

地域レベルにおける気候変動シナリオを 考慮した流域資源評価手法の構築

-福島県三島町における気候変動の影響と緩和策の総合評価の提案-

2024 年

菊池 翔太郎

目次

第 1 章 序論	1-1
第 1 節 研究の背景	1-1
1.1.1 気候変動の影響の顕在化	1-1
1.1.2 地方自治体の計画策定義務と影響評価研究の必要性	1-3
1.1.3 小規模流域における気候変動対策への課題	1-6
第 2 節 本研究の目的と方針	1-8
1.2.1 研究目的	1-8
1.2.2 研究方針	1-8
第 3 節 論文構成	1-10
第 2 章 モデルの選定と検証	2-1
第 1 節 背景	2-1
第 2 節 解析方針	2-2
第 3 節 研究対象地及び解析方法	2-3
2.3.1 対象流域	2-3
2.3.2 解析モデルのタイプと選定	2-4
2.3.3 SWAT+モデルの概要	2-7
第 4 節 SWAT+モデルの構築	2-11
2.4.1 データの収集	2-11
2.4.2 パラメータの設定	2-16
第 5 節 モデルの検証	2-21
2.5.1 パラメータの調整結果	2-21
2.5.2 自動キャリブレーションによる補正	2-23
2.5.3 精度検証	2-25
第 6 節 考察	2-28
第 7 節 まとめ	2-30
第 3 章 冬期の気候変動による降雪・融雪への影響評価	3-1
第 1 節 本章の背景・目的	3-1
3.1.1 積雪寒冷地の森林地帯における気候変動の影響	3-1
3.1.2 三島町の気候変動による気候条件の変化	3-3
3.1.3 積雪寒冷地および融雪・降雪に関する文献	3-5
3.1.4 本章の目的	3-6
第 2 節 解析方法	3-7
3.2.1 気候変動シナリオの検討	3-7
第 3 節 解析結果	3-17
3.3.1 降雪・融雪への影響	3-17
3.3.2 春先の流量	3-19
第 4 節 考察	3-21
第 5 節 まとめ	3-23

第 4 章	気候変動を考慮した森林の機能と災害リスクの評価	4-1
第 1 節	本章の背景・目的	4-1
4.1.1	気候変動下の災害に対する自然を活用した対応	4-1
4.1.2	森林伐採と貯水機能の関係	4-2
4.1.3	森林機能の解明の限界	4-4
4.1.4	本章の目的	4-4
第 2 節	解析方法	4-5
4.2.1	三島町における土地利用シナリオ	4-5
第 3 節	解析結果	4-9
4.3.1	森林の貯水機能	4-9
4.3.2	土砂流出量	4-12
第 4 節	気候変動による影響	4-14
第 5 節	考察	4-16
第 6 節	まとめ	4-17
第 5 章	気候変動を考慮した再生可能エネルギー（小水力）の ポテンシャル評価	5-1
第 1 節	本章の背景・目的	5-1
5.1.1	背景	5-1
第 2 節	解析方法	5-5
5.2.1	計算条件（SSPシナリオと確率降雨）	5-5
5.2.2	発電量の計算方法	5-6
5.2.3	3年・10年確率降雨の計算	5-8
第 3 節	解析結果	5-10
5.3.1	気候変動シナリオを考慮した発電量	5-10
5.3.2	3年・10年確率降雨における発電量	5-12
第 4 節	考察	5-15
第 5 節	まとめ	5-17
第 6 章	地域レベルにおける気候変動シナリオを考慮した流域 資源評価手法の構築	6-1
第 1 節	本章の背景・目的	6-1
6.1.1	研究背景	6-1
6.1.2	研究目的	6-6
第 2 節	評価方法	6-7
6.2.1	条件設定	6-7
6.2.2	評価手順	6-9
第 3 節	評価結果	6-11
6.3.1	各指標の相対評価の実施	6-11
6.3.2	各指標の総合評価	6-22
6.3.3	トレードオフ分析と流域資源管理の提案	6-24
6.3.4	流域資源評価シート作成	6-25
第 4 節	考察	6-27
第 5 節	まとめ	6-28
第 7 章	総括	7-1
第 1 節	研究概要	7-1

第 2 節 今後の課題 7-3

要旨
Summary
謝辞

図目次

図	1-1	温暖化に伴う極端な気象現象の増加	1-2
図	1-2	森林伐採の理由は農地拡大が7割以上	1-3
図	1-3	地域気候変動適応計画策定の構図（環境省）	1-4
図	1-4	策定年別の地域適応策の定量指標の計画割合	1-5
図	1-5	文部科学省諸プログラムの位置づけ	1-6
図	1-6	流域資源の総合評価手法開発とそのフロー	1-9
図	1-7	論文構成	1-10
図	2-1	研究対象地（福島県三島町埴子沢）	2-3
図	2-2	SWAT+の機能とモデル構築	2-8
図	2-3	対象流域におけるHRU	2-8
図	2-4	標高データ（赤枠：対象地の小流域、青線：支川）	2-12
図	2-5	土地利用図	2-13
図	2-6	土壌分布図	2-14
図	2-7	月別降水量	2-16
図	2-8	デフォルト値を使用したシミュレーション結果	2-22
図	2-9	パラメータ調整後のシミュレーション結果	2-22
図	2-10	実測値との推定値の相関比較	2-23
図	2-11	自動キャリブレーションによる補正結果	2-24
図	2-12	自動キャリブレーション後の相関	2-25
図	2-13	各計算値のNSE	2-26
図	2-14	各計算値のRMSE	2-27
図	2-15	日本土壌インベントリ（農研）データをパラメータ に入力	2-29
図	3-1	北半球の積雪面積の推移	3-2
図	3-2	地球温暖化の進行と気候システムの変化	3-2
図	3-3	地表面の温度変化と積雪範囲の変化率	3-3
図	3-4	1980-2020年平均気温（金山町）	3-4
図	3-5	1980-2020年、降雨量（金山町）	3-4
図	3-6	1980-2020年、降雪量（金山町）	3-5
図	3-7	各シナリオに基づく平均気温上昇	3-9
図	3-8	5つのシナリオに基づく将来のCO ₂ 排出量	3-9
図	3-9	CO ₂ 排出量と世界の平均気温の上昇（℃）	3-10
図	3-10	A-PLATの構成図 ¹²	3-11
図	3-11	NIES2020によりダウンスケールされた日降雨量分布	3-12
図	3-12	各シナリオの2020と2090年の変化量（最高気温）	3-14
図	3-13	各シナリオの2020と2090年の変化量（最低気温）	3-14
図	3-14	各シナリオの2020と2090年の変化量（相対湿度）	3-15
図	3-15	各シナリオの2020と2090年の変化量（日射量）	3-15
図	3-16	各シナリオの2020と2090年の変化量（降雨量）	3-16
図	3-17	各シナリオの降雪・融雪量（1~3月）	3-17
図	3-18	降雪・融雪の日数（1~3月）	3-18
図	3-19	各シナリオの流量と降雨量（1~3月）	3-19

図 3-20	各シナリオの流量推移（1～3月）	3-20
図 4-1	NbS、EbA、Eco-DRR の概念の相互関係	4-1
図 4-2	森林の浸透能	4-3
図 4-3	森林の土砂災害防止機能・土壌保全機能	4-3
図 4-4	三島町ゼロカーボンビジョンの取組・意義	4-5
図 4-5	三島町の耕作地と荒廃農地面積推移（ha）	4-7
図 4-6	福島県三島町の森林面積推移（ha）	4-7
図 4-7	土地利用変化	4-8
図 4-8	流出量（森林面積 99% & 95%）	4-9
図 4-9	流出量 7～8月（森林面積 99% & 95%）	4-10
図 4-10	表面流出	4-11
図 4-11	側方流	4-11
図 4-12	降雨量と流量の相関	4-12
図 4-13	月別の土砂流出量	4-13
図 4-14	SSP 毎の年平均と最大流量（森林面積 99%と 95%）	4-15
図 4-15	SSP 毎の流量（森林面積 99%）	4-15
図 4-16	SSP シナリオ毎の流量（森林面積 95%）	4-16
図 5-1	再生可能エネルギー情報提供システム（REPOS）	5-2
図 5-2	福島県三島町の小水力ポテンシャル（河川）	5-2
図 5-3	発電機水車の形式	5-6
図 5-4	水車選定表	5-7
図 5-5	Gumbel 分布関数式を用いた年間降雨量	5-9
図 5-6	各 SSP における月別流量	5-10
図 5-7	各 SSP における月別発電量	5-11
図 5-8	各シナリオにおける年間発電量	5-11
図 5-9	各確率降雨における月別流量	5-12
図 5-10	各確率降雨における月別発電量	5-13
図 5-11	各確率降雨における年間発電量	5-13
図 6-1	IUCN の NbS の取組に関する世界標準	6-3
図 6-2	NbS の検討とエコシステムと社会経済システムの関係	6-4
図 6-3	地域循環共生圏の 3 原則	6-5
図 6-4	気候変動における災害リスク、自然の機能、緩和策	6-7
図 6-5	流域資源の評価手順	6-10
図 6-6	気候変動による気候条件の変化（年間）	6-12
図 6-7	冬期における気候変動による気候条件の変化	6-13
図 6-8	森林面積 99%と 95%の災害リスク指標の比較	6-14
図 6-9	2020 年（森林 99%）の気候変動下の災害リスク指標	6-15
図 6-10	2020 年（森林 95%）の気候変動下の災害リスク指標	6-15
図 6-11	森林面積 99%と 95%の各シナリオの傾向比較	6-16
図 6-12	各確率降雨における年間発電量（表 5-10 再掲）	6-19
図 6-13	再エネポテンシャルの達成度	6-21
図 6-14	気候変動の影響を踏まえた流域資源評価シート	6-26

表目次

表 2-1	各モデルの特徴	2-5
表 2-2	準分布・分布型モデルの機能比較比較	2-6
表 2-3	取得データ一覧	2-11
表 2-4	流域内の土地利用	2-13
表 2-5	含水率、EC、pH、強熱減量、比重 透水率	2-14
表 2-6	粒度分布 (g)	2-15
表 2-7	粒度分布 (%)	2-15
表 2-8	NIES 提供データ	2-15
表 2-9	土壌パラメータ (森林褐色土) 上部	2-17
表 2-10	土壌パラメータ (森林褐色土) 下部	2-18
表 2-11	土壌パラメータ (黒ボク土)	2-19
表 2-12	降雪・積雪・融雪のパラメータ	2-20
表 2-13	計算の設定条件	2-21
表 2-14	各計算値のNSE&RMSE一覧(月別&通年)	2-27
表 3-1	SSPシナリオの概要	3-8
表 3-2	適用シナリオ概要	3-12
表 3-3	各シナリオの2020と2090年の通年変化量	3-16
表 3-4	各シナリオの2020と2090年の冬期(1-3月)変化量	3-16
表 3-5	各シナリオにおける総計(1~3月)	3-18
表 4-1	三島町の再生可能エネルギーの目標値	4-6
表 4-2	ピーク流量の比較	4-10
表 5-1	水車形式と適用流量	5-8
表 5-2	月別の平均流量(全ケース)	5-14
表 5-3	月別の発電量(全ケース)	5-14
表 6-2	NbSのアプローチ分類	6-2
表 6-3	評価指標	6-8
表 6-4	想定シナリオ	6-9
表 6-5	三島町の再エネの目標値(表3-1再掲)	6-9
表 6-6	対象流域における目標	6-16
表 6-7	対象流域における再エネ目標達成率	6-21
表 6-8	総合評価の結果	6-23

第1章 序論

第1節 研究の背景

1.1.1 気候変動の影響の顕在化

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) の第6次評価報告書 (AR6) によれば、気温が 2°C 上昇する場合、降雨強度が 14% 強まり、10 年確率降雨の頻度も 1.7 倍となることが示されており、更に気温が 4 °C まで上昇する場合には、降雨強度は 20.2%、10 年確率降雨の頻度は 2.7 倍になると予想されている。世界の水循環が地球規模の気温上昇とともに強まり続けるという証拠が強まっており、降水量と地表水の流れは、季節の陸域の地域でより変動が年々大きくなる可能性が高い⁴。

2015 年に採択されたパリ協定では、平均気温上昇を産業革命前と比較して 2°C 未満に抑え、1.5°C に近づけることが主要な目標となり、日本は、2015 年 7 月に自国が決定する貢献案注 (INDC : Intended Nationally Determined Contribution) を決定し、気候変動枠組条約事務局へ提出している。また、地球温暖化対策計画に基づき、2030 年度に 2013 年度比 26% 減の温室効果ガス削減目標を定めており、26% の内の 2% を森林吸収源対策により確保することとしている¹。

他方、人為的な土地利用改変による森林生態系の劣化・消失は続き、世界の毎年 520 万ヘクタールの森林が減少し、気候変動影響を強める温室効果ガス排出の原因となっている²。その原因の大部分は農業活動である³。

そうした中で、国際自然保護連合 (IUCN) は Nature-based Solutions (NbS) を提案し、自然の機能を活用した防災・減災対策について、世界的に注目が集まっている。

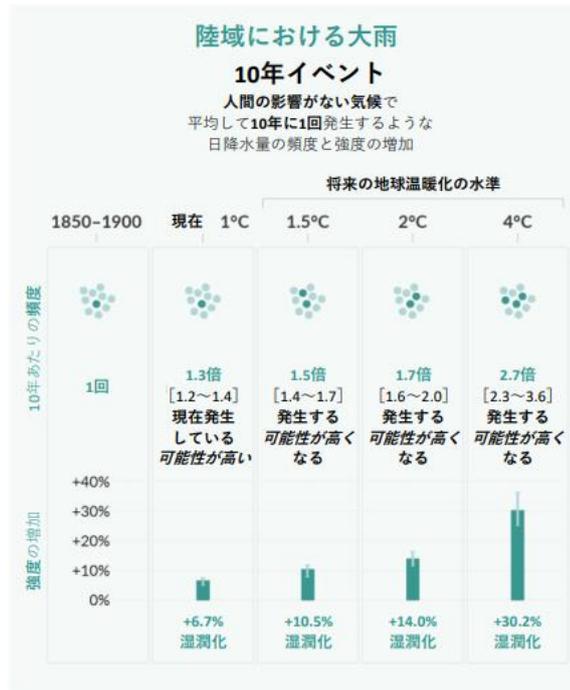
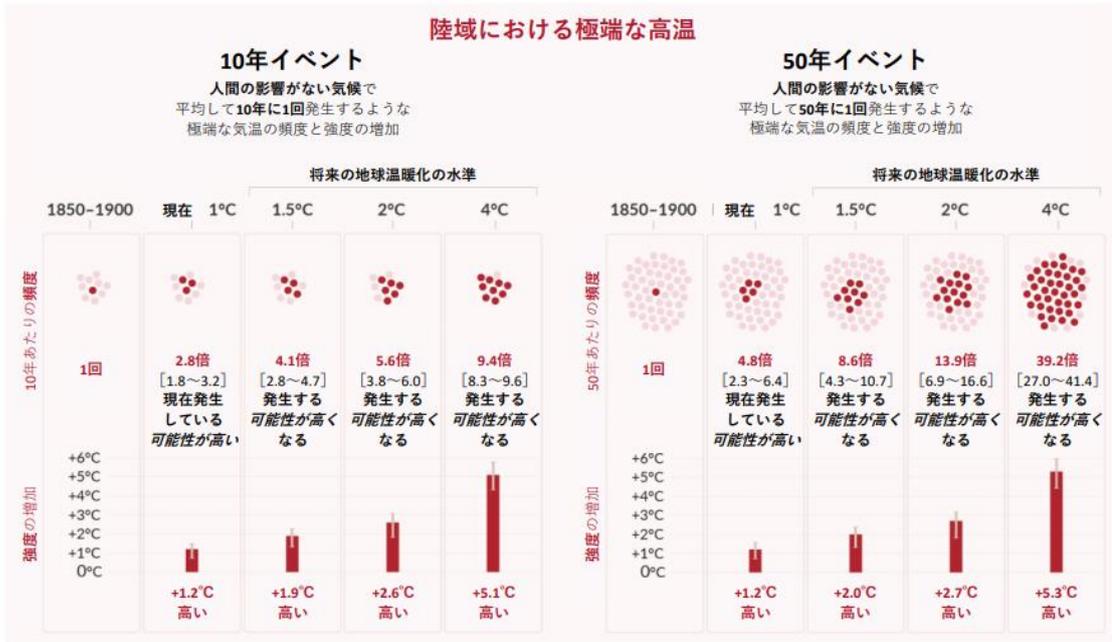


図 1-1 温暖化に伴う極端な気象現象の増加⁴

a) Proportion of deforestation drivers

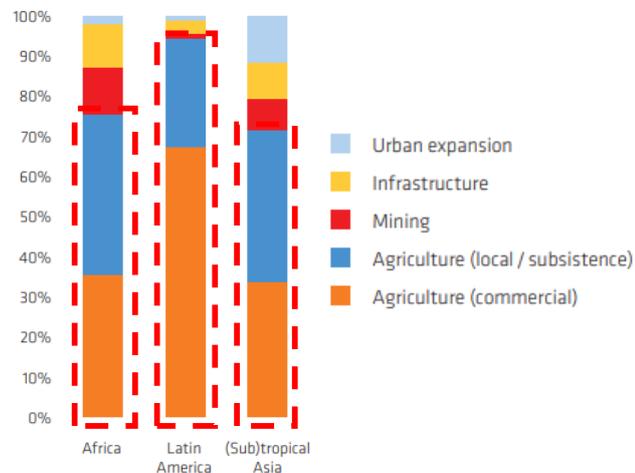


図 1-2 森林伐採の理由は農地拡大が 7 割以上

引用：A Synthesis Report for REDD+ Policymakers (2012)

1.1.2 地方自治体の計画策定義務と影響評価研究の必要性

(1) 地方自治体の適応計画策定義務

NbS といった国際的な動きに注目が集まる一方で地域レベル（地方自治体）では、より実践的な側面において気候変動対策の課題を抱えている。例えば、地域レベルにおける気候変動の適応策の検討は地域の様々な地理・生態・社会経済・文化の実情に沿って、地元の理解を得ながら実施しなければならないという、適応に関する特徴がある⁵。しかし、現在の気候変動の進行を鑑みるに、地域レベルにおいても迅速かつ幅広い分野で、きめ細かく早期に取り組まなければならない⁶。そうした課題がある中で、英国、ドイツ、米国などの先進国では、IPCC への貢献を考慮して、自国における「気候変動の影響と気候変動への適応」の規定と自治体レベルの計画を策定した⁷。それを追従するかたちで、日本も 2018 年 12 月に気候変動適応法（平成 30 年法律第 50 号）を施行し、地方自治体に対する気候変動適応計画の策定の努力を義務付けた。一方、緩和策では、地球温暖化対策推進法に基づき、地球温暖化対策計画に即して、地方公共団体実行計画を策定しなければならない（図

1-3)。

その結果として、2024年2月現在時点で、都道府県47件、政令市20件、市区町村196件、合計263件の地域気候変動適応計画を策定されたが、その内、策定の評価指標を設定している割合は4割程度となっており、市町村レベルにおいては計画評価に関する支援が必要である(図1-4)。

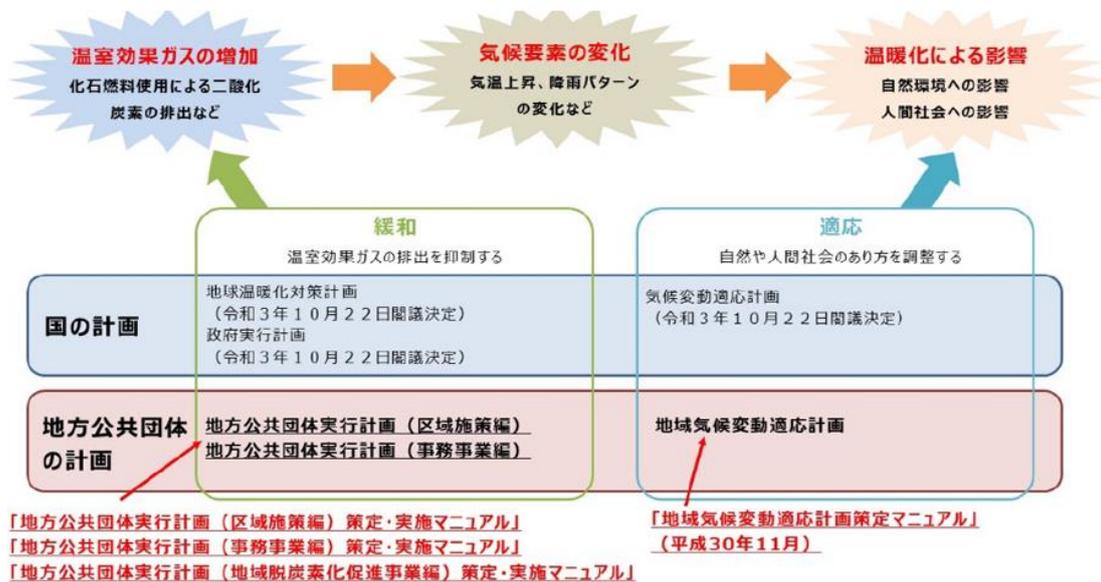


図 1-3 地域気候変動適応計画策定の構図(環境省)⁸

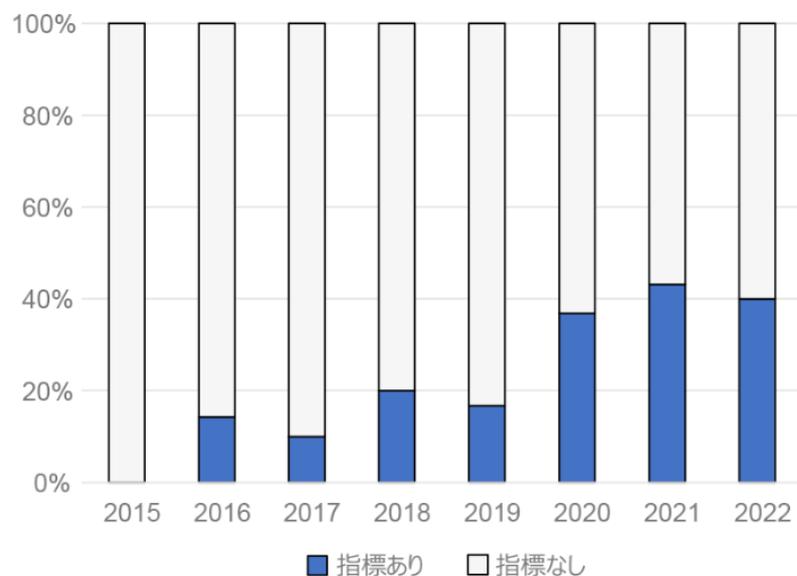


図 1-4 策定年別の地域適応策の定量指標が設定されている計画割合⁹

(2) 適応策を検討するための研究と情報の不足

また、2015 年度から文部科学省の気候変動適応技術社会実装プログラム (Social Implementation Program on Climate Change Adaptation Technology: SI-CAT) がスタートし、研究者と自治体関係者等が協力して将来必要となる適応策とそのための技術開発が国家プロジェクトとして実施された (図 1-5)¹⁰。

しかしながら、気候変動適応センターが運営する「気候変動適応情報プラットフォーム(A-PLAT)」等、取組はなされているものの現時点では日本の地方レベルの自治体では具体的な適応策を検討するための情報が不足しており¹¹、現在も気候変動の将来予測、その地域レベルへのダウンスケール、その結果を踏まえた地域への影響予測、地域特有の脆弱性とリスク評価、対策技術、社会実装など、多岐に渡る研究と活動が求められており¹²、地方公共団体の希望する解像度 (市区町村レベルや特定の場所) での情報提供が期待されている¹⁰。

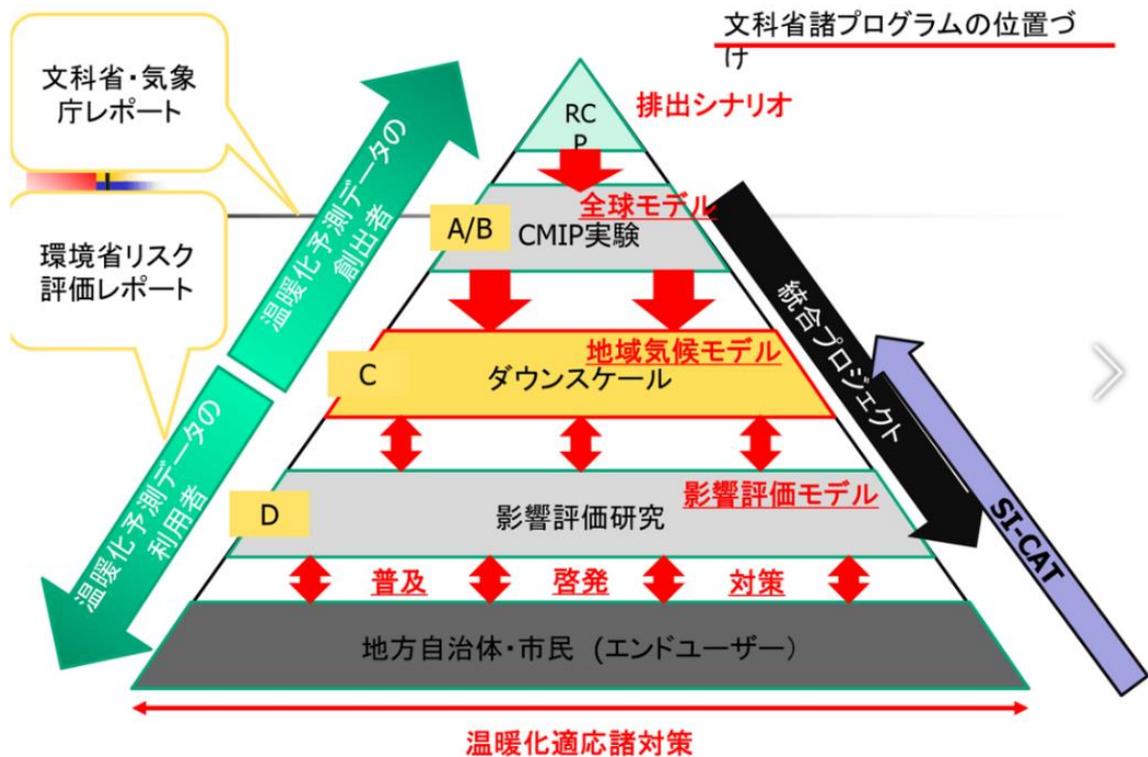


図 1-5 文部科学省諸プログラムの位置づけ
 (統合的気候モデル高度化研究プログラム公開シンポジウム¹⁰⁾)

1.1.3 小規模流域における気候変動対策への課題

近年、気候変動の影響で降雨や降雪の時期、確率降雨、融雪時期に変化が現れてきており、特に洪水外力は既に大きく変化しており、地方自治体においても早急な対応が求められている。令和3年10月22日に閣議決定された気候変動適応計画¹³では、気候変動により頻発化・激甚化する水災害に対して、気候変動を考慮した計画に見直すことや、流域治水の推進に当たっては、自然環境が有する多様な機能を活用し、災害リスクの低減に寄与する自然の機能を積極的に保全又は再生することが掲げられている。しかし、その効果は小流域毎に異なるため、機能の

正確な把握が重要である。

一方、農業用水については、気候変動による降水・融雪のパターンの変動や、土地利用や水稲の作付け時期の変化が予測される状況下で安定的に農業用水を確保するためには、気候変動による影響と流域の循環特性に基づいた水利用計画の策定が必要となるが、小規模流域においては、それらを考慮した水利計画の策定は課題である。

他方、地方の流域管理では地域活性化といった経済と連携した持続的な流域管理が必要であり、小流域での検証が必要であるとされている¹⁴。地方の小さな自治体ほど自然エネルギーのポテンシャルが大きく、特に農村部は風力、太陽光、バイオマス、地中熱など多くの自然エネルギー資源があるとも言われており¹⁵、上述の通り（図 1-3）、地方自治体における緩和策の検討が義務付けられるなかで、流域内の資源を有効活用し、自治体は再生可能エネルギーの推進と地域活性化を合わせて考える必要がある。特に、気候変動の影響は過疎化や少子高齢化が進展する地域で深刻化すると考えられることから、さらに低密度地域に着目した今後の研究の追加も必要である¹⁶。最後に地方自治体は包括的かつ早急な対応が求められているが、特に小規模な流域（小規模な自治体）においては、対策に投入するリソースが豊富にあるわけではないため、選択と集中を行う必要がある²⁵、総合的な評価に基づいた計画策定が必要である。

第2節 本研究の目的と方針

1.2.1 研究目的

地方自治体の気候変動適応計画の策定努力は義務付けられたが、気候変動モデルに基づく、地域レベルの影響評価の研究については必ずしも十分とは言えない。その中でも、小規模な自治体は気候変動の影響を受けやすく、異常気象による影響は顕在化している中で、水災害に関連した対策については早急な対応が求められており、かつ再生可能エネルギー等の地域資源を活用した地域活性化が重要である。そのため、その地域における気候変動の影響および対策の効果を明確にし、持続可能な流域管理を推進するための総合的な評価手法を検討することが重要であり、その結果として、気候変動シナリを踏まえた水循環の健全性や流域マネジメントの取組みの効果を「見える化」することで、質の向上を図ることが可能になると考える。

本研究は、小規模の流域資源の管理に着目し、地域レベルにおける気候変動を考慮した流域の災害リスクと自然の機能、気候変動の緩和策（再生可能エネルギー）の効果を定量分析し、それらの関係を整理し、流域資源の総合的な評価手法を提案する。

1.2.2 研究方針

評価手法の提案までのフローを図 1-6 に示す。まず、想定するシナリオとしては、気候変動シナリオおよび流域資源利用シナリオを設定する。分析項目は気候変動の影響を考慮した災害リスク、自然の機能、気候変動緩和策（再生可能エネルギー）を評価する。その後、各項目の定量分析し、各項目の関係を整理する。項目の指標による相対評価と総合評価を実施し、総合評価の結果に基づいて項目間のトレードオフを分析

することで、社会課題を考慮した流域資源管理を提案する。

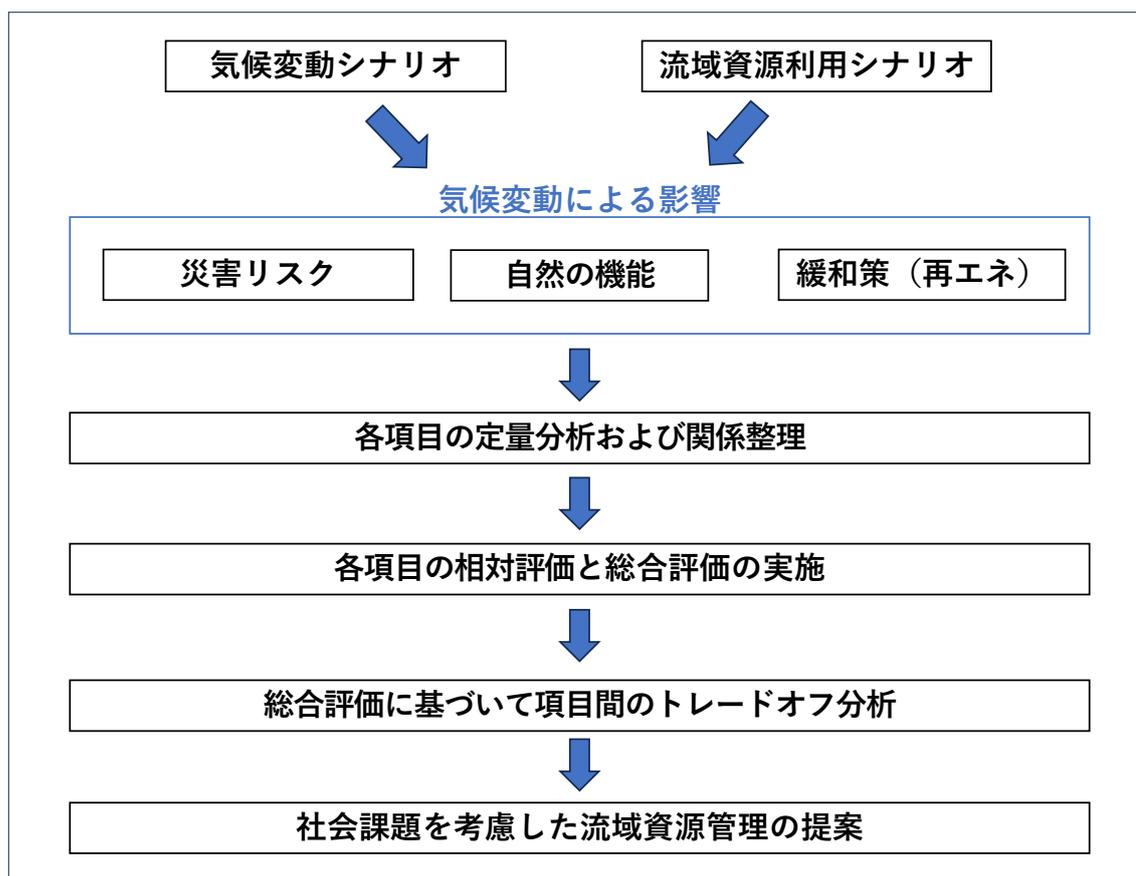


図 1-6 流域資源の総合評価手法開発とそのフロー

第3節 論文構成

本論文は 7 章から構成されており、1 章は上述の通り、本研究の背景・目的を述べ、2 章では自治体で使用することを想定し、汎用性の観点からシミュレーション・モデルの比較・選定・検証を行う。3 章では複数の気候変動シナリオを適用してシミュレーションを行い、気候変動による降雪・融雪への影響を評価する。4 章では森林面積の減少による森林の貯水機能と災害リスクの関係を分析する。5 章では各気候変動シナリオによる再生可能エネルギー（小水力）のポテンシャル変化を確認する。6 章では 3～5 章の研究成果を踏まえて、地域レベルにおける流域資源の定量的な評価手法の構築と流域の管理方法を提案する。そして、7 章を研究総括とした。

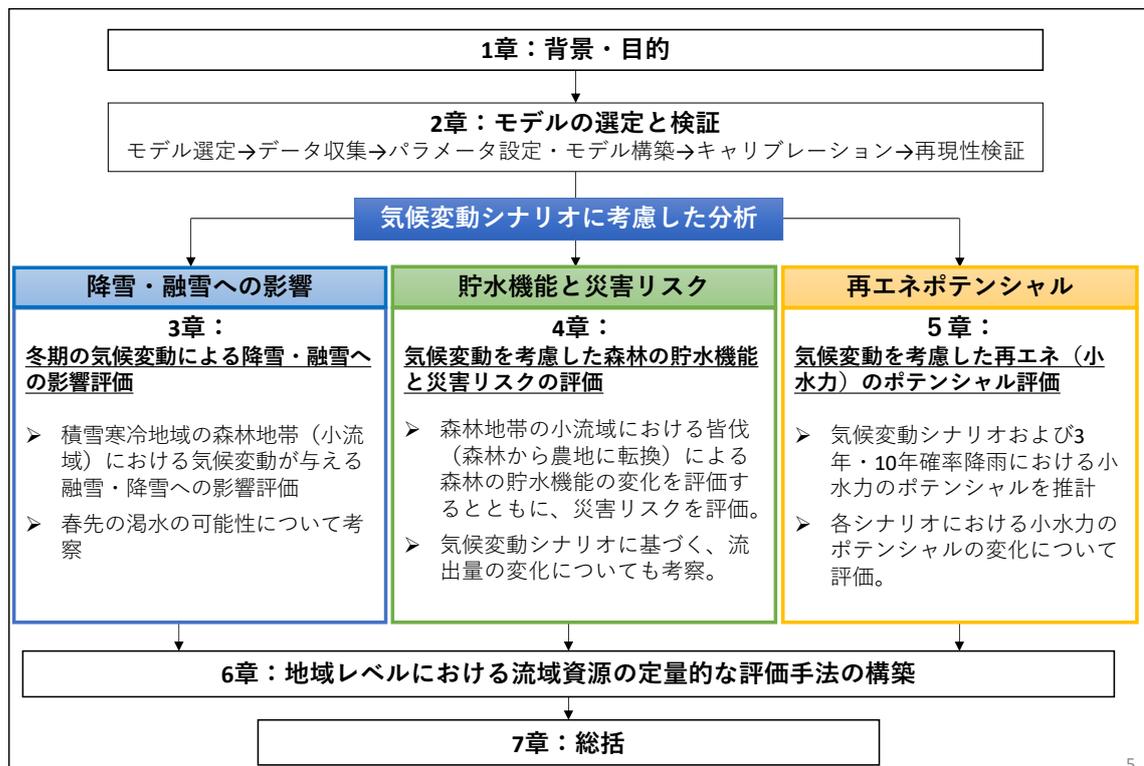


図 1-7 論文構成

引用・参考文献

- 1 林野庁, "パリ協定(2020年以降)の目標." 林野庁公式ウェブサイト, <https://www.rinya.maff.go.jp/j/sin_riyou/ondanka/con_pa.html>
- 2 竹内やよいら. (2022). "気候変動時代の生態学: 陸域生態系における「自然を基盤とした解決策」にむけた課題." 日本生態学会誌, 72(2), 109-143.
- 3 Drivers of deforestation and forest degradation: A synthesis report for REDD+ policymaker <<https://www.cifor.org/knowledge/publication/5167/>>
- 4 環境省(2022) IPCC AR6 WG1 報告書 政策決定者向け要約 (SPM) 暫定訳 (2022年12月22日版) P.18 <https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/ar6/IPCC_AR6_WGI_SPM_JP.pdf>
- 5 大場真ら(2019). "地域循環共生圏と森林管理・バイオマス利活用 福島県奥会津・三島町における取り組み". バイオマス科学会議発表論文集, O-07 15, 13-14.
- 6 環境省(2015) 「日本における気候変動による影響の評価に関する報告と今後の課題について」. 報道発表資料「同」(中央環境審議会意見具申)について(お知らせ) <<http://www.env.go.jp/press/100480.html>>
- 7 白迎玖(2015) 事業構想大学院大学. "自治体レベルでの適応策ー「気候変動適応社会に向けて」ー." 月刊「事業構想」10月号.
- 8 環境省, 地方公共団体実行計画(区域施策編) 策定・実施マニュアル(本編) <https://www.env.go.jp/policy/local_keikaku/h_manual/k2_1_5-6.html>
- 9 気候変動適応情報プラットフォーム(A-PLAT) - 国立環境研究所 地域気候変動適応計画 <<https://adaptation-platform.nies.go.jp/local/plan/information/01-burden-reduction.html>>
- 10 今井敦子(2020), 地球環境研究センターニュース: 地球温暖化に備えるために~必要な予測、想定すべきリスク~統合的気候モデル高度化研究プログラム公開シンポジウム報, 1月号 [Vol.30 No.10] 通巻第349号 202001_349002 <<https://www.cger.nies.go.jp/cgernews/202001/349002.html>>
- 11 馬場 健司(2020). "自治体行政の視点気候変動適応策の推進に向け." <https://www.soumu.go.jp/main_content/000796664.pdf>
- 12 三村信男(2022). "IPCCにおける議論の動向と気候変動研究の課

題." 俯瞰ワークショップ報告書 気象・気候研究開発の基盤と最前線に関するエキスパートセミナー. <<https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2021/WR/CRDS-FY2021-WR-06.pdf>>

13 気候変動適応計画令和 3 年 10 月 22 日閣議決定, P.73-74 < <https://www.env.go.jp/content/900449799.pdf> >

14 島谷幸宏. (2015). "治水主体の河川管理から包括的流域管理へ." 河川技術論文集, 21, 503 -508

15 自然エネルギー財団気候変動対策は小さな自治体ほど向いているー「小さな自治体、大きな気候保護」報告書より < https://www.renewable-ei.org/column_g/column_20150928.php >

16 白井信雄ら (2015) 気候変動への緩和・適応行動の意識構造の分析ー地域における気候変動学習のためにー環境教育 VOL.25-2, 63-71

第2章 モデルの選定と検証

第1節 背景

気候変動の影響評価では、水文モデルを用いたシミュレーションによる解析が多く用いられている。例えば、水循環解析モデルである GETFLOWS を使用した事例では、グリーンインフラを活用した地下水涵養等の水循環の改善の検討¹や、流出モデルである HSPF を使用した事例では、気候変動が湖沼の水循環に及ぼす影響評価²等がある。これらの研究は、それぞれの対象地で設定したシナリオの結果を示しているものの、融雪期や極端降雨のシミュレーション等³⁴、特定の気候条件や一部の機能の精度向上が求められる場合や、多様なシナリオで幅広い将来予測を行い、様々なシチュエーションを想定できるようにすること等が、気候変動の影響予測解析を実施する上で課題となっている¹。

