は実測値が不明なダムも存在するため、統一的に以下のように整理した。

- * 1：初期土砂濃度：菊池川水系竜門ダムの値を使用。
- * 2：平衡時の土砂濃度：菊池川水系竜門ダムの値を使用。
- * 3：通常時の表面積 (ha)：同流域内の下笠ダムの比を対象ダムの湛水面積に乘じて算出。
(式：下笠ダム通常時の表面積 (ha) / 下笠ダム湛水面積 (ha)) × 合所・江川・夜明ダム湛水面積 (ha))
- * 4：通常時の通常時の貯水量 (10⁴m³)：同流域内の下笠ダムの比を対象ダムの最大貯水量に乘じて算出。
(式：下笠ダム通常時の貯水量 (10⁴m³) / 下笠ダム最大貯水量 (10⁴m³) × 合所・江川・夜明ダム最大貯水量 (10⁴m³))
- * 5：開始時の貯水量 (10⁴m³)：同流域内の下笠ダムの比を対象ダムの開始時の貯水量に乘じて算出。
(式：下笠ダム開始時の貯水量 (10⁴m³) / 下笠ダム最大貯水量 (10⁴m³) × 合所・江川・夜明ダム開始時の貯水量 (10⁴m³))
- * 6：合所ダム日平均放出量 (m³/s)：同流域内で最大貯水量に近い下笠ダムの値を使用。

(8) 実測栄養塩濃度

雨水中の栄養塩（窒素）濃度、地下水中の栄養塩（窒素、リン）濃度、土壌水中の栄養塩（窒素、リン）濃度については、本事業で計測した実測値をモデルに入力した。

ア) 降雨中の栄養塩濃度

本事業で計測した実測値を、RCN.bsn（雨水中の窒素濃度（mg/l））、Rcn_sub.atm（硝酸態窒素の湿性沈着量（mg/l））、rammo_sub.atm（アンモニウム態窒素の湿性沈着量（mg/l））に入力した。

計測は年2回（7月、11月）に2か所の観測地点（神瀬、多良木）にて実施し、採水された雨水全窒素の平均値を全流域に対するパラメータ値として用いた。

球磨川モデルに入力したパラメータ値と、過年度に構築した他3流域におけるパラメータ値（参考）を表 V-11 に示す。

表 V-11 雨水中窒素濃度のパラメータ値

SWAT パラメータ	球磨川モデル	菊池川モデル	筑後川モデル	矢部川モデル
RCN.bsn (mg/l)	0.4600	0.3900	0.5093	0.4892
Rcn_sub.atm (mg/l)	0.1250	0.1357	0.1744	0.1389
rammo_sub.atm (mg/l)	0.0775	0.1138	0.1590	0.0421

イ) 地下水中の窒素およびリン濃度

本事業において流域内の5か所で計測した実測値をパラメータ値としてモデルに入力した。

実測値が得られていない支流については、令和3年度に整理した「採取地点が属する集水域の範囲」を1つのグループとして共通のパラメータを与えた。グループ分けの結果を図 V-20 に、また、SWAT パラメータ及びパラメータ値を表 V-12 に示す。



図 V-20 地下水中の栄養塩について共通のパラメータを与える流域のグループ分け

表 V-12 地下水中栄養塩の SWAT パラメータ及びパラメータ値

SWAT パラメータ	ソース (実測値)	支流 No.	観測点名	パラメータ値
SHALLST_N.gw	湧水の NO3-N	1	上原の井川	0.26
		4	永国寺庭園の池	0.28
		13	東方湧水	0.26
		23	白滝公園	0.56
		24	久連子湧水	0.37
GWSOLP.gw	湧水の I-P	1	上原の井川	0.041
		4	永国寺庭園の池	0.014
		13	東方湧水	0.007
		23	白滝公園	0.024
		24	久連子湧水	0.017
LAT_ORGN.gw	湧水の O-N	1	上原の井川	0.06
		4	永国寺庭園の池	0.08
		13	東方湧水	0.03
		23	白滝公園	0.03
		24	久連子湧水	0.04
LAT_ORGP.gw	湧水の O-P	1	上原の井川	0
		4	永国寺庭園の池	0
		13	東方湧水	0
		23	白滝公園	0
		24	久連子湧水	0.005

ウ) 土壌水中の栄養塩濃度

本事業において流域内の 4 か所で計測した実測値をパラメータ値としてモデルに入力した。

共通のパラメータを与える支流のグループ分けについては、地下水中の栄養塩と同様に令和 3 年度に整理した「採取地点が属する集水域の範囲」とした。グループ分けの結果を図 V-21 に、また、SWAT パラメータ及びパラメータ値を表 V-13 に示す。

凡例

- 流域界
- 神瀬
- 田野
- 多良木
- 梶原
- 球磨川土壌地点
- 河川



図 V-21 土壌水中の栄養塩について共通のパラメータを与える流域のグループ分け

表 V-13 土壌水中栄養塩の SWAT パラメータ及びパラメータ値

SWAT パラメータ	ソース (実測値)	流域 No.	観測点名	パラメータ値
SOL_ORGN.chm	土壌の O-N	1	神瀬	3410
		18	田野	7850
		16	多良木	3500
		22	梶原	4720
SOL_LABP.chm	土壌の I-P	1	神瀬	350
		18	田野	160
		16	多良木	330
		22	梶原	510
SOL_ORGP.chm	土壌の O-P	1	神瀬	680
		18	田野	400
		16	多良木	490
		22	梶原	880

(9) ポイントソース

陸域から河川に流入する負荷として、農地や森林などの面的な部分からの負荷（面源負荷）に加え、下水道や畜産施設からのポイント的な負荷（点源負荷）も考慮しなくてはならない。点源負荷からは SS（Suspended Solid：浮遊物質）、リン、窒素が排出されており、流域全体での土砂・栄養塩流出量に影響を与える。なお、SS は厳密には土砂だけでなく植物プランクトンなども含まれるが、洪水時の SS 負荷量の増加と土砂流出量の増加には関連性があると考えられ、SS を土砂流出量とみなすことができる場合がある（清水、小野寺 2012）。そのため、本事業でも SS を土砂流出量実測値として扱った。

工場などの産業排水については下水道の処理水に含まれるとして、下水道、生活由来排水（下水道以外）、畜産由来排水の 3 種類から負荷を反映させた。

なお、過年度までの構築モデル（菊池川・筑後川・矢部川）では流域内各県の排水データを各県 HP 等から入手し、排出量設定の計算に用いていたが、今年度から統一的なフォーマットでの計算が可能となるよう、全国データを用いて計算を行うこととした（表 V-14）。

表 V-14 令和 4 年度にポイントソースからの排出量算定に用いたデータ

区分	下水道	生活排水	畜産排水
	下水道人口	浄化槽人口	市町村別家畜飼養頭数（牛、豚）
使用データ	農林水産省一般廃棄物処理実態調査結果		農水省畜産統計調査（平成18年）

ア) 排出点の設定

排出点は、各支流の最上流に設定した。球磨川流域における設定位置を図 V-22 に示す。

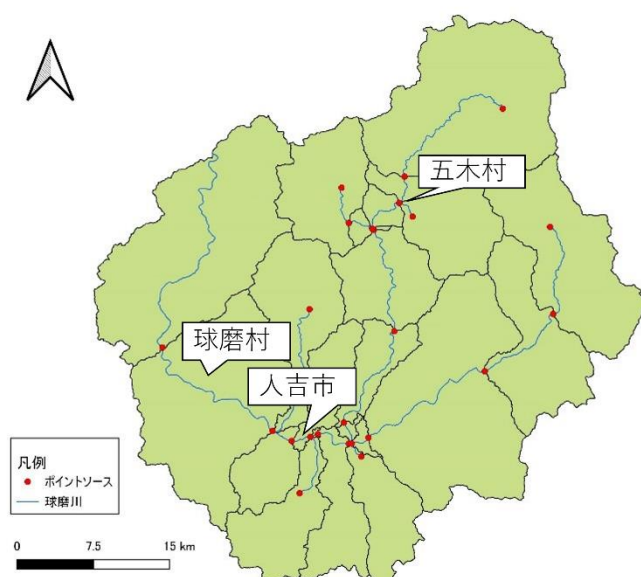


図 V-22 球磨川流域における排出点の設定位置

イ) 生活排水データの収集と反映

過年度事業の生活排水由来負荷量の計算方法に準じ、一人・一日当たりの負荷量を示した原単位法を用いて、各支流に一定の負荷を割り当てることとした。

下水道以外の生活排水処理施設には、農業集落排水施設、合併処理浄化槽、単独処理浄化槽が含まれる。これらの施設の排出負荷量原単位は「流域別下水道整備総合計画調査 指針と解説」（平成 27 年 国土交通省 水管理・国土保全局下水道部）より表 V-15 のとおりとした。

生活排水の市町村及び処理種別の人口については、前述の環境省一般廃棄物処理実態調査結果³より、調査実施期間（キャリブレーション期間）に含まれる平成 18 年度のデータを収

³ 環境省一般廃棄物処理実態調査結果
<https://www.env.go.jp/recycle/wastetech/ippan/index.html>

集した。

表 V-15 下水道以外生活由来排水の原単位

処理施設	SS (g/人・日)	T-N (g/人・日)	T-P (g/人・日)
農業集落排水施設	2.4	6.1	0.63
合併処理浄化槽	10.8	6.5	0.75
単独処理浄化槽	3.1-3.9	5.2-6.6	0.56-0.7

ウ) 下水道データの収集と反映

下水道由来負荷量についても、生活排水由来負荷量の計算と同様に原単位法を用いて、各支流域に一定の負荷を割り当てることとし、下水道人口についても(2)と同様にデータを収集した。

原単位については、「熊本県流域下水道事業経営戦略」(熊本県土木部道路都市局下水環境課 令和3年3月)⁴及び「流域別下水道整備総合計画調査 指針と解説」(平成27年 国土交通省 水管理・国土保全局下水道部)、「広報みなみあそ」(2021年8月号)⁵により表 V-16 のとおりとした。

表 V-16 球磨川流域における下水道由来負荷量原単位

SS (g/人・日)	T-N (g/人・日)	T-P (g/人・日)
0.954	1.5882	0.42294

エ) 畜産由来排水データの収集と反映

畜産由来排水についても、同じく原単位法を用い、生活由来排水・下水道と同様の前述の資料より、表 V-17 のデータを得た。

表 V-17 畜産由来排水負荷量原単位
(「流域別下水道整備総合計画調査 指針と解説」より)

家畜種類	SS (g/頭・日)	T-N (g/頭・日)	T-P (g/頭・日)
牛	3000	290	50
豚	700	40	25

家畜の排せつ物については「家畜排せつ物の利用の促進を図るための県計画」(平成29年宮崎県)⁶により、家畜排せつ物のうち浄化処理されるものは2割程度と考えられること、さらに、「環境省中央審議会水環境部会 総量規制専門委員会(第4回)資料」により、処理による除去率を95%とし、表 V-17 の値に0.01を乗じた数値を本事業における畜産由来排水負荷量原単位として用いることとした(表 V-18)。

⁴ https://www.pref.kumamoto.jp/uploaded/life/90384_127222_misc.pdf

⁵ https://www.vill.minamiaso.lg.jp/kiji0031380/3_1380_up_hm70wo7m.pdf

⁶ https://hinatamafin.pref.miyazaki.lg.jp/material/files/group/17/44140_20190617103258-1.pdf

表 V-18 畜産由来排水負荷量原単位

家畜種類	SS (g/頭・日)	T-N (g/頭・日)	T-P (g/頭・日)
牛	30	2.9	0.5
豚	7	0.4	0.25

支流域毎の畜産負荷量は、「作物統計調査 市町村別データ 長期累計（平成 19 年 2 月現在）」に記載の市町村別の家畜頭数を面積按分により支流域毎の家畜頭数に換算し、表 V-18 の原単位に乗じて設定した。

（10）耕作シナリオ

球磨川モデルについては、水田、農地（平地）、農地（傾斜地：20°以上）、森林の耕作シナリオを作成し、インプットデータを設定した。なお、実際は様々な作物が栽培されているが、SWATモデルでは、水田・農地（平地）・農地（傾斜地）のそれぞれについて代表作物を1～2種類選定し、全ての水田・農地で同じ作物を同じ日程で栽培する設定となっているため、代表作物を選定することとした。また、SWATモデルに存在しない設定については、パラメータの変更等で対応した。

ア) 水田

水田の代表作物は、関係市町村の農業統計データ⁷より表作は稲、裏作は二条大麦とした。SWATモデルにおける作物の設定は、稲は RICE (ID33)、二条大麦は WINTER BARLEY (ID99) である。

稲の移植時の初期 LAI (LAI_INT) は 0.1、初期バイオマス量 (BIO_INT) は 20 [kg/ha] とした。耕作中は灌水状態を再現するために Auto irrigation オプションを利用し、植物が水ストレスを感じると自動的に近隣の河川から引水し水田に供給するように設定した。また、水田の畦道による土砂捕捉効果を再現する FILTERW オプションを利用し、畦道の距離を 2.6m と設定した（表 V-19）また、USLE の作物係数を 0.010 とした⁸。

耕作シナリオは、稲については JA くまが公開している栽培基準（図 V-23）により、二条大麦については同じく JA くまの作成した大麦栽培基準を参考に設定した。また、熊本県農業動向年報（令和元年度～令和 2 年度）により耕地利用率を 53%とした。施肥は、JA くまの稲作及び大麦栽培基準、JA くま担当者へのヒアリング結果、及び耕地利用率等を踏まえて設定した（表 V-20）。

表 V-19 水田の設定パラメータ

パラメータ名	設定値	説明
Initial Land Cover	なし	
FILTERW	2.6	畦道による土砂捕捉効果を再現。畦道の幅を設定
Irrigation Source	Reach	水の供給元
Subbasin ID	支流域番号	供給元の支流域を指定
USLE_C	0.010	USLE の作物係数

⁷ 第 66 次農林水産統計年報（平成 30～令和元年）

⁸ 農地を対象とした広域土壌侵食予測のための土地利用データ作成手法
<https://thesis.ceri.go.jp/db/files/8588880865f2ba255e7e9d.pdf>



令和4年産 ヒノヒカリ くまさんの輝き 栽培基準

機械移植基準日 6月5日～15日

JA米の要件

- 種子更新の徹底
- 栽培履歴の記録
- 農産物検査の実施

出荷時には「生産履歴」を提出しましょう。

球磨地域農業協同組合
くまもと売れる米づくり推進本部
令和4年1月作成

- 1.土づくりの徹底：◎完熟堆肥の投入 ◎土壌改良材の投入
- 2.種子更新の徹底
- 3.健苗育成
- 4.適正な水管理・肥培管理と適期防除行
- 5.適期刈取励行と乾燥調製適正化(玄米水分15%・整粒歩合80%以上・網目1.85mm以上)
- 6.食味及び品質の向上(タンパク含有量6.5%以下)

種の一生涯	ヒノヒカリ・くまさんの輝き作型			水管理														
	移植期	出穂期	成熟期	浅水	間断灌水	中干し	間断灌水	深水	間断灌水	落水	間断灌水	落水	間断灌水	落水				
項目	5月	6月	7月	8月	9月	10月												
生育期	播種期	育苗期	移植期	有効分けつ期	無効分けつ期	穂の発育期	出穂期(4粒出穂)	乳熟期	登熟期	成熟期								
主な作業	種子更新徹底 JA米規格に準拠 水田に散布しない	播種 草の徒長防止	育苗 草の徒長防止	田植 草の徒長防止	深切り 草の徒長防止	間断灌水 草の徒長防止	中干し 草の徒長防止	間断灌水 草の徒長防止	深水 草の徒長防止	間断灌水 草の徒長防止	落水 草の徒長防止	間断灌水 草の徒長防止	落水 草の徒長防止	間断灌水 草の徒長防止	落水 草の徒長防止			
病害虫発生期	ツマグロヒョウモン・セジロウカ						コブメイガ						カメムシ					
防除	薬剤使用						本田防除目安①						本田防除目安②					



品名	播種日数	播種の日数	選別率(%)
ヒノヒカリ	100%	100%	95%
コシヒカリ	100%	100%	95%
あきたこまち	100%	100%	95%
ひとめぼれ	100%	100%	95%
新米	100%	100%	95%
産地	100%	100%	95%
選別機	100%	100%	95%
選別機	100%	100%	95%
選別機	100%	100%	95%

施肥基準

肥料名	基肥	追肥	合計	肥料名	基肥	追肥	合計
JA-C-48等	40	6.4	46.4	JA-C-48等	40	6.4	46.4
JA-C-65等	18	2.1	20.1	JA-C-65等	18	2.1	20.1
JA-C-100等	8.5	1.1	9.6	JA-C-100等	8.5	1.1	9.6
JA-C-120等	4.5	0.6	5.1	JA-C-120等	4.5	0.6	5.1

図 V-23 JA くま栽培基準 (部分)

表 V-20 耕作シナリオ (水田)

実施日	実施内容	SWATでの操作	詳細
6/8	耕起	Tillage(Springplow)	
6/8	施肥	Fertilizer Application	Elem-P 9kg/10a Elem-P 6.4kg/10a Elem-N 6.4kg/10a
	灌水開始 灌水	Initiate Water Impound Auto irrigation(自動灌水処理)	
6/9	代かき	Tillage(Riceroll)	
6/10	移植(稲)	Plant/begin Application	
7/25	追肥	Fertilizer Application	Elem-P 2.1kg/10a Elem-N 0.8kg/10a
9/20	落水	Release/Impound	
10/1	収穫	Harvest and Kill	全量収穫
10/25	施肥 耕起	Fertilizer Application Tillage(Fallplow)	BEEF-FR 1000kg/10a

11/20	施肥 耕起 播種(二条大麦)	Fertilizer Application Tillage(Constill) Plant/begin Application	Elem-P 6.0kg/10a Elem-P 3.6kg/10a Elem-N 8.8kg/10a 畝立て播種
5/31	収穫	Harvest and Kill	全量収穫

イ) 農地（平地）

平地の農地では、球磨川流域内の市町村における畑作物の作付面積は熊本県 球磨地域振興局農林部 農業普及・振興課へのヒアリングを実施し、代表作物を表作はキュウリ（ハウス栽培）、裏作はメロン（ハウス栽培）を栽培する想定とした。SWATモデルにおける作物の設定は、キュウリはCUCUMBER（ID85）、メロンはHONEYDEW MELON（ID88）である。

ハウス栽培を想定した設定は SWAT モデル内に存在しないため、パラメータの設定変更で対応した。具体的には、作物データベース内の最低気温パラメータ（T_BASE）をデフォルトではキュウリ・メロンともに 16℃のところを 6℃に、最適気温パラメータ（T_OPT）はキュウリで 32℃のところを 22℃に、メロンで 35℃のところを 25℃に変更した。USLE の作物係数は、ハウス栽培であることを考慮しデフォルトでは 0.03 のところを 0.01 とした⁹（表 V-21）。

耕作シナリオと施肥は、熊本県より提供されたメロン（半促成・アングス）及び、キュウリ（抑制）の耕種基準を参考に設定した。耕地利用率は、熊本県農業動向年報（令和元年度～令和2年度）より 38%とした（表 V-22）。

表 V-21 農地（平地）の設定パラメータ

パラメータ名	設定値	説明
Initial Land Cover	なし	
FILTERW	2.6	畦道による土砂捕捉効果を再現。畦道の幅を設定
T_BASE(.crop)	6	作物が生育可能な最低気温
T_OPT(.crop)	22（キュウリ） 25（メロン）	作物の生育最適気温
USLE_C	0.010	USLE の作物係数

表 V-22 農地（平地）の耕作シナリオ

実施日	実施内容	SWAT での操作	詳細
1/1	基肥	Fertilizer Application	(Elem-P) 52.8kg/ha (Elem-N) 120kg/ha
1/20	定植（メロン） 灌水	Plant/begin Application Auto irrigation（自動灌水処理）	
6/10	収穫	Harvest and kill	
6/15	基肥 耕起	Fertilizer Application Tillage（Sprgplow）	(Elem-P) 110 kg/ha (Elem-N) 180kg/ha
6/30	定植（キュウリ） 灌水	Plant/begin Application Auto irrigation（自動灌水処理）	

⁹ USLE による畑地流域からの土砂流出解析
<https://thesis.ceri.go.jp/db/giken/h21giken/JiyuRonbun/GT-21.pdf>

9/15	追肥	Fertilizer Application	(Elem-P) 66kg/ha (Elem-N) 150kg/ha
11/30	収穫	Harvest and kill	
12/1	施肥 耕起	Fertilizer Application Tillage (Fallplow)	(BEEF-FR) 1000kg/10a

ウ) 農地（傾斜地：20°以上）

通常、傾斜が20°以上あるような土地では野菜が栽培されていないことから、果樹や茶の栽培がされている。熊本県より提供された資料から、果樹の中で最も栽培面積の大きなクリの栽培を想定した。なお、クリに該当する作物が SWAT に存在しないことから、作物の設定は WALNUT (ID126) で代替することとした。

耕作シナリオは JA かもと広報誌（2022年10月号）及び、こうち農業ネット

（<https://www.nogyo.tosa.pref.kochi.lg.jp/info/dtl.php?ID=2532>）により設定した。

耕地利用率は、農地（平地）と同様に、熊本県農業動向年報（令和元年度～令和2年度）より38%とした。

表 V-23 農地（傾斜地）の設定パラメータ

パラメータ名	設定値	説明
Initial Land Cover	Walnut	
USLE_C	0.001（デフォルト）	USLEの作物係数

表 V-24 農地（傾斜地）の耕作シナリオ

実施日	実施内容	SWATでの操作	詳細
2/20	基肥	Fertilizer Application	(Elem-P)15.84kg/ha (Elem-N)84kg/ha
8/10	追肥	Fertilizer Application	(Elem-P)7.92kg/ha (Elem-N)42kg/ha
9/25	一部収穫	一部収穫 (harveff=0.1)	
10/10	追肥	Fertilizer Application	(Elem-P)7.92kg/ha (Elem-N)42kg/ha

エ) 森林

森林については、過年度と同様に、成熟した針広混交林が当初より存在し、シミュレーション期間中に伐採は行われたい設定とした（表 V-25）。

表 V-25 森林の設定パラメータ

パラメータ名	設定値	説明
Initial Land Cover	Forest-mixed	初期の土地利用の種類
LAI_INT	4	初期 LAI
BIO_INT	1000 (kg/ha)	初期バイオマス
BLAI	9	最大 LAI
CANMX	20 (mm)	最大樹冠貯留量

3.2 モデルの各種設定条件等

球磨川モデル及び、過年度に構築した筑後川、菊池川、矢部川の各モデルについて、流域の概要と各種設定は以下のとおりである。

区分		球磨川	筑後川	矢部川	菊池川
概要	流域面積 (ha)	185,510.6	228,537.5	45,449.4	75,963.6
	支流数	24	54	11	34
	HRU 数	934	1476	704	1271
支流境界、 HRU 構築	河川データ (Burn in Stream の入力)	入力			
	支流境界構築上の 閾値	Define threshold	30 km ²		
		Snap threshold	33333 grid cells		
	ポイントソース	設定			
		24 箇所	9 箇所	1 箇所	1 箇所
	ダム	設定			
		1 基	8 基	1 基	1 基
	流域の統合閾値 (Merge subbasins)	5%			
傾斜区分	5 区分	5 区分	4 区分	5 区分	
HRU's の最小閾値 設定: Filter by Landuse, soil, slope	1/5/5	5/5/5	0/0/0	3/3/5	
気象データの取込	入力期間	2008.1.1~2018.12.31			
	時間単位	日(Daily)			
パラメータ初期値		筑後川モデルのパラメータを適用			
シミュレーション	シミュレーション期間	2010.1.1~2018.12.31			
	ウォームアップ	期間	2008.1.1~2009.12.31		
		NYSKIP	2(年)		
	シミュレーション時間単位	日(daily)			
	SWAT.exe Version	Rev. 681, 64-bit, release			
	蒸発散量計算方法	ペンマン・モンティース法			
	表面流計算方法	カーブナンバー法			

4. 流域における土地利用・地形及び流出特性の実態の把握

SWATモデルにおける各水文過程の計算は、地形（傾斜）、土地利用、土壌タイプの違いによって分割された HRU（Hydrologic Response Unit：水文応答単位）と呼ばれ、小ブロック単位で計算されることから、傾斜や土地利用が計算結果に与える影響は大きい。ここでは、モデルシミュレーション結果の解釈や評価の妥当性を検証するため、筑後川モデル、球磨川モデルの解析範囲となっている流域内の土地利用及び地形についてそれぞれインプットし、単位毎の面積及び面積割合を整理した。集計には、SWAT モデルによってベクターデータ形式で生成される HRU の属性値を用いた。

また、後述のモデルを用いたシナリオ解析・評価においては、前提としてモデルシミュレーションにより推定された水や物質の流出量が、流域から流出する実際の流出量と乖離していないことが重要である。このことから、推定結果の妥当性を適宜確認する材料として、筑後川流域、球磨川流域から年間に流出する河川水の総量（実測）についても把握した。

4.1 土地利用・地形

筑後川モデルの土地利用・傾斜区分別の面積（表 V-26、図 V-24）及び面積割合（表 V-27）の集計を行った。

筑後川流域における森林の傾斜 35°以上の割合は約 40%を占めており、森林が急峻地に多く分布していることが分かる。一方、水田・農地・建物・幹線用地は傾斜 15°未満の緩傾斜地に多く、草地、裸地は、緩傾斜から急傾斜地まで広く分布している。筑後川の特徴として、傾斜 35°以上における草地・裸地の面積割合が他の傾斜区分と比較してやや多くなっている。これは筑後川最上流部には日出生台演習場が在ることによるものである。

表 V-26 筑後川モデルの土地利用・傾斜区分別面積（ha）

土地利用	傾斜					総計
	0-15.0	15.0-20.0	20.0-30.0	30.0-35.0	35.0以上	
森林	15,781	7,835	22,322	11,480	81,699	139,118
水田	21,698	745	888	124	602	24,058
農地	5,941	971	1,490	482	1,541	10,425
草地	1,715	635	1,005	363	985	4,704
裸地	671	309	634	299	1,599	3,513
建物・幹線用地	13,901	340	412	98	278	15,029
水域	1,482	0	0	0	0	1,482
総計	61,190	10,837	26,751	12,846	86,704	198,328

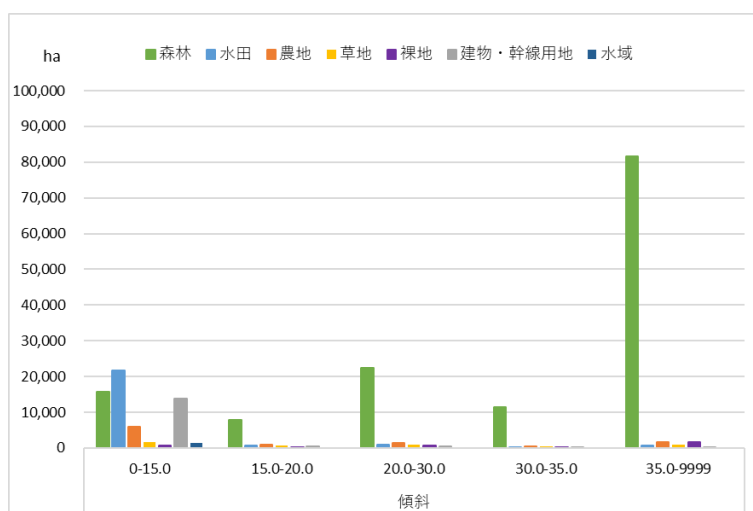


図 V-24 筑後川モデルの土地利用・傾斜区分別面積 (ha)

