

Environment Research and Technology Development Fund

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

2-2005 気候政策とSDGsの同時達成における水環境の
シナジーとトレードオフ
(JPMEERF20202005)

令和2年度～令和4年度

Synergies and Trade-offs among Climate Policies and Sustainable
Development Goals in terms of Water Sector

〈研究代表機関〉
芝浦工業大学

〈研究分担機関〉
東京大学
国立環境研究所
農業・食品産業技術総合研究機構

〈研究協力機関〉
該当なし

○図表番号の付番方法について

「Ⅰ. 成果の概要」の図表番号は「0. 通し番号」としております。なお、「Ⅱ. 成果の詳細」にて使用した図表を転用する場合には、転用元と同じ番号を付番しております。

「Ⅱ. 成果の詳細」の図表番号は「サブテーマ番号. 通し番号」としております。なお、異なるサブテーマから図表を転用する場合は、転用元と同じ図表番号としております。

令和5年5月

目次

I. 成果の概要	1
1. はじめに（研究背景等）	
2. 研究開発目的	
3. 研究目標	
4. 研究開発内容	
5. 研究成果	
5-1. 成果の概要	
5-2. 環境政策等への貢献	
5-3. 研究目標の達成状況	
6. 研究成果の発表状況	
6-1. 査読付き論文	
6-2. 知的財産権	
6-3. その他発表件数	
7. 国際共同研究等の状況	
8. 研究者略歴	
II. 成果の詳細	
II-1 気候政策とSDGsの同時達成における水災害のシナジーとトレードオフおよび統合解析・・・	19
(学校法人芝浦工業大学)	
要旨	
1. 研究開発目的	
2. 研究目標	
3. 研究開発内容	
4. 結果及び考察	
5. 研究目標の達成状況	
6. 引用文献	
II-2 気候政策とSDGsの同時達成における水熱質循環のシナジーとトレードオフ・・・	30
(国立大学法人東京大学)	
要旨	
1. 研究開発目的	
2. 研究目標	
3. 研究開発内容	
4. 結果及び考察	
5. 研究目標の達成状況	
6. 引用文献	
II-3 気候政策とSDGsの同時達成における水資源のシナジーとトレードオフ・・・	40
(国立研究開発法人国立環境研究所)	
要旨	

1. 研究開発目的
2. 研究目標
3. 研究開発内容
4. 結果及び考察
5. 研究目標の達成状況
6. 引用文献

II-4 気候政策とSDGsの同時達成における食糧生産のシナジーとトレードオフ 50
 (国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構)

要旨

7. 研究開発目的
8. 研究目標
9. 研究開発内容
10. 結果及び考察
11. 研究目標の達成状況
12. 引用文献

III. 研究成果の発表状況の詳細 62

IV. 英文Abstract 69

I. 成果の概要

課題名 2-2005 気候政策とSDGsの同時達成における水環境のシナジーとトレードオフ

課題代表者名 平林 由希子 (学校法人芝浦工業大学大学院理工学研究科教授)

重点課題 主：【重点課題⑧】気候変動への適応に係る研究・技術開発

副：【重点課題⑨】地球温暖化現象の解明・予測・対策評価

行政要請研究テーマ (行政ニーズ) 非該当

研究実施期間 令和2年度～令和4年度

研究経費

111,987千円 (合計額)

(各年度の内訳：令和2年度：39,995千円、令和3年度：35,996千円、令和4年度：35,996千円)

研究体制

(サブテーマ1) 気候政策とSDGsの同時達成における水災害のシナジーとトレードオフおよび統合解析 (芝浦工業大学)

(サブテーマ2) 気候政策とSDGsの同時達成における水熱質循環のシナジーとトレードオフ (東京大学)

(サブテーマ3) 気候政策とSDGsの同時達成における水資源のシナジーとトレードオフ (国立環境研究所)

(サブテーマ4) 気候政策とSDGsの同時達成における食糧生産のシナジーとトレードオフ (農業・食品産業技術総合研究機構)

研究協力機関はない。

本研究のキーワード 緩和策、適応策、水資源、水災害、SDGs

1. はじめに (研究背景等)

気候安定化や持続可能な開発に向けた目標が、それぞれパリ協定、持続可能な開発のための2030アジェンダとしてどちらも2015年に国際合意された。これに対して、我が国では、気候変動適応計画および地域気候変動適応計画が策定され、今後見込まれる気候変動影響に対応するための気候変動適応策が推進されている。また、2020年12月には菅内閣により2050年カーボンニュートラルが2020年12月に宣言され、より野心的な緩和策の具体的な対策が進められることとなった。このような気候安定化に向けた緩和策と適応策の実施には、持続可能な開発目標(SDGs)達成に向けた取り組みとの間には大きなシナジーが期待されているが、トレードオフも懸念されている。しかしながら、これに関する最初の包括的な分析は2018年に発行されたIPCC1.5度特別報告書の第5章で実施されたが、概念的な検討にとどまっていた。また、2019年に発行されたIPCC土地関係特別報告書では強力な緩和策としてバイオ燃料の大量生産について同種の検討がされたが、やはり定性的かつマクロな検討に留まっていた。したがって、定量的かつ地域詳細なシナジーとトレードオフの検討が必要である。

また、気候安定化目標とSDGsの検討において、死活的に重要な水環境が軽視されてきたという問題がある。気候政策の検討には、AIMのような統合評価モデルと呼ばれるエネルギー経済モデルが中心として用いられてきた。この結果、エネルギーと経済の観点からは高い整合性が認められるものの、市場取引のない水

資源については無尽蔵にあると仮定されたり、定常性が仮定されて旱魃や洪水の考慮が不足していた。同様に、SDGsも水の量的・質的制約や水環境の負荷が熟慮されたうえで設定されていない。

環境研究総合推進費S-14（気候変動の緩和策と適応策の統合的戦略研究）では、気候変動の緩和と適応の影響評価に関して、世界でも先進的な全球モデルが開発が進められてきた。2030年を前に、気候行動と持続可能な開発、特に水目標にかかわるシナジーとトレードオフが焦点となるのは間違いなく、これらのモデルを活用してCMIP6や低排出経路などの新しいシナリオも検討し、水についての定量的なSDGs達成度評価を示すことには喫緊の行政ニーズがある。

2. 研究開発目的

上述の背景を踏まえ、本課題は、水災害、水熱質循環、水資源、食糧生産に着目し、世界的にも高い評価を得る全球水環境モデル群を活用することで、実施の際の水の量的・質的制約や洪水・旱魃などの災害発生の可能性を考慮しつつ、気候目標とSDGsのシナジーとトレードオフを定量的かつ地域詳細に整理し、同時達成の可能性を評価することを目的とする。また、同時達成が難しい課題や地域を特定・抽出し、解決策の検討を行う。

3. 研究目標

全体目標	本課題の目標は、水環境に着目し、気候目標とSDGsを同時に達成する際に生じうるシナジーとトレードオフを明らかにし、想定される緩和策や適応策のもとで水に関連する6つのSDGsの達成可能性を地域的に評価することである。各サブテーマでは、水に関連するSDGsの達成評価に必要なシミュレーションを全球数十kmの解像度で実施し、その結果を国ごとまたは地域ごとに集計することで、気候目標とSDGsとのシナジーとトレードオフを地域ごとに分析する。また、気候政策として緩和策を反映した気候シナリオごと、適応策の有無ごとに気候目標とSDGsの同時達成の可能性を地域別に評価する。最終的にはサブテーマ1において、気候目標やSDGsに掲げられた目標が、水環境の観点から実現可能なのか、どの地域に水環境への負荷が高く、シナジーやトレードオフが存在するか、そして同時達成が難しい課題や地域がどこにあるのかをケーススタディも含めて分析し、考えられる解決策オプションを提示する。
サブテーマ1	気候政策とSDGsの同時達成における水災害のシナジーとトレードオフおよび統合解析
サブテーマリーダー/ 所属機関	平林由希子／芝浦工業大学
目標	本サブテーマでは以下の2つを目標とする。 1) 河川氾濫モデルCaMa-Floodを用いて河川洪水の将来変化推計を行い、サブテーマ3およびサブテーマ4に知見を提供する。また、水災害について、貧困(SDG1)や防災(SDG11.5)についてのシナジーとトレードオフを検討し、地域ごとのSDGsの達成可能性を評価する。 2) 水に関連する6つのSDGsの達成可能性を統合的に分析し、課題をとりまとめ、考えられる解決策オプションを提示する。
サブテーマ2	気候政策とSDGsの同時達成における水熱質循環のシナジーとトレードオフ

サブテーマリーダー/ 所属機関	沖大幹／東京大学
目標	<p>本サブテーマでは、以下の4つを目標とする。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 全球水温モデルHEAT-LINKを湖沼と結合した水熱動態モデルを開発し、温暖化に伴う水温変化を推計する。 2) 水温予測および全球窒素循環モデルTNCMから食糧に関するSDG2の達成可能性の評価を行う。 3) サブテーマ3と連携し、質と量の双方から生活用水の評価を行い、安全な水供給(SDG6)の達成評価を行う。 4) 水温や水質に関する気候政策とSDGのシナジーとトレードオフの解析を行い、シナジーを多くしトレードオフを可能な限り小さくするような方策の検討を行う。

サブテーマ3	気候政策とSDGsの同時達成における水資源のシナジーとトレードオフ
サブテーマリーダー/ 所属機関	花崎直太／国立環境研究所
目標	<p>本サブテーマでは以下の3つを目標とする。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 全球水資源モデルH08を用いることにより、低炭素シナリオとSDGs目標のうち、水力発電とバイオ燃料生産に着目したクリーンなエネルギー（SDG7）、および安全な水へのアクセスについて（SDG6）の水資源面でのシナジーやトレードオフを詳細に検討する。 2) 2度（1.5度）目標の達成にあたり、世界全体の水力発電の大幅な増加や、バイオ燃料の増産が前提になっている研究が散見される。前者に関しては、非現実的な水力発電の開発が前提となっていないかという軸から検討を行う。後者については、バイオ燃料増産により水循環の変化や灌漑需要の増加につながることはないかという軸などから詳細な検討を行う。 3) SDGsが高度に達成できたとしても世界の水需要は急には減らせない。特定の地域や期間に表流水や地下水の過剰取水をもたらす水利用に主に注目し、水資源制約に関する指標や地図を提示する。

サブテーマ4	気候政策とSDGsの同時達成における食糧生産のシナジーとトレードオフ
サブテーマリーダー/ 所属機関	飯泉仁之直／農業・食品産業技術総合研究機構
目標	<p>本サブテーマでは以下の3つを目標とする。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 播種前後および生育期間中の極端気象や水資源変動により播種・収穫面積が減少する効果をデータ解析により明らかにし、簡易モデルを提案する。 2) 全球作物モデル（Sultan et al. 2019）による全球の作物収量シミュレーションと上記の簡易モデルによる収穫面積影響、灌漑シナリオ（サブテーマ3）、土地利用変化シナリオ（サブテーマ1）を組み合わせる解析し、食糧生産の将来予測を行う。 3) それにより、気候緩和を推進するうえで食糧生産(SDG2)にトレードオフが生じる地域を特定し、統合解析（サブテーマ1）に資する知見を提供する。

4. 研究開発内容

【サブテーマ1】気候政策とSDGsの同時達成における水災害のシナジーとトレードオフおよび統合解析

CMIP6 実験を入力とした 2100 年までの全球河川氾濫シミュレーションを実施し、貧困 (SDG1) と防災 (SDG11.5) に共通の SDGs 指標の 1 つである、洪水暴露人口 (洪水時の浸水域に住む影響人口) を算定した。洪水暴露人口は、過去の再解析シミュレーションで出力される 15 分解像度 (約 25km) の年最大日流量の再起確率から 30 秒 (約 1km) の洪水氾濫面積が得られるルックアップテーブルを作成し、そこに温暖化実験のモデルで得られる毎年の年最大日流量の再起確率に対応した氾濫面積を 30 秒の人口データ (GPW v4.1.0) と重ねることで算定した。気候政策のうち、緩和策が洪水関連の SDG 指標に与える影響は、ssp585 と ssp126 という 2 つの気候シナリオの違いによる洪水暴露人口の違い、適応策は堤防等のハードインフラを想定した将来の河川防護レベルの向上のシナリオと、現在の防護レベルを用いた場合の洪水暴露人口の違いとして評価を行った。

洪水に関する SDG 指標に加えて、他サブテーマから得られるモデル実験から、水質、水資源、小規模農家の生産性に関する指標を分析し、指標の悪化ないしは改善に影響を受けた人数 (洪水、水質、水資源) または GDP に対する金額比 (小規模農家の生産性) を用いて、気候政策と水に関する SDG の全体的な評価を行った。水質に関しては、サブテーマ 2 から得られた河川水の窒素濃度から良好な水域に関する水質指標を定義し、その指標を超えている水域の人口を算定して SDG6.3.2 への影響を評価した。気候シナリオのうち、緩和策は ssp285 と ssp245 の違いとして算定した。適応策に関しては、将来の社会経済発展に伴う GDP の関数として算定した施肥量と、技術革新による収量増を想定して将来の施肥量を半分に減じたシナリオを比較したが、水質への影響はほとんどなかったため、評価を行わなかった。同様に、土壌に炭素を貯留することで収量を上げる緩和策の水質への影響もごくわずかであり、対象とはしなかった。水資源に関しては、高い水ストレス下にある人口 (水ストレス人口) の比較で評価を行った。緩和策の違いは、温暖化レベルの違いによる水ストレス人口の違いに加えて、灌漑をすることでバイオ燃料を増産した場合の水ストレス人口の違いについても評価に取り入れた。また、適応策に関しては、将来の水利用効率等が反映された社会経済シナリオの違いを見るため、ssp585 と ssp285 における水ストレス人口の違いとして評価を行った。小規模農家の生産性は、途上国を中心とした対象国において、緩和策の効果は温暖化シナリオの違いである ssp585 と ssp126 の違いで評価を行い、適応策の効果は、農業生産における適応策 (収量を上げるための様々な対応策) の有無で評価を行った。

気候政策と SDG 指標のシナジーまたはトレードオフの大小は、気候シナリオの違い、すなわち緩和策の違いのうち、SDG 指標に正または負の影響を与える国のうち、分析の対象とした国の割合が、正 (負) のトップ 10% を高いシナジー (トレードオフ)、トップ 30% までを中間のシナジー (トレードオフ) として評価を行った。ここで国の数でシナジーの大小を定義した理由は、影響範囲や単位等が異なる指標の変化傾向について、国間の比較を行うためである。最後に、国ごとの結果を地域ごとに集計し、統合的な評価を行った。

【サブテーマ2】気候政策とSDGsの同時達成における水熱質循環のシナジーとトレードオフ

全球水温モデル HEAT-LINK に湖沼を結合するため、河川-湖沼ネットワークの情報が必要となる。また湖沼内の過程の簡略化が課題で、河川と湖沼では温度成層によって卓越する過程が異なるため、物質水文輸送の定量評価に必要な河川と湖沼を区別して表現する必要がある。使用した河道や湖沼分布データは、それぞれ空間分解能が 3 秒 (約 90m) とシェイプデータと異なっており、故障分布データは河道データと同じ空間分解能にラスタデータへ変換した。また、上述した 2 つのデータセットを結合する際、湖沼の大きさがアップスケール (3 秒から 15 分) したグリッドより大きい小さいかで、結合手法を準備する必要があり、小さければサブグリッドとして扱い、大きければ湖沼の流出口を単位集水域の流出口に固定することで対応した。湖沼モデルの開発は、水動態モデルと熱動態モデルに分けられ、水動態モデルでは、流出量の季節変動と水の流出入に伴う質量の保存を必要条件とし、熱動態モデルでは、鉛直 1 次元の拡散法定期を用い、各湖沼は水平分割せず大気境界条件は平均とした。湖沼表層温度 (skin temperature) は移流に伴う温度変化の考慮が困難であったので、第 1 層温度で代用し、水面の熱フラックスを河川水温モデルと同じように計算

した。渦拡散係数は、Henderson-Sellers (1985) によるパラメタリゼーションを実施した。河川モデルとの結合では、移流スキームは河川モデルは水平 1 次元、鉛直 0 次元、湖沼モデルは水平 0 次元、鉛直 1 次元であるため、河川から湖沼へは湖沼の表層に追加して水量が変化するたびに上から層構造を再計算し、湖沼から河川へは流出口に接している層の平均を河川に流入させる。また全球気候モデルを用いて、現在気候は 1960～1990 年、将来気候 (SSP126 と SSP585) は 2071～2100 年において河川水温を推計した。最終的に水質スキームは、Huang et al. (2021) に基づいて実装され、閾値は日本の閉鎖水域での基準である 0.2mg/L を用いた。

【サブテーマ 3】 気候政策と SDGs の同時達成における水資源のシナジーとトレードオフ

研究期間前半では、主に世界の二酸化炭素回収貯留付きバイオ燃料生産 (Bio Energy with Carbon Capture and Storage; BECCS) ポテンシャルに対する水資源の制約に焦点を絞って研究を進めた。まず、主な人間活動を含めて地球規模の水循環の時空間表現が可能な全球水資源モデル H08 を使って、バイオ燃料作物の成長と収穫、ならびに灌漑用水の需要と取水を詳しくシミュレーションできるように拡張した。次に、バイオ燃料作物農地についての土地利用シナリオを 2 つ開発した。陸域を 0.5° の格子に分割し、世界自然保護区データベース (The World Database on Protected Areas; WDPA) に掲載された自然保護区、生物多様性に重要な劣化土壌地域、または湿地が含まれる場合、格子全体をバイオ燃料農地への転換の不適地とし、さらに各格子内の耕作地、牧草地、森林、および市街地を除外した残りの土地をバイオ燃料作物農地への転換の候補地とした (牧草地保護 (Pasture Protected; PP) シナリオと呼ぶ)。ここで、牧草地も転換の候補地とする牧草地転換 (Pasture Conversion; PC) シナリオも用意した。最後に、気候と社会経済の変化を考慮して H08 のシミュレーションを行い、2080～2099 年の 2 種類のバイオ燃料作物について、世界の BECCS ポテンシャルと追加的に必要となるバイオ燃料用の灌漑用水の取水量を推定した。ここでは 3 つの水管理シナリオ (灌漑なし、完全灌漑、持続可能な灌漑) を実施した。天水シナリオ (RF) の場合、格子内のバイオ燃料作物はすべて天水農地とした。完全灌漑シナリオ (FI) の場合はすべて灌漑農地とした。持続可能な灌漑 (Sustainable Irrigation; SI) シナリオの場合、バイオ燃料作物の灌漑に利用可能な水量を、参照流量 (REF) と水使用率 (WUF) の積として推定した。

研究期間後半では、主に表流水や地下水の過剰取水をもたらす水利用の主因となる食料生産用の灌漑に焦点を絞って研究を進めた。まず H08 を改良するとともに、国別のパラメータ較正を行うことにより、トウモロコシ、コムギ、コメ、ダイズの 4 作物を世界各国で妥当に推計できるようにした。この改良されたモデルを使うことにより、各国の食料生産がどれだけ灌漑に依存しているのかを推定した。

【サブテーマ 4】 気候政策と SDGs の同時達成における食糧生産のシナジーとトレードオフ

コメ多期作が行われているアジア地域の 6 か国 (インドネシア、マレーシア、タイ、バングラデシュ、ミャンマー、フィリピン) について農業統計データを収集し、コメ収穫面積の年々変動を気象条件の平均指標と極端指標から説明する弾性ネット回帰モデルを構築し、交差検証法によりモデルの予測性能を評価した。収量の年々変動についても面積の場合と同様にモデルを構築・検証した。開発した面積と収量の気候応答モデルに気候変動シナリオ (CMIP5) を入力し、面積と収量の気候応答を考慮したアジアのコメ生産量の将来見通しを作成した。洪水の作物生産影響については、河川洪水の氾濫原分布データをサブテーマ 1 から得て、作物収量と農地分布の 0.5° 解像度全球グリッドデータと組み合わせ、現在気候下の洪水による世界の作物生産被害額を推計した。

全球作物モデル CYGMA の出力などから SDG2 の指標である小規模農家の生産額を推計する手法を開発した。気候変動 (CMIP6) と社会経済発展 (SSP) の将来シナリオを考慮した作物モデルによるシミュレーションを行い、気候緩和や適応策 (播種日変更、品種切替)、灌漑面積の拡大が将来の小規模農家の生産額に与える影響を所得水準別、水資源の状況別に評価した。水資源の状況については World Resources Institute の区分に従い、水欠乏地域とそれ以外の地域とに分けて解析した。

作物収量、土壌、気候、栽培管理についての 0.5° 解像度全球グリッドデータを機械学習のランダムフォレストにより解析し、土壌有機炭素と窒素肥料投入量に対するそれぞれの収量応答を作物別に定量化した。

定量化した関係を用い、農地管理による土壌炭素量の増加とそれに伴って期待できる気候緩和効果、作物増収効果、無機窒素肥料の節減効果をそれぞれ定量化した。

5. 研究成果

5-1. 成果の概要

【サブテーマ1】気候政策とSDGsの同時達成における水災害のシナジーとトレードオフおよび統合解析 将来洪水予測.