第2節 解析方針

第1章で記述した通り、地域レベルにおける気候変動適応計画の策定の努力が義務付けられており、特に水災害については、地方自治体は気候変動の将来予測の結果を踏まえた早急な対応策の検討が必要である。

本研究では、災害リスク、自然の機能、再生可能エネルギーのポテンシャルを評価するにあたり、水循環モデルを用いることとした。一方、影響を評価するための水循環モデルは上述の通り、複数存在するが、地方自治体レベルで評価するための手法やツールを選定するための評価は十全に行われていない。そこで本章では、自治体・地域レベルで実施できる汎用性を念頭におき、最適なモデルの選定を行う。また、そのモデルの精度向上の手法を検討し、構築したモデルの再現性を検証する。

第3節 研究対象地及び解析方法

2.3.1 対象流域

研究対象地は福島県三島町の埴子沢流域（図 2-1）である。埴子沢は只見川の支流であり、流域は緯度 37.50° - 37.47° 、経度 139.62° - 139.63° 、標高 350-370 m に位置し、流域面積は 2.85 km^2 で、ほとんどが山林に覆われている。農地の 0.4% は本川沿いにある。降雪期は 12 月から 2 月、融雪期は 3 月から 4 月である。降水量は 6 月から 7 月の梅雨時期に比較的多く、9 月から 10 月にかけては台風が多い。2020 年の年間降水量は 1,340 mm、日平均気温は 10.6°C 、日最低気温は 6.9°C 、日最高気温は 15.3°C 、である。

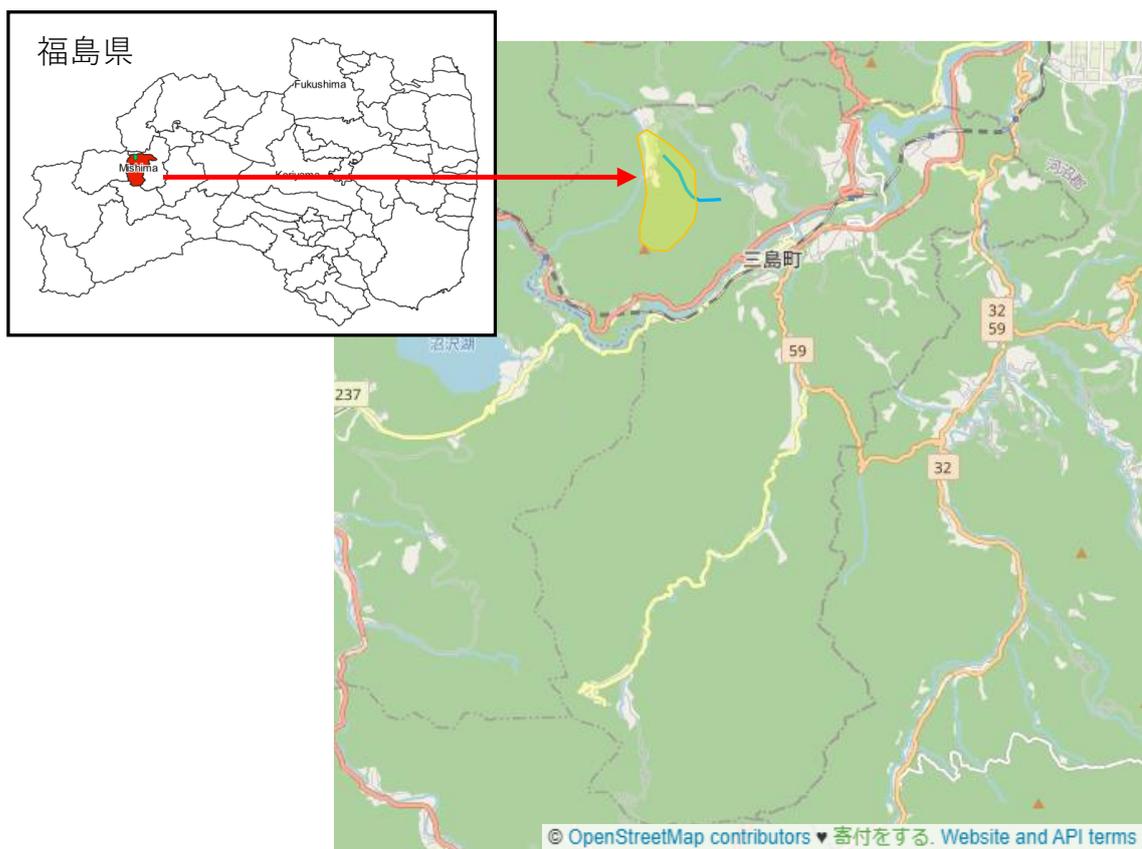


図 2-1 研究対象地（福島県三島町埴子沢）

2.3.2 解析モデルのタイプと選定

(1) 流出モデルのタイプ⁵

流域モデルは、地域や流域内の水文プロセスや資源の管理を行うためのツールであり、主に集中型モデル、準分布型モデル、分布型モデルの3つの主要なモデルがある。各モデルの特徴を表 2-1 に示す。

集中型モデルは、流域全体を一つの一元的なモデルで表現し、流域全体の平均的な特性や挙動を取り扱う。一方、地域の異質性や細かい地理的変動を十分に反映することはできないが比較的計算負担が少ない。

一方で、準分布型モデルは流域をいくつかの部分に分割し、各部分に対して個別にモデルを適用し、流域内の一部の特性を反映することができる。計算負担は集中型モデルより高くなるが、詳細なモデリングが可能である。代表的なモデルとしては SWAT (Soil and Water Assessment Tool) や、HSPF、TOPMODEL 等があげられる。

分布型モデルは、流域を多数の小さなセルに分割し、各セルに水文プロセスをモデル化し、地域内の空間的な変動を詳細に表現でき、地形や土地利用の影響を考慮できる。分布型モデルは高い詳細度と精度を持つ一方で、計算負担が高いのが特徴である。代表的なモデルには GETFLOWS や MIKE-SHE 等があげられる。

小流域を対象とした場合、高精度な分析を優先し、分布型も考えられるが、自治体が十分なデータを所有しているかは分からず、またより詳細な設定が求められる分布型モデルでは、解析準備と解析時間が長くなってしまうため、準分布型モデルが最適であると判断した。

表 2-1 各モデルの特徴

モデル	集中型モデル	準分布型モデル	分布型モデル
アプローチ	流域全体を一つの一元的なモデルで表現。	流域をいくつかの部分に分割し、各部分に対して個別にモデルを適用。	流域を多数の小さなセルに分割し、各セルに水文プロセスをモデル化
特徴	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 流域全体の平均的な特性を取り扱う。 ➤ 地域の異質性や細かい地理的変動を無視することがある。 ➤ 比較的計算負担が低い。 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 流域内の一部の異質性を考慮できる。 ➤ 部分ごとに異なる特性やパラメータを持つ。 ➤ 計算負担は集中型モデルより高いが、詳細なモデリングが可能。 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 地域内の空間的な変動を詳細に表現できる。 ➤ 地形や土地利用の影響を考慮できる。 ➤ 高い詳細度と精度を持つが、計算負担が高い。
パラメータ	流出係数	気象、植生、土壌、地形等	気象、植生、土壌、地形等
代表的なモデル	合理式、CN	SWAT、HSPF、TOPMODEL、AnnAGNP、	GETFLOWS、MIKE-SHE、KINEROS、PRMS

(2) 準分布型モデルの比較

準分布型モデルの代表的なモデルについて、機能比較を行った結果、SWAT+が最適であると判断した。

SWAT+モデルの選定理由は以下の通りである。

- 準分布型であり、本研究解析期間と範囲と合致（降雪・融雪の解析は MIKE-SHE も可能だが、収集したデータから検討し、簡易的な SWAT+の方が本研究には適している）
- 降雪・融雪および地下水挙動のシミュレーションが可能
- 長期的な予測が可能（気候変動などのシナリオにも対応可能）
- 搭載のデータベースを活用することで実測データが無い流域でも予測可能
- 実測値を得ることが難しいパラメータについてキャリブレーションにより適切な値にフィッティング
- SWAT は土壌・作物・土地利用などの各種データベースと有し、汎用性が高い
- 実測データの少ない不特定流域を対象とした流量・水質の予測が可能。
- 解析スケールを任意に設定することが可能（小流域レベルも対応）

表 2-2 準分布・分布型モデルの機能比較

モデル	準分布型	地下水挙動	降雪・融雪再現	農業利用	汎用性	キャリブレーション
SWAT+	準分布	○	○ (簡易な解析可能)	◎ (灌漑・土壌侵食等再現)	◎ (不特定流域の解析可)	◎ (自動キャリブレーション可)
TOPMODEL	準分布	○	×	○	○	○
MIKE-SHE	分布型	○	○ (複雑な解析可能)	○	△ (モデルがやや複雑)	△
GETFLOWS	分布型	○	×	○	○	○

2.3.3 SWAT+モデルの概要

(1) SWAT+とは

SWATは米国農務省-農業研究事業団(United States Department of Agriculture – Agricultural Research Service : USDA-ARS)によって開発された解析ツールであり、20年以上にわたって世界中で使用されている水循環モデルである⁶。SWATモデルでは、対象流域をHRU(水文流出単位)と呼ばれる小流域に細分化する(図 2-3)。HRUは、土地利用、土壌タイプ、勾配などを組み合わせたサブ流域内の一塊の領域であり、ランドスケープで発生するすべての水文プロセスをシミュレーションするためのものである⁷。そして、各々の流域における降水量、蒸発散量、河川流量、流域内貯水量を物理現象として計算し、これらを流域全体に統合することで対象流域内の水の動き(直接流出・基底流出・流域内貯留)を知ることができる準分布型モデルである。

SWAT+は、SWATの改訂版であり、インタフェースはQGISであり、Pythonを使用して開発されている⁸。操作方法はSWATよりもわかりやすい表現となり、使いやすくなっている。蒸発散量の推定では、Penman-Monteithを使用した⁹。

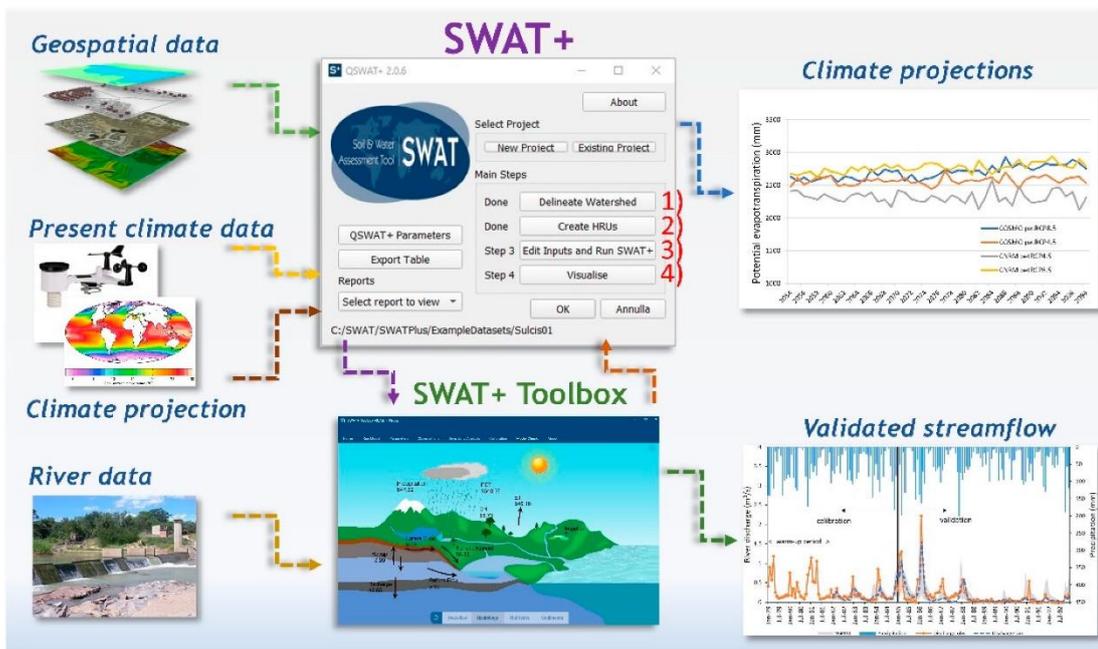


図 2-2 SWAT+の機能とモデル構築¹⁰

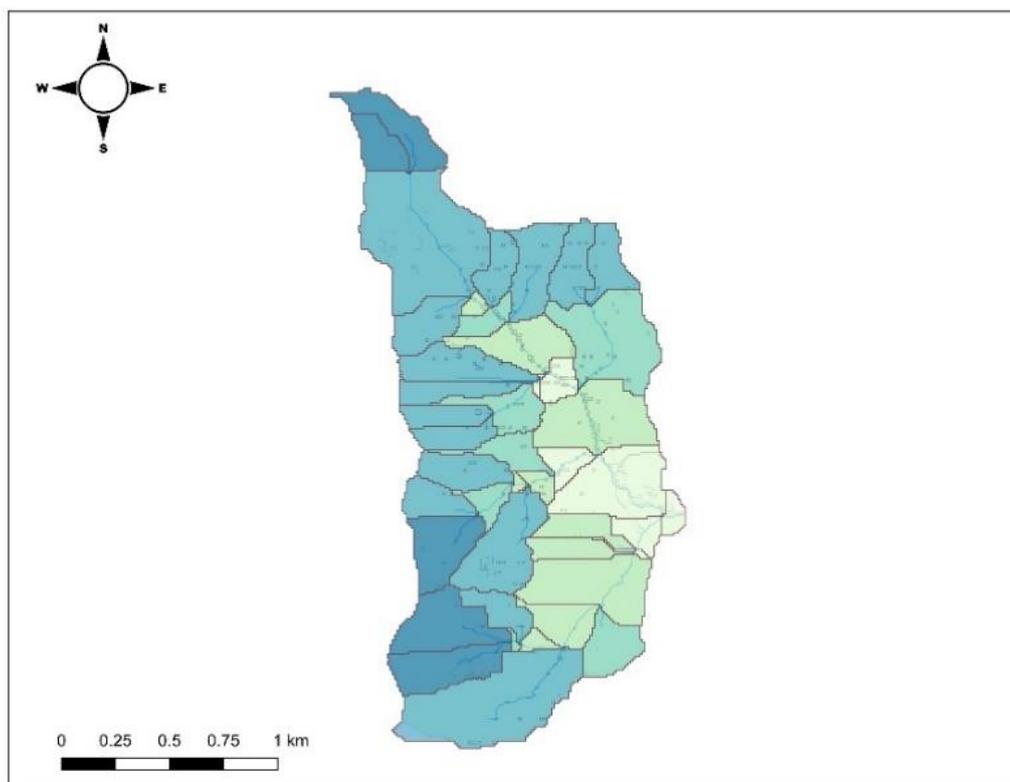


図 2-3 対象流域における HRU

(2) 水収支の計算式

水収支は以下の数式で計算している (1) :

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

ここで、 SW_t : 土壌水分量 (mm)、 SW_0 : 初期土壌水分量 (mm)、 t : 時刻 (日)、 R_{day} : 降水量 (mm)、 Q_{surf} : 表面流出量 (mm)、 E_a : 蒸発散量 (mm)、 W_{seep} : 不飽和帯に入る水量 (mm)、 Q_{gw} : 戻り流量 (mm)、である。

流域を細分化することで、様々な作物や土壌の蒸発散の違いをモデルに反映させることができる。流出量は、各 HRU について別々に予測され、流域の総流出量を得るためにルーティングされる。これにより、精度が向上し、水収支をより適切に物理的に表現することができる¹¹。

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - I_a)^2}{R_{day} - I_a - S} \quad \because R_{day} > I_a \quad (2)$$

ここで、 Q_{surf} : 表面流出 (mm)、 R_{day} : 降雨深度 (mm)、 I_a : 初期流出量 (流出前の表面貯留、遮断、浸透) (mm)、 S : 保水 (mm) である。保水力パラメータ: 、地形 (傾斜)、土壌、土地利用、管理手法に依存し、土壌水分量により時間経過とともに変化する (式(3))。

$$S = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) S = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (3)$$

ここで、 CN は先行水分量、土壌浸透量、土地利用、土地管理条件に対応する¹²。

(3) モデル評価

RMSE (Root Mean Squared Error) は、シミュレーションと観測値との適合度を示すために使用される (式(4)) :

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n EV}{n}} \quad (4)$$

ここで、 EV : 誤差分散 (シミュレーションと観測値との差分の 2 乗)、 n : 観測日数である。

Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) は、測定データの分散と比較した残差分散の相対的な大きさを決定する正規化統計量である。

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{ave})^2} \quad (5)$$

Q_{sim} : シミュレーション値 (m^3/s)、 Q_{obs} : 観測値 (m^3/s)、 Q_{ave} : シミュレーション期間の観測値の平均値 (m^3/s)、である。

Q_{sim} と Q_{obs} はそれぞれタイムステップにおけるシミュレーション値と観測値 (m^3/s)、 P と Q は全期間におけるシミュレーション値と観測値の対応する平均値 (m^3/s)、 n は流速データ点の総数である。

また、観測値と計算値をプロットしたときに 1:1 の線上に分布する k を示す指標として決定係数を用いて精度を確認する。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{ave})^2 - \sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{ave})^2} \quad (6)$$

第4節 SWAT+モデルの構築

2.4.1 データの収集

SWAT+のモデル構築のために取得したデータの一覧を表 2-3 に示す。

表 2-3 取得データ一覧

項目	データ元	備考
標高データ	国土地理院 基盤地図情報	10 m ラスターデータ
土地利用分布	JAXA (EORC) AVNIR-2 高解像度 土地利用土地被覆図	10 m メッシュ(森林、農地、草地に区分)
土壌分布	20 万分の1 土地分類 基 本調査(農研機構)	シェープファイル(ポリゴン)
気象データ	国立環境研究所 観測データ	日データ: 風速、風向、気温、相対湿度、 日射量、降水量、日照時間、積雪深度、 クオリティ値 5 分間隔データ: 流量、SS
土質データ	現地調査データ (2021/12/17)	含水率、EC、pH、強熱減量、真比重、 透水係数、粒度分布

(1) 標高データ

標高データ (DEM) は国土地理院基礎地図情報の 10 m ラスターデータを使用した。図 2-4 に使用した標高データを示すとともに、解析により判明した対象流域および、支川 (Stream) を示す。流域は 5 つに分割される。

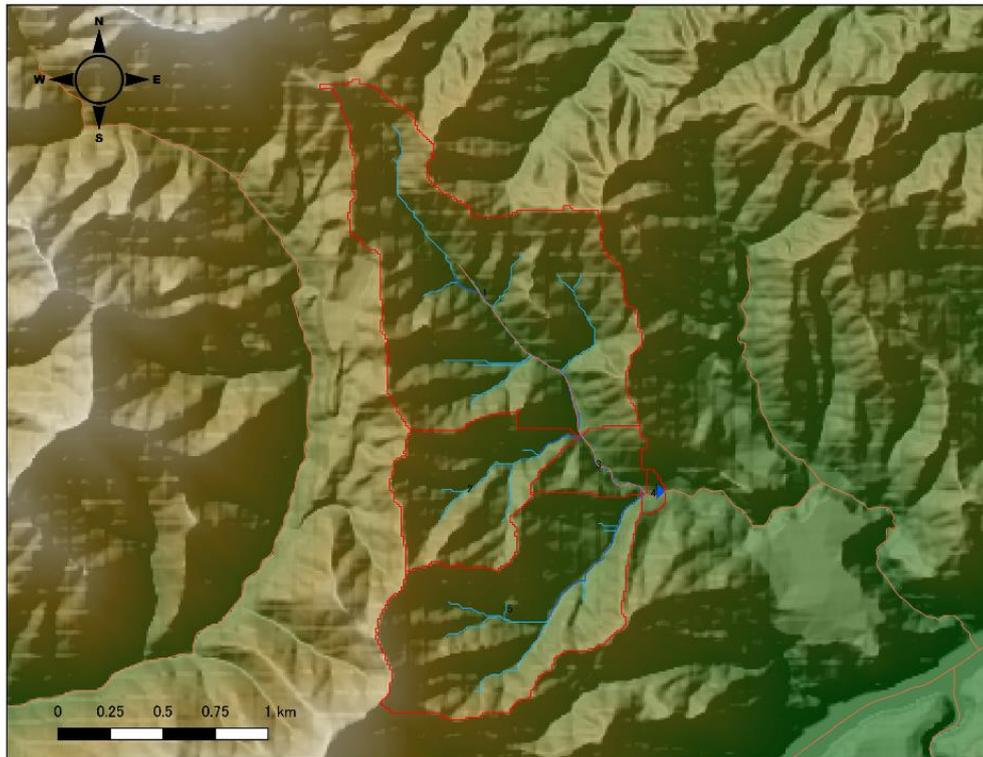


図 2-4 標高データ（赤枠：対象地の小流域、青線：支川）

(2) 土地利用データ

土地利用は宇宙航空研究開発機構（JAXA）と地球観測研究センター（EORC）の ALOS/ALOS-2 解析データである高解像度土地利用土地被覆図（10m メッシュ）を使用した。大部分（98.4%）は森林地帯である。土地利用は農地（AGRL）、森林地帯（FRST）、水域（WATER）、草地（PAST）の区分とした。踏査調査により土地利用の確認を行い、明らかに異なる土地利用は一部修正した。

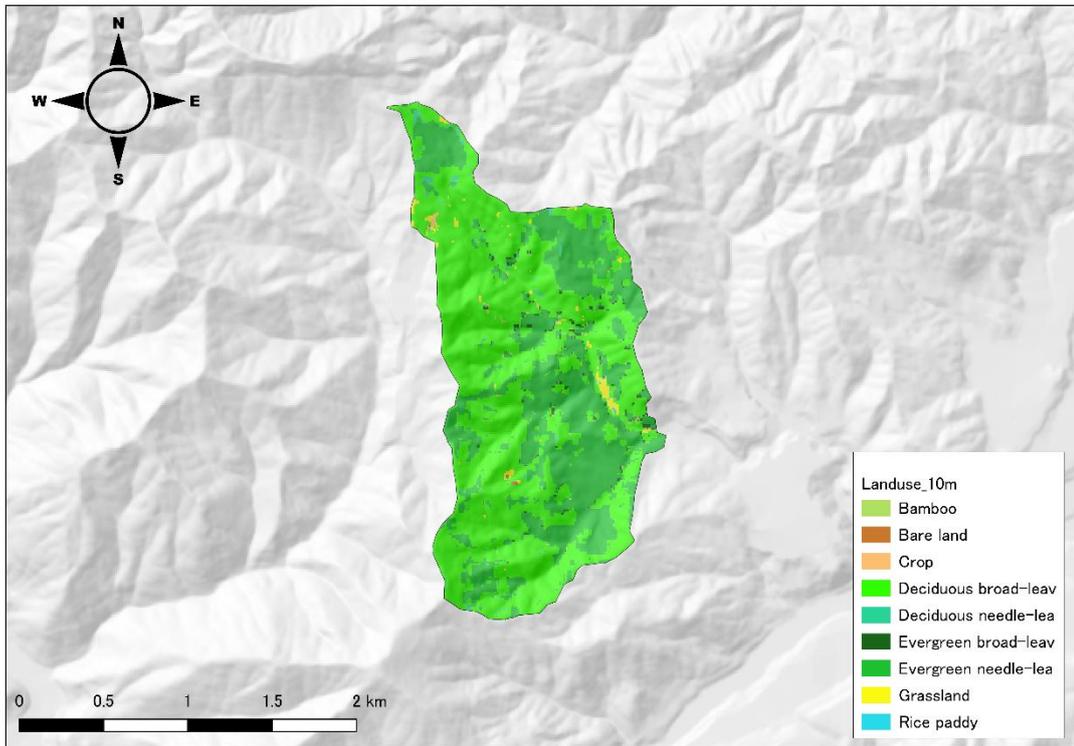


図 2-5 土地利用図

表 2-4 流域内の土地利用

Watershed area (km ²)	Land-use (%)			River length (km)
	Forest	Grass land	Paddy field	
2.85	98.4	1.2	0.4	2.5

(3) 土壌データ

1) 土壌分布

土壌分布は国土数値情報の 20 万分の 1 土地分類基本調査（シェープファイル）を使用した（図 2-6）。土壌は農地の黒ボク土と森林地帯の森林褐色土の 2 種類に区分した。

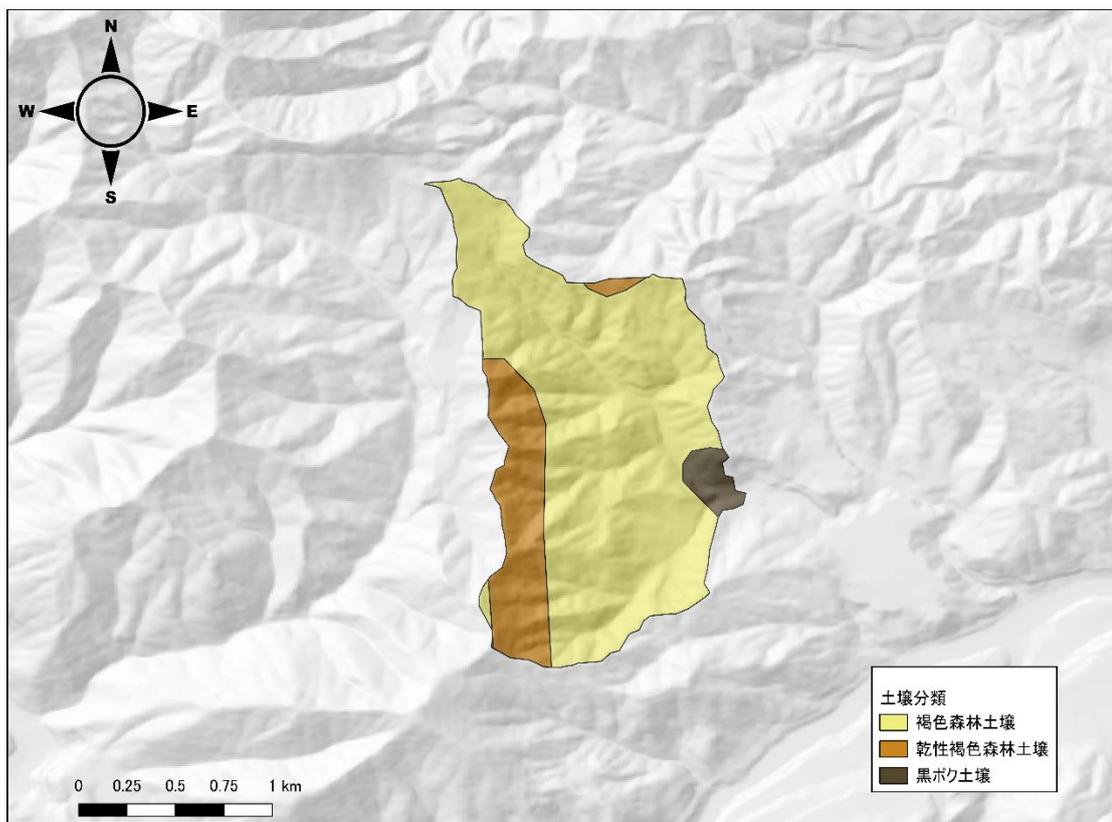


図 2-6 土壌分布図

2) 土壌分析

土壌をサンプリングし、分析した結果を以下に示す。

表 2-5 含水率、EC、pH、強熱減量、比重 透水性

Sample Name	Water Content (%)	EC (dS/m)	pH	Ignition loss (%)	Specific gravity	Saturated hydraulic conductivity (cm/s)
Forest (上)	34.03	12.6	4.1	26.18	2.57	1.57×10^{-2}
Forest (下)	16.09	12.1	4.7	8.03	2.7	9.9×10^{-6}
Cropland	26.91	4.8	4.0	22.43	2.60	1.71×10^{-3}

表 2-6 粒度分布 (g)

Particle size distribution in grams	Gravel (2.0 mm above)	Coarse sand (2.0 - 0.2 mm)	Fine sand (0.2 - 0.02 mm)	Silt (0.02 - 0.002 mm)	Clay (0.002 below)
Forest (上)	1.21	3.2	1.097	0.88	0.304
Forest (下)	0.23	1.34	1.859	0.945	0.489
Cropland	1.29	2.64	1.27	1.398	0.184

表 2-7 粒度分布 (%)

Particle size distribution in percent	Gravel (2.0 mm above)	Coarse sand (2.0 - 0.2 mm)	Fine sand (0.2 - 0.02 mm)	Silt (0.02 - 0.002 mm)	Clay (0.002 below)
Forest (上)	18.08	47.82	16.4	13.16	4.54
Forest (下)	4.72	27.56	38.22	19.44	10.06
Cropland	18.90	38.99	18.76	20.64	2.71

(4) 気象観測データ

国立環境研究所の表 2-8 の観測データを使用した。

表 2-8 NIES 提供データ

気象観測データ	測定値：風速、風向、気温、相対湿度、日射量、降水量、日照時間、積雪深度、クオリティ値 データ間隔：1日 観測期間：2018/12/9-2022/3/31
三島町埴子沢流量SS観測データ	測定値：流量、SS データ間隔：10分 観測期間：2019/1/21-2022/3/31

雨量データを以下に示す。

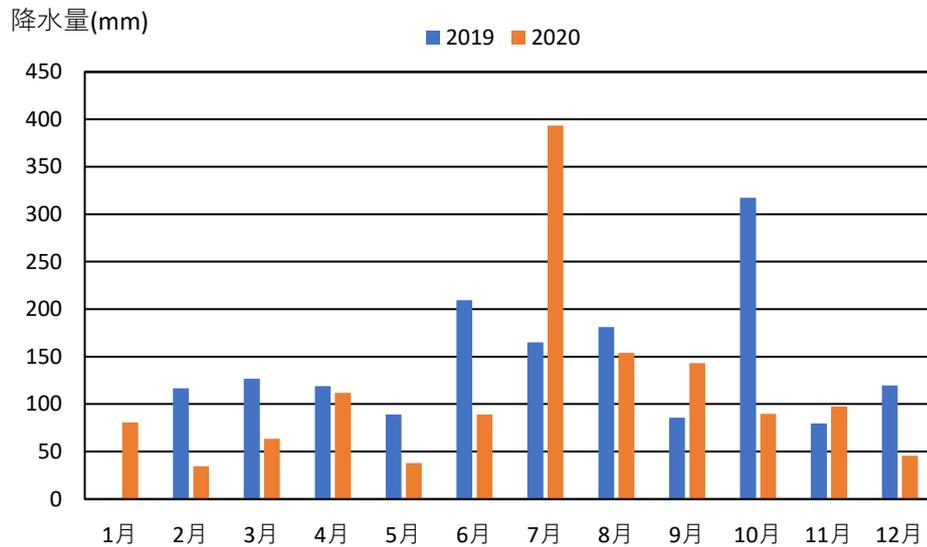


図 2-7 月別降水量

2.4.2 パラメータの設定

(1) 土壌パラメータ

SWAT+の土壌パラメータは非常に多く、全てのパラメータの値を実測で取得することは困難であったため、FAO Soil データベースより、黒ボク土 (Buxton)、森林褐色土 (Cambisols) を使用して、基礎のパラメータとして入力し¹³、透水係数 (soil_k)、最大容水量 (awc)、クライ土 (Clay)、シルト (Silt)、サンド (Sand)、ロック (Rock) の値を実測値より入力した。

以下、入力した土壌パラメータを示す。

表 2-9 土壤パラメータ（森林褐色土）上部

Value		Description	SWAT+ Variable	Default	Recommended Range
1		Layer number in soil	layer_num	1	1 - 100
500	mm	Depth to bottom of layer	dp	0	0 - 3500
0.9	g/cm ³	Bulk density of layer	bd	0.9	0.9 - 2.5
0.7382	mm/mm	Available water capacity of soil layer	awc	0	0 - 1
565.2	mm/hr	Saturated hydraulic conductivity of soil layer	soil_k	0	0 - 2000
4.2	%	Carbon in soil layer	carbon	0.05	0.05 - 10
4.54	%	Clay in soil layer	clay	0	0 - 100
13.16	%	Silt in soil layer	silt	0	0 - 100
65.9	%	Sand in soil layer	sand	0	0 - 100
18.08	%	Rock in soil layer	rock	0	0 - 100
0.11		Soil albedo when soil is moist	alb	0	0 - 0.25
0.15	mm/hr	USLE equation soil erodibility (K) factor	usle_k	0	0 - 0.65
12.6	dS/m	Electrical conductivity of soil layer	ec	0	0 - 100
0	%	CaCO ₃ in soil layer	caco3	0	0 - 65
4.1		pH value of soil layer	ph	3	3 - 10

表 2-10 土壤パラメータ（森林褐色土）下部

Value		Description	SWAT+ Variable	Default	Recommended Range
2		Layer number in soil	layer_num	1	1 - 100
1000	mm	Depth to bottom of layer	dp	0	0 - 3500
1.33	g/cm ³	Bulk density of layer	bd	0.9	0.9 - 2.5
0.9197	mm/mm	Available water capacity of soil layer	awc	0	0 - 1
0.3564	mm/hr	Saturated hydraulic conductivity of soil layer	soil_k	0	0 - 2000
2.3	%	Carbon in soil layer	carbon	0.05	0.05 - 10
10.06	%	Clay in soil layer	clay	0	0 - 100
19.44	%	Silt in soil layer	silt	0	0 - 100
65.78	%	Sand in soil layer	sand	0	0 - 100
4.72	%	Rock in soil layer	rock	0	0 - 100
0.24		Soil albedo when soil is moist	alb	0	0 - 0.25
0.15	mm/hr	USLE equation soil erodibility (K) factor	usle_k	0	0 - 0.65
12.1	dS/m	Electrical conductivity of soil layer	ec	0	0 - 100
0	%	CaCO ₃ in soil layer	caco3	0	0 - 65
4.7		pH value of soil layer	ph	3	3 - 10

表 2-11 土壌パラメータ（黒ボク土）

Value		Description	SWAT+ Variable	Default	Recommended Range
1		Layer number in soil	layer_num	1	1 - 100
1000	mm	Depth to bottom of layer	dp	0	0 - 3500
1.05	g/cm ³	Bulk density of layer	bd	0.9	0.9 - 2.5
0.776	mm/m m	Available water capacity of soil layer	awc	0	0 - 1
61.56	mm/hr	Saturated hydraulic conductivity of soil layer	soil_k	0	0 - 2000
3.2	%	Carbon in soil layer	carbon	0.05	0.05 - 10
2.71	%	Clay in soil layer	clay	0	0 - 100
20.64	%	Silt in soil layer	silt	0	0 - 100
57.75	%	Sand in soil layer	sand	0	0 - 100
18.9	%	Rock in soil layer	rock	0	0 - 100
0.01		Soil albedo when soil is moist	alb	0	0 - 0.25
0.32	mm/hr	USLE equation soil erodibility (K) factor	usle_k	0	0 - 0.65
4.8	dS/m	Electrical conductivity of soil layer	ec	0	0 - 100
0	%	CaCO ₃ in soil layer	caco3	0	0 - 65
0		pH value of soil layer	ph	3	3 - 10

(2) 降雪・積雪・融雪パラメータ

デフォルト値のシミュレーション結果を観測値と比較すると、12月から3月にかけてのデータのほとんどが降雨であり、降雪と融雪が適切に再現されていないため、融雪温度と降雪温度のパラメータを調整する必要があった。ネットワーク化された測候所が10分間隔で収集した最高気温、平均気温、積雪深の気象データを用いて、降雪温度（fall_tmp）と融雪温度（melt_tmp）を計算し、降雪温度は、降雪があった日（2019-2020年内の11月と3月）の平均気温（2.51℃）とした。融雪温度は、降雨がなかった日（2019～2020年内の12月～2月）で、積雪深が1cm以上減少した日の最高気温（2.71℃）とした。

表 2-12 降雪・積雪・融雪のパラメータ

Value		Description	SWAT+ Variable	Default	Recommended Range
2.51	deg C	Snowfall temperature	fall_tmp	1.0	-5 - 5
2.71	deg C	Snow melt base temperature	melt_tmp	0.5	-5 - 5
4.5	mm/deg C/day	Maximum melt rate for snow during year (June 21)	melt_max	4.5	0 - 10
4.5	mm/deg C/day	Minimum melt rate for snow during year (Dec 21)	melt_min	4.5	0 - 10
1		Snow pack temperature lag factor	tmp_lag	1	0 - 1
1	mm	Minimum snow water content	snow_h2o	1	0 - 500
0.5		Fraction of minimum snow water content	cov50	0.5	0 - 1
0	mm	Initial snow water content at start of simulation	snow_init	0	—

第5節 モデルの検証

上記のパラメータを設定し、表 2-13 の計算条件において、モデルの検証を実施した。土質および気象データは、対象流域内の実測値を使用した。計算条件を表 2-13 に示す。本研究は計算の時間間隔を日単位とした。ウォームアップ期間は 2019 年 2 月 1 日から 2019 年 12 月 31 とし、シミュレーション期間は 2020 年 1 月 1 日から 2020 年 12 月 31 日とした。一部のパラメータは実測値より調整・入力した。

HRU の閾値は 5% を適用し、45 の HUR として定義された (図 2-3)。

表 2-13 計算の設定条件

項目	内容
期間	・ Warm-up: 2019/2/1-2019/12/31 ・ Simulation: 2020/1/1-2020/12/31
時間間隔	・ 日単位
調整 パラメータ	・ 以下のパラメータは実測値より調整・入力 透水係数 (soil_k)、最大容水量 (awc)、 Clay、Silt、Sand、Rock、EC 積雪気温: 2.51°C 融雪気温: 2.71°C
計算方法	・ 蒸発散量の計算: Penman-Monteith 法 ・ 表面流の計算: Curve Number 法

2.5.1 パラメータの調整結果

(1) パラメータを調整した場合とデフォルト値の比較

SWAT+は、基準となるデフォルト値を所有しており、デフォルト値を使用したシミュレーションも可能である。デフォルト値によりシミュレーションを実施した場合と、収集データによりパラメータを調整した場合との精度の違いを確認した。