表 V-27 筑後川モデルの土地利用・傾斜区分別面積割合 (%)

土地利用	傾斜					総計
	0-15.0	15.0-20.0	20.0-30.0	30.0-35.0	35.0以上	
森林	7.96	3.95	11.26	5.79	41.19	70.15
水田	10.94	0.38	0.45	0.06	0.30	12.13
農地	3.00	0.49	0.75	0.24	0.78	5.26
草地	0.86	0.32	0.51	0.18	0.50	2.37
裸地	0.34	0.16	0.32	0.15	0.81	1.77
建物・幹線用地	7.01	0.17	0.21	0.05	0.14	7.58
水域	0.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.75

球磨川モデルについても同様に、土地利用・傾斜区分別の面積（表 V-28、図 V-25）及び面積割合（表 V-29）の集計を行った。球磨川モデルにおいても、傾斜 35°以上の立地に存在する森林面積割合が約 60%と、森林が急峻地に多く分布している傾向がみてとれるほか、森林全体の面積割合も全体の 86%と、森林率が極めて高い流域であることが分かる。

筑後川と同様、草地、裸地は緩傾斜から急傾斜まで広く分布しているが、傾斜 35°以上における面積割合が、他の傾斜区分に比較して高い。

表 V-28 球磨川モデルの土地利用・傾斜区分別面積 (ha)

土地利用	傾斜					総計
	0-15.0	15.0-20.0	20.0-30.0	30.0-35.0	35.0以上	
森林	9,032	2,060	19,172	13,229	99,250	142,744
水田	8,057	177	340	52	295	8,921
農地	3,276	238	427	105	340	4,386
草地	5	0	0	0	0	5
裸地	374	111	589	376	2,333	3,783
建物・幹線用地	4,053	134	211	34	179	4,611
水域	1,191	0	0	0	0	1,191
総計	25,988	2,721	20,738	13,797	102,398	165,641

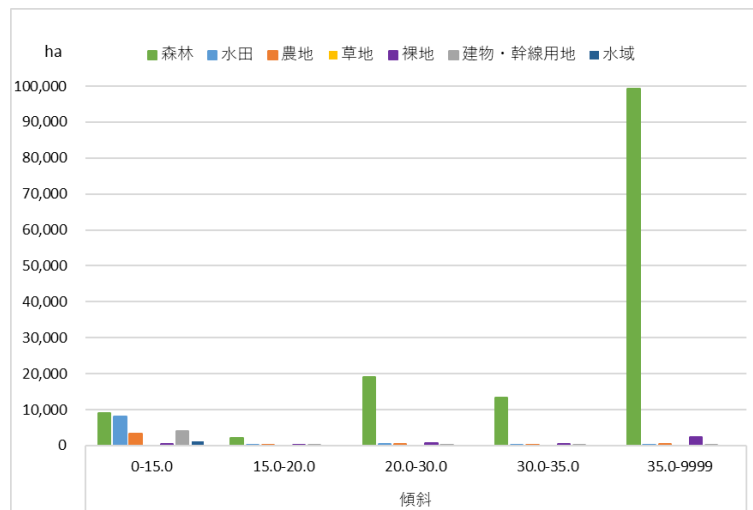


図 V-25 球磨川モデルの土地利用・傾斜区分別面積 (ha)

表 V-29 球磨川モデルの土地利用・傾斜区分別面積割合 (%)

土地利用	傾斜					総計
	0-15.0	15.0-20.0	20.0-30.0	30.0-35.0	35.0以上	
森林	5.453	1.244	11.574	7.987	59.919	86.177
水田	4.864	0.107	0.205	0.031	0.178	5.386
農地	1.978	0.144	0.258	0.063	0.205	2.648
草地	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003
裸地	0.226	0.067	0.355	0.227	1.409	2.284
建物・幹線用地	2.447	0.081	0.127	0.021	0.108	2.784
水域	0.719	0.000	0.000	0.000	0.000	0.719

4.2 流出特性

(1) 河川からの流出総量

図 V-26 は筑後川流域の森林流域直下地点（小淵観測所）と最下流地点（瀬ノ下観測所）における流出総量を示したものである。

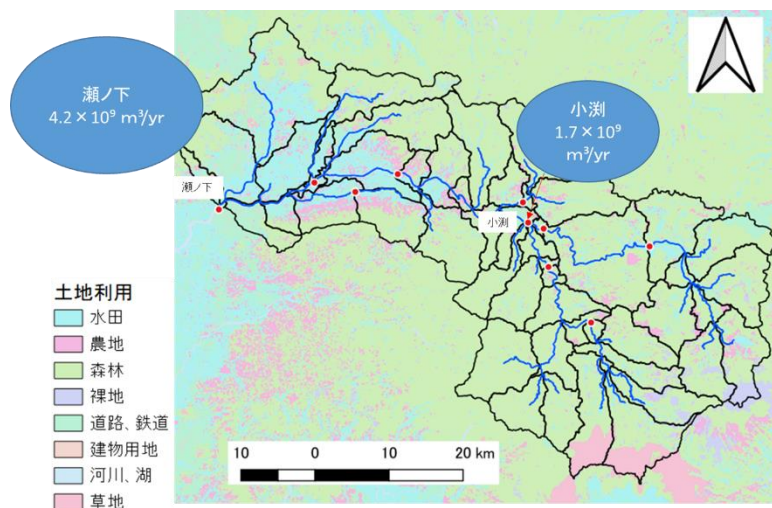


図 V-26 筑後川流域年間流出総量

河川流量は、シミュレーション期間の平均雨量値と最も近い2011年のデータを使用した。小淵観測所の流量は、上流側3つの支川合流後の河川流量である。これらの2地点のデータを用いて、年間総流量を計算したところ、森林流域直下地点が約 1.7×10^9 m³/年、最下流地点が約 4.2×10^9 m³/年であり、森林直下の流量は流域全体の総流量の40%を占めていた。

図 V-27 は球磨川流域の上流側の各流量観測所と最下流地点（横石）における流出総量を示したものである。

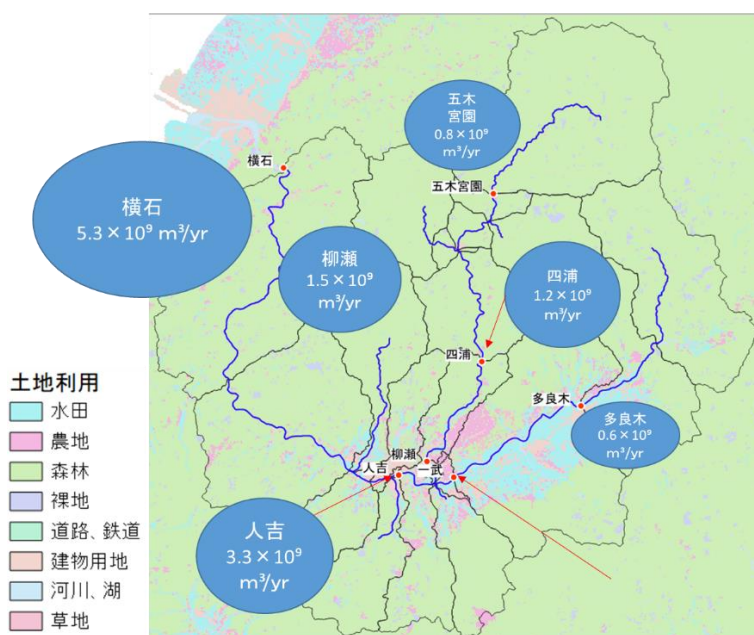


図 V-27 球磨川流域年間流出総量

球磨川流域年間の水流出総量は最下流地点の横石において、 $5.3 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{年}$ と最も多く、球磨川上流部の多良木において、 $0.6 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{年}$ と最も少なかった（図 V-27）。

（２） 流況曲線及び流出率

図 V-28 は、球磨川流域の最下流地点（横石）における 2010 年から 2018 年までの実測流量データを用いて作成した流況曲線である。上記の期間のうち、年降雨量が最も多かった年（2016年）を豊水年、最も少なかった年（2017年）を渇水年として比較したところ、両者の流量は、特に豊水流量と渇水流量で差が大きくなる傾向を示した。

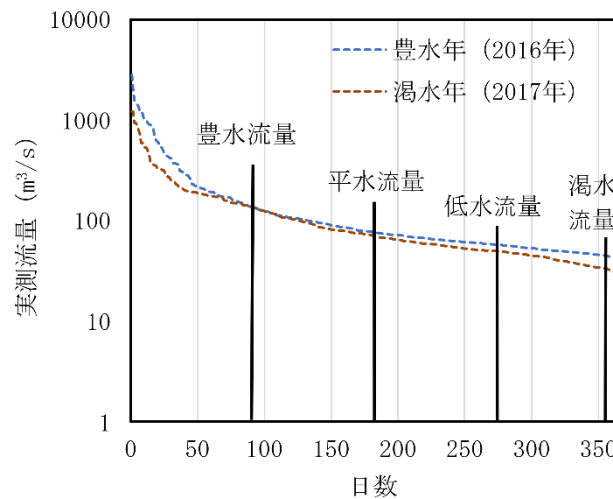


図 V-28 球磨川流域流況曲線（2010～2018 年）

また、年降水量と流量の関係を過年度までに構築した 3 モデル（菊池川、筑後川、矢部川）と含めて比較した（図 V-29）。球磨川流域は、他の流域に比べ年間降水量が突出して多く、流量との関係においては、近似線の傾きから、筑後川や菊池川と同程度の流出率とみられた。

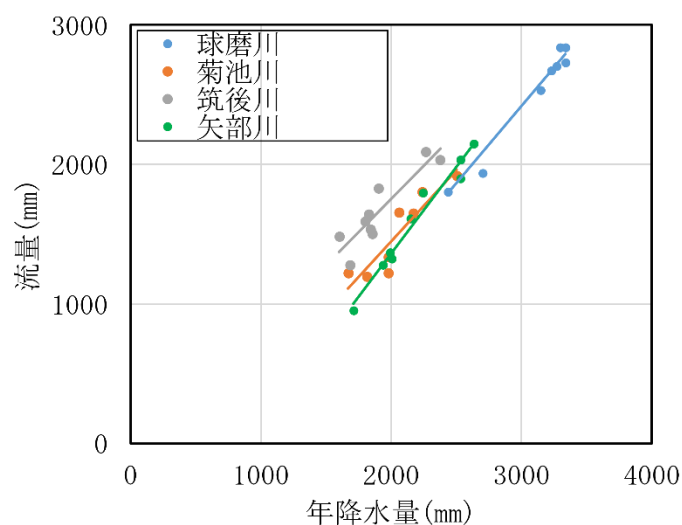


図 V-29 各流域の年降水量と流量の関係（2010～2018 年）

(3) 土地利用の違いと土砂・栄養塩流出量の関係

球磨川流域では、森林域を流れる川辺川と、森林域から農地が集中する地域を通過する球磨川が合流して、八代海へ流れ出ている。このように、森林からの直接の影響が大きい川辺川と農地からの影響が大きい球磨川本流の水・土砂・栄養塩の流出量を比較することで、川辺川支流域及び球磨川上流支流域の土地利用の違いが流出に与える影響を把握し、有効な知見が得られた場合には、後のパラメータ検討を行う上での参考情報として活用したい。

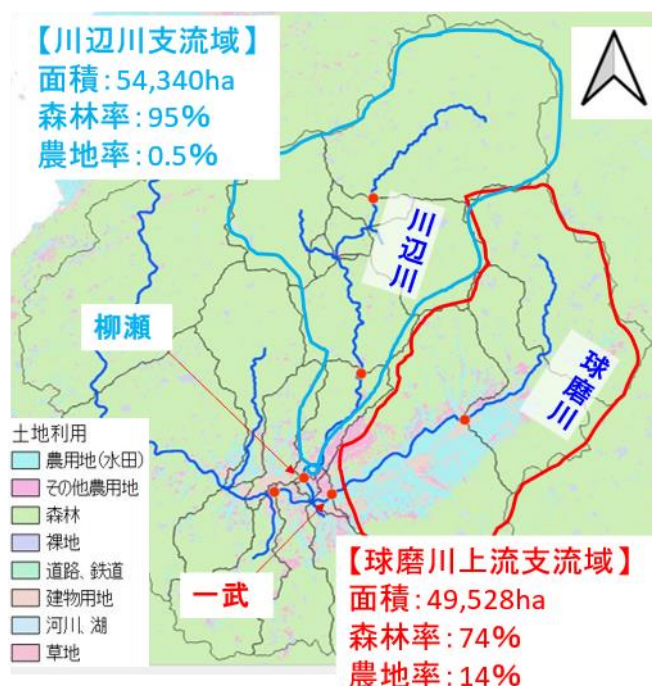


図 V-30 川辺川支流域及び球磨川上流支流域における概要図

図 V-30 に示すとおり、川辺川支流域の面積は 54,340 ha、支流域全体に占める森林の面積割合は 95%、農地の割合は 0.5%であり、そのほとんどを森林が占めている。

球磨川上流部支流域の面積は 49,528ha、支流域全体に占める森林の面積割合は 74%、農地の面積割合は 14%であり、川辺川流域よりも農地の割合が高い。また、図 V-30 の土地利用分布において、球磨川上流支流域の河川周辺には農用地（水田）が集中している。

図 V-31 には、国土交通省が所管する川辺川最下流点の柳瀬観測所と、球磨川が川辺川と合流する地点より上流に位置する一武観測所における、2001年から2010年のhaあたりの河川流量及びSS、全窒素(TN)、全リン(TP)の年間総流出量を示した。それぞれ青色のバーが柳瀬観測所、赤色のバーが一武観測所において観測された結果である。

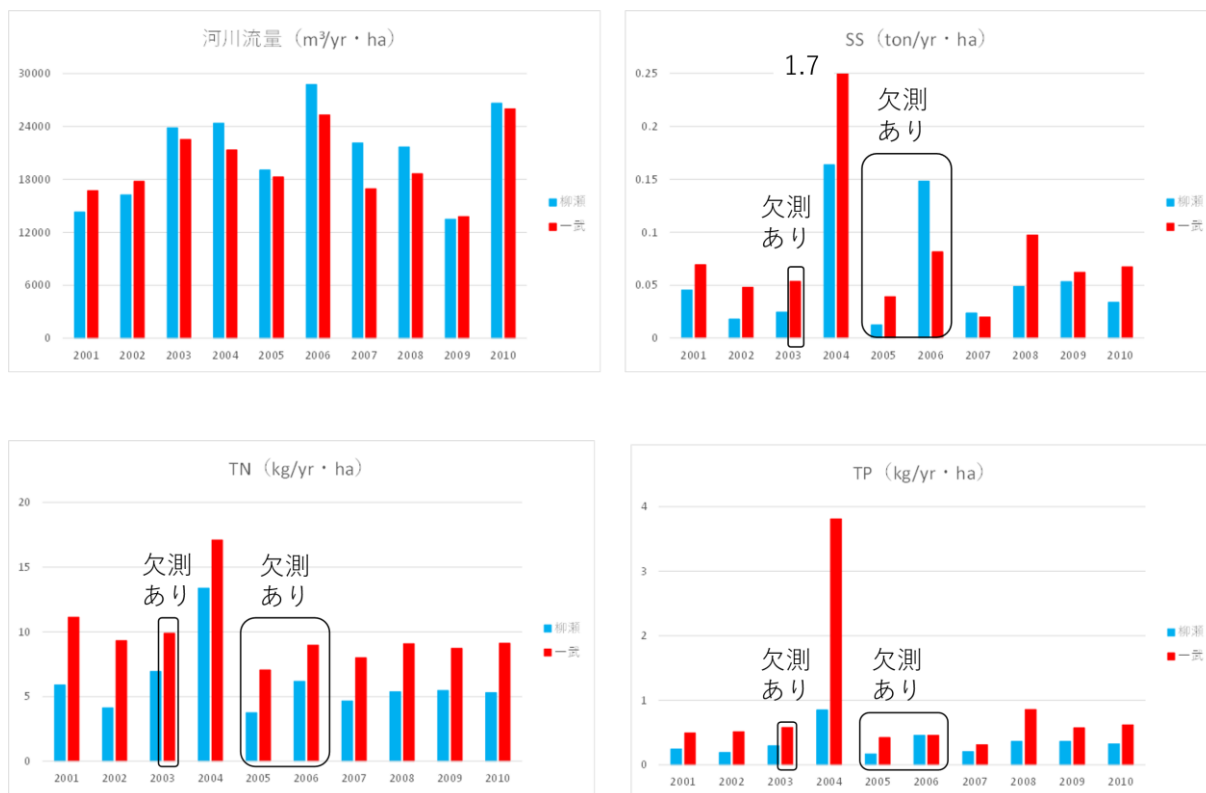


図 V-31 柳瀬及び、一武における河川流量並びに、SS、TN、TP の年間総流出量

河川流量については毎日の観測値があるが、SS、TN、TPについては月に1～2度ほどの観測データしかないため、各月に観測されたデータを年間の総量に換算した。ただし、一武観測所では2003年及び2005年に1点、2006年に2点、柳瀬観測所では2005年に1点、2006年に2点のSS、TN、TPの欠測がみられた。

河川流量は概ねどの年も一武よりも柳瀬で多く、SSは欠測が2点みられた2006年以外、柳瀬よりも一武において多くみられた。窒素とリンの年間流出総量においては、どの年も窒素とリンどちらも柳瀬より一武において多くみられた。そのため、森林域の川辺川よりも農地が集中している球磨川上流部の方が土砂や及び栄養塩が多く流出していることが明らかとなった。

これらの分析結果を踏まえ、モデルのキャリブレーションにおいて、森林が多くを占める支流よりも、農地割合の高い支流からの土砂、栄養塩流出量の方が多くなるようにパラメータの調整を行うこととした。

5. SWATモデル精緻化（筑後川モデルの精緻化）

ここでは、構築した SWAT モデルの推定精度を向上させるための精緻化作業として、以下の2点の作業を行う。

- ・インプット設定・見直しによる改善状況の確認
- ・パラメータ調整（キャリブレーション、バリデーション）

前者は、今年度に行ったインプットを設定し、モデルが有効に呼応しているかどうか確認し、また、課題のあった点については改善したかどうかについて見直しを行い再度、検証作業を行うこととした。

後者は、水・土砂・栄養塩の流出量の推定程度を向上させるための作業である。

5.1 インプット設定・見直しによる改善状況の確認

(1) ダム設定のアウトプットへの影響

ダム設定の有無による河川流量への影響について検証を行った。

球磨川モデルの市房ダムを対象に、2018年6月後半～7月前半の豊水期に、ダムを設定した場合と設定しない場合の2パターンのシミュレーションを行い、河川流量を比較した（図 V-32）。その結果、ダムが設定されている場合には出水期の河川流量が抑制され（赤丸）、その後の無降雨期間に徐々に流出する傾向がみられた（緑丸）。ダムの設定により流出量が平準化される形で調整されることが確認されたため、ダム流出量の実測データの入手が可能であれば、インプット値の調整により、ダムからの流出量を実態に沿ったものにできる可能性がある。

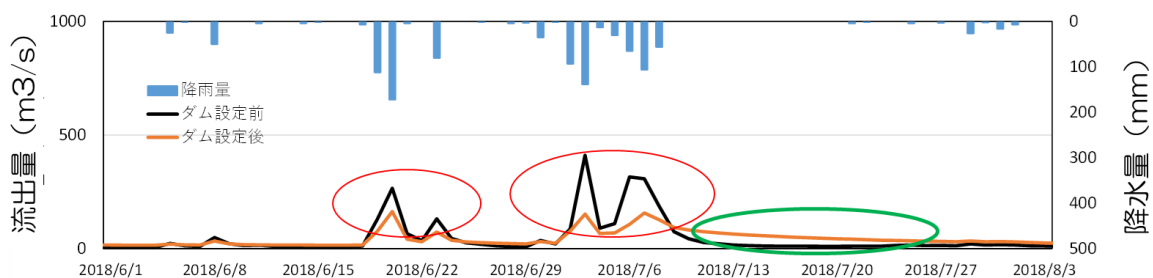


図 V-32 市房ダムにおける夏季の日積算降水量及び、ダム設定前後の河川流量の比較

(2) ポイントソース由来の物質流出量の改善状況（課題④、⑤に対応）

土砂と栄養塩流出量の推定値が過剰となっていた要因として、インプットであるポイントソース（河川に流出する畜産・生活排水・下水道等に由来する点源負荷量）の入力値が高めに設定されていることが考えられた。昨年度、筑後川流域において河川から流出するポイントソース由来の土砂量は 2,037Mg/年であった（図 V-33）が、これは同流出量の推定値が数百 Mg 程度の菊池川モデルと比べると極めて高いことから、精緻化が必要と考えられた。このことから、ポイントソース設定の見直しを行い、その上で、必要に応じて土砂流出に関わるパラメータの調整を行うこととした。

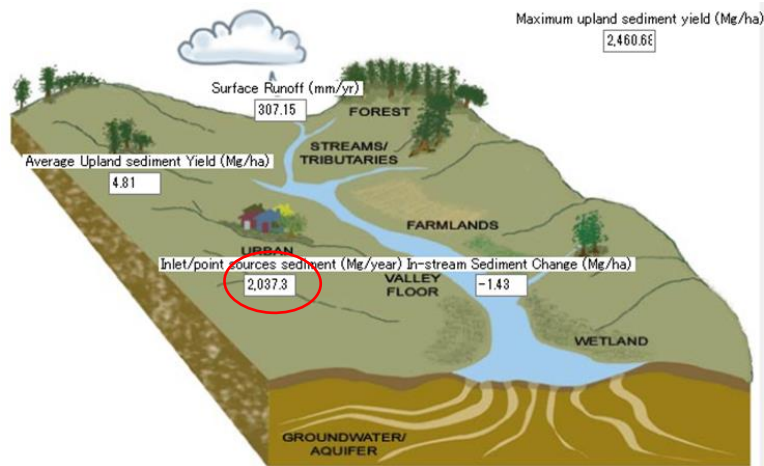


図 V-33：筑後川流域における起源別の推定土砂流出量
(赤丸内はポイントソース由来の土砂流出量)

今年度、ポイントソースの作成方法の見直し等を行った結果、筑後川モデルにおける SS の排出量は図 V-34 のように減少した。

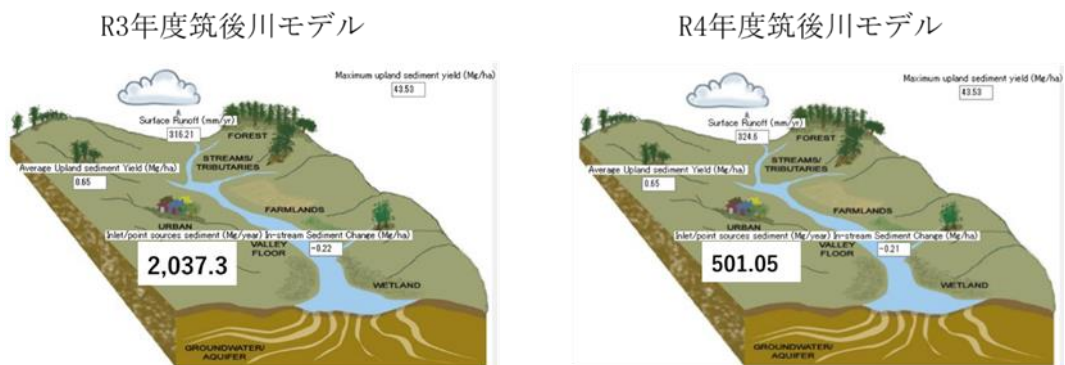


図 V-34 ポイントソース由来 SS 排出量の減少

しかし、図 V-35 に示すとおり、総窒素 (TN)、総リン (TP) については令和 3 年度筑後川モデルと比較して排出量が増加したため、排出源を確認したところ、下水道由来の排出量が増加したことが分かった (図 V-35)。

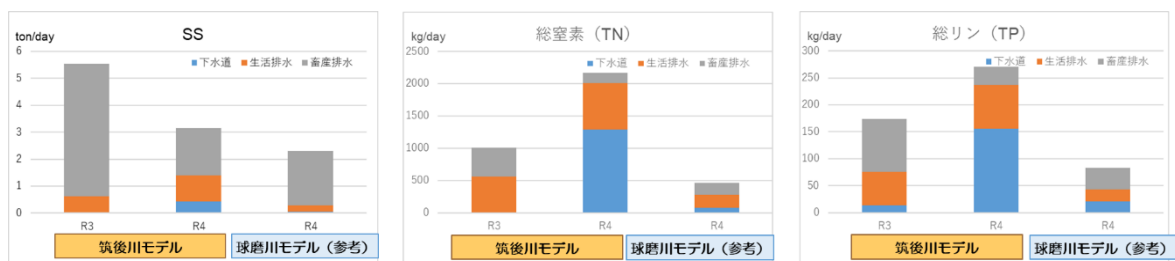


図 V-35 ポイントソース排出源の確認

増加の要因として、令和 3 年度までのモデルでは下水道由来の排出は污水处理場が存在する支流域にのみ設定されていたが (例：令和 3 年度筑後川モデルでは全 54 支流域のうち 2 支流域にのみ設定)、令和 4 年度より環境省統計データから各支流域の下水道人口を求め、

原単位法により人口当たりの排出量を各支流域に与える方法としたことが考えられる。

このことから、令和4年度モデルで下水道由来 TN、TP のポイントソースからのインプット量が過剰になることは許容し、令和4年度筑後川モデルでは、TN は過少推定（インプットが過剰）、TP は過剰推定（インプットが過少）となっていることから、引き続き下水道由来のインプット量の調整を行う。

5.2 パラメータ調整（キャリブレーション・バリデーション）

（1）パラメータ調整方法の検討

ア） 森林直下の流量観測地点におけるキャリブレーション（課題②に対応）

モデル解析・評価全に係る課題の一つに、これまでは、流域全体のマクロな評価を主体としていたことから、森林域に特化した水や物質の流出量の分析・評価が十分に行えていなかったという点が挙げられる。そこで、今後、森林域の評価をより柔軟に行うため、昨年度、モデル精緻化の一環として、森林域直下の流量観測地点をキャリブレーションポイントとして追加し、森林流域からの流出量の推定精度の向上を図った。今年度も引き続き、同様のキャリブレーションにより、推定精度の向上を図るとともに、改善したシミュレーション結果を元に、流域内の森林域の役割・影響について、流域全体と比較・分析して評価を行う。