最新のCMIP6による将来の洪水予測は、それまでの既往の実験と傾向は大まかに一致しており、洪水は南アジア、東南アジア、ユーラシア北東部、西アフリカおよびアフリカ低緯度地域、南アメリカで増加し、北ヨーロッパおよび東ヨーロッパ、アナトリア、中央アジア、北米中部、南アメリカの南部では減少する予測であった（Hirabayashi et al., 2021）（図-1.1）。人口分布を2015年に固定した場合で気候変動の影響のみによる洪水暴露人口は、産業革命前と比べて3度上昇すると1.4倍（世界人口の2.2-3.2%に相当）となり、特にアフリカ（1.7倍）、アジア（1.5倍）では増加幅が大きかった。

水災害に関するシナジーとトレードオフ.

洪水被害（SDG1.5およびSDG11.5に関連）に対する緩和策の影響は、エリトリアやエチオピアといったアフリカの国や、イエメン、アラブ首長国連邦といった中東の国で高いシナジーとなり、チリやコスタリカといった中南米の一部の国ではトレードオフとなった。IPCC第6次評価報告書によれば、温暖化の進行度が高いほど、地中海やカリブ海の周辺で年平均降水量が減少する。降水量が減るということは、それに伴い洪水も減ると考えられるため、地球温暖化の防止を図る緩和策の効果と洪水被害がトレードオフの関係になっている。このことが地中海やカリブ海周辺で、緩和策が洪水に関するSDG指標に対してトレードオフとなった要因である。

低所得国における洪水への脆弱性の評価によると、アジアやアフリカにおける低所得国では、温暖化が進むことで洪水の強度や頻度が増加するため、水災害に関連したSDG1.5指標の達成が困難になることが判明した。このような河川の防護レベルが低い低所得国では、緩和策による洪水被害の低減の効果が大きく、緩和策を進めた低排出シナリオでは、高排出シナリオに比べて2100年までの指標の悪化を最大50%減らすことができ、SDG達成に緩和策が大きいシナジーを持つ。

また、各国が自国で洪水防護に必要とする総費用と便益（洪水防護により軽減する被害額）の差が最小となるまで適応する場合（標準適応）は、適応をしない場合よりも指標の悪化を19%減らすことができる。さらに、他国からの適応策への援助も想定して、低所得国においても適応の効果があるところまでは洪水防護を進める場合（最大適応）を検討したところ、温暖化による指標の悪化はすべて適応することができ、現在よりも洪水に対する脆弱性が低くなることも判明した。このことから、特に低所得国では、費用対効果に関わらず適応策を講じることは有効であり、温暖化による洪水増加が予想される低所得国への適切な適応策への資金支援が有効であることが明らかになった。

水に関するSDG指標の統合評価.

本研究課題が対象とする水に関するSDG指標は、水災害、水熱質循環、水資源、食糧生産に関する6つのSDG指標である。231あるSDG目標のサブ指標のうち、水に関係する目標は、目標6（サブは指標9つ）を中心に、全部で33が存在する。そのうち、過去のSDGサブ指標の数値について定量的かつある程度の国数のデータが得られた31のサブ指標に対して、指標間の相関を調べたところ、多くの指標は、人口または国のGDPの変化との相関が高く、また指標間の相関も高いことが判明した。本研究で定量的に分析する6つのSDGサブ指標とは、直接（9つ）および間接（4つ）の相関が高いサブ指標が合計15であったことから、本研究課題では水に関するSDG指標の約半分の変化傾向を分析していると言える。

サブテーマで算定された水に関するSDG指標と、緩和策および適応策に対するシナジーおよびトレードオフの分析した結果、グローバルには、緩和策も適応策もシナジーがトレードオフを大幅に上回ることから、

水に関するSDG指標は、気候政策によるシナジーが大きいことが判明した。特にシナジーが大きいのは、現在でも水に関するSDG指標が低い傾向にあり、かつ気候変動による悪化が予想されるアジアとアフリカであり、緩和策と適応策では同程度のシナジーが確認できた。

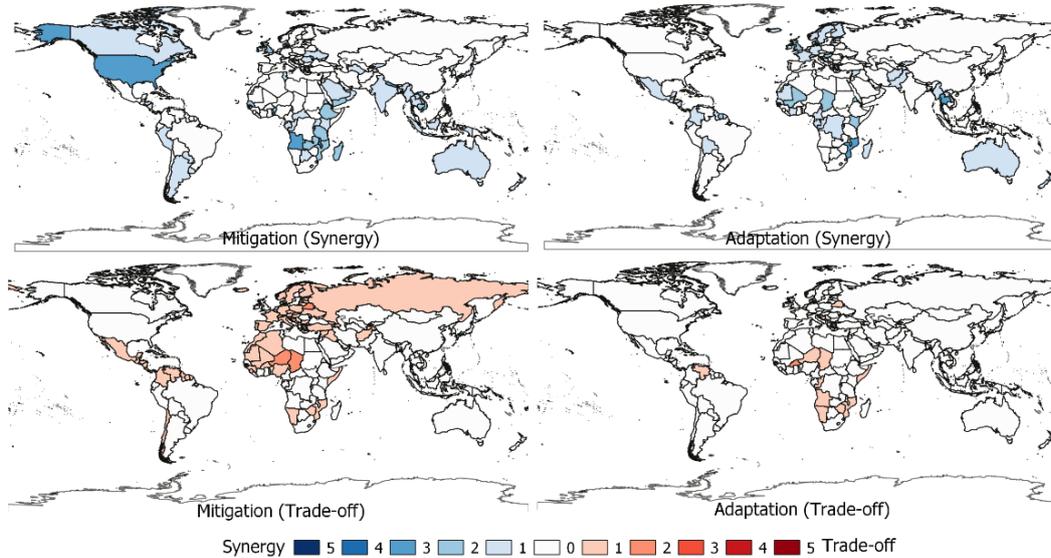


図-1.5 緩和策（左）および適応策（右）に対する水に関するSDG指標のシナジー（上）とトレードオフ（下）の国ごとの合計。分析した5つのSDGサブ指標の合計を示す。合計に使用した水に関するSDG指標は、河川洪水、水質、水ストレス（需要と供給の比）、水ストレス（バイオ燃料の増産のための灌漑に伴う変化）、小規模農家の生産性の5つ。

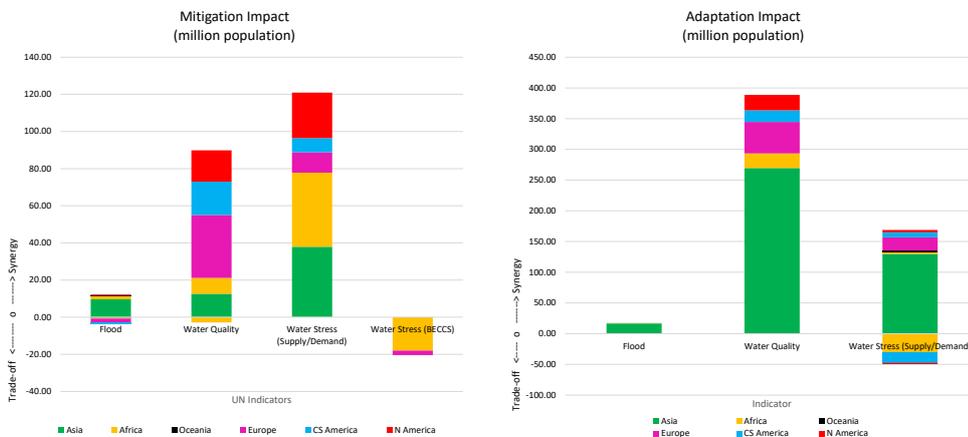


図-1.6 緩和策（左）および適応策（右）に対する水に関するSDG指標のシナジー（棒グラフの正）とトレードオフ（負）の影響人口（100万人）。小規模農家の生産性を除く4つのSDGサブ指標における変化が見られたグリッドの人口を足したもの。

気候政策と水に関するSDG指標とのシナジーは、アフリカと東南アジアで多くみられると共に、オーストラリアやアメリカ合衆国、中南米、カナダなどで確認できた。一方、トレードオフに関してはアジアでは見られず、主にアフリカ、中南米に見られた。この理由は、緩和策に関するトレードオフは、水資源では降水量の増加、洪水では降水量の減少などといった気候変動に対する降水量の増減傾向が反映していることや、アジアは水資源がそもそも豊富であり、バイオ燃料の増産に伴う灌漑水利用の増加が現地の水資源への影響がさほどないことなどが影響していると思われる。適応策に関しては、現在からの洪水に対する防護レベルの増加が大きく見込める地域や社会経済の発展に伴う水利用効率の改善が期待される発展途上国でシナジーが大きいことが判明した。

【サブテーマ2】気候政策とSDGsの同時達成における水熱質循環のシナジーとトレードオフ

河川湖沼結合モデル. 河川・湖沼を明示した河道網の開発では、図-2.1のように湖沼を入れることによる効果は大きく、流域界も空間解像度を上げてもしっかり示され、効率的な計算を可能とした。実際の湖沼の大きさとの比較の結果（図は省略）も十分な精度を示した。続いて、湖沼モデルの開発については、水動態モデルは、流出量の季節変動の表現と水の流出入に伴う質量保存を必要条件として構築し、一方熱動態モデルは、各湖沼を水平分割せず大気境界条件は平均とし、鉛直1次元の拡散方程式を用いた。水面温度はいわゆる skin temperature ではなく、第1層温度で代用した。skin temperature は、移流に伴う温度変化を考慮することが難しいため、省略した。水面の熱フラックスは、すでに開発されている河川水温モデル (Tokuda et al., 2019) と同様に取り扱った。渦拡散係数は、Henderson-Sellers (1985) によるパラメタリゼーションを用い、成層条件下の拡散係数をリチャードソン数で補正し、密度拡散と風応力による乱流拡散の影響を考慮した。ここで開発された湖沼モデルと河川モデルを結合した。移流スキームは、質量及び熱量の保存と湖沼内の層構造の表現を図るため、1)河川モデルは水平1次元、鉛直0次元、湖沼モデルは水平0次元、鉛直1次元の構造とし、2)河川は湖沼の表層に追加する形をとり、湖沼の水量が変化するたびに上層から層構造を再計算し、3)湖沼からは、流出口（堰の上）に接している層の平均を河川へ流した。モデル構造の特徴は、湖沼モデルの改良・交換と両モデル間の矛盾を回避するため、水路網、外力データ、物理家庭、時間管理のみを共有し、移流の計算はそれぞれで実施した。例えば、河川グリッドと湖沼グリッドではそれぞれ流出量を計算した。その結果、流入量を河川と湖沼を合わせたグリッドで計算し、その流入量をカプラーを通じて交換、そして同じタイムステップで計算することで、質量と熱量の保存をすることができた。

こうして開発された河川湖沼結合モデルの結果は、観測データを用いて全球で検証した。河川流量および河川水温の観測データは、Global Runoff Data Center (GRDC) と Global Environmental Monitoring System (GEMS) から収集した。観測データを用いたモデルの全球検証の結果を図-2.3に示す。最初に、河川湖沼結合モデルと、非結合モデル（河川のみ）を、146地点の河川流量観測データと比較し、河川モデルと湖沼モデルを結合した時としない時とを比較した。湖沼の貯水効果の過大評価と環境用水の過小評価が改善されたことがわかる。次に、124の湖沼において、G-REALM (Birkett et al., 2018) の100km²より大きい湖沼における水面標高を人工衛星で測定したデータと比較した（図-2.4）。その結果、河川流出量を考慮することによってバイアスが改善されていた。

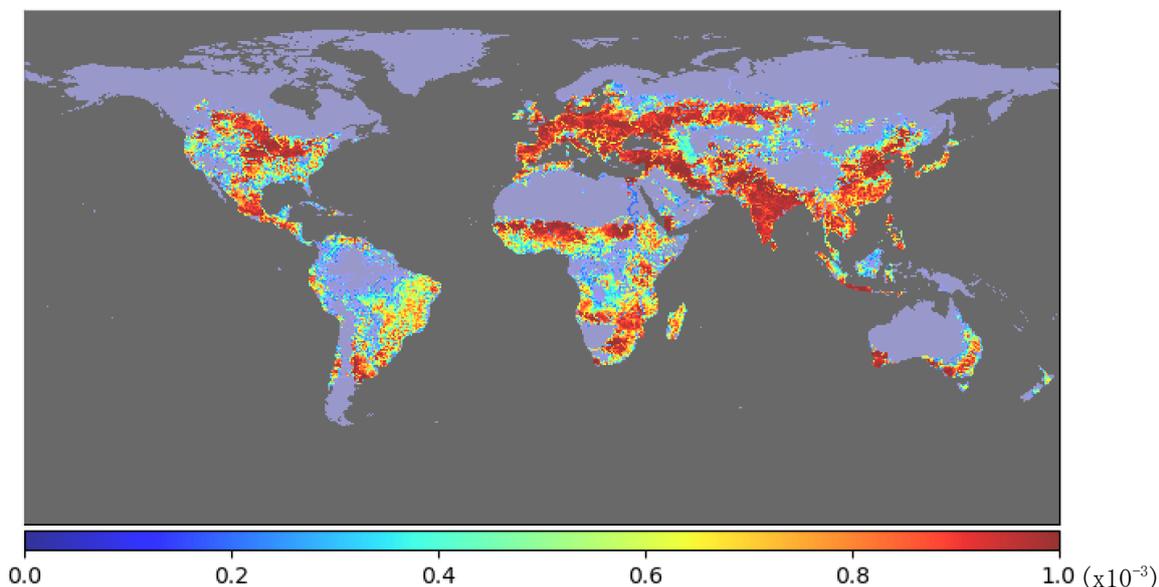
温暖化時の河川水温. 上記で開発された河川湖沼モデルを用いて、温暖化時の河川水温の計算を実施した。全球気候モデル MIROC6 (Tanabe et al., 2018) を用いて、温暖化実験 (SSP126、SSP585) を実施した。計算期間は、現在気候は1960~1990年、将来気候は2071~2100年である。図-2.5は、現在気候の河川流量、河川水温、河川熱量指標（流量×河川水温×水の比熱容量×水の密度）と将来気候下での変化を示したものである。全球平均で見ると河川水温はSSP126では2050年ころから昇温しないが、SSP585では2100年まで昇温し続けることが示された。変化のパターンはあまり変わらないが、その差は特に河川水温が大きく変わっていることがわかる。特に北米南部、地中海から中央アジアにかけてその差が顕著である。

主要な29の河川において、分布をみてみると、SSP585では昇温量に幅があるがいずれも順調に上昇するが、SSP126では、全球平均同様2050年ころからほぼ一定になるが一部の河川（コンゴ川やザンベジ川など）では、2050年以降下降するなどの地域性があることが分かった（図-2.6）。さらに季節変化（図-2.7）からは、寒冷域のスレーブ川、レナ川、オビ川、アムール川は夏季に過大評価が見られる。また、メコン川は3~5月、ガンジス川は5~6月に過大評価で、ちょうど雨季の前である暑季にあたるため河川流量の大きな変化のある時期であることが要因と考えられる。今後、改良に向けた検証が求められる。

開発された全球窒素循環モデルに、サブテーマ4から提供された過去及び将来 (SSP126、SSP585) の0.5°グリッドごとの窒素投入量 (tN/年) を入力値として用いた。なお、MIROC6のデータが1°グリッドのため窒素投入量をアップスケールする必要がある。海陸マスクの不一致を解消するため、MIROC6の海に割り当てられた場合、隣接する8グリッドのうちの陸グリッドに平等に分配する処理を実施することで解消した。また、面積が異なる点については、まず面積単位、秒単位に変換 (tN/m²/s) し、流出量で除する (tN/kg) ことで対応した。全球での評価の際、世界各国の規制値を用いるのは、評価する項目や基準が異なることから、日本の閉鎖水域での窒素濃度の規制値を参考に、0.02 mg/Lを用いた。全球の1961~2014年平均の結果を図-2.8

に示す。さらに将来については、SSP126 と SSP585 での計算を行った（図-2.9）。この結果は、サブテーマ1に提供され、統合解析が行われ、詳細な結果はここでは省くが、緩和策の効果は、アフリカや西アジアといった半乾燥地域～砂漠域で低いトレードオフとなる以外は、シナジーであることが分かった。この結果は、気候政策である緩和策が多くの地域でSDG6.3.2の達成にも資することを示している。

(a)



(b)

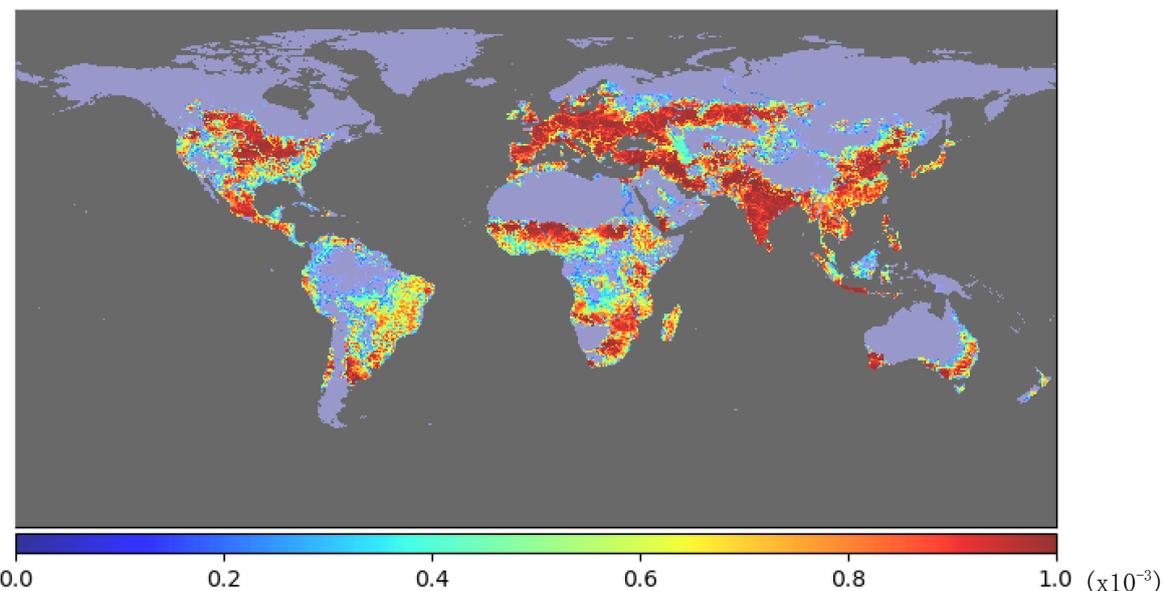


図-2.9 2015～2075年平均の河川窒素濃度 (mg/L)。(a)SSP126、(b)SSP585。

【サブテーマ3】気候政策とSDGsの同時達成における水資源のシナジーとトレードオフ

全球のBECCSポテンシャル. 天水シナリオ (RF) では、2090年の世界の平均BECCSポテンシャルは、PPとPCの土地利用シナリオでそれぞれ0.82と1.99 Gt C yr⁻¹であった（図-0.1(a)）。BECCSポテンシャルはPPとPCの完全灌漑シナリオ (FI) でそれぞれ1.32と3.42 Gt C yr⁻¹ (RFと比較して60%と71%増加) に達したが、持続可能な灌漑シナリオ (SI) ではBECCSポテンシャルはPPおよびPCでそれぞれ0.88および2.09Gt C yr⁻¹ (RFと比較して5%および6%増加) に留まった。これは、SIで定義した持続可能な灌漑を実施する場合、BECCSポテンシャルの増加が大幅に抑制されることを示している。