デフォルト値では、パラメータを調整したことで、決定係数は 0.571 から 0.751 に改善した。また、流量 0.1m³/s 以上の実測・推定値の相関が向

上している。

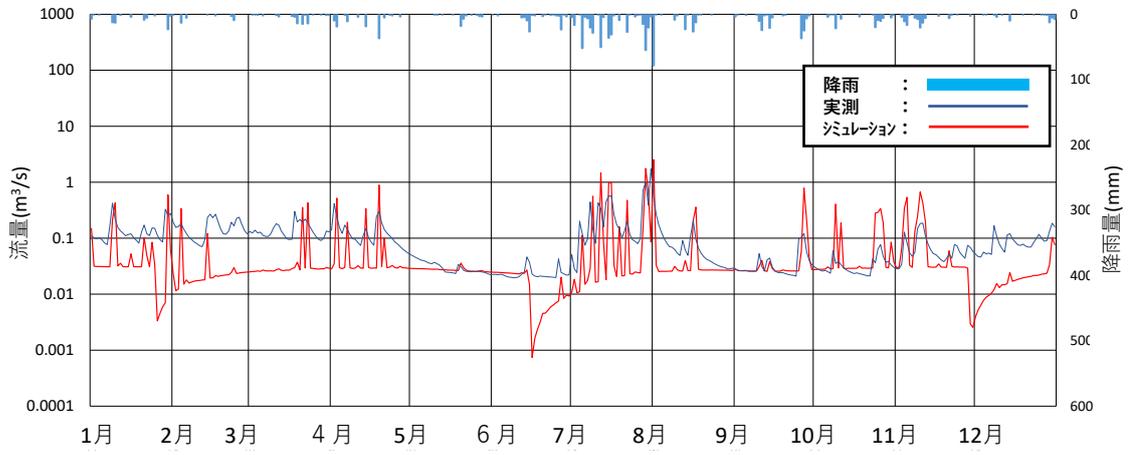


図 2-8 デフォルト値を使用したシミュレーション結果

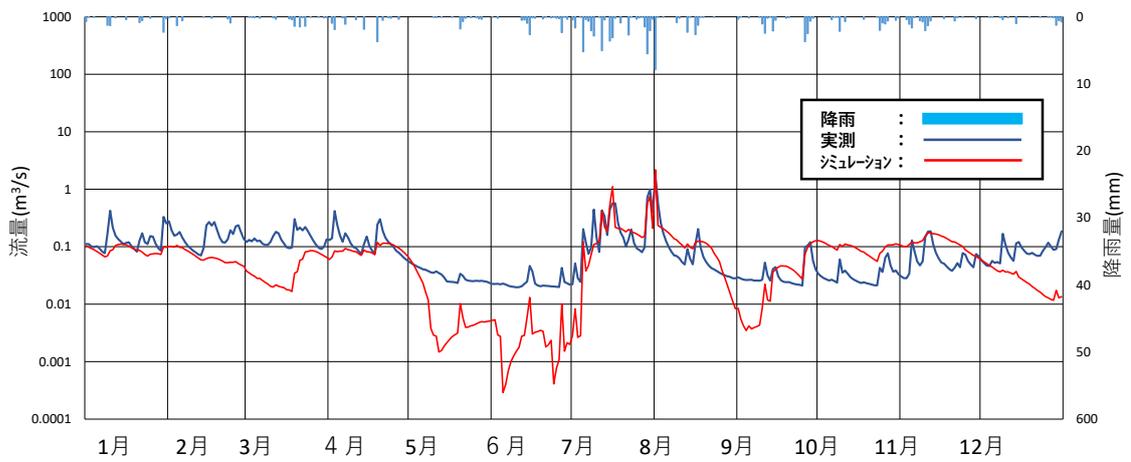


図 2-9 パラメータ調整後のシミュレーション結果

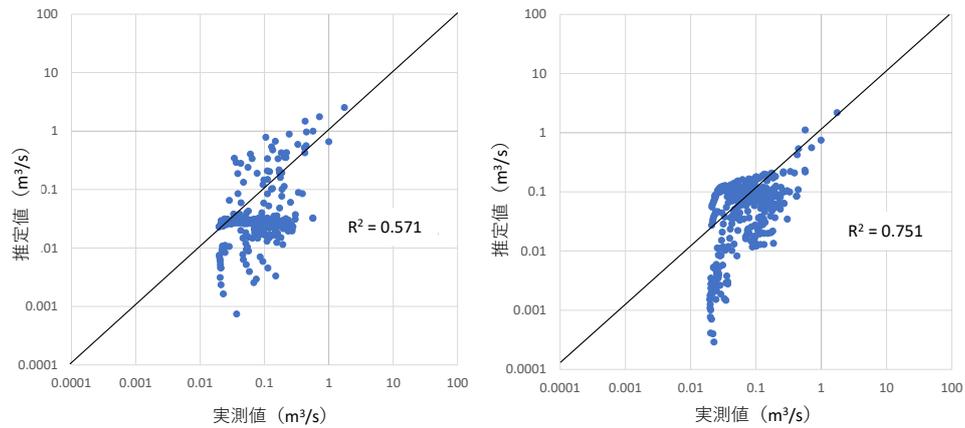


図 2-10 実測値との推定値の相関比較
(右：デフォルト値、左パラメータ調整)

2.5.2 自動キャリブレーションによる補正

(1) 自動キャリブレーションの設定

自動キャリブレーションは観測値を用いてパラメータを補正し、シミュレーションを繰り返すことでNSE、RMSE、MSEの値を改善する。自動キャリブレーションはNSE、RMSE、MSEから選択することができる。本研究では、NSEを自動校正に選択した。

(2) 補正パラメータ

側方流動の移動時間 (Q_{lat}) の計算には、キネマティックストレージモデル (Sloan and Moore, 1984) を適用しており、その中で側方浸透流は以下の数式で計算されている。

$$Q_{lat} = 0.024 \left[\frac{2 \cdot SW_{ly,excess} \cdot K_{sat} \cdot \sin(\alpha_{hill})}{\phi_d \cdot L_{hill}} \right]$$

ϕ_d : 間隙率 (mm/mm) , α_{hill} : 傾斜角度, K_{sat} : 飽和透水係数 (mm/hr) , $SW_{ly,excess}$: 日可能浸透量 (mm) , L_{hill} : 傾斜距離 (m)

SWAT+では、SLSUBBSN (平均斜面長)、HRU_SLP (平均斜面勾配)、SOL_K (飽和透水係数) といったパラメータで計算している。傾斜のパラメータの影響が大きいことから、本来 SWAT モデルが開発された対象である農地ではなく、傾斜が急な森林地にこれを適用すると、側方流が過剰に計算されてしまうことが分かっている¹⁴。

側方流は降雨と地下水滞留時間や直接流出とのタイムラグを把握することが困難であり、加えて、影響が大きいパラメータであるため、補正パラメータとして側方流動の移動時間 Q_{lat} (lat_time) を対象とした。

(3) キャリブレーションの結果

側方流動の移動時間 (lat_time) を補正した結果を図 2-11 に示す。自動キャリブレーションにより、0.1 m³/s 以下の精度が向上しており、決定係数 R^2 は 0.751→0.773 に改善した (図 2-12)。

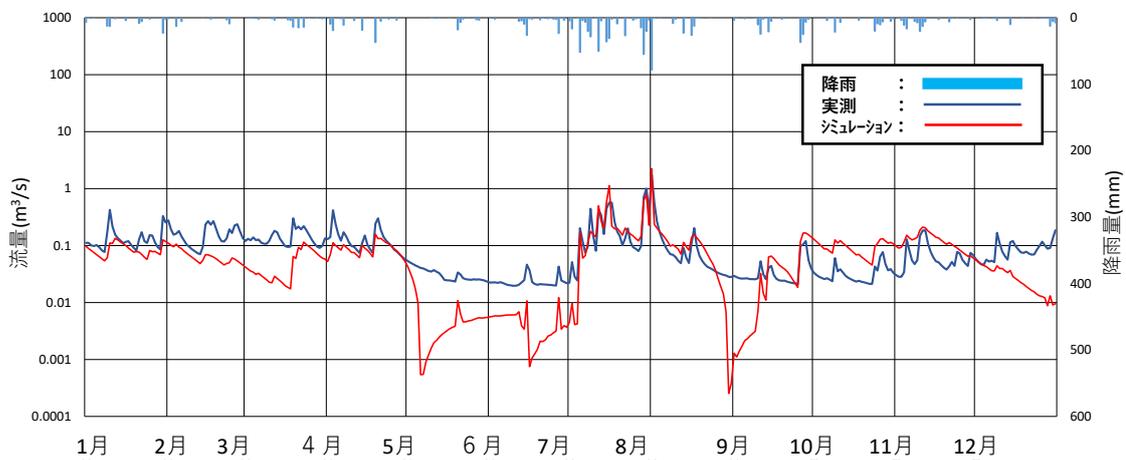


図 2-11 自動キャリブレーションによる補正結果

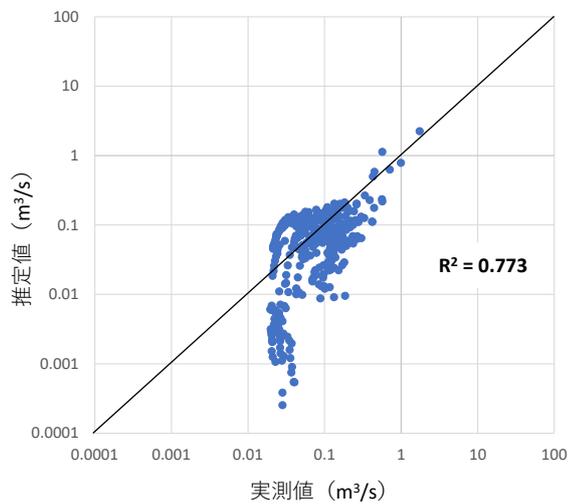


図 2-12 自動キャリブレーション後の相関

2.5.3 精度検証

デフォルトパラメータ、調整パラメータ、自動キャリブレーションのシミュレーション結果から、各月の NSE と RMSE を算出した。その結果を図 2-13、図 2-14、表 2-14 に示す。

NSE はばらつきを考慮した評価指標であり、値が 1 に近いほど精度が高い。降雪期（12 月～2 月）と融雪期（3 月～4 月）では、NSE の値が全体的に低く、降雪・融雪期の精度確保の難しさを示している。一方、調整パラメータと自動キャリブレーションの精度は、NSE のデフォルトパラメータよりも向上していることが示された。通年（全体）の NSE を計算した結果、デフォルトパラメータでは -0.26、調整パラメータでは 0.59、自動キャリブレーションでは 0.62 であった。

各月の RMSE は、最適値は 0 であり、これは実測値と観測値の差を重視した評価指標である。降雨時は RMSE の値が高く、精度が低いと評価される。降雨量が少ないときは、河川流量が少なく、観測値と予測値の差が小さくなるため、精度が高くなる。自動キャリブレーションの RMSE は全体的に値が小さく、精度が高いと評価される。通年（全体）の RMSE を計算すると、Default パラメータは 0.20、adjust パラメータは 0.15、自動キャリブレーションは 0.15 であった。

デフォルトの計算値より、パラメータ調整と自動キャリブレーションに精度の改善が見られた。一方、RMSE については、NSE を補正基準としたこともあり、値の改善はほとんど見られなかった。

流出モデルの評価指標と精度評価基準については Moriasi 氏が以下の通り示している。Moriasi 氏の精度基準においては NSE は 0.6 以上あり、精度として十分（Satisfactory）であることが分かった。また、自動キャリブレーション後の決定係数は $R^2=0.77$ はあり、こちらも Moriasi et al.

(2007)が示す 0.5 以上を確保できており、一連の作業により精度が確保できることがわかった¹⁵。

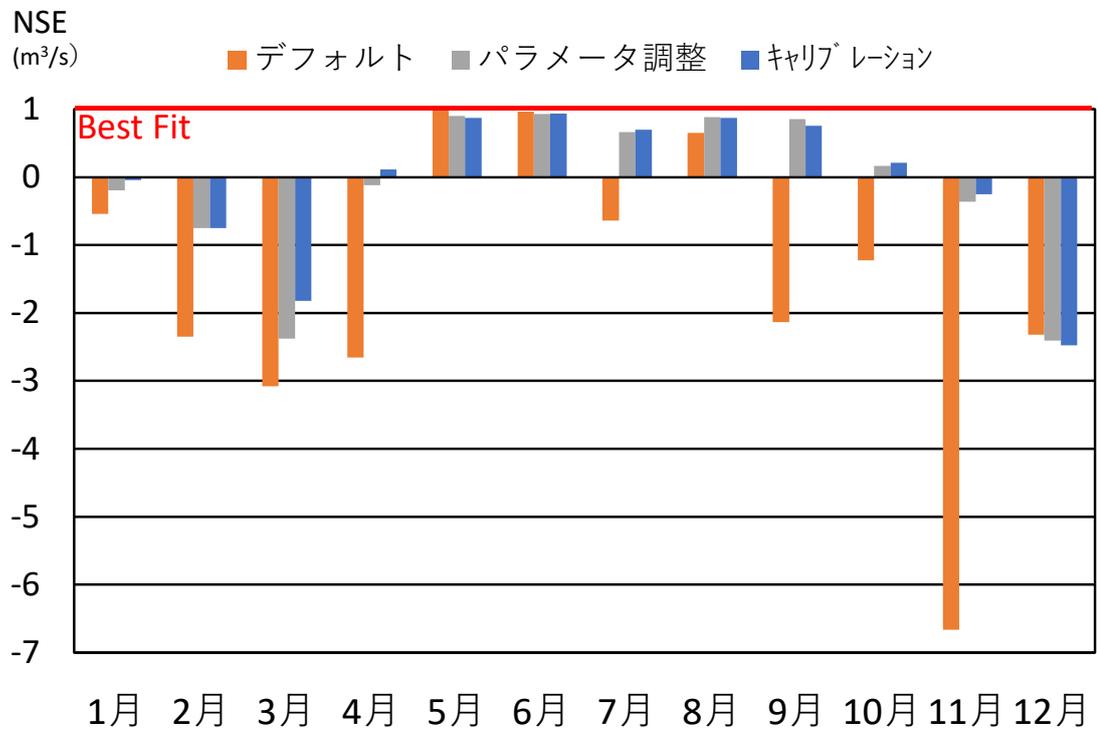


図 2-13 各計算値のNSE

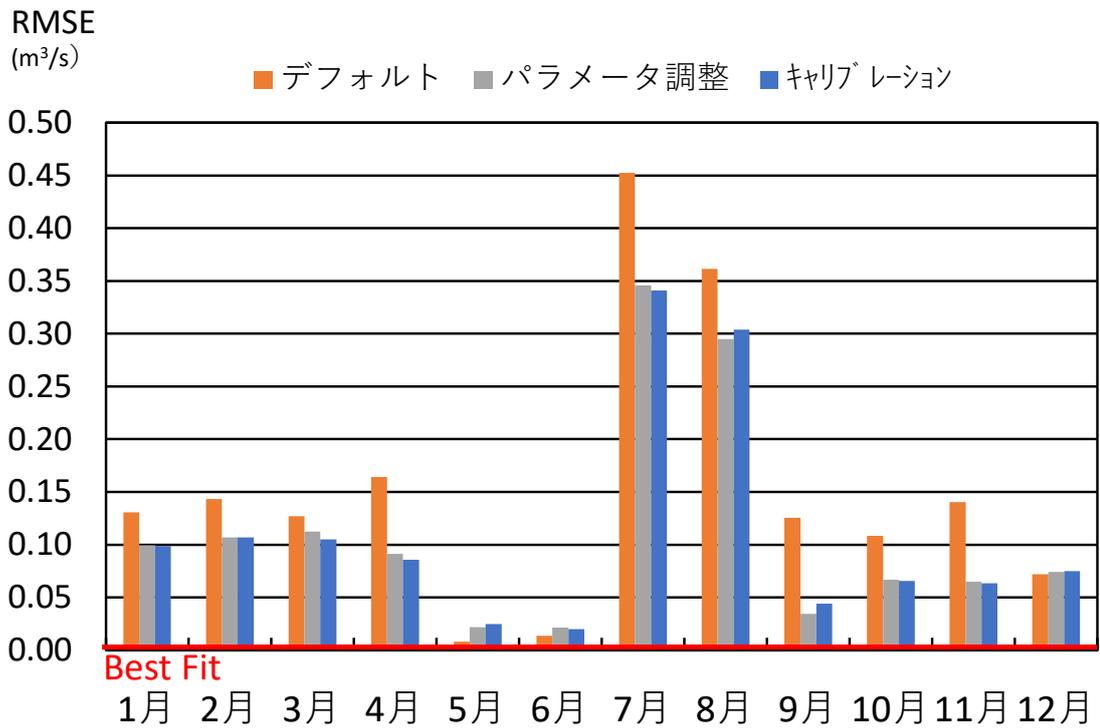


図 2-14 各計算値の RMSE

表 2-14 各計算値の NSE & RMSE 一覧 (月別 & 通年)

計算値		1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	通年
NSE	デフォルト	-0.54	-2.35	-3.08	-2.65	0.98	0.97	-0.64	0.66	-2.14	-1.22	-6.66	-2.32	-0.26
	パラメータ調整	-0.19	-0.75	-2.38	-0.12	0.90	0.93	0.66	0.88	0.86	0.17	-0.36	-2.41	0.59
	キャリブレーション	-0.04	-0.75	-1.82	0.12	0.87	0.94	0.70	0.87	0.75	0.21	-0.25	-2.47	0.62
RMSE	デフォルト	0.13	0.14	0.13	0.16	0.01	0.01	0.45	0.36	0.13	0.11	0.14	0.07	0.20
	パラメータ調整	0.10	0.11	0.11	0.09	0.02	0.02	0.35	0.30	0.03	0.07	0.07	0.07	0.15
	キャリブレーション	0.10	0.11	0.11	0.09	0.02	0.02	0.34	0.30	0.04	0.07	0.06	0.08	0.15

第6節 考察

(1) シミュレーションの精度確保

以上の結果より、日本国内の積雪寒冷地かつ森林主体の小流域においてシミュレーションを実施する場合、SWAT+を用いることで再現性のあるモデルを構築することができると考えられる。一方、降雪・融雪期のシミュレーションの再現性を確保することは、標高や勾配が異なるなど条件が複雑であるため、他と比較して難しく、降雪・融雪の再現性を確保するためには、観測点を増やす等により詳細な条件設定が必要である。また、自動キャリブレーションにより精度が向上することが確認され、収集データが少ない場合やパラメータの測定が困難な場合に、シミュレーション精度を向上させる有効性がわかった。一方、NSEに基づいて自動校正を行った場合、RMSEは改善されなかった。補正基準を選択する際には、NSE、RMSE、MSEはそれぞれ特性が異なるため、目的に応じて自動校正基準を選択する必要がある。

(2) 公開データによる補完

本研究で使用したSWAT+は、改良されたことでより他のソフトと比較してインターフェイスが見やすく操作性に優れている。一方、土壌データを収集は専門性も必要となる。日本土壌インベントリー（農研機構）の土壌データを使用した場合においても一定の改善が確認されており、SWAT+のデフォルト値と組み合わせて、解析することで一定の精度を作ることが可能であると考えられる。

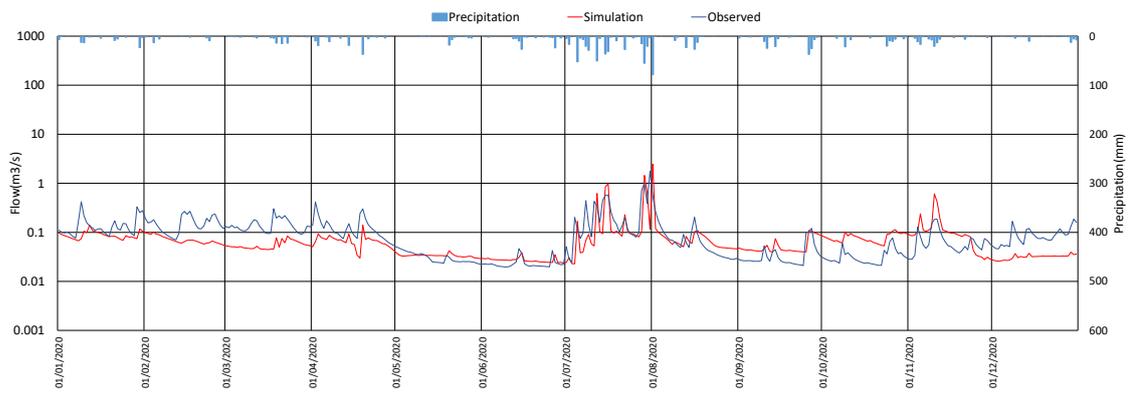


図 2-15 日本土壌インベントリー（農研）データをパラメータに入力

第7節 まとめ

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

(1) モデルの選定

モデルは準分布型モデルかつ汎用性が高い SWAT+ を採用した。

(2) モデルの構築

土壌分析の実測値の入力、側方流の補正值として自動キャリブレーションを実施し、モデル構築した。

(3) モデルの検証

構築したモデルを NSE、RMSE で精度検証を行い、それぞれ一定の精度が確保できることを確認した。

本章で構築したモデルを使用して、3 章から 5 章のシミュレーションを実施する。

引用・参考文献

- 1 根岸勇太ら（2019）,健全な水循環の形成に向けたグリーンインフラ活用シナリオと地下水流動シミュレーション：東京都神田川上流域を対象として,環境情報科学学術研究論文集 33, 277-282
- 2 矢島啓ら（2021）,気候変動が連結系汽水湖 宍道湖・中海の水環境に及ぼす影響,土木学会論文集 B1（水工学） Vol.77,NO.2,I_1087-1092
- 3 峠嘉哉ら（2015）,アラル海流域における陸域水循環モデルを用いた気候変動の水需給バランスへの影響評価,土木学会論文集 G（環境） Vol.71,NO.5,I_183-188
- 4 井芹慶彦ら（2015）,高知県を対象とした気候変動による水循環変動評価モデルの構築,水文・水資源学会 2015 年度研究発表会, 100129
- 5 山下三男ら（2006）,河川水文シミュレーションモデルの現状と新しい提案,特集：集水域の生物地球化学シミュレーションモデルの有用性と課題,陸水学雑誌 67: 267 - 280
- 6 Williams J. R., et al(2008). History of model development at temple. Hydrol. Sci. J. 53 (5), 948-960.
- 7 Bieger, K., et al (2016). Introduction to SWAT+, A Completely Restructured Version of the Soil and Water Assessment Tool. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 53(1), 115-130. Retrieved from <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12482>
- 8 Katrin, B., et al (2016), Introduction to SWAT+, A completely restructured version of the Soil and Water Assessment Tool. 53, 115– 130
- 9 Okazawa H. ., et al (2016). Influence of Meteorological Variable Combinations on Reference Evapotranspiration Estimated by the FAO56 Penman-Monteith Method, International Journal of Environmental and Rural Development, 7(2), 147-153.
- 10Giuseppe Pulighe., et al (2021). Modeling Climate Change Impacts on Water Balance of a Mediterranean Watershed Using SWAT+,Hydrology 2021, 8(4), 157
- 11Neitsch.S.L., et al (2009), Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation version 2009, P.98 - 100.<<https://swat.tamu.edu/media/99192/swat2009-theory.pdf> >
- 12Kakarndee, I., et al (2020). Comparison between SWAT and SWAT+ for simulating streamflow in a paddy-field-dominated basin, northeast Thailand. E3S Web of Conferences, 187, 06002.
- 13令和 2 年度 山地保全調査（森林の水源涵養 機能の評価・発信に関する調査） 委託事業 報告書 P.125 <<https://www.rinya.maff.go.jp/j/suigen/suigen/attach/pdf/index-5.pdf>>

14令和3年度 山地保全調査（森林の水源涵養 機能の評価・発信に関する調査） 委託事業 報告書令和4年3月 P.89 < <https://www.rinya.maff.go.jp/j/suigen/suigen/attach/pdf/index-5.pdf>>

15Moriassi, D. N., et al (2007) . "MODEL EVALUATION GUIDELINES FOR SYSTEMATIC QUANTIFICATION OF ACCURACY IN WATERSHED SIMULATIONS.",P.890-891. < <https://swat.tamu.edu/media/1312/moriasimodeleval.pdf>>

第3章 冬期の気候変動による降雪・融雪への影響評価

第1節 本章の背景・目的

3.1.1 積雪寒冷地の森林地帯における気候変動の影響

20世紀半ば以降、北半球の積雪面積が減少していること確信度は非常に高く（図 3-1）、北半球の積雪面積は、1967年から2012年の期間で3月と4月の平均については10年当たり1.6（0.8～2.4）%、6月については10年当たり11.7（8.8～14.6）%の割合で減少している¹。また、21世紀末までに気候変動への対策がなされず、温室効果ガスが排出され続け、気温が1850-1900年よりも4℃上昇した場合、北半球の春季の積雪面積は、モデル平均では26%減少すると予測されており²、地表面温度が5～7℃上昇した場合、北半球の積雪面積は30～60%減少するとしている²。

寒冷地河川の年間総流量の70%を占めるとされる豊富な融雪水量は、流域涵養や灌漑用水の供給などのように健全な水循環系を構成する重要な要素であり、地域社会を支える貴重な天然資源である³。かかる状況を鑑みるに、2100年には融雪期の流量が減少に適応していくために、現在の水利用の実態をより正確に把握し、総合的な水管理方策の検討を行っていくことが必要である⁴。

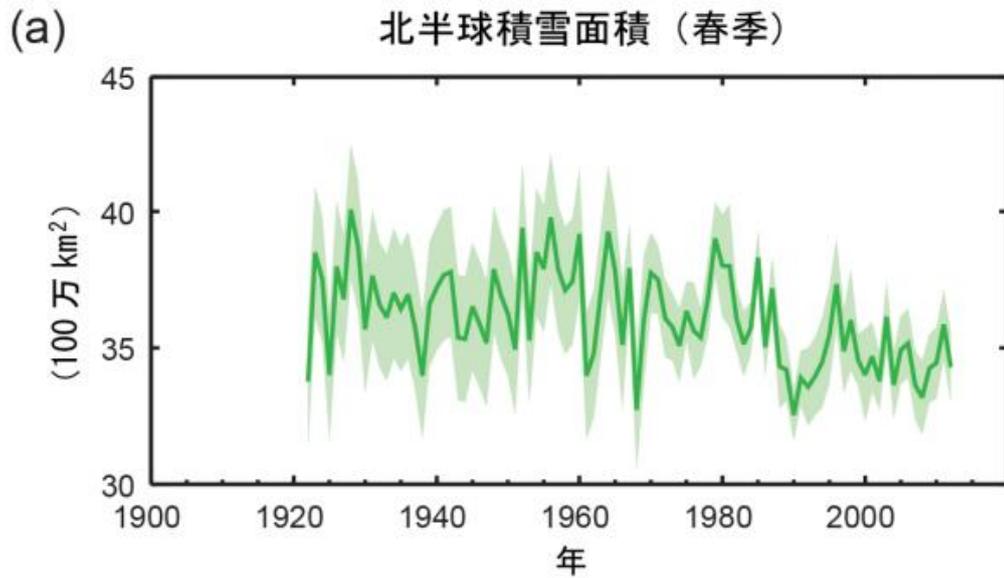


図 3-1 北半球の積雪面積の推移¹

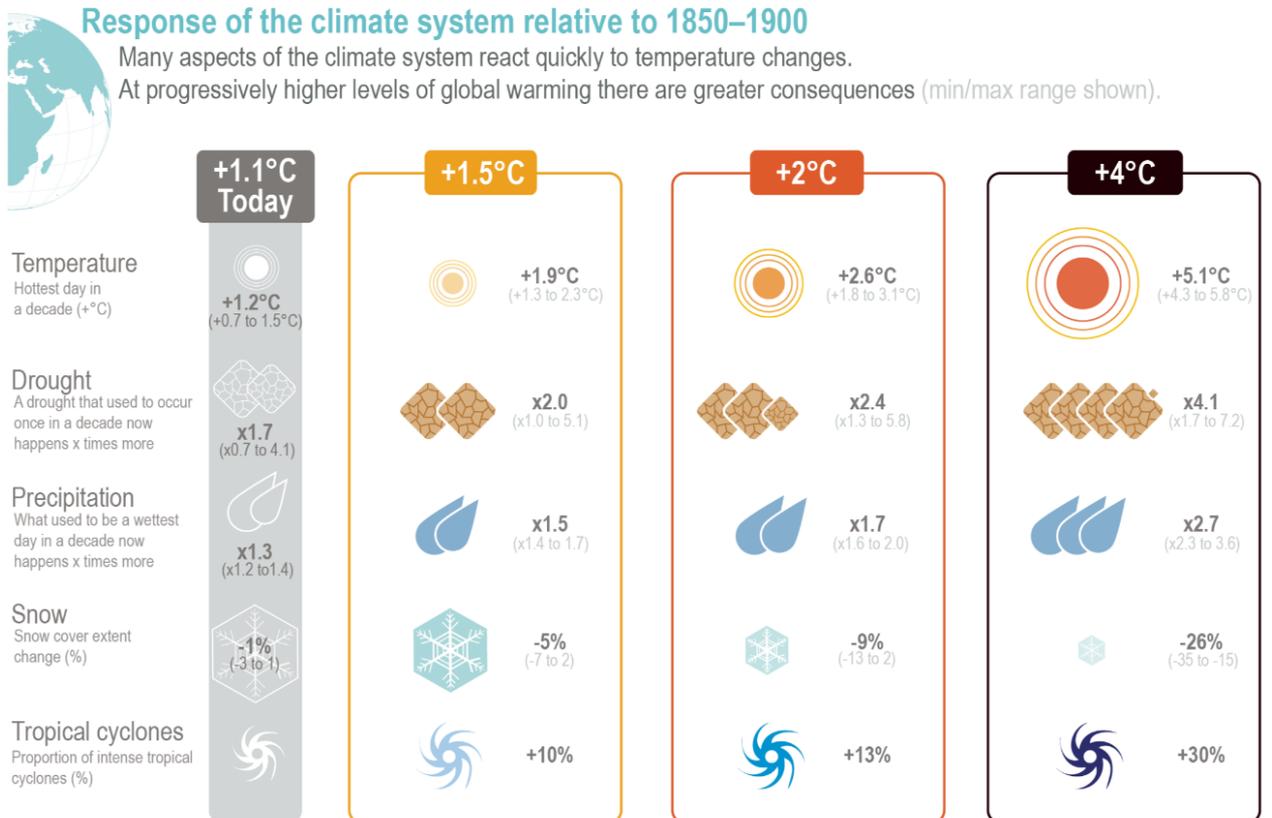


図 3-2 地球温暖化の進行と気候システムの変化²

(d) Northern Hemisphere March–May snow cover

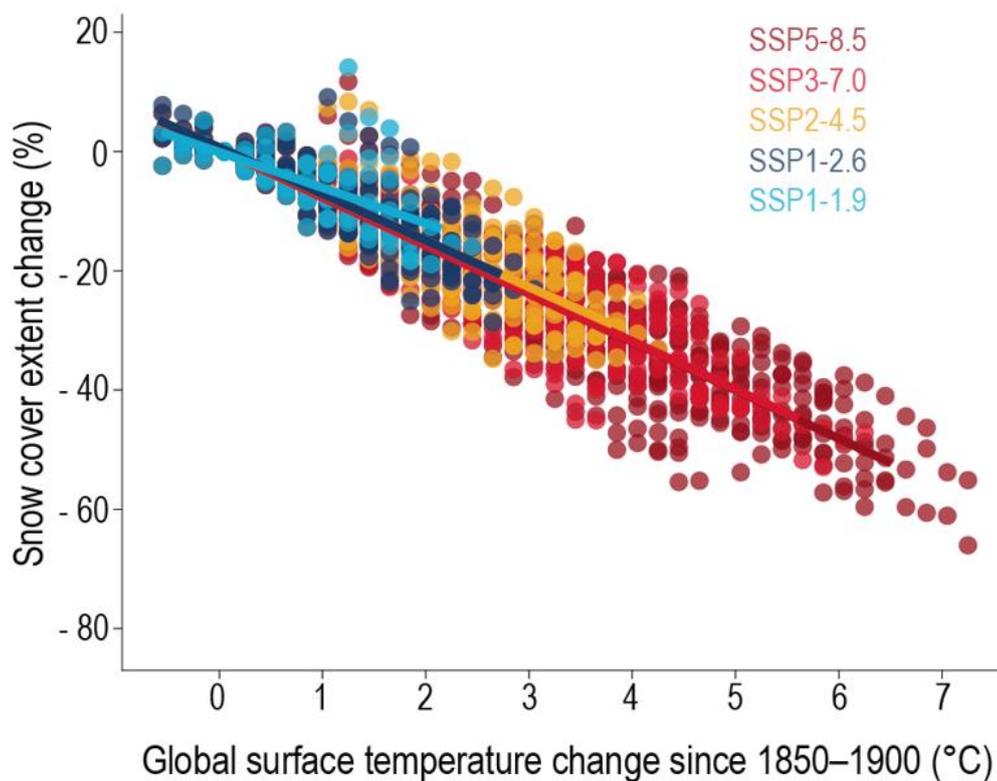


図 3-3 地表面の温度変化と積雪範囲の変化率²

3.1.2 三島町の気候変動による気候条件の変化

三島町周辺における気候変動による気候条件の変化について、最も近い金山町のアメダスデータ⁵を整理した。平均気温、降雨量、降雪量の推移を図 3-4、図 3-5、図 3-6、に示す。

全体的な推移の傾向として、1980–2020 年の間に平均気温は 0.8 °C 上昇、降雨量は 145 mm 増加、降雪量は 146 mm 減少しており、気候変動の影響が生じている可能性が示唆された。

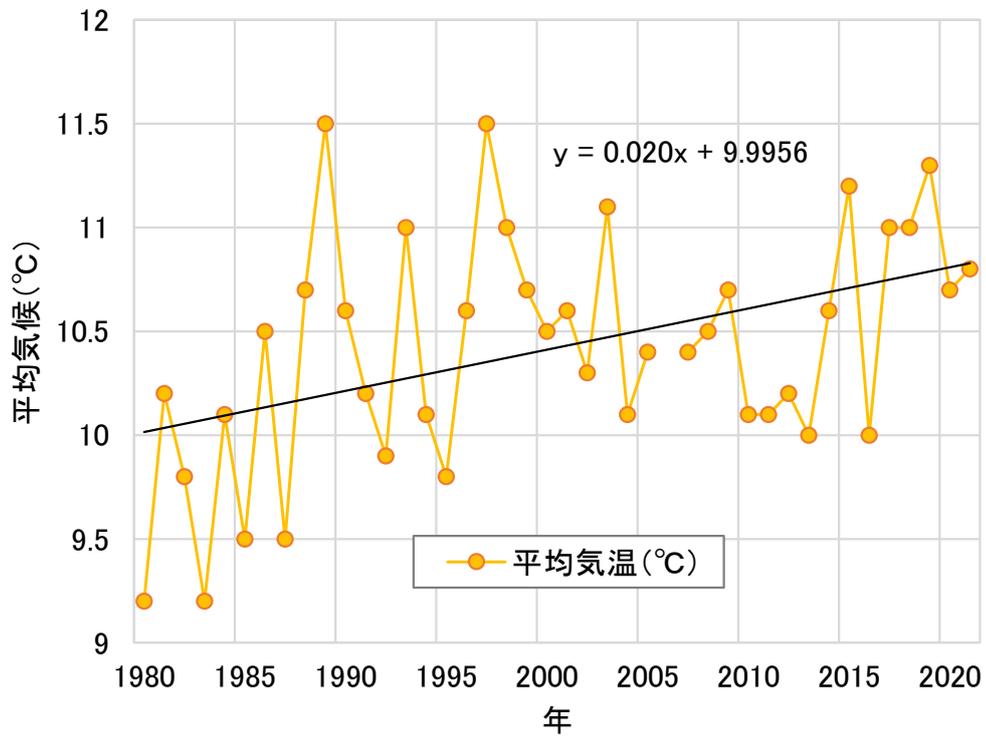


图 3-4 1980—2020 年平均气温（金山町）

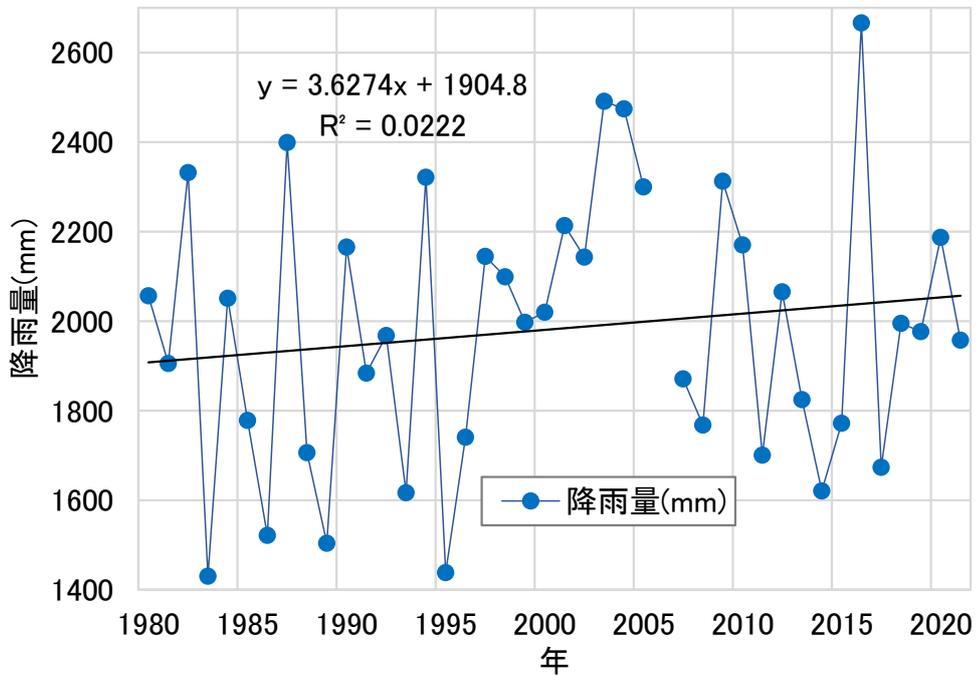


图 3-5 1980—2020 年、降雨量（金山町）

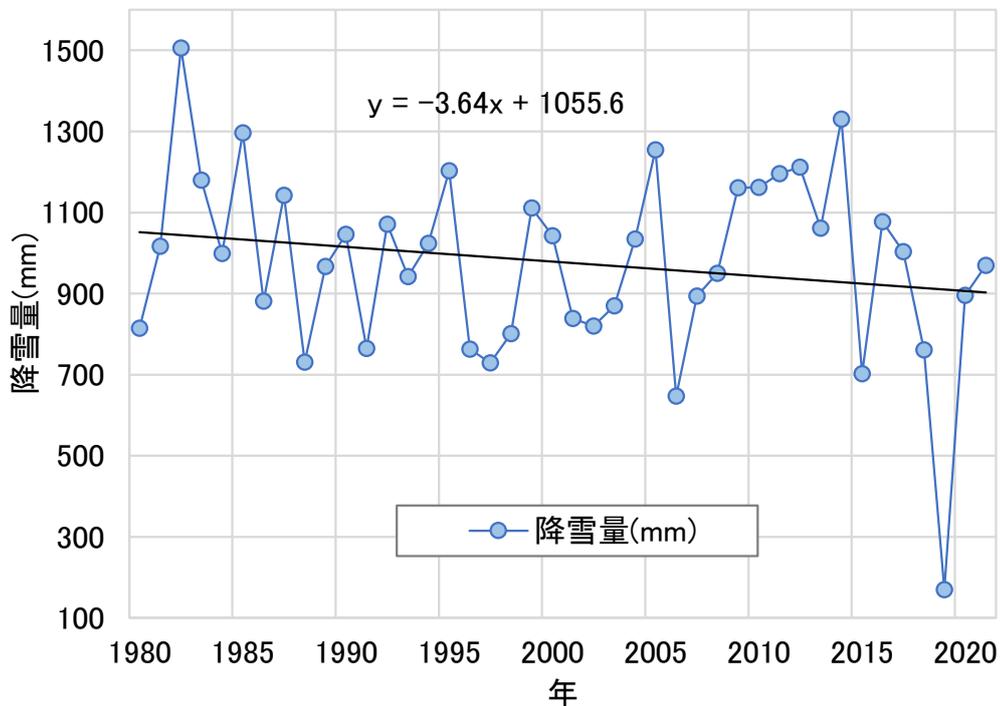


図 3-6 1980-2020 年、降雪量 (金山町)

3.1.3 積雪寒冷地および融雪・降雪に関する文献

積雪寒冷地および融雪・降雪に関する既存文献では、以下の内容が確認されている。

- 積雪寒冷地の大規模流域における気候変動のシミュレーションでは、2100年には融雪期の流量が減少し灌漑に支障をきたすとしている⁴。
- 融雪量の予測については、これまでは個別流域での経験式によるものが多く、他の流域や異なる気候条件に適用できず、気候変動などによる将来変化予測が困難である⁶。
- また、気候変動が与える影響は排出シナリオや気候変動モデルの進捗に合わせて、更新する必要がある⁷。
- 積雪寒冷地における冬期の湯水に関する分析は定性的なものが多く、全

体の傾向を示すに留まっている⁸。

- ▶ 日本において SWAT+を使用した積雪寒冷地の森林地帯における気候変動による融雪の影響評価の研究は少ないⁱ。

3.1.4 本章の目的

本章では、SWAT+を使用して積雪寒冷地域の森林地帯（小流域）における気候変動が与える融雪・降雪への影響と春先の渇水の可能性について評価する。

ⁱ Google scholar : 4 件 ,2023 年 10 月 17 日時点

第2節 解析方法

3.2.1 気候変動シナリオの検討

(1) SSP シナリオ

将来の社会経済の発展の傾向を仮定した共有社会経済経路（Shared Socio-Economic Pathway：SSP）シナリオと放射強制力を組み合わせたシナリオから、下表の5つが主に使用される。これらは SSPx-y と表記され、x は5種の SSP（1：持続可能、2：中道、3：地域対立、4：格差、5：化石燃料依存）に分けられる。SSP は社会経済経路の番号、その後のハイフンに続く数字は代表濃度経路シナリオ（Representative Concentration Pathways：RCP）と同様で2100年における、凡その「放射強制力」（W/m²）を表すものである。