イ） 水収支及びハイドログラフの改善（課題②、③に対応）

水収支やハイドログラフの精度に係る課題としては、蒸発散量の過大推定（特に傾斜地の農地）、ハイドログラフ逡減期における実測値と推定値の乖離（図 V-36 の赤で囲んだ部分）などが挙げられる。

これらの課題に対しては、蒸発散、地形、表面流出・土壌浸透等のパラメータ調整により改善を図ることとし、具体的なパラメータ調整の方法については、以降の（3）、（4）、（5）で述べる。

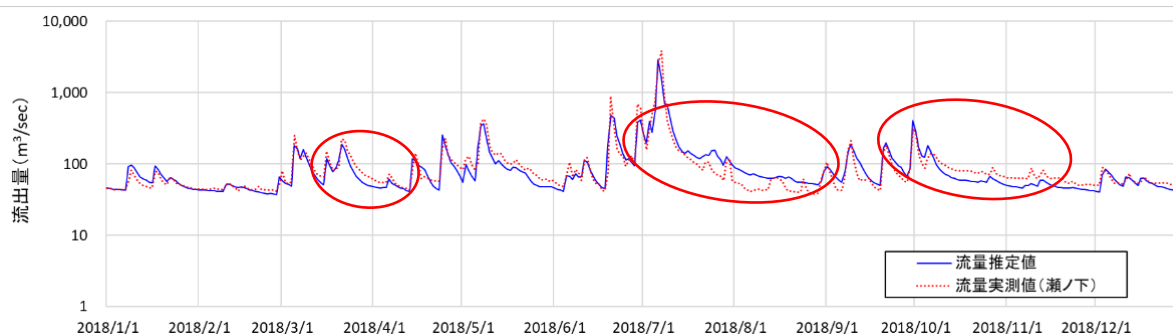


図 V-36：実態とそぐわないハイドログラフ逡減期の波形

ウ） 土砂・栄養塩流出量の適正化（課題④、⑤に対応）

ポイントソースの見直しを行った上で、土砂・栄養塩流出量についてさらなる調整が必要と認められる場合には、必要に応じてパラメータ調整を行う。

（2）推定精度の評価指標

キャリブレーションやバリデーション結果の評価には、RSR、NSE、PBIAS の評価指標を用いることとし、表 V-30 の「Performance Rating」が「Good」以上となることを目指す。

表 V-30 評価指標と評価基準 (Moriyasi et al. (2015)より引用)

Performance Rating	RSR	NSE			PBIAS(%)		
		Streamflow	Sediment	N, P	Streamflow	Sediment	N, P
Very Good		NSE>0.80	NSE>0.80	NSE>0.65	PBIAS<±5	PBIAS<±10	PBIAS<±15
Good	0.50<RSR≤0.60	0.70<NSE≤0.80	0.70<NSE≤0.80	0.50<NSE≤0.65	±5≤PBIAS<±10	±10≤PBIAS<±15	±15≤PBIAS<±20
Satisfactory	0.60≤RSR≤0.70	0.50<NSE≤0.70	0.45<NSE≤0.70	0.35<NSE≤0.50	±10≤PBIAS<±15	±15≤PBIAS<±20	±20≤PBIAS<±30
Unsatisfactory	RSR>0.70	NSE≤0.50	NSE≤0.45	NSE≤0.35	PBIAS≥±15	PBIAS≥±20	PBIAS≥±30

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：流量のばらつきの大きさを示す指標。

PBIAS：評価したデータの偏りを 100 分率で示したものの。

(3) 水パラメータの調整

水収支における各流出量が土地利用ごとに妥当性の高い割合となるよう、また、森林域直下と流域最下流地点の双方において、実測と推定のハイドログラフができるだけ合致するよう、主に傾斜、表面流・浸透に関するパラメータを調整した。

傾斜のパラメータは、HRU_SLP (斜面の平均傾斜勾配) 及び SLSUBBSN (斜面の平均長) の調整を行った。HRU_SLP は平均傾斜が 20°以上の HRU_SLP の勾配をより緩やかになるように、SLSUBBSN (平均斜面長) をより長くなるように設定することで、傾斜地で過剰に流出する傾向にある側方流の流出量を調整した。

表面流・浸透のパラメータとしては、CN2 (カーブナンバー) の調整をした。土地利用の違いが表面流出に与える影響が大きいことから、CN2 の調整は土地利用ごとに設定した。道路や建物が多い都市部や浸透機能が低い裸地は表面流出量が多くなると考えられるため、CN2 を高く設定した。森林地及び農地・傾斜地(果樹園)は土壌への浸透量が多く、表面流出が少なくなることが考えられるため、CN2 を低く設定した。草地及び水田、農地の CN2 の設定においては、表面流量の割合が森林地、農地・傾斜地よりも高く、都市部や裸地よりも低くなるように設定した。

(4) 土砂パラメータの調整

土砂流出の計算において感度の高い河道のパラメータを調整した。河道のパラメータは主に CH_COV1 (河川の浸食)、CH_COV2 (河川の被覆係数)、CH_N2 (河川の粗度係数) の調整を行った。

図 V-37 及び図 V-38 は、それぞれ CH_COV1 を 0.01、CH_COV2 を 0.02、CH_N2 を 0.01 に設定した時の土砂流出量である。図 V-37 の最下流点において概ね実測と一致していることがみてとれるが、図 V-38 の上流地点において平水時に実測値よりも高い傾向を示した。これらは、上流部と下流部において河床に生育する植生の繁茂状態が異なり、河川の土砂流出に違いがあることが影響していると考えた。そのため、上流部と下流部に分けてパラメータの設定をし、下流部はそのままの値を採用し、上流部は土砂流出が少なくなるように設定をした。その結果、図 V-39 のように上流部でも概ね実測と一致した。

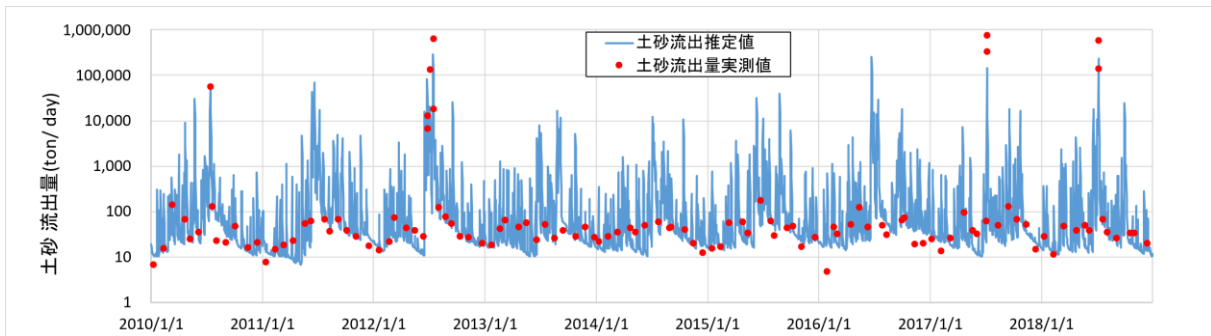


図 V-37 瀬ノ下（最下流点）における実測及び、推定土砂流出量

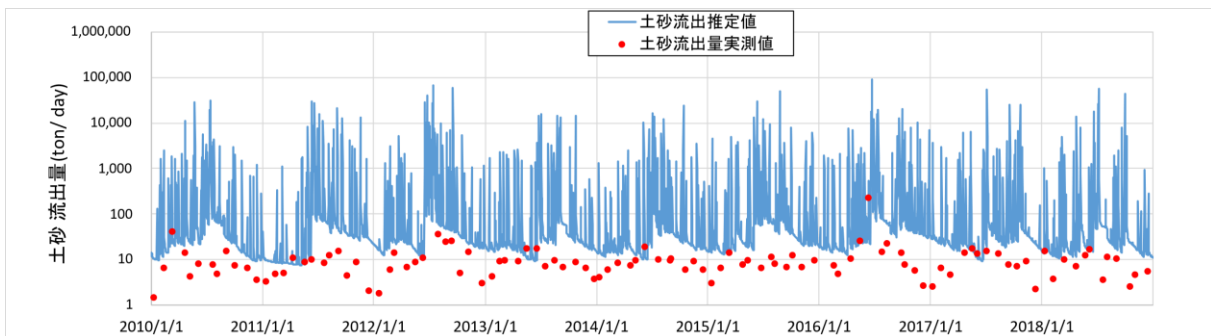


図 V-38 小湊（上流部）におけるキャリブレーション前の実測及び、推定土砂流出量

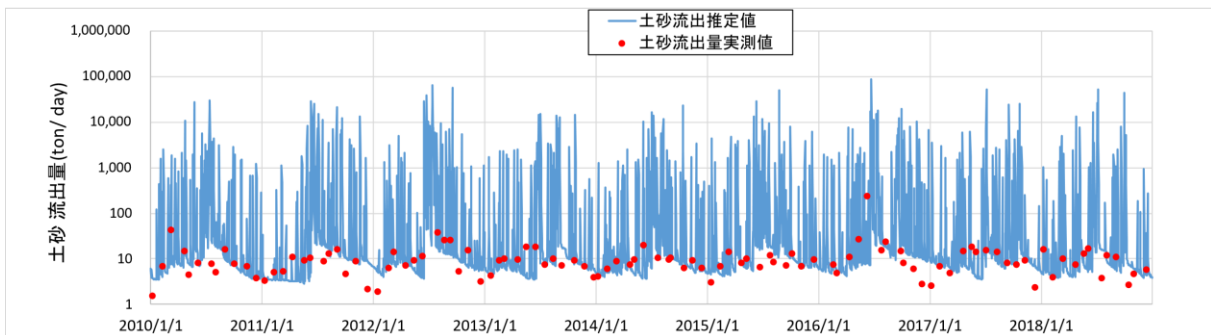


図 V-39 小湊（上流部）におけるキャリブレーション後の実測及び、推定土砂流出量

(5) 栄養塩パラメータの調整

ア) リン

リンのパラメータについては、キャリブレーションの調整を試みたが、直接的に精度の向上には至らなかったことから、引き続き今後において検討を行う必要がある。

イ) 窒素

図 V-40 のとおり、キャリブレーションによる調整前の窒素推定流出量は平水時に実測よりも低い傾向を示していたため、推定流出量を高くなるように調整をした。具体的には窒素流出の計算において感度の高い BIO_INIT (初期バイオマス) と BIOMIX (生物学的混合効率) を高く設定した。その結果、図 V-41 のように推定流出量が調整前よりも多くなり、平水時の流出量が実測値と同程度となった。

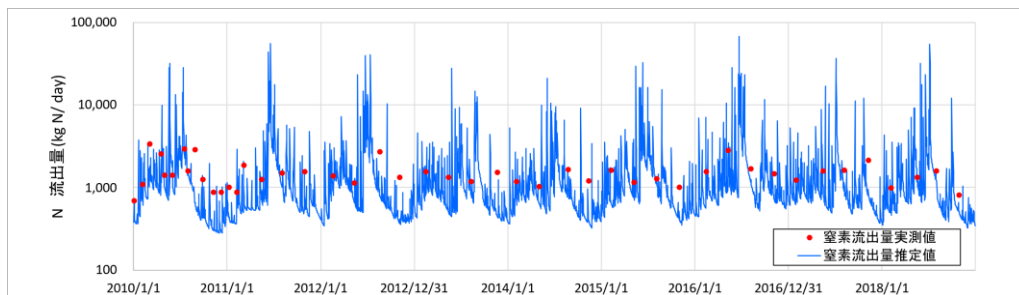


図 V-40 キャリブレーション前の実測及び、推定窒素流出量

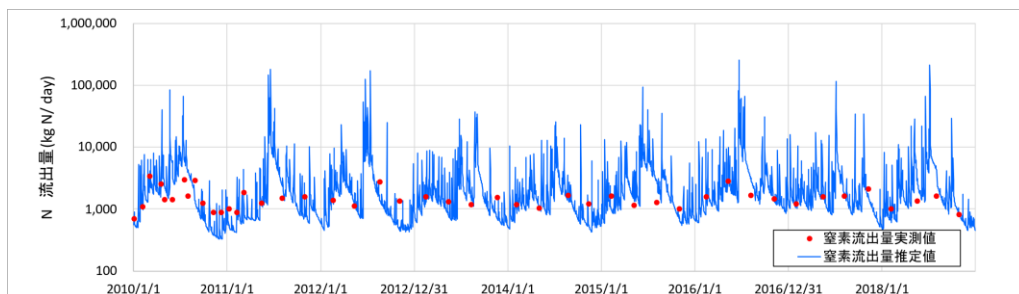


図 V-41 キャリブレーション後の実測及び、推定窒素流出量

6. 結果及び考察

6.1 調整後のパラメータ値の結果

キャリブレーションを行うことにより、調整した筑後川・球磨川モデルのベストパラメータ値を表 V-31 に示す。

表 V-31 筑後川・球磨川モデルにおけるパラメータの結果

パラメータ		筑後 モデル	球磨川 モデル	作業での留意点
名称	区分等			
CN2	農地	65~80	49~79	水収支における表面流の割合及び各土地利用から発生する土砂量について知見の整理を行った。
	水田	70	75	
	森林	15~25	20.225~ 29.325	
	裸地	75	80	
	都市	85	85	
	草地	60	65	
SLSUBBSN	森林	デフォルト 値の 2.24 倍	デフォルト 値の 1.92 倍	全土地利用について、傾斜を緩やかにかつ斜面長を長くすることにより土壌中の流速を抑えるとともに、各傾斜間でパラメータの値が逆転しないように留意した。
	その他の土地利用			
HRU_SLP	森林	デフォルト 値の 0.48 倍	デフォルト 値の 0.642 倍	
	その他の土地利用			
ESCO	森林	0.41	0.80	土壌からの蒸発ファクター。土壌の深い層から低い層への鈴の移動のしやすさを示し、数値が低いとより深い層からも蒸発する。
EPCO	森林	0.92	0.85	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。
LAT_SED	森林	0.233	0.00189	側方流及び地下水流中の土砂濃度。
SOL_K(1,2)	ANDSOL		7.32	土壌の飽和透水系数。筑後川モデルの大半を占める土壌タイプ ANDSOL 及び BROWNFESTSOIL について土壌の保水力が維持されるようにした。なお、最下層（第3層）については岩盤を想定し、第1~2層の値より1オーダー小さな値に設定した。本年度新たに加えた
	ANDOSOL_WET		7.32	
	BROWNFESTSOIL		63.21	
	BROWNFESTSOIL_DRY		63.21	
	BROWNFESTSOIL_WET		63.21	
	IMMATURESOIL		63.21	
	GLEYSOIL		105.25	
	REDYELLOSOIL		304.35	
SOL_K(3)	ANDSOL		0.732	ANDOSOL_WET、BROWNFESTSOIL_DRY、BROWNFESTSOIL_WET は ANDOSOL 及び BROWNFESTSOIL と同様の値を設定したため、今後再検討が必要。
	ANDOSOL_WET		0.73	
	BROWNFESTSOIL		6.321	
	BROWNFESTSOIL_DRY		6.32	
	BROWNFESTSOIL_WET		6.32	
	IMMATURESOIL		6.321	
	GLEYSOIL		10.525	
	REDYELLOSOIL		30.435	

SOL_BD	ANDSOL		0.37~0.43	主に土壌中の水分量に係るパラメータであり、値が大きいほど側方流は少なくなる。流量ピーク後の逓減期の流量の傾きに注目して調節を行った。次項のSOL_AWCより影響の小さいパラメータだが、SWATの推奨値である1.1~1.9より小さな値となったため、今後再検討が必要。
	ANDOSOL_WET		0.37~0.43	
	BROWNFORESTSOIL		0.856~1.096	
	BROWNFORESTSOIL_DRY		0.856~1.096	
	BROWNFORESTSOIL_WET		0.856~1.096	
	IMMATURESOIL		0.960~1.080	
	GLEYSOIL		0.760~0.976	
	REDYELLOSOIL		0.900~1.016	
	SOL_AWC	ANDSOL		
ANDOSOL_WET			0.5	
BROWNFORESTSOIL			0.2	
BROWNFORESTSOIL_DRY			0.2	
BROWNFORESTSOIL_WET			0.2	
IMMATURESOIL			0.04	
GLEYSOIL			0.17	
REDYELLOSOIL			0.13	
CH_N2			0.01、0.02 (支流域別)	0.01
CH_K2		116.345	1	河床における実効透水係数。
LAT_TTIME	森林		1	森林から発生する側方流量の流出時間。他の土地利用とは別に設定。(その他の土地利用の流出時間は、SWATが自動計算した値を使用した。)
REVAPMN			215	深層滞水層への浸透が起こる水深の閾値で、GWQMINとともに地下水涵養量を決定するパラメータ。
GWQMN			300	浅層地下水の水深。主に地下水涵養量を決定するパラメータで、値を大きく設定すると地下水涵養量の容量が増加する。昨年度より、涵養量を増加させられるよう設定した。
GW_DELAY		31	1.7	浅層帯水層に到達地下水の遅延
ALPHA_BF		0.655	1	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。流域北部と南部に分けて設定。
USLE_P	農地傾斜 20°未満	0.4	0.6265	USLE 式の保全係数。各土地利用から計算される土砂に係るパラメータで、土地の手入れ状態を表す値。1に近いほど土砂が流出しやすい。
	農地傾斜 20°以上	0.66	0.69425	
	水田傾斜 20°未満	0.3	0.43565	
	水田傾斜 20°以上	0.6	0.8227	
USLE_C	水域		0	

	森林		0.005	USLE 式の作物係数。各土地利用から計算される土砂に係るパラメータで、土地の手入れ状態を表す値。1に近いほど土砂が流出しやすい。昨年度より土地から発生する土砂量を減少させ、かつ本年度新たに加えた土地利用との整合性を考慮したで変更を行った。
	都市		0.01	
	水田		0.01	
	草地		0.05	
	農地傾斜 20°未満	0.200 (ハウレンソウ)		
	小麦		0.2	
	農地傾斜 20°以上		0.1	
	裸地		1	
CH_COV1		0.001、0.01 (支流域別)	0.02	河川の侵食されやすさ。
CH_COV2		0.002、0.02 (支流域別)	0.04	水路内の植生の状況を表すパラメータで、1～0の間で表現され、0に近いほど侵食力を低下させる。 過剰となっている土砂量を河床に堆積させることで流量堰での観測量を減らす方針で変更を行った。
BIO_INIT	森林	デフォルト 値の 1.60 倍	1000	乾重量バイオマスの初期値
	森林以外		0	
BIOMIX	森林	デフォルト 値の 1.60 倍	0.14	生態混交率
	森林以外		0.2	
ADJ_PKR		1	1.5225	出水時のピーク流量が土砂流出量に与える影響を調整する係数。支流域間の基幹河川(main channel)が対象。
SPEXP		1.18	1.245	沈着した懸濁物質の再浮遊係数（流路内で再浮遊する土砂の最大量の計算変数）。
SPCON		0.0055	0.00851	沈着した懸濁物質の再浮遊指数（流路内で再浮遊する土砂量を計算するための変数）
PRF_BSN		1	0.523333	出水時のピーク流量が土砂流出量に与える影響を調整する係数。支流域内の河川対象。

6.2 ベストパラメータ適用後のシミュレーション結果

(1) 水収支

ベストパラメータ適用後の筑後川モデルによる土地利用別水収支の結果を図 V-42 と表 V-32 に示す。

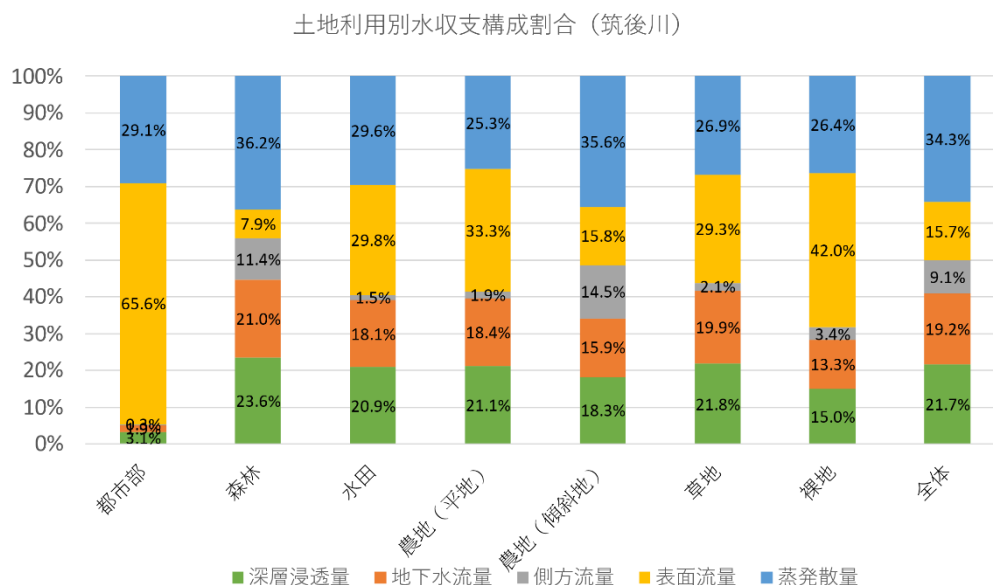


図 V-42 ベストパラメータ適用後の土地利用別水収支の割合（筑後川）

表 V-32 ベストパラメータ適用後の土地利用別流出量（筑後川）

	降水量	蒸発散量	表面流量	側方流量	地下水流量	深層浸透量
都市部	1493	434	979	4	29	47
森林	2106	762	166	240	442	496
水田	1588	470	474	24	288	332
農地(平地)	1986	503	661	37	366	419
農地(傾斜地)	1983	705	314	287	315	362
草地	2444	658	716	51	486	533
裸地	2265	597	951	76	302	339
全体	1997	685	313	182	384	433

水収支は昨年度と同様の傾向となった。森林は他の土地利用と比べ、表面流量は少なく、側方流量、地下水流量及び浸透量が多いと算出した。これは、森林は浸透能が高いことから、他の土地利用よりも土壤に浸透し、川へ流出する水が多いと推定された。一方で、森林は農地傾斜より蒸発散量が多いと推定されたので、昨年度に提起された「傾斜地農地（果樹園）の蒸発散量が森林域よりも多い」との課題を解消した。ただ、都市部の蒸発散割合（29.1%）は、水田及び草地と同じ程度で推定したので、過剰推定と考えられた。流域全体での割合について、蒸発割合が 34.4%の程度で、昨年度の結果（29.9%）と比較すると、やや高い推定となった。

次に、ベストパラメータ適用後の球磨川モデルによる土地利用別水収支の結果を図 V-43 と表 V-32 に示す。

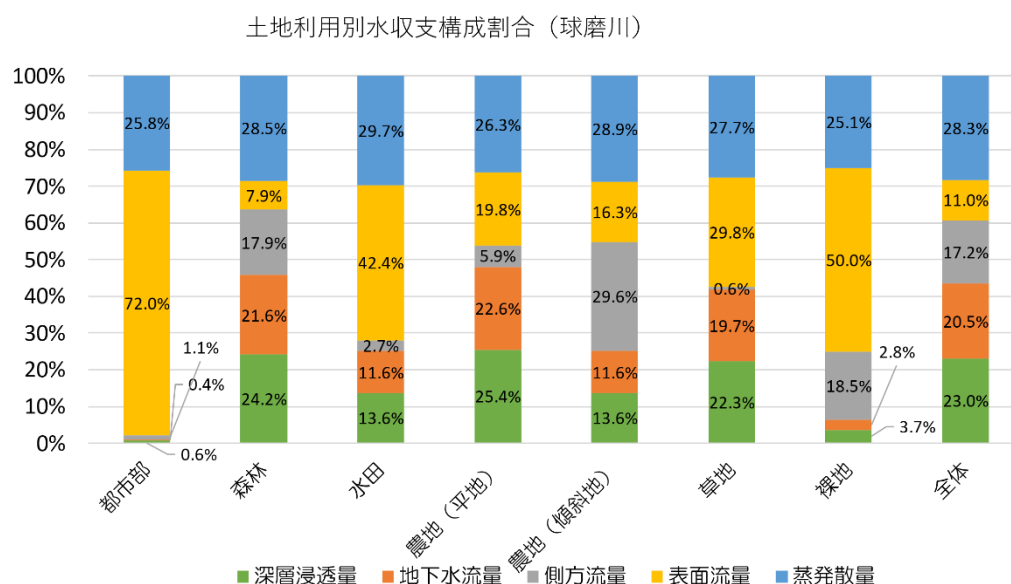


図 V-43 ベストパラメータ適用後の土地利用別水収支の割合（球磨川）

表 V-33 ベストパラメータ適用後の土地利用別流出量（球磨川）

	降水量	蒸発散量	表面流量	側方流量	地下水流量	深層浸透量
都市部	2787	718	2007	32	12	18
森林	2967	845	234	531	640	717
水田	2704	804	1146	72	313	369
農地(平地)	2764	727	547	164	625	701
農地(傾斜地)	2811	812	459	832	326	382
草地	2573	712	766	16	506	573
裸地	3011	756	1504	557	83	111
全体	2957	836	326	510	606	679

筑後川と同様に、他の土地利用と比べ、森林からの蒸発散量、地下水流量及び深層浸透量の割合（それぞれ約 29%、約 46%）は高く、表面流量が少ない結果となった。これは既往の知見と調和的であり、森林をはじめとする流域の水収支が概ね再現できていると考えられる。また、農地（傾斜地）の側方流量の割合が森林よりも大きい値となっている点については再検討の必要がある。流域全体での割合について、筑後川モデルと比べ、表面流量が低かった。球磨川においては森林率が約 85%、筑後川は 65%である。森林の表面流量が低いことから考えると、森林率が高い球磨川モデルにおいて表面流量が少なくなると考えられた。一方で、地下水と深層浸透量の割合について、球磨川モデルは筑後モデルと同程度に推定されており、妥当な推定と考えられた。