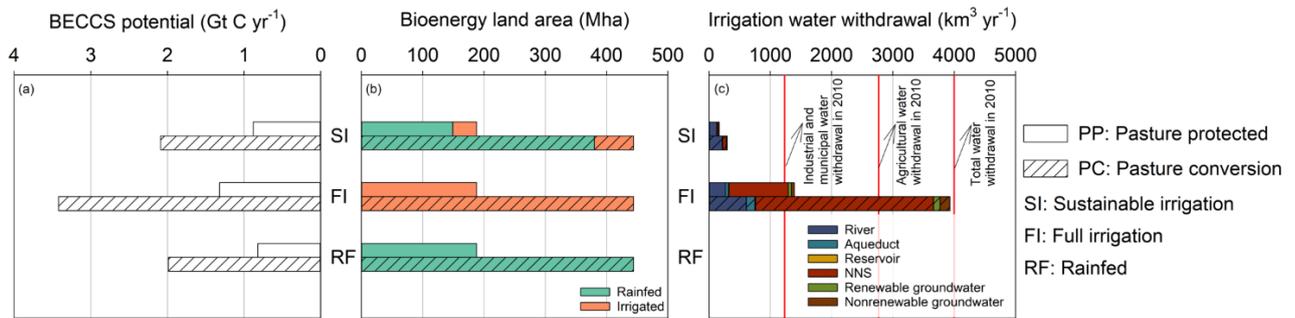


図-0.1 各シナリオにおける2090年（2080-2099年の平均）の(a)世界のBECCSポテンシャル、(b)バイオエネルギー農地、(c)追加的な灌漑取水量。PPとPCはそれぞれ牧草地を保全するか、農地に転換するかの土地利用シナリオを示す。SI、FI、RFはそれぞれ持続可能な灌漑、完全灌漑、天水の水管理シナリオを表す。NNSは現地調達も再生も不可能な表流水を指す。(c)における3つの赤線はFAOによる2010年の世界の工業・生活用水、農業用水、全取水量を示す。Ai et al. (2021)より転載。

世界のバイオ燃料農地. PPとPCの土地利用シナリオで、それぞれ合計188百万haと444百万haがバイオ燃料作物栽培に割り当てられた（図-0.1(b)）。水管理シナリオの異なるRF、SI、およびFIの下で灌漑されたそれぞれの農地面積は、PPで0、39、および188 百万ha、PCでそれぞれ0、64、および444 百万haであった。SIの全バイオ燃料農地に対する灌漑の比率は小さかった（PPとPCでそれぞれ21%と14%）。地理的には、バイオ燃料作物の栽培に利用できる土地は主にロシア、南アメリカ、中央アフリカ、東南アジアと米国の一部に分布していたが、SI下の灌漑地域は主にロシアの高緯度地域と中央アフリカに集中していた。

追加的な灌漑用水の取水. SIでは、追加的な取水量は限定的であった（166~298 km³ yr⁻¹）（図-0.1(c)）。これは現在の世界の農業用取水量（2010年には2769 km³）のわずか6~11%である。これらの水は主に再生可能な水源から取られた。最大の水源は河川（73~76%）であり、次に再生可能な地下水（5~6%）が続く。水の16~20%のみが、持続不可能な水源から供給された。対照的にFIでは、大量の灌漑用水取水（1392~3929 km³ yr⁻¹）が追加的に必要であり、この範囲の下限と上限は、現在の工業用水と生活用水の取水量の合計（1232 km³ yr⁻¹、2010年）および、すべてのセクターの総取水量（4001 km³ yr⁻¹、2010年）に相当する。日単位の水需給の変動を加味すると、乾燥地帯または半乾燥地帯のほとんどの場所と期間で河川水または再生可能な地下水が利用できないため、水は主に持続不可能な水源から取水されていた（73~78%）。河川から取水した水と再生可能な地下水から取水した水はそれぞれわずか16~19%と4%であった。これは、SIによって取水量の総量と持続不可能な取水量の割合を大幅に削減することを示している。SIにおける追加的な取水は水ストレスをほとんど変化させないが、FIでは南アメリカ南東部、アフリカ南部、中央アフリカ等において大幅な追加の水ストレスがもたらされた。

世界の食糧生産における灌漑の貢献度. 全世界の食糧生産において灌漑は重要な役割を担っている。文献によれば、世界の総食料生産の約40%が灌漑地によるものである。本研究では、改良されたH08モデルを用いて、トウモロコシ、小麦、米、大豆の世界生産における灌漑の貢献度を推定した。その結果、灌漑農地からの世界平均生産量は、トウモロコシ、小麦、米、大豆でそれぞれ約27%、30%、61%、16%であることがわかった（図-0.2）。これらの推定値は、先行研究の推定値（それぞれ26%、37%、77%、8%）に近いものであった。であった。この2つの研究の類似性の原因は、主に、両研究が国毎の作物別収穫面積と収量について、同じデータを参照していることにあると考えられた。

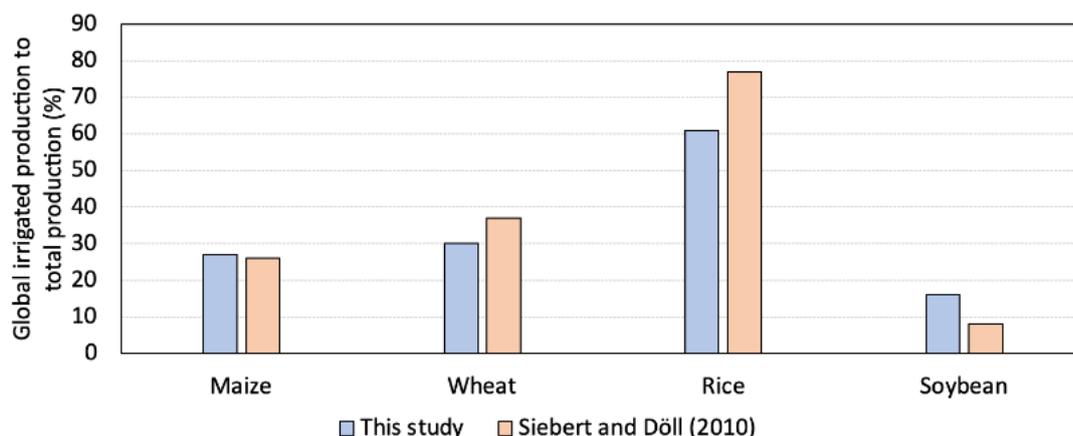


図-0.2 世界のトウモロコシ、コムギ、コメ、ダイズ生産における灌漑の貢献度(%)。Ai and Hanasaki (2023)より転載。

【サブテーマ4】気候政策とSDGsの同時達成における食糧生産のシナジーとトレードオフ

コメ多期作が行われているアジア地域の6か国について農業統計データを収集・解析した結果、面積変動は収量変動の半分から同程度であり、面積変動が無視できない大きさであることを示した。収集した統計データを用いて、コメ収穫面積の年々変動を気象条件から説明する弾性ネット回帰モデルを構築・検証した。回帰モデルの回帰係数値について傾向を解析した結果、雨季作・乾季作にかかわらず、最大連続無降水日数や最大連続降水日数に代表される極端気候が面積変動に大きな影響を与えること、雨季作の気候指標では生育期間中の気候条件よりも播種前後の気候条件が面積変動に大きく寄与していることを明らかにした。収量の年々変動についても面積の場合と同様にモデルを構築したうえで、面積と収量の気候応答モデルに気候変動シナリオ (CMIP5) を入力し、面積と収量の気候応答が必ずしも連動しないことが、アジアのコメ生産量に対する気候変動影響を軽減するとの将来見通しを示した。さらに、作物収量と農地分布、サブテーマ1から提供を受けた河川洪水の氾濫原分布を組み合わせて解析し、過去35年間 (1982~2016年) の洪水による生産被害額は全世界で56.2億ドルと推計した。

全球作物モデル出力などからSDG2の指標である小規模農家の生産額を推計する手法を開発した。そのうえで、気候変動 (CMIP6) と社会経済発展 (SSP) の将来シナリオを考慮した全球作物モデルのシミュレーションを行い、とりわけ気候緩和と灌漑面積の増加が将来の小規模農家の生産額の増加に寄与することを明らかにした (図-4.7)。そこで、サブテーマ3で得られたBECCSと他の水利用との競合に関する知見を援用して、BECCSを強力に推進した場合、アフリカやアジアでは水利用の競合を避けた場合に比べて取水量が20~21倍増加し、水欠乏地域の低所得国では小規模農家と非小規模農家の間の灌漑導入率の格差縮小が困難になる恐れがあることを明らかにした。

作物収量、土壌、気候、栽培管理の全球グリッドデータを機械学習により解析し、農地管理により、6作物 (トウモロコシ、コメ、コムギ、ダイズ、ミレット、ソルガム) を栽培する世界の農地全体で土壌炭素量を127.8億トン増加できると推計された (図-4.4B)。この量の土壌炭素量の増加は世界の平均気温の上昇を0.03°C抑制できる規模に相当する。この量の土壌炭素量の増加を達成するには50~75年を要すると考えられるものの、増加させた土壌炭素量を適切な農地管理の継続によって維持できれば、世界の作物生産を年間3,825万トン増加、無機窒素肥料の投入量を年間582万トン節減できると推計された (図-4.4D)。農地への炭素貯留による窒素節減量データは、水質保全へのシナジーの定量化を目指し、サブテーマ2に提供した。

サブテーマ4の研究者が関連する論文4報がIPCC第2作業部会第6次評価報告書に引用され、気候政策の国際的な議論を支える科学的知見を創出した。また、3件のプレスリリースを行い、国民への研究成果の発信に努めた。

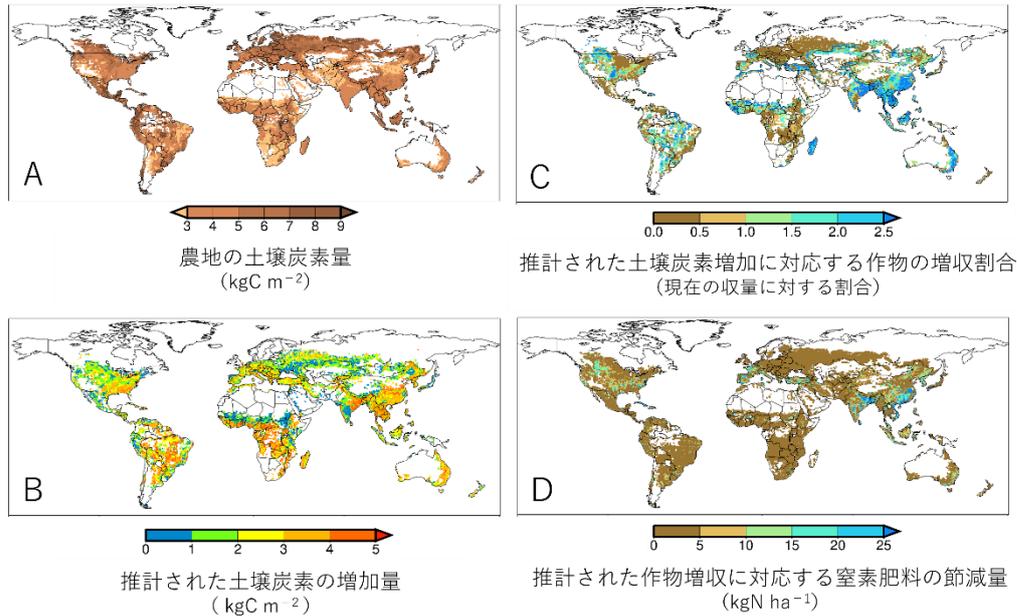


図-4.4 現在の土壌炭素量と推計された土壌炭素量の増加、土壌炭素量の増加がもたらす増収効果と節減できる窒素量

Aは農地の土壌表層30cmに含まれる現在の有機炭素量。Bは農地管理により期待される土壌炭素増加量の推計値（6作物計）。Cは推計された土壌炭素増加量に対応する増収効果（栽培面積の違いを考慮したうえで6作物を平均）。Dは推計した作物生産量の増加に対応する無機窒素肥料の節減量（栽培面積の違いを考慮したうえで6穀物を平均）。白色の地域は栽培されていない地域。

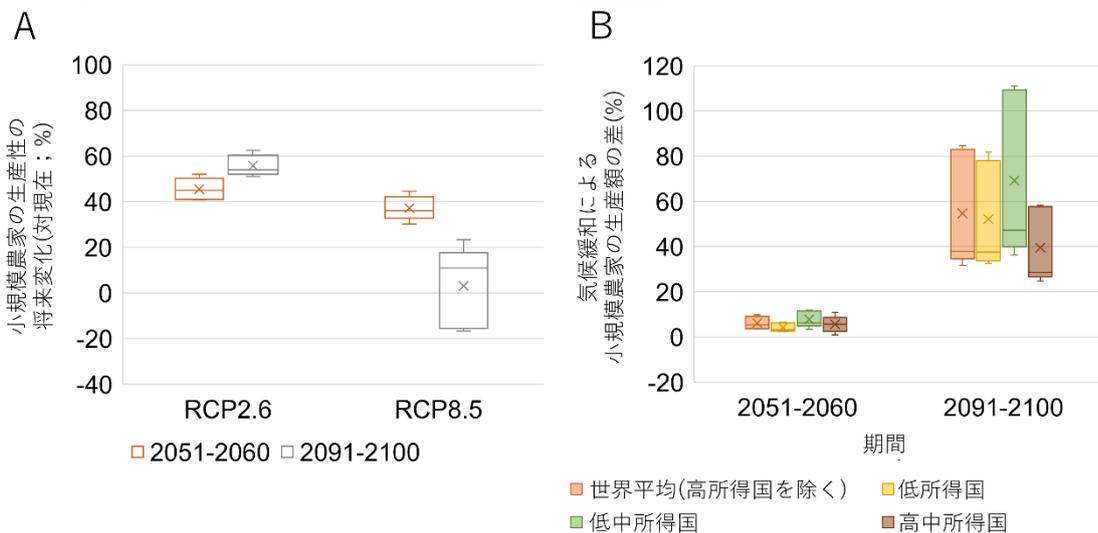


図-4.7 気候緩和が小規模農家の農業生産額に及ぼす影響

Aは、気候緩和が進むシナリオ（SSP126）と気候変動が進行するシナリオ（SSP585）それぞれでの今世紀半ばと今世紀末の農業生産額の将来変化見通しを示す（対：現在）。Bは、国の所得水準ごとに示したSSP585シナリオでの農業生産額の将来見通しとSSP126シナリオでの将来見通しの差であり、気候緩和の影響を示す。結果は、まず、3つの社会経済シナリオ（SSP1、SSP3、SSP5）と適応の有無の組み合わせからなる6つの将来見通しをGCMごとに平均した。箱ひげ図は5つのGCM間の結果のばらつきを表す。中央値（箱の中の水平線）、平均値（×印）、25～75パーセンタイル（箱）、最小～最大幅（ひげ）を示す。ここで考慮したSSPとRCPの組み

合わせの中には、SSP1-RCP8.5やSSP3-RCP2.6といった現実的でないものも含まれるが、同じ社会経済条件での気候変動影響に焦点を当てるため、こうした組み合わせも用いた。

5-2. 環境政策等への貢献

<行政等が既に活用した成果>

環境省が令和2年12月に公表した気候変動影響評価報告書のうち「(参考資料) 気候変動影響評価報告書(詳細)」にサブテーマ4が推計した穀物生産の適応費用の知見を提供した。

<行政等が活用することが見込まれる成果>

CMIP6を用いた洪水の温暖化影響予測(サブテーマ1)と、穀物生産の適応費用(サブテーマ4)についての知見について、IPCC第6次評価報告書第二作業部会(AR6 WGII)で引用された。

全球での河川・湖沼結合モデルによって導かれた水温の将来変化(サブテーマ2)は、河川水を用いた養殖や灌漑などへの影響が大きく、日本の様な精密農法(水温や水位、入排水の管理)では、農事歴の改良への貢献が期待される。また、水質への影響と窒素の投入による増産との関係解明は、環境政策等への貢献が期待される。

地域詳細かつ定量的な緩和策と適応策のSDG目標とのシナジー・トレードオフに関する成果は、緩和策の目標策定や適応策の国際的な支援計画における科学的知見として活用されることが期待される。

5-3. 研究目標の達成状況

全体目標	目標の達成状況
<p>本課題の目標は、水環境に着目し、気候目標とSDGsを同時に達成する際に生じうるシナジーとトレードオフを明らかにし、想定される緩和策や適応策のもとで水に関連する6つのSDGsの達成可能性を地域的に評価することである。各サブテーマでは、水に関連するSDGsの達成評価に必要なシミュレーションを全球数十kmの解像度で実施し、その結果を国ごとまたは地域ごとに集計することで、気候目標とSDGsとのシナジーとトレードオフを地域ごとに分析する。また、気候政策として緩和策を反映した気候シナリオごと、適応策の有無ごとに気候目標とSDGsの同時達成の可能性を地域別に評価する。最終的にはサブテーマ1において、気候目標やSDGsに掲げられた目標が、水環境の観点から実現可能なのか、どの地域に水環境への負荷が高く、シナジーやトレードオフが存在するか、そして同時達成が難しい課題や地域がどこにあるのかをケーススタディも含めて分析し、考えられる解決策オプションを提示する。</p>	<p>地域ごとの水に関するSDGsの達成可能性を定量的かつ地域的に評価することで、目標どおりの成果をあげた。</p> <p>全球0.5度(50km)ごとのグローバルモデルを用いて、水災害、水質、水資源、農業に関する6つの水に関するSDGサブ目標を定量的に分析する手法を開発し、緩和策及び適応策の気候政策を進めた場合のSDG指標への正の影響(シナジー)と負の影響(トレードオフ)を国ごとおよび地域ごとに定量的に評価した。また、それらの結果を統合的に分析することで、シナジーが大きい国とトレードオフが懸念される国を具体的に特定した。</p> <p>気候政策に関する政策オプションとしては、資金援助に伴う河川洪水への適応策の効果、土壌への炭素貯留による気候緩和効果ポテンシャルと作物収量低減効果および水質改善の効果、バイオ燃料の増産ポテンシャルとそれに伴う水資源への影響、海水淡水化による沿岸都市の水資源利用可能ポテンシャル、について、それぞれグローバルかつ定量的な分析を完了した。</p>

サブテーマ1 目標	目標の達成状況
<p>本サブテーマでは以下の2つを目標とする。</p> <p>1) 河川氾濫モデルCaMa-Floodを用いて河川洪水の将来変化推計を行い、サブテーマ3およびサブテーマ4に知見を提供する。また、水災害について、貧困(SDG1)や防災(SDG11.5)についてのシナジーとトレードオフを検討し、地域ごとのSDGsの達成可能性を評価する。</p> <p>2) 水に関連する6つのSDGsの達成可能性を統合的に分析し、課題をとりまとめ、考えられる解決策オプションを提示する。</p>	<p>左記の2つの目標のいずれについても目標通りの成果を上げた。</p> <p>1) CMIP6実験を入力として河川氾濫モデルCaMa-Floodによる2100年までの全球河川氾濫シミュレーションを実施し、貧困(SDG1)と防災(SDG11.5)に共通のSDGs指標の1つである、洪水曝露人口(洪水時の浸水域に住む影響人口)の将来変化を算定し、低収入国における将来の洪水被害に見通しと、費用便益の観点から合理的な適応レベルだけでは将来の残余被害が大きくなることを示した。</p> <p>2) 各サブテーマから提供を受けたSDG指標の将来推計を分析し、国ごとおよび地域ごとの緩和策・適応策とのシナジーとトレードオフの統合的な解析を行った。各指標の影響人口ならびに国の数を参考にシナジーやトレードオフのレベルを設定し、地域ごとの傾向を集計した結果、シナジーがあるのは東南アジア、アフリカ、北米、南米であり、特にアフリカとインドシナ半島では、緩和策が水に関するSDG指標に対してシナジーが大きいことが判明した。</p> <p>地域および国ごとに、シナジーを大きくしトレードオフを軽減するための政策オプションに資する定量的な評価を取りまとめた。今後の環境政策に重要な科学的知見の創出に大きく貢献した。</p>

サブテーマ2 目標	目標の達成状況
<p>本サブテーマでは、以下の4つを目標とする。</p> <p>1) 全球水温モデルHEAT-LINKを湖沼と結合した水熱動態モデルを開発し、温暖化に伴う水温変化を推計する。</p> <p>2) 水温予測および全球窒素循環モデルTNCMから食糧に関するSDG2の達成可能性の評価を行う。</p> <p>3) サブテーマ3と連携し、質と量の双方から生活用水の評価を行い、安全な水供給(SDG6)の達成評価を行う。</p> <p>4) 水温や水質に関する気候政策とSDGのシナジーとトレードオフの解析を行い、シナジーを多くしトレードオフを可能な限り小さくするような方策の検討を行う。</p>	<p>目標どおりの成果をあげた。</p> <p>1) 全球水熱動態モデルを開発し(Tokuda et al., 2021)、現在気候及び将来気候での河川水温を推計し、温暖化に伴う河川水温の変化を示した。</p> <p>2) サブテーマ4と協働し、農地への窒素投入量を削減する緩和策による水質向上が見込めるシナジーが多く地域で見られたことから、SDG2の達成可能性が示された。</p> <p>3) サブテーマ3と協働し、河川の水温質の評価を行った。河川水温の上昇が見られ、また河川水の窒素濃度も推計された。引き続き窒素濃度の高い地域においては、改善対策が求められることが示された。</p> <p>4) 緩和策の一つである農地への炭素貯留によって窒素投入量が低減され、水質の改善が見込まれるシナジーが示された。</p>