各シナリオの CO₂ 排出量と予測される気温上昇を図 3-7、図 3-8 に示す。

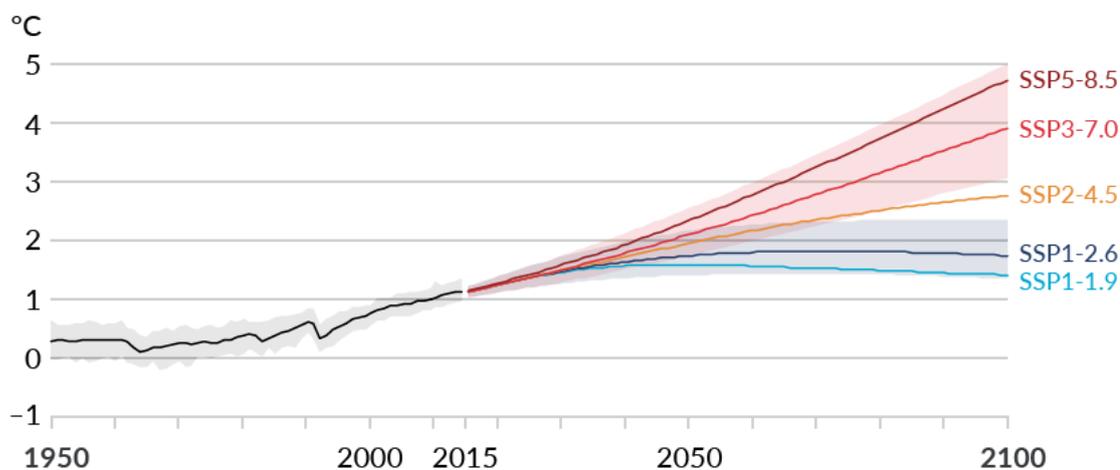
SSP1-1.9 は最善の排出レベルであり、今世紀半ばに世界の CO₂ 排出量が実質ゼロ、その後マイナスになり、パリ協定の「1.5℃」目標に対応する。SSP1-2.6 は「低い」排出レベルであり、2070年代に CO₂ 排出量が実質ゼロになり、「2℃」目標に対応する。中道的な発展の SSP2-4.5 は、今世紀末まで CO₂ 排出量が実質ゼロにできず、2℃以上温暖化する。SSP3-7.0 は今世紀にわたって排出量が増え続け、4℃近く温暖化する。SSP5-8.5 は化石燃料に依存し、気候政策を導入しない最大排出量のシナリオである⁹。

SSP1 は2100年までの気温上昇は1.5℃前後で安定するが、SSP2 より CO₂ 排出量が多いシナリオの場合は、2050年頃には気温上昇は2℃に達し、その後も上昇し続ける予測となっている。

累積 CO₂ 排出量が 1000 GtCO₂ 増加するごとに、世界平均気温が 0.45（0.27～0.63）℃上昇する可能性が高いとされている（図 3-9）¹⁰。

表 3-1 SSP シナリオの概要¹⁾

シナリオ	シナリオの概要 [近いRCPシナリオ]
SSP5-8.5	化石燃料依存型の発展の下で気候政策を導入しない。2050年までにCO ₂ 排出量が現在の2倍に。[RCP8.5]
SSP3-7.0	地域対立的な発展の下で気候政策を導入しない。エーロゾルなどCO ₂ 以外の排出が多い。2100年までにCO ₂ 排出量が現在の2倍に。[RCP6.0 とRCP8.5 の間]
SSP2-4.5	中道的な発展の下で気候政策を導入。2030年までの各国の「国が決定する貢献(NDC)」を集計した排出量の上限にほぼ位置する。CO ₂ 排出は今世紀半ばまで現在の水準で推移。[RCP4.5(2050年までRCP6.0にも近い)]
SSP1-2.6	持続可能な発展の下で、工業化前を基準とする昇温(中央値)を2°C未満に抑える気候政策を導入。2050年以降にCO ₂ 排出正味ゼロ。[RCP2.6]
SSP1-1.9	持続可能な発展の下で、工業化前を基準とする21世紀末までの昇温(中央値)を概ね(わずかに超えることはあるものの)約1.5°C以下に抑える気候政策を導入。2050年頃にCO ₂ 排出正味ゼロ。[該当なし]



Scenario	Near term, 2021–2040		Mid-term, 2041–2060		Long term, 2081–2100	
	Best estimate (°C)	Very likely range (°C)	Best estimate (°C)	Very likely range (°C)	Best estimate (°C)	Very likely range (°C)
SSP1-1.9	1.5	1.2 to 1.7	1.6	1.2 to 2.0	1.4	1.0 to 1.8
SSP1-2.6	1.5	1.2 to 1.8	1.7	1.3 to 2.2	1.8	1.3 to 2.4
SSP2-4.5	1.5	1.2 to 1.8	2.0	1.6 to 2.5	2.7	2.1 to 3.5
SSP3-7.0	1.5	1.2 to 1.8	2.1	1.7 to 2.6	3.6	2.8 to 4.6
SSP5-8.5	1.6	1.3 to 1.9	2.4	1.9 to 3.0	4.4	3.3 to 5.7

図 3-7 各シナリオに基づく平均気温上昇

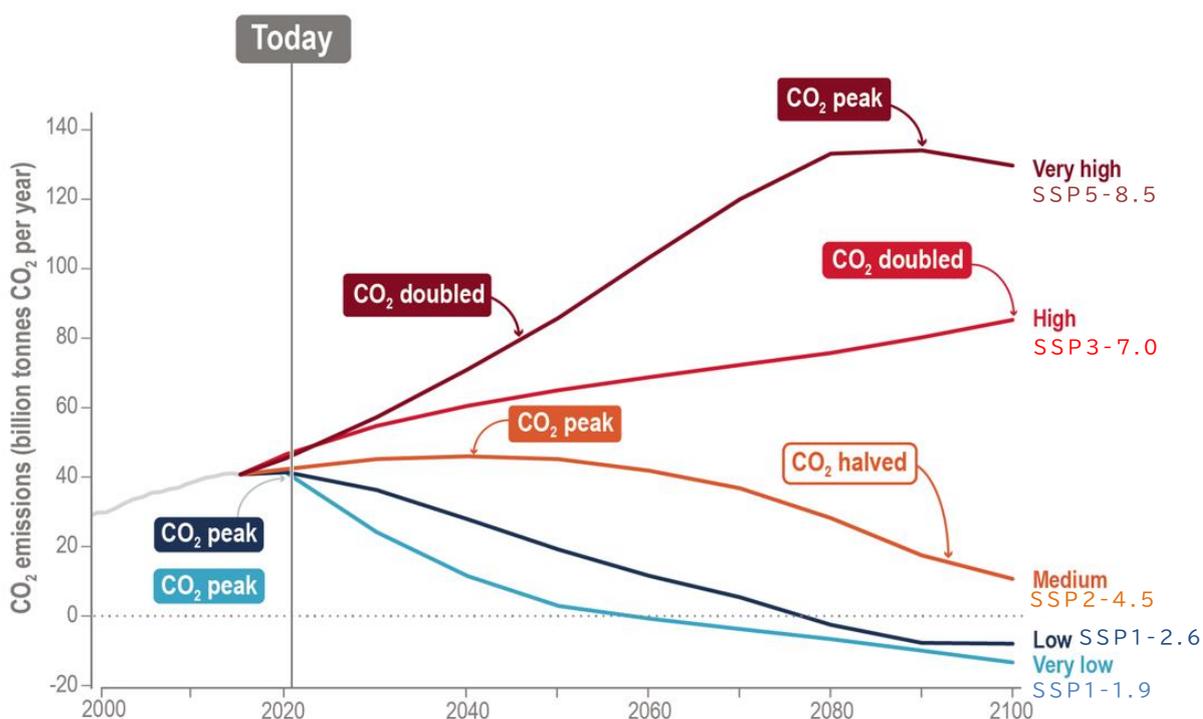


図 3-8 5つのシナリオに基づく将来のCO2排出量²

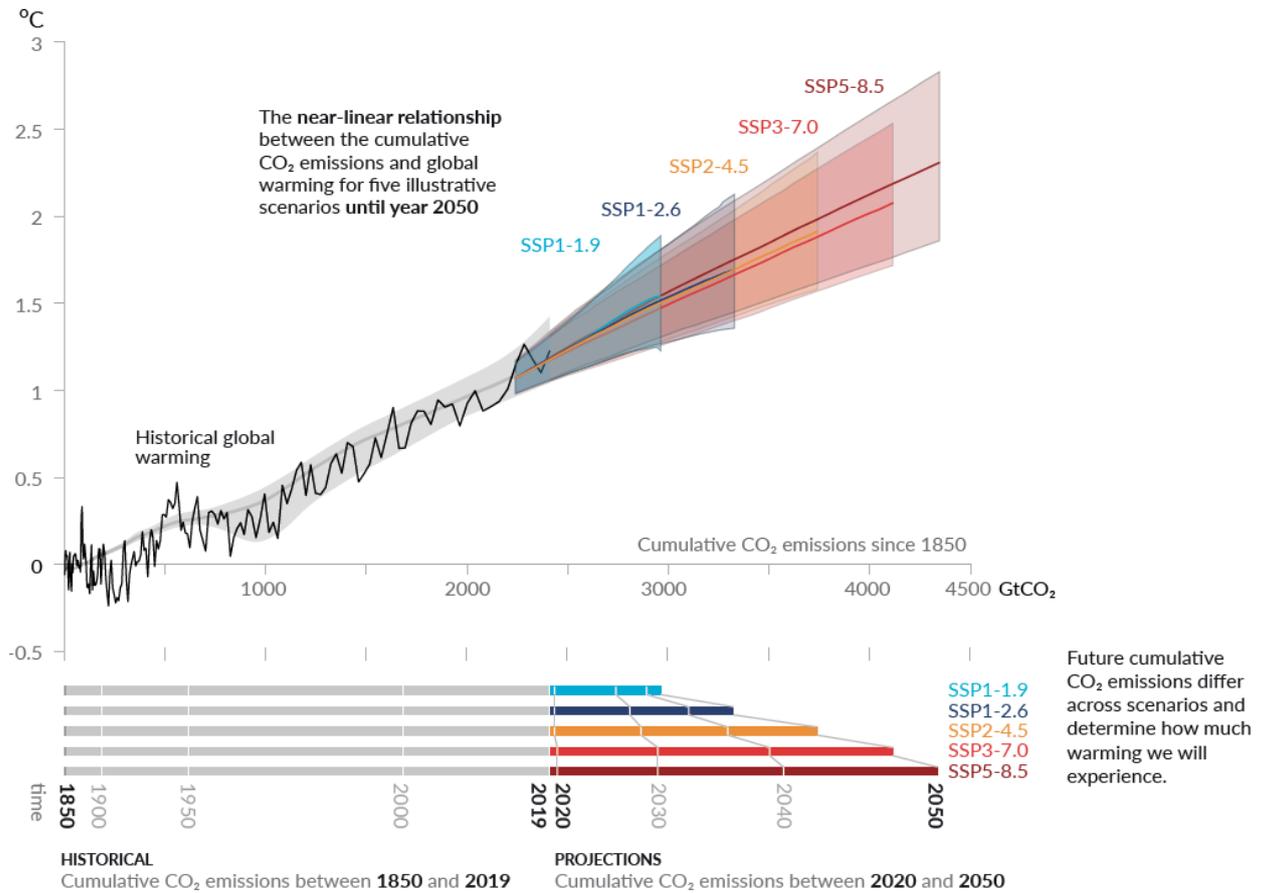


図 3-9 CO₂ 排出量と世界の平均気温の上昇 (°C) ¹⁰

(2) SSP シナリオと適用モデル

気象観測データや将来の気候予測及び気候変動影響予測の研究成果に基づくデータは、国立環境研究所気候変動適応センターが中心となり、関連省庁や各種機関と連携して、気候変動適応情報プラットフォーム（A-PLAT）を運営し、地方自治体や事業者等が、適応策を検討できるように情報を発信している。

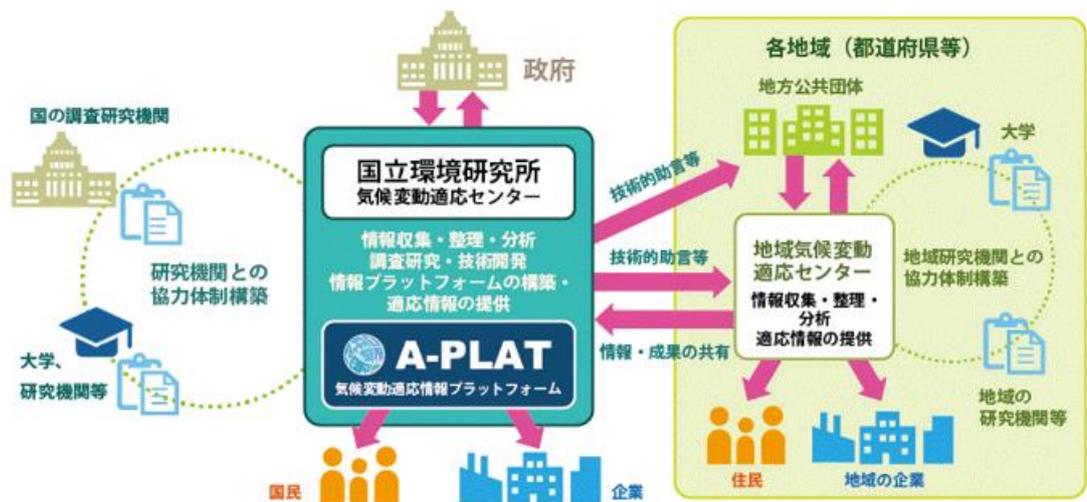


図 3-10 A-PLAT の構成図¹²

本研究では A-PLAT よりデータを取得した。選択したデータは、IPCC の第 6 次影響評価報告書にも用いられている CMIP6（第 6 期結合モデル相互比較プロジェクト）の最新モデル群を採用し、気候モデルは MIROC6 とした。MIROC6 は、日本において東京大学／国立研究開発法人国立環境研究所／国立研究開発法人海洋研究開発機構が開発した気候モデルであり、当該モデルを利用して日本を含むアジアの気候やモンスーン、梅雨前線等の再現性や将来変化の研究が実施されている¹²。

データセットは国立環境研究所（NIES）気候変動適応センターが開発した日本国内における統計的ダウンスケーリングがなされたシナリオ NIES2020¹³の福島県シナリオを採用した。公開されている全球気候モデルは、格子の水平方向のサイズが数十 km から 100km 程度であり、地域の情報とするには解像度が粗く、全球気候モデルで過去を再現した結果が実際の観測値と完全には一致せず、系統的なズレが生じるが、NIES2020 は、全球気候モデルの結果を 1km 間隔に内挿し、過去の気候を再現した全球気候モデルの結果と観測値との間の統計関係を使って系統的なズレを除去する統計的ダウンスケーリングという手法を用いて詳細な地域気候予測データを開発したものである（図 3-11）¹⁴。

気候・影響指標は最高・最低気温、降雨量、日射量、相対湿度とした。

将来予測シナリオは SSP1-2.6（持続型）、SSP2-4.5（中道型）、SSP5-8.5（化石燃料依存型）の三つのケースを選定した。

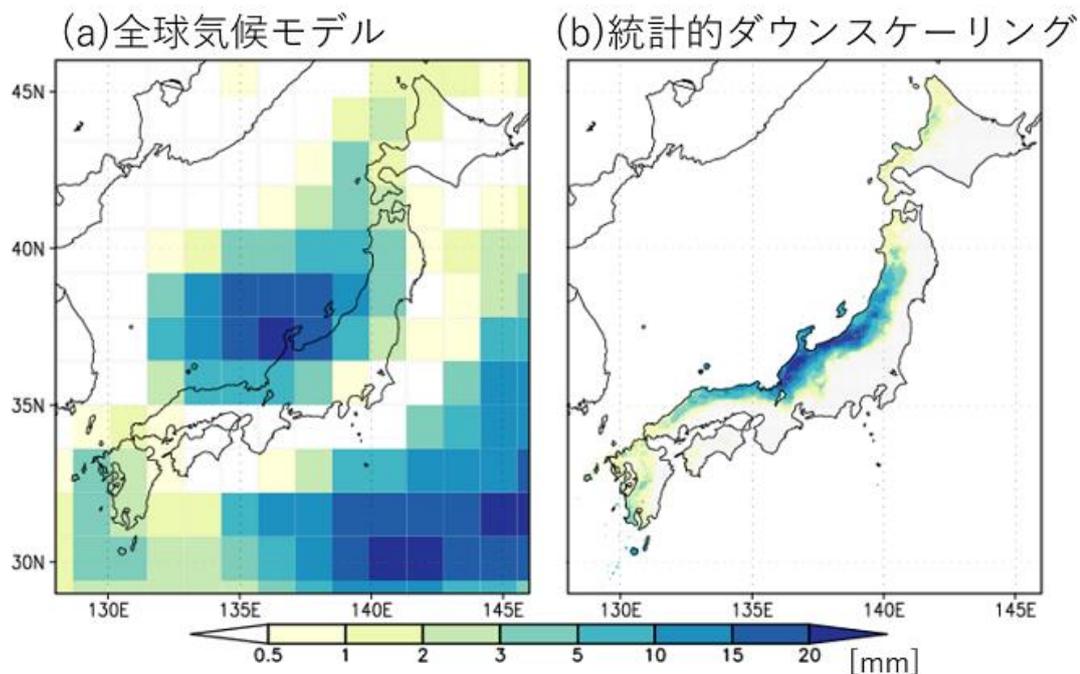


図 3-11 NIES2020 によりダウンスケールされた日降雨量分布¹⁴

表 3-2 適用シナリオ概要

項目	内容
データセット	CMIP6 - NIES2020(月単位)
気候変動モデル	MIROC6
パラメータ	a. 最高・最低気温(°C) b. 降雨量(mm) c. 日射量(MJ/day) d. 相対湿度(%)
将来予測シナリオ	SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP5-8.5
使用年	2020、2090
地域	福島県シナリオ

(3) 現在気候と将来気候の変化量

上述の通り、2090年の状況を予測値として MIROC6-NIES2020-Fukushima の予測データ（月単位）を使用して、現在気候（2020年）から将来気候（各 SSP シナリオ）への変化量を算出し、整理した（図 3-16、表 3-3）。

降雨量は変化倍率（2090/2020）で計算¹⁵、それ以外は差分（2090年－2020年）で計算した。

気温に関しては、SSP1-2.6 と SSP2-4.5 においても 0.5～2.0℃上昇し、SSP5-8.5 おいてはいずれの月も 3℃以上気温が上昇する。降雨量は、すべてのシナリオで増加し、SSP2-4.5 は最も降雨量が多く、2020年と比較して 1.17 倍となる。

実測した 2020年のデータに各変化量に基づいて各シナリオの 2090年の仮想データセットを作成して、構築した SWAT+モデルに入力し、シミュレーションを行った。

最高気温 (2090-2020)

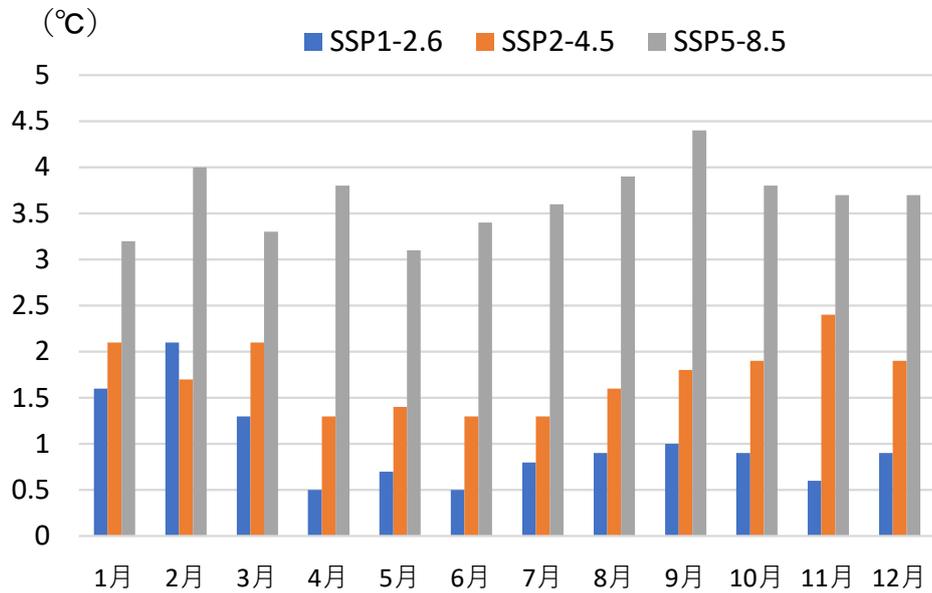


図 3-12 各シナリオの 2020 と 2090 年の変化量 (最高気温)

最低気温 (2090-2020)

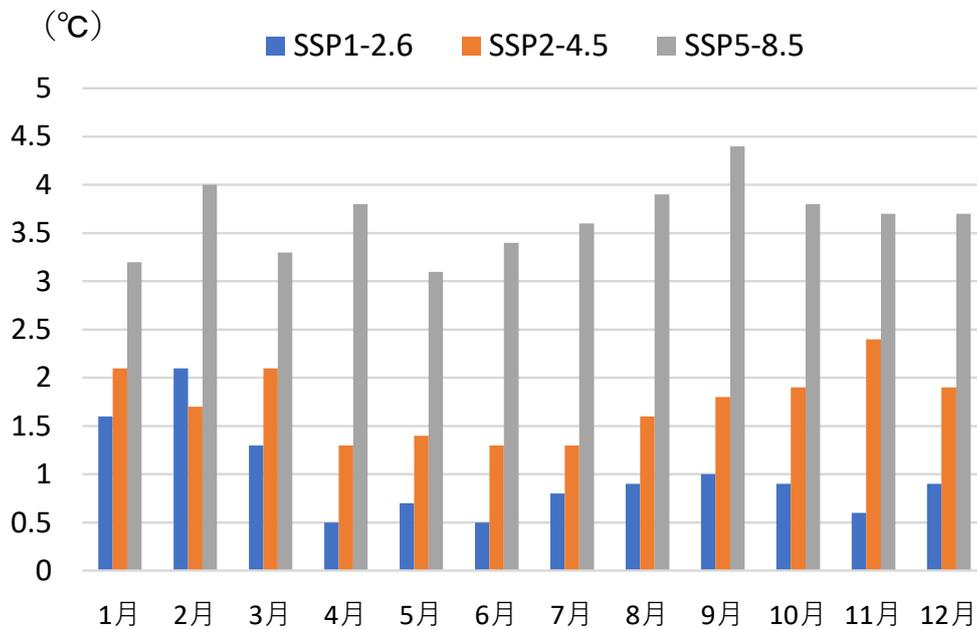


図 3-13 各シナリオの 2020 と 2090 年の変化量 (最低気温)

相対湿度 (2090-2020)

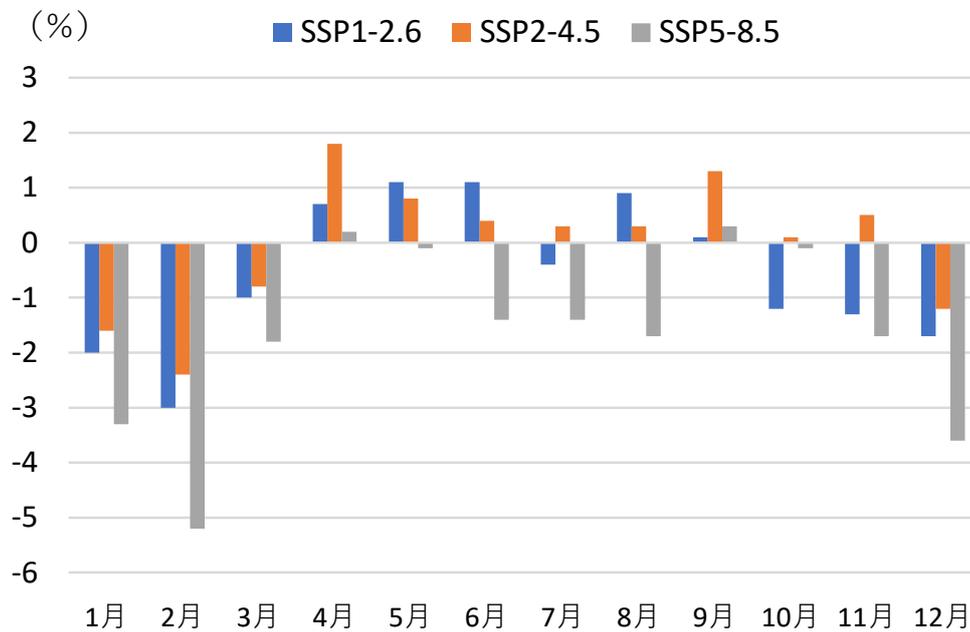


図 3-14 各シナリオの 2020 と 2090 年の変化量 (相対湿度)

日射量 (2090-2020)

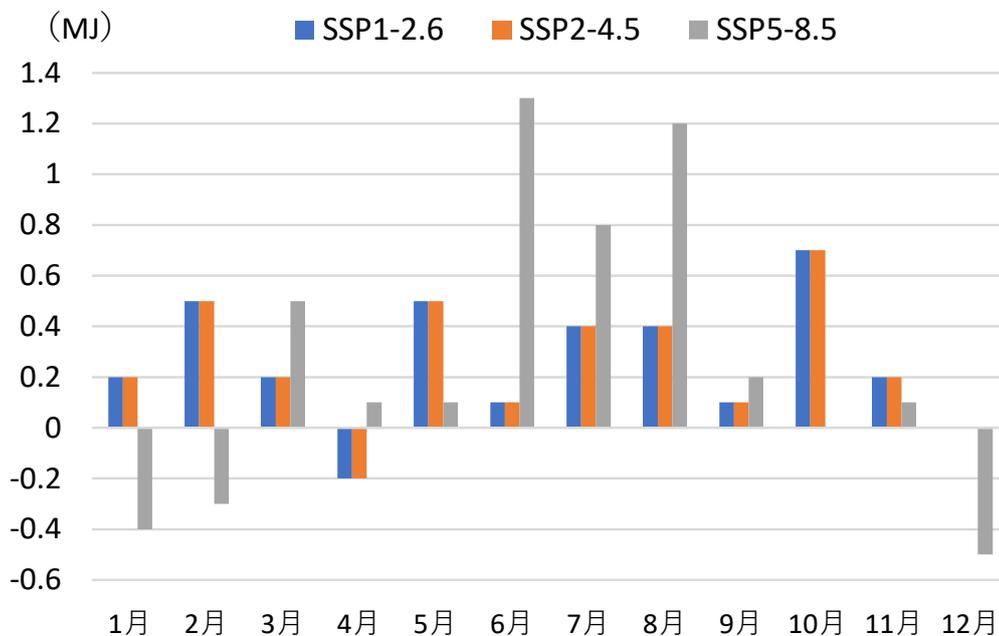


図 3-15 各シナリオの 2020 と 2090 年の変化量 (日射量)

降雨量（2090/2020）倍率

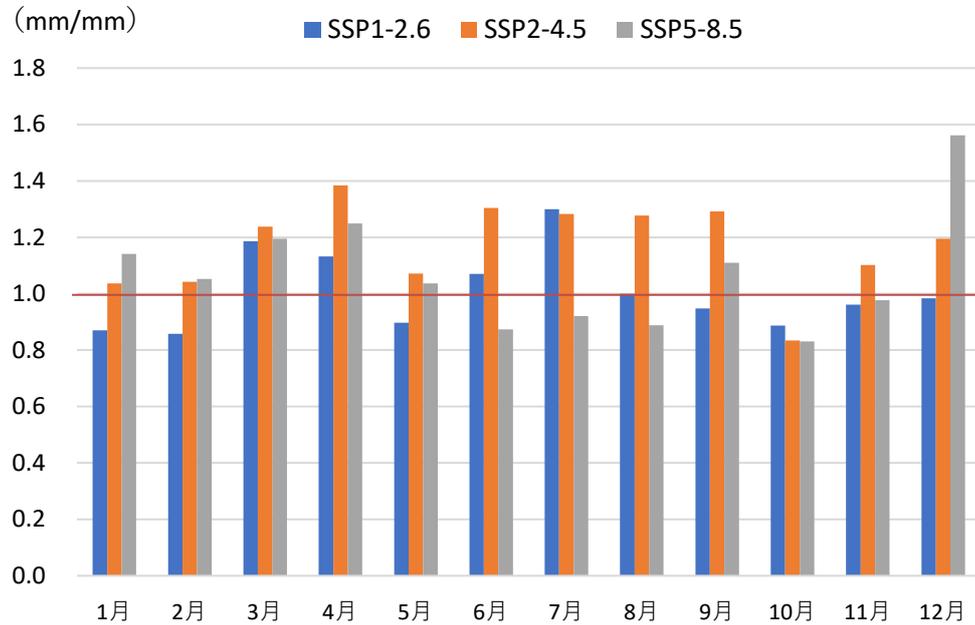


図 3-16 各シナリオの 2020 と 2090 年の変化量（降雨量）

表 3-3 各シナリオの 2020 と 2090 年の通年変化量

SSP 変化量（通年）	SSP1-2.6 持続型	SSP2-4.5 中道型	SSP5-8.5 化石燃料依存型
最低気温（℃）	+0.82	+1.56	+3.43
最高気温（℃）	+0.98	+1.73	+3.66
日射（MJ）	+0.26	+0.26	+0.26
相対湿度（％）	-0.56	-0.04	-1.65
降雨量（mm/mm）*	1.01 倍	1.17 倍	1.07 倍

*降雨量は倍率で計算、それ以外は差分で計算

表 3-4 各シナリオの 2020 と 2090 年の冬期（1-3 月）変化量

SSP 変化量（1-3 月）	SSP1-2.6 持続型	SSP2-4.5 中道型	SSP5-8.5 化石燃料依存型
最高気温（℃）	+1.67	+1.97	+3.50
最低気温（℃）	+1.13	+1.27	+2.90
日射（MJ）	+0.30	+0.30	-0.07
相対湿度（％）	-2.00	-1.60	-3.43
降雨（mm/mm）*	0.97 倍	1.11 倍	1.13 倍

第3節 解析結果

3.3.1 降雪・融雪への影響

1月から3月までの融雪量と降雪量および日数を図 3-17、図 3-18、表 3-5 に示す。2090 年のすべてのシナリオにおいて、1月と2月の降雪・融雪量が大きく減少している（図 3-17）。1～3月の総計では、降雪・融雪量ともに 50 mm 以上減少した。日数に関しては、SSP1-2.6 と図 3-18）、SSP5-8.5 の場合は、わずか 1 日となっている（表 3-5）。

SSP5-8.5 の場合は、降雪・融雪量とも 5.7 mm となり、蒸発散量は 2020 年の 14.2 mm から SSP5-8.5 では 19.6 mm（1.38 倍）の差があった。

表 3-5 に示す通り、通年の平均流量は SSP シナリオの方が多い。

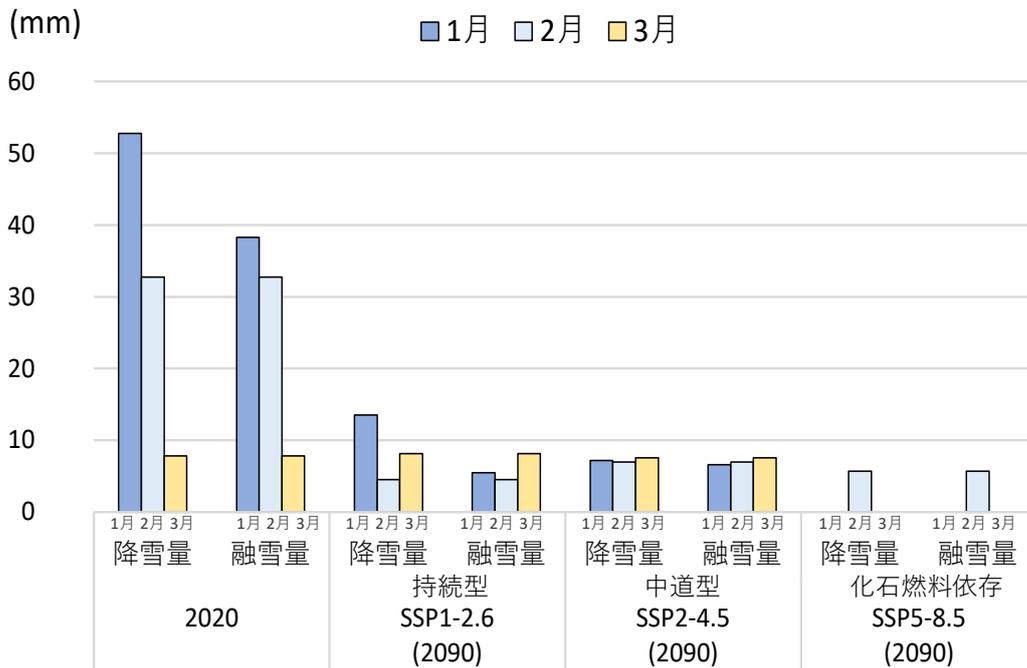


図 3-17 各シナリオの降雪・融雪量（1～3月）

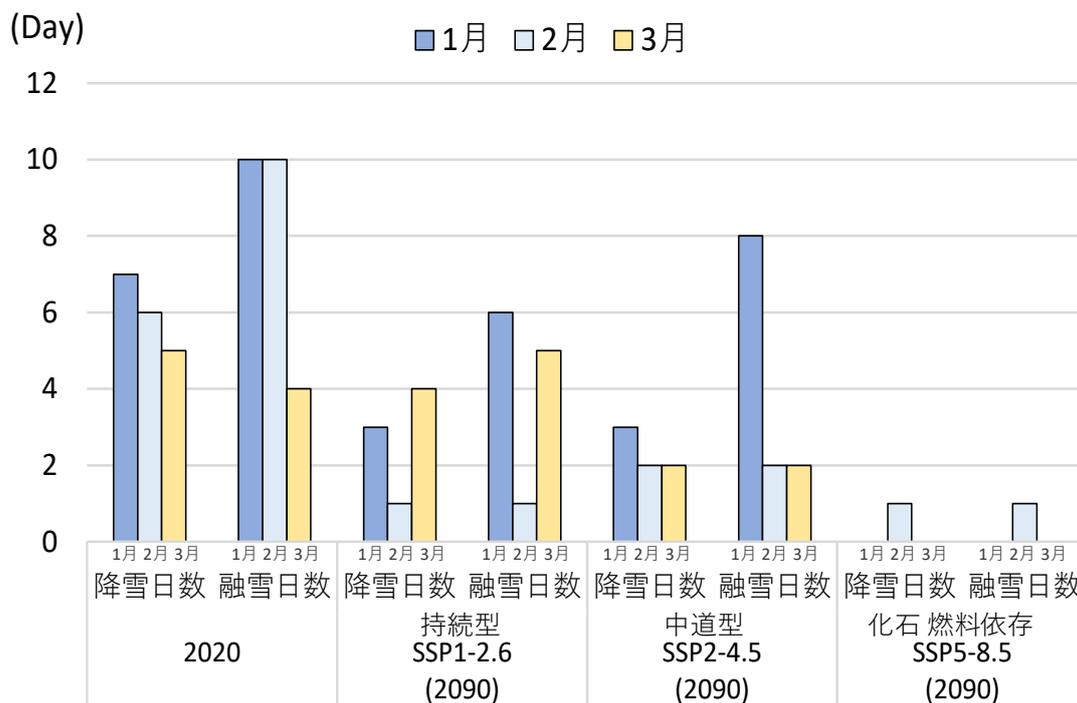


図 3-18 降雪・融雪の日数（1～3月）

表 3-5 各シナリオにおける総計（1～3月）

	2020	SSP1-2.6 持続型 (2090)	SSP2-4.5 中道型 (2090)	SSP5-8.5 化石燃料依存型 (2090)
降雨量 (mm)	178.5	175.3	199.7	204.1
日平均流量 (m ³ /s)	0.066	0.059	0.066	0.072
降雪量 (mm)	93.3	26.2	21.7	5.7
降雪日数 (day)	18	8	7	1
融雪量 (mm)	78.8	18.1	21.1	5.7
融雪日数 (day)	24	12	12	1
蒸発散量 (mm)	14.2	18.2	19.2	19.6

3.3.2 春先の流量

上述の通り、積雪・融雪量の減少は確認されたが、降雨量の増加に伴い、流量は増加した。各月の流量と降雨量を図 3-19 に示す。月別の流量では、2020 年における流量との差は大きくなく、全体としては GHG の排出量が多いシナリオの方が流量が多い。

一方、2 月 15 日～2 月 29 日の平均流量は、2020 年は $0.0553 \text{ m}^3/\text{s}$ 、SSP1-2.6 は $0.0358 \text{ m}^3/\text{s}$ （2020 年比 35%減少）、SSP2-4.5 は $0.0451 \text{ m}^3/\text{s}$ （2020 年比 18%減少）、SSP5-7.5 は $0.0441 \text{ m}^3/\text{s}$ （2020 年比 20%減少）と融雪による流量の差を確認した（図 3-20）。

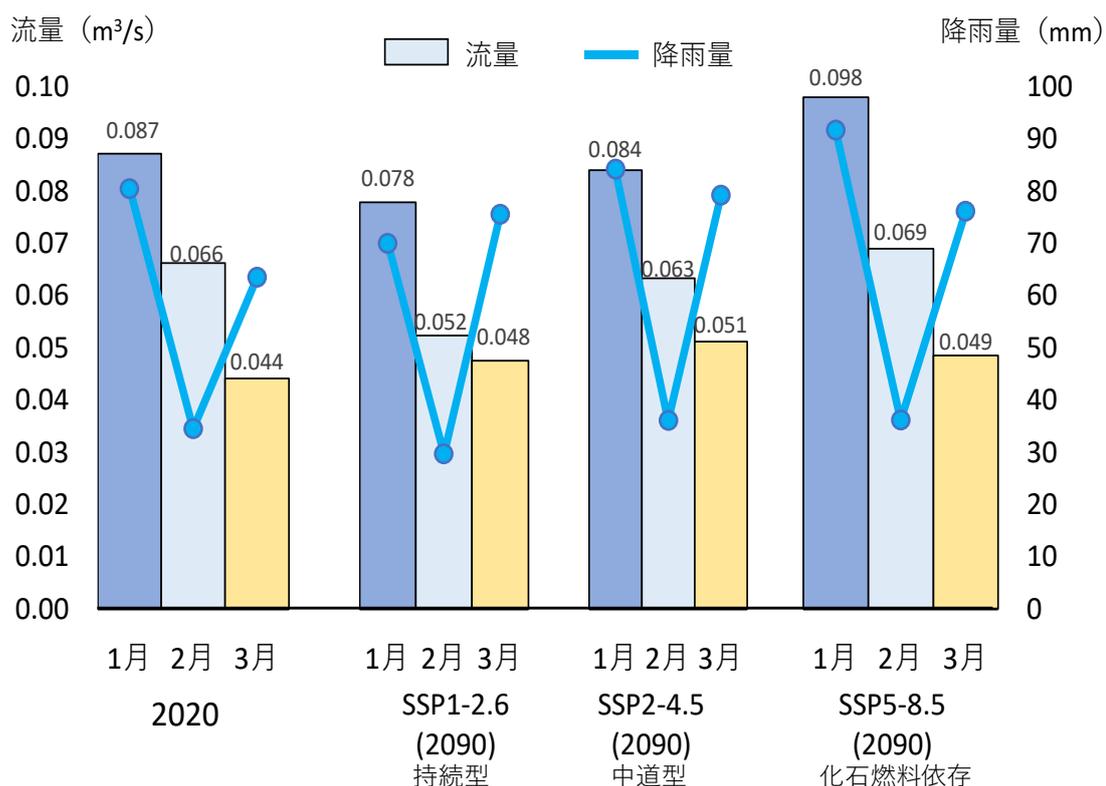


図 3-19 各シナリオの流量と降雨量（1～3月）

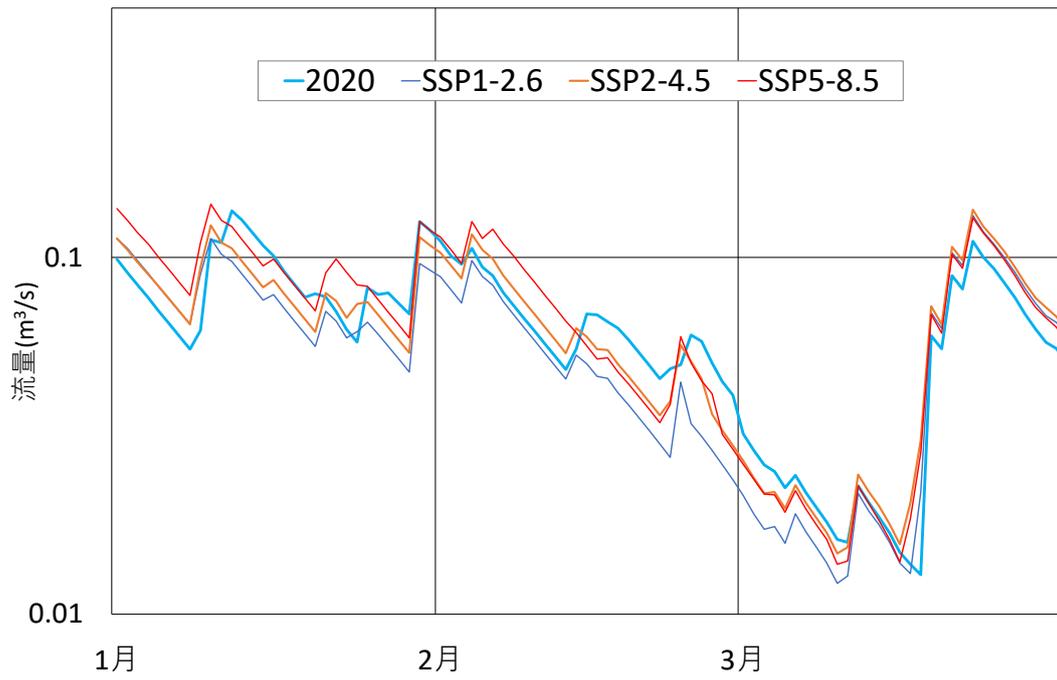


図 3-20 各シナリオの流量推移 (1~3月)