(2) 河川流量

ア) 森林直下地点

筑後川モデルの森林直下地点である小湊観測点の河川流量の推定結果を図 V-44 に示す。

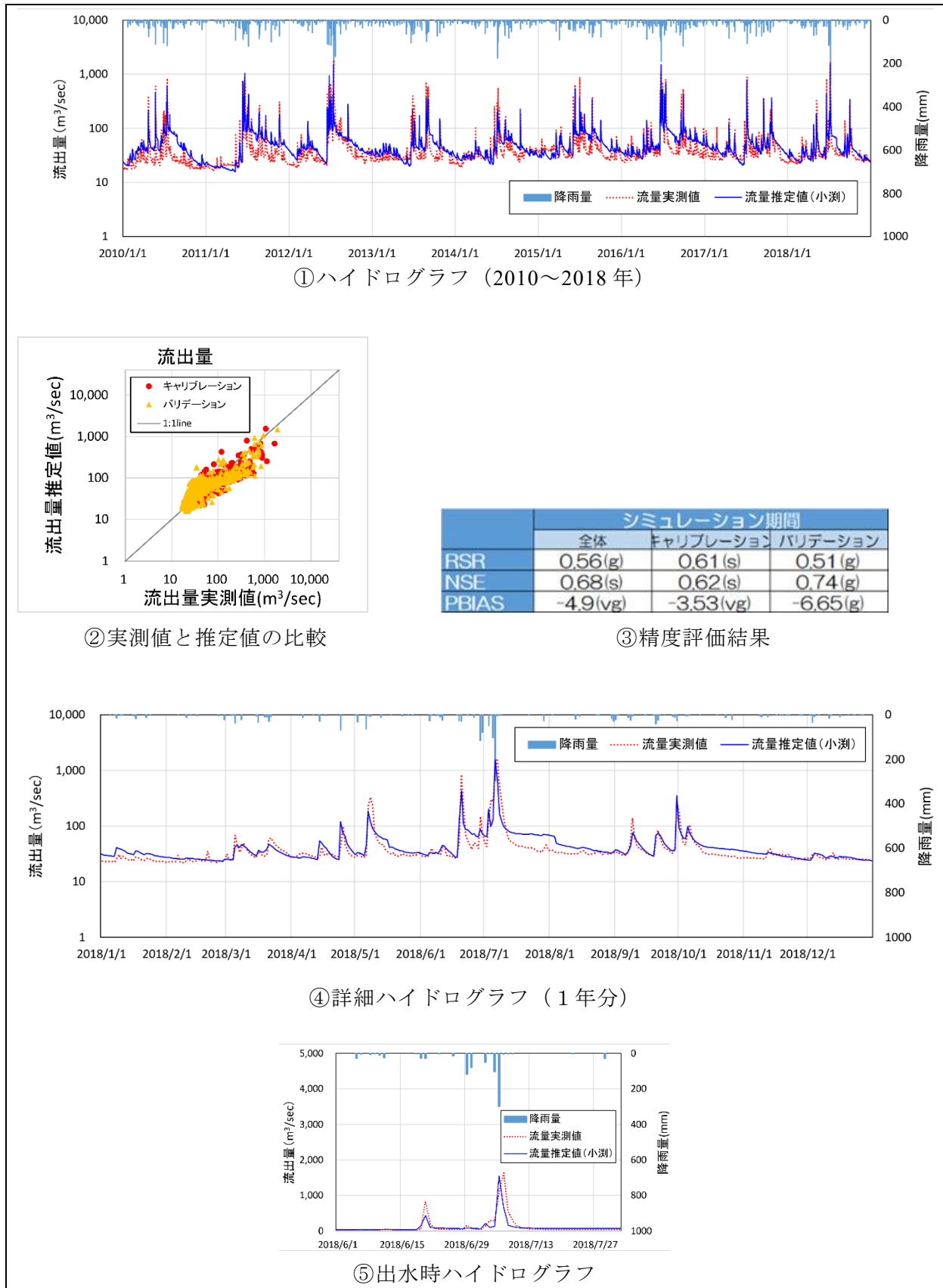
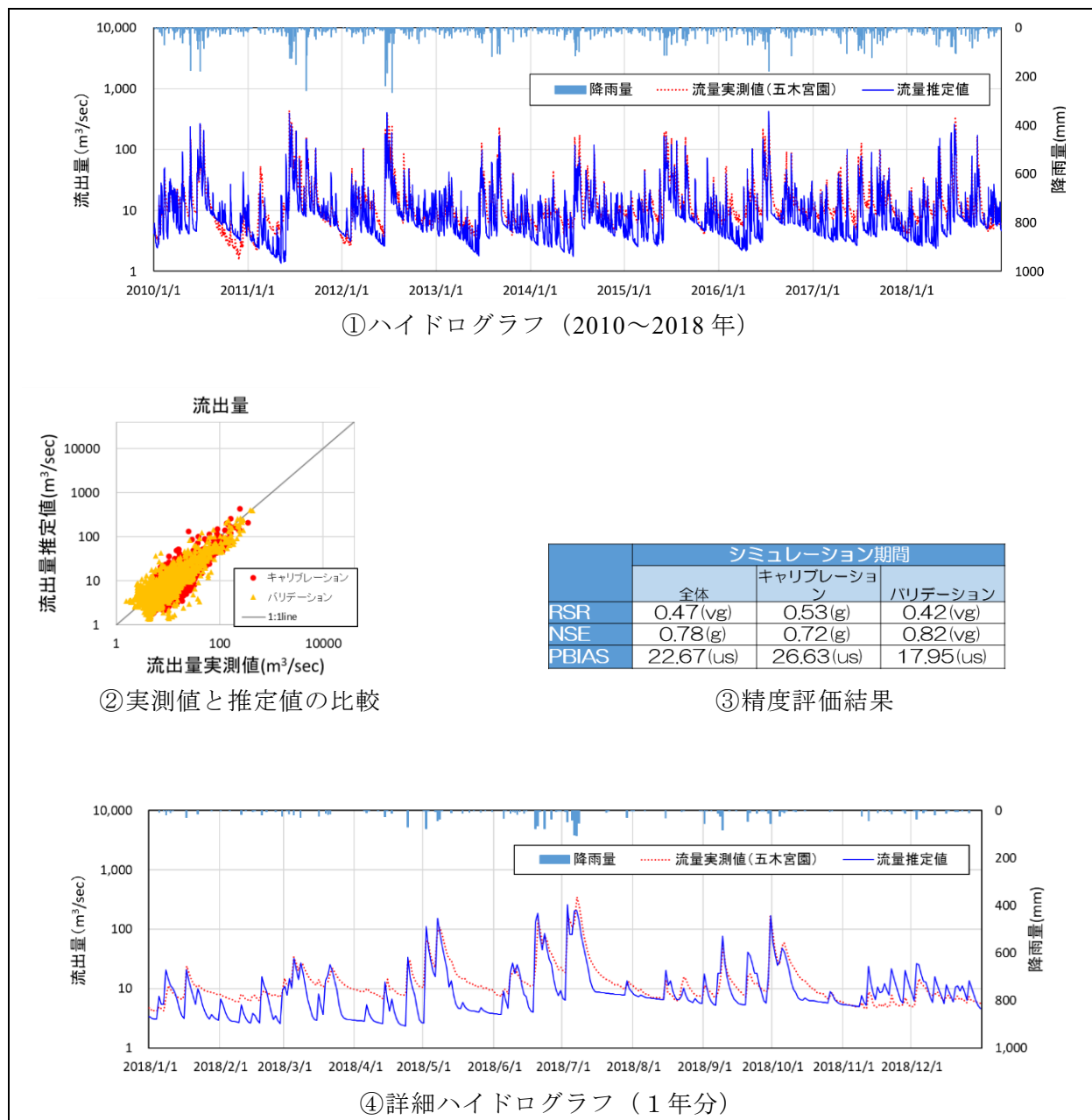


図 V-44 筑後川モデルによる森林直下地点 (小湊) の水流出量

3つの評価指標において、概ね「Good」以上の推定精度が得られた（図 V-44③）。しかしながら、平水期の流量はやや過大推定の傾向があるほか、図 V-44 の④と⑤のヒドログラフからは、ピーク流量の推定値は実測値と近いものの、ピークのタイミングにズレが生じている箇所があることもみとめられた。

次に、球磨川モデルの森林直下地点である五木宮園観測点での河川流量の推定結果を図 V-45 に示す。



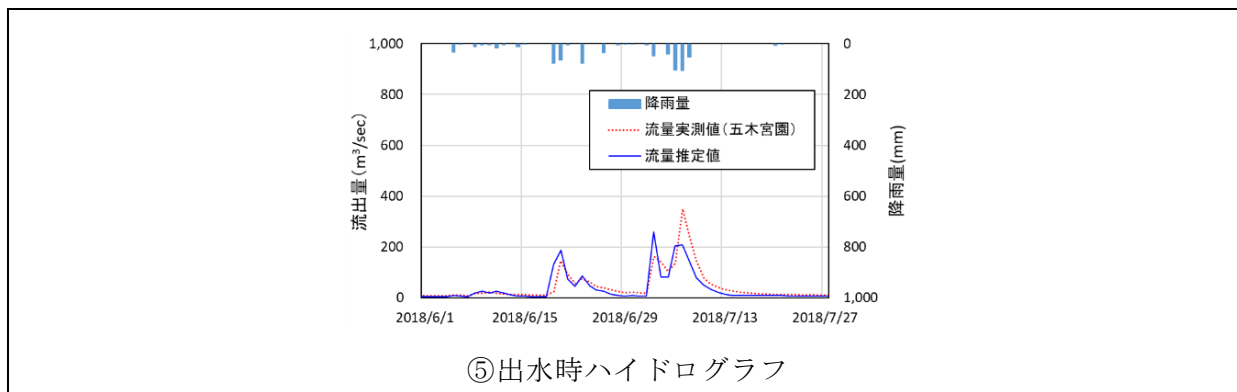
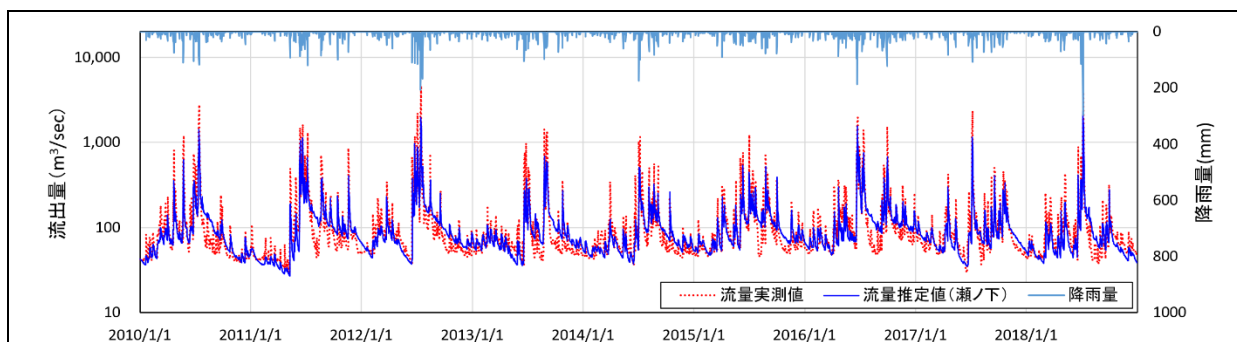


図 V-45 球磨川モデルによる森林直下地点（五木宮園）の水流出量

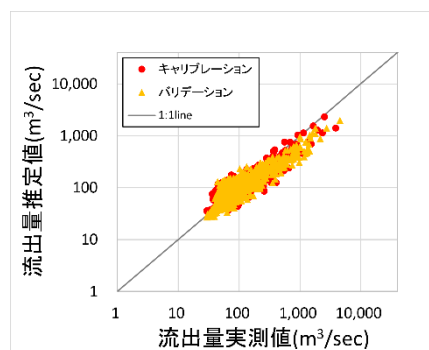
球磨川モデルのパラメータには、基本的には筑後川モデルのベストパラメータを適用し、推定値の微調整のため、球磨川モデル独自のパラメータの調整も行った。その結果、3つの評価指標において、概ね「Good」以上の推定精度が得られた（図 V-45③）。ピーク流量は精度よく推定されたものの、ピーク逡減時と平水時における実測値と推定値の乖離がみられるところもある（図 V-45④、⑤）。

イ) 流域最下流地点

筑後川モデルの流域最下流地点である瀬ノ下観測点における河川流量の推定結果を図 V-46 に示す。



①ハイドログラフ（2010～2018年）



②実測値と推定値の比較

	シミュレーション期間		
	全体	キャリブレーション	バリデーション
RSR	0.53(g)	0.51(g)	0.55(g)
NSE	0.72(g)	0.74(g)	0.7(g)
PBIAS	12.15(s)	9.44(g)	15.17(us)

③精度評価結果

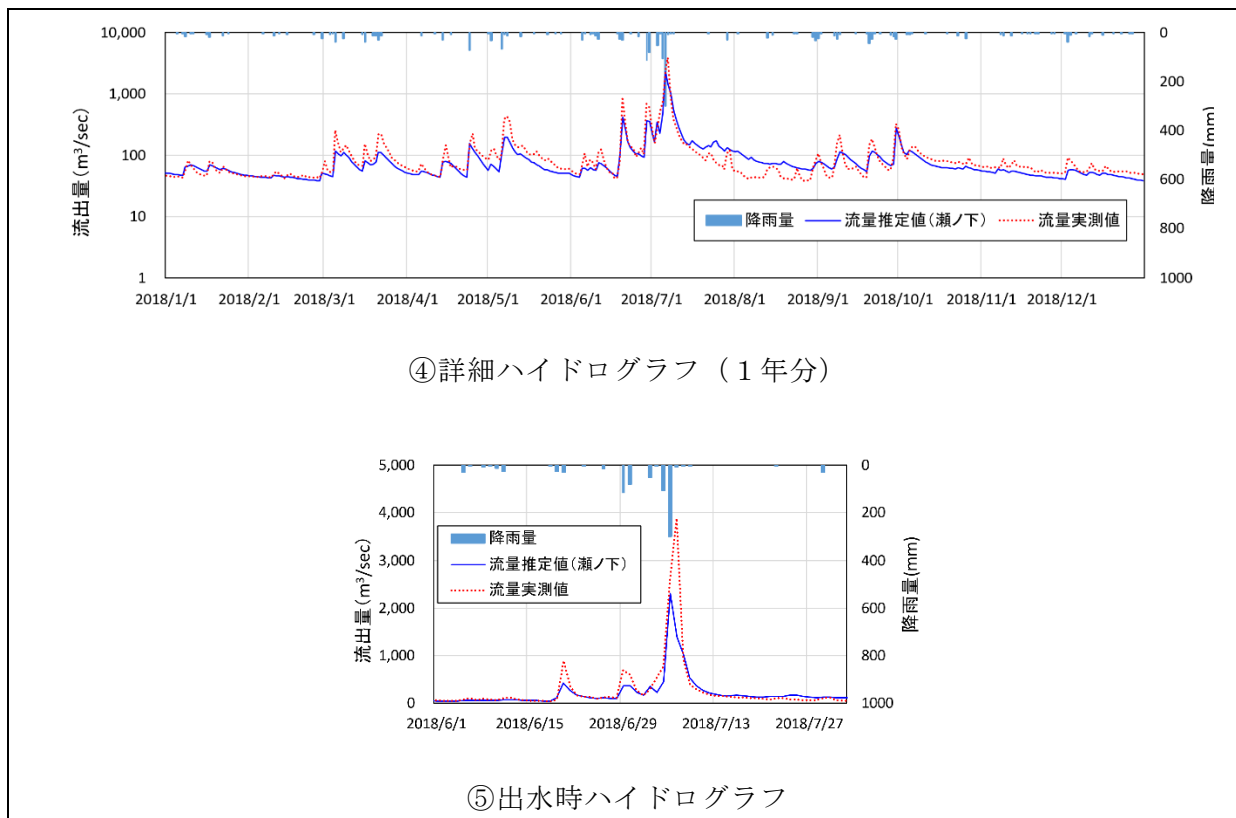
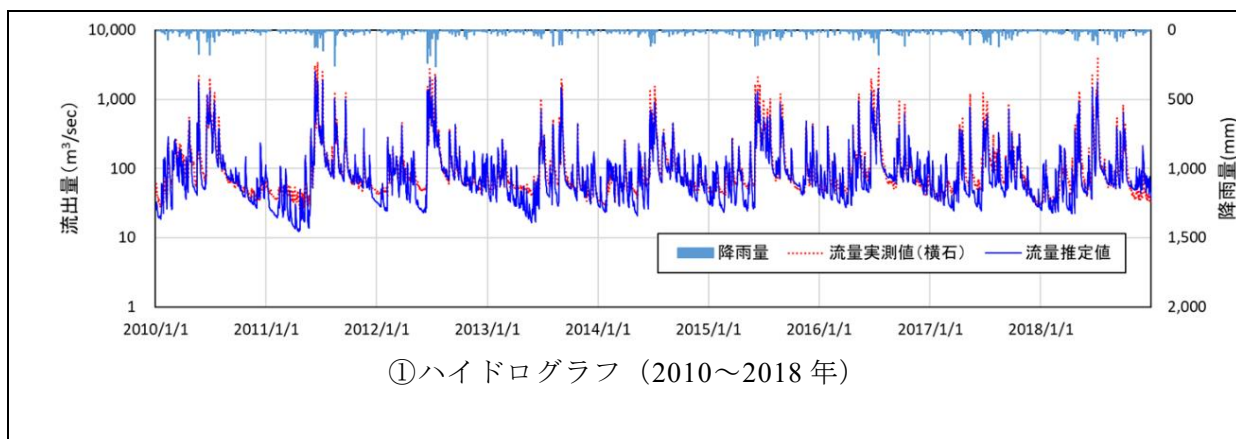


図 V-46 筑後川モデルによる流域最下流点（瀬ノ下）の水流出量

3つの評価指標において、概ね「Good」以上の推定精度が得られた（図 V-46③）。しかし、昨年度と同様に図 V-46④の詳細ハイドログラフからは、ピーク流量や平水時の推定流出量が、実測値よりもやや過少となっているところがみられる。

次に、球磨川モデルの流域最下流地点である横石観測点における河川流量の推定結果を図 V-47 に示す。



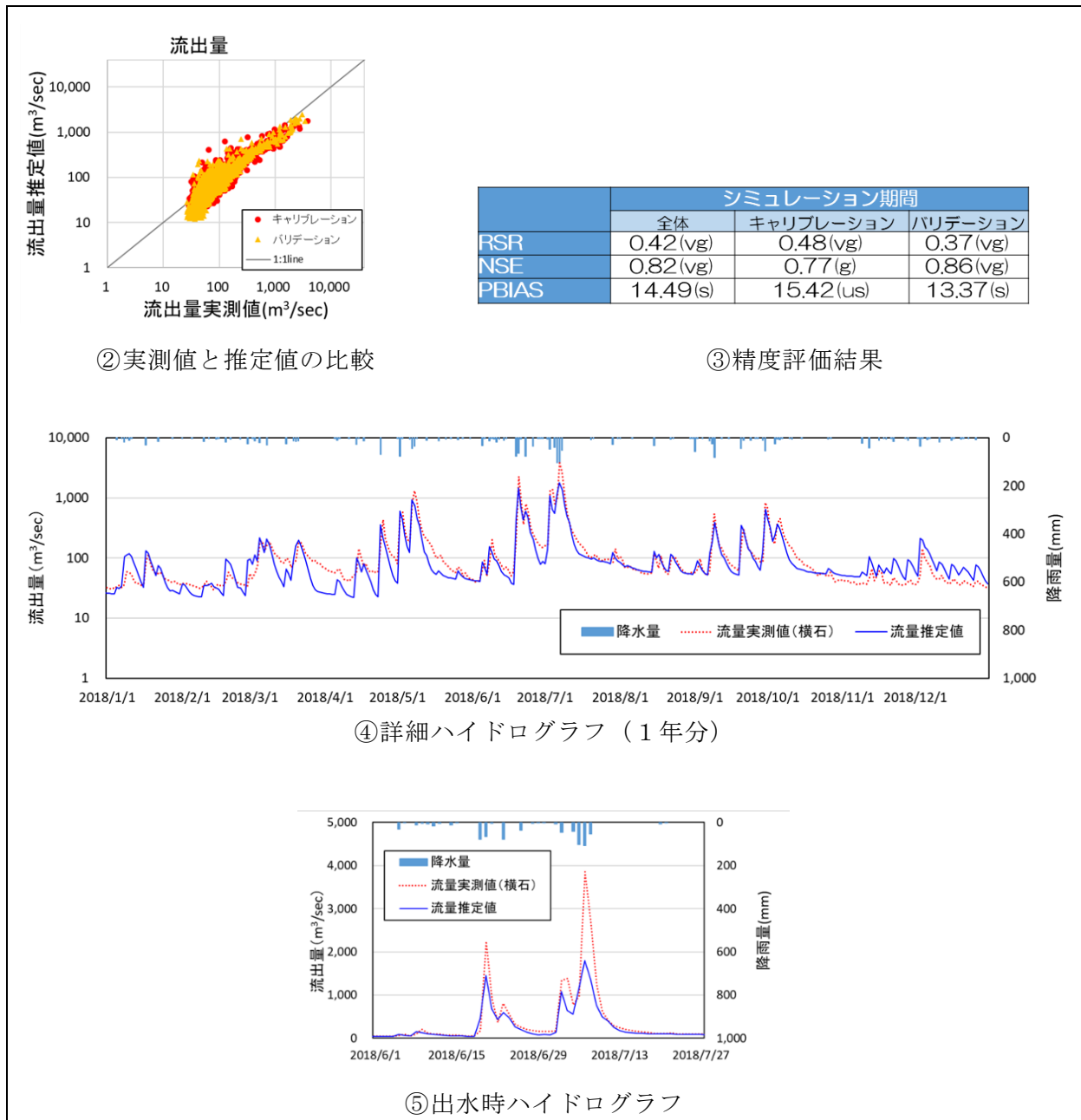


図 V-47 ベストパラメータ適用後の水流出量 (球磨川)

その結果、球磨川流域モデルも評価指標により概ね「Good」以上の精度が得られ、全ての期間においてシミュレーション概ね実測値に近い推定値を得ることができた。筑後川モデルと同様に、ピーク流量が実測値より推定値が過少であった。また、低水時についても同様に実測値に比べ推定値が過小と推定される傾向がみられた。

(3) 土砂・栄養塩流出量

ア) 森林直下地点

ベストパラメータを適用した筑後川モデル森林直下地点による土砂・栄養塩流出量の推定結果は図 V-48 のとおりである。

まず土砂の推定値については、全ての期間において過大となる傾向があり、指標による精

度評価の結果はすべて不十分 (Unsatisfactory) であった。また、ヒドログラフ (図 V-48①) や、1対1の散布図 (図 V-48②) の振幅から、実測値に比べ、推定値のバラつきが大きいことがわかる。

リン、窒素についても同様に、評価指標によるモデル精度の評価結果は不十分 (Unsatisfactory) であったが、窒素の1対1の散布図 (図 V-48⑥) における実測値と推定値の乖離はなく呼応していた。

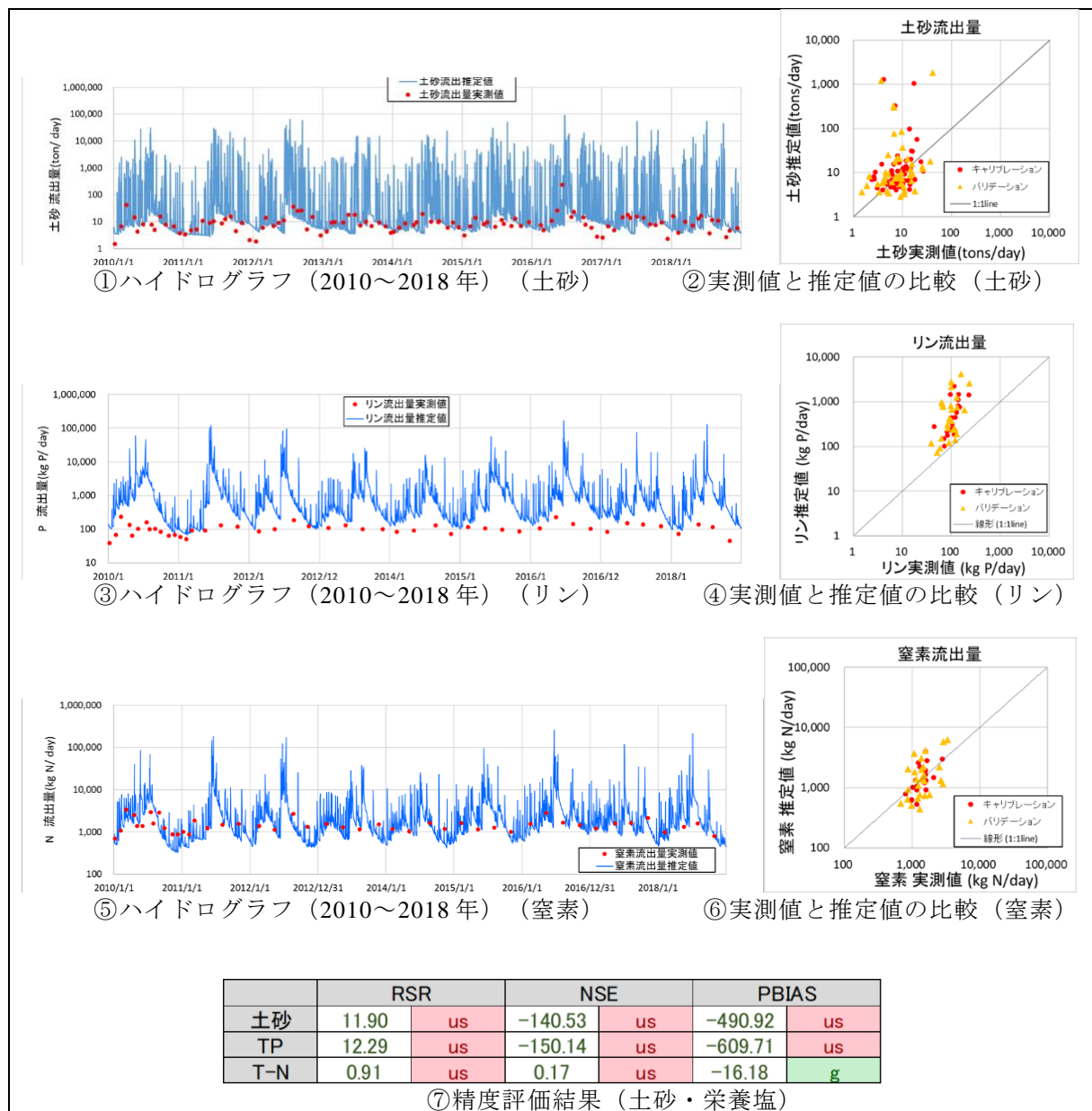


図 V-48 筑後川モデルによる森林直下地点 (小淵) の土砂・栄養塩流出量

ベストパラメータを適用した球磨川モデル森林直下地点による土砂・栄養塩流出量の推定結果は図 V-49 のとおりである。今回の解析用の実測値が非常に少ないため、モデルによる再現した精度の評価及び推定値と実測値の比較ができなかった。このことから、今後においては新たに実測データの収集が必要と考えられる。