サブテーマ3 目標	目標の達成状況
<p>本サブテーマでは以下の3つを目標とする。</p> <p>1) 全球水資源モデルH08を用いることにより、低炭素シナリオとSDGs目標のうち、水力発電とバイオ燃料生産に着目したクリーンなエネルギー (SDG7)、および安全な水へのアクセスについて (SDG6) の水資源面でのシナジーやトレードオフを詳細に検討する。</p> <p>2) 2度 (1.5度) 目標の達成にあたり、世界全体の水力発電の大幅な増加や、バイオ燃料の増産が前提になっている研究が散見される。前者に関しては、非現実的な水力発電の開発が前提となっていないかという軸から検討を行う。後者については、バイオ燃料増産により水循環の変化や灌漑需要の増加につながることはないかという軸などから詳細な検討を行う。</p> <p>3) SDGsが高度に達成できたとしても世界の水需要は急には減らせない。特定の地域や期間に表流水や地下水の過剰取水をもたらす水利用に主に注目し、水資源制約に関する指標や地図を提示する。</p>	<p>左記の3つの目標のいずれについても目標通りの成果を上げた。</p> <p>1) まず、水資源・クリーンなエネルギー・安全な水へのアクセスに関するシナジーとトレードオフの中心にあるエネルギー作物・食料生産用の灌漑を時空間詳細に扱うためのH08の改良を行い、世界のミスカンサス、スイッチグラス、トウモロコシ、コムギ、コメ、ダイズ生産における灌漑の貢献度を国別に定量化することに成功した。これにより、灌漑 (水) と収量 (エネルギー・食料) のシナジー・トレードオフについての詳細を明らかにした。</p> <p>2) 水力発電については、達成可能な最大水力発電量を推計し、化石燃料に対する価格競争力が緩和策によって強化されるという以前の研究での知見 (Zhou, Hanasaki et al. 2018) を確認した。バイオ燃料の増産については、全球水資源モデルH08を上述のように拡張することで、バイオ燃料作物が明示的に扱えるようにした。次に、拡張されたH08を利用することで、世界の二酸化炭素回収貯留付きバイオ燃料生産 (BECCS) ポテンシャルに対する水資源の制約を明らかにし、持続可能な範囲の灌漑では大きなバイオ燃料増産が見込めないことを明らかにした。</p> <p>3) 1) の分析で主要な7つの水源に関して水資源制約を考慮しつつ、水利用の評価を行い各種指標の地図を提示した。さらに、エネルギー面から見て持続可能性の乏しい海水淡水化にも焦点を当てて、今後のプラントの分布を推定するモデルの構築を行った。これまでの傾向を踏まえると、今後もさらに海水淡水化プラントは世界的に増加することを明らかにした。</p>

サブテーマ4 目標	目標の達成状況
<p>本サブテーマでは以下の3つを目標とする。</p> <p>1) 播種前後および生育期間中の極端気象や水資源変動により播種・収穫面積が減少する効果をデータ解析により明らかにし、簡易モデルを提案する。</p> <p>2) 全球作物モデル (Sultan et al. 2019) による全球の作物収量シミュレーションと上記の簡易モデルによる収穫面積影響、灌漑シナリオ (サブテーマ3)、土地利用変化シナリオ (サブテーマ1) を組み合わせ解析し、食糧生産の将来予測を行う。</p> <p>3) それにより、気候緩和を推進するうえで食糧生産 (SDG2) にトレードオフが生じる地域を特定し、統合解析 (サブテーマ1) に資する知見を提供する。</p>	<p>左記の3つの目標のいずれについても目標通りの成果を上げた。</p> <p>1) 農業統計データを解析し、播種前後の期間および生育期間中の極端な気温と降水量を説明変数、収穫面積の平年からの乖離を被説明変数とする統計モデルをコメについて提案した。さらに、面積と収量の変動が必ずしも連動しないことが、将来の気候変動下でアジアのコメ生産量の安定化に寄与するとの見通しを示した。</p> <p>2) 気候変動と社会経済発展を考慮した全球作物モデルのシミュレーションにより、SDG2の指標である小規模農家の生産額の将来予測を行った。水欠乏地域の低所得国については灌漑導入率の格差縮小が効果的であることを明らかにした。</p>

	3) 機械学習を用いて、作物収量、気候・土壌、栽培管理のデータを解析し、農地管理により世界の土壌炭素量を増加させた場合に期待できる気候緩和効果と、そのシナジー（作物増収、無機窒素肥料の節減）を定量的に示した。
--	--

6. 研究成果の発表状況

6-1. 査読付き論文

<件数>

31件

<主な査読付き論文>

- 1) A. Rimba and Y. Hirabayashi: *Water*, 15, 613 (2023) (IF=3.530), Interlinkages of water-related SDG indicators globally and in low-income countries.
- 2) N. Nozaki, N. Hosokawa, Y. Doi, W. Kim and T. Iizumi: *Environ. Res. Commun.*, 5, 031006 (2023) (IF=3.237), Global modeling of indicators related to small-scale farmers used in sustainable development goals: testing in a changing climate. DOI:10.1088/2515-7620/acc3e2
- 3) Z. Ai, F. Ishihama, and N. Hanasaki: *Water Resources Research*, 58 (2022) (IF=6.16), Mapping Current and Future Seawater Desalination Plants Globally Using Species Distribution Models, e2021WR031156, 10.1029/2021WR031156.
- 4) M. Tanoue, R. Taguchi, H. Alifu and Y. Hirabayashi: *Nat. Clim. Chang.*, 11, 823-826 (2021) (IF=28.862), Residual flood damage under intensive adaptation.
- 5) D. Tokuda, H. Kim, D. Yamazaki, and T. Oki: *Geoscientific Model Development*, 14, 5669-5693 (2021) (IF=5.240), Development of a coupled simulation framework representing the lake and river continuum of mass and energy (TCHOIR v1.0), doi:10.5194/gmd-14-5669-2021.
- 6) C.-Y. Zhang, and T. Oki: *Water*, 13, 2253 (2021) (IF=3.530), Optimal multi-sectoral water resources allocation based on economic evaluation considering the environmental flow requirements: A case study of Yellow River Basin, doi: 10.3390/w13162253.
- 7) Z. Ai, N. Hanasaki, V. Heck, T. Hasegawa, and S. Fujimori: *Nature Sustainability*, 4, 884-891 (2021) (IF=12.08), Sustainable irrigation largely constrains the global BECCS potential, doi:10.1038/s41893-021-00740-4.
- 8) T. Iizumi, N. Hosokawa and R. Wagai: *CABI Agric. Biosci.*, 2, 43 (2021) (IF=N.A.), Soil carbon-food synergy: sizable contributions of small-scale farmers.
- 9) J. Jägermeyr, C. Müller, A. C. Ruane, J. Elliott, J. Balkovic, O. Castillo, B. Faye, I. Foster, C. Folberth, J. A. Franke, K. Fuchs, J. R. Guarin, J. Heinke, G. Hoogenboom, T. Iizumi, A. K. Jain, D. Kelly, N. Khabarov, S. Lange, T.-S. Lin, W. Liu, O. Mialyk, S. Minoli, E. J. Moyer, M. Okada, M. Phillips, C. Porter, S. S. Rabin, C. Scheer, J. M. Schneider, J. F. Schyns, R. Skalsky, A. Smerald, T. Stella, H. Stephens, H. Webber, F. Zabel and C. Rosenzweig: *Nat. Food*, 2, 873-885 (2021) (IF=20.443), Climate impacts on global agriculture emerge earlier in new generation of climate and crop models.
- 10) Z. Ai, N. Hanasaki, V. Heck, T. Hasegawa, and S. Fujimori: *Geoscientific Model Development*, 13, 6077-6092 (2020) (IF=5.240): Simulating second-generation herbaceous bioenergy crop yield using the global hydrological model H08 (v.bio1), doi:10.5194/gmd-13-6077-2020, 2020.

6-2. 知的財産権

該当するものはない

6-3. その他発表件数

査読付き論文に準ずる成果発表	31件
その他誌上発表（査読なし）	1件
口頭発表（学会等）	28件
「国民との科学・技術対話」の実施	24件
マスコミ等への公表・報道等	30件
本研究費の研究成果による受賞	4件
その他の成果発表	0件

7. 国際共同研究等の状況

【サブテーマ1】

平林は国際プロジェクトInter Sectoral Impacts Model Intercomparison Project (ISIMIP)のScientific Advisory Boardとして気候変動の影響評価に関するプロジェクト設計に助言している。また、国際水文科学会(IAHS)による10年科学計画のマイルストーンとなる書籍の、洪水と人間活動の関係について執筆を担当しており、洪水に対する気候変動影響や貧困・地形的気候的な脆弱性との関係について取りまとめを行っている。

【サブテーマ2】

地球規模課題対応国際科学技術プログラム(SATREPS)の一つである「タイ国における統合的な気候変動適応戦略の共創推進に関する研究」(日本側PI: 沖大幹, FY2015~2022)は、カウンターパートをタイ国カセサート大学のThanya Kiatiwat教授(前副学長)として実施されているが、淡水、土砂災害、沿岸、森林、農村計画、都市の6つのセクターにおいて、SDG6、11、13を中心に優良事例やトレードオフ、シナジーなどの知見を、タイ側の共同研究者や政府関係者と協働で、タイ国の国家適応計画(NAP; National Adaptation Plan)並びにそのガイドラインへ打ち込んだ。さらにタイにおける気候変動の影響と適応に関するレビュー論文(Kiguchi, Takata, et al., 2021(IF:6.096))でそれらの成果を紹介し、欧米に偏りがちなそれらの科学的知見を中進国タイで水関連セクターだけとはいえ取り纏めたのは、世界的に重要な意味を持つ。

さらに、まだ始まったばかりだが、戦略的国際共同研究プログラムSICORPの多国間協力としてe-ASIA共同研究プログラムの一つである「ダム貯水池の動的運用による統合水資源管理」(PI: 沖大幹, FY2021~2023)は、カウンターパートをタイ・王立灌漑局のSomchit Amnatsan部長とラオス・ラオス国立大学Keouangchai Keokhamphui副学部長として実施しており、気象・気候データの大規模データを利用したAIやディープラーニングを援用しつつ、ダムへの流入量予測を開発し組み込んだダム運用モデルの実装を日本、タイ、ラオスの対象地域で実装することを目的としている。特にSDG6の達成をターゲットとしているが、安定した農業生産や洪水・渇水制御、水質改善などとのトレードオフとシナジーに関する科学的知見を開発し、ダムに関連する多様なステークホルダーと一つのテーブルで議論して運用ルールを共創することを目指しており、気候変動とSDGの同時達成によるトレードオフとシナジーに関して地域スケールに落とし込んで取り組む。このような国家を跨いだ研究は世界的に見てもほとんど例がなく、先駆的なものである。

【サブテーマ3】

全球水資源モデルH08は国際プロジェクトInter Sectoral Impacts Model Intercomparison Project (ISIMIP)に参加している。ISIMIPは複数の影響評価モデルを共通の境界条件で走らせ、複数分野の全球規模の温暖化影響評価を行う国際プロジェクトである。気候変動の影響評価において世界で最も重要な活動の一つであり、ドイツのポツダム気候影響研究所が主導している。ISIMIPのH08の出力結果はドイ

ツ気候計算センター(DKRZ)から公開されており、世界の温暖化影響評価の基盤的情報となっている。

【サブテーマ4】

国際プロジェクトであるISIMIPのPhase3シミュレーションの農業セクター部分にサブテーマ4の全球作物モデルCYGMAが参加している。カウンターパートはドイツ・PIKのChristoph Müller博士。Phase3シミュレーション結果を用いて穀物収量への影響を評価した論文が現在、査読中である。なお、ISIMIPの農業セクター部分は別の国際プロジェクトであるAgMIPと合同で行われている。カウンターパートはNASAのJonas Jägermeyr博士。AgMIPではRuane et al. (2021)がサブテーマ4を含む国際共同研究の成果として公表されている。

ISIMIP (The Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project): 分野横断影響モデル相互比較プロジェクト

PIK (Potsdam Institute for Climate Impact Research): ポツダム気候影響研究所

AgMIP (Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project): 農業モデルの相互比較と改良プロジェクト。

8. 研究者略歴

研究代表者

平林 由希子

芝浦工業大学工学部卒業、東京大学大学院工学系研究科修了、博士（工学）、現在、芝浦工業大学教授

研究分担者

1) Rimba Andi Besse

ガジャマダ大学地理学部卒業、博士（工学）、現在、SIT総合研究所プロジェクト研究助教

2) 沖 大幹

東京大学工学部卒業、東京大学大学院工学系研究科修了、博士（工学）、現在、東京大学 総長特別参与、大学院工学系研究科部教授

3) 花崎 直太

東京大学工学部卒業、東京大学大学院工学系研究科修了、博士（工学）、現在、国立環境研究所気候変動適応センター気候変動影響評価研究室室長

4) Ai Zhipin

四川農業大学大学、中国科学院大学大学院修了、博士（理学）、国立環境研究所気候変動適応センター気候変動影響評価研究室特別研究員を経て、現在、中国科学院地理学科与資源研究所研究員

5) 飯泉 仁之直

筑波大学第二学群生物資源学類卒業、博士（理学）、現在、国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構 農業環境研究部門 上級研究員

6) 金 元植

韓国・建国大学理学部卒業卒業、博士（農学）、現在、国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構 企画戦略本部 上級研究員

7) 細川 奈々枝

信州大学農学部卒業、博士（環境科学）、国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構 農業環境研究部門 契約研究員（2020年9月～2021年9月）、現在、国立研究開発法人森林研究・整備機構 森林総合研究所 研究員

8) 野崎 乃倫子

一橋大学法学部卒業、博士（環境学）、現在、国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構 農業環境研究部門契約研究員（2021年12月～2023年3月）

II. 成果の詳細

II-1 気候政策とSDGsの同時達成における水災害のシナジーとトレードオフおよび統合解析

学校法人芝浦工業大学
大学院理工学研究科
SIT総合研究所

平林 由希子
Rimba Andi Besse

[要旨]

サブテーマ1の目的は、洪水に関連するSDG1.5/11.5への気候政策のシナジー・トレードオフを評価することと、各サブテーマの成果に基づく気候政策と水に関するSDG指標の関係についての統合的な解析を実施することである。将来の適応シナリオによる洪水防御レベルの増加を考慮した洪水曝露人口の算定、気候緩和・適応策のSDG1.5/11.5へのシナジー・トレードオフについての知見の創出、の3つを実施することで、目標はいずれも目標通りの成果を上げた。研究成果は、①洪水に関する気候の影響と適応策の将来見通し、②洪水に関する緩和策および適応策のシナジーと適応の限界、③水に関するSDG指標の統合的評価、にまとめた。

成果①では、CMIP6実験を入力として河川氾濫モデルCaMa-Floodによる2100年までの全球河川氾濫シミュレーションを実施し、貧困（SDG1）と防災（SDG11.5）に共通のSDGs指標の1つである、洪水曝露人口（洪水時の浸水域に住む影響人口）の将来変化を算定した。人口分布を2015年に固定した場合では、気候変動の影響のみによる洪水曝露人口の変化は、産業革命前と比べて3度上昇すると1.4倍（世界人口の2.2-3.2%に相当）とり、特にアフリカ（1.7倍）、アジア（1.5倍）では増加幅が大きいことが判明した。また、費用便益比モデルを用いて洪水増加による各国の洪水に関する適応レベルを算定し、適応費用を推計した。また、世界の浸水深予測をサブテーマ4に提供した。

成果②では、緩和策の効果として異なる温室効果ガスシナリオ間の洪水曝露人口の差、適応策の効果として、将来の追加的な洪水対策の有無による洪水曝露人口の差を算定した。その結果、費用便益の観点から洪水防護への投資などの適応が進まない国があること、海外からの資金援助などが、有効であることを示した。

成果③では、各サブテーマから提供を受けた水に関するSDG指標の将来推計を分析し、国ごとおよび地域ごとの緩和策・適応策とのシナジーとトレードオフの統合的な解析を行った。各指標の影響人口ならびに国の数を参考にシナジーやトレードオフのレベルを設定し、地域ごとの傾向を集計した結果、シナジーが1つ以上確認されたのは東南アジア、アフリカ、北米、南米であり、特にアフリカとインドシナ半島では、緩和策が水に関するSDG指標に対してシナジーが大きいことが判明した。さらに、気候政策の緩和策・適応策それぞれについて、シナジーまたはトレードオフが中程度以上の場所を0.5度グリッドごとに集計し、影響人口を推計した。緩和策は、水に関するSDG指標のシナジーの恩恵を受ける人口は0.12-1.2億人（世界人口の0.17-1.7%）であるのに対して、トレードオフに直面する人口は280万人-0.2億人であり、シナジーの6分の1程度であった。適応策がSDG指標に与える影響は、緩和策とほぼ同等であるが、指標および地域によって、そのばらつきは大きい傾向にあった。適応策が水に関するSDG指標に対してシナジーとなるのは0.17-3.9億人（世界人口の0.2-5.3%）であった。適応策によるトレードオフは、水資源において0.5億人（世界人口の0.7%）である。以上より、緩和策および適応策は水に関するSDG指標に対してはおおむねシナジーがトレードオフに比べて大きく、積極的に進めるべきであること、また、トレードオフが懸念される国では、その影響を低減するための方策が必要であることが示された。

サブテーマ1からは論文4報がIPCC第2作業部会第6次評価報告書に引用された。その他に、本課題の前進であるS-14戦略プロジェクトからの論文も、気候政策に資する科学的知見の創出に貢献した。また、2件のプレスリリースや一般シンポジウム、市民講座を実施し、国民への研究成果の発信に努めた。

1. 研究開発目的

サブテーマ1の研究目的は、想定される緩和策や適応策のもとで水災害に関連するSDG目標の達成可能性を地域的に評価することおよび、各サブテーマから得られる、水に関連するSDGsの達成評価の結果を国ごとまたは地域ごとに集計することで、気候目標とSDGsとのシナジーとトレードオフを地域ごとに分析することである。具体的には、気候政策として緩和策を反映した気候シナリオごと、ないしは将来想定される適応策の有無ごとに、気候目標とSDGsの同時達成の可能性の違いを地域別に算定し、気候目標やSDGsに掲げられた目標が、水環境の観点から実現可能でありシナジーが存在するのか、どの地域に水環境への負荷が高く、トレードオフが存在するのかについて分析する。最終的には、気候政策とSDGsの同時達成が難しい課題や地域がどこにあるのかをケーススタディも含めて分析し、考えられる解決策オプションを提示することを目的とする。

2. 研究目標

本サブテーマでは以下の2つを目標とする。

- 1) 河川氾濫モデルCaMa-Floodを用いて河川洪水の将来変化推計を行い、サブテーマ3およびサブテーマ4に知見を提供する。また、水災害について、貧困(SDG1)や防災(SDG11.5)についてのシナジーとトレードオフを検討し、地域ごとのSDGsの達成可能性を評価する。
- 2) 水に関連する6つのSDGsの達成可能性を統合的に分析し、課題をとりまとめ、考えられる解決策オプションを提示する。

3. 研究開発内容

サブテーマ1では上記の研究目標に沿って研究開発を進め、得られた結果を以下の3つの成果に取りまとめた。これらの成果は研究目標で掲げた2つの目標をすべて含む内容である。

①洪水に関する気候の影響と適応策の将来見通し

CMIP6実験を入力として河川氾濫モデルCaMa-Floodによる2100年までの全球河川氾濫シミュレーションを実施し、貧困地域の災害脆弱性(SDG1.5)と防災(SDG11.5)に共通のSDGs指標の1つである、洪水曝露人口(洪水時の浸水域に住む影響人口)の将来変化を算定した。これらの成果はサブテーマ4に提供した。また、社会経済シナリオで与えられる経済状況と、追加的な適応策による適用費用便益モデルから、将来の各国の適応費用および洪水防護レベルを推計した。これらの推計値からSDG1およびSDG11.5の達成可能性をシナリオごとに推計した。(目標1に対応)

②洪水に関する緩和策および適応策のシナジーと適応の限界

緩和策の効果として異なる温室効果ガスシナリオ間の洪水曝露人口の差、適応策の効果として、将来の追加的な洪水対策の有無による洪水曝露人口の差を算定し、SDG1.5とSDG11.5に対する、気候政策のシナジーとトレードオフを算定した。また、費用便益から将来の洪水防護が進まない地域(経済的な適応の限界)と、今後の経済発展等により適応策が進むことが期待される地域を特定すると共に、経済的な適応の限界にある地域に対して、洪水被害の削減が期待できるレベルまで積極的に適応策を考慮したシナリオを分析し、途上国への適応策への資金援助が効果的な地域を抽出した。(目標1に対応)