第4節 考察

(1) 気候変動と降雪・融雪への影響

すべての SSP シナリオにおいて、1月と2月の降雪・融雪量が大幅に減少しており、降雪日数も減少している。結果として、1～3月の総計では、降雪・融雪量が 50 mm 以上減少した。特に SSP5-8.5 の場合は、降雪・融雪量がわずか 5.7 mm となり、日数も 1日まで減少しており、将来の気候シナリオにおいて極端な降雪・融雪の減少の可能性を示唆している。

(2) 春先の渇水の可能性

SSP シナリオは、SSP2-4.5 と SSP5-8.5 の降雨量は増加しているが、積雪・融雪量は大幅に減少している。一方で、降雨が増加することで、春先の総流量は増加している。ただし、2月15日～2月29日の平均流量を見ると、SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP5-8.5 のシナリオでは、2020年に比べて融雪による流量が減少しており、一部の期間においては融雪による水源が減少する可能性があることを示唆している。

(3) 総合的な影響

降雪・融雪の減少は、水源の変動や春先の流量に影響を与えており、一部のシナリオでは春先において融雪の減少により流量が低下し、渇水に陥る可能性が高まる恐れがある。

一方で、降雨量の増加により、春先の総流量は一部のシナリオで増加しているが、融雪水の減少により、河川の水温が上昇することが考えられ、これらの変動が地域の水利用や生態系にどのように影響するかは注意が必要である。

これらを踏まえて、積雪・融雪の変動が春先の水量に影響を及ぼす可能性があるため、降雨の一時貯留のため池などを整備すること等、検討が必要である。

第5節 まとめ

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

(1) 降雪・融雪への影響

SSPシナリオにおける2090年の降雪量は、2020年と比較して、SSP1-2.6で約3割、SSP2-4.5で約4割、SSP5-8.5で約9割減少することが示された。また、融雪量も同様に減少し、2090年の融雪量は、2020年と比較して、SSP1-2.6で約3割、SSP2-4.5で約4割、SSP5-8.5で約9割減少することが示された。

(2) 春先の流量への影響

降雨量はすべてのシナリオで増加しており、特にSSP2-4.5では最も増加しており、春先の総流量は増加する。

一方で2090年の2月15日～29日の平均流量は、2020年と比較して、SSP1-2.6で約3割、SSP2-4.5で約1割、SSP5-8.5で約1割減少することが示された。

3章では冬期の降雪・融雪の影響に関して評価したが、4章では気候変動によるリスク増大の可能性が高い、豪雨による災害リスクと森林機能に着目し、シミュレーションを実施した。

引用・参考文献

- 1 気象庁（2013）「IPCC 第5次評価報告書第1作業部会報告書政策決定者向け要約」,P.7,19,26,<
https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/ar5/ipcc_ar5_wg1_spm_jpn.pdf>
- 2 IPCC Sixth Assessment Report, Figures: Technical Summary, Infographic TS.1&TS.12< <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/figures/technical-summary>>
- 3 小原 一哉ら(2008). 降雪・積雪・融雪過程のモデル化と河川融雪流出予測への応用に関する研究. 土木学会論文集 B.2008年 64巻 1号 p. 49-61
- 4 川村一人ら（2010）気候変動が積雪地域の水循環と水利用へ,水工学論文集 , 54, 445-450. 10)
- 5 気象庁、過去の気象データ検索、福島県金山町
<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php?prec_no=36&block_no=1044&year=&month=&day=&view=a4>
- 6 岩見洋一ら. (2015),積雪寒冷地河川における流出計算の精度向上と洪水・渇水リスク評価に関する研究,<<https://www.pwri.go.jp/jpn/results/report/report-seika/2015/pdf/ho-3.pdf>.>
- 7 西原照雅ら（2015）,積雪寒冷地のダムを対象とした融雪期における気候変動の影響に関する一考察,土木学会論文集 G(環境) Vol.71, No.5, I_197-I_203.
- 8 阪田義隆ら. (2016), "積雪寒冷地における領域モデルを用いた渇水比流量の分布推定—現在と将来—." 土木学会論文集 G(環境), 71(5), I_253-I_264.
- 9 江守正多（2021）,日経 ESG ホームページ,温暖化の実態が明らかに IPCC 第6次評価報告書のメッセージを読み解く(2021.10.29掲載)<
<https://project.nikkeibp.co.jp/ESG/atcl/column/00003/102600025/?P=3>>
- 10 IPCC(2021) The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Sixth Assessment Report (AR6)-Summary for Policymakers,P.28<
https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM.pdf>
- 11 環境省（2023）, IPCC 第6次評価報告書の概要—第1作業部会（自然科学的根拠）,P.32<<https://www.env.go.jp/content/000116424.pdf>>
- 12 気候変動適応プラットフォーム（A-PLAT）ホームページ-気候予測・影響予測の概要< <https://adaptation-platform.nies.go.jp/webgis/guide.html>>
- 13 Ishizaki, N., 2021, Bias corrected climate scenarios over Japan based

on CDFDM method using CMIP6 < <https://www.nies.go.jp/doi/10.17595/20210501.001-e.html>>

14石崎紀子（2021）,国立環境研究所ホームページ,統計的ダウンスケーリングによる詳細な日本の気候予測情報を公開 ～日本で初めて第6期結合モデル相互比較プロジェクト（CMIP6）に準拠～< <https://www.nies.go.jp/whatsnew/20210628/20210628.html>>

15国土交通省,“気候変動を踏まえた治水計画のあり方-提言”～参考資料～,P.29< https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/chisui_kentoukai/pdf/06_sankousiryoku.pdf>

第4章 気候変動を考慮した森林の機能と災害リスクの評価

第1節 本章の背景・目的

4.1.1 気候変動下の災害に対する自然を活用した対応

気候変動適応計画では、流域治水の推進に当たっては、自然環境が有する多様な機能を活用し、災害リスクの低減に寄与する生態系の機能を積極的に保全又は再生すること、が掲げられている¹。

昨今、注目を集めている生態系を活用した防災・減災（Ecosystem-based Disaster Risk Reduction：Eco-DRR）や、生態系を活かした気候変動適応（Ecosystem-based Adaptation：EBA）は、NbS（Nature based Solution）の概念に包含される。一方で、NbSの価値とその効果の限界を理解することが重要であるとも言われている²。例えば、英国における自然洪水管理アプローチ（漏水ダムや集水域の森林など）は、小流域での小規模な洪水に伴う危険を軽減するが、最も極端な現象には大きな影響を与えないという結果も出ている²。

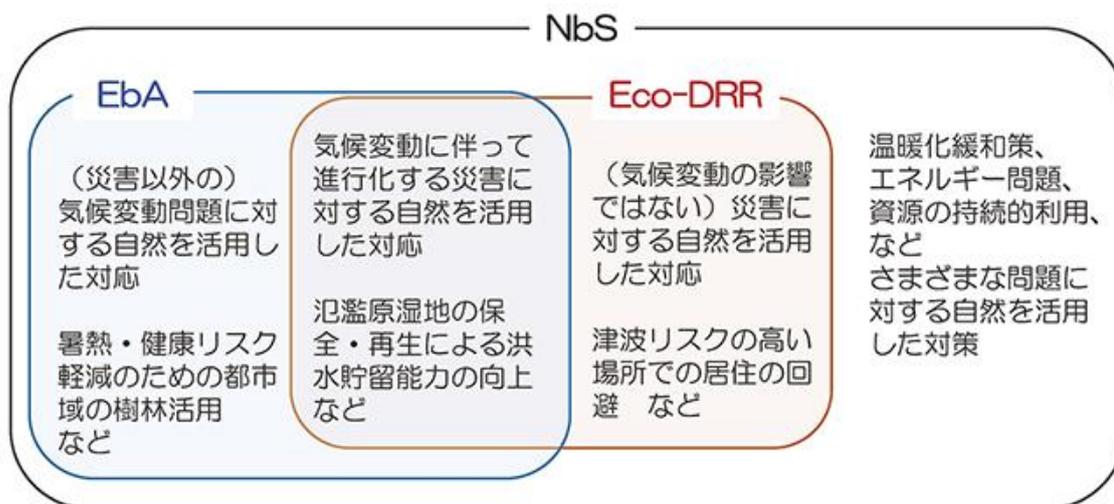


図 4-1 NbS、EbA、Eco-DRR の概念の相互関係³

4.1.2 森林伐採と貯水機能の関係

森林の自然を活用した機能として、貯水機能や災害リスクについてはこれまで長く研究されてきた。その中でも、森林の伐採と貯水機能の関係を示す文献では以下の結果が得られている。

- 森林伐採面積の割合(伐採面積率)と年流出量の増加量との関係として、伐採面積が大きくなるほど流出量の増加が大きくなる傾向がある⁴。
- 長期的には森林で覆われた流域は、背丈の低い農作物や草地の流域より蒸散量が多く、その結果として流出量が少なくなる⁵。
- 浸透能 (mm/hr) は、林地：258、伐採跡地：150、草生地：128、裸地：79⁶ (図 4-2)
- 土砂流出量 (t/年/ha) は、森林：2、荒廃地:307、耕地：15 (図 4-3)
- また、皆伐による短期的な影響では樹冠遮断水量の減少と蒸発散量の減少は、土壌中への水貯留量の増加をもたらし、その結果として流量が増加する事例が確認されている⁷

既往研究では、都市開発等による土地利用変化と災害リスクの関係を検証した研究や⁸、水田の治水効果に関する研究は存在するが⁹、森林伐採と農地との関係を研究した事例は極めて少ない。

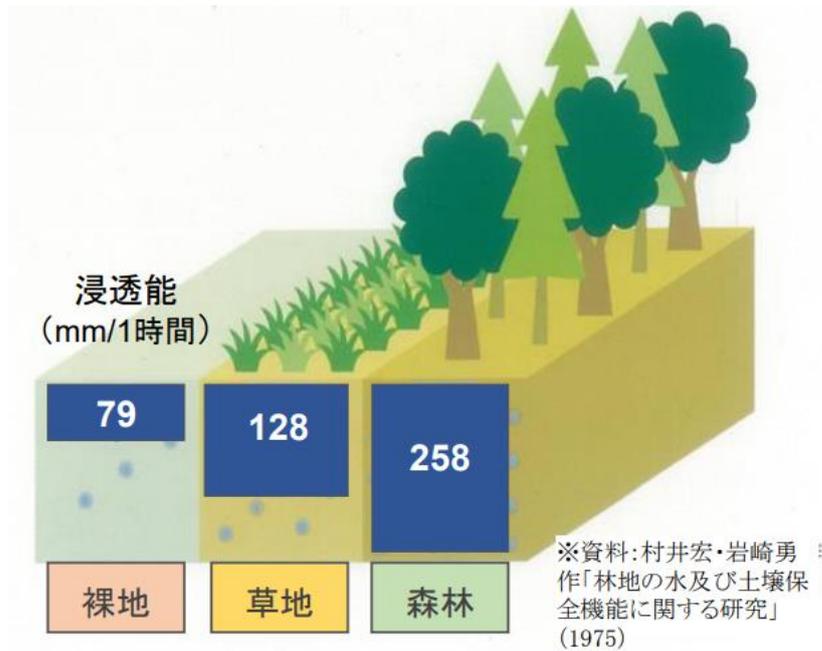


図 4-2 森林の浸透能

(村井ら (1975)、林地の水および土壌保全機能に関する研究¹⁰)

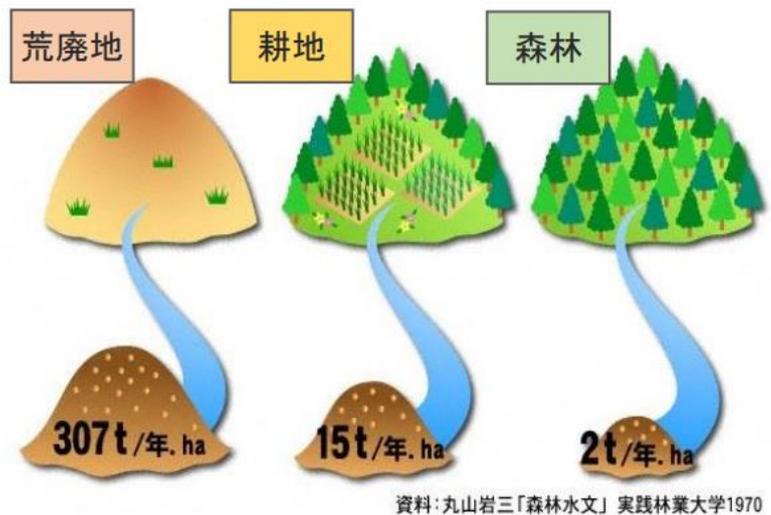


図 4-3 森林の土砂災害防止機能・土壌保全機能¹⁰

(丸山ら (1970)、森林水文 (実践林業大学))

4.1.3 森林機能の解明の限界

森林伐採と貯水機能については、さまざまな議論があり、国土交通省は、「学説が定まっておらず、森林整備による効果の定量的な評価は困難だが、森林の増加は樹木からの蒸発散量を増加させ、むしろ、渇水時には河川への流出量を減少させることが観測されている」と述べている¹¹。一方、林野庁は皆伐が与える貯水機能への影響は、伐採後の林床面からの蒸発量の増加や林床植生の蒸散量の増加等の影響も考えられるが、これらの研究事例や成果については十分なものがない¹²、と述べている。森林の貯水機能が解明されない理由として、①情報不足(観測の困難さ)、②大きな面積を対象とすること、③降雨の空間的なバラツキの把握、④森林土壌の貯水能力の実態がわからない、ことがあげられている¹³。したがって、森林の保水容量が洪水流出緩和効果を産み出すメカニズムについては、十分検討が進められたとはいえず¹⁴、さらなる研究が必要である。

4.1.4 本章の目的

一方、本対象流域のように小流域の森林地帯における水文解析の研究事例は少なく、日本における森林から農地への転用による森林の貯水機能の変化を分析した研究はほとんど行われていない。

そこで、本章では、森林地帯の小流域において、土地利用変化(森林伐採)による流出量・土砂流出量の変化を分析し、災害リスクを分析することで、災害リスクの変化から森林の機能(自然の機能)を評価する。加えて、気候変動によるリスクの変化を分析する

第2節 解析方法

4.2.1 三島町における土地利用シナリオ

(1) 三島町ゼロ・カーボンビジョン

福島県三島町は環境省の「平成31年度脱炭素イノベーションによる地域循環共生圏構築事業のうち、地域の多様な課題に応える脱炭素型地域づくりモデル形成事業」に採択され、「三島町ゼロカーボンビジョン」を策定し、再生可能エネルギー事業（木材バイオマス利活用システム、太陽光発電、小水力発電）を検討している。発電量は19.3 GWhを目標にしている（表4-1）。



図 4-4 三島町ゼロカーボンビジョンの取組・意義¹⁵

表 4-1 三島町の再生可能エネルギーの目標値¹⁶

再エネ種類	総ポテンシャル量 (kWh/年間)	2030年		2050年		比率
		割合	kWh*	割合	kWh*	
バイオマス (発電+熱利用)	10,910万 kWh	5%	546万	20%	1091万	56%
太陽光発電	7830万 kWh	5%	392万	10%	783万	41%
小水力発電	580万 kWh	5%	29万	10%	58万	3%
合計	1億9300万 kWh		967万		1,932万	100%

*公開目標値をkWからkWhに変換

具体的なバイオマス利用の計画としては、三島町の民有林（6,575 ha(2020)）¹⁷のうち30%(1972 ha)において適切な管理がなされ、エネルギーとして利用することを想定している¹⁸。

大場ら（2017）の先行研究において、木材バイオマスは年間施業面積率の1/50（2%）が利用できるとしており、将来的には2050年から経済的に利用可能な平均収穫材積は55.5～77.2万立米と試算した¹⁹。一方、三島町の耕作と荒廃農地の面積比率は33%であり、近年中間管理機構を通じた集積が進み、改善傾向にある（図4-5）。

また、森林面積においては減少傾向にあり（図4-6）²⁰、2010年の7,888 haから7,863 haに減少している。

他方、荒廃農地の利活用として、三島町ゼロカーボンビジョンにおける太陽光発電事業では、太陽光を農業生産と発電とで共有する取組み「ソーラーシェアリング（営農型太陽光発電）」を新設農地（内100%）で実施することを目標としている。

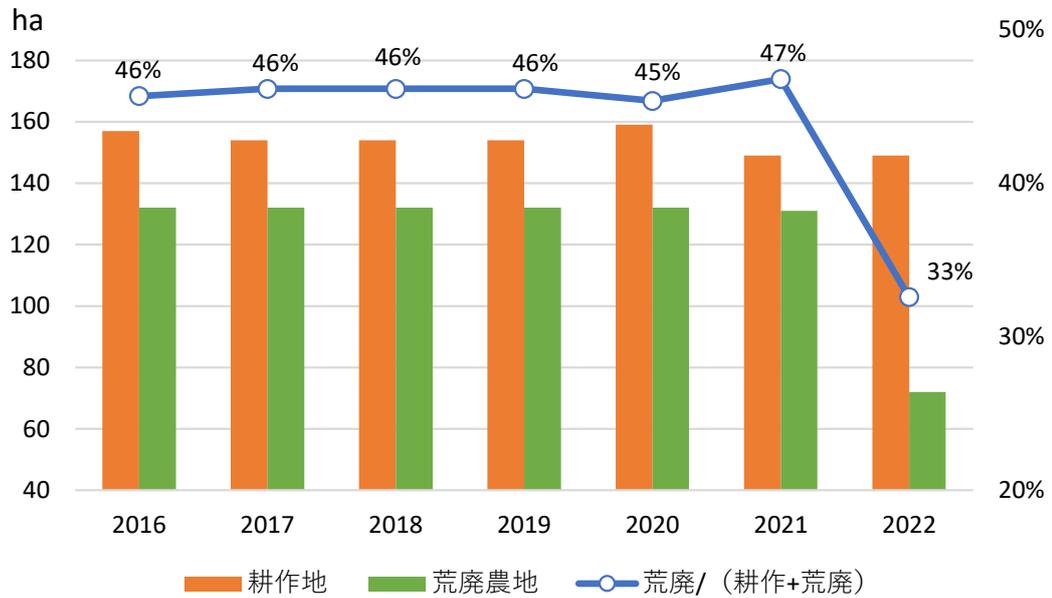


図 4-5 三島町の耕作地と荒廃農地面積推移 (ha) ¹⁷

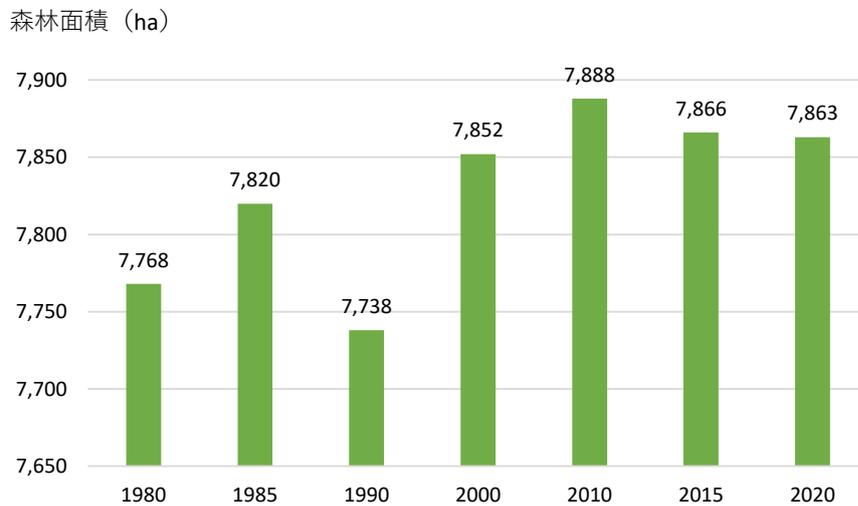


図 4-6 福島県三島町の森林面積推移 (ha) ²⁰

(2) 対象地における解析条件と評価方法

一か所につき、皆伐できる面積は 0.2 km^2 (20 ha) が上限として森林整備計画に定められている²¹。以上を踏まえ、森林面積の 2% を木材バイオマスとしての利用、さらにソーラーシェアリングにより耕作地が 2% 増加することを想定し、現在 (2020) の森林面積 99% から森林面積 95% に減少させ、伐採跡地は農地とした場合のシナリオを設定した。また、皆伐エリアは既存農地周辺とし、アクセスの観点から市街地に近い下流部流域で開発が実施されたことを想定した。

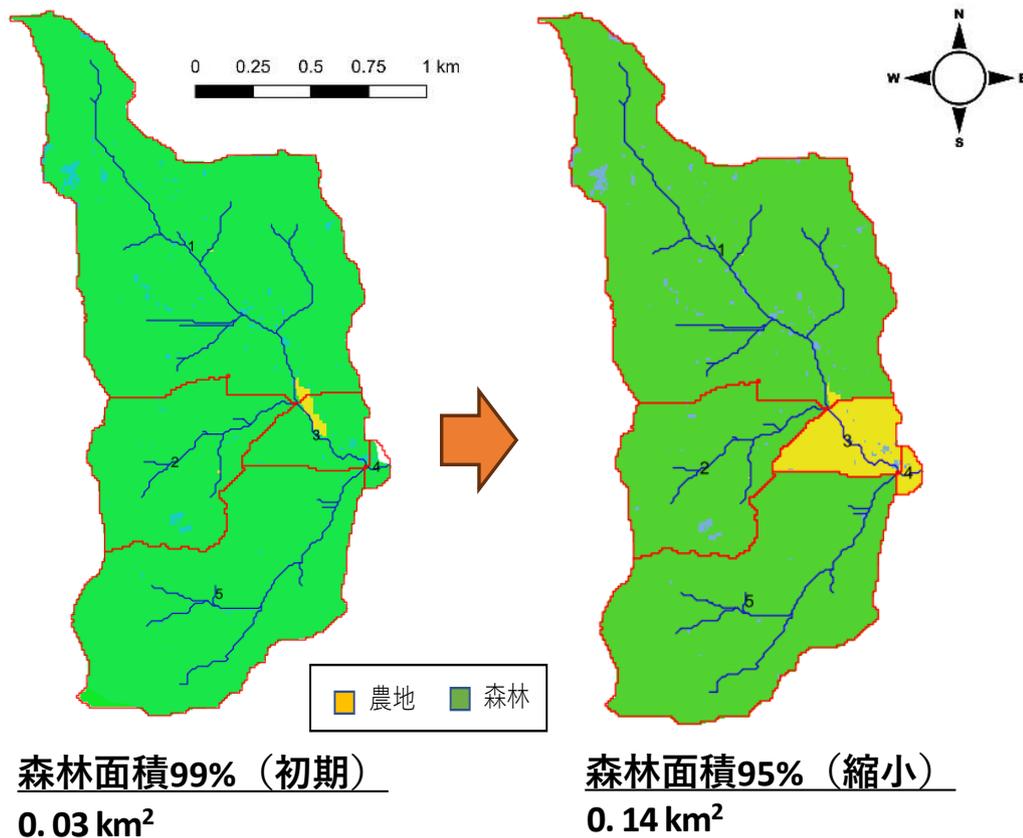


図 4-7 土地利用変化

第3節 解析結果

2章で構築した SWAT+モデルを使用し、シミュレーションを実施した。森林面積が 99%から 95%に減少した場合の森林の貯水機能変化と土砂流出量の変化を評価した。

4.3.1 森林の貯水機能

(1) 年間流出とピーク流量

2020年の1年間の河川流出量データ（図 4-8）において、1日の流出量が特に多い日（7月12日、7月16日、8月1日）を抽出し、流出量を比較した（表 4-2）。7月16日と8月1日には有意な差は見られず、年間の流量に大きな変化はなかったが、7/12の日流量は森林面積95%では66%増加した。

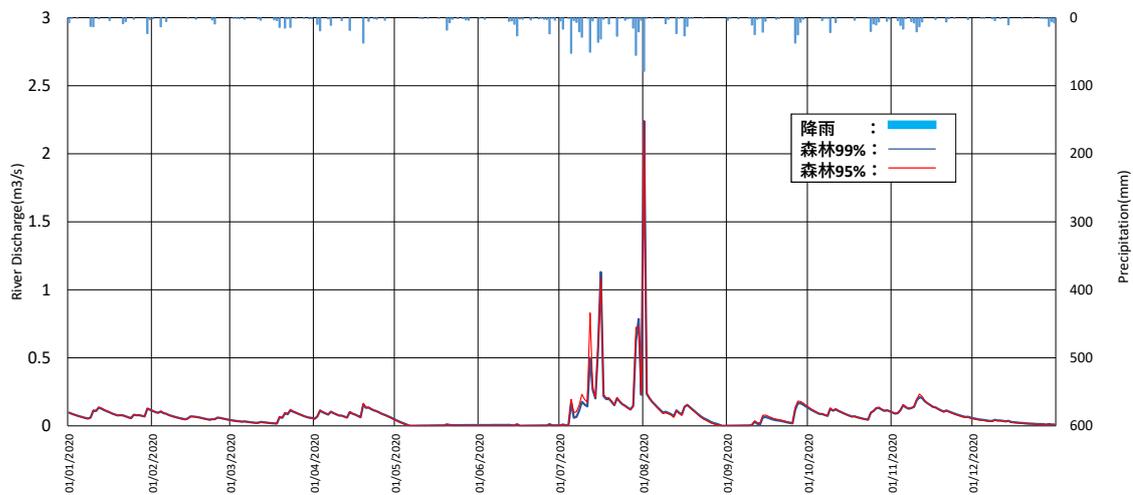


図 4-8 流出量（森林面積 99% & 95%）

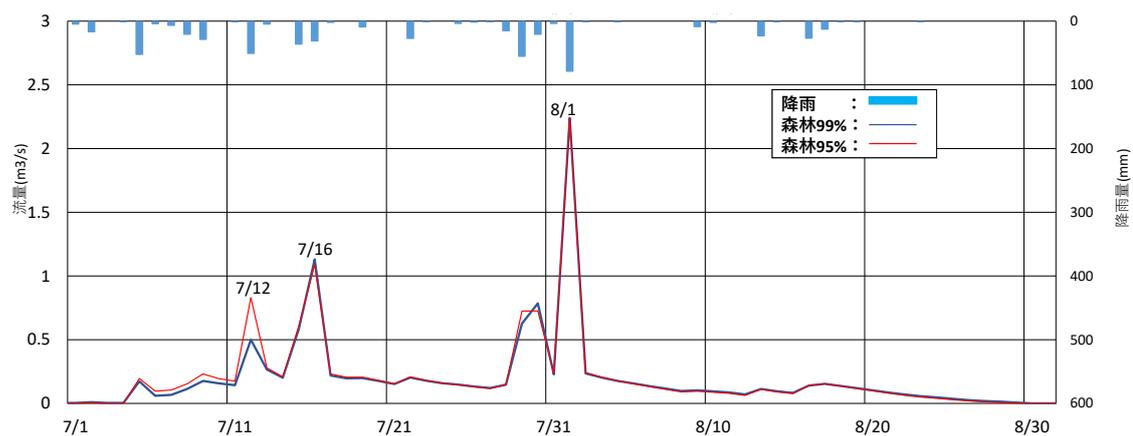


図 4-9 流出量 7～8月（森林面積 99% & 95%）

表 4-2 ピーク流量の比較

流量 (m ³ /s)	年平均	7/12	7/16	8/1
既存（森林面積 99%）	0.083	0.5	1.13	2.24
減少後（森林面積 95%）	0.084	0.83	1.09	2.24

(2) 表面流出と側方流

5日間移動積算より雨量と表面流出、側方流の関係を図 4-10 に示す。平均年間流量および日最大流出は大きな変動は少ない。一方、7/12 の日流量は 66%増加した。森林面積 95%では、平均で表流出量は 7.5%増加、側方流は 16.0%増加した。

また、降雨量の変動が大きかった 2021 年 7-8 月の流量と降雨量の相関を確認した。その結果、日降雨量 20 mm 以上の流量の差（森林面積 95%/森林面積 99%）は、13%の流量の増加を確認した。

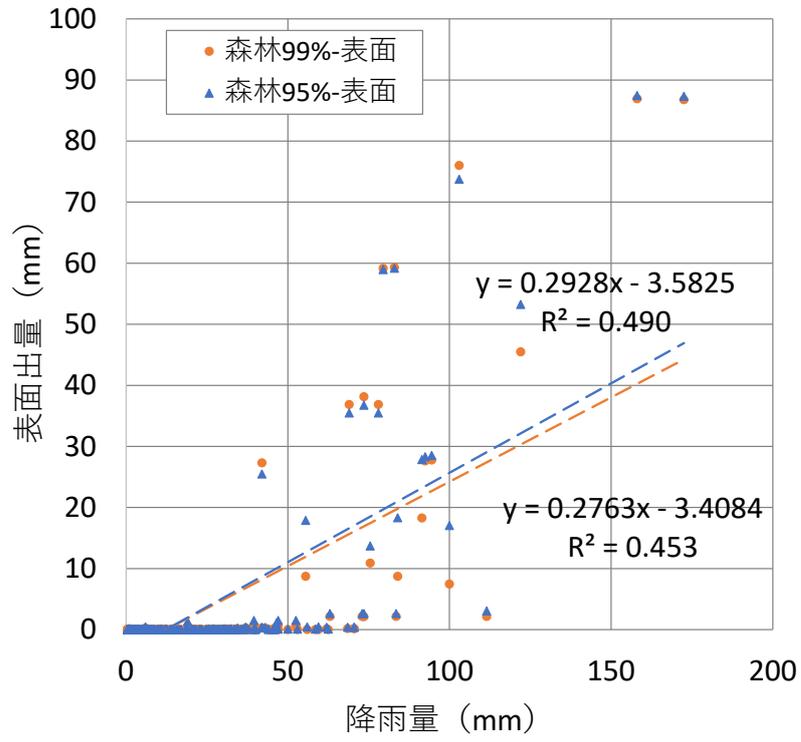


图 4-10 表面流出

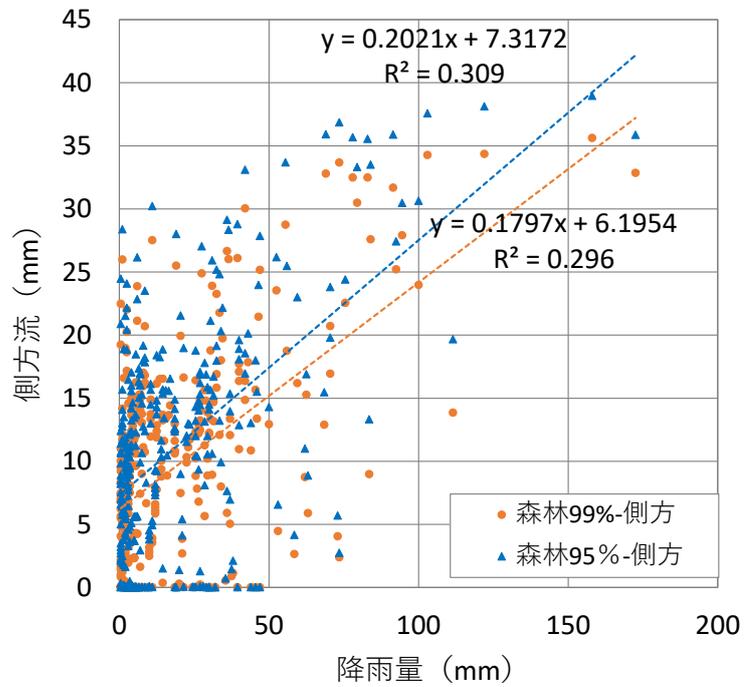


图 4-11 側方流

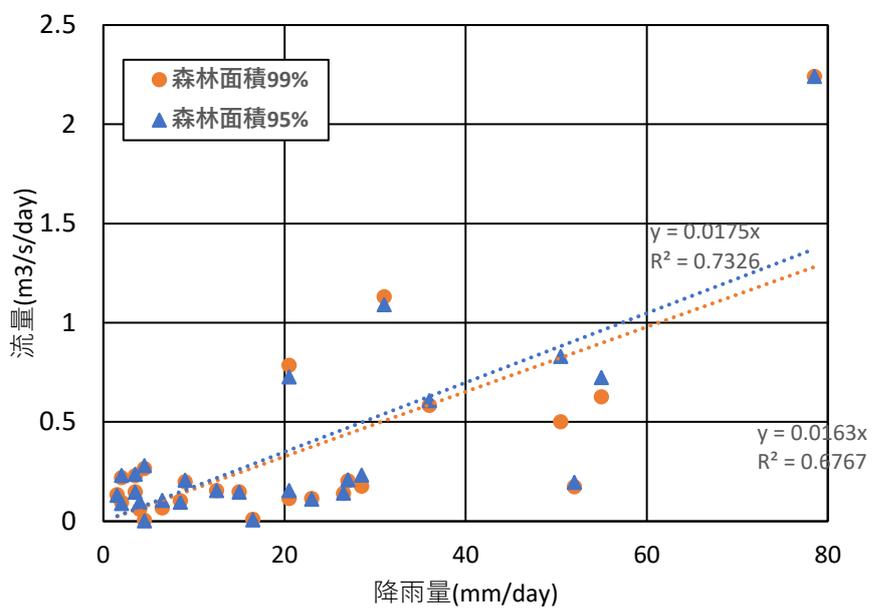


図 4-12 降雨量と流量の相関

4.3.2 土砂流出量

土砂流出量では、森林面積 95%は 99%と比較して土砂流出量が 11%増加した。本シミュレーションでは、経年的な変化は考慮できていないが、土砂流出量は伐採後 10～20 年程度で土質強度がもっとも低下し、斜面崩壊が発生しやすくなる可能性がある。そのため、推定量以上の流出が今後発生することもあり得る²²。

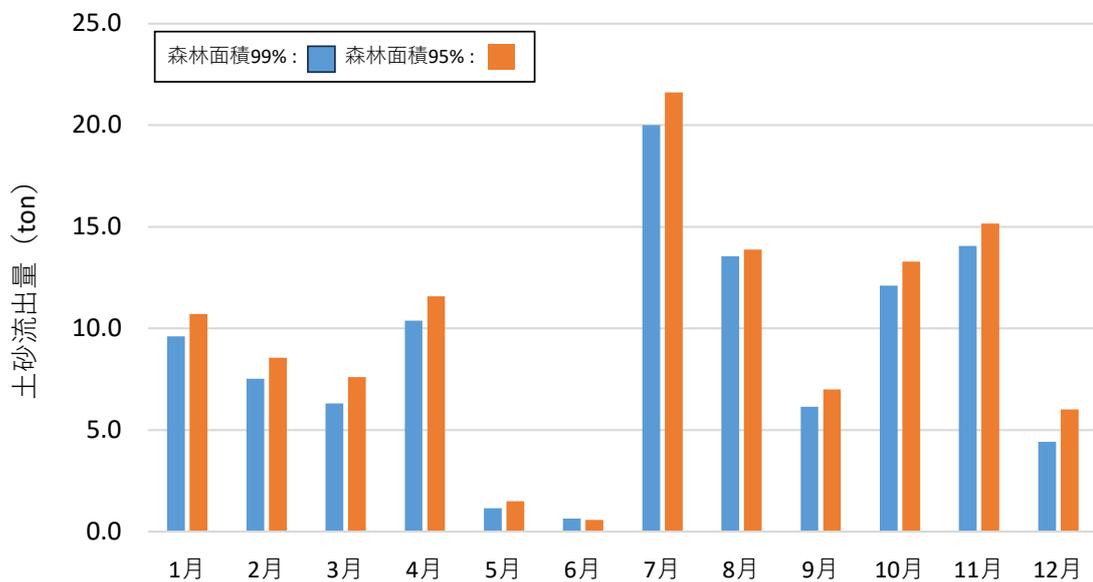


図 4-13 月別の土砂流出量

第4節 気候変動による影響

第3章で作成した各 SSP シナリオの気象条件を適用して、2020年と2090年のシミュレーションを行うとともに、森林面積99%と95%の比較を行った。

SSPシナリオ毎の洪水リスク（日最大流出量）は、2020年の2,24 m³/sと比較して、SSP1-2.5は2,26 m³/s（1.01倍）、SSP2-4.5は2,98 m³/s（1.33倍）、SSP5-8.5は1,950 m³/s（0.87倍）となった。

年平均流量と最大流量の結果を図4-14に示す。年平均流量に関しては、上述の結果と同じく、いずれも森林面積95%の方が1%よりも若干多く、年間の最大流量はいずれのシナリオにおいても森林面積99%と95%に差はなかった。

図4-15と図4-16に森林面積99%と95%の7～8月のSSPシナリオ毎の流量を示す。7月31日前後の流量に関しては、ほとんど差はみられなかったが、雨が降り始めた7月初め（7月1日から21日）の流量は、森林の貯水機能が働いており、森林面積95%の方が大きく、流量に変化が見られた。