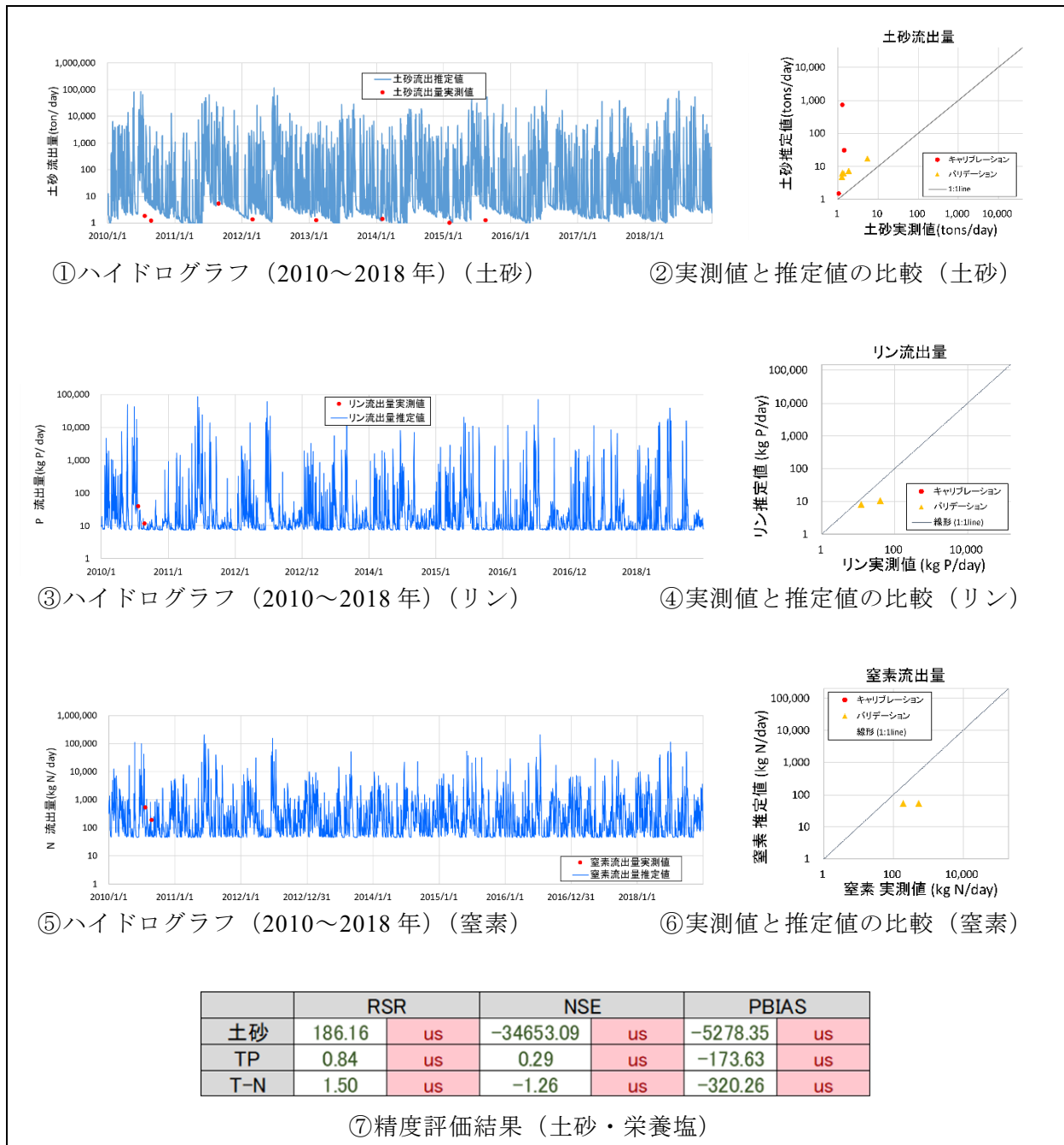
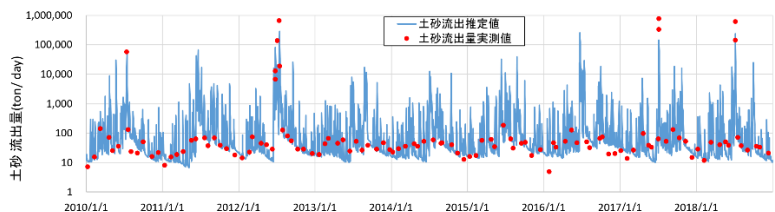


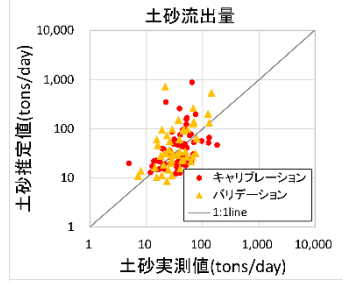
図 V-49 球磨川モデルによる森林直下地点（五木宮園）の土砂・栄養塩流出量

イ) 流域最下流地点

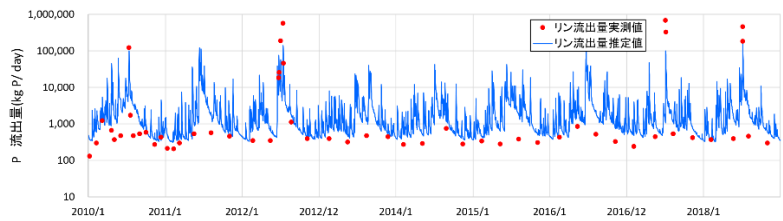
ベストパラメータを適用した筑後川モデル最下流地点による土砂・栄養塩流出量の推定結果は図 V-50 のとおりである。土砂、リン、窒素の流出量についても、不十分な再現精度であった。ハイドログラフを見ると、土砂及びリンのピーク流量は一定の精度で呼応しているが、実測値に比べ、推定値の過大推定傾向があった。1対1の散布図でみると、概ね1対1線の近くにプロットされたため、推定値と実測値では近い状態であった。窒素の流出量について、実測値とくらべ、推定値が過少と推定されることが見られた。一方で、流域全体から土砂推定流出量は 2.1ton/yr・ha となり、昨年度推定量（4.4ton/yr・ha）の約半分の結果となった。



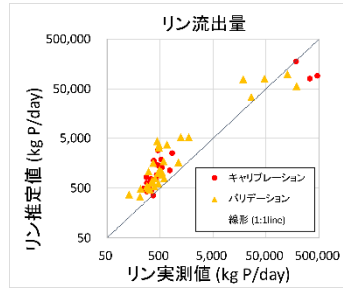
①ハイドログラフ (2010~2018年) (土砂)



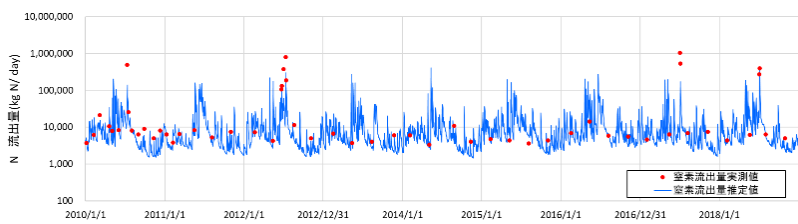
②実測値と推定値の比較 (土砂)



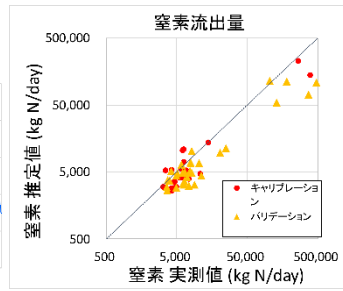
③ハイドログラフ (2010~2018年) (リン)



④実測値と推定値の比較 (リン)



⑤ハイドログラフ (2010~2018年) (窒素)



⑥実測値と推定値の比較 (窒素)

	RSR		NSE		PBIAS	
土砂	0.78	us	0.39	us	58.70	us
TP	0.82	us	0.33	us	62.46	us
T-N	0.83	us	0.31	us	67.36	us

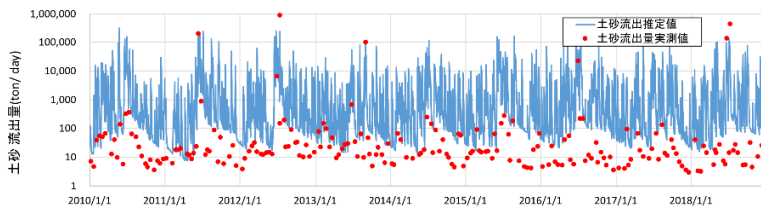
⑦精度評価結果 (土砂・栄養塩)

土地利用	面積 (km ²)	水流出量 (mm/year)	土砂流出量 (ton/year・ha)	P流出量 (kg/year・ha)	N流出量 (kg/year・ha)
都市部	180.3	1011.0	0.6	8.4	50.5
森林	1603.9	847.4	0.2	2.2	4.9
水田	280.3	785.5	0.3	4.6	6.9
農地 (平地)	76.9	1063.5	5.1	26.3	32.5
農地 (傾斜地)	38.9	915.9	1.4	10.2	18.7
草地	50.4	1252.9	2.6	25.8	38.0
裸地	37.6	1329.3	99.4	40.3	69.9
全体	2268.2	878.2	2.1	5.1	11.8

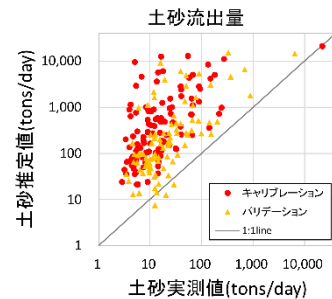
⑧推定流出量 (土砂、リン (P)、窒素 (N))

図 V-50 筑後川モデルによる流域最下流点 (瀬ノ下) の土砂・栄養塩流出量

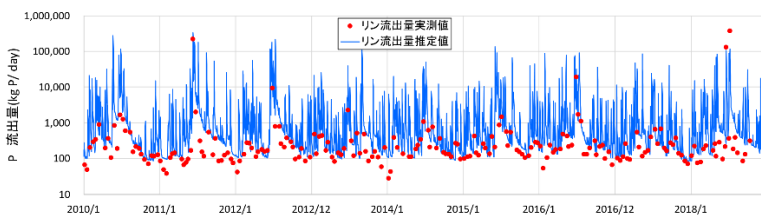
ベストパラメータを適用した球磨川モデル最下流地点による土砂・栄養塩流出量の推定結果は図 V-51 のとおりである。土砂、リン及び窒素の評価の精度については、全体的に不十分な結果となり適当な推定ができたと言えない状態であった。また、推定値と実測値を比較すると、土砂及びリンは過大推定、窒素は過少に推定された傾向があった。一方、各土地利用別の流出量を見ると、裸地の土砂、リン及び窒素の流出量が最も高いことが示された。



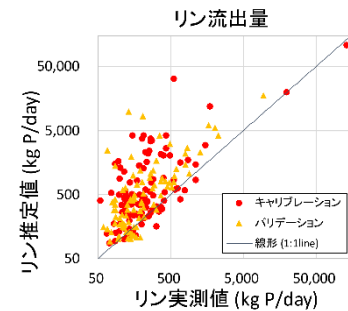
①ハイドログラフ (2010～2018年) (土砂)



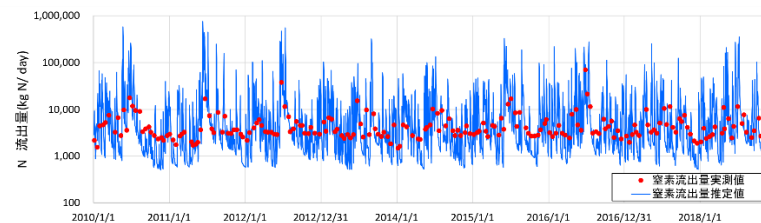
②実測値と推定値の比較 (土砂)



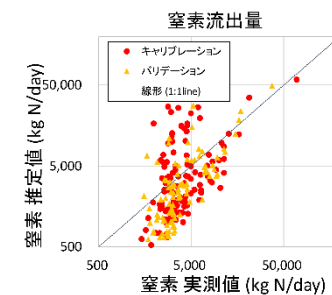
③ハイドログラフ (2010～2018年) (リン)



④実測値と推定値の比較 (リン)



⑤ハイドログラフ (2010～2018年) (窒素)



⑥実測値と推定値の比較 (窒素)

	RSR		NSE		PBIAS	
土砂	0.73	us	0.46	s	14.49	us
TP	0.79	us	0.37	s	46.29	us
T-N	1.01	us	-0.02	us	100.00	us

⑦精度評価結果 (土砂・栄養塩)

土地利用	面積 (km ²)	水流出量 (mm/year)	土砂流出量 (ton/year・ha)	P流出量 (kg/year・ha)	N流出量 (kg/year・ha)
都市部	52.6	2051.3	2.0	15.1	127.9
森林	1593.7	1405.7	0.5	4.4	17.6
草地	0.1	1288.9	3.0	16.4	37.9
裸地	41.3	2144.8	636.9	36.4	87.6
農地（平地）	41.0	1335.6	0.4	8.0	32.4
農地（傾斜地）	9.5	1616.2	4.8	20.7	54.6
全体	1842.5	1447.3	15.0	6.7	24.0

⑧推定流出量（土砂・栄養塩）

図 V-51 球磨川モデルによる流域最下流点（横石）の土砂・栄養塩流出量

6.3 水・土砂・栄養塩流出量の定量的な把握

（1）流域全体に占める森林の寄与率

表 V-34 は、筑後川モデルによって推計された、河川流出に寄与する斜面からの水、土砂、リン、窒素の単位面積あたり・土地利用別の年間流出量（2010年から2018年の平均）を集計したものである。

森林は、他の土地利用と比べ、単位面積あたりの土砂、リン、窒素の流出量を低く抑えており、上流域に多く占める森林が下流域への土砂・栄養塩の流出を抑制していることを定量的に捉えることができた。

表 V-34 水、土砂、リン、窒素の単位面積あたり・土地利用別の年間流出量
(河川流出に寄与する斜面からの推定流出量より集計)

	面積 (km ²)	水流出量 (mm/year)	土砂流出量 (ton/ha/year)	N流出量 (ton/ha/year)	P流出量 (ton/ha/year)
都市部	180.3	1,011.0	0.6	50.5	8.4
森林	1,603.8	847.5	0.2	4.9	2.2
水田	280.3	785.5	0.3	6.9	4.6
農地（平地）	76.9	1,064.0	5.1	32.6	26.3
農地（傾斜地）	38.9	915.9	1.4	18.7	10.2
草地	50.4	1,252.9	2.6	38.0	25.8
裸地	37.6	1,329.3	99.4	69.9	40.3
水域	17.1	-	-	-	-
全体	2,285.22	775.4	2.1	10.8	4.5

表 V-35 は、筑後川モデルによって推計された、流域全体の各種の流出量に占める森林由来の流出総量の割合を示している。こちらも上記と同様、河川流出に寄与する斜面からの年間流出量（2010年から2018年の平均）について集計を行ったものである。

流域全体に占める森林からの水流出量が77%と、流域からの水供給に高い寄与度を示している一方、土砂流出量は6%と低く、単位面積あたりの土砂流出量と同様（表 V-34）に、上流域に多く占める森林が下流域への土砂・栄養塩の流出を抑制していることを定量的に捉えることができた。

表 V-35 筑後川流域全体の流出総量に占める森林由来の各種の流出量の割合
(河川流出に寄与する斜面からの推定流出量より集計)

	面積 (km ²)	水流出量 (10 ⁶ m ³ /year)	土砂流出量 (ton/year)	P 流出量 (kg/year)	N 流出量 (kg/year)
森林	1,603	1,359	26,660	349,633	789,063
全体	2,285	1,759	469,839	1,024,336	2,476,403
寄与率	71%	77%	6%	34%	32%

表 V-36 は、筑後川モデルによって推計された、流域全体の各種の流出量に占める森林由来の流出総量の割合を示している。表 V-35 が河川の流出に寄与する斜面から各種の流出量を集計したものであったのに対し、表 V-36 は年間の河川各種の流出量について集計を行ったものである。森林からの各種の流出量の集計には、森林直下の小沢地点の推計結果と、流域全体の流出量の集計には、最下流地点である瀬ノ下の推計結果（実測値、推定値ともに2011年の河川流出量）を用いた。

表 V-36 筑後川流域全体の流出総量に占める森林由来の各種の流出量の割合
(河川推定流出量より集計)

	面積 (km ²)	水流出量 (10 ⁶ m ³ /year)		土砂流出量 (ton/year)		P 流出量 (kg/year)		N 流出量 (kg/year)	
		実測	推定	実測	推定	実測	推定	実測	推定
森林直下 (小沢)	1,603	1,718	1,902	未算出	262,408	未算出	895,366	未算出	1,503,687
流域全体 (瀬ノ下)	2,285	4,185	3,601		327,510		1,426,365		3,431,735
寄与率	71%	41%	53%		80%		63%		44%

河川流出に寄与する斜面からの水流出量（森林の寄与率 77%）と比較し、モデルにより推定した流出量の寄与率は 53%と低下した。さらに、モデルにより推定した河川に流出した土砂流出量（森林の寄与率 6%）は 80%と高くなった。これは、小沢地点より上流側は、森林が分布している割合が高いものの、部分的に分布している草地や裸地から流出した土砂が河川に流入したため、純粋に森林のみが抽出されている斜面からの流出量とは異なる結果になったものと考えられる。

(2) 流出量の空間分布

筑後川モデル、球磨川モデルの水収支等の結果を分布図で示す。各モデルのベストパラメータを適用したシミュレーション期間（2010～2018年）の平均値で表示している。

① 降水量

図 V-52 に降水量の分布を示す。降水量は、各支流の最寄りの観測地点における観測地を用いており、以降に示す推定結果の元となるデータであるため、水収支と比較する参考地として示す。

降水量は、球磨川モデルが筑後川モデルと比較して多く、2流域ともに南部に降水量の多

い流域が分布し、球磨川モデルでは東部にも降水量の多い流域が認められる。

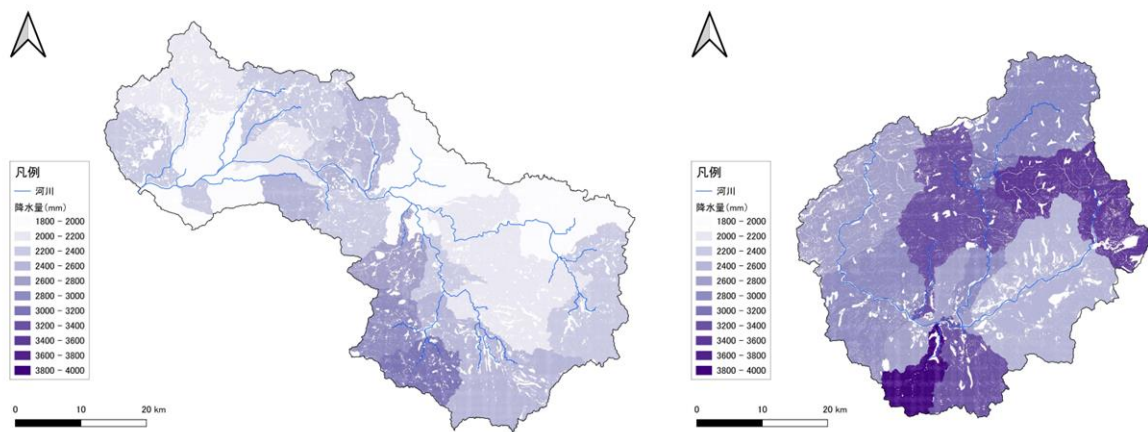


図 V-52 降水量の分布

② 蒸発散量

図 V-53 に蒸発散量の分布を示す。

球磨川と筑後川の2流域ともに、森林域の蒸発散量はその他の土地利用よりも多くなっており、筑後川モデルでは、森林域の流域の中でも蒸発散量の多寡がみられるが、球磨川モデルでは一様な分布となっている。

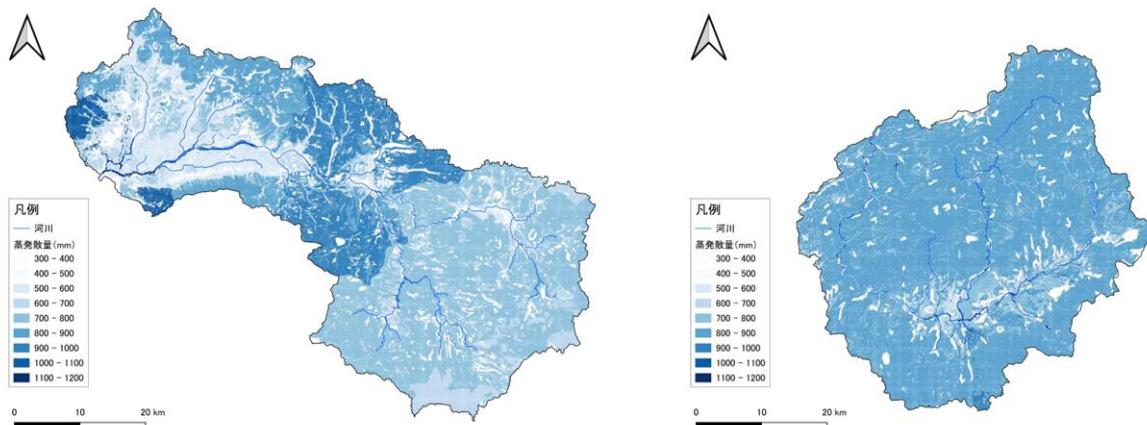


図 V-53 蒸発散量の分布

③ 表面流量

図 V-54 に表面流量の分布を示す。

球磨川と筑後川の2流域ともに森林域からの流出量は少なく、建物・道路等の幹線用地や裸地、水田からの流出量が多い。

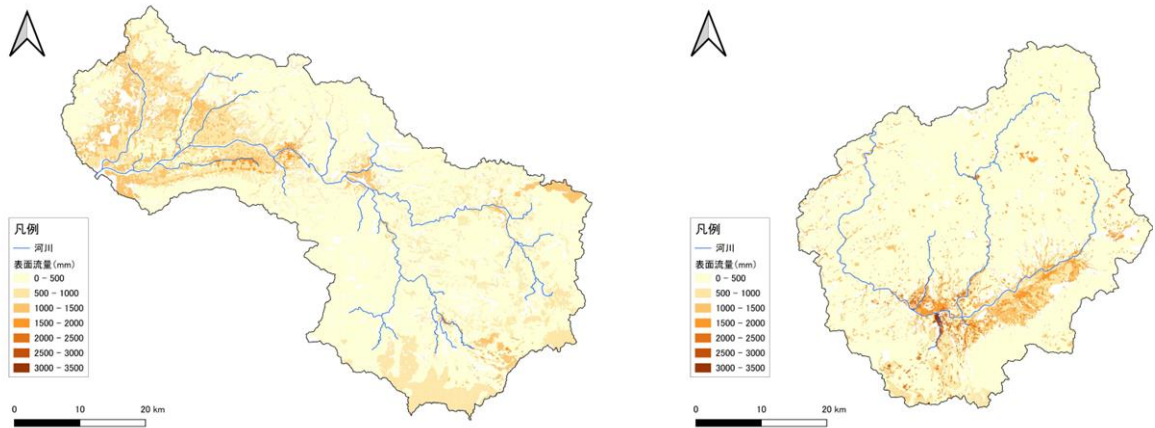


図 V-54 表面流量の分布

④ 表面流量

図 V-55 に、側方流量の分布を示す。

球磨川と筑後川の 2 流域ともに、急傾斜地における流出量が多くなっている。また、降水量の多い地域で側方流量が多い。

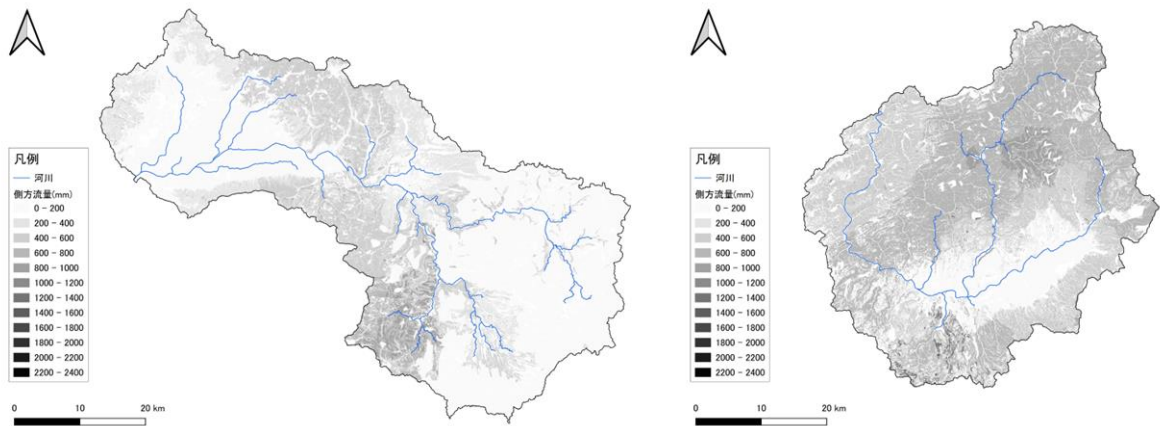


図 V-55 側方流量の分布

⑤ 地下水流量

図 V-56 に地下水流量の分布を示す。

側方流量と同様に、球磨川と筑後川の 2 流域ともに降水量の多い地域で流量が多くなっている。

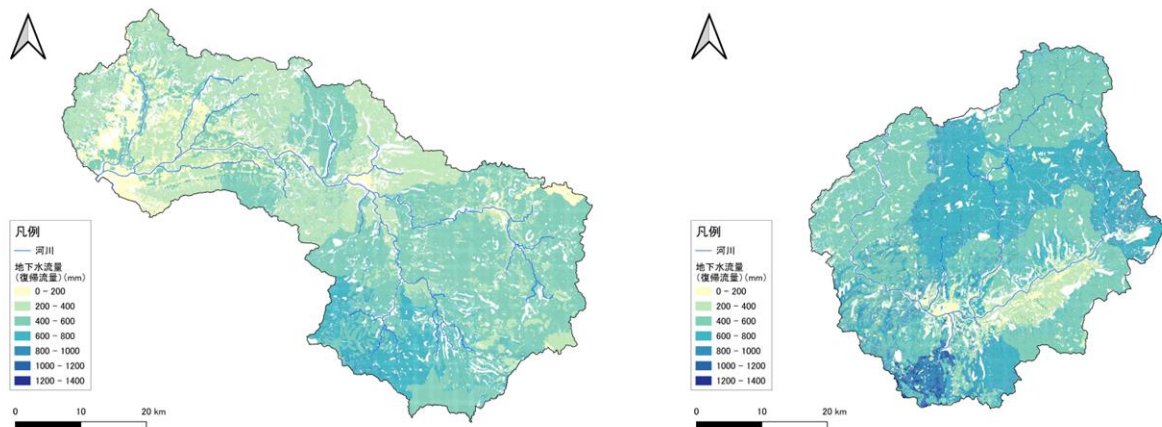


図 V-56 地下水流量（復帰流量）の分布

⑥ 深層浸透量

図 V-57 に深層浸透量の分布を示す。

側方流量や地下水流量と同様に、降水量の多い地域で流量が多くなっている。

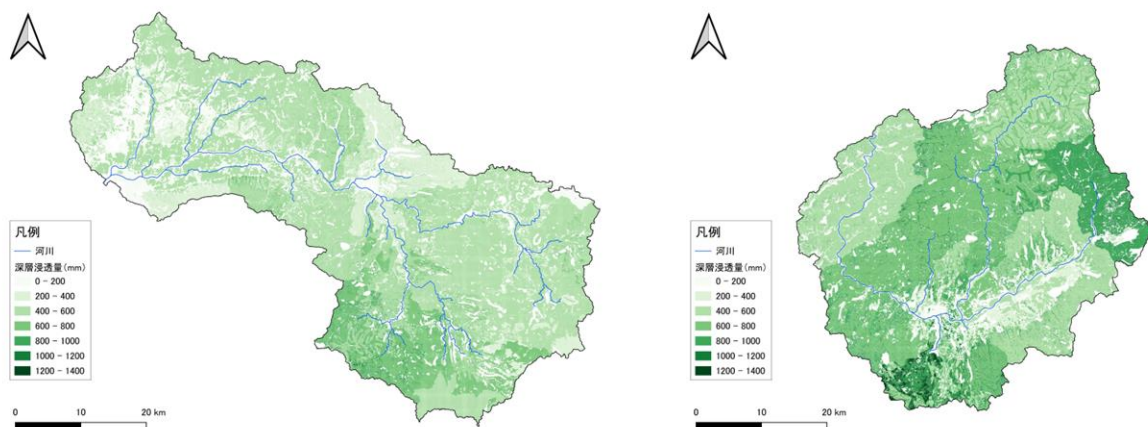


図 V-57 深層浸透量の分布

6.4 まとめと考察

本年度は、昨年度までに構築済みの筑後川モデルの精緻化と、球磨川モデルの新規構築を行った。その結果、モデルの推定精度における改善の余地が一部認められるものの、冒頭の表 V-1 に記載の課題については概ね改善を図ることができた。以下に、モデル構築・精緻化の対応結果について概要を述べる。