③水に関するSDG指標の統合的評価

各サブテーマから提供を受けた水に関するSDG指標の将来推計を分析し、国ごとおよび地域ごとの緩和策・適応策とのシナジーとトレードオフの統合的な解析を行った。各指標の影響人口ならびにシナジーまたはトレードオフが見られる国の数を参考に、分析した国のうち、緩和策でのSDG指標の向上(悪化)が見られた上位(下位)10%の国は高いシナジー(トレードオフ)、上位(下位)30%を中規模以上のシナジー(トレードオフ)とした。また、全球50kmメッシュごとにシナジーまたはトレードオフの地域の合計人口を算定して集計し、シナジーまたはトレードオフが多い課題・地域を抽出した。対象としたのはサブテーマ1の洪水曝露人口(SDG1.5および11.5に関連)、サブテーマ2から提供された河川水窒素濃度から定義した良好な水域(SDG6.3に関連)、サブテーマ3による気候変動に伴う水ストレス指標(SDG6.4に関連)とパイオ

燃料に伴う水ストレスの変化（SDG6.4およびSDG7.2に関連）、サブテーマ4の小規模農家の生産性（SDG2.3に関連）の6指標である。（目標2に対応）

4. 結果及び考察

以下、3つの成果の内容について記載する。

①洪水に関する気候の影響と適応策の将来見通し

サブテーマ1では、将来の温暖化時の河川氾濫による経済被害を推計し、最も温暖化が進行する極端なシナリオ（RCP8.5/SSP5）では、洪水被害は現在よりも年平均で983億米ドル増加すること、このうち年間68億ドル投資することで、最大で年間740億ドルの洪水被害の増加分を軽減することができる一方で、世界全体で適応策を実施しても、現在よりも洪水被害が年間243億米ドル増加することを明らかにした（表-1.1）¹⁾。シナリオと適応目標の組み合わせの違いによって数値は異なるが、どのシナリオにおいても、現在よりも洪水被害額が増加することが判明した。特に、中国、インド、インドネシア、オーストラリア北東部、アラスカ、ラテンアメリカの国々など、地球上のほとんどの地域で、適応策を実施したとしても、現在よりも洪水被害額が増加する（地方行政単位のGDPの0.05%以上）ことが示された（図-1.1）。

表-1.1 代表的なシナリオにおける洪水費用便益分析の結果

	被害額の増分 [億US\$/年]	費用 [億US\$/年]	便益 [億US\$/年]	RFD [億US\$/年]
RCP8.5/SSP5	983	68	740	243
RCP6.0/SSP3	353	40	220	133
RCP4.5/SSP2	442	50	337	105
RCP2.6/SSP1	543	55	374	169

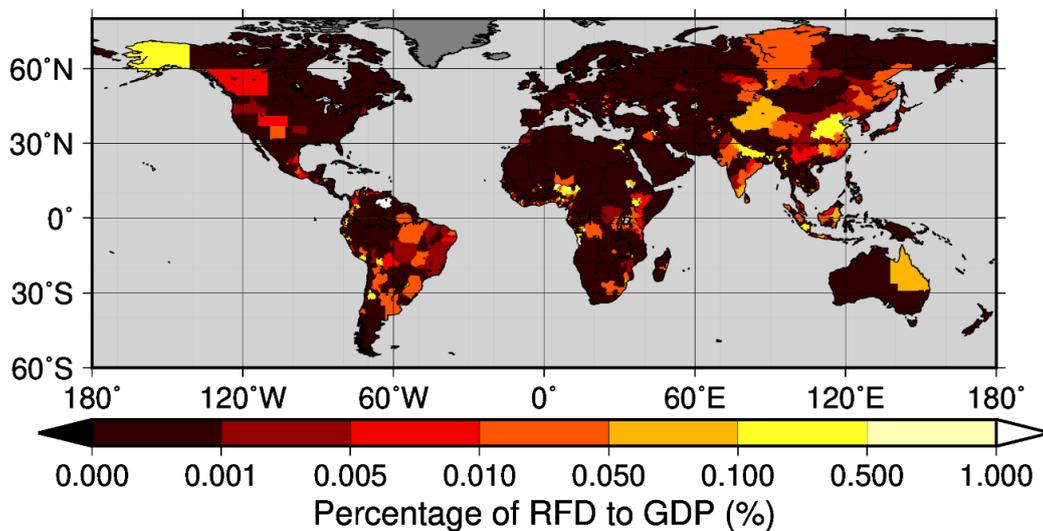


図1-1. 適応策を実施した場合の現在からの洪水被害額の増加（極端シナリオRCP8.5/SSP5）。各地表行政単位におけるGDPに対する比として示す。

洪水に曝される多くの地域では、今後の経済発展が高いと見込まれており、適応策によって現在よりも高い洪水防御レベルを達成することで、洪水被害の増加を大幅に減少させることができる。その一方で、最適シナリオにより経済的に最も合理的な適応レベルを決定するシナリオの場合は、地域の経済状況に対して適応策を実施するためのコストが高い、すなわち適応による便益が見合わない地域では、適応策が実施されず、洪水防御のレベルが低いままであることが判明した。これらの地域には、ナイジェリア、アンゴラ北西部、エチオピア、ベネズエラ東部、コロンビア西部、エクアドル、ペルー西部、ボリビア、アルゼンチン北部などが含まれる。このような地域では、将来の洪水被害の増加を低減するために、気候資金の枠組みや国際的な協力が必要であることが判明した。

また、中国、インド南部および北部、インドネシア、オーストラリア北東部、ナイジェリア、コンゴ、南アフリカ、アラスカ、ベネズエラ、コロンビア西部、エクアドル西部、ペルー西部、ボリビア、アルゼンチン北部などの地域では、適応後でも現在よりも大きく洪水被害が増える（0.05%以上）ことが予測された。洪水防御のレベルがある程度高くなった地域でも現在よりも被害が増える主な理由は、洪水を防御するための構造物を建設する間に発生する洪水被害が大きいためである。そのため、早期の適応策の決定と実施の短期間化が重要であると共に、被害を軽減するための予警報や避難などのソフトな対策も必要である。

②洪水に関する緩和策および適応策のシナジーと適応の限界

洪水被害（SDG1.5およびSDG11.5に関連）に対する緩和策の影響は、エリトリアやエチオピアといったアフリカの国や、イエメン、アラブ首長国連邦といった中東の国で高いシナジーとなり、チリやコスタリカといった中南米の一部の国ではトレードオフとなった。IPCC第6次評価報告書によれば、温暖化の進行度が高いほど、地中海やカリブ海の周辺で年平均降水量が減少する。降水量が減るということは、それに伴い洪水も減ると考えられるため、地球温暖化の防止を図る緩和策の効果と洪水被害がトレードオフの関係になっている。このことが地中海やカリブ海周辺で、緩和策が洪水に関するSDG指標に対してトレードオフとなった要因である。

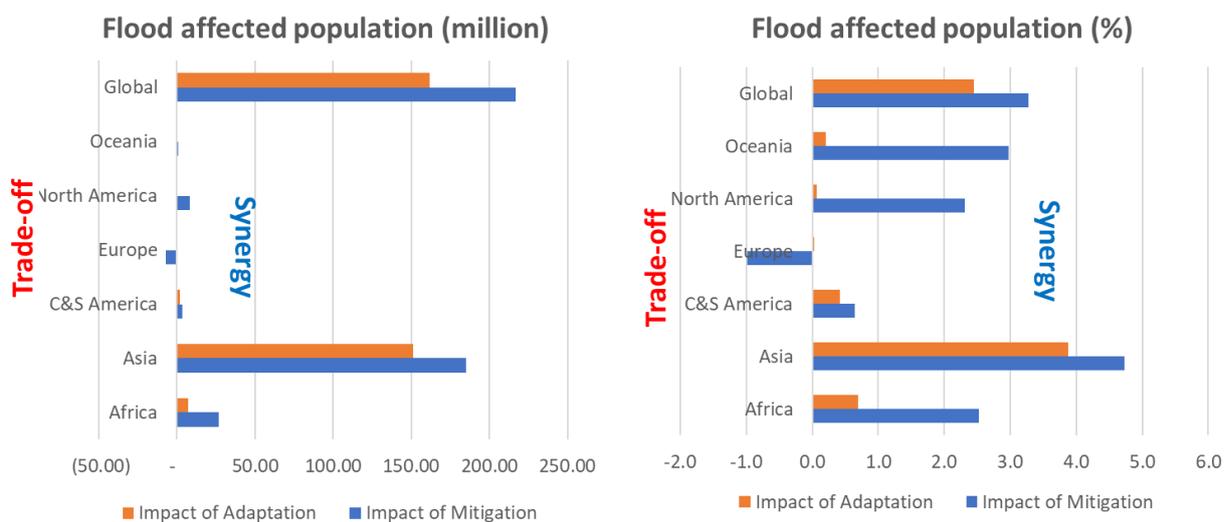


図-1.2 洪水曝露人口に対する緩和策と適応策のシナジーとトレードオフ。左側が洪水曝露人口（100万人）、右側が地域ごとの総人口に対する割合（%）を示す。

世界銀行の定義で低所得国(2015年のGNIが1025ドル未満と定義)の多くはアジアやアフリカにある国々である。これらの地域は、温暖化が進むことにより洪水の強度や頻度が増加するため、水災害に関連したSDG1.5指標の達成が困難になる。しかし、緩和策を進めた低排出シナリオでは、高排出シナリオに比べて2100年までの指標の悪化を最大50%減らすことができ、SDG達成に緩和策が大きいシナジーを持つ。また、各国が自国で洪水防護に必要とする総費用と便益(洪水防護により軽減する被害額)の差が最小となるまで適応する場合(標準適応)は、適応をしない場合よりも指標の悪化を19%減らすことができる。さらに、他国からの適応策への援助も想定して、低所得国においても適応の効果があるところまでは洪水防護を進める場合(最大適応)を検討したところ、温暖化による指標の悪化はすべて適応することができ、現在よりも洪水に対する脆弱性が低くなることも判明した。このことから、特に低所得国では、費用対効果に関わらず適応策を講じることは有効であり、温暖化による洪水増加が予想される低所得国への適切な適応策への資金支援が有効であることが明らかになった。

なお、先進国は現在においても洪水に対する河川の防護レベルが高いため、将来の適応(洪水対策)の追加分の余地があまり無い。そのため、G7の平均では、最大適応シナリオを適用した場合でも、気候変動が進行することでSDG指標は0.1悪化する。また、最大適応シナリオにおいても、低所得国は将来の適応が完了した後であっても洪水への曝露指標が先進国と比べて大きい。このことより、低所得国の洪水に対する脆弱性が現在の先進国のレベル程度にまで達成するためには、より野心的な洪水対策も重要であることも判明した。

③水に関するSDG指標の統合的評価

本研究課題で対象とする水に関するSDG指標は、水災害、水熱質循環、水資源、食糧生産に関する6つのSDG指標である。231あるSDG目標のサブ指標のうち、水に関係する目標は、目標6(サブ指標9つ)を中心に、全部で33が存在する²⁾。そのうち、過去のSDGサブ指標の数値について定量的かつある程度の国数のデータが得られた31のサブ指標に対して、指標間の相関を調べたところ、多くの指標は人口または国のGDPの変化との相関が高く、また指標間の相関も高いことが判明した。本研究で定量的に分析する6つの

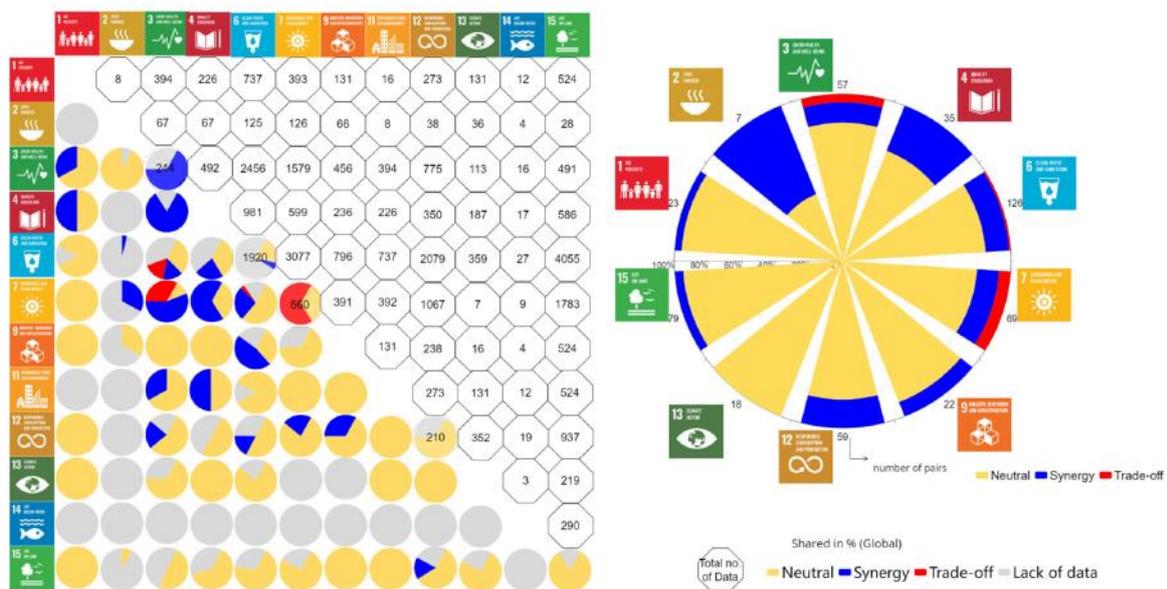


図-1.3 分析したSDGサブ指標間のサンプル数(左)とサブ指標間の相関関係の内訳(右)。ここでは、サブ指標の過去の変化が同じ傾向(影響が正、すなわち好ましい変化をプラス、そうでない場合はマイナスに数値を調整した後の分析)の場合はシナジー、逆の傾向の場合はトレードオフと記載している

SDGサブ指標とは、直接（9つ）および間接（4つ）の相関が高いサブ指標が合計15であったことから、本研究課題では水に関するSDG指標の約半分の変化傾向を分析している（図-1.3、表-1.2）。

表-1.2 水に関連する31のSDGサブ指標と、本研究課題で定量的に分析した6つのサブ指標との相関関係。直接的な相関が高いもの（緑）と間接的な相関が高いもの（黄色）をそれぞれ示す。数値はスピアマンの順位相関係数を示す。

No	Water related indicators (% indicators with ρ -value > 0.4 and ρ -value < - 0.4)		
1	1.5.1	1.9 %	Number of deaths and missing persons
2	2.3.1	0.9 %	Production per labour unit by classes of farming/pastoral/forestry enterprise
3	2.3.2	1.9 %	Average income of small-scale food producers
4	2.4.1	No data	Agricultural area under productive and sustainable agriculture
5	3.3.3	5.5 %	Malaria
6	3.3.5	10.2 %	Number of people requiring interventions against neglected tropical diseases
7	3.9.2	3.7 %	Mortality rate attributed to unsafe water, unsafe sanitation and lack of hygiene
8	4.a.1.a	13 %	School with drinking water
9	4.a.1.b		schools with basic handwashing
10	6.1.1	9.5 %	Population with safely drinking water
11	6.3.1	1.9 %	Proportion of wastewater safely treated
12	6.3.2	0.9 %	Proportion of bodies of water with good ambient water quality
13	6.4.1	6.5 %	Change in water-use efficiency over time
14	6.4.2	0.9 %	Proportion of water withdrawal and freshwater
15	6.6.1a	5.6 %	Nationally derived extent of open water bodies
16	6.6.1b		Water body extent
17	6.a.1	3.7 %	Amount of water- and sanitation-related official development assistance
18	6.b.1		communities in water and sanitation management supported by government
19	9.5.1	3.7 %	Research and development
20	11.3.2	No data	Cities with a direct participation structure of civil society in urban planning
21	11.5.1	1.9 %	Number of deaths and missing persons
22	12.2.2	1.9 %	Domestic material consumption
23	12.4.2a	11.1 %	Hazardous waste treated or disposed (%)
24	12.4.2b		Electronic waste recycling (%)
25	13.1.2	0.9 %	Number of deaths and missing persons
26	14.3.1	8.3 %	Average marine acidity (pH)
27	15.1.1	0.9 %	Forest area as a proportion of total land area
28	15.1.2	2.8 %	terrestrial and freshwater biodiversity in protected areas
29	15.3.1	0.9 %	degraded land over total land area
30	15.5.1	1.8 %	Red List Index

Direct
Indirect
No data
Not classified

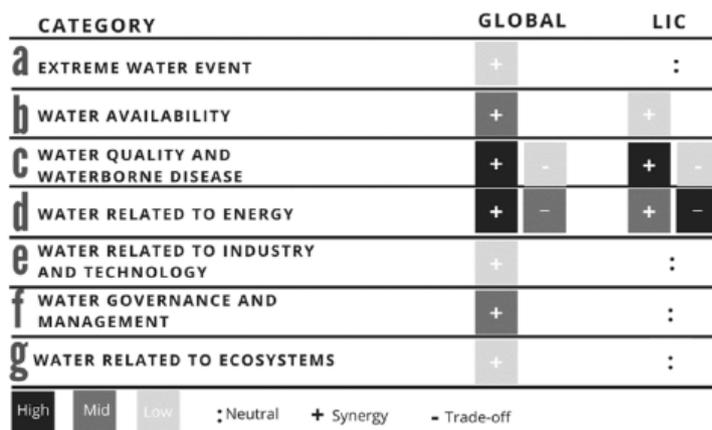


図-1.4 水に関するSDG指標の相関関係のエキスパートジャッジメント

SDG目標のうち、目標3と目標6は他の水に関するSDG指標と最も高いシナジーを示した。たとえば、家庭および学校における質の良い水へのアクセス（4. a. 1）は水質に関連する目標と高い相関を示しており、学校における飲料水へのアクセス（4. a. 1a）や手洗いの水へのアクセス（4. a. 1b）は、水利用の効率（6. 4. 1）や安全な飲料水へのアクセス（6. 1. 1）の指標と高い相関がある。

これらの指標の相関は、データが得られたすべての国を分析した場合（グローバル）では顕著であったのに対して、低所得国（LIC: Low Income Countries）では水災害、産業及び技術、ガバナンスおよび生態系に関する相関は見られなかった（図-1.4）。水に関するSDG指標との相関関係が最も高いサブ指標は水に関係するエネルギー関連のサブ指標であり、グローバル、LICともにシナジーもトレードオフも大きいことが判明した。本課題ではサブテーマ3で検討したバイオエネルギーの生産とそれに伴う水資源への影響がこのサブ指標ともっとも関連が深い。

表-1.3には、各サブテーマで算定された水に関するSDG指標と、緩和策および適応策に対するシナジーおよびトレードオフの分析結果を示す。全球および、アジア、アフリカ、オセアニア、ヨーロッパ、中央・南アメリカ、北アメリカの地域ごとの分析結果を示す。それぞれ、気候政策の有無により、シナジー（SDG指標が改善）およびトレードオフ（同指標が悪化）した場合の変化を示す。農業に関する指標以外は、指標が改善ないし悪化した場所に住む人の合計人数に影響人口を示し、農業に関するSDG指標は、小規模農家の生産性（USD）を示す。グローバルには緩和策も適応策もシナジーがトレードオフを大幅に上回ることから、水に関するSDG指標は、気候政策によるシナジーが大きいことが判明した。特にシナジーが大きいのは、現在でも水に関するSDG指標が低い傾向にあり、かつ気候変動による悪化が予想されるアジアとアフリカであり、緩和策と適応策では同程度のシナジーが確認できた。

表-1.3 緩和策（上）および適応策（下）に対する、洪水曝露人口、水質、水ストレス、バイオ燃料の増産による水ストレス変化、小規模農家の生産性のシナジー（青）とトレードオフ（赤）の分析。小規模農家の生産性は1日当たり1世帯当たりの生産性（USD）を示し、その他はシナジーおよびトレードオフに影響される人数（100万人）を示す。

Mitigation Impact (million population)

Region	Flood		Water Quality		Water Stress (Supply/Demand)		Water Stress (BECCS)		Small-scale farmer productivity (\$/hh/d)	
	Synergy	Trade-off	Synergy	Trade-off	Synergy	Trade-off	Synergy	Trade-off		
Asia	9.61	-0.24	12.57	0	37.92	0				-4.35
Africa	1.87	-0.53	8.58	-2.80	39.88	-18.01	16.26			
Oceania	0.05	0	0	0	0	0				
Europe	0.18	-1.98	33.84	0	11.01	-2.40				
Central and South America	0.22	-0.67	17.93	0	7.67	0	18.09			
North America	0.36	0.00	16.94	0	24.47	0				
Global affected population	12.29	-3.42	89.87	-2.80	120.94	-20.42				
% of Global Population	0.17%	-0.05%	1.23%	-0.04%	1.65%	-0.28%				

Adaptation impact (million population)