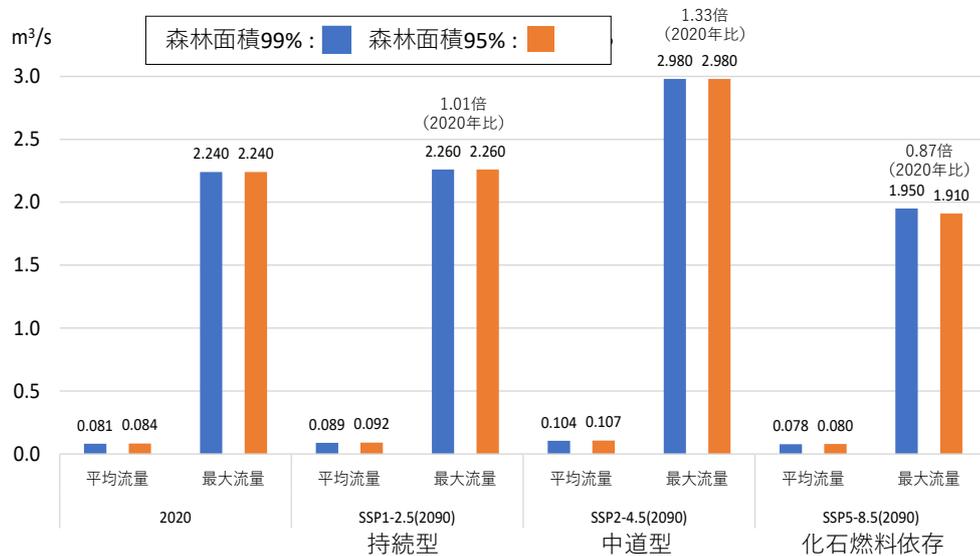


図 4-14 SSP 毎の年平均流量と最大流量（森林面積 99%と 95%）

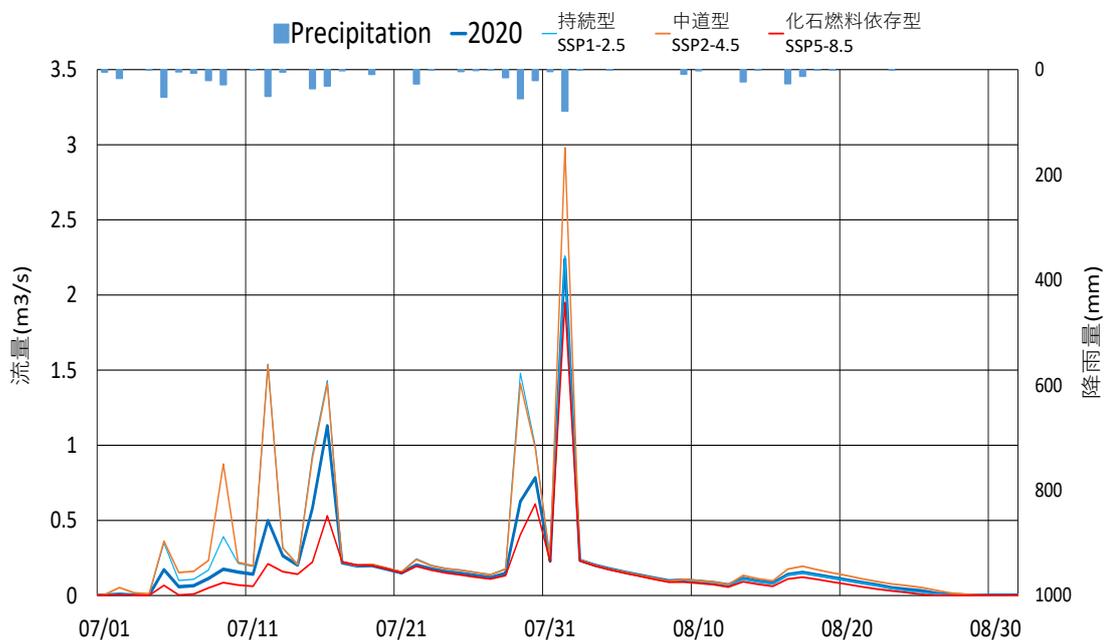


図 4-15 SSP 毎の流量（森林面積 99%）

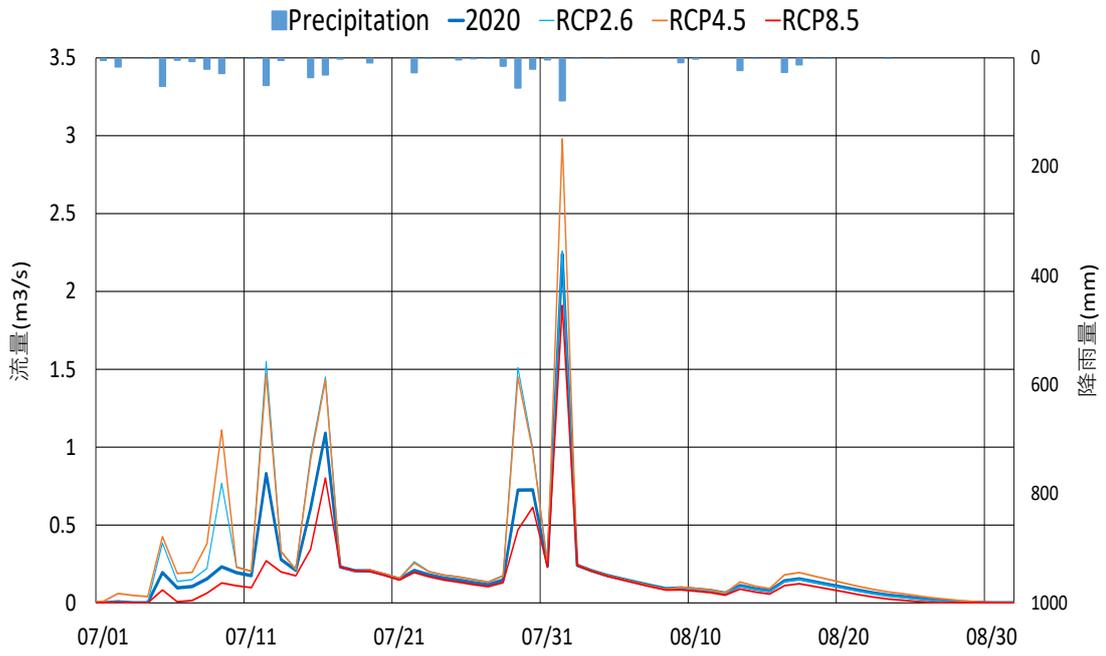


図 4-16 SSP シナリオ毎の流量（森林面積 95%）

第5節 考察

降り始めの期間は流出量が減少していたが（7/16頃まで）降雨が一定期間続いた場合、日最大流量は森林面積減少後も変化はなかった。年最大の日雨量は同じであり、降雨が十分に供給されて土層全体が湿潤になると、それ以降の降雨総量と洪水流出総量は近似的に相等しくなる²³。上述した通り、7月初めの流出量の推移をみても森林面積95%より森林面積99%の方が低く、貯水機能が働いていないわけではないが、SSPシナリオ毎の気象条件を当てはめて、降雨量が増加した場合においても最大流量は同じであり、集中豪雨や台風等、気候変動の対応策として森林の貯水機能への過度な期待はリスクが大きいことが示唆された²⁴。

一方で、年間最大流量に関しては、SSP5-8.5の流量が最も少なく、温暖化による集中豪雨のリスクを除けば、災害リスクは減少する傾向がみられた。

第6節 まとめ

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

(1) 森林の貯水機能には限界あり

降雨が一定期間続いた場合、森林貯水機能は低下し、ピーク流量の差は森林面積減少後も変わらない。降雨が十分に供給されて土層全体が湿潤になると、それ以降の降雨総量と洪水流出総量は近似的に相等しくなる。

(2) 年全体の流量は変化なし

全体として森林面積減少後の流量は微増加となった。(流量平均： $0.083 \text{ m}^3/\text{s} \rightarrow 0.084 \text{ m}^3/\text{s}$)。

(3) 土地利用変化により土壌流出量は増加

森林面積減少後、土砂流出量が11%増加した($105.9 \text{ ton/y} \rightarrow 117.5 \text{ ton/y}$)。

(4) 気候変動シナリオ (SSP5-8.5) では洪水リスク低下

年間の最大流量は、森林面積99%と95%ともにどのSSPシナリオにおいても同じであり、洪水リスクとしては大きな差はない。年平均流量はいずれも森林面積95%は微増する。

気候変動シナリオ (SSP5-8.5) では洪水リスクが低下した。また、年間最大流量に関しては、SSP2-4.5では増加するが、SSP5-8.5の場合、流量は減少し、温暖化による集中豪雨のリスクを除けば、災害リスクは減少する傾向がみられた。

3章および4章では、主に災害のリスク評価を実施したが、一方5章では気候変動による緩和策のポテンシャル変化について分析する。

引用・参考文献

- 1 気候変動適応計画（2021）, <<https://adaptation-platform.nies.go.jp/plan/government/npcca.html>>
- 2 Nathalie. et al., (2019). "Understanding the value and limits of nature-based solutions to climate change and other global challenges." Royal Society Publishing. <<https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rstb.2019.0120#d4119541e1>>
- 3 西廣（2021）, NbS（自然を活用した解決策）EbA（生態系を活かした気候変動適応）、Eco-DRR（生態系を活かした防災・減災）の概念の相互関係 < <https://www.nies.go.jp/kanko/news/40/40-3/40-3-04.html>>
- 4 Bosch, J.B., et al (1982), A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration, J. Hydrol, 55, P.3-22.
- 5 イアン・カルダー（2005）, 「水の革命」（蔵治光一郎・林裕美子監訳）、築地書館、タイトル：森林は流出量を増加させるか？, P.269
- 6 村井ら（1975）. 林地の水および土壌保全機能に関する研究, 林試研報, No.274, P.77
- 7 真坂英一. (2005). "新第三紀層流域における70年生スギ・ヒノキ林伐採による年流出量の変化." 森林学会誌, 森林と水: 政策的見地から, 43, 65-67. <https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjsk/43/0/43_KJ00003368096/_article/-char/ja/>
- 8 Qingmu, S., et al (2021), The Impact of land use change on disaster risk from the perspective of efficiency, Sustainability 2021, 13, 3151.
- 9 Yoshikawa, K., et al (2009), Watershed Scale Evaluation of Flood Mitigation Function of Paddy Fields Installed with Runoff Control Devices, Transactions of the Japanese Society of Irrigation, Drainage and Rural Engineering. 77 (3), pp.273-280
- 10 総務省 第3回「森林吸収源対策税制に関する検討会」提出資料 <<https://www.city.murakami.lg.jp/uploaded/attachment/30318.pdf>>
- 11 国交省. "緑のダムへの見解." <https://www.mlit.go.jp/river/dam/main/opinion/midori_dam/midori_dam_index>
- 12 林野庁ホームページ 森林の多面的機能に関するQ&A（平成28年度森林整備保全事業推進調査成果物より）2. 水源涵養機能 Q&A <<https://www.rinya.maff.go.jp/j/keikaku/tamenteki/attach/pdf/suigen2.pdf>>
- 13 カイモヴィッツ・デビット（2005）, 森林と水 政策的見地から, 森林

科学 43 : 65-67

- 14 谷誠. (2018). "森林土壌の流出緩和効果に関する研究の展開過程." 水文・水資源学会誌, 第 31 巻 第 2 号, 107-121.
<https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjshwr/31/2/31_107/_pdf.>
- 15 三島町ゼロカーボンビジョン (概要) 説明資料
<<https://www.town.mishima.fukushima.jp/uploaded/attachment/1028.pdf>>
- 16 三島町ゼロカーボンビジョン 説明スライド 令和 4 年 5 月 1 日策定, P25
<<https://www.town.mishima.fukushima.jp/uploaded/attachment/1087.pdf>>
- 17 農林水産省 HP, わがマチ・わがムラ, 市町村の姿, グラフと統計でみる農林水産業
<<https://www.machimura.maff.go.jp/machi/contents/07/444/details.html>>
- 18 三島町ゼロカーボンビジョン 説明スライド 令和 4 年 5 月 1 日策定
<<https://www.town.mishima.fukushima.jp/uploaded/attachment/1087.pdf>>
- 19 大場真ら (2019). "地域循環共生圏と森林管理・バイオマス利活用 福島県奥会津・三島町における取り組み". バイオマス科学会議発表論文集, O-07 15, 13-14.
- 20 総務省 HP, 統計ダッシュボード <<https://dashboard.e-stat.go.jp/>>
- 21 三島町森林整備計画 (令和元年度変更) <
<https://www.town.mishima.fukushima.jp/uploaded/attachment/1308.pdf>>
- 22 堀田紀文ら (2011) 山地からの土砂流出の変遷の実態—流域の土砂貯留量の変化に着目して—, 砂防学会誌, Vol. 63, No. 5, p. 52-61
- 23 谷誠. (2018). "森林土壌の流出緩和効果に関する研究の展開過程." 水文・水資源学会誌, 第 31 巻 第 2 号, 107-121.
<https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjshwr/31/2/31_107/_pdf.>
- 24 藤枝基久, プレゼン資料: 森林と水の謎を解く—水源かん養機能の理解にむけて—, 森林総合研究所
<<https://www.rinya.maff.go.jp/kanto/gizyutu/attach/pdf/sinrinringyoukoukaikouza1-3.pdf>>

第5章 気候変動を考慮した再生可能エネルギー（小水力）の ポテンシャル評価

第1節 本章の背景・目的

5.1.1 背景

(1) 小水力発電のポテンシャル

日本全体の電力供給量のうち、再生可能エネルギーの割合は、2023年3月時点で約22.4%である。このうち、水力発電の割合は約7.8%（2021年時点）¹であり、再生可能エネルギーの中では大きな割合を占めており、小水力発電（1万kW以下）の割合は、全発電量の約2%程度といわれている²。

水力発電は、ダムを用いた大規模なものから用水路などに設置される小規模なものまで様々であるが、数万～数十万kW級の大規模水力については開発可能地点のほとんどが開発済みであると考えられており、今後は比較的小規模な水力発電の新規開発が期待される³（未開発地点は2016年3月末時点で約2700地点、約1000万kW）⁴。加えて、中・小規模水力発電で発電された電気が国のFIT制度（再生可能エネルギーで発電された電気の買取り価格を一定期間国が保証する制度）の対象になったことから注目が高まっている。

日本には高い小水力発電のポテンシャルが存在するとされているが、その活用への意欲を生み出すためには、具体的な小水力発電の水源候補地について、その発電能力を簡便かつ短時間に評価して提供できることが望まれる⁵。

環境省の令和元年度再生可能エネルギーに関するゾーニング基礎情報報告書では、小水力発電を含む再生可能エネルギーのポテンシャルが評価されており、小水力発電のポテンシャルについては、再生可能エネ

ルギー情報提供システム（REPOS）等で公開されており、福島県三島町の小水力ポテンシャルも計算されている（図 5-2）。しかしながら、閾値の間隔は 100 kW と大きく、また 100 kW 未満は詳細なスケールで行われていないため、地域レベルの非常に小規模な水力発電のポテンシャルについて確認するためには調査が必要となる。

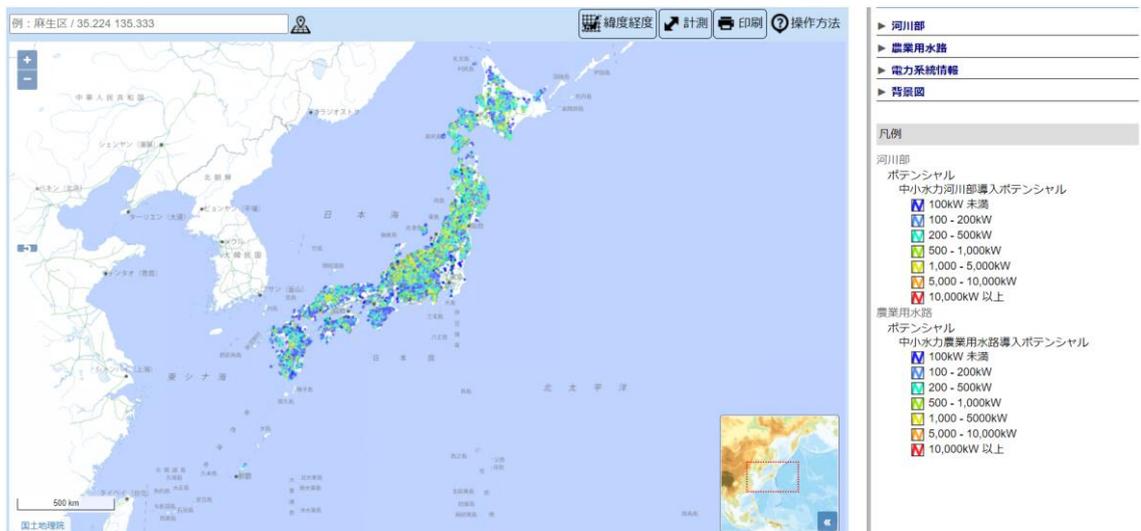


図 5-1 再生可能エネルギー情報提供システム（REPOS）⁶

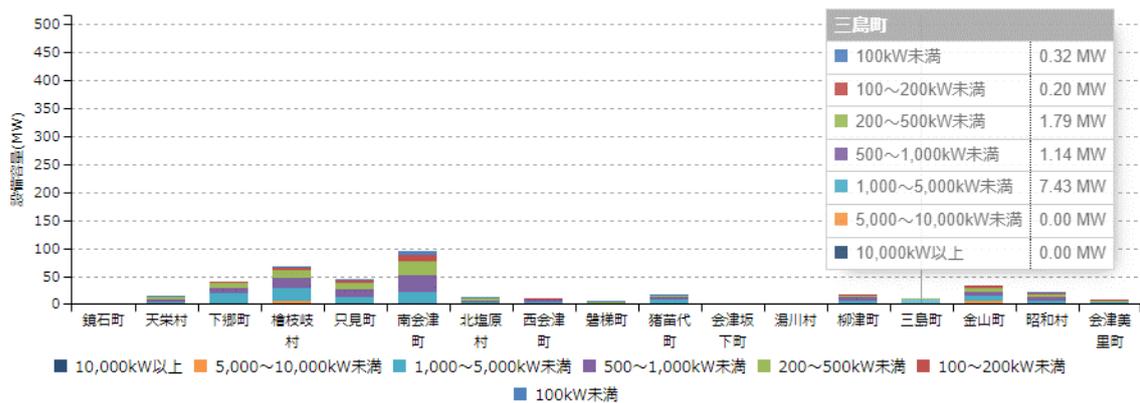


図 5-2 福島県三島町の小水力ポテンシャル（河川）（REPOS）⁶

(2) 三島町における小水力発電の計画

そうした中、三島町のゼロカーボンビジョンでは、2050年の再生可能エネルギー総発電量 5,876 万 kWh のうち、小水力発電により 10% (58 万 kWh) を賄うことを目標値としており、小水力発電では 2030 年までに全体の 5% (29 万 kWh)、2050 年までに 10% (58 万 kWh) の達成を目指している。⁷

(3) 気候変動を考慮したポテンシャル評価の必要性

経済産業省資源エネルギー庁は、「太陽光や風力など他の再エネが気象条件に左右されるのに比べて、渇水のリスクをのぞけば、自然条件によらず安定して発電ができる⁴」と述べており、水力発電は安定的なエネルギー資源として認識されている。しかし、上記のポテンシャル評価では、気候変動の影響を考慮した評価は実施されておらず⁸、地球温暖化による増水によるポテンシャルの向上もしくは渇水のリスクは評価されていない。したがって、将来に渡って小水力発電は安定的なエネルギー資源であるのか確認する必要がある。

(4) 本章の目的

REPOS からおよその情報は得られるが、具体的な事業検討においては、より詳細な条件設定を行った上で、発電ポテンシャルを計算することが重要である。加えて、将来の気候変動を考慮したポテンシャル評価を行うことは、持続可能な事業運用のために重要である。

そこで本章では、三島町の埴子沢において、SWAT+を使用して気候変動シナリオを考慮した小水力ポテンシャルを推計し、気候変動の影響によるポテンシャルの変化について評価するとともに、小規模流域における気候変動を考慮した適切な設計・運用計画を提案する。

第2節 解析方法

5.2.1 計算条件（SSP シナリオと確率降雨）

気候変動シナリオは、第3章で作成したデータセットを使用し、SSPシナリオはSSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP5-8.5を対象とする。

また、IPCCの報告書では、気候変動シナリオに伴い、気温が4℃上昇（1900年台と比較して）した場合、これまでの10年確率降雨の発生が2.7倍程度になると試算されている⁹。そこで、SSPシナリオに加えて、3年確率降雨と10年確率降雨についてもシミュレーションを行い、発電のポテンシャルを評価することとした。

5.2.2 発電量の計算方法

水力発電出力 P [kW] は次の式によって求められる。

$$P = 9.8 \eta QH$$

ここで、 Q は河川流量 [m³/s]、 H はタービンに仕事をさせるための有効落差 [m]、 η はタービンと発電機の総合効率 0.8 とした。また、年間の発電量は以下の式より求めた。

$$\text{年間発電量} = \text{発電出力 (kW)} \times 24 \text{ 時間} \times 1 \text{ 年 (366 日)}$$

発電機に使用する水車形式は、さまざま種類があり、条件によって選定する。以下、水車の区分について図 5-3 に示す。

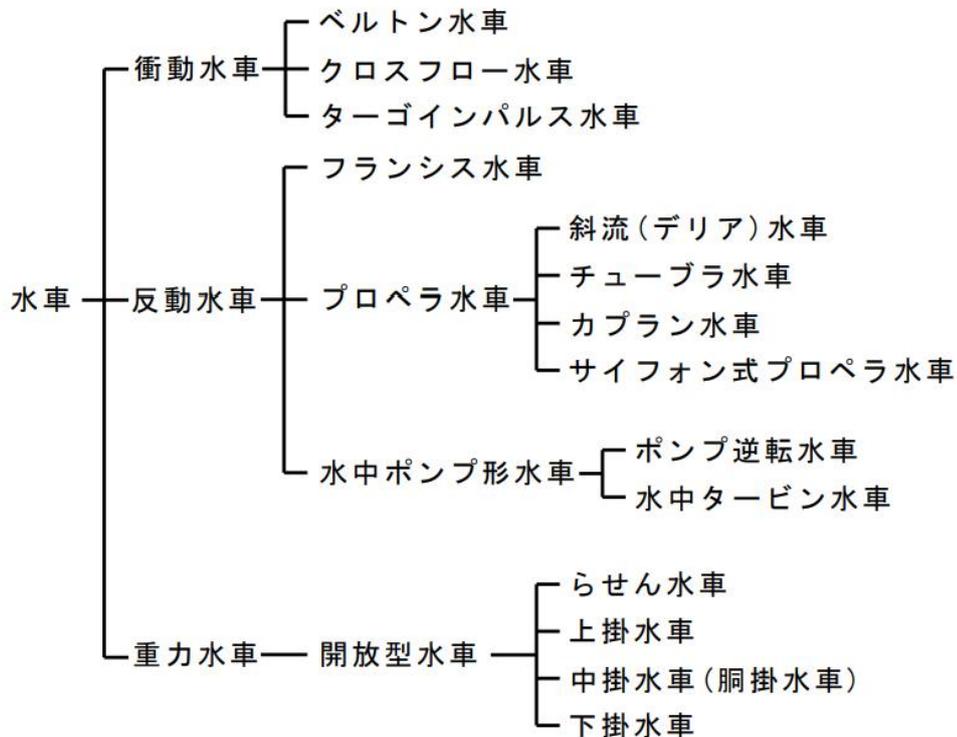


図 5-3 発電機水車の形式¹⁰

水車の選定では下記の水車選定表（図 5-4）を使用し、検討を行った。2020年観測データにおける埴子沢の年間最大日流量は $1.75 \text{ m}^3/\text{s}$ である。また、現地踏査から埴子沢の落差は 2.0 m 程度だと考えられ、選定表より開放型下掛け水車を選定した。

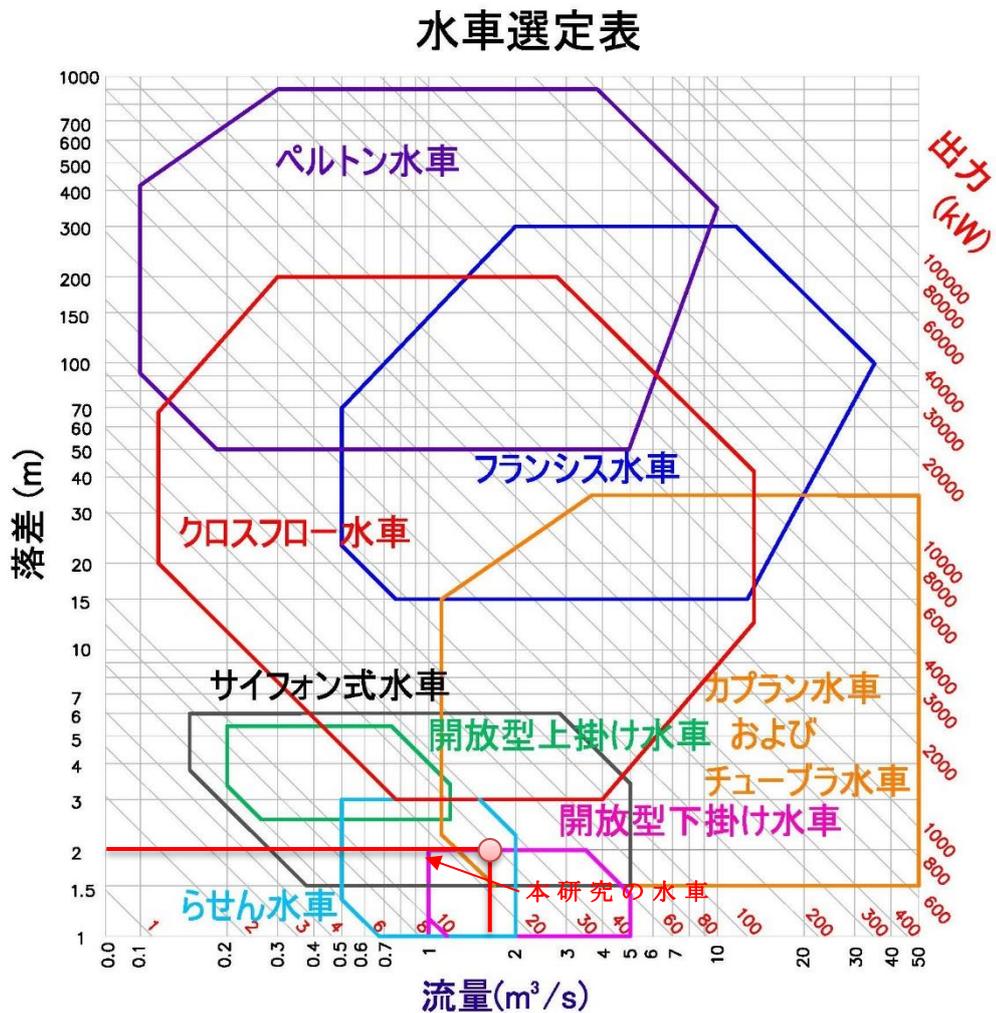


図 5-4 水車選定表¹¹

一方、洪水時には流量の大きな増加によってタービンに過大なエネルギーを与え、発電機を故障させる可能性があるため、洪水時には発電をストップすることが一般的であり、全ての河川流量が発電に変換されな

いことは発電量を計算する上で、留意すべきである。

本研究では、選択した開放型下掛け水車の適用流量範囲を確認し、許容最大流量を設定した。一般的な開放型下掛け水車の適用範囲は 1.0～2.0 であるため（表 5-1）、発電の最大許容流量は 2.0 m³/s として、超過した場合は発電停止とした。

水車の種類		摘要範囲			落差	
		出力 (kW)	落差 (m)	流量 (m ³ /s)		
衝動水車 (速度エネルギー)	ペルトン水車	0.5～ 4,000	17～ 500	0.01～ 2	高い ↑ ↓ 低い	
	ターゴインパルス水車	100～ 8,000	25～ 300	0.2～ 8		
	クロスフロー水車	10～ 1,000	5～ 200	0.1～ 8		
反動水車 (圧力エネルギー)	フランシス水車	50～ 4,000	10～ 300	0.3～ 10		
	プロペラ水車	カプラン水車	1,000～ 100,000	10～ 60		10～
		チューブラ水車	50～ 5,000	3～ 18		1.5～ 40
		プロペラ水車	1～ 200	2～ 150		0.01～ 3
	水中ポンプ形 水車	ポンプ逆転水車	1～ 200	6～ 80		0.02～ 1
		水中タービン水車	10～ 500	2.8～ 20		0.4～ 10
重力水車 (水の重さ)	開放型水車	らせん水車	-	1～ 5		-
		上掛け水車	-	2.5～ 5.5	0.2～ 1.2	
		下掛け水車	-	1～ 2	1.0～ 2.0	

表 5-1 水車形式と適用流量¹²

5.2.3 3年・10年確率降雨の計算

3年・10年確率降雨は、三島町にはアメダスデータはないため、隣町である金山町のアメダスデータ（1976-2021）を使用して計算した。

3年確率、10年確率として、Gumbel分布関数式により年間降雨量を算定した（図 5-5）。

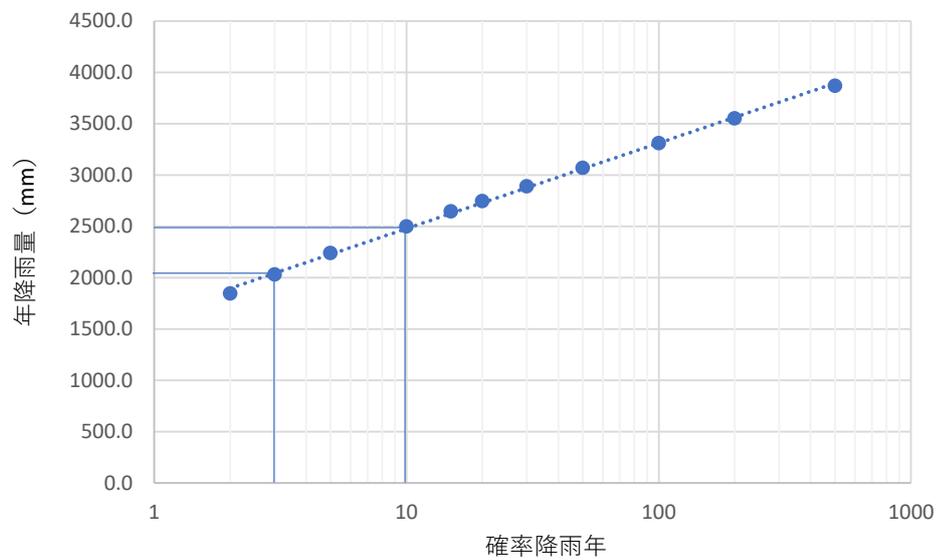


図 5-5 Gumbel 分布関数式を用いた年間降雨量

3 年確率は 2,034 mm、10 年確率は 2,499 mm とし、日雨量は 2020 年の観測日雨量より引き延ばしを行い、作成した。

第3節 解析結果

5.3.1 気候変動シナリオを考慮した発電量

2020年と各SSPシナリオに基づく月別流量と降雨量を図5-6、図5-7に示す。流量の2020年比は、SSP1-2.6で9%増加、SSP2-4.5で28%増加、SSP5-8.5で5%減少となった。

年間の発電量を図5-8に示す。SSP2-4.5が最も発電量が多く13,265 kWhであった。続いて、2020年の10,359 kWh、SSP1-2.6の11,403 kWhとなった。一方、最も発電量が低かったのはSSP5-8.5の10,679 kWhであり、2020年と比較して約3.1%発電量が増加する。

発電量は全体的に比例傾向にあるが、8月は流量が少ないSSP5-8.5の発電量が最も多くなっている。これは、8月1日に強い降雨があり、SSP5-8.5は流量が最も少なく発電の最大許容流量（2.0 m³/s）に収まったため発電できたが、それ以外のケースでは、発電機が停止していたことが影響している。

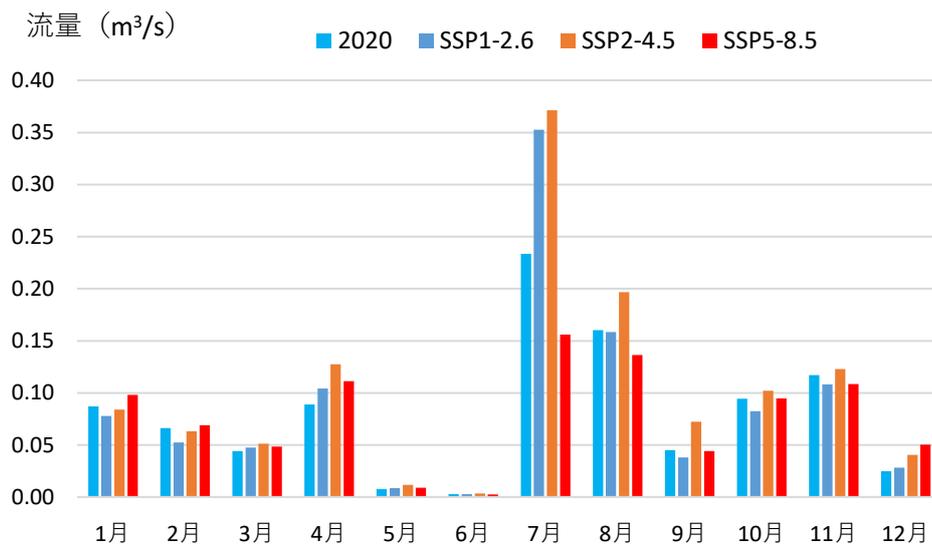


図 5-6 各 SSP における月別流量

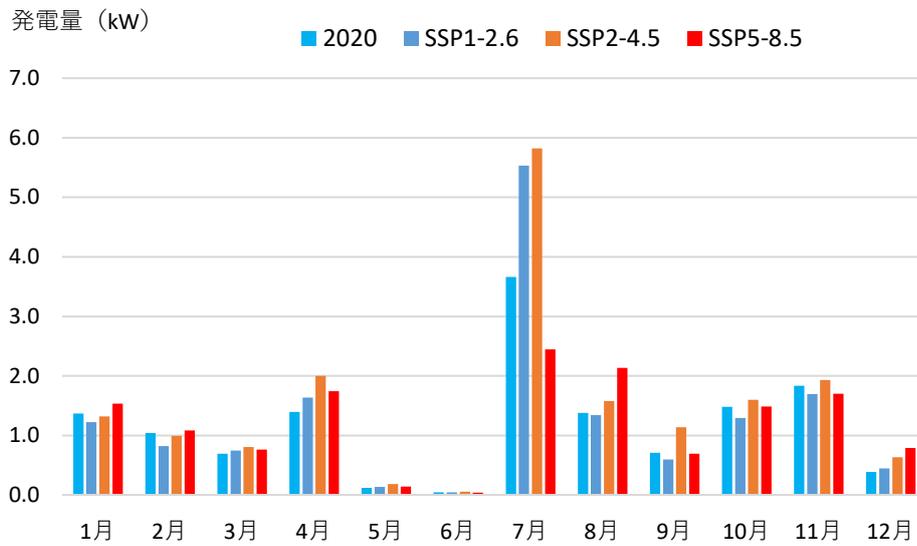


図 5-7 各 SSP における月別発電量

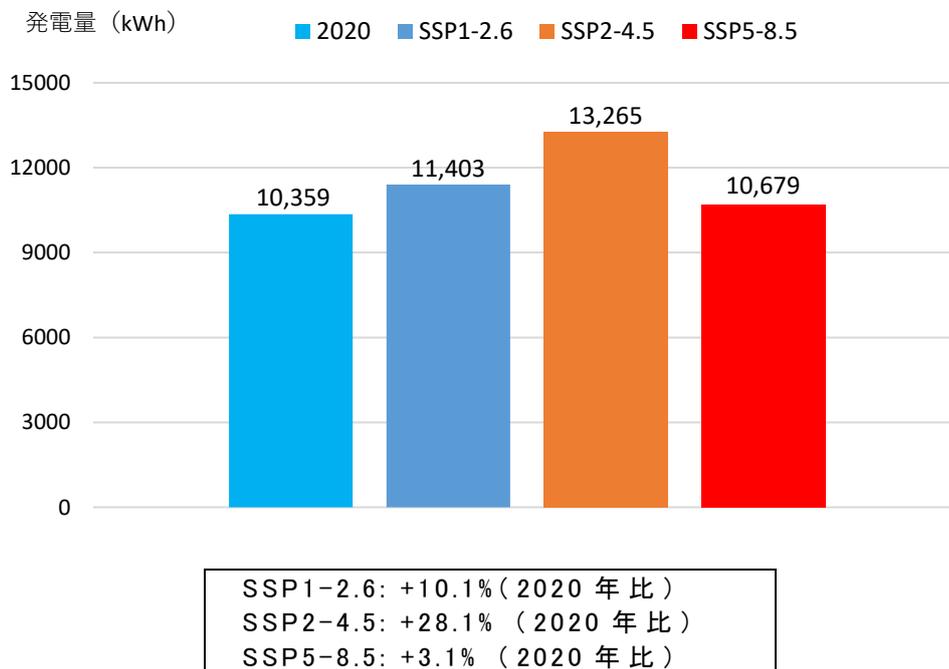


図 5-8 各シナリオにおける年間発電量

5.3.2 3年・10年確率降雨における発電量

2020年と3年・10年確率降雨の月別流量と降雨量を図5-9、図5-10に示す。7月の発電量は3年確率降雨が最も多くなっている。10年確率降雨は7月に3度、最大許容流量2.0 m³/sを超過しており、発電が停止したため、3年確率降雨より流量は多いが発電量は少なくなっている。

年間の発電量を図5-11に示す。10年確率が最も発電量が多く20,779 kWh、3年確率降雨は17,504 kWhであった。3年確率降雨では、2020年比で+69.0%、10年確率降雨で+100.6%、発電量が増加する。

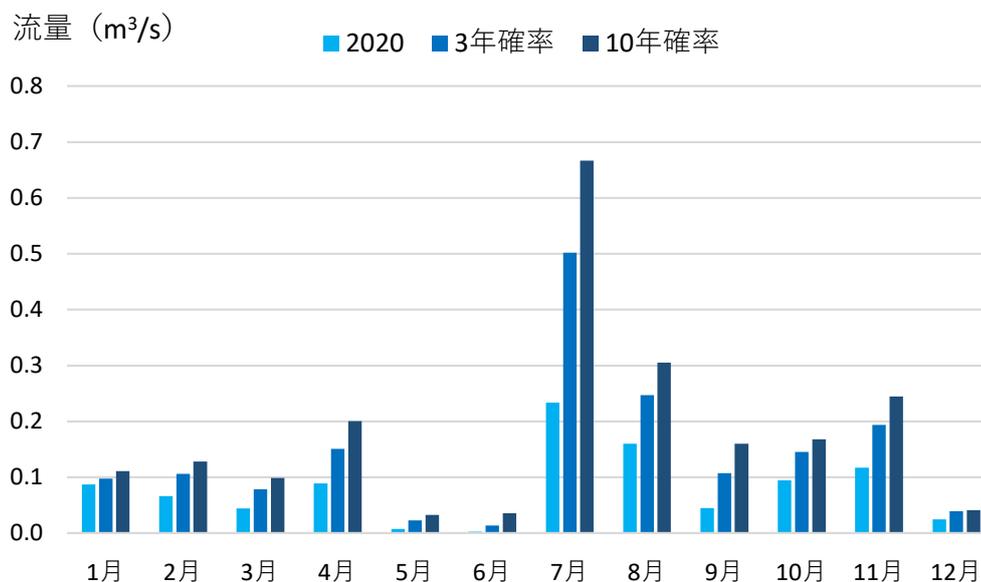


図 5-9 各確率降雨における月別流量

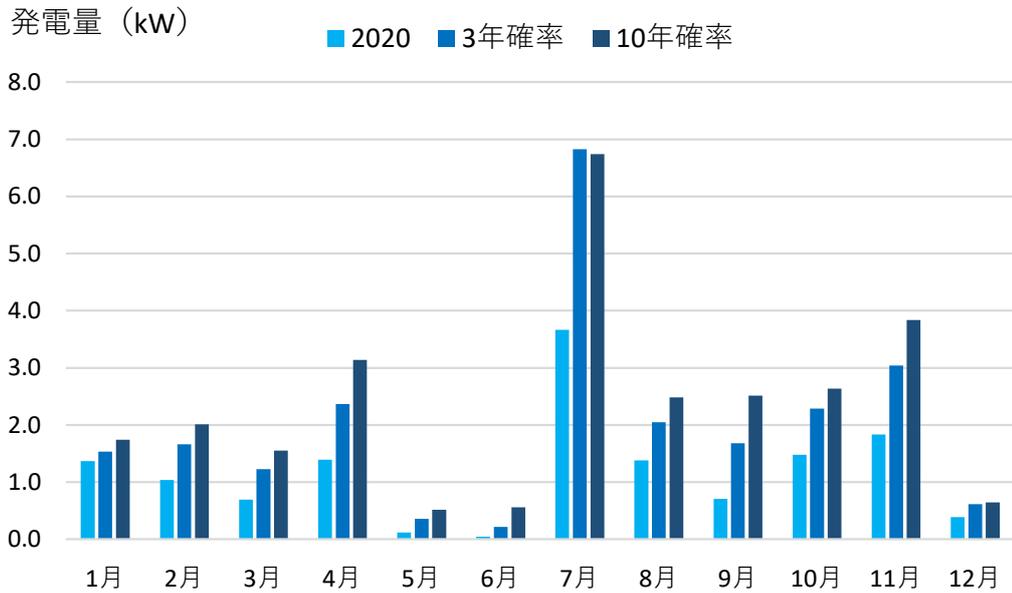
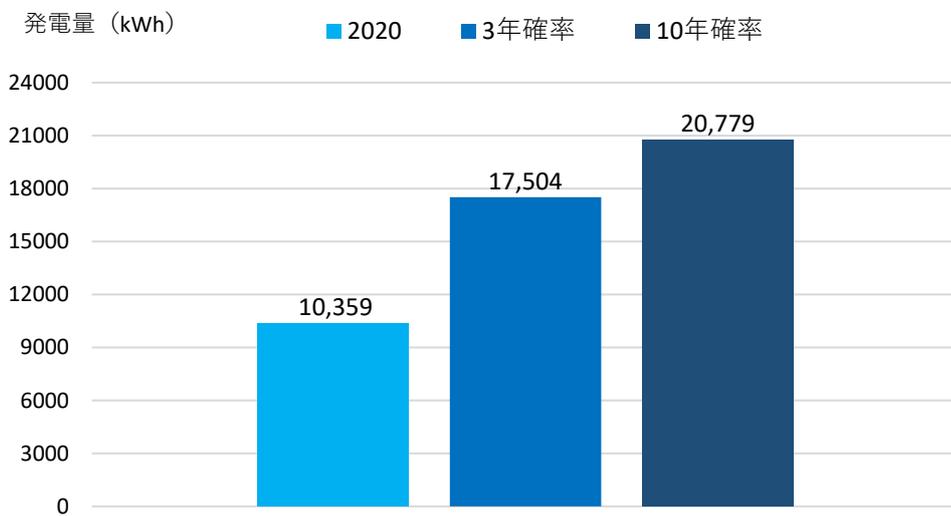