(1) 水収支

筑後川モデルについて、土地利用別の水収支構成割合は昨年度より妥当性の高いものとなり、特に、昨年度の課題であった、農地（傾斜地）の蒸発散の方が森林からの蒸発散量よりも多いという課題を改善することができた。

球磨川モデルについて、筑後川モデルで調整されたベストパラメータを適用し、概ね妥当な水収支構成割合を推定することができた。このことにより、筑後川モデルで調整を行った各パラメータの設定値について、一定の汎用性があることが確認された。

(2) 河川流量

筑後川モデルについて、最下流地点及び今回キャリブレーション地点として追加した森林直下地点の双方において、十分な精度で河川流出量を推定することができた。しかしながら、最下流地点におけるピーク流量がやや過少に推定された結果となったことや、平水時の推定値と実測値にやや乖離がある点については、引き続き、精査が必要であると思われる。

球磨川モデルについても、比較的良い精度で河川流出量が推定されたものの、筑後川モデルと同様、平水時の流出量が過少に推定される傾向となったことから、更なる改善の余地がある。

(3) 土砂・栄養塩流出量

今年度実施した、ポイントソース（点源由来）の作成方法の見直しによって、筑後川流域全体は土砂流出量に占めるポイントソース由来の割合が昨年度の 0.2%から 0.1%に減少させることができたものの、過大に推定される傾向にある土砂流出量については、ポイントソース以外の要因も精査するなど、今後において妥当性の確認が必要である。全体量に占めるポイントソース由来の窒素流出量の割合は、昨年度の 6%に対し、今年度は 17%と、約 3 倍に増えたため、過大に推定される要因となっている可能性があり、土砂流出量と同様に、妥当性については更なる精査が必要である。

球磨川モデルについては、まず森林直下における観測地点の実測データ数が少なく（土砂 9 個、栄養塩が 2 個）、妥当な精度分析・解析ができないという問題点があった。次年度以降の対応について、近隣の観測地点の実測データの使用や観測点の再選定など、代替手法を検討が必要である。また、最下流地点の土砂・栄養塩流出量の推定精度は、筑後川モデルと同様、十分に精度が高いとはいえず、球磨川モデルにおいてもキャリブレーションを実施し、最適なパラメータセットを探索していく必要がある。

7. モデルを用いたシナリオ解析・評価

7.1 シナリオ解析・評価の基本方針

流出モデルを構築することのメリットとしては、□流域からの水や物質流出量の推計、□それを踏まえた、森林の水源涵養機能の定量化といったことが可能となるだけでなく、□様々なインプット条件の組み替えにより、仮想的な条件下におけるシミュレーションによるシナリオ解析が可能となる点大きい。このことにより、□現実では実験することが難しい条件についても、比較的簡単に比較ができるようになり、森林の機能をより詳細に明らかにしていける可能性がある。

本項では、精緻化された筑後川モデルを用いて、上流域に優占する森林が草地や裸地など、他の土地利用に変化した場合の仮定したシナリオ（図 V-58）において、水や物質の流出傾向がどのように変化するか、洪水緩和機能や水資源の貯留（水量調節）機能の視点からシミュレーション結果の分析・評価を行うこととした。

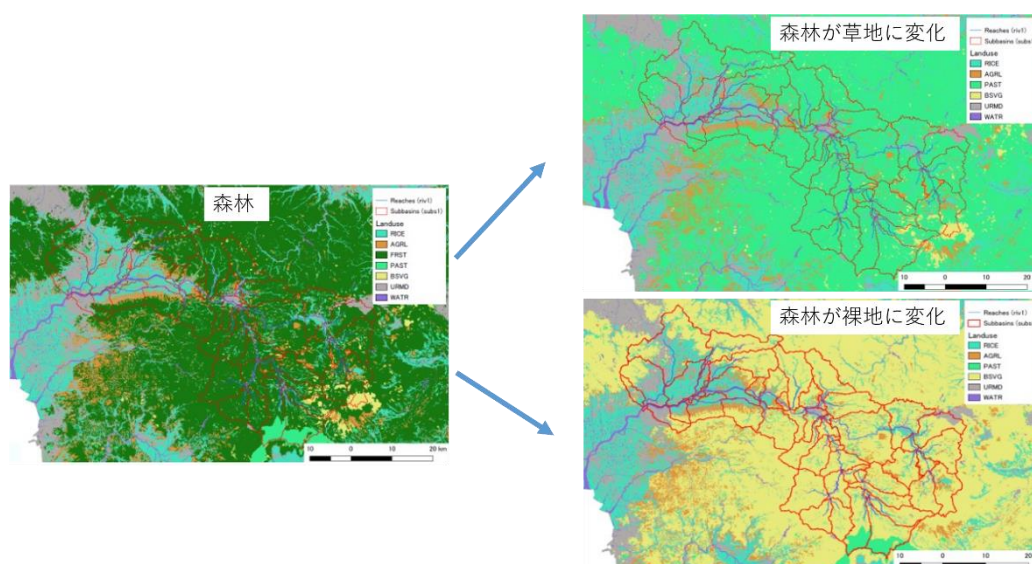


図 V-58 森林が他の土地利用に変化したシナリオのイメージ

7.2 森林の水源涵養機能等の影響評価

(1) 洪水緩和機能

森林の洪水緩和機能は、流域の森林を現行どおりの森林とした場合（森林シナリオ）、草地に置換えた場合（草地シナリオ）、裸地に置換えた場合（裸地シナリオ）の計3つのシナリオに基づくモデルを構築し、それぞれのシミュレーション結果を比較することにより評価を行うこととする。洪水緩和機能を評価する観点から、大きな出水のあった平成30年7月豪雨イベント前後の期間を抽出してシミュレーションを行った。

図 V-59 から図 V-62 は、筑後川流域の最下流地点（瀬ノ下）及び森林直下地点（小淵）における出水時の水、土砂、リン、窒素のそれぞれの流出量について、シナリオ毎のシミュレーション結果を比較したものである。図中の青棒が降水量、緑線が森林シナリオ、青線が草地シナリオ、オレンジ線が裸地シナリオにおける推定の水流出量、赤の点もしくは点線が実測の流出量を示している。

土地利用の違いがピーク流量に及ぼす影響に着目してみると、水や土砂のピーク流量は、

瀬ノ下地点と小淵地点のいずれにおいても裸地シナリオが最も多く、森林シナリオは水流出量・土砂流出量が最も少ない結果となった。これらは、土壤浸透能の高い森林地において表面流が発生しにくく、草地や裸地のように地表の被覆が少なくなる程、土壤浸透機能が低下し、表面流が増加するという既往の知見をパラメータに反映させた結果が再現されたものとみられ、モデルによって森林の洪水緩和機能の評価が一定程度可能であることが示された。

リンと窒素の流出のピーク流量は瀬ノ下地点、小淵地点どちらも草地シナリオで最も多く、森林シナリオにおいては最も少ない結果となった。一般的には裸地からのリンと窒素流出の方が草地からのリン及び窒素の流出量がよりも多いと考えられるが、筑後川流域は規模の大きな流域であるため、流域内の各地点での降雨量が必然的に多くなったことが影響した可能性も考えられ、窒素収支の妥当性の確認と併せ、精査が必要である。

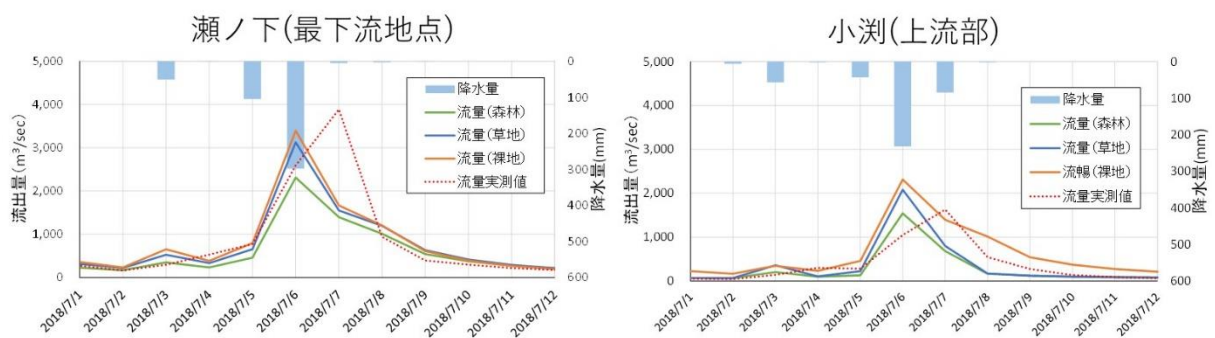


図 V-59 瀬ノ下及び小淵観測地点における出水時の水流出量

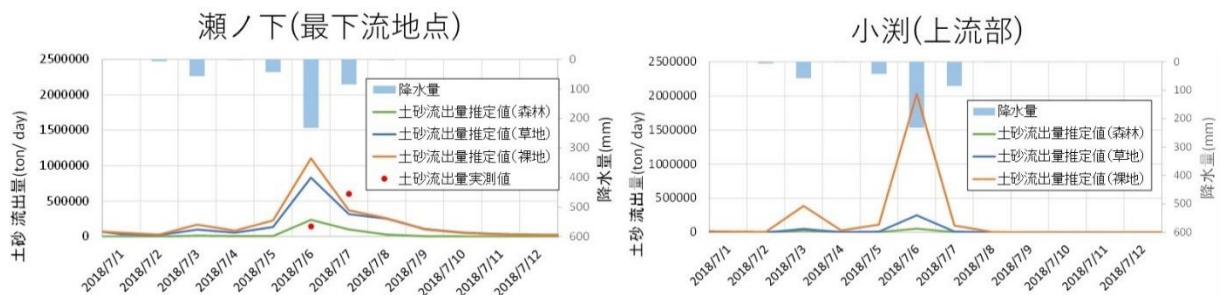


図 V-60 瀬ノ下及び小淵観測地点における出水時の土砂流出量

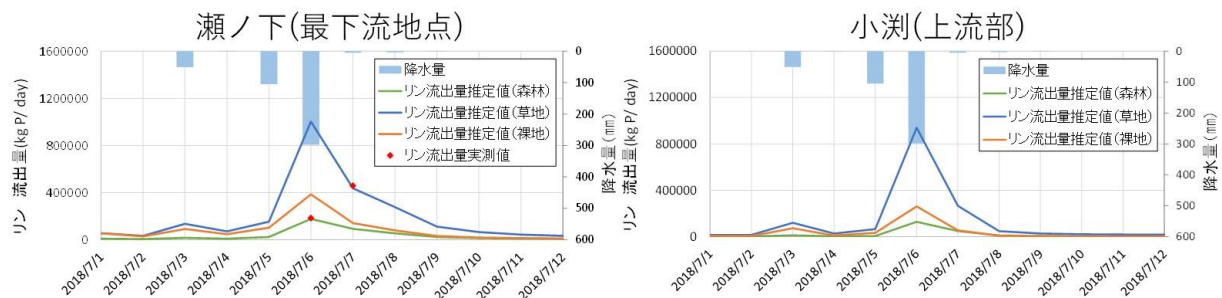


図 V-61 瀬ノ下及び小淵観測地点における出水時のリン流出量

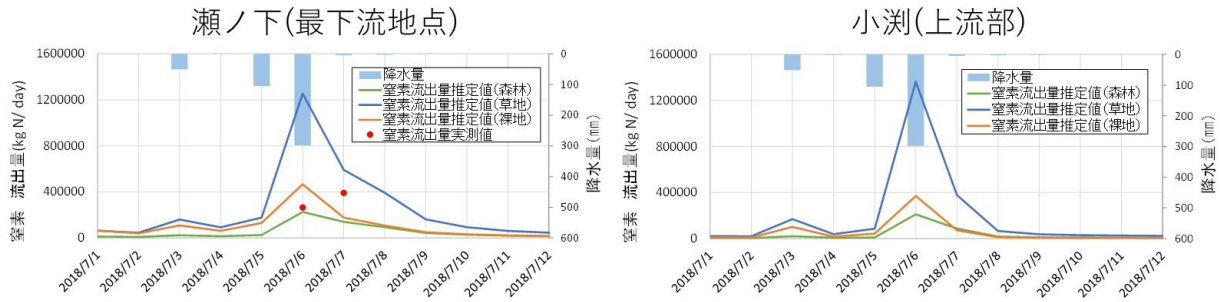


図 V-62 瀬ノ下及び小淵観測地点における出水時の窒素流出量

(2) 水資源の貯留（水量調節）

図 V-63 は、シミュレーション期間（2010～2018 年）内のうち、年降雨量が最も少なかった 2017 年を渇水年として抽出し、当該年におけるシナリオ別河川流量について流況曲線を作成したものである。

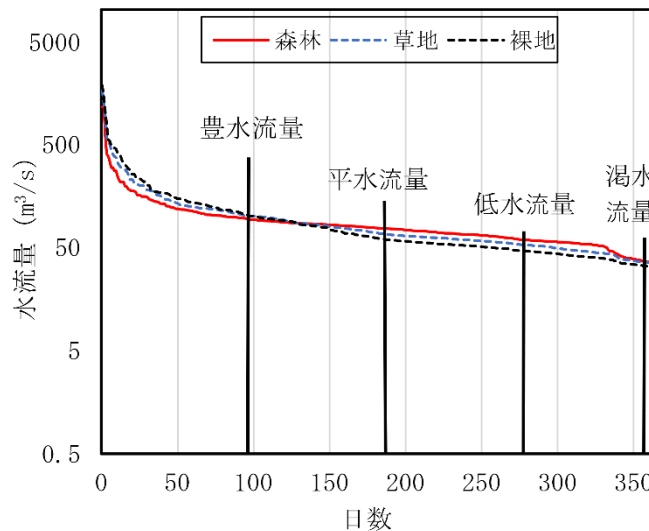


図 V-63 各仮想シナリオにおける渇水年シミュレーション結果を用いた流況曲線

森林シナリオでは、草地シナリオや裸地シナリオと比べると、豊水期の流量が低く、低水期や渇水期の流量が多い結果となった。反対に、裸地シナリオでは豊水期の流量が多く、渇水期の流量が少なかった。これは、森林域に降る雨が保水性のある土壤に一旦貯留され、徐々に河川に流出したことが再現された結果であり、森林がある場合では貯留したことにより流出平準化機能が発揮されていると捉える。

7.3 まとめと考察

以下の考察は、現時点で河川流量の推定精度にやや改善の余地がありながらも、精度評価指標で概ね「Good」以上の評価が得られたモデルのシミュレーション結果を用いていることを前提とし、結果は当事業のモデルに限定的である可能性があることに留意願いたい。

洪水緩和機能に係るシナリオ解析・評価の結果としては、上流域が草地や裸地であった場

合に比べ、森林であった場合の出水時のピーク流量が低く抑えられることや、様々な土地利用の影響を受ける流域最下流地点においてもその傾向が持続することが示された。これにより、上流域に森林があることが流域全体における洪水緩和機能の維持・向上に寄与していることがモデルによって定量的に示されたといえる。

次に、水資源貯留機能・水量調節機能に係るシナリオ解析・評価の結果としては、上流域が草地や裸地であった場合に比べ、森林であった場合の豊水期の流量が低く抑えられ、渇水期の流量が若干であるが多くなった。これは、既往知見として認識されている水文プロセスと同じ現象であり、森林域では、降雨後に森林土壌中に一時貯留された水がゆっくりと地下に浸透し、基底流となって無降雨時にも安定的に流出するということがモデルにおいても再現された結果であり、洪水緩和機能と同様、上流域に森林があることが流域全体における水資源貯留（水量調節）機能の維持・向上に寄与していることがモデルによって定量的に示されたといえる。

VI. 長期的傾向の把握手法の検討

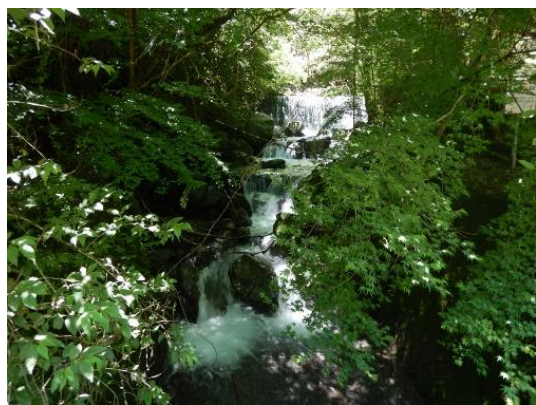
1. 検討方針、前提整理

これまで本調査ではモデルの精緻化を図り再度、モデル構築及び評価・検証を行い、さらに年に数回から数十回程度の現地調査等を実施してきた。現地調査では、モデル構築に必要な雨水、湧水、土壌を中心とした調査を実施したほか、森林と海域を繋ぐ河川水を対象に平水時、出水時に分けて採水し、現地の状況を細かに把握してきた。

一方で、本調査は「有明海及び八代海等を再生するための特別措置に関する法律」に基づく調査であるため、調査の周期が定められていない状況である。さらに、過年度調査では、長期間にわたるモニタリングは海域への森林が及ぼす影響の長期的な把握・分析に有用であるとされたことから今年度調査では「データ蓄積の方法」について整理を行うこととした。なお、整理にあたっては、広範囲かつ多数の地点で長期間にわたるデータ収集は、将来的に予算の制約等により継続が難しくなる可能性もあることから、効率的かつ有用なデータ収集の方法・内容を十分に検討する必要があることを踏まえ、以下の前提で検討した。

○観測箇所の想定

これまでの河川調査では、モデルの構築を行うために流域の最下流点を中心に実施してきた。今後、森林からの直接の流出量や水質等も把握できるように、森林率・面積の大きい区域の直下での定点観測によるデータ蓄積方法を検討する。今年度調査では、具体的な観測箇所を球磨川流域に設定した。また、具体的に想定した場所は、二次支川以上の最下部とし、森林の直下にあり、かつ、流量への影響を考慮し、川底や側面がコンクリート等で覆われ浸食等を受けない箇所を想定した（図VI-1）。



図VI-1 球磨川流域での現場イメージ（球磨川支流の川辺川支流の久連子川支流の様子）

左：最下流部から上流方向を撮影、右：最下流部を撮影

○観測対象の整理

SWAT モデルでの評価・分析では、水収支を適確に把握する必要があるため、まずは水量のデータを確実に取得・蓄積することとした。なお、水量の把握にあたっては、水位及び流速を観測し、それに加えて河川断面から水量を算出するため、水位及び流速から導き出す把握方法を整理することとした。また、将来的には水質も把握する可能性があることから、河川水のサンプリング方法も併せて検討した。

以上の前提で、文献調査や専門家へのヒアリング等を実施し、水位の観測手法を把握・整理した。観測機器・器具については、野外での耐久性、設置費用を考慮し、操作性やメンテナンスに係る頻度や費用など、利点・欠点等を整理し、現実的な選択肢を整理した。

2. 調査方法

水位（流量）観測手法には、普通計測（施設点検時等と併せて目視確認）と自記計測（記憶媒体含む計器を利用）がある。本事業では、長期間効率的にデータ収集することから、自記計測する機器を基本として設置し観測することと検討した。また、自記計測は接触式水位計、非接触式水位計に大きく分かれるが、今回、比較対象とした水位（流量）観測手法は、表VI-1に示す6種類とし、表VI-2の特徴が挙げられる。

表VI-1 水位（流量）観測手法一覧

方式	観測手法	概要
接触式	フロート式水位計	フロートを観測井の水面に浮かべ、その上下の動き水位として記録。
接触式	気泡式水位計	水中に開口した管から気泡を出し、その時の管内の圧力をセンサで測定し水位とする。
接触式	リードスイッチ式水位計	観測地点の水中に設置した測定柱の中のフロートが水位変化に連動し、水位を測定。
接触式	水圧式水位計	水位の変化にともなう水圧の変化を機械的に測定するなどして水深を測り水位を測定。
非接触式	レーザ（超音波）式水位計	超音波パルスが水面に当たって戻ってくるまでの時間から水位を計測。
非接触式	レーザ（電波）式水位計	マイクロ波（電波）パルスが水面に当たって戻ってくるまでの時間から水位を計測。

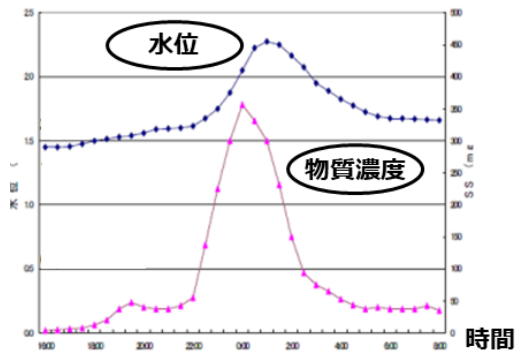
表VI-2 水位（流量）観測手法の特徴

観測手法	メリット	デメリット
フロート式水位計	電源が不要なため、災害（停電）に強い。	設置工事が大掛かりとなる。フロートや可動部に汚れ等が付着すると動きを妨げるため、正確な測定ができなくなる恐れがある。
気泡式水位計	水中に投入するのは感圧チューブのみのため、熱水や薬液などにも対応可能。	流れが速いところでは動水圧の影響を受け誤差が出やすく、大河川ではあまり使用しない。
リードスイッチ式水位計	直接水面を計測するため測定原理がわかりやすい。	設置工事が大掛かりとなる。
水圧式水位計	高精度で測定範囲が広いとため、最も使用されている。※出水時河川調査における自動採水装置にも採用。	接触方式なので土砂埋没・汚れ等の影響がある。
レーザ（超音波）式水位計	非接触で計測できるのでメンテナンス性に優れる。河川の上流部で流れが速く、かつ河床の変動が激しい場所などで使用される。	空中の物体の影響を受けるため、暴風雨の影響を受ける。橋梁部に設置する場合、管理者許可が難航する可能性がある。流速も測れるが、計測には水面に漂流物が必要。
レーザ（電波）式水位計	非接触で計測できるのでメンテナンス性に優れる。マイクロ波（電波）は、自身の波長の1/4以下の物体に	測定範囲が狭い（10m程度）。橋梁部に設置する場合、管理者許可が難航する可能性がある。流速も測れるが、計

	は反応しないため、粉塵や蒸気の影響をほとんど受けない。	測には水面に漂流物が必要。
--	-----------------------------	---------------

続いて、水質調査にあたっては、河川から河川水をサンプリングする必要があり、河川水中の栄養塩や SS 等を分析により把握するが、栄養塩類等は降雨により水位が上昇（水量が増加）を始める初期の段階で濃度が急上昇し、その後、比較的短時間で低濃度に戻ることが知られている（図VI-2）。このような状況下では、降雨を確認後に採水を実施しても、初期の栄養塩類等の濃度の増加ピークは確認できない可能性がある。さらに、その場で単発に採水を行っても濃度が上昇途中であるか、ピークであるかを判断することは困難となり、栄養塩類等の総量を推定することは難しくなる。

このことから、水質調査にあたっては、過年度に実施した河川資質調査と同様に水位が一定以上になると自動的に採水を実施することができる、水位計と自動採水器が連動したシステム（図VI-3）を基本とすることを検討した。このシステムは、降雨により水位が上昇する段階から定期的（一定の時間毎）に採水することが可能であるため、栄養塩類等の濃度のピークを確実に捉え、濃度の総量を適切に評価できる。



図VI-2 水位と物質濃度の変化イメージ



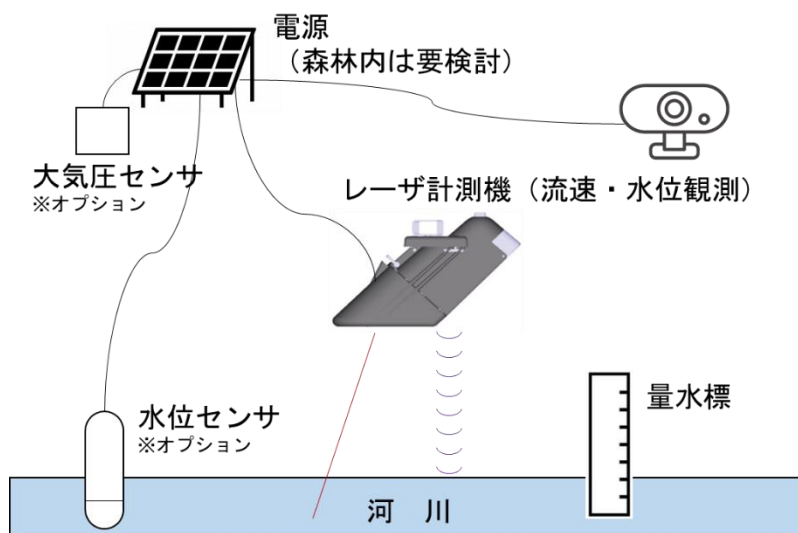
図VI-3 機器設置イメージ

3. 検討結果

前提や観測手法の特徴を整理したうえで机上の調査や専門家へのヒアリングを行い、本調査の各委員からの意見等も踏まえ、最適とした観測方法は以下のとおりである。なお、流量観測方法とSS・栄養塩観測方法は分けて整理しているが、機器の重複や現場状況等を踏まえ、両方のシステムを併せて観測を実施する可能性も考えられる。

3.1 流量観測方法

災害時の利用も想定されることから、メンテナンス性を考慮し、非接触型のレーザ式である機器を第一候補とする。具体的な機器名は、「TIENet360 レーザ流速流量計」を想定する。この機器は、上流側に流速計測の信号を発信し、真下に水位計測の信号を発信することで、流速水位を同時計測ができる。また、不測の事態等により、この機器を用いた計測ができなかった場合に備え、カメラと量水標等を設置し、目視での記録（ビデオ録画）、もしくは水圧式の水位観測を第二の観測方法として確保する。水圧式の水位観測を行う場合には大気変化による影響を考慮するために大気圧センサも併せて設置する。観測システムのイメージは、図VI-4 のとおり。