Region	Flood	Water Quality	Water Stress (Supply/Demand)		Small-scale farmer productivity ((\$/hh/d)	
	Synergy	Synergy	Synergy	Trade-off		
Asia	16.60	269.59	129.96		0.5	-2.62
Africa	0.51	23.87	3.03	-30.42		
Oceania	0	0	2.33	0		
Europe	0	51.20	21.45	0		
Central and South America	0.02	18.85	8.15	-17.05		-5.72
North America	0	25.14	3.75	-2.12		
Global affected population	17.13	388.66	168.67	-49.59		
% of Global Population	0.23%	5.30%	2.30%	-0.68%		

図-1.5には、国ごとの、気候政策とSDG指標のシナジーとトレードオフを分析した結果を示す。シナジーおよびトレードオフの大きさについては、まず、気候政策によってSDG指標が正または負の変化が見られた国のうち、指標ごとの変化幅の順位が対象国の上位および下位10%についてを高いシナジーまたはトレードオフ、上位および下位30%を中程度のトレードオフとしてそれ以外を低いトレードオフ、シナジーと定義した。次に、中程度以上のシナジーまたはトレードオフと判定された指標があった場合は、その数値を1足す、ということを行った。すなわち、シナジーまたはトレードオフは合計で5のサブ指標（水災害の2つのサブ指標は同じ洪水曝露人口の指標であるため、本課題で対象とする6つサブ指標は最終的に5のサブ指標で評価）の合計となる。集計した結果では、同時にシナジーまたはトレードオフが同一の国で見られた場合はアフリカ、東南アジア、アメリカ合衆国などであったが、その合計数は最大で2であり、グローバルにはシナジーまたはトレードオフが生じる国は指標によってばらばらであることが判明した。

気候政策と水に関するSDG指標とのシナジーはアフリカと東南アジアで多くみられると共に、オーストラリアやアメリカ合衆国、中南米、カナダなどで確認できた。一方、トレードオフに関してはアジアでは見られず、主にアフリカ、中南米に見られた。この理由は、緩和策に関するトレードオフは、水資源では降水量の増加、洪水では降水量の減少などといった気候変動に対する降水量の増減傾向が反映していることや、アジアは水資源がそもそも豊富であり、バイオ燃料の増産に伴う灌漑水利用の増加が現地の水資源への影響がさほどないことなどが影響していると思われる。適応策に関しては、現在からの洪水に対する防護レベルの増加が大きく見込める地域や社会経済の発展に伴う水利用効率の改善が期待される発展途上国でシナジーが大きいことが判明した。

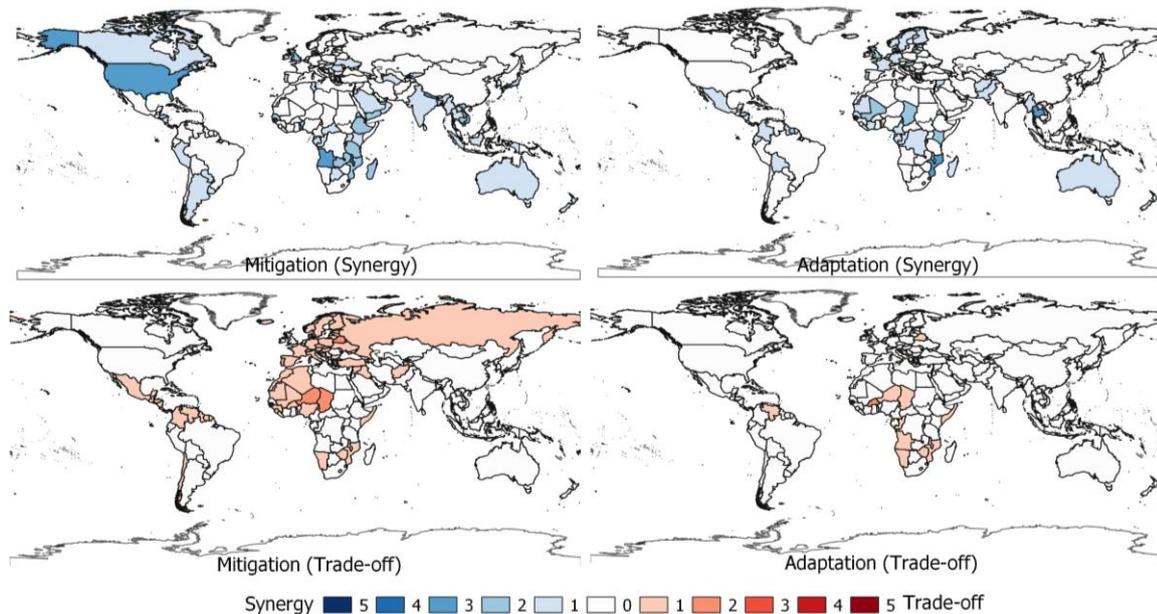


図-1.5 緩和策（左）および適応策（右）に対する水に関するSDG指標のシナジー（上）とトレードオフ（下）の国ごとの合計。分析した5つのSDGサブ指標の合計を示す。合計に使用した水に関するSDG指標は、河川洪水、水質、水ストレス（需要と供給の比）、水ストレス（バイオ燃料の増産のための灌漑に伴う変化）、小規模農家の生産性の5つ。

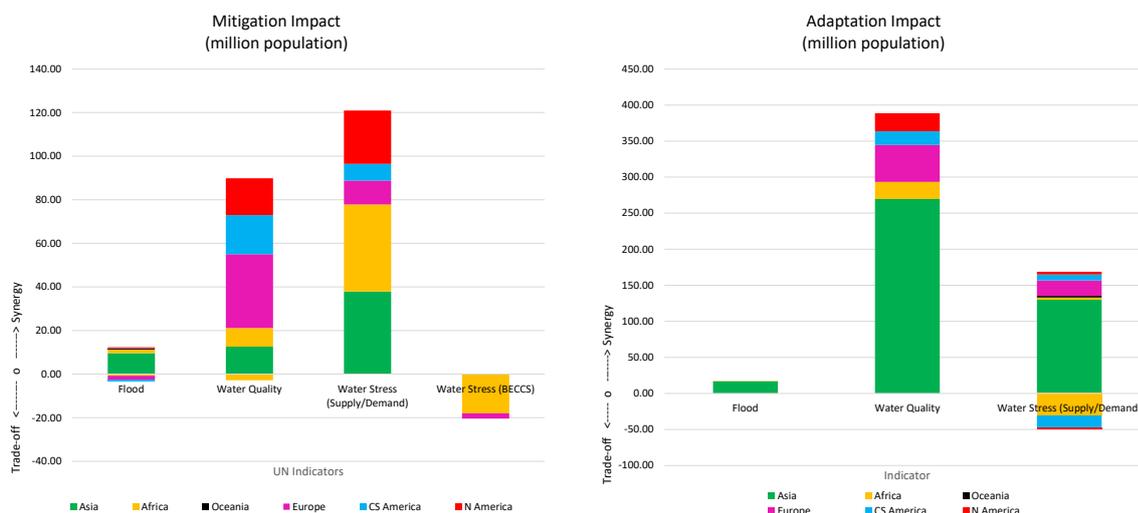


図-1.6 緩和策（左）および適応策（右）に対する水に関するSDG指標のシナジー（棒グラフの正）とトレードオフ（負）の影響人口（100万人）。小規模農家の生産性を除く4つのSDGサブ指標における変化が見られたグリッドの人口を足したもの。

このように求めたシナジーおよびトレードオフの同時発生の合計値は、どの地域で緩和策や適応策と言った気候政策が水に関するSDG指標に影響を与える可能性があるかを概観する上では有用な情報であると言える。しかし、対象とする国の間におけるSDG指標の変化から、相対的に指標の変化が大きい国の上位を選び、シナジーまたはトレードオフとして表示していることから、これらの変化が社会に与える影響を分析することができない。また、同じ1つの国の中においても、たとえば中国やアメリカ合衆国、ロシアなどの面積が大きい国では、地域によるSDG指標の違いが大きく、気候変動に対するシナジーまたはトレードオフの変化が大きい地域とそうでない地域もある。

そこで、これらの指標の変化がどの程度の人に影響を与えるかについて、グローバルな数値モデルによって、それぞれ計算された0.5度グリッドごとのSDGのサブ指標の変化に、0.5度グリッドの人口分布を重ね合わせることで、シナジーとトレードオフの影響人口を算定した（図-1.6）。

図-1.5のように国ごとの相対的な評価ではなく、影響人口という観点から評価すると、その絶対数はシナジーの恩恵を受ける人数と比べると非常に少ないことがわかる。緩和策は、水に関するSDG指標のシナジーの恩恵を受ける人口は0.12-1.2億人（世界人口の0.17-1.7%）であるのに対して、トレードオフに直面する人口は280万人-0.2億人であり、シナジーの6分の1程度であった。

水災害に関するSDG指標の変化に対しての影響人口の構成に着目すると、大半がアジアにおける影響人口である。これは、温暖化によって特にアジアで豪雨および河川洪水が増えることと対応しており³⁾、緩和策に伴うその変化の低減や、河川防護のような適応策といった今後の気候政策が、気候変動による悪影響を低減することに効果的であるためである。ただし、河川洪水により浸水する地域は、大河川の近傍や低平地等、ある程度限られた地域であることから、より広域に影響を与える、水質および水ストレスに関するSDG指標における影響人口の方が絶対値としては数倍以上大きかった。同様に、乾燥地におけるバイオ燃料の増産や将来の気候変動に伴う降雨と蒸発の変化に対する影響が大きいアフリカにおいても、気候政策が水に関するSDG指標に与えるシナジーの影響人口は大きくなった。特に、緩和策に伴う乾燥化の低減等が水ストレスの悪化を低減する効果が大きく、シナジーの影響人口の約3分の1を占める。

作物への施肥量を半減することを想定した適応策では、河川水の窒素濃度の改善の恩恵を受ける人口が広域に分布するため、シナジーの影響人口は他のシナリオと比べて大きい結果となった。しかし、この適応策は各国の社会経済発展の度合いや、気候変動に伴う作物収量の減少を補填するなどのシナリオに基づ

いたものではないため、様々な政策オプションや社会経済シナリオの前提条件とリンクした形での施肥節約の適応策シナリオを考慮する必要がある。そこで一例として、サブテーマ4で推計された、土壌への炭素貯留による収量増加から、将来に節約できる施肥量を推計した適応シナリオについても分析した。その結果、同シナリオにおける河川水の窒素濃度の改善は限定的であり、グローバルな変化は1%未満であることから、河川水の窒素濃度汚染の改善には、より大きい政策が必要であることが判明した。

本課題で定量的に緩和策のトレードオフを分析したもののうち、図-1.6に反映したSDGサブ指標は、気候変動に伴う降水の降り方などの変化による水災害および水資源の変化、降水と水温変化および将来の施肥量の変化による河川水の窒素濃度変化、積極的な緩和策であるバイオ燃料の増産に伴う水資源の変化の4つである。そのため、たとえば将来のエネルギーミックスの変化や、より複雑な社会経済の制度水質の変化を通じた他の水に関するSDG指標への影響については分析できていないため、影響人口は限定された指標であることに留意する必要がある。

5. 研究目標の達成状況

サブテーマ1で設定した2つの目標はいずれも目標通りの成果を上げた。

目標1については、当初の目標を上回り、2021年にNature Climate Change誌に掲載されるとともに、IPCC第6次評価報告書に図表つきで引用されるなど、同分野における科学的知見の充実に大きく貢献した。この目標に関連する研究では、CMIP6実験を入力として河川氾濫モデルCaMa-Floodによる2100年までの全球河川氾濫シミュレーションを実施し、貧困（SDG1）と防災（SDG11.5）に共通のSDGs指標の1つである、洪水曝露人口（洪水時の浸水域に住む影響人口）の将来変化を算定し、低収入国における将来の洪水被害の見通しと、費用便益の観点から合理的な適応レベルだけでは将来の残余被害が大きくなることを示した。これらの知見は、制度的または経済的なバリアーや、緩和策が進まない高温暖化シナリオにおける適応の限界を定量的に示すものである。また、気候変動による降水量および水循環の変化を考慮した地域詳細な河川洪水に対する適応策の国際的な支援につながる知見である。

目標2については、目標通りの成果を上げた。各サブテーマから提供を受けた水に関するSDG指標の将来推計を分析し、国ごとおよび地域ごとの緩和策・適応策とのシナジーとトレードオフの統合的な解析を行った。各指標の影響人口ならびに国の数を参考にシナジーやトレードオフの国間の相対的な大きさからレベルを設定し、地域ごとの傾向を集計した結果、東南アジア、アフリカ、北米、南米でシナジーが多く見られ、特にアフリカとインドシナ半島では、緩和策が水に関するSDG指標に対してシナジーが大きいことが判明した。また、以下の3つの環境政策に資する科学的知見としてまとめられた。①水に関するSDG目標に対しては、気候政策によるシナジーがトレードオフを大きく上回ることから、トレードオフの懸念される地域・項目に関して配慮しつつ積極的に進めるべきである。②トレードオフが懸念される地域のうち、緩和策に伴う降水量の増減傾向が、洪水ないし水資源の観点で悪影響を与える地域については、それらの影響を軽減するための追加的な適応策を考慮することで影響を低減する必要がある。③シナジーもトレードオフも大きい国はアジアやアフリカの途上国が中心であることから、たとえば洪水防護への資金援助や水利用効率を上げるための技術援助など、適応策への国際的な支援が重要であることが示唆される。

さらに、これらの各サブテーマの個別の成果にくわえて、河川洪水が作物収量へ与える影響（サブテーマ1と4）、将来の収量変化または土壌炭素貯留の緩和策オプションによる施肥量の変化と河川水質への影響（サブテーマ2と4）、バイオエネルギー燃料の増産に伴う水資源の制約と小規模農家の状況の分析（サブテーマ3とサブテーマ4）といった、サブテーマ間の連携により、水を介したSDG指標の相互作用についても理解が進んだ。

気候政策に関する政策オプションとしては、資金援助に伴う河川洪水への適応策の効果、土壌への炭素貯留による気候緩和効果ポテンシャルと作物収量低減効果および水質改善の効果、バイオ燃料の増産ポテンシャルとそれに伴う水資源への影響、海水淡水化による沿岸都市の水資源利用可能ポテンシャル、について、それぞれグローバルかつ定量的な分析を完了した。得られた成果はインパクトファクターの高いジャーナル

への投稿を目指して準備中であり、IPCC第7次報告書等への貢献も大いに期待される成果である。

6. 引用文献

- 1) M. Tanoue, R. Taguchi, H. Alifu and Y. Hirabayashi: *Nat. Clim. Chang.*, 11, 823-826 (2021), Residual flood damage under intensive adaptation.
- 2) A. Rimba and Y. Hirabayashi: *Water*, 15, 613 (2023), Interlinkages of water-related SDG indicators globally and in low-income countries.
- 3) Y. Hirabayashi, M. Tanoue, O. Sasaki (2021) Global exposure to flooding from the new CMIP6 climate model projections. *Scientific Reports* 11, 3740. doi:10.1038/s41598-021-83279-w.

II-2 気候政策とSDGsの同時達成における水熱質環境のシナジーとトレードオフ

国立大学法人東京大学

未来ビジョン研究センター
 <研究協力者>

沖 大幹

未来ビジョン研究センター
 大学院工学系研究科

木口 雅司
 徳田 大輔

[要旨]

本課題は、水熱質循環に着目し、全球水環境モデル群を活用することで、実施の際の水の量的・質的制約の可能性を考慮しつつ、気候目標とSDGsのシナジーとトレードオフを定量的かつ地域詳細に整理し、同時達成の可能性を評価した。また、同時達成が難しい課題や地域を特定・抽出し、解決策の検討を行った。全球水温モデルHEAT-LINKを湖沼と結合した水熱動態モデルを開発し、世界の主要河川で検証を行い、季節変化の再現が可能であることが示された。また将来の河川水温は温暖化に伴い上昇し、その季節性も示された。この開発された水熱動態モデルと全球窒素循環モデルTNCMを組み合わせて、窒素濃度を推計し、将来の気候変動下における窒素濃度負荷を示した。将来の河川水温と窒素濃度の変化を全球主要河川において提供し、今後の国際会議の場における日本政府の科学的知見の蓄積に貢献するものである。

気候変動の適応策として、農地での収量増加を目的に土壌有機炭素（SOC）の増加がしばしば議論されている。この炭素貯留は河川に流出する窒素を削減するという影響もあるため、現在及び将来シナリオの窒素投入量データを用いて、現在及び将来の水熱循環の推計結果から、その緩和策による水質と収量増加とのトレードオフとシナジーを示すことができた。

1. 研究開発目的

本課題は、水熱質循環に着目し、全球水環境モデル群を活用することで、実施の際の水の量的・質的制約の可能性を考慮しつつ、気候目標とSDGsのシナジーとトレードオフを定量的かつ地域詳細に整理し、同時達成の可能性を評価することを目的とする。また、同時達成が難しい課題や地域を特定・抽出し、解決策の検討を行う。

2. 研究目標

本サブテーマでは、以下の4つを目標とする。

- 1) 全球水温モデルHEAT-LINKを湖沼と結合した水熱動態モデルを開発し、温暖化に伴う水温変化を推計する。
- 2) 水温予測および全球窒素循環モデルTNCMから食糧に関するSDG2の達成可能性の評価を行う。
- 3) サブテーマ3と連携し、質と量の双方から生活用水の評価を行い、安全な水供給（SDG6）の達成評価を行う。
- 4) 水温や水質に関する気候政策とSDGのシナジーとトレードオフの解析を行い、シナジーを多くしトレードオフを可能な限り小さくするような方策の検討を行う。

3. 研究開発内容

Tokuda et al. (2019) で開発された全球水温モデルHEAT-LINKに湖沼を結合するため、河川－湖沼ネットワークの情報が必要となる。HEAT-LINKは1次元保存則で、全球河川モデルCaMa-Flood (Yamazaki et al., 2013) と結合させることで、氾濫が熱収支に及ぼす影響を表現している。入力を気象外力として (Kim et al., 2017)、陸面モデルMATSIRO (Takata et al., 2003) として結果を検証されている。湖沼内の過程の

簡略化が課題で、河川と湖沼では温度成層によって卓越する過程が異なるため、物質水文輸送の定量評価に必要な河川と湖沼を区別して表現する必要がある。モデル開発の手順は、1) 河川・湖沼を明示した河道網の開発、2) 湖沼モデルの開発、3) 河川・湖沼モデルの結合、そして4) 水質スキームの導入である。

河川-湖沼ネットワークは、河道データとしてMERIT-Hydro (Yamazaki et al., 2019)、湖沼分布データとしてHydroLAKES (Messenger et al., 2016) を用いた。MERIT-Hydroは高解像標高データMERIT DEM (Yamazaki et al., 2017) を用いており、そこから派生して河道情報が得られ、空間分解能は3秒(約90m)である。一方、HydroLAKESは全球で140万個以上の天然の湖沼と人工湖の名前や平均水深などのシェイプデータである。シェイプデータであることから、MERIT-Hydroと同じ空間分解能にラスタデータへ変換した。上述した2つのデータセットを結合する際、湖沼の大きさがアップスケール(3秒から15分)したグリッドより大きい小さいかで、結合手法を準備する必要がある。小さければサブグリッドとして扱い、大きければ湖沼の流出口を単位集水域の流出口に固定することで対応した。ちなみにアップスケール手法はFLOW (Yamazaki et al., 2019) を用いた。

湖沼モデルの開発は、水動態モデルと熱動態モデルに分ける。水動態モデルでは、流出量の季節変動と水の流出入に伴う質量の保存を必要条件とした。質量の変化に対しては面積を変化させず水位の変化のみで対応する。熱動態モデルでは、鉛直1次元の拡散法定期を用い、各湖沼は水平分割せず大気境界条件は平均とした。湖沼表層水温(skin temperature)は移流に伴う温度変化の考慮が困難であったので、第1層温度で水面温度を代用し、水面の熱フラックスを河川水温モデルと同じように計算した。渦拡散係数は、Henderson-Sellers (1985) によるパラメタリゼーションを実施した。

湖沼モデルを開発したところで河川モデルとの結合を行う。移流スキームについて述べると、河川モデルは水平1次元、鉛直0次元、湖沼モデルは水平0次元、鉛直1次元である。そこで河川から湖沼へは、湖沼の表層に追加して水量が変化するたびに上から層構造を再計算する。一方、湖沼から河川へは、流出口に接している層の平均を河川に流入させる。併せて、温暖化時の河川水温の計算を実施した。全球気候モデルMIROC6 (Tanabe et al., 2019) を用いて、温暖化実験(SSP126、SSP585)を実施した。計算期間は、現在気候は1960~1990年、将来気候は2071~2100年である。