図 5-10 各確率降雨における月別発電量



3年確率降雨 : +69.0% (2020年比) 10年確率降雨 : +100.6% (2020年比)
--

図 5-11 各確率降雨における年間発電量

表 5-2 月別の平均流量（全ケース）

流量 (m ³ /s)	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	総計 (平均)
2020	0.087	0.066	0.044	0.089	0.008	0.003	0.234	0.160	0.045	0.094	0.117	0.025	0.081
3年確率	0.098	0.106	0.078	0.151	0.023	0.014	0.502	0.247	0.107	0.146	0.194	0.039	0.142
10年確率	0.111	0.128	0.099	0.200	0.033	0.036	0.667	0.305	0.160	0.168	0.245	0.041	0.183
SSP1-2.6	0.078	0.052	0.048	0.104	0.009	0.003	0.353	0.158	0.038	0.082	0.108	0.028	0.088
SSP2-4.5	0.084	0.063	0.051	0.128	0.012	0.003	0.371	0.197	0.072	0.102	0.123	0.041	0.104
SSP5-8.5	0.098	0.069	0.049	0.111	0.009	0.002	0.156	0.136	0.044	0.095	0.108	0.050	0.077

表 5-3 月別の発電量（全ケース）

発電量 (kWh)	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	総計
2020	1,017	724	515	1,004	90	33	2,725	1,027	510	1,102	1,322	290	10,359
3年確率	1,142	1,156	915	1,706	266	156	5,080	1,524	1,210	1,699	2,191	459	17,504
10年確率	1,296	1,399	1,156	2,262	383	403	5,017	1,849	1,808	1,963	2,764	479	20,779
SSP1-2.6	909	572	555	1,177	102	34	4,115	997	428	961	1,222	331	11,403
SSP2-4.5	981	691	598	1,440	138	39	4,332	1,174	818	1,191	1,389	474	13,265
SSP5-8.5	1,143	753	567	1,256	106	27	1,818	1,590	500	1,106	1,224	589	10,679

第4節 考察

(1) 気候変動シナリオの影響

各 SSP シナリオに基づく、年間の発電量では、2020 年比で SSP1-2.6 では+10.1%、SSP2-4.5 では+28.1%と、気候変動に伴って、小水力発電のポテンシャルが向上することが示されている一方で、温暖化が最も進行するケースである SSP5-8.5 では+3.1%となったが、他の SSP シナリオとは異なり流量全体としては、2020 比で 5%減少しており、将来的にポテンシャルが下がる可能性が示唆された。一方で、3 年確率降雨、10 年確率降雨ともに発電量が大きく増加しており、IPCC の気温が 2℃上昇する場合の 10 年確率降雨の頻度は 1.7 倍、4℃上昇する場合は 2.7 倍となることが示されていることからⁱ、10 年確率降雨の頻度増加によるポテンシャル増加の可能性がある。

(2) 気候変動を考慮した水車形式の選定

本研究では、開放型下掛け水車（許容最大流量 2.0 m³/s）を選択したが、7 月・8 月は許容最大流量を超過したことで、水力発電が停止することもあり、それにより流量が各シナリオの中で最も少ない SSP5-8.5 は 8 月に発電量が多い結果となっている。

また、SSP1-2.6 と SSP2-4.5 では今後降雨量が増加し、流量も増加することが予想されること、上述の通り確率降雨の頻度も増加することが予想されることから、より許容最大流量が大きな水車の使用や別形式の変更を検討する必要性が示唆された。

ⁱ 第 1 章 P.1-1 参照

(3) 総合的な考察

SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP5-8.5などの異なるシナリオを比較することで、将来的な発電ポテンシャルに差異が生じることが明らかとなり、気候変動を考慮したポテンシャル評価は、最適な運用条件での発電能力を示唆し、将来の運用戦略を考える上で参考になる。また、気候変動に対する小水力発電の脆弱性や可能性を評価し、将来のエネルギーインフラの設計や運用に向けた洞察に寄与するものだと考える。

第5節 まとめ

(1) 気候変動シナリオ毎の発電量

2020年比で SSP1-2.6 では+10.1%、SSP2-4.5 では+28.1%増加し、SSP5-8.5 では発電量が 3.1%増加する可能性がある。

(2) 3年・10年確率降雨の発電量

2020年比で3年確率降雨では+69.0%、10年確率降雨では+100.6%、の年間発電量が増加する。

将来的にはより頻繁な豪雨が発生する可能性もあるため、小水力発電運用計画においては気候変動を考慮した検討が必要である。

(3) 気候変動を考慮した小水力発電ポテンシャルの評価

REPOS から凡その情報は得られるが、実施計画を検討する上で、具体的な条件設定を行い、発電停止の可能性を知ることは重要であり、気候変動を考慮したポテンシャル評価を行うことは、発電停止の可能性を確認し、水車の選定や運用計画を検討する上で重要である。

3章から5章において、気候変動による災害リスクと自然の機能、緩和策のポテンシャルの変化を評価した。6章では3章から5章の結果を使用して、流域の総合的な評価手法について検討する。

引用・参考文献

- 1 グリラボホームページ, 最新版-日本における発電の割合-今後の普及はどうか? < <https://gurilabo.igrid.co.jp/article/3329/> >
- 2 NPO 法人環境エネルギー政策研究所 (2017), 自然エネルギー白書 2017, 4.1 自然エネルギー電力, < <https://www.isep.or.jp/jsr/2017report> >
- 3 平塚二郎 (2012), 地球温暖化対策としての中小水力発電の推進. 電気設備学会誌 32 巻 4 号 p. 249-253
- 4 経済産業省資源エネルギー庁 (2018,) 水力発電は安定供給性にすぐれた再生可能エネルギー < <https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/suiryokuhatuden.html> >
- 5 河村隆雄. (2015). "降水量からの小水力発電ポテンシャルの推定-流域面積が小さい水源への適用-." 岐阜県情報技術研究所研究報告, 第 17 号. 報告書.P.54-57
- 6 REPOS(リーポス),再生可能エネルギー情報提供システム <<https://www.renewable-energy-potential.env.go.jp/RenewableEnergy/gis.html?energy=water>>
- 7 三島町ゼロカーボンビジョン 説明スライド 令和 4 年 5 月 1 日策定,P.26<<https://www.town.mishima.fukushima.jp/uploaded/attachment/1087.pdf>>
- 8 環境省 (2023), 我が国の再生可能エネルギー導入ポテンシャル概要資料導入編令和 4 年 4 月 Ver. 1.0< <https://www.renewable-energy-potential.env.go.jp/RenewableEnergy/doc/gaiyou3.pdf> >
- 9 環境省 (2022) IPCC AR6 WG1 報告書 政策決定者向け要約 (SPM) 暫定訳 (2022 年 12 月 22 日版) P.18<https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/ar6/IPCC_AR6_WGI_SPM_JP.pdf>
- 10平成 2 3 年度 新エネルギー農業水利施設利活用促進事業報告書,P.5<<https://www.sz-cca.com/pdf/seminar/20130911-4.pdf>>
- 11日本小水力発電株式会社ホームページ,発電出力について< <http://www.smallhydro.co.jp/products/syutsuryoku.html> >
- 12糸魚川市,小水力発電可能地調査報告書,第 2 章,小水力発電の基礎知識の整理,P.7< https://www.city.itoigawa.lg.jp/secure/16567/suiryoku_h2.pdf >

第6章 地域レベルにおける気候変動シナリオを考慮した流域資源評価 手法の構築

第1節 本章の背景・目的

6.1.1 研究背景

(1) 自然を活用した解決策（NbS）の評価

日本は次期生物多様性国家戦略に、気候変動とも並ぶ地球規模での重要課題である生物多様性の損失や、気候変動対策を含む様々な社会課題の解決に自然を活用した解決策（NbS）を用いていくことを柱とし、社会経済活動における生物多様性の主流化についても提示している。

NbS の定義は国際自然保護協会（IUCN）や欧州委員会（EC）によって示され、定義された。IUCN が発表している NbS の定義は以下の通りである。

「社会的課題に効果的かつ順応的に対処し、人間の幸福及び生物多様性による恩恵を同時にもたらし、自然の、そして人為的に改変された生態系の保護、持続可能な管理、回復のための行動（2016）」

NbS に含まれる対策（アプローチ）の分類は表 6-1 の通りである。NbS はグリーンインフラや Eco-DRR(Ecosystem-based Disaster Risk Reduction: 生態系を活用した防災・減災)などの類似するアプローチを包含する概念となっている。また、NbS は平均気温上昇を 1.5℃ 近くに保つために必要な総純排出削減努力の約 3 分の 1 を持続的に提供することが可能とされている¹。

しかし、2021 年 6 月 10 日に公表された IPBES-IPCC 合同ワークショップ報告書²では、「気候変動緩和に NbS が果たせる役割には大きな可能性がある。しかしその寄与の程度については未だ結論は出ておらず、

また、すべての人為の温室効果ガスの野心的な排出削減があつて初めて効果を発揮する」としており、その効果については条件によっても異なり、不確定である。また、既存研究では、環境と社会経済の目標の間にはトレードオフの関係があり、NbS の価値とその効果の限界を理解することが重要であることや³、NbS の課題やトレードオフについて長期的かつ継続的な支援や科学的知見の蓄積が必要であることが、指摘されている⁴。

表 6-2 NbS のアプローチ分類⁵

NbSアプローチの分類	例
生態系回復アプローチ	<ul style="list-style-type: none"> 生態系の回復 生態工学 森林ランドスケープ回復
特定の問題の生態系関連アプローチ	<ul style="list-style-type: none"> 生態系ベースの気候変動への適応策 生態系ベースの気候変動の緩和策 気候変動への適応サービス 生態系を活用した防災
インフラ関連アプローチ	<ul style="list-style-type: none"> 自然インフラ グリーンインフラ
生態系に基づく管理アプローチ	<ul style="list-style-type: none"> 統合的沿岸管理 統合的水資源管理
生態系保護アプローチ	<ul style="list-style-type: none"> 保護区管理を含む、地域に基づく保全アプローチ

IUCN の NbS に関する取組の世界標準を図 6-1 に示す。基準 3、4、5 は、持続可能な開発の三本の柱である環境的な持続可能性、社会的公平性、経済的な実行可能性に対応する。強固な NbS の実施のためには、各基準に関してベースラインとしての現在の資源および状況の理解に加え、先を見据えた持続可能な行動が求められる。基準 6 では、トレードオフと、短期的および長期的利得の達成のためになされるべき選択の比較考量、また、そのようなトレードオフを決定するための、包括的なプロセ

スの存在の保証に取り組む必要がある⁶。加えて、自然の機能（エコシステム）と社会経済システムは相互干渉の関係にあり、両要素を統合的かつ公平に検討し、適応策を実施することが重要である（図 6-2）。

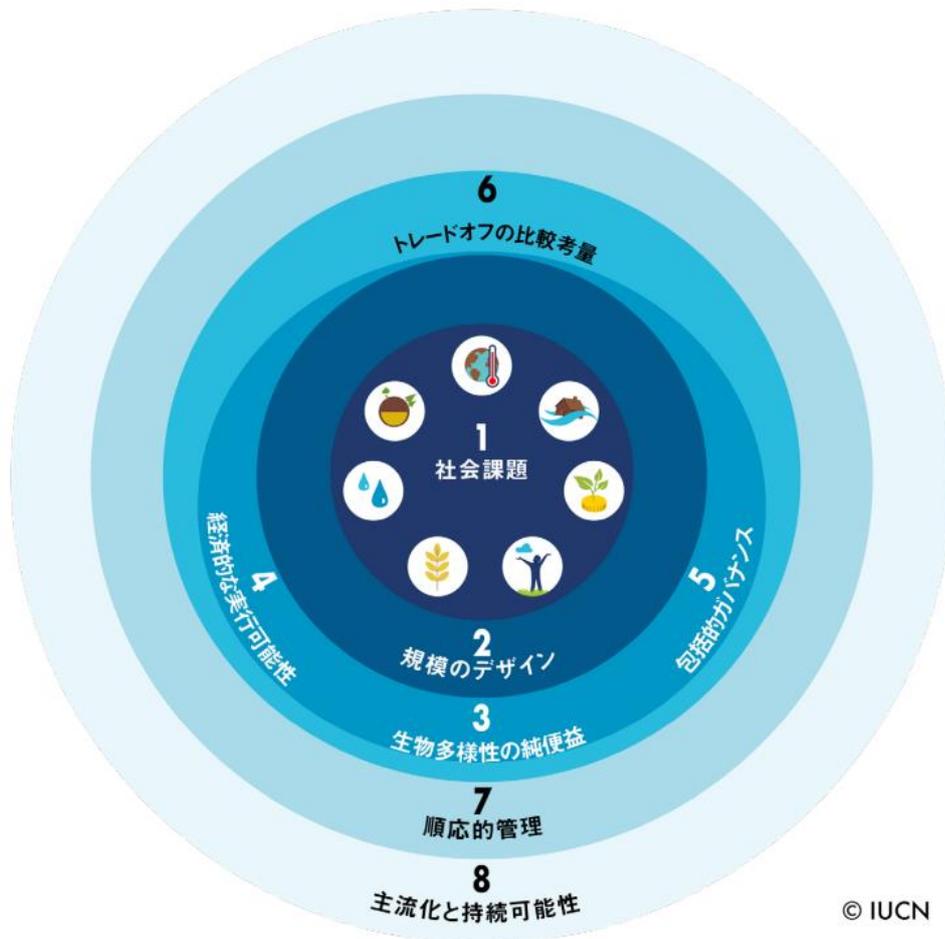


図 6-1 IUCN の NbS の取組に関する世界標準

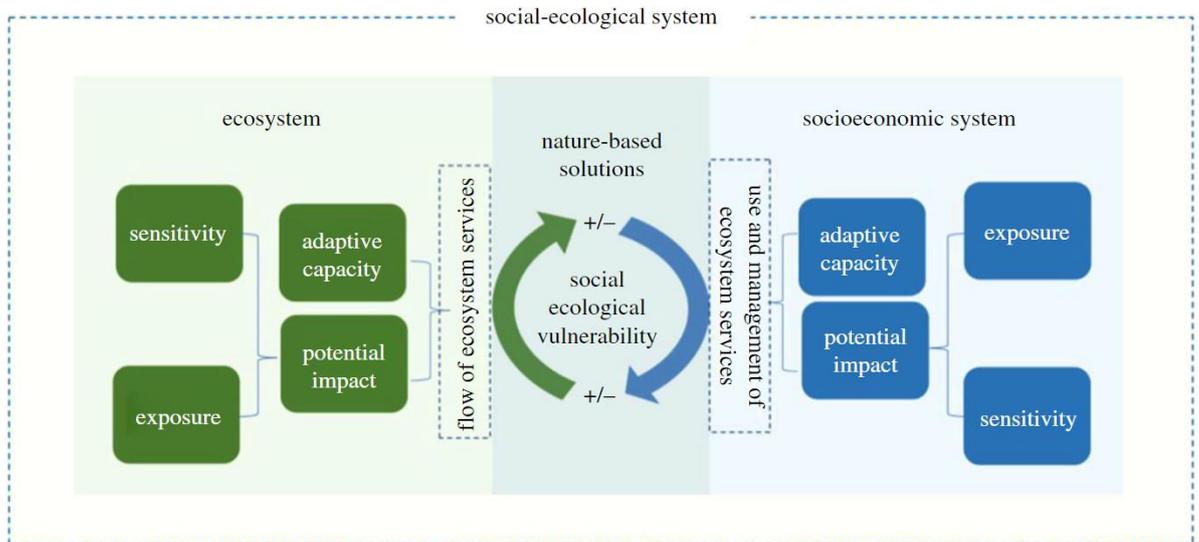


図 6-2 NbS の検討とエコシステムと社会経済システムの関係³

(2) 福島県三島町における地域循環共生圏構築事業

環境省は地域単位で資源の循環を促進し、環境保全や地域経済の活性化の取組が重要であるとして、2018年4月に閣議決定した第五次環境基本計画において「地域循環共生圏」を提唱した⁷。

第4章で記述した通り、福島県三島町は環境省の「平成31年度脱炭素イノベーションによる地域循環共生圏構築事業のうち、地域の多様な課題に応える脱炭素型地域づくりモデル形成事業」に採択され、環境省や国立環境研究所から支援を受けながら、地域循環共生圏を目指した取り組みを実施している。

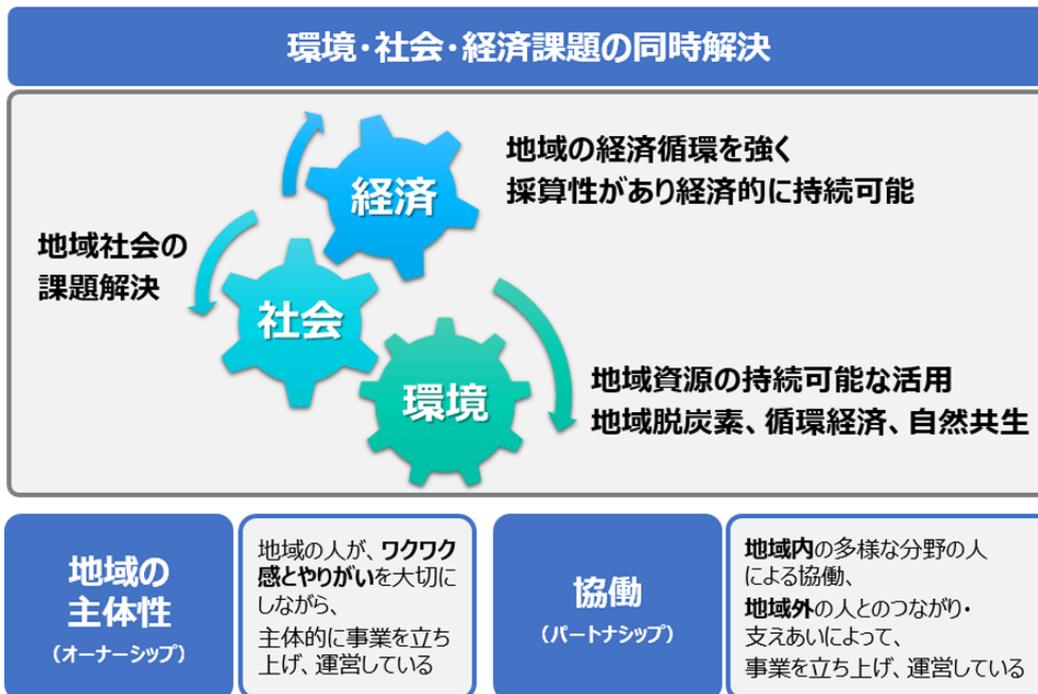


図 6-3 地域循環共生圏の 3 原則⁸

三島町の地域循環共生圏に向けたこれまでの取組を以下に示す⁹。

- 2006 年に三島町地域新エネルギービジョンを策定以降、木材を燃料とする木質バイオマス等の再生可能エネルギーの導入に係わる取組を実施。
- 2017 年に国立環境研究所と連携・協力に関する基本協定を締結し、環境と調和した町づくりのための調査研究を開始。
- 2018 年に三島町生活工芸館の冷暖房の熱源設備に薪ボイラーを導入し、木の駅事業にて町民が伐採した丸太を薪として利用するエネルギーの地産地消を開始。
- 2019 年に、三島町地域循環共生圏推進協議会を設立。
- 2050 年までの町全体のゼロカーボン達成に向けた明確な道筋を描く計画として三島町ゼロカーボンビジョンを策定。

6.1.2 研究目的

NbS といった自然の機能を活用した解決策に注目と期待が高まる一方で、上述の通り、気候変動による外力も強まっているが、その効果には不確定な要素があり、適切に評価しなければ、今後の気候変動対策に影響を与える恐れがある。

一方、対象地である三島町は地域循環共生圏事業に取り組み、ゼロカーボンビジョンを掲げているが、本取組において、気候変動による気象条件の変化や洪水などの災害リスクを含めた検討は行われていない。

また、災害リスクと自然機能、緩和策の総合的な流域の評価手法は十全に検討されておらず、その研究意義は大きい。

そこで本章では、福島県三島町の地域循環共生圏の取組（三島町ゼロ・カーボンビジョン）を対象に、地域レベルの将来の気候変動と流域の資源利用計画に対して災害リスクと自然機能、緩和策（再生可能エネルギー）を定量分析し、これらの関係性を整理し、トレードオフの観点から総合評価することで、今後の流域資源管理の手法を提案する。

第2節 評価方法

6.2.1 条件設定

(1) 気候変動下における流域資源の総合的な評価

地方農村の持続的な発展には、気候変動による影響を考慮し、異常気象に伴う災害リスクへの対策、自然の機能の活用、緩和策の効果的な実施が重要であり（図 6-4）、それらの関係を総合的に分析することが必要である。

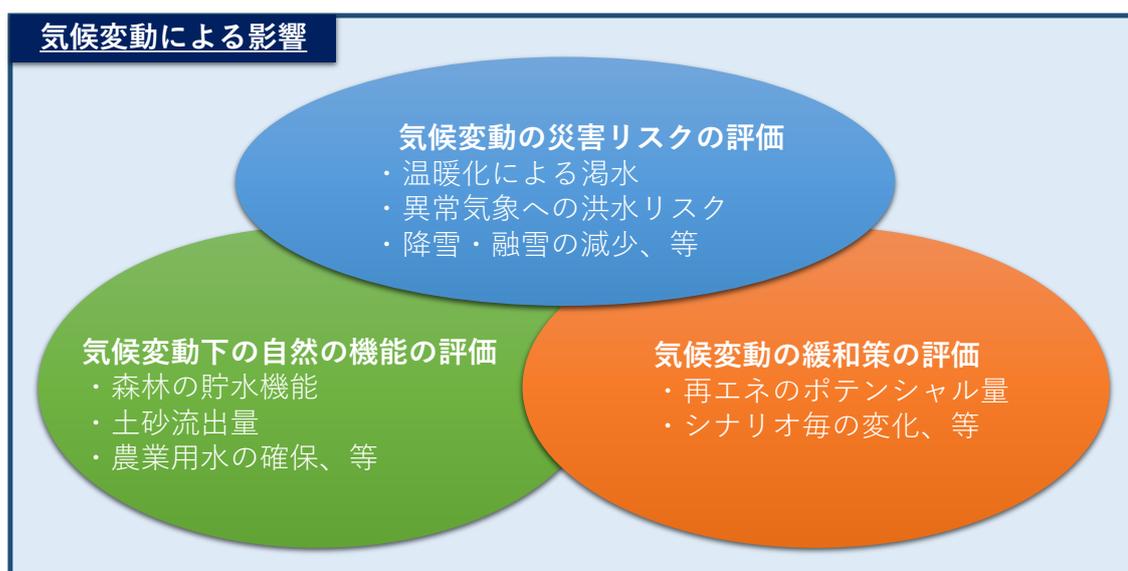


図 6-4 気候変動における災害リスク、自然の機能、緩和策

(2) 評価指標

三島町埴子沢流域 (2.85 km²)を対象に、現在(2020年)を基準として、将来の変化を「リスク評価、自然の機能の評価、緩和策のポテンシャル評価」の三つの観点から分析を行う。

評価指標を表 6-3 に示す。評価指標は NbS が掲げる社会課題（気候変

動、自然災害、社会と経済の発展、食料安全保障、水の安全保障、環境劣化と生物多様性) から設定した。

表 6-3 評価指標

気候変動	自然災害	社会と経済の発展	食料安全 & 水の安全保障	環境劣化と生物多様性
<ul style="list-style-type: none"> ・降雨量 ・降雪・融雪の減少 ・気温上昇 ・蒸発散量 	<ul style="list-style-type: none"> ・洪水リスク(日最大流量) 	<ul style="list-style-type: none"> ・再生可能エネルギーのポテンシャル(発電量) 	<ul style="list-style-type: none"> ・農業用水 ・春先の渇水：流量、融雪量 	<ul style="list-style-type: none"> ・土砂流出量 ・貯水機能

(3) 将来の想定シナリオ

本手法による評価は流域資源管理を検討するアプローチであり、自然科学的な指標に重点を置き、設定する想定シナリオとしては、気候変動シナリオと流域資源利用シナリオを設定する。

気候変動シナリオでは、SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP5-8.5 を設定条件とし、流域資源利用シナリオでは、三島町ゼロカーボンビジョンに基づいて再生可能エネルギー(森林バイオマス・太陽光発電・小水力発電)を設定し、三島町ゼロカーボンビジョンの目標値を使用して達成度を確認する(表 6-5)。最後に、自然の機能は、仮想条件として土地利用変化(森林面積 4%減)を設定し、災害リスクの変化から評価することとした。

表 6-4 想定シナリオ

シナリオ	項目	設定条件	備考
気候変動	SSP シナリオ	2090 年の SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP5-8.5	MIROC6-NIES2020-Fukushima
流域資源利用	自然の機能	土地利用変化 (森林全体の 4% 減)	跡地は農地とし、 土地利用変化から 災害リスクを評価
	再生可能 エネルギー	三島町ゼロカーボンに基 づく、再エネ事業実施(バ イオマス、太陽光、小水 力発電)	2050 年目標値の 達成度を評価

表 6-5 三島町の再生可能エネルギーの目標値 (表 3-1 再掲) ¹⁰

再エネ種類	総ポテンシャル量 (kWh/年間)	2030 年		2050 年		比率
		割合	kWh*	割合	kWh*	
バイオマス (発電+熱利用)	109,100 万 kWh	5%	5,455 万	20%	21,820 万	56%
太陽光発電	7830 万 kWh	5%	392 万	10%	783 万	41%
小水力発電	580 万 kWh	5%	29 万	10%	58 万	3%
合計	1 億 9300 万 kWh		5,876 万		22,661 万	100%

*公開目標値を kW から kWh に変換

6.2.2 評価手順

流域資源の評価手順について、図 6-5 に示す。基本データを収集し、その後、解析のためのモデルを構築し、評価指標は NbS の社会課題に基づいて、評価項目を設定する。気候変動シナリオ (SSP) と対象地域で想定される流域資源利用のシナリオを想定し、指標とそれらの関係を整理する。各指標の相対評価 (2020 年現在との比較) と総合評価を実施し、総合評価の結果に基づいてトレードオフ分析を行い、流域資源管理の利用・管理方法を検討する。

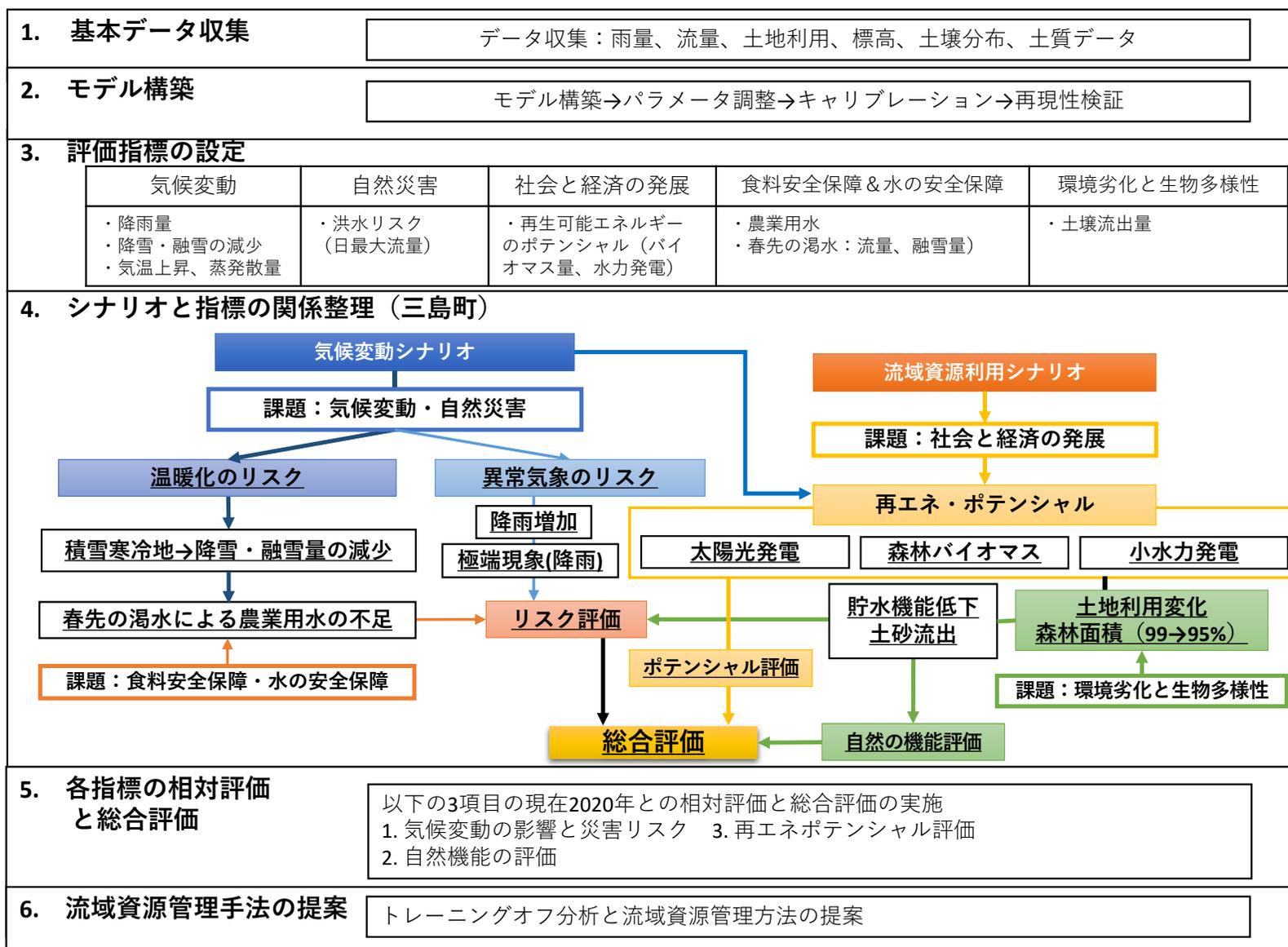


図 6-5 流域資源の評価手順

第3節 評価結果

3章から5章の解析結果を使用し、2020年のデータを基準（100）として各指標に対するレーダ表を作成し、相対評価を行った。

6.3.1 各指標の相対評価の実施

(1) 気候変動（災害）のリスク

a) 気候条件（温暖化・異常気象）

各 SSP シナリオにおける気候条件の変化を図 6-6 に示す。

降雨・流量は SSP2-4.5 が最も多く、降雨量は 1.17 倍に増加し、流量は 1.28 倍に増加した。蒸発散量は、SSP5-8.5 は 1.36 倍に増加し、流量は 0.96 倍に減少した。

気温と日射量では SSP5-8.5 が最も高く、最高気温は 1.24 倍、最低気温は 1.47 倍となる。相対湿度、日射量においては各シナリオの差はほとんどなかった。

気候変動（年平均）

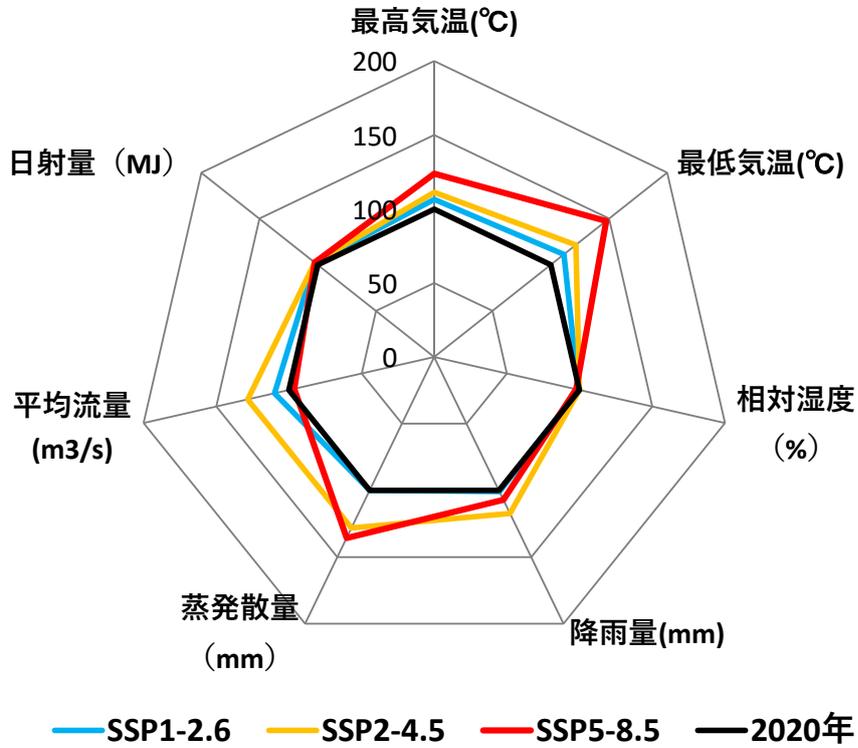


図 6-6 気候変動による気候条件の変化（年間）

b) 降雪・融雪の減少

第3章で既に記述した通りであるが、降雪・融雪量に関しては、全てのシナリオにおいて、30%以上減少し、SSP5-8.5では6%程度まで減少した。SSP5-8.5では、冬期の最高気温は1.75倍（3.66°C）上昇した。

気候変動（冬期：1-3月平均）

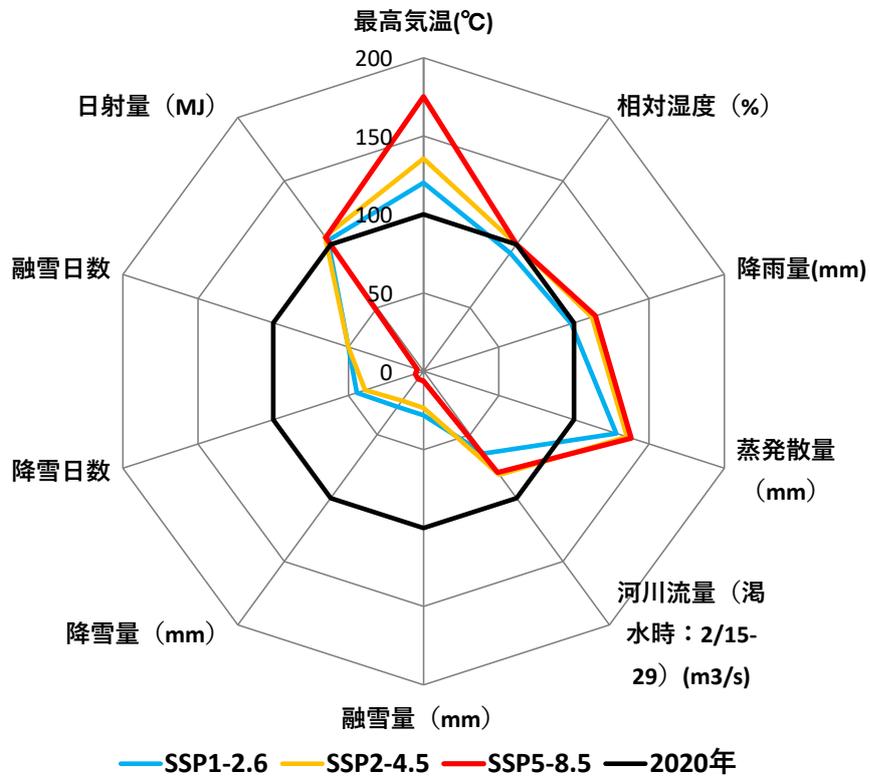


図 6-7 冬期における気候変動による気候条件の変化

(2) 自然の機能

a) 土地利用変化

森林面積 99%と 95%の災害リスク指標を比較した結果を図 6-11 に示す。年最大の流量に変化はなく、平均流量の差もほとんど見られなかった。森林面積 95%では、土砂流出は 11%程度増加した。

森林面積99%と95%の比較

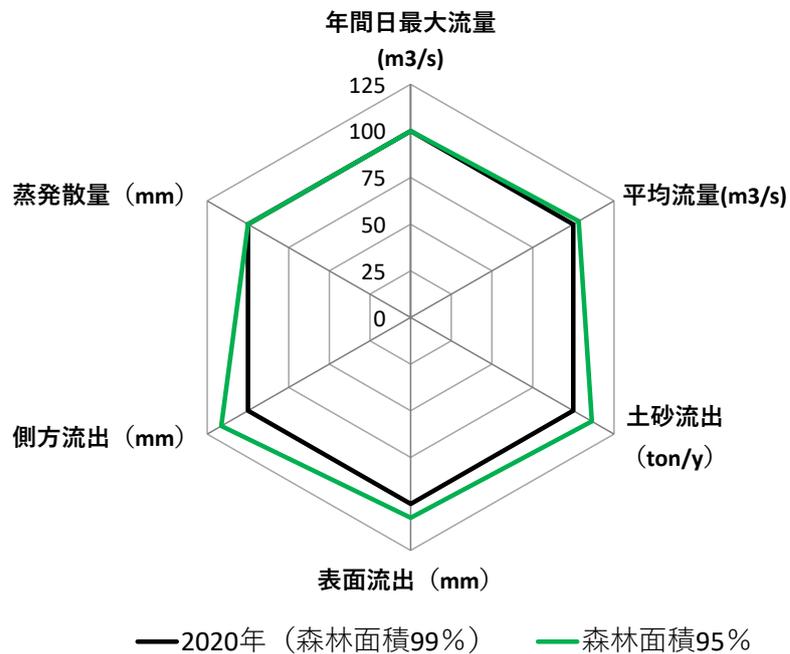


図 6-8 森林面積 99%と 95%の災害リスク指標の比較

b) 気候変動シナリオ毎の災害リスク

森林面積 99%と 95%の各気候変動シナリオの指標の変化率を図 6-9、図 6-10 に示す。森林面積 95%の方が、側方流に関しては、森林面積 99%よりも大きい傾向があるが、全体として各シナリオの気候変動による影響については、森林面積 99%と 95%ともに同じ傾向である（図 6-11）。他方、日最大流量および表面流出量ともに SSP2-4.5 が最も高く、一方で SSP5-8.5 はその両方で最も低い値となった。全体としては、雨量が多い SSP2-4.5 が最もリスクが高い。