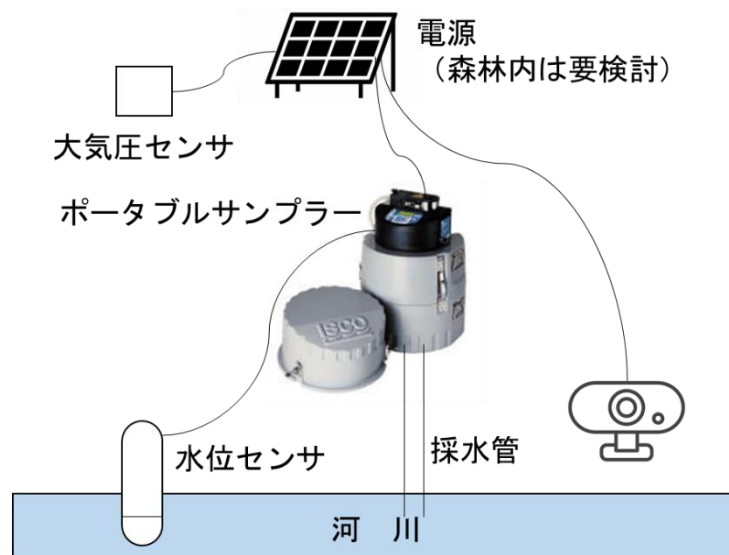


図VI-4 流量観測システム（イメージ）

画像引用：<https://www.ne.jp/asahi/nikkaki/bios/index.html>

3.2 SS・栄養塩類観測方法

水位が上昇する出水時を確実にサンプリングするために過年度調査でも用いた水位観測システムを用いる。また、水位センサに圧力式のものを用いる場合は、大気変化による影響を考慮するために大気圧センサも併せて設置する。観測システムのイメージは、図VI-5 のとおりである。



図VI-5 SS・栄養塩観測システム (イメージ)

画像引用：<https://www.ne.jp/asahi/nikkaki/bios/index.html>

4. 考察

流量観測はレーザ式の計測によるもの、SS・栄養塩観測は自動採水によりサンプリングし、分析することを第一候補として整理した。

流量観測で得られた水位・流速のデータは、経年利用で発生する可能性のあるドリフト（長年観測を続けると発生する出力データに偏り等が発生する現象）を考慮し、データ整理の際には、カメラデータ等の他の手法で得られたデータと比較したうえで整理することとする。さらに留意点として、レーザを用いた流速観測には、水面に漂流物が必要なため、現場の検討にあたっては留意する必要がある、それをカバーするために、第二の観測方法としてプロペラ式流速計等を用いた観測を行うことも検討する必要がある。

VII. 成果の公表に係る対応

1. 第4回アジア太平洋水サミットの概要

第4回アジア・太平洋水サミットは、地下水保全について幅広い施策を推進している熊本市において、「持続可能な発展のための水～実践と継承～（Water for Sustainable Development - Best Practices and the Next Generation -）」をテーマにアジア・太平洋水フォーラム（APWF）、熊本市の共催で開催された。

参加国は、オンラインやビデオメッセージ参加を含むと 31 か国となり、会場の熊本城ホールには海外からの来賓を含め約 700 名が出席した。

期日	2022年4月23日（土）24日（日）
会場	熊本城ホール（熊本市中央区桜町）
主催	アジア・太平洋水フォーラム（APWF）と熊本市の共催
全体テーマ	持続可能な発展のための水～実践と継承～
会議の公式言語	日本語・英語

2. 実施内容

本業務においては、全体テーマや主催者である熊本市の施策のひとつである「森林整備による水源涵養機能の持続的な発揮に向けた取組」、さらに令和2年度に改訂された「水循環基本計画」における「水源涵養機能をはじめとする多面的機能を持続的に発揮させるための森林の整備及び保全を進める必要がある」ことを踏まえ、シンポジウムを開催した。

シンポジウムは、飲料水や農業・工業用水などの水インフラに寄与する重要な要素である森林に着目し、森林の水源涵養機能や土砂流出防止機能等について最新の知見も交えて講演・事例紹介等を行い、森林の重要性についての理解を深めるとともに、森林の整備・保全に向けた機運の醸成を図った。

実施にあたり、必要となる以下の業務を実施した。

- ・ 登壇者・主催・参加者等関係者との連絡調整
- ・ 開催周知（オンラインサイトの運営）
- ・ 開錠運営（当日対応）
- ・ 登壇者に係る謝金・旅費の支払い



シンポジウム終了後アンケートにご協力下さい。
Please fill out the questionnaire after the symposium

アンケート
(questionnaire)

開催概要 [Event Outline] > ページを更新する [Refresh the page]

開催日 [Date] 令和4年(2022年)4月24日(日) (14:30開場)
April 24, 2022 (Sun) /Doors open at 14:30

場所 [Place] 熊本城ホール 2階 シビックホール
>>アクセス
Kumamoto-go Hall 2F "Civic Hall"
>>Access

プログラム プロフィール 講演者資料	日本語 [Japanese]	英語 [English]
プログラム [Program]		
作説提供 [Information provided]		
英語通訳 [Materials]		

図VII-1 オンラインサイトキャプチャ
< https://csk-inc.org/apws4_sym/ >



図VII-2 開催通知リーフレット (表面)

○プログラム (リーフレット裏面より抜粋)

14:45	主催者挨拶 Greetings from the Organizer 林野庁 森林整備部長 小坂 善太郎 Zentaro Kosaka, Director-General, Private Forest Department, Forestry Agency
14:50	情報提供 Information 林野庁 治山課 企画官 林 健二 Kenji Hayashi Senior Planning Officer, Conservation Division, Forestry Agency. 森林の水資源涵養機能の発揮に向けた林野庁の取組について Policy for Fulfillment of the Water Resource Conservation Function of Forests by Forestry Agency
15:00	基調講演 Keynote Speech 京都大学 名誉教授 谷 誠 Makoto Tani Honorary Professor, Kyoto University 森林と水 - 樹木の長寿性の観点から - Forest and Water - From a viewpoint of the long-life characteristics of tree species
15:35	事例紹介① Case Study 1 宮崎大学 農学部 准教授 篠原 慶規 Yoshinori Shinohara Associate Professor, Faculty of Agriculture, University of Miyazaki 針葉樹人工林の管理と水資源・土壌侵食・土砂災害 Management of Coniferous Plantations and Water Resources, Soil Erosion, and Landslide Disasters
15:55	事例紹介② Case Study 2 広島大学大学院 先進理工系科学研究科 教授 小野寺 真一 Shinichi Onodera Professor, Graduate School of Advanced Science and Technology, Hiroshima University 森林の水資源涵養機能等の評価～ SWAT モデルを用いた水・土砂・栄養塩流出量の推定～ Evaluating Water Resource Conservation and Other Forest Functions: Estimating Water, Soil, and Nutrient Runoffs with the SWAT Model

	休憩 (10分間) Break (10 minutes)
16:25	事例紹介③ Case Study 3 コカ・コーラボトラーズジャパン(株) 経営改革本部 コーポレートコミュニケーション統括部 CSV推進部 部長 丸山 竜一郎 Ryuichiro Maruyama General Manager of CSV Promotion Department, Coca-Cola Bottlers Japan Inc. Corporate Communication Supervisory Department, Management Reform Headquarters コカ・コーラシステムが取り組む水資源保護活動について Water resource conservation activities in the Coca-Cola system
16:45	事例紹介④ Case Study 4 広島大学大学院先進理工系科学研究科博士課程 ミャンマー-鉱物資源・環境保全省 森林局 ナン・ユー・ワール Nang Yu War Doctoral Student, Graduate School of Advanced Science and Engineering, Hiroshima University/Forest Department, Ministry of Mineral Resources and Environmental Conservation, Myanmar ミャンマー・シャン州の インレー流域における主な土地被覆下の土壌侵食評価について Estimation of Soil Erosion under Major Land Covers of Inle Watershed in Shan State, Myanmar
17:10	パネルディスカッション パネリスト：全登壇者 ～森林の水資源涵養機能の更なる発揮に向けて～ Panel Discussion Panelists: All speakers --Toward Further Realization of the Water Source Recharge Function of Forests-- (ファシリテーター) 東京農工大学大学院 農学研究院 教授 五味 高志 Takashi Gomi Professor, Graduate School of Agriculture, Tokyo University of Agriculture and Technology 「災害時や危機的渇水時における非常時地下水利用システムの開発」での森林の役割 The role of forests in "development of a system for groundwater use during disasters, critical water shortages, and other emergencies"
17:50	閉会 Closing

3. 開催結果

冒頭には主催者挨拶として、林野庁の小坂善太郎森林整備部長からビデオメッセージにて「熊本の街の湧水はどこから来るのか、水道水の 100%をまかなう地下水はどこからどういう経路をたどってくるのか。また、世界では深刻な水不足に悩む地域もある一方で、気候変動で雨の降り方が激しくなる地域もある。こうしたことに思いを馳せて、水循環への貢献として何ができるのか、また、森林の機能についての理解を深め、森林の整備・保全が進む契機になればと思う」との言葉が届けられた（図VII-3）。



図VII-3 小坂部長による主催者挨拶

続いて、シンポジウムの導入として林野庁治山課の林健二企画官から、「森林の水源涵養機能の発揮に向けた林野庁の取組について」と題する情報提供がなされた（図VII-4）。水資源の確保や災害への対応として、森林・林業基本計画や水循環基本計画を踏まえた森林整備や治山対策を進めてきたことを紹介しつつ、一方で、「森林の水源涵養機能のメカニズムについては最近の調査研究で色々なことが明らかになってきているが、まだ分かっていないことも多くあるので、調査研究を推進し、科学的知見に基づいて政府の施策を進めていくことが重要」と強調した。



図VII-4 林企画官による情報提供

そして、基調講演として、谷誠京都大学名誉教授より「森林と水ー樹木の長生きの性質から考えるー」と題した講演が行われた（図VII-5）。

まず、長生きの樹木を主体とする生態系である森林は、樹木の一生の間に何度も起こる少

雨年にも光合成と蒸発散を維持して成長する性質があり、その例として、シベリア北方林においては少雨年でも蒸発散量が減少せずに一定であるとの観測結果が紹介された。ユーラシア大陸北方での降水量は大西洋で蒸発した水蒸気がルーツであるため東へ行くほど降水量が減るものの、こうした森林の蒸発散が大きく安定している性質こそが水のリサイクルをつうじて海洋から遠い内陸の湿潤気候を支えていることが強調された。その一方で、岡山県の竜ノ口山森林理水試験地での対照流域法を用いた研究では、森林の蒸発散量が乾燥期間にも減りにくい性質があるため、森林伐採により水資源を増加させる結果が得られている。こうした研究結果から、海洋から離れた大陸奥地と日本のような島国とでは、森林の蒸発散に関する性質が水資源に及ぼす影響は相異なることが指摘された。したがって、河川流量を貯水によって変動をならして水資源を確保する方法としてはため池やダムが有効であるが、蒸発散を制御して水資源を増やす目的に対しては、森林管理が唯一の現実的な手法であると結論づけられた。



図VII-5 谷名誉教授による基調講演

次に、森林と災害の関係に関しては、森林総合研究所の竜ノ口山試験地での長年の観測研究から、降雨と流域からの流出量が同規模になるほどの大雨であっても森林土壌はピーク流量を低減させる効果があること、大きな間隙に富む森林土壌は粘土質土壌に比べてその効果が高いことが示された。さらに、大雨時に雨水が土壌層内に浸透するにもかかわらず、急斜面上の土壌層であっても数百年以上安定状態を維持するのは、一旦崩壊した後の土壌層の回復過程において、森林根系による補強に加えてパイプ状水みちなどの排水構造が同時に発達してくるためではないか、との仮説が示された。

このような仕組みから、樹木を主体とする森林は、短命で根の浅い草本に比べ、乾燥期間にも蒸発散を維持して成長を続け、森林の地盤となる土壌層を崩壊させずに維持する効果が大きいことが指摘できる。結果的に、内陸の森林は風上の森林の蒸発散による水蒸気でもたらされる降雨によって成立できるのであるし、急斜面上の森林は土壌層が崩壊せずに厚く発達することによって長期間安定を保つことになり、森林と生育環境とは、言わば「持ちつ持たれつ」の関係があると言える。そして、森林が人間社会に及ぼす諸機能は、長生きの性質をもつ樹木を主とする森林生態系がもつ高いレジリエンスからもたらされる「副産物」であるとの見解が示された。

○事例紹介

事例紹介では4件の研究・取組の紹介がされた。最初に、宮崎大学の篠原慶規准教授から、「針葉樹人工林の管理と水資源・土壌侵食・土砂災害」と題して、森林管理、特に間伐の重要性を示す研究成果が紹介された（図VII-6）。まず、水資源確保の観点については、辺材面積（各立木の胸高付近での辺材面積の合計）の増加にともない蒸散量が大きくなり、また、立木密度の上昇にともなう樹冠による降雨の遮断蒸発が大きくなる性質を踏まえ、これらをコントロールすることが重要であると、間伐実施により蒸散量は44%、遮断蒸発は57%の減少が見られる研究結果が示された。



図VII-6 篠原准教授による事例紹介

また、土壌侵食に関しては、本来、森林では枝葉により雨滴が大きくなる一方で、その落下速度は林外と変わらないため、運動エネルギーが大きい雨滴による土壌剥離のリスクは高まるものの、森林で土壌侵食が起こりにくいのは下層植生やリターがクッションの役割を果たしているためであり、間伐により林床の裸地化を防ぐことが重要であるとされた。

土砂災害、特に表層崩壊に関しては、大雨で大量の地下水が発生すると土壌に浮力が働き、崩壊の危険性が高まるが、林齢が上がるほど根系が発達して土塊移動に対する抵抗力が増し、斜面崩壊が起こりにくくなると説明された。一方で、間伐の効果については明確な科学的知見がないものの、間伐を行わずに放置すると2017（平成29）年7月の九州北部豪雨のような流木災害のリスクが高まることを強調し、最後に、成熟した森林の伐採が今後進んでいくことを考えると、伐採後の更新も徹底することが必要と訴えかけた。

次に、林野庁が実施している調査について、その検討委員を務めていただいている広島大学大学院の小野寺真一教授から「森林の水資源涵養機能等の評価～SWATモデルを用いた水・土砂・栄養塩流出量の推定～」と題する発表があった（図VII-7）。本調査では熊本県北部の菊池川流域を対象にシミュレーションツールを用いて、有明海や流域の環境保全に資する最適な森林整備の方向性の検討が進められており、森林が豪雨時の水・土砂流出の平準化にどのように働くか、また、水や土砂・栄養塩類が、いつ・どのように森林に貯留され、下流に安定的に供給されるかという観点での分析がされている。



図VII-7 小野寺教授による事例紹介

分析の結果、農地や水田と比べて森林は出水時の水の流出を抑えるとともに、渇水時でも一定の流出を維持していること、また、森林では土砂・リン・窒素の流出も平準化していることが明らかにされた。栄養塩については、海域への供給という観点では森林はストックする方向に働く一方で、下流からも栄養塩が流出している状況において、森林からは常に一定の水が供給されるため、栄養塩の濃度を薄めて海に定常的に供給する効果がある旨が強調された。

また、若齢林が主であった 1970 年代と、森林が成熟した 2010 年代のモデルについて、同様の気象条件を与えてシミュレーションすると、後者の方が出水時の水・土砂の流出量を低減させる効果が高いという結果が示された。今後は有明海・八代海を取り巻く他流域にも分析対象を広げるとともに、本モデルを活用することで日本と似た気候・地質等をもつ国や地域にも貢献することが期待されると締めくくられた。

民間からの取組の紹介としては、コカ・コーラ ボトラーズジャパン株式会社の丸山竜一郎 CSV 推進部長から、「コカ・コーラシステムが取り組む水資源保護活動について」と題した紹介があった（図VII-8）。同社は九州から南東北までの 38 都府県を営業地域とし、アジアで最大規模の製造・販売を担っており、近年では SDGs の達成を目指すために、「多様性の尊重」や「地域社会」への貢献に取り組むとともに、「資源」に関する課題の一つとして、水資源保護活動が進められているとの説明があった。



図VII-8 丸山部長による事例紹介

製品の製造時に使用した水を可能な限り再利用するとともに、熊本のほか全国各地で工場の取水水源となる地域と協定を締結し、2020 年現在で 7,963ha を対象とした間伐や植林等の

水源林整備を実施しているとの紹介があった。森林整備は地域の森林組合とも協力して実施し、自社算定での水源涵養量は製品生産に使用する水量に対して 364%に達するとのことであった。

また、熊本工場等の水源域を対象とした水田たん水事業や、丸山部長自身も参画した阿蘇での草原再生の取組、また、「森に学ぼうプロジェクト」として全国 13 か所で社員と地域住民とが協力して行う植林や間伐等の森林整備・普及活動も展開されているとの紹介があった。さらに、阿蘇の地下水も利用している「い・ろ・は・す」の売上金の一部を日本各地の森林組合や NPO 等に寄付して森林の水源涵養機能等の発揮・向上に寄与していること、「廃棄物ゼロ社会」に向けてペットボトルの樹脂の使用量の削減や回収・再利用の取組を進めていることなどが示され、企業としても引き続き環境保全活動を推進していく旨の表明がされた。

最後に、広島大学大学院博士課程に在籍中の、ミャンマー天然資源・環境保全省森林局の Nang Yu War (ナン・ユー・ワール) さんから、「ミャンマー・シャン州のインレー流域における主な土地被覆下の土壌侵食評価について」と題して、土壌侵食や土砂堆積を抑える森林の効果を示す研究結果が示された (図VII-9)。



図VII-9 Nang Yu War さんによる事例紹介

ミャンマーでは、河川や湖の流域を対象に様々な部門で「統合水資源管理 (Integrated Water Resources Management)」が推進されているとのことであり、近年、森林が伐採等により減少していることを受けて、2014 年に丸太輸出を禁止するとともに、2016 年度からはチーク材の産地での 10 年間の伐採禁止措置がなされ、現在は 10 年間の回復・復興計画 (Myanmar Restoration and Rehabilitation Programme) が進められているとの説明があった。

また、ミャンマーで 2 番目に大きな淡水湖であり、重要な水源地域の一つであるインレー湖の流域では、違法伐採や持続不可能な農業慣行、観光等により森林の減少・劣化が進み、多数の土壌侵食も発生しているとの問題提起がなされた。当該流域を対象とした調査により、流域北部よりも南部の方が降雨による土壌侵食率が高く、中でも農地による土壌侵食の影響が大きいことが明らかになったことから、森林の回復や農地を対象とした土壌保全の取組が重要であると強調された。

また、現在、JICA によるキャパシティビルディングの事業も実施されており、2030 年にかけてはインレー流域再生計画 (Inle Watershed Restoration Programme) に基づく流域生態系の持続可能性や森林の回復、土壌・水保全に資する取組が推進されている旨も紹介され、政府としてインレー湖の流域の環境保全に向けた取組を今後も進めていきたいと締めくくっ

た。

○パネルディスカッション等

パネルディスカッションの冒頭では、ファシリテーターを務めていただいた東京農工大学大学院の五味高志教授より、『『災害時や危機的渇水時における非常時地下水利用システムの開発』における森林の役割』と題して、内閣府総合科学技術・イノベーション会議によるS I P（戦略的イノベーション創造プログラム）での研究内容の紹介があった（図VII-10）。



図VII-10 五味教授による研究紹介

地震等の災害による長期間の断水に備えて、生活用水などの水需要に対する地下水の供給可能量や揚水による地盤沈下の影響を事前に把握しておくことが重要であることから、これらを解明するシステム開発を進められているとのことであった。この地下水供給には国土の7割を占める森林の果たす役割が大きいものの、樹種や林齢などの違いが地下水涵養に及ぼす影響についてはこれまで十分な分析が困難であった旨の説明がされた。

そこで、地下水流動モデルの一つである GETFLOWS（株式会社地圏環境テクノロジーの開発モデル）により、広域・流域スケールで森林状態（樹種、林齢、林床等）や降水タイプ（雨、雪等）を考慮した森林内での水循環モデルの構築が進められているとの紹介がされた。具体的には、都道府県の森林簿や森林 GIS、航空レーザ計測を活用して立体的な森林状態を再現し、樹冠遮断量や蒸散量、林床面蒸発量を算定しており、こうした結果を踏まえて、各地域での森林の水源涵養機能の向上のために、どのような森林施業を行えばよいのかについても提案していきたい、との展望が語られた。

続いて、五味教授をファシリテーターとしてディスカッションが行われた（図VII-11、図VII-12）。参加者からの質問への回答も含めて、主に話題となったテーマは、「どのような森林であれば水源涵養機能や土砂災害防止機能が高いのか」、「今後どのような森林管理が行われるべきか」、「今後望まれる研究開発や施策は何か」の3点かと思われる。



図VII-11 パネルディスカッションの様子（背景はくまもと自然休養林・菊池渓谷）

まず、1点目については、谷名誉教授より、「水源涵養の観点からは、裸地にもいち早く植生を広げるマツは蒸発散量が高いことが知られているが、スギ・ヒノキと落葉広葉樹についてはあまり差が見られない」との紹介がされた。

また、篠原准教授からは、「30年生以下よりも30年生以上の森林の方が災害防止機能が高いことは分かっているが、さらに間伐によってどの程度機能が高められるのかについては、地質や降雨等の影響も大きいため明らかにっていない。また、針葉樹を広葉樹に植え替えれば良いというものでもなく、それぞれ浅根性・深根性のものがあることから、多様な樹種から構成された森林にすることが重要」との説明があった。

2点目の今後の森林管理に関しては、小野寺教授からは、「中山間地での過疎化も進んでいることから、環境問題に熱心な若い世代を大切にするなど、各地域での社会システムの状況全体を踏まえて森林管理の担い手を確保することが必要」との考えが示された。

また、Nang Yu War さんからは、「ミャンマーでの研究結果から、森林が水収支を改善させることが明らかになったものの、地域住民の生活は主に農業によって成り立っていることも念頭に置かなければならない。彼らの生計も維持しつつ、地域全体での森林管理をどのように進めていくべきかを検討していきたいと考えており、この点に関しては、JICA による日本の貢献にも感謝している」との言葉があった。

谷名誉教授からは、「戦後の一斉造林により現在は森林が充実してきたが、収穫期を迎えて伐採が広がると、その跡地にシカによる食害なども多くなって侵食や表層崩壊が進み、土壌層が薄くなるおそれがある。このため、将来にわたり継続的に土砂災害を防ぐには、ドイツのように森林の齢級構成を平準化することが望ましい。また、人間の生活に不可欠である木材を得るためには世界のどこかで森林を伐採する必要があるが、その地域での水資源の保全にも十分な配慮がなされるよう、グローバルな視点で森林の管理・利用を考えていく必要がある」と提言された。

最後に、3点目の今後の研究・施策については、林企画官から「森林はダムとは異なり貯留量や流出量を任意に調節することはできないが、国土の7割を占める資源・インフラであり、水の貯留や流出の平準化に大きな役割を担っていることから、いかにこれを適切に管理して機能を高めるかという観点が重要。また、近年は施策検討に当たり EBPM（合理的根拠

に基づく施策の立案)が求められることから、今後の研究動向も注視しつつ科学的根拠も踏まえた施策の推進に努めていきたい」との説明があった。

Nang Yu War さんからも「開発途上国としての立場から申し上げますと、ミャンマーでもより良い施策の形成に研究は不可欠であり、科学的知見によって持続可能性が保たれる。そのため、日本のほかにもぜひ海外から多くの研究者にミャンマーでの研究に参画いただけるとありがたい」との要望があった。

小野寺教授や篠原准教授からは、「森林での水源涵養機能に関する研究をさらに進めて、ダム等の人工物も含めた総合的な評価の下で地域に応じた対策を考えていくことが重要であり、そのためにも研究者側から積極的に調査を進めて道筋を示すことが重要」と語られた。

さらに、谷名誉教授からは「気候・水循環に影響を与えるという観点からも、森林という環境資源について外交上での議論を行っていくことが必要」と強調された。

丸山部長からは「消費者のサステナビリティへの関心が高まっており、生物多様性も含めて持続可能なビジネスとするためにも、様々な形で森林保全の取組を進めたい。また、災害時のライフライン確保という側面でも水供給の役割を担っていると自覚しており、引き続き地域への貢献について考えていきたい」との話があった。



図VII-12 パネラーによる意見交換

今回、会場には 96 名、ウェブからは 94 名の参加があり、荒尾干潟や中津干潟で環境保全に取り組んでいる方々も含めて多くの質問が投げかけられた。終了後のアンケート結果では、5段階評価での満足度では 5 と 4 で 9 割以上を占めるとともに、「内容の濃い学びの多いものだった」、「このようにまとまった議論の場が一般向けに行われることはとても有意義」「皆が力を合わせて取り組むことの大切さを学んだ」など、非常に高い評価を得た。さらに、「大きなモニターがあれば街中の市民にも内容を共有できたのでは」「今後もこのようにオンラインで参加できる機会が毎年あれば」など、研究発表や情報発信を広く継続的に提供されることを望む声もあった。

最後に、閉会挨拶として、一般社団法人日本治山治水協会の津元頼光専務理事より、「本日は皆様方から貴重な講演をいただいた。協会では雑誌『水利科学』の発刊により水と森林について探求しており、第1回サミットのシンポジウムでは主催、今回は後援させていただいた。熊本では地震や球磨川氾濫などの大きな災害に見舞われ、その復旧・復興が進んでいるものの、豪雨等の災害の恐れは今後も続く。自身もかつて良質な水とともに熊本で暮らしたが、この水をこれからも安定的にどう確保していくのかは豪雨対策とともに考えるべきテーマであり、今回シンポジウムが熊本で開催されたのは誠に意義深いものだった」と締めくくられた（図VII-13、図VII-14）。



図VII-13 津元専務による閉会挨拶



図VII-14 シンポジウム登壇者

○アンケート

開催後に実施したアンケートでは 21 の有効回答を得た。概要は以下のとおりである。今回のシンポジウムは概ね好評であったことから、今後も森林の水源涵養機能や土砂流出防止機能等について最新の知見も交えて講演・事例紹介等を行い、森林の重要性についての理解を深めるとともに、森林の整備・保全に向けた機運の醸成を図る必要があると考えられる。

表VII-1 アンケート概要

○開催を知ったきっかけ

内容	回答数
業務関係での連絡・お知らせ	9
インターネット・新聞・雑誌	6
SNS	4
家族・友人・知人	3
その他	2

○参加のきっかけ

内容	回答数
サミットの他の催しを訪れて当シンポジウムに関心を持ったから	4
関心のある分野だったから	15
業務・取組の内容に関係していたから	10
その他	1