最終的に水質スキームの導入を行う。水質スキームは、Huang et al. (2021) に基づいて実装された。窒素濃度のしきい値は、日本の閉鎖性水域の基準値(0.2 mg/L)を参考に、過去の国連の良好な水域のSDG目標を満たさない国、地域の分布と最も整合性のあることから0.2 mg/Lの10倍希釈の0.02 mg/Lの濃度を基準とした。

4. 結果及び考察

河川湖沼結合モデル. 河川・湖沼を明示した河道網の開発では、図-2.1のように、湖沼を入れることによる効果は大きく、流域界も空間解像度を上げてもしっかり示され、効率的な計算を可能とした。実際の湖沼の大きさとの比較の結果(図は省略)も十分な精度を示した。続いて、湖沼モデルの開発について述べる。水動態モデルは、流出量の季節変動の表現と水の流出入に伴う質量保存を必要条件として構築した。一方、熱動態モデルは、各湖沼を水平分割せず大気境界条件は平均とし、鉛直1次元の拡散方程式を用いることとした。水面温度はいわゆる skin temperature ではなく、第1層温度で代用した。skin temperature は、移流に伴う温度変化を考慮することが難しいため、省略した。水面の熱フラックスは、すでに開発されている河川水温モデル(Tokuda et al., 2019)と同様に取り扱った。渦拡散係数は、Henderson-Sellers (1985) によるパラメタリゼーションを用い、成層条件下の拡散係数をリチャードソン数で補正し、密度拡散と風応力による乱流拡散の影響を考慮した。簡単な模式図を図-2.2に示す。ここで開発された湖沼モデルと河川モデルを結合した。移流スキームは、質量及び熱量の保存と湖沼内の層構造の表現を図るため、1)河川モデルは水平1次元、鉛直0次元、湖沼モデルは水平0次元、鉛直1次元の構造とし、2)河川は湖沼の表層に追加する形をとり、湖沼の水量が変化するたびに上層から層構造を再計算し、3)湖沼からは、流出口(堰の上)に接している層の平均を河川へ流した。モデル構造の特徴は、湖沼モデルの改良・交換と両モデル間の矛盾を回避するため、水路網、外力データ、物理家庭、時間管理のみを共有し、移流の計算はそれぞれで実施した。

例えば、河川グリッドと湖沼グリッドではそれぞれ流出量を計算した。その結果、流入量を河川と湖沼を合わせたグリッドで計算し、その流入量をカプラーを通じて交換、そして同じタイムステップで計算することで、質量と熱量の保存をすることができた。

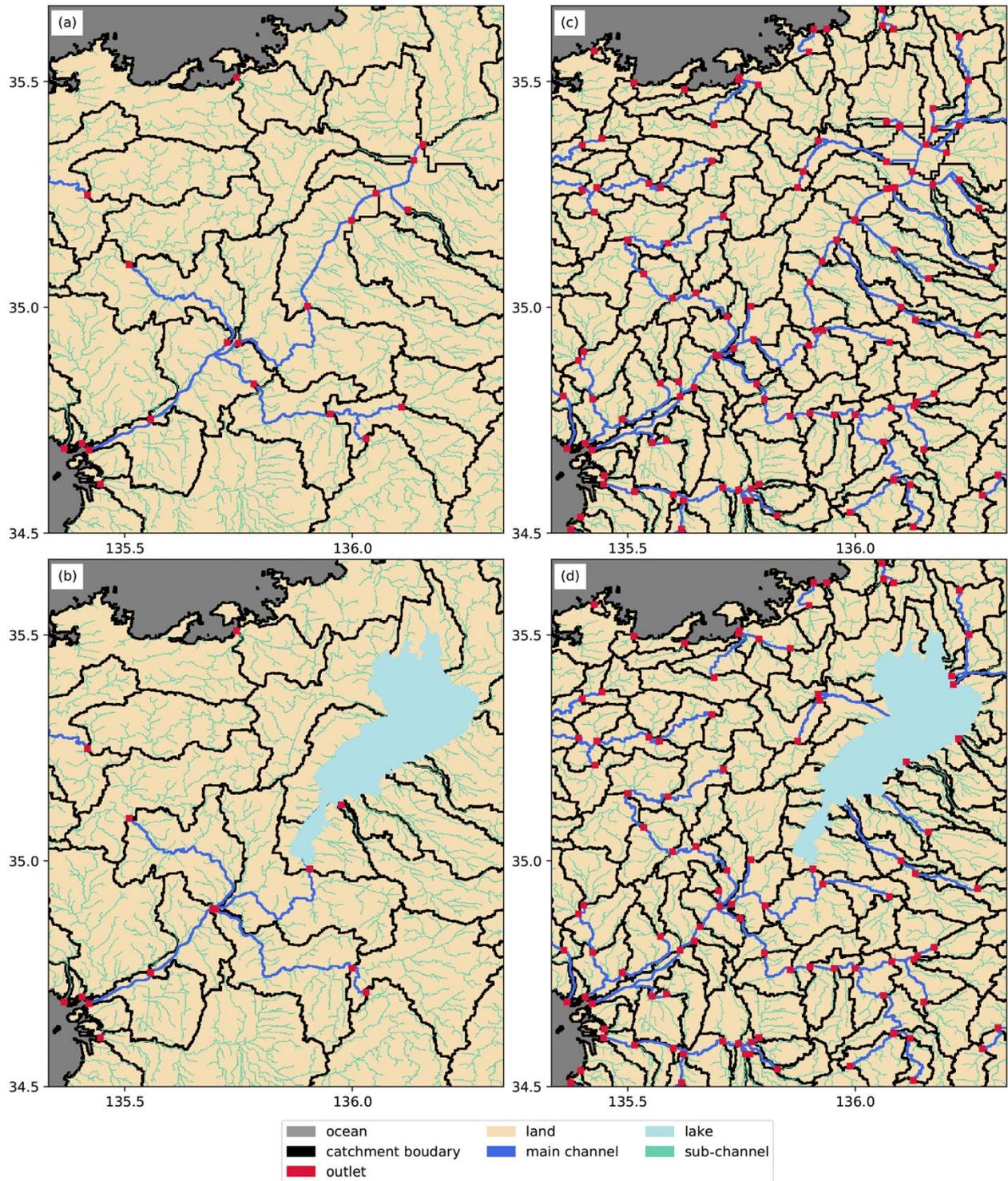


図-2.1 河川-湖沼ネットワークとそのアップスケールの例。上段と下段は湖沼の有無、左側と右側は空間解像度が15分と3秒のケースを示す (Tokuda et al., 2021)。

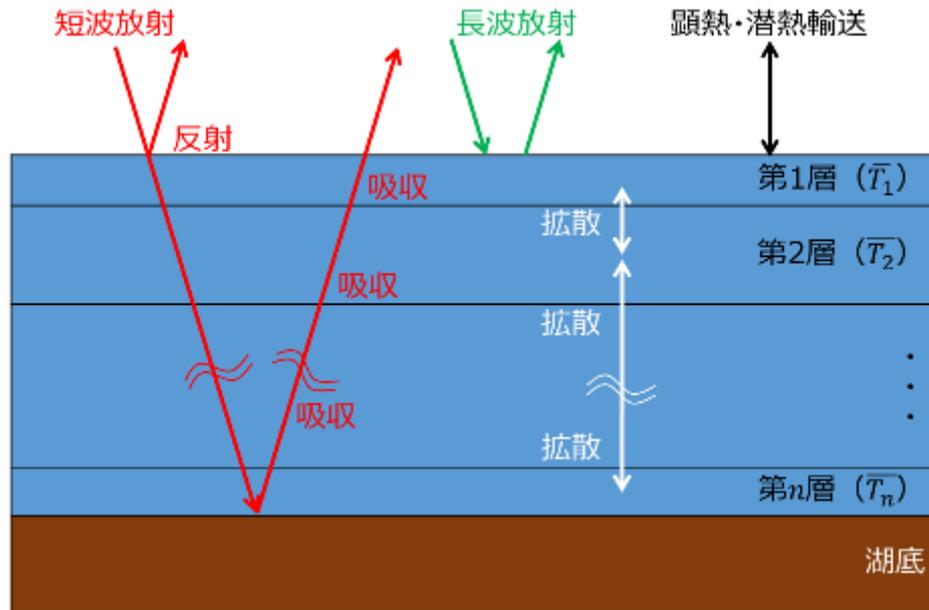


図-2.2 湖沼モデルにおける模式図。

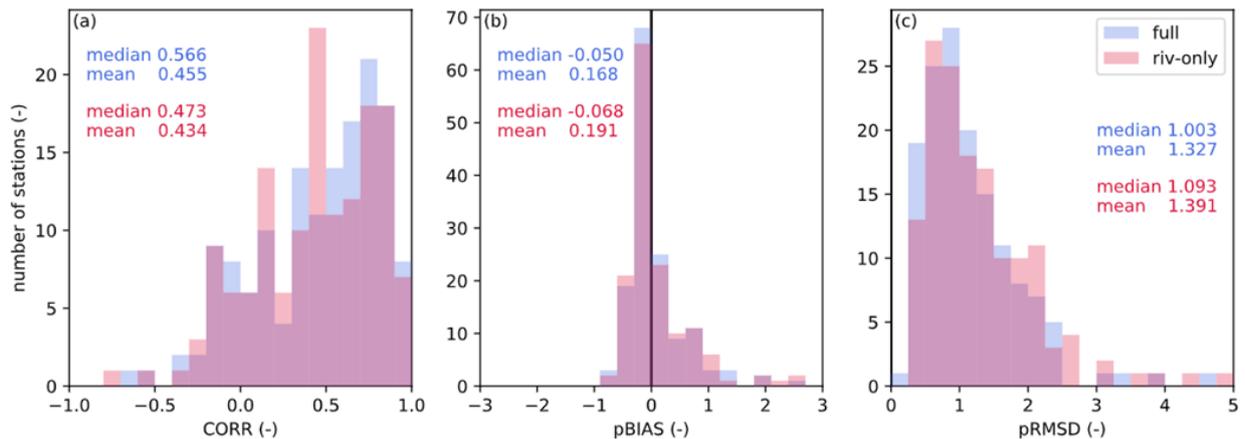


図-2.3 河川流量の現地観測データを用いた、結合及び非結合モデルの結果の差 (Tokuda et al., in print)。青が河川湖沼結合モデルと観測データとの比較、赤が非結合モデル (河川のみ) と観測データとの比較を示す。(左) 相関係数、(中央) バイアス (正がモデルが過大評価であることを示す)、(右) RMSE である。

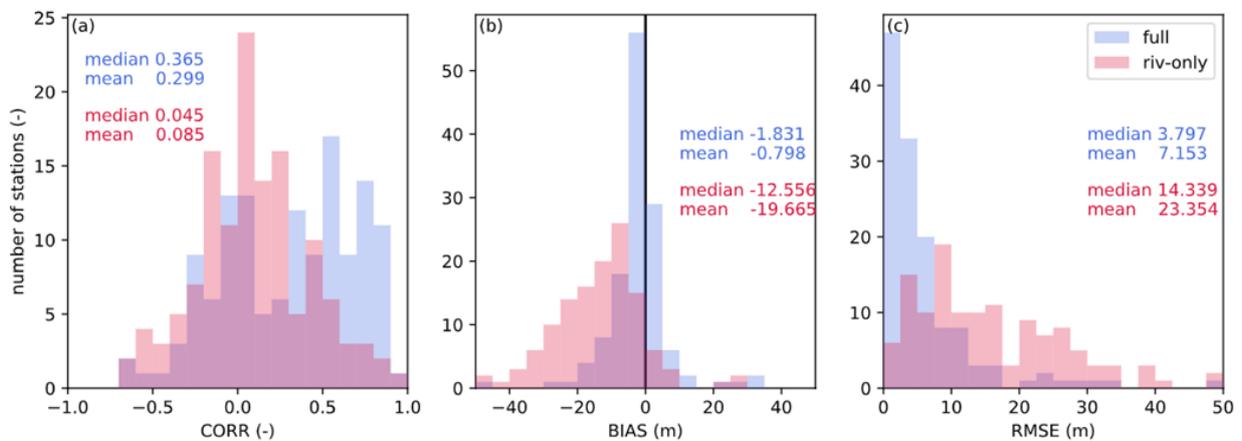


図-2.4 図-2.3 に同じ。但し、湖沼水面標高の人工衛星データを用いた結果。

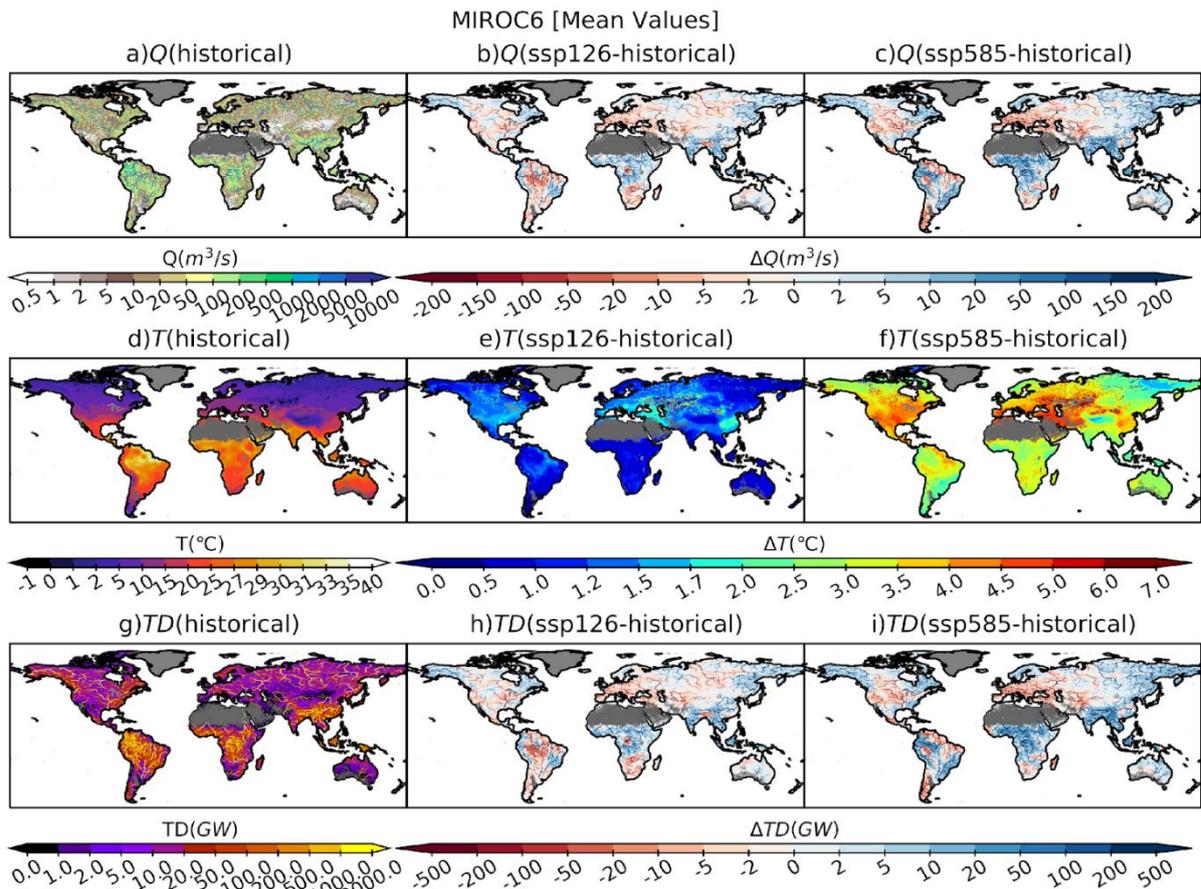


図-2.5 MIROC6を用いた温暖化時 (SSP126、SSP585) と現在気候との差の空間分布。a) 現在気候での河川流量 (m^3/s)、b) SSP126 と a) との差、c) SSP585 と a) との差、d) 現在気候での河川水温 ($^{\circ}C$)、e)、f) はそれぞれ SSP126 と SSP585 と d) との差、g) は現在気候での河川熱量指標 (GW)、h)、i) はそれぞれ SSP126 と SSP585 と g) との差。

こうして開発された河川湖沼結合モデルの結果は、観測データを用いて全球で検証した。河川流量および河川水温の観測データは、Global Runoff Data Center (GRDC) と Global Environmental Monitoring System (GEMS) から収集した。観測データを用いたモデルの全球検証の結果を図-2.3 に示す。最初に、河川湖沼結合モデルと、非結合モデル (河川のみ) を、146 地点の河川流量観測データと比較し、河川モデルと湖沼モデルを結合した時としない時とを比較した。湖沼の貯水効果の過大評価と環境用水の過小評価が改善されたことがわかる。次に、124 の湖沼において、G-REALM (Birkett et al., 2018) の $100km^2$ より大きい湖沼における水面標高を人工衛星で測定したデータと比較した (図-2.4)。その結果、河川流出量を考慮することによってバイアスが改善されていた。

温暖化時の河川水温. 上記で開発された河川湖沼モデルを用いて、温暖化時の河川水温の計算を実施した。全球気候モデル MIROC6 (Tanabe et al., 2018) を用いて、温暖化実験 (SSP126、SSP585) を実施した。計算期間は、現在気候は 1960~1990 年、将来気候は 2071~2100 年である。図-2.5 は、現在気候の河川流量、河川水温、河川熱量指標 (流量 \times 河川水温 \times 水の比熱容量 \times 水の密度) と将来気候下での変化を示したものである。全球平均で見ると河川水温は SSP126 では 2050 年ころから昇温しないが、SSP585 では 2100 年まで昇温し続けることが示された。変化のパターンはあまり変わらないが、その差は特に河川水温が大きく変わっていることがわかる。特に北米南部、地中海から中央アジアにかけてその差が顕著である。

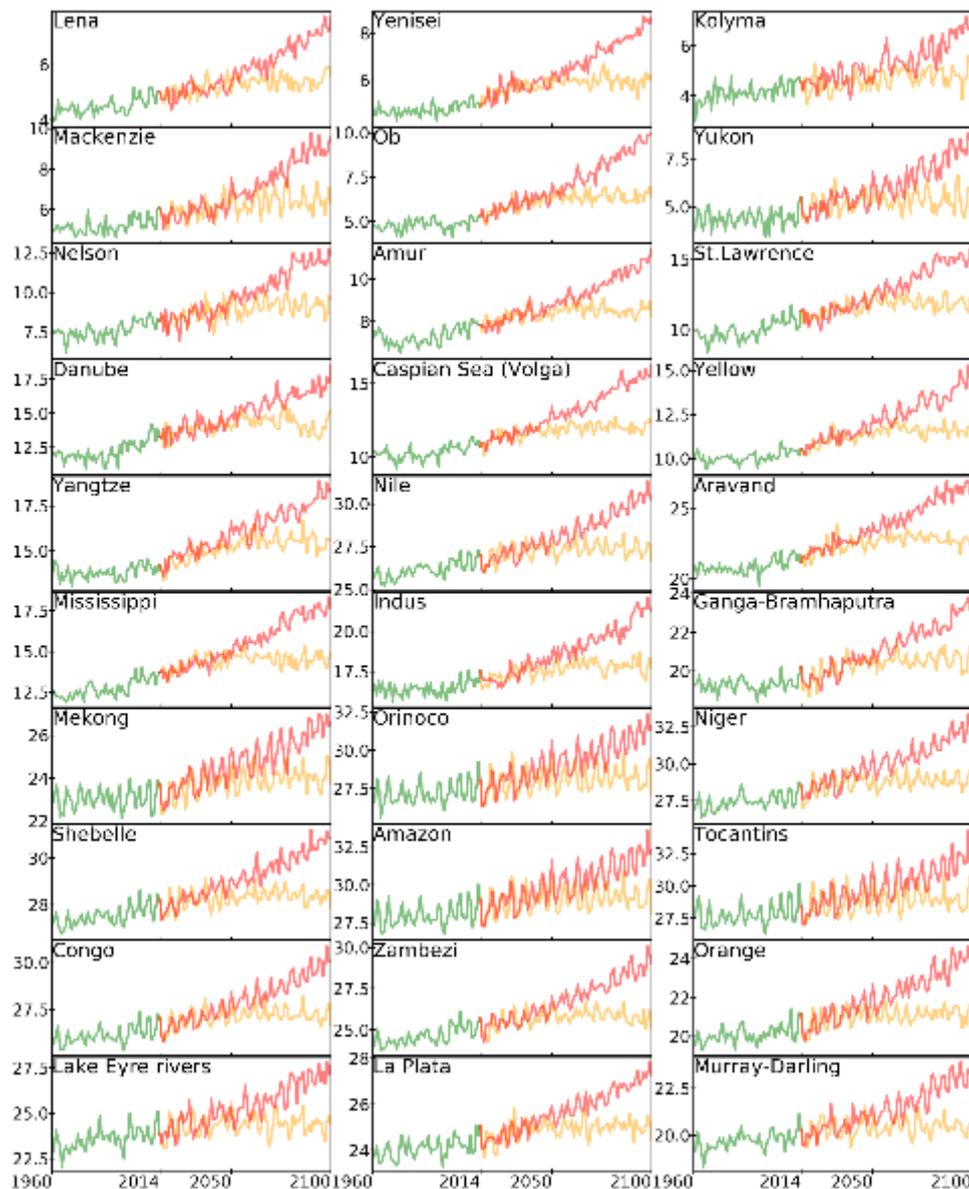


図-2.6 MIROC6での河川水温(°C)の時系列データ。緑線が現在気候、赤線がSSP585、橙線がSSP126。

主要な29の河川において、分布をみると、SSP585では昇温量に幅があるがいずれも順調に上昇するが、SSP126では、全球平均同様2050年ころからほぼ一定になるが一部の河川(コンゴ川やザンベジ川など)では、2050年以降下降するなどの地域性があることが分かった(図-2.6)。さらに季節変化(図-2.7)からは、寒冷域のスレーブ川、レナ川、オビ川、アムール川は夏季に過大評価が見られる。また、メコン川は3~5月、ガンジス川は5~6月に過大評価で、ちょうど雨季の前である暑季にあたるため河川流量の大きな変化のある時期であることが要因と考えられる。今後、改良に向けた検証が求められる。