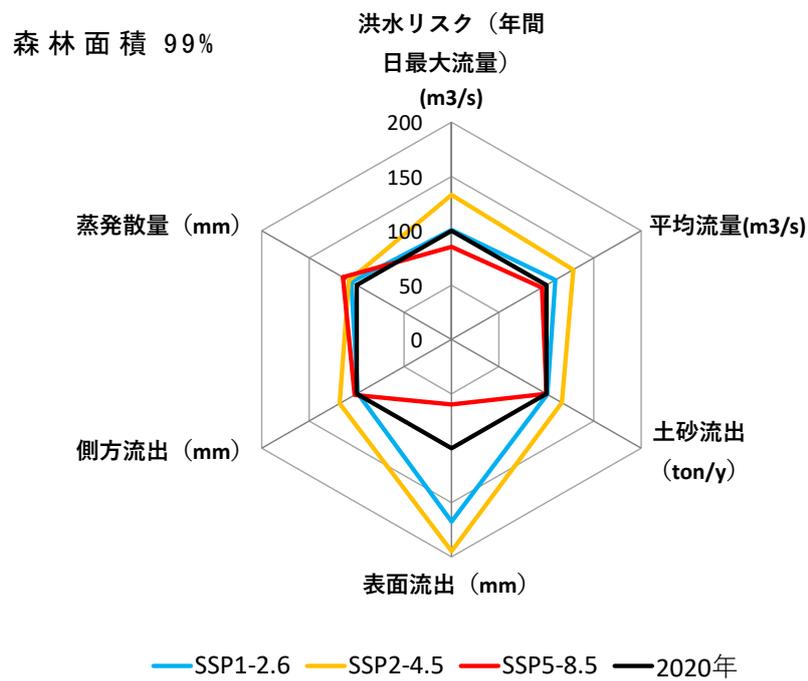


図 6-9 2020年 (森林面積 99%) の気候変動下の災害リスク指標

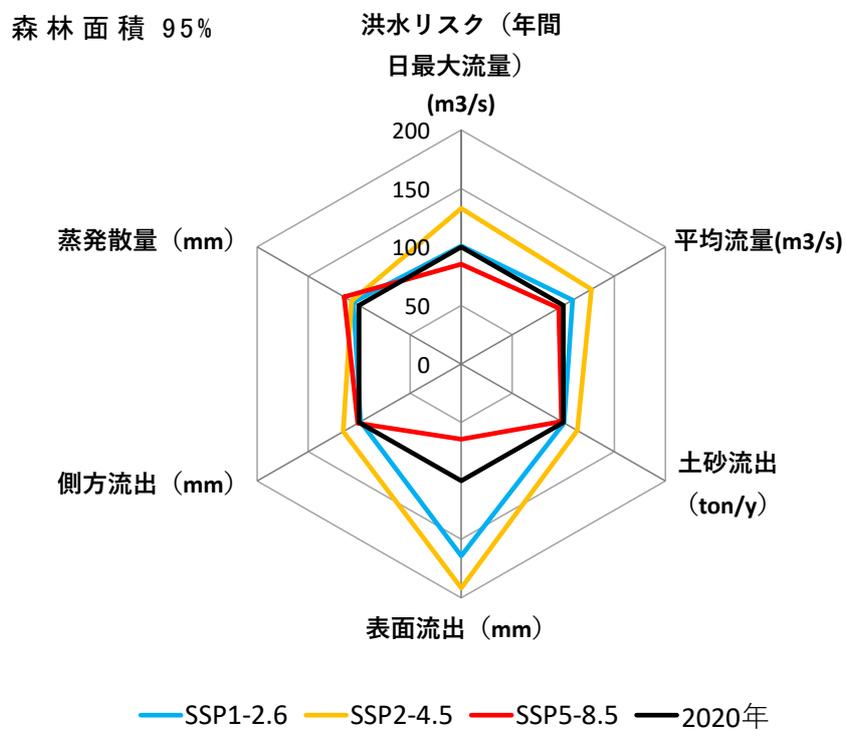


図 6-10 2020年 (森林面積 95%) の気候変動下の災害リスク指標

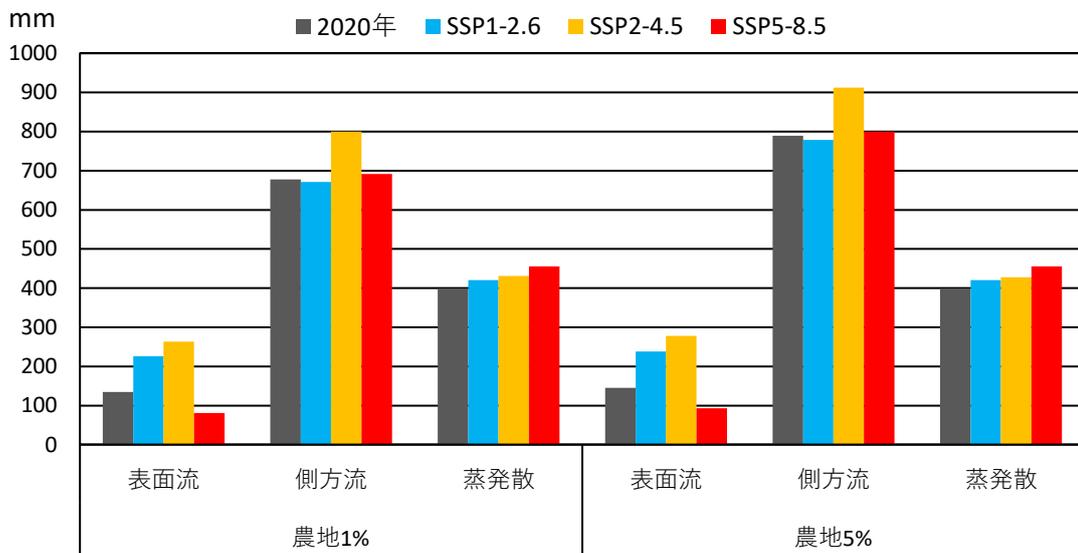


図 6-11 森林面積 99%と 95%の各シナリオの傾向比較

(3) 再エネポテンシャル

a) 対象流域の再生可能エネルギーの目標値

三島町のゼロカーボンビジョンの目標値は、表 6-6 に示した通りであるが、対象流域は三島町の流域の一部であり、全体の 3%程度 (2.85 km²/90.81 km²) であるため、目標値は全体の 3%とした。

表 6-6 対象流域における目標

再エネ種類	2030年		2050年	
	全体	対象流域 (3%)	全体	対象流域 (3%)
バイオマス (発電+熱利用)	5,455×10 ⁴ kWh	164.7×10 ⁴ kWh	21,820×10 ⁴ kWh	654.6×10 ⁴ kWh
太陽光発電	392×10 ⁴ kWh	11.8×10 ⁴ kWh	783×10 ⁴ kWh	23.5×10 ⁴ kWh
小水力発電	29×10 ⁴ kWh	0.9×10 ⁴ kWh	58×10 ⁴ kWh	1.7×10 ⁴ kWh
合計	5,876×10 ⁴ kWh	176×10 ⁴ kWh	22,661×10 ⁴ kWh	680×10 ⁴ kWh

b) 木材バイオマス

第4章で参照した大場ら（2017）の先行研究において、木材バイオマスは年間施業面積率の1/50（2%）が利用できるとしており、将来的には2050年から経済的に利用可能な平均収穫材積は55.5から77.2 × 10³ m³/yと試算されている。これは、三島町の全体で試算した値であり、対象流域は三島町全体の内、3%の流域面積であるため、77.2 × 10³ × 0.03 = 2,316 m³/yの収穫材積が確保できることを仮定した。その上で、木材ペレットの密度は700 kg/m³を想定し、有効発熱量は4.8 kWh/kgと仮定し、kWhを計算したところ、ポテンシャルは778 × 10⁴ kWh（最大）となった。ただし、これは民有林全体のポテンシャルであるため、三島町のゼロカーボンビジョンの最大ポテンシャルの試算では民有林の30%が最大値とされており¹⁰、234 × 10⁴ kWhが最大値と試算された。

目標管理面積は2030年で7%と2050年で10%であるため、2030年は54.5 × 10⁴ kWh、2050年は77.8 × 10⁴ kWhと試算された。

○ 木材バイオマスのポテンシャル計算

三島町の全体の収穫材積：55.5 ~ 77.2 × 10³ m³/y（大場ら,2017）

民有林の施業面積率：1/50（2%）で計算

対象流域（三島町全体の内、3%）の収穫材積：77.2 × 10³ × 0.03 = 2316 m³/y

密度（仮）：700 kg/m³ * 木材ペレットを想定

有効発熱量（仮）：4.8 kWh/kg

全ポテンシャル量：2,316 × 700 × 4.8 × 0.3 = 約 7,781,760 kWh

最大ポテンシャル-民有林管理面積 30%：2,334,528 kWh

2030年目標-民有林管理面積 7%：7,781,760 × 0.07 = 544,723 kWh

2050年目標-民有林管理面積 10%：7,781,760 × 0.1 = 778,176 kWh

c) ソーラーシェアリング（太陽光発電）

Google earth の 2019 年 8 月の衛星画像より流域内の農地面積をポリゴン作成機能により計測したところ、4.1 ha であった。既存の農地においてソーラーシェアリングを実施した場合の発電量は以下の通り、91.1 万 kWh のポテンシャルがあることが分かった。一方、第 4 章で三島町の荒廃農地の割合は 33%であることを確認した（図 4-2）。荒廃農地のみを対象にソーラーシェアリングを実施した場合は、30 万 kWh となる。また、SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP5-8.5 における 2090 年の日射量の増加率は 2%であったため、ポテンシャルが微増する可能性がある。

○ ソーラーシェアリング発電量試算

既存農地面積（対象流域）： $0.041 \text{ km}^2 = 41,000 \text{ m}^2$

年間日射量： $3.58 \text{ kWh/m}^2/\text{d}$

システム容量： $10 \text{ kW}/150 \text{ m}^2$

損失係数：0.85

面積設置率（遮光率）：30%

年間発電量（最大）＝ $41,000 \times 3.58 \times 0.0667 \times 365 \times 0.85 \times 0.3 = 911,225 \text{ kWh}$

年間発電量（荒廃農地 33%）＝ $911,25 \times 0.33 = 300,704 \text{ kWh}$

d) 小水力発電

小水力発電の推定量は第5章で計算した通りであり、10年確率降雨で最大20,779kWhである。

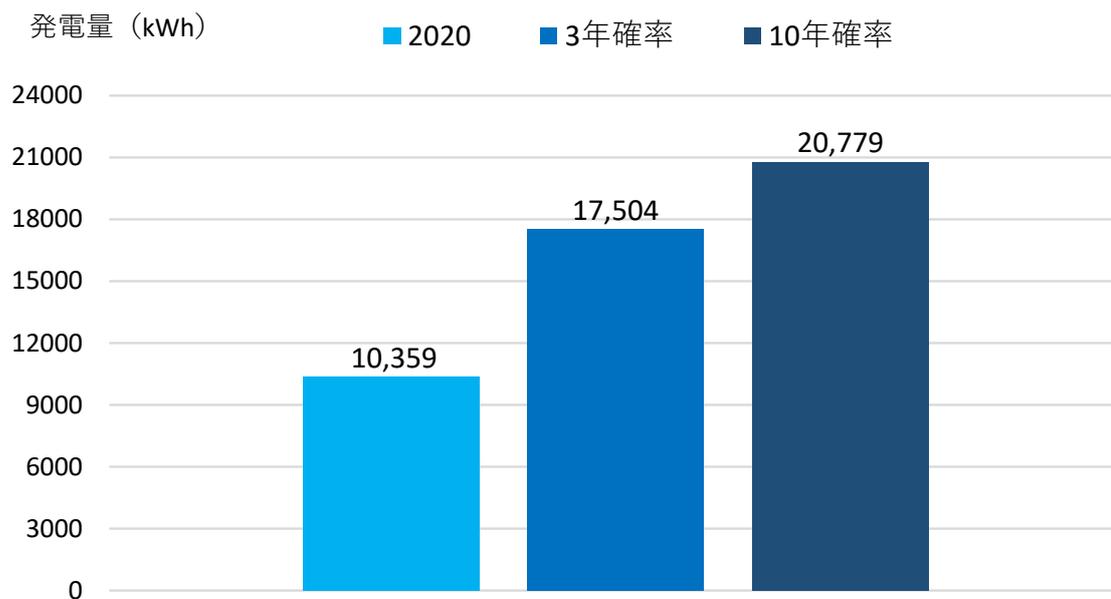


図 6-12 各確率降雨における年間発電量 (表 5-10 再掲)

e) 発電ポテンシャル評価

(2)～(4)の結果を取りまとめ、2050年目標との達成度を表 6-7 に示す。
再エネポテンシャルの 2020 年（現在）は以下の内容で試算した。

バイオマス：2030 年目標の民有林管理面積 7%

太陽光発電：既存農地のうち、荒廃農地（全体の 33%）でソーラーシェアリングを実施した場合

小水力発電：2020 年降雨の計算結果

再エネポテンシャルの最大値は以下の内容で試算した。

バイオマス：最大ポテンシャルである民有林管理面積 30%

太陽光発電：既存農地すべてがソーラーシェアリングを実施した場合

小水力発電：10 年確率降雨の計算結果

太陽光発電は、他の項目としてポテンシャルが高く、荒廃農地でのソーラーシェアリングを実施した場合においても、目標値 1.28 倍を発電する。一方、バイオマスによる発電は、最大ポテンシャルにおいても 36% の達成度であり、条件の変更がない限り、目標の達成は難しい。全ての最大ポテンシャルを合算した場合においても達成率は最大 48%である（表 6-7）。

再エネ目標値2050年
達成率

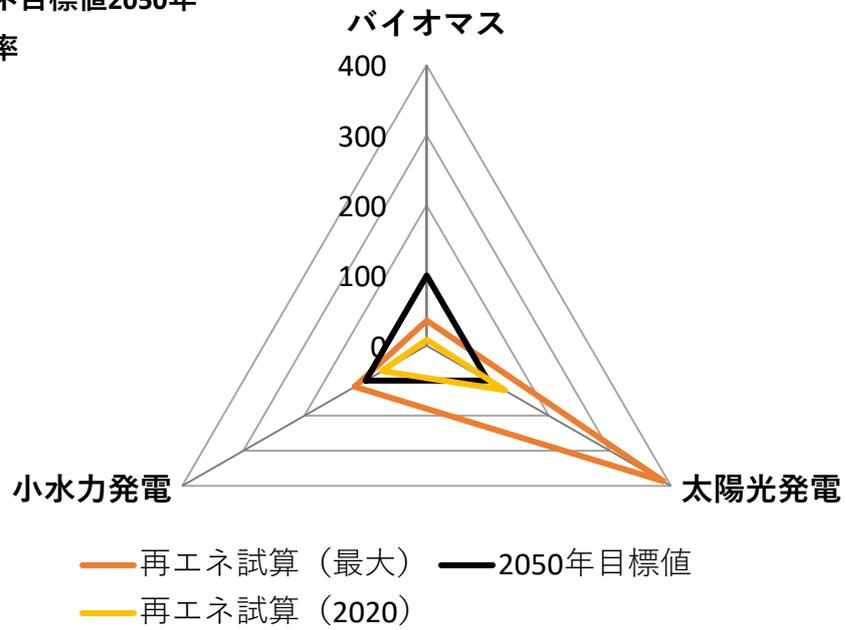


図 6-13 再エネポテンシャルの達成度

表 6-7 対象流域における再エネ目標達成率

再エネ種類	2050 目標 (3%) (kWh)	発電ポテンシャル (kWh)	達成率
バイオマス	654.6×10^4	$54.5 - 233.4 \times 10^4$	8 - 36%
太陽光発電	23.5×10^4	$30.0 - 91.1 \times 10^4$	128 - 388%
小水力発電	1.7×10^4	$1.2 - 2.0 \times 10^4$	70 - 118%
合計	680×10^4	$109.0 - 326.5 \times 10^4$	16 - 48%

6.3.2 各指標の総合評価

各指標において、○：2020年から改善、△：2020年を現状維持、×：2020年より悪化、として3段階の評価を行い、総合評価を実施した（表6-8）。SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP5-8.5も降雨量の変化により、リスクとポテンシャルの変動がそれぞれ異なり、SSP2-4.5では洪水リスクは増加する一方で、小水力発電ポテンシャルは増加した。森林面積95%は土壌流出のリスクは増加するが、ソーラーシェアリングやバイオマスなどを利用した再エネポテンシャルは増加の可能性がある。

表 6-8 総合評価の結果

社会課題	指標	各気候変動における 2020年と2090年比較			土地利用変化 評価
		持続型 SSP1-2.6	中道型 SSP2-4.5	化石燃料依存 SSP5-8.5	森林面積変化 99%→95%
気候変動	降雪・融雪量の減少	× 降雪：-72% 融雪：-81%	× 降雪：-77% 融雪：-77%	× 降雪：-94% 融雪：-94%	—
自然災害	洪水リスク (最大日流量)	△ 微増 1%増	× 悪化 33%増	△ 全体流量は減少 10年確立降雨は増加	△ 現状維持 変化なし
社会と経済の発展	再生エネルギー 事業の目標達成率	○ 小水力発電量 10.1%増	○ 小水力発電量 28.1%増	○ 小水力発電量 3.1%増	○ バイオマス活用 4%増
食料安全保障	春先(2月末)の 流量変化	× 35%減	× 18%減	× 20%減	—
水の安全保障	冬期の流量変化	× -10%減	△ 1%増	○ 9%増	—
環境劣化と生物多 様性の損失	土壌流出量	△ 1%増	× 14%増	○ 2%減	× 11%増

○：2020年から改善、△：2020年を現状維持(1%以内の差)、×：2020年より悪化

6.3.3 トレードオフと流域資源管理の提案

上記の総合評価に基づいて、トレードオフの観点から今後の流域資源管理について提案を行った。

(1) 自然の機能と再エネポテンシャル

自然の機能と資源を利用する再生可能エネルギーとの関係には、一部トレードオフの関係が存在する。対象流域において、再生可能エネルギー事業の推定値は目標を満たしていないが、その一方で、土地利用変化（森林面積 95%）では、土壌流出が増加したのみで、災害リスクは大幅に増加していないことから、森林面積の活用を検討することで再エネ目標値の達成を目指すことが考えられる（例えば、再エネ事業中でポテンシャルが高い太陽光発電の導入等）。

(2) 自然の機能と災害リスク（人工インフラ）

自然の機能と災害リスクはコベネフィットが期待されているが、対象流域における森林の貯水機能も容量に限界があり、一定以上の降雨量においては、効果はそれほど大きくなく、小流域において自然の機能に防災能力を委ねることは逆に災害リスクを上げること（無対策）にもなりかねない。一方で、降雨量は気候変動により増加傾向になる可能性が高いことから、気候変動に対する災害リスクの対策は強化すべきであり、土壌流出対策としては択伐による森林利用計画を検討するとともに、洪水対策として必要に応じて人工インフラの導入を検討することも考えられる。

他方、気候変動により降雪・融雪は減少傾向になるものの、冬期の流量自体の減少の可能性は少ないことから、春先の流量確保のための貯水

池の設置等の施策を講じることで、災害リスクは抑えることも考えられる。

(3) 気候変動と災害リスクと再エネポテンシャル

気候変動の進行と災害リスクは比例関係かつ状況は悪化のみと考える風潮もあるが、全球的な温暖化が、地域における環境や社会の悪化を、必ずしももたらすわけではなく、例えば小水力のポテンシャルは気候変動後に好転する可能性があり、一方で化石燃料依存型の SSP5-8.5 では、流量全体としては減少傾向となり、農業用水としては不足のリスクがある一方で、夏場の降雨減少による日最大流量が減少するため、水災害リスクが減少する可能性も示唆された。気候変動の影響により好転する指標については、より有効活用する手段も考えられる。各シナリオや社会課題によって影響は異なるため、その特徴を考慮した計画策定が重要である。

6.3.4 流域資源評価シート作成

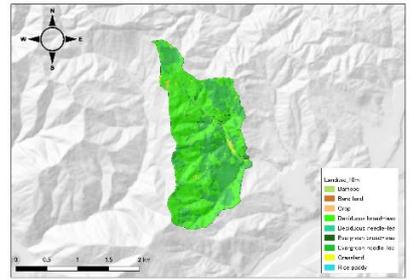
気候変動の影響評価は、地域レベルでの対策議論の促進するために可視化できる形で整理することが重要である。

上述の結果を整理する形で、気候変動の影響を踏まえた流域資源の評価シートを作成した（図 6-14）。評価シートを用いることで、気候変動による影響と、災害リスク、自然の機能、緩和策（再エネ）のポテンシャルを可視化して確認することができる。

三島町のゼロカーボンビジョンの埴子沢流域評価シート

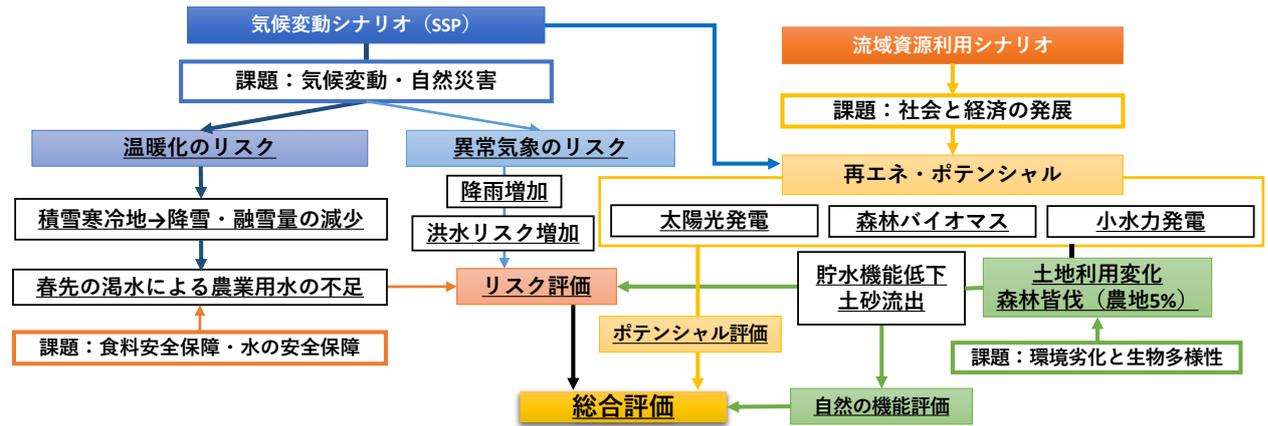
三島町のゼロカーボンビジョンの目標値

再エネ種類	2030年		2050年	
	全体	対象流域 (3%)	全体	対象流域 (3%)
バイオマス	5,455万	164.7万	21,820万	654.6万
太陽光発電	392万	11.8万	783万	23.5万
小水力発電	29万	0.9万	58万	1.7万
合計	5,876万	176万	22,661万	680万

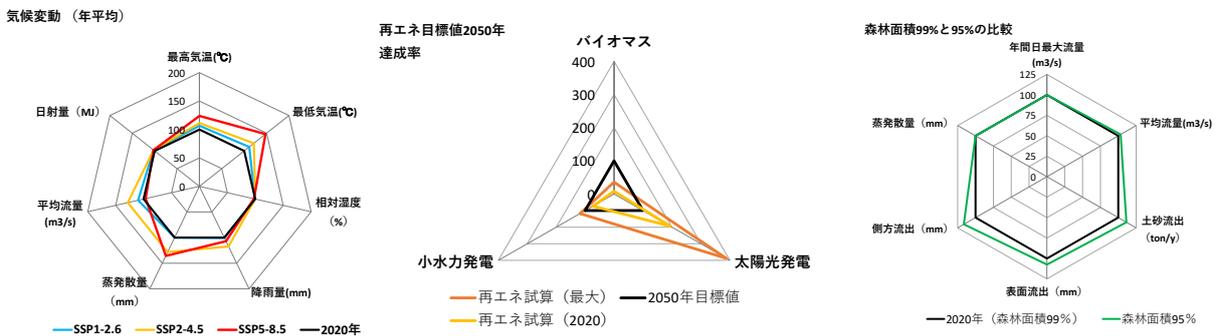


埴子沢流域土地利用

1. 災害リスク、自然の機能、緩和策(再エネ)の関係整理



2. 気候変動、再エネポテンシャル、土地利用変化の相対評価



3. 総合評価

社会課題	指標	気候変動の評価 2020年と2090年(各シナリオ)比較			土地利用変化評価 森林面積変化 99%→95%
		持続型 SSP1-2.6	中道型 SSP2-4.5	化石燃料依存 SSP5-8.5	
気候変動	降雪・融雪の減少	× 降雪: -72% 融雪: -81%	× 降雪: -77% 融雪: -77%	× 降雪: -94% 融雪: -94%	-
自然災害	洪水リスク (最大日流量)	△ 微増 (1%増)	× 悪化 (33%増)	△ 全体流量は減少 10年確立降雨は 増加	△ 現状維持 (変化なし)
社会と経済の発展	再生エネルギー事業の 目標達成率	○ 小水力発電量 10.1%増	○ 小水力発電量 28.1%増	○ 小水力発電量 3.1%増	○ バイオマス活用 4%増
食料安全保障	春先(2月末)の 流量変化	× 35%減	× 18%減	× 20%減	-
水の安全保障	冬期の流量変化	× -10%減	△ 1%増	○ 9%増	-
環境劣化と生物多 様性の損失	土壌流出量	△ 1%増	× 14%増	△ 2%減	× 11%増

○: 2020年より改善 △: 2020年を現状維持 ×: 2020年より悪化

図 6-14 気候変動の影響を踏まえた流域資源評価シート

第4節 考察

(1) 本評価手法による発見

気候変動が及ぼす影響を考慮し、災害リスクと自然の機能、緩和策（再生可能エネルギー）を総合的に評価し、取りまとめた。総合評価の結果、SSP シナリオが悪化するほど、全ての評価項目が悪い方向に進むのではなく、各シナリオによって、気候変動のリスクと再エネポテンシャルが変動することがわかった。

例えば、森林面積の利用は土壌流出への対策を実施すれば、各 SSP シナリオによる影響の差も小さくなく、緩和策のポテンシャルを上げることも可能だと思われ、その一方で、森林の貯水機能も容量に限界があり、一定以上の降雨量においては、気候変動の適応策としての効果はそれほど大きくない可能性が示唆された。

全球的な温暖化が、地域における環境や社会の悪化を、必ずしももたらすわけではなく、その一方で気候変動による災害リスクを自然の機能にすべて委ねることは難しい。

これらは総合評価を実施したことにより明らかになった事項であり、本評価シートを用いることで、各 SSP シナリオで資源利用計画を実施するかを検討することが可能となり、本研究で初めてそれらの評価のあり方を明らかにした。

第5節 まとめ

(1) 流域資源評価手法の構築

流域資源の評価における評価の手順と整理・分析方法について提案した。まず、3項目（災害リスク、自然の機能、再エネポテンシャル）において定量分析し、関係整理を行う。そして、各指標による相対評価と総合評価を実施し、総合評価の結果に基づいてトレードオフの観点から、流域管理の提案を行うことで、総合的な流域資源評価手法が構築できることを説明した。

(2) 流域資源の総合評価の提案

NbSにおける各社会課題において評価指標を作成し、3段階の総合評価（改善、現状維持、悪化）を実施・整理し、評価シートを作成した。本シートを使用することでSSPシナリオを踏まえた資源利用計画の検討、地域の持続的な発展や再生可能エネルギーの利用に対する総合的な見通しを示すことが可能となる。そして、異なる気候変動シナリオや流域資源利用シナリオにおける適応策と緩和策の検討に役立つものだと考える。

引用・参考文献

- 1 環境省 2050年カーボンニュートラルと生物多様性（参考資料4）<https://www.biodic.go.jp/biodiversity/about/initiatives6/files/8_4_2050cn&biodiversity.pdf>
- 2 環境省生物多様性センター（2021）,IPBES-IPCC 合同ワークショップ報告書 概要 P.1<https://www.biodic.go.jp/biodiversity/about/initiatives6/files/9_9-6_ipbesipccwsreport.pdf>
- 3 Nathalie Seddon, Alexandre Chausson, Pam Berry, Cécile A. J. Girardin, Alison Smith, & Beth Turner. (2019). "Understanding the value and limits of nature-based solutions to climate change and other global challenges." Royal Society Publishing.
- 4 大橋祐輝ら（2021）, IGES Briefing Note : COP26 と自然を活用した解決策（Nature-based Solutions : NbS）適応と水環境領域, 公益財団法人 地球環境戦略研究機関
- 5 環境省 2050年カーボンニュートラルと生物多様性（参考資料4）<https://www.biodic.go.jp/biodiversity/about/initiatives6/files/8_4_2050cn&biodiversity.pdf>
- 6 IUCN の NbS に関する世界標準ガイダンス ,P.3< <https://nbs-japan.com/wp-content/uploads/2022/02/7e7c4057c64eb7886d1b26c7db4f0d63.pdf>>
- 7 環境で地方を元気にする地域循環共生圏づくり構想策定の手引き 2020年7月,環境省大臣官房環境計画課 P.1-8<<https://www.env.go.jp/content/900501697.pdf>>
- 8 環境省ローカル SDGs -地域循環共生圏-ホームページ, <<http://chiikijunkan.env.go.jp/shiru/>>
- 9三島町ゼロカーボンビジョン 説明スライド 令和4年5月1日策定,P 11 <<https://www.town.mishima.fukushima.jp/uploaded/attachment/1087.pdf>>
- 10三島町ゼロカーボンビジョン 説明スライド 令和4年5月1日策定, P.16,25 <<https://www.town.mishima.fukushima.jp/uploaded/attachment/1087.pdf>>

第7章 総括

第1節 研究概要

日本の地方レベルの自治体では具体的な気候変動に対する適応策を検討するための情報が不足しており、地域への影響予測、地域特有の脆弱性とリスク評価、対策技術、社会実装など、多岐に渡る研究と活動が求められている。令和3年10月22日に閣議決定された気候変動適応計画では、気候変動により頻発化・激甚化する水災害に対して、自然環境が有する多様な機能を活用し、災害リスクの低減に寄与する自然の機能を積極的に保全又は再生することが掲げられている。しかし、その効果は小流域毎に異なるため、機能の正確な把握が重要である。他方の小さな自治体ほど自然エネルギーのポテンシャルが大きく、特に農村部は風力、太陽光、バイオマス、地中熱など多くの自然エネルギー資源があるとも言われており、資源を有効活用し、地域活性化を合わせて流域資源の管理を考える必要がある。

そこで、本研究は、地域レベルにおける気候変動を考慮した流域の災害リスクと自然の機能、気候変動の緩和策の効果を定量分析し、それらの関係性を整理し、流域資源の評価手法を提案することを目的とした。

1章序論では、本論文の目的と意義を明確化し、研究目的及び構成を示した。

2章では、モデルの選定を行い、モデルは準分布型モデルかつ汎用性が高いSWAT+を採用した。モデルの構築は、土壌分析の実測値の入力、側方流の補正值として自動キャリブレーションを実施し、構築したモデルをNSE、決定係数 R^2 で精度検証を行い、それぞれ一定の精度が確保できることを確認した。

3章では、気候変動による降雪・融雪への影響を評価した。各SSPシナリオにおける2090年の降雪量と融雪量は、2020年と比較して、

SSP1-2.6 で約 3 割、SSP2-4.5 で約 4 割、SSP5-8.5 で約 9 割減少することが示された。

春先の流量への影響については、降雨量はすべての SSP シナリオで増加しており、特に SSP2-4.5 では最も増加しており、気候変動により春先の総流量としては増加することが示された。

4 章では土地利用変化として森林面積を全体の 99%から 95%に減少させ、気候変動を考慮した森林の貯水機能と災害リスクを評価した。森林の貯水機能は、降雨が一定期間続いた場合、土壌が湿潤状態に達して低下するため、年間の最大降雨時には森林面積を減少させた場合においても、貯水機能の上限を迎えているため、年間の日最大流量の変化はなかった。蒸発散の差はほとんどなく、年全体の流量は森林面積減少後、微増加となり、土砂流出量が 11%増加した。SSP シナリオ毎の年間の最大流量は、森林面積 99%と 95%ともにどの SSP シナリオにおいても同じであり、洪水リスクとしては大きな差はないことを確認した。

5 章では気候変動を考慮した緩和策（小水力発電）のポテンシャルを評価した。気候変動の影響は 2020 年比で SSP1-2.6 では+10.1%、SSP2-4.5 では+28.1%増加し、SSP5-8.5 では発電量が 3.1%増加となった。確率降雨の年間発電量は 2020 年比で 3 年確率降雨は+69.0%、10 年確率降雨は+100.6%増加した。

6 章では、気候変動シナリオと流域資源利用シナリオを設定し、災害リスクと自然機能、再生可能エネルギーのポテンシャル、各指標の相対評価（現在 2020 年との比較）を実施するとともに、それらを取りまとめ総合評価を行い、総合評価の結果に基づいてトレードオフ分析を行うことで、流域資源管理を提案した。

本研究成果により気候変動によるリスクとポテンシャル変動を可視化したことで地域レベルでの気候変動への対策検討の議論の促進につながり、本シートを活用して地域住民参加型の議論を行うことで、地域ニ

ーズや優先事項の考慮した計画の立案が可能になることは、特筆すべき点である。

第2節 今後の課題

本研究により気候変動の影響を踏まえた災害リスク、自然の機能、緩和策の評価が可能となった。このことは、世界的に自然の評価を高めていく動きがある中で、自然に対する評価手法に焦点が集まるものの、総合的な観点から各項目の関係を分析した研究は少なかったことから、提案した評価手法を使用することで、各要素の相互関係が定量的に分かり、今後の流域管理計画に役立つものと考ええる。

一方、各シミュレーションの精度向上については、課題の一つであるが、精度向上のためには観測のデータの増加と継続的なデータ収集が必要となり、そのための負荷が発生する。また、気候変動による気候・環境条件の変化は著しく、加えて気候変動モデルもアップデートされていくため、一度のシミュレーションの結果を継続して利用できるとは言えず、条件の変化に合わせて定期的な更新が必要である。小規模の自治体においては、活用できるリソースに限りがあり、どの分野・項目に重点をおき、継続的に評価を更新するかは計画すべきである。評価指標の設定にあたっては、その地域で協議を行い、その地域毎の問題・課題を整理し、重みづけを行い、設定すべきものであり、地域住民への説明・ヒアリングにより、ニーズとの照らし合わせを考慮した影響評価の説明が必要である。

要 旨

日本の地方レベルの自治体では具体的な気候変動に対する適応策を検討するための情報が不足しており、地域への影響予測、地域特有の脆弱性とリスク評価、対策技術、社会実装など、多岐に渡る研究と活動が求められている。令和3年10月22日に閣議決定された気候変動適応計画では、気候変動により頻発化・激甚化する水災害に対して、自然環境が有する多様な機能を活用し、災害リスクの低減に寄与する自然の機能を積極的に保全又は再生することが掲げられている。しかし、その効果は小流域毎に異なるため、機能の正確な把握が重要である。他方の小さな自治体ほど自然エネルギーのポテンシャルが大きく、特に農村部は風力、太陽光、バイオマス、地中熱など多くの自然エネルギー資源があるとも言われており、資源を有効活用し、地域活性化を合わせて流域資源の管理を考える必要がある。そこで、本研究は、地域レベルにおける気候変動を考慮した流域の災害リスクと自然の機能、気候変動の緩和策（再生可能エネルギー）を定量評価し、それらの関係性を分析し、評価手法を構築し、流域管理の提案を行うことを目的とした。本論文は7章から構成されており、1章序論で、本論文の目的と意義を明確化し、研究目的及び構成を示し、2章ではモデルの選定と検証、3章では冬期の気候変動による降雪・融雪への影響評価、4章では気候変動を考慮した森林の貯水機能と災害リスクの評価、5章では気候変動を考慮した再エネ（小水力）のポテンシャル評価、6章では地域レベルにおける流域資源の定量的な評価手法の提案、7章を研究総括とした。

研究対象地は福島県三島町の埴子沢流域である。2章では自治体で使用することを想定し、汎用性の観点からシミュレーション・モデルの比較・選定を行い、モデルは作業負荷と精度を考慮し、準分布型モデルかつ融雪・降雪の解析ができるSWAT+を採用し、その精度が確保できることを検証した。3章では気候変動による降雪・融雪への影響を評価

し、全ての SSP シナリオにおいて、2090 年には降雪・融雪量が著しく減少することを確認した。4 章では森林面積の減少（森林面積を 99% から 95%）による森林の貯水機能の変化を確認し、降雨が一定期間続いた場合に森林の貯水機能は上限に達し、森林面積 95% においても日最大流量に変化は生じないことを確認した。第 5 章では、気候変動の影響を考慮した小水力発電のポテンシャル評価を行い、異なる気候変動シナリオをシミュレーションした結果、将来的な発電ポテンシャルは、現在（2020 年）と比較して最大 28% 程度差異が生じることが明らかとなった。第 6 章では気候変動シナリオ（SSP）と対象地域で想定される流域資源利用のシナリオを想定し、気候変動下における関係性を整理し、災害リスク、自然機能、緩和策（再生可能エネルギー）の 3 項目の評価と関係性を分析し、それぞれの気候変動シナリオや流域資源利用シナリオにおいて、各社会課題が総合的に評価された。地域レベルにおける流域資源について総合的な観点から各項目の関係性に分析した研究は極めて少なかったことから、提案した評価手法を使用することで、各要素の相互関係が定量的に分かり、気候変動を考慮した総合的な評価の重要性、評価のあり方を本研究で初めて明らかにした。

SUMMARY

Development of watershed resource assessment methodology considering climate change scenarios on regional level - A Proposal for Comprehensive Assessment of Climate Change Impacts and Mitigation Measures in Mishima Town, Fukushima Prefecture –

Shotaro KIKUCHI

Since local governments sometimes do not have sufficient information to consider specific climate change adaptation measures, a wide range of research and activities are required, including regional impact prediction, region-specific vulnerability and risk assessment, countermeasure technologies, and social implementation. The Climate Change Adaptation Plan approved by the Cabinet on October 22, 2021 calls for the active conservation or restoration of natural functions that contribute to disaster risk reduction by utilizing the diverse functions of the natural environment in response to water-related disasters that are becoming more frequent and severe due to climate change. However, since the effects of these efforts vary from one small watershed to another, it is important to accurately identify the functions. On the other hand, smaller municipalities are said to have greater potential for natural energy, and rural areas in particular are said to have many natural energy resources such as wind, solar, biomass, and geothermal heat, etc. It is necessary to consider management of watershed resources in combination with effective use of resources and local revitalization.

Therefore, this study aimed to quantitatively evaluate disaster risk, natural functions, and climate change mitigation measures (Renewable energy) of watersheds considering climate change at the regional level, analyze the relationship between them, develop an evaluation method, and propose watershed management. The study area is the Dangosawa watershed in Mishima Town, Fukushima Prefecture. The paper consists of seven chapters: Chapter 1, Introduction, clarifies the purpose and significance of the paper and presents the research objectives and structure; Chapter 2,

Hydro-model selection and validation; Chapter 3, Assessment of the impact of winter by climate change on snowfall and snowmelt; Chapter 4, Assessment of forest water storage function and disaster risk under climate change; Chapter 5, Assessment of renewable energy (small hydropower) in under climate change; Chapter 6, proposes a quantitative evaluation method for watershed resources at the regional level, and Chapter 7 summarizes the study. The results of the research are described below.

In Chapter 2, we compared and selected a simulation model from the viewpoint of versatility, assuming that the local government would use the model. In Chapter 3, we evaluated the impact of climate change on snowfall and snowmelt and confirmed that snowfall and snowmelt will decrease significantly by 2090 under all SSP scenarios. In Chapter 5, we examined the effects of climate change on the water storage function of forests and found that the maximum daily flow rate does not change even when the forest area is reduced to 95%. In Chapter 5, we evaluated the potential of small hydropower generation considering the effects of climate change, simulating different climate change scenarios. We found that the future power generation potential increases by about 28%, depending on the scenario. In Chapter 6, we assume the climate change scenario (SSP) and the scenario of watershed resource use assumed in the target area, organize the relationships under climate change, and discuss disaster risks, natural functions, and renewable energy. By analyzing the evaluation and relationship of the three elements were as comprehensively evaluated in each climate change scenario and basin resource use scenario. A few studies have analyzed the relationship between each component from a comprehensive perspective regarding watershed resources at the local level. Using the proposed evaluation method, the interrelationships of each component can be quantitatively understood, and climate change This study clarified for the first time the importance of comprehensive evaluation that considers the factors involved and the ideal form of the assessment.

謝辞

本論文は、様々な方からご支援頂き、まとめることができました。ご協力頂きました皆様には、ここに心から感謝の意を表します。

まず、指導教員である東京農業大学、水利施設工学研究室の岡澤宏教授は、私が社会人ドクターとして、うまく時間が取れない状況を理解して下さい、土日であっても時間を作り、研究の相談に乗って頂き、ご指導ご鞭撻下さりました。深く感謝申し上げます。また、同研究室のマスク助教授および環境情報研究室のマイ研究員には、現地調査のご協力を頂き、特に土壌分析において知見を貸して頂きました。副査の東北工業大学、大場真教授には、学部・修士時代からご指導頂き、博士課程に進学してからは国立環境研究所福島支部室長として、その後、東北工業大学に移られてからも、遠方にもかかわらず、指導の時間を作して下さいました。この場を借りて御礼申し上げます。

国立環境研究所福島地域協働研究拠点の林誠二研究グループ長、地域環境創生研究室及び地域協働推進室中村省吾主任研究員、には「令和3年度中山間地域における持続可能な小水力発電ポテンシャル評価のためのモデル開発委託業務」において、大変お世話になり、本研究に係る気象・流量データ収集や論文執筆において多大なるご支援を頂きました。謹んで感謝いたします。

主査の鈴木伸治教授、副査の渡邊文雄教授には、ご多忙の中、懇切丁寧に多くの指導、ご助言を賜りました。また、環境情報学研究室、島田沢彦教授、関山絢子教授、地域資源工学研究室、三原真智人教授、農村環境工学研究室、トウ ナロン教授から大学発表の折々で、ご指導頂きました。また、水利施設工学研究室の皆様には、博士課程の学生として十分なサポートが出来ませんでした。研究室生活のサポートを頂きました。ここに深く感謝いたします。

NTC インターナショナル（株）の小林維円様には、社会人ドクターの

先輩として、仕事と研究の両立や論文作成についてアドバイス頂きました。現在の勤務先であるササカワ・アフリカ財団の皆様には、社会人ドクターへのご理解と応援を頂きましたこと、感謝申し上げます。

最後に子育てが大変なタイミングにもかかわらず、仕事と大学で多忙な私を3年間応援してくれた妻、家族には感謝の想いで一杯です。

なお、本論文は東京農業大学の農生命科学研究大学院博士後期課程研究支援制度により2021年度、2022年度と研究費のご支援を頂きました。この場を借りて御礼申し上げます。

2024年 菊池 翔太郎