○特に興味深かった・参考になった講演

内容	回答数
サミットの他の催しを訪れて当シンポジウムに関心を持ったから	4
関心のある分野だったから	15
業務・取組の内容に関係していたから	10

○理由

内容	回答数
理解しやすかった、関心が持てた等	8
多様な視点や新たな知見が得られた等	8

その他	1
-----	---

○満足度（5段階）

内容	回答数
5	10
4	10
3	1

○感想・意見（自由記述）

全体の感想	<ul style="list-style-type: none"> ・水インフラに寄与する森林の役割について、このようにまとまった議論の場が一般向けに行われることは、とても有意義。今後の研究の進展・進捗についても随時一般向けにもわかりやすく公開されると有意義 ・当シンポが最も内容の濃い学びの多いものでした。パワポ資料の印刷配布もありがたかった ・皆が力を合わせて取り組むことの大切を学びました
今後重要な研究・取組	<ul style="list-style-type: none"> ・気候変動下での水資源確保と防災対策、温暖化対策を多目的に達成可能な流域森林管理技術の確立 ・その土地に適した自然植生や天然林に近い樹種の森林、多様な樹種が混合している森林での、土壌侵食土砂災害への抵抗性のデータ ・地域ごとの特性を理解し、その流域の地域性を考えたうえで、それぞれの流域に合った水資源管理を行う取組 ・（研究成果の施策に対する？）意思決定への反映などの社会実装の試み ・中山間地域における里山を守っている人々や予算 ・日本の経験や技術、研究のアジア太平洋地域での共有の状況やその将来展望、逆にアジア太平洋地域から日本が何を学べるかについての議論 ・熊本の職業訓練校などへの環境分析コースの新設
開催方法への意見	<ul style="list-style-type: none"> ・会場の外にも座って見られる巨大モニターなどあれば、街に出掛けている市民にも内容を共有できる ・オンライン参加ができる機会は毎年あっても良い

VIII. 検討委員会の開催

1. 検討委員の選定

本業務においては、「①定量的な分析が可能な流出モデル（SWAT）を用いて、②土地条件や森林の状態による水収支や土砂・栄養塩量の変化を分析し、③有明海等の環境保全に資する森林整備の方向性を検討する」こととしている。このため、調査を適切に進めるためには、①については、モデルを用いた水文解析、②については、水・土砂・栄養塩の流出動態、③については、有明海等の海域環境への影響評価について、専門家からの助言を得ることが重要である。さらに、昨年度委員会で議論された内容も踏まえる必要があることから、学識経験者を選定した。

検討委員として協力いただいた専門家を以下に示す。

氏名	所属	専門分野
落合 博貴 (座長)	一般社団法人 日本森林技術協会 技術指導役	土砂流動解析、降雨にともなう土砂流出、斜面崩壊
小野寺 真一	広島大学 大学院総合科学研究科 教授	流出モデル、地下水動態、栄養塩
小林 政広	国立研究開発法人 森林研究・整備機構 森林総合研究所 立地環境研究領域 土壌特性研究室 室長	森林土壌中の水・物質の移動・貯留 (環境省有明委員)
清水 貴範	国立研究開発法人 森林研究・整備機構 森林総合研究所 森林防災研究領域 水保全研究室 室長	森林での水収支、蒸発散、森林気象
田井 明	九州大学大学院 工学研究院 環境社会部門 准教授	海域環境、河川の流出モデル
杉松 宏一 ※今年度新任	国立研究開発法人 水産研究・教育機構 水産技術研究所 環境・応用部門 沿岸生態システム部 有明海・八代海グループ 主任研究員	海洋生体、海洋環境、海洋水質

2. 開催概要

検討委員会を以下のとおり開催した。説明資料と議事録は、巻末資料に示す。委員からの指摘事項等については、調査内容を適切に修正する等の対応を行い、次回委員会でその報告を行った。

会議名	開催日時	会場	議事
第1回 検討委員会	令和4年 7月25日(月) 13:30~15:30	日本森林技術協会5階中会議室・Zoom(ハイブリッド)	(1) 令和3年度調査結果(ご報告) (2) 令和4年度調査計画 (3) その他
第2回 検討委員会	令和4年 11月25日(金) 13:30~16:00	日本森林技術協会3階大会議室・Zoom(ハイブリッド)	(1) 現地調査 (2) モデル構築・精緻化 (3) 長期的傾向の把握手法検討 (4) 次年度以降の調査方針(案) (5) その他
第3回 検討委員会	令和4年 2月24日(金) 13:30~16:00	日本森林技術協会5階中会議室・Zoom(ハイブリッド)	(1) 現地調査 (2) モデル構築・精緻化 (3) 長期的傾向の把握手法検討 (4) 次年度以降の調査方針(案) (5) その他

IX. 次年度以降の調査計画

1. 次年度以降の調査計画（案）

今後、他の流域についても順次モデルの構築・精緻化を進め、林齢や針広割合等の森林の変化による影響も含めたシナリオ分析を行い、最終的には有明海等の海域全体に対する森林の水源涵養機能等を評価するとともに、海域に良好な影響を与える理想的な森林管理のあり方について検討し、施策に反映する必要がある。

このため、次年度の調査では、現地の状況を十分に把握したうえで、今年度調査で明らかとなった課題を解決し、精緻化を図る必要がある。

また、海域への影響を評価するためには、森林と海域を繋ぐ河川の流量や水質の流出状況を把握していくことも重要であるが、流量や水質は季節変化が大きいことから、長期的な調査を行い情報として蓄積していく必要がある。そのため、今年度調査で整理した手法を用いて今後も継続的に現地から情報を取得する。

これらを踏まえた具体的な調査項目（案）は、次のとおり。

- 球磨川流域・筑後川流域の流出モデルの精緻化
 - ・ 水質調査（雨水、河川）
- 長期的傾向把握の試行調査
 - ・ 公開データの収集整理
 - ・ 調査箇所の選定
 - ・ 計測機器等の選定・設置
 - ・ 試行結果の整理
- 成果の公表に係る対応
 - ・ 第10回世界水フォーラム

2. 今後の方針

本調査の当面の方針案は、以下のとおり。

【モデルの構築・精緻化】

- ・ 森林が海域に与える影響を大局的にとらえる観点から、有明海・八代海に流入する一級河川について、各流域におけるモデルの構築を進めて評価を行う。なお、モデル構築に当たっては、森林の割合が高い流域等、森林が海域に及ぼす影響が比較的大きいと見られる流域を優先して行う。
- ・ モデルの精緻化については、森林の影響が大きいと見られる流域については、モデルの精度を踏まえた上で適宜修正を行うが、影響の小さい流域での精緻化については今後の状況を踏まえて検討する。

【森林管理のあり方の検討等】

- ・ 林齢等の変化が水源涵養機能、土砂流出防止機能、物質貯留機能、水質浄化機能等へ与える影響について、構築モデルを用いたシミュレーションを行い、その結果の分析・評価を踏まえ、水量・水質の両面において、海域に良好な影響を与える理想

的な森林管理のあり方を検討する。

- ・シミュレーションは、森林の影響が大きいと見られる流域を中心に行うとともに、同一流域内の過去の森林と現在の森林の状態を比較し評価も行う。なお、土地利用の変化、砂防ダムの設置等、森林以外の状況も過去と現在とでは異なることに留意する。

【成果の公表】

- ・SWAT モデルは他国でも広く用いられていることから、日本の森林で適用するための、検討結果について公表することにより、成果の情報共有を行う。
- ・また、日本と気候や地質等が近い国・地域においても、本事業で構築したモデルやパラメータを活用し、森林整備が流域・海域に与える影響の評価について寄与することが期待される。
- ・環境省がとりまとめる「有明海・八代海等総合調査評価委員会」に向けて調査内容をとりまとめていく必要があり、令和6年度に調査・研究成果等のとりまとめ（案）の検討や作成を開始するとともに、令和8年度にとりまとめ（案）の審議が予定されていることから、それを見据え、次年度の調査において一定程度のとりまとめを行う。

また、これらの方針に基づいて調査を進めるには、各種データの入力様式を含むモデル構築手順やパラメータの種類と設定値、分析方法などをまとめたマニュアルの整備や、効果的・効率的な現地調査・長期的データの収集方法を確立することが重要と考えられる。

X. 巻末資料

1. SWAT モデルについて

本事業で有明海・八代海に注ぐ第一級河川流域の解析・評価に用いている SWAT (Soil-Water Assessment Tool) モデルの概要を記す。

1.1 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、似通った水文の挙動を示す HRU (Hydrologic Response Unit : 水文応答単位) ごとに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 X-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とされている。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。

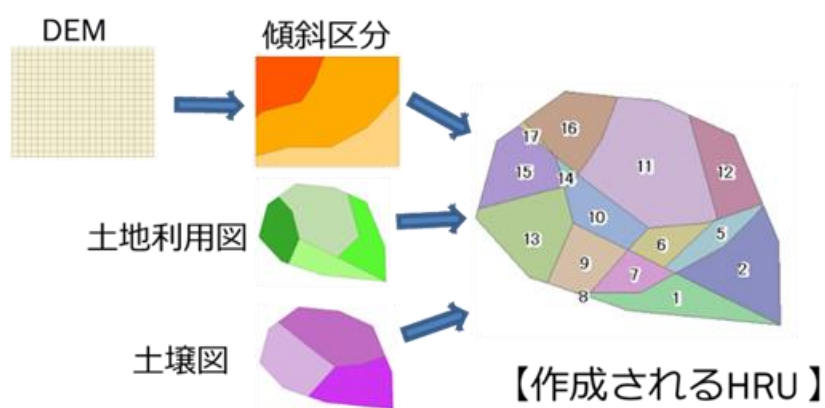


図 X-1 HRU の概略図

1.2 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 X-1 と図 X-2 のとおりである。

表 X-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

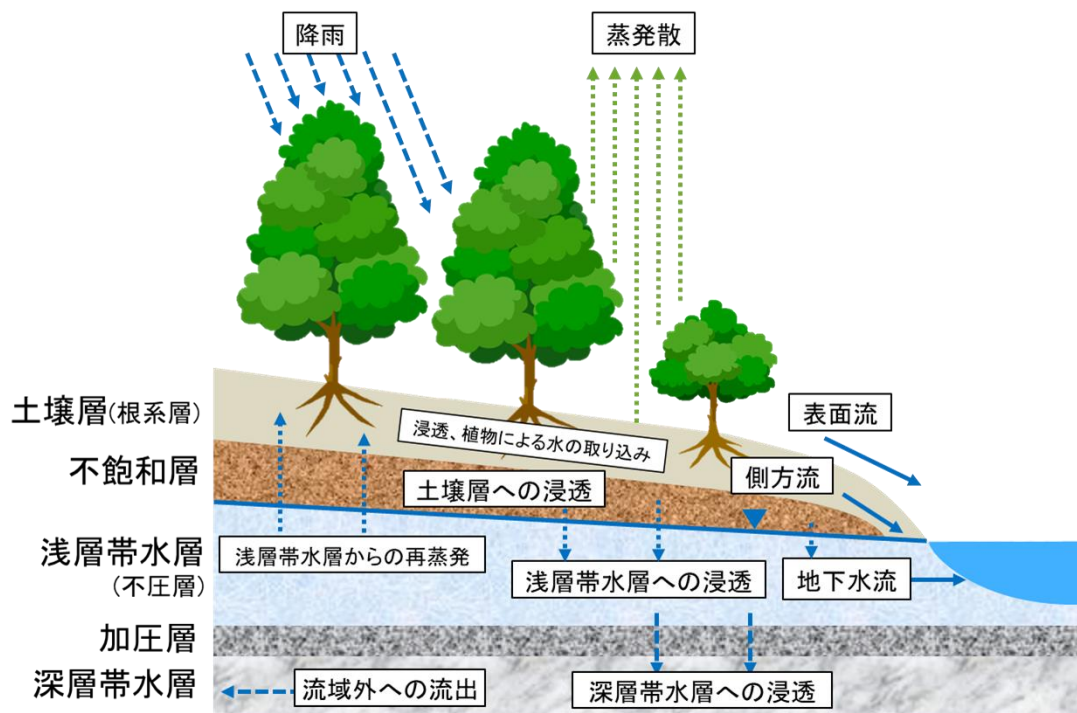


図 X-2 SWAT モデル内部で考慮される水文プロセスのイメージ

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 X-2 と表 X-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 X-2 蒸発散の算出方法

算出方法	概要
Penman-Monteith (ペンマン・モンティース) 法	<ul style="list-style-type: none"> • 水面蒸発量の測定法である Penman 式に植物生理学的プロセスを付加した方法であり、降雨で樹冠が濡れている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 X-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。

1.3 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 X-3 に示す。

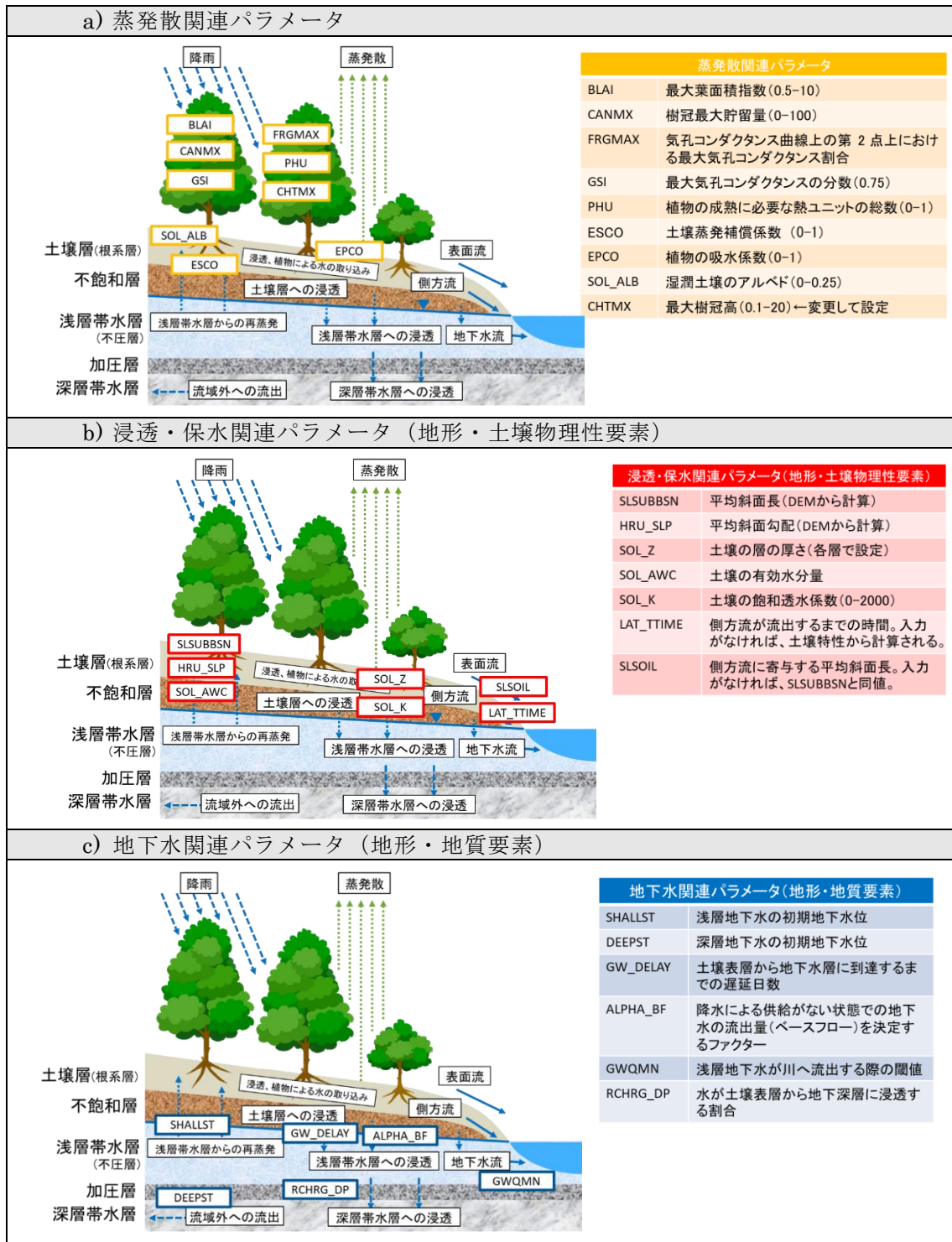


図 X-3 SWAT モデルの各水文プロセスに関連するパラメータ

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、既往の文献をもとにキャリブレーションを行うことにより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ものであることから、本事業において特に留意すべきパラメータともいえる。

1.4 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 X-4 に示す。

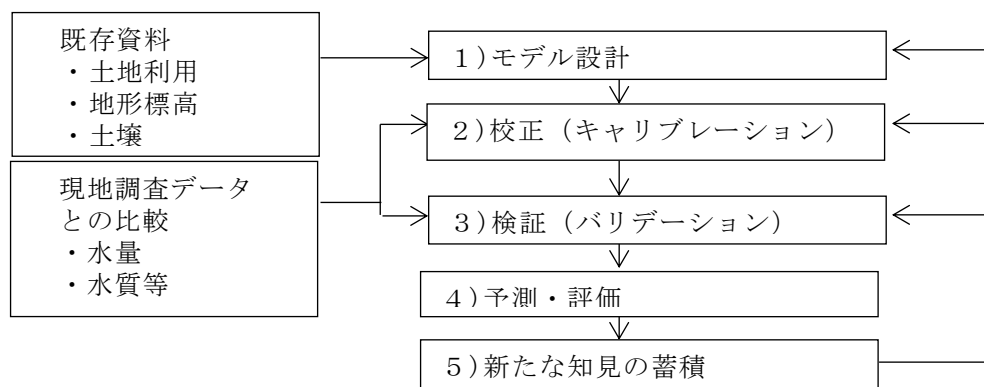


図 X-4 基本的なモデル構築フロー

1.5 キャリブレーション・バリデーション

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を比較し、実測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る。また、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であり、バリデーションという。

キャリブレーションやバリデーション結果の評価には、決定係数や Nash Sutcliffe Efficiency (NSE) など各種存在する評価指標が持ちられ（表 X-4）、一定の基準値を下回る場合は、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 X-4 評価指標と評価基準 (Moriassi et al. (2015)より引用)

Performance Rating	RSR	NSE			PBIAS(%)		
		Streamflow	Sediment	N, P	Streamflow	Sediment	N, P
Very Good		NSE>0.80	NSE>0.80	NSE>0.65	PBIAS<±5	PBIAS<±10	PBIAS<±15
Good	0.50<RSR≤0.60	0.70<NSE≤0.80	0.70<NSE≤0.80	0.50<NSE≤0.65	±5≤PBIAS<±10	±10≤PBIAS<±15	±15≤PBIAS<±20
Satisfactory	0.60≤RSR≤0.70	0.50<NSE≤0.70	0.45<NSE≤0.70	0.35<NSE≤0.50	±10≤PBIAS<±15	±15≤PBIAS<±20	±20≤PBIAS<±30
Unsatisfactory	RSR>0.70	NSE≤0.50	NSE≤0.45	NSE≤0.35	PBIAS≥±15	PBIAS≥±20	PBIAS≥±30

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：流量のばらつきの大きさを示す指標。

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とバリデーションの基本的な作業フローを図 X-5 に示す。まず水収支についてキャリブレーションを行い、バリデーションで一定以上の評価 (satisfactory 以上) の結果が得られた後に、土砂流出量、栄養塩流出量の順にこれらの作業を繰り返す。

なお、これらの順番で作業を実施する理由は、土砂出量は水収支に、栄養塩量は水収支と土砂出量の影響を強く受けることから、影響の大きいパラメータから値を確定することで、作業の効率化を図るためである。

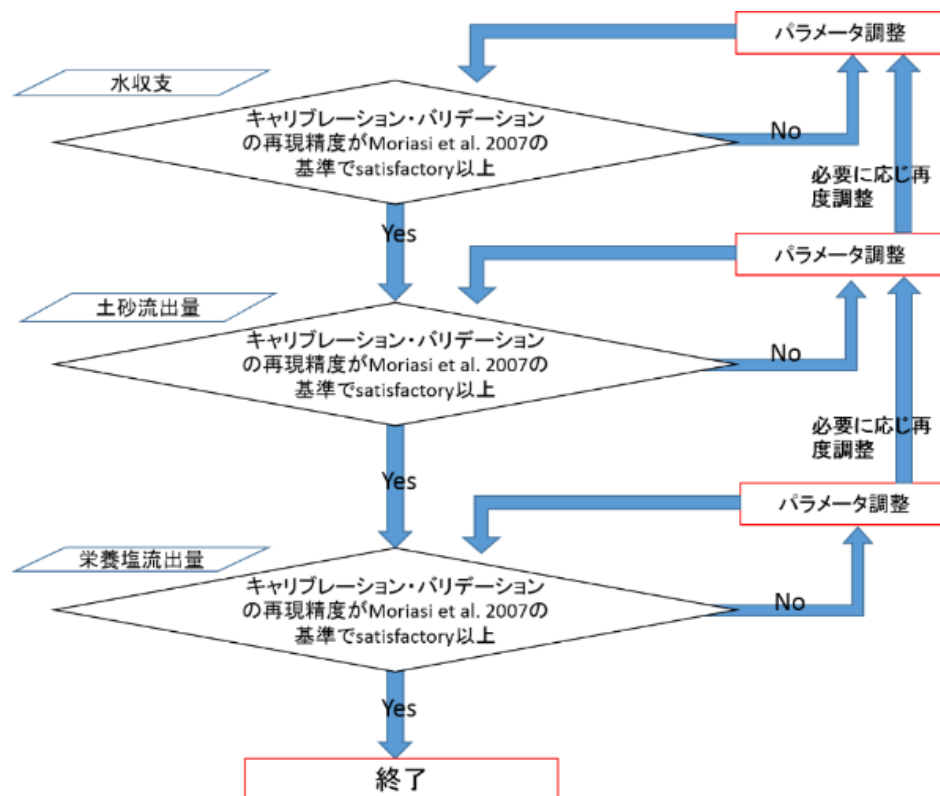


図 X-5 キャリブレーション・バリデーションの作業フロー

キャリブレーションには、専用ソフトウェアである SWAT-CUP2019 を利用し、SUFI2 のアルゴリズムで実施している（図 X-6～図 X-7）。

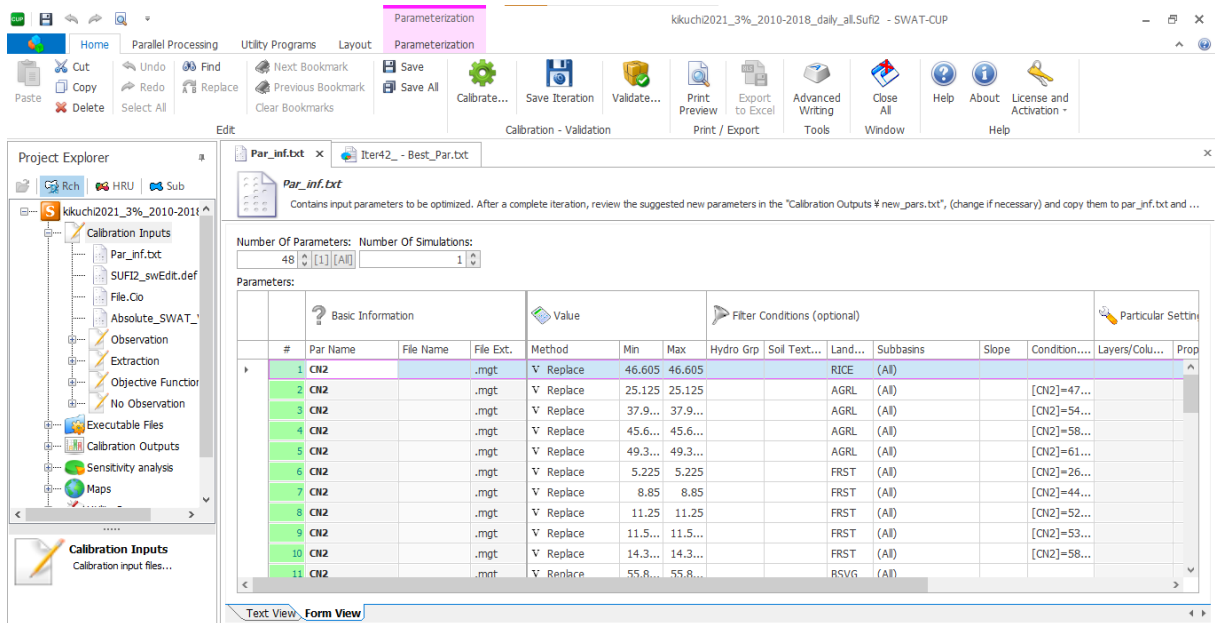


図 X-6 SWAT-CUP を用いたパラメータの設定画面

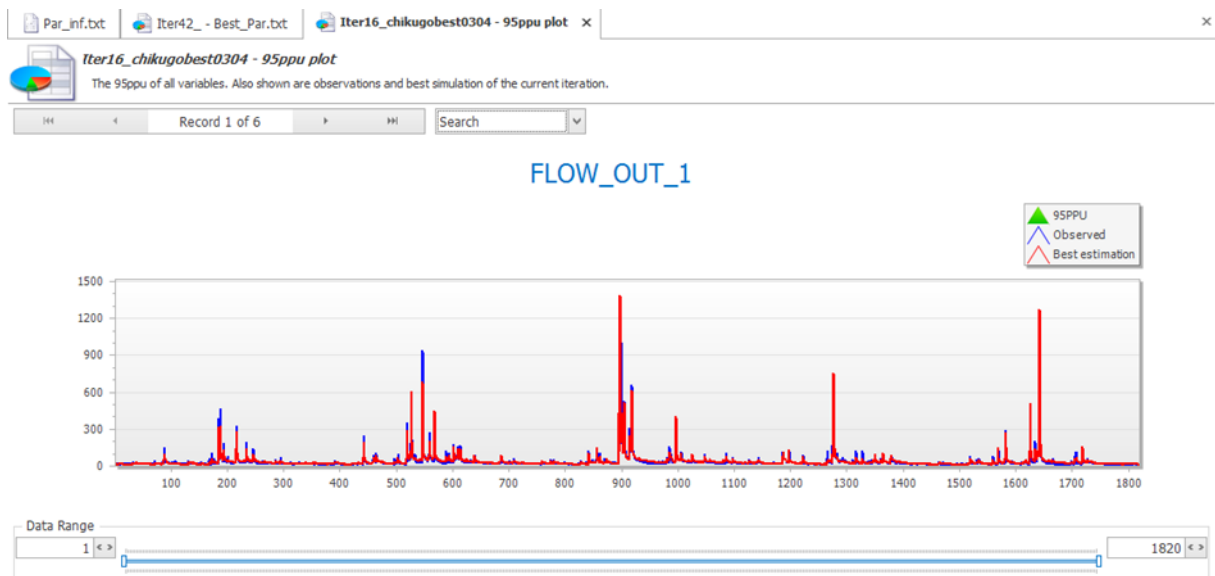


図 X-7 SWAT-CUP を用いた流量実測値と推定値の比較