開発された全球窒素循環モデルに、サブテーマ4から提供された過去及び将来(SSP126、SSP585)の 0.5° グリッドごとの窒素投入量($tN/年$)を入力値として用いた。なお、MIROC6のデータが 1° グリッドのため窒素投入量をアップスケールする必要がある。海陸マスクの不一致を解消するため、MIROC6の海に割り当てられた場合、隣接する8グリッドのうちの陸グリッドに平等に分配する処理を実施することで解消した。また、面積が異なる点については、まず面積単位、秒単位に変換($tN/m^2/s$)し、流出量で除する(tN/kg)ことで対応した。窒素濃度のしきい値は、日本の閉鎖性水域の基準値(0.2 mg/L)を参考に、過去の国連の良好な水域のSDG目標を満たさない国、地域の分布と最も整合性のあることから 0.2 mg/L の10倍希釈の 0.02 mg/L の濃度を基準とした。全球の1961~2014年平均の結果が図2-8に示す。さらに将来については、SSP126とSSP585での計算を行った(図-2.9)。この結果は、サブテーマ1に提供され、統合解析が行われ、詳細な結

果はここでは省くが、緩和策の効果は、アフリカや西アジアといった半乾燥地域～砂漠域で低いトレードオフとなる以外は、シナジーであることが分かった。この結果は、気候政策である緩和策が多く地域でSDG6.3.2の達成にも資することを示している。

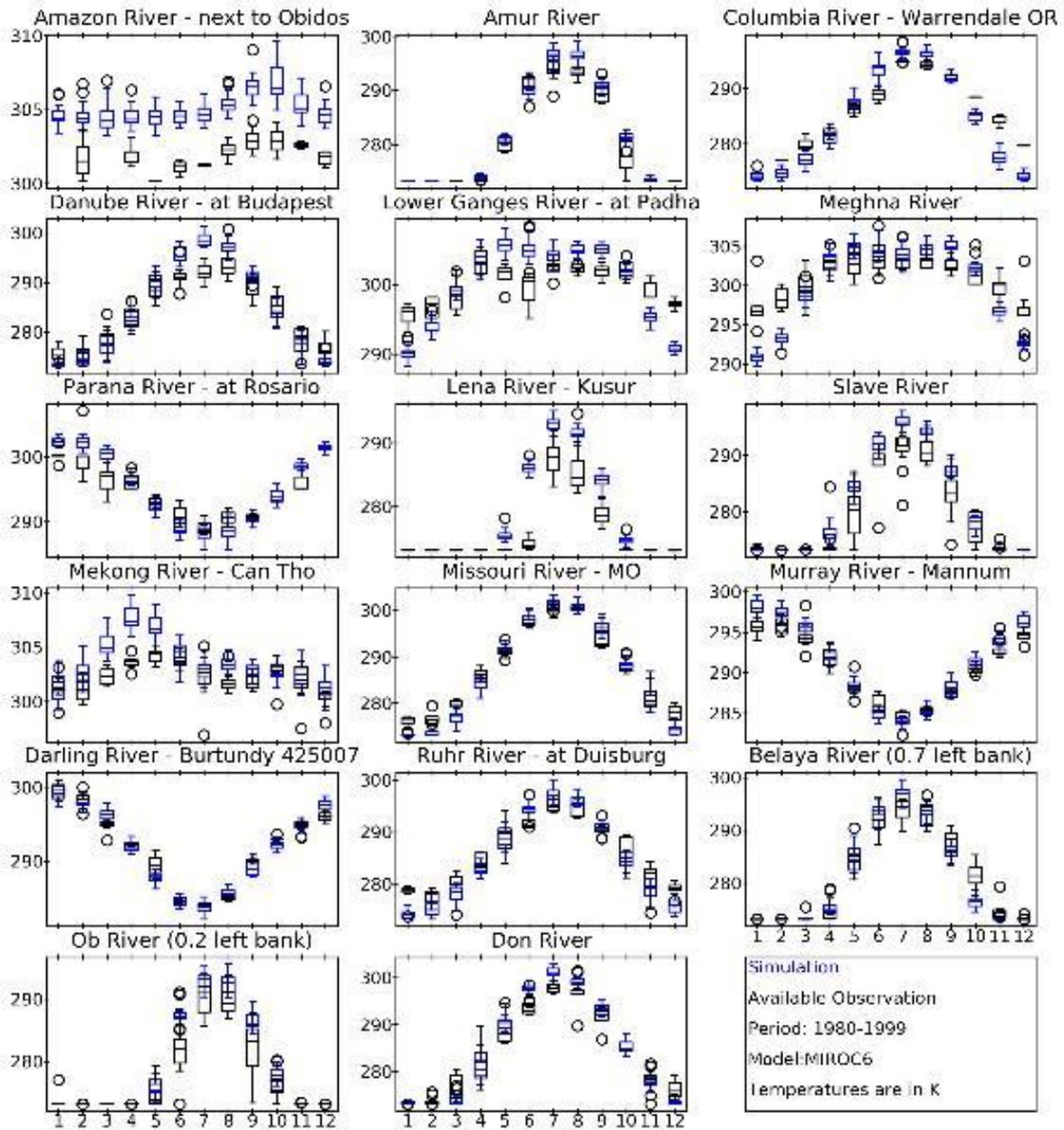


図-2.7 MIROC6による現在気候（1980～1999）での月平均河川水温（℃）。黒が観測値、青がMIROC6。

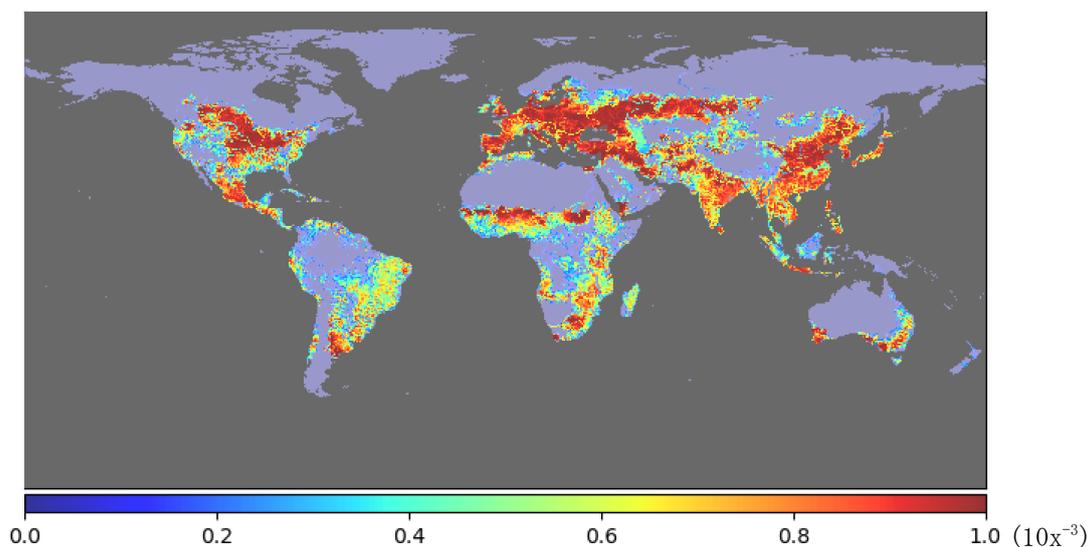


図-2.8 1961～2014年平均の河川窒素濃度 (mg/L)。0.2 $\times 10^{-3}$ mg/Lを下回る部分はマスクしている。

5. 研究目標の達成状況

本サブテーマでは、以下の4つを目標とし、それぞれについて達成状況を述べる。

- 1) 全球水温モデル HEAT-LINK を湖沼と結合した水熱動態モデルを開発し、温暖化に伴う水温変化を推計する。

Tokuda et al. (2019) の HEAT-LINK に湖沼を結合させた全球水熱動態モデル (Tokuda et al., 2021) を開発した。MIROC6 を入力値として現在気候及び将来気候での河川水温を推計し、温暖化に伴う河川水温の変化を示した。季節依存性などが見られるが、限られた検証データではあるものの再現性が示された。さらに温暖化に伴う河川水温の変化も季節性が見られるなど、十分な推計結果が得られた。

- 2) 水温予測および全球窒素循環モデル TNCM から食糧に関する SDG2 の達成可能性の評価を行う。

サブテーマ4と協働し、農地への窒素投入量を節減する緩和策による水質向上が見込めるシナジーが多く見られたことから、SDG2の達成可能性が示された。具体的には、TNCMの結果から、農地への窒素投入量が SSP126 と SSP585 で異なるが、緩和策の一つである炭素貯留によって農地への窒素投入量の低減も図られることから、SDG2の達成可能性が示された。

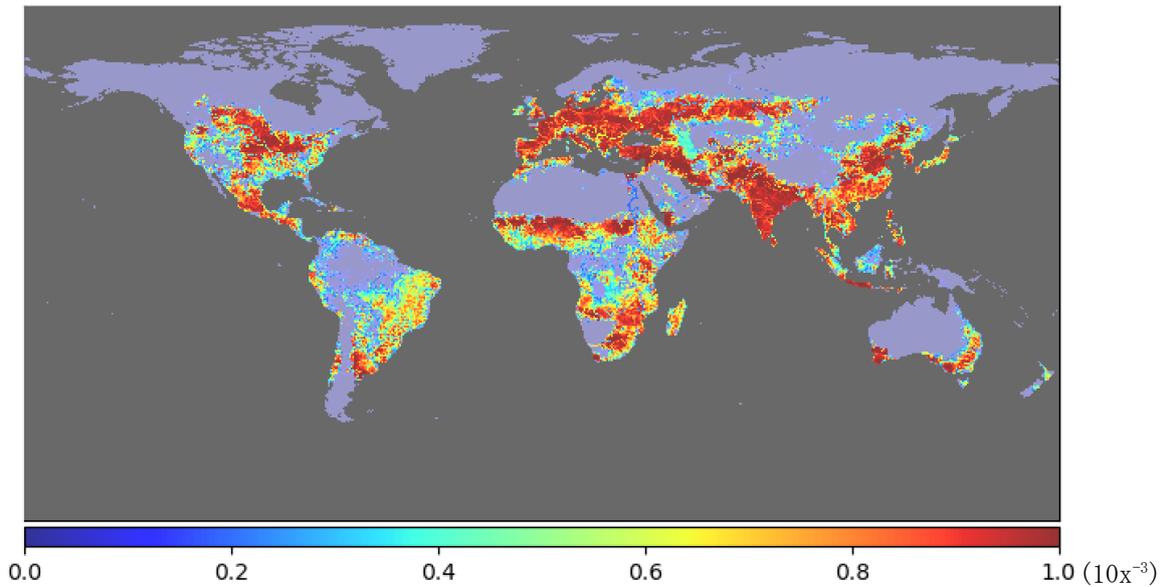
- 3) サブテーマ3と連携し、質と量の双方から生活用水の評価を行い、安全な水供給 (SDG6) の達成評価を行う。

サブテーマ3と協働し、河川の水温質の評価を行った。河川水温の上昇が見られ、また河川水の窒素濃度も推計された。引き続き窒素濃度の高い地域においては、改善対策が求められることが示された。具体的には、全球窒素循環モデル TNCM の結果から、炭素貯留による農地への窒素投入量の低減によって、河川へ流入する無機窒素が減少し、河川環境が良くなることから、SDG6の達成可能性が示された。

- 4) 水温や水質に関する気候政策と SDG のシナジーとトレードオフの解析を行い、シナジーを多くしトレードオフを可能な限り小さくするような方策の検討を行う。

緩和策の一つである農地への炭素貯留によって窒素投入量が低減され、水質の改善が見込まれるシナジーが示された。上述した2)と3)から分かるように、緩和策の炭素貯留が河川への窒素負荷の低減が見られ、一部のアフリカなど半乾燥地域ではトレードオフが見られたが、多くの地域でシナジーが見られた。この結果から気候政策である緩和策が多くの地域で SDG6. 3.2 の達成にも資することがいえる。

(a)



(b)

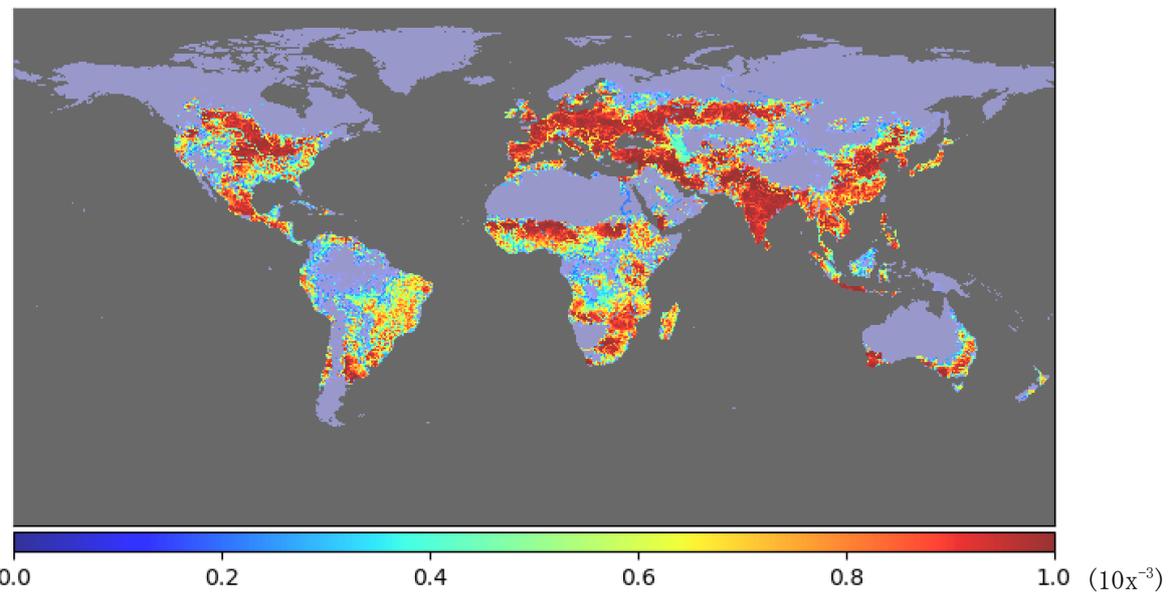


図-2.9 2015~2075年平均の河川窒素濃度 (mg/L)。 (a)SSP126、 (b)SSP585。

6. 引用文献

- 1) Tokuda, D., Kim, H., Yamazaki, D., and Oki, T.: Development of a global river water temperature model considering fluvial dynamics and seasonal freeze-thaw cycle, *Water Resour. Res.*, 55, 1366-1383, 2019.
- 2) Yamazaki, D., Almeida, G. A. M., and Bates, P. D.: Improving computational efficiency in global river models by implementing the local inertial flow equation and a vector-based river network map, *Water Resour. Res.*, 49, 7221-7235, 2013.
- 3) Kim, H.: Global Soil Wetness Project Phase 3 Atmospheric Boundary Conditions (Experiment 1) [data set], *Data Integr. Anal. Syst. (DIAS)*, <https://doi.org/10.20783/DIAS.501>, 2017.
- 4) Takata, K., Emori, S., and Watanabe, T.: Development of the minimal advanced treatments of surface interaction and runoff, *Global Planet. Change*, 38, 209-222, 2003.
- 5) Yamazaki, D., Ikeshima, D., Sosa, J., Bates, P. D., Allen, G. H., and Pavelsky, T. M.: MERIT Hydro: A High-Resolution Global Hydrography Map Based on Latest Topography Dataset, *Water Resour. Res.*, 55, 5053-5073, <https://doi.org/10.1029/2019WR024873>, 2019.

- 6) Messenger, M. L., Lehner, B., Grill, G., Nedeva, I., and Schmitt, O.: Estimating the volume and age of water stored in global lakes using a geo-statistical approach, *Nat. Commun.*, 7, 13603, <https://doi.org/10.1038/ncomms13603>, 2016.
- 7) Yamazaki, D., Ikeshima, D., Tawatari, R., Yamaguchi, T., O'Loughlin, F., Neal, J. C., Sampson, C. C., Kanae, S., and Bates, P. D.: A high-accuracy map of global terrain elevations, *Geophys. Res. Lett.*, 44, 5844-5853, <https://doi.org/10.1002/2017GL072874>, 2017.
- 8) Henderson-Sellers, B.: New formulation of eddy diffusion thermocline models, *Appl. Math. Model.*, 9, 441-446, 1985.
- 9) Tatebe, H., Ogura, T., Nitta, T., Komuro, Y., Ogochi, K., Takemura, T., Sudo, K., Sekiguchi, M., Abe, M., Saito, F., Chikira, M., Watanabe, S., Mori, M., Hirota, N., Kawatani, Y., Mochizuki, T., Yoshimura, K., Takata, K., O'ishi, R., Yamazaki, D., Suzuki, T., Kurogi, M., Kataoka, T., Watanabe, M., and Kimoto, M.: Description and basic evaluation of simulated mean state, internal variability, and climate sensitivity in MIROC6, *Geosci. Model Dev.*, 12, 2727-2765, <https://doi.org/10.5194/gmd-12-2727-2019>, 2019.
- 10) Huang, Y., Tokuda, D., Zhou, X., and Oki, T.: Global integrated modeling framework of riverine dissolved inorganic nitrogen with seasonal variation, *Hydrol. Res. Lett.*, 15(3), 50-57, <https://doi.org/10.3178/hr1.15.50>, 2021.
- 11) Birkett, C. M., Reynolds, C. A., Deeb, E. J., Ricko, M., Beckley, B. D., and Yang, X.: G-REALM: A Lake/Reservoir Monitoring tool for Water Resources and Regional Security assessment, AGUFM, 2018, H51S-1570, 2018.

II-3 気候政策とSDGsの同時達成における水資源のシナジーとトレードオフ

国立研究開発法人国立環境研究所

気候変動適応センター気候変動影響評価研究室 花崎 直太

Zhipin Ai

〔要旨〕

本サブテーマでは、主に4つの研究を実施した。まず、全球水資源モデルH08を拡張することで、バイオ燃料作物が明示的に扱えるようにした (Ai et al. 2020)。次に、拡張されたH08を利用することで、世界の二酸化炭素回収貯留付きバイオ燃料生産 (BECCS) ポテンシャルに対する水資源の制約を明らかにし、持続可能な範囲の灌漑では大きなバイオ燃料増産が見込めないことを明らかにした (Ai et al. 2021)。続いて、エネルギー面から見て持続可能性の乏しい海水淡水化に焦点を当てて、今後のプラントの分布を推定するモデルの構築を行い、今後もさらに海水淡水化プラントは世界的に増加することを明らかにした (Ai et al. 2022)。最後に、水資源に関するシナジーとトレードオフの中心にある食料生産用の灌漑を時空間詳細に扱うためのH08の改良を行い、世界のトウモロコシ、コムギ、コメ、ダイズ生産における灌漑の貢献度を国別に定量化することに成功した。これにより、灌漑（水）と収量（食料）のシナジー・トレードオフについての詳細を明らかにした (Ai et al. 2023, under review)。本節では、紙面の制約から、特に大きな開発項目となった4つ目の研究、すなわちH08モデルの作物収量推定サブモデルの改良に絞って詳細な説明を行う。食料作物への灌漑は現在の世界の取水量の7割を占める。気候変動や人口増加・経済成長が灌漑取水量にどのような影響を与えるかで、水資源面でのシナジーやトレードオフの様相が変わってしまうため、本件等はサブテーマにとって極めて重要であり、本サブテーマの最終的な目標である「水資源に関するRCP、SSP、SDGsのシナジーとトレードオフの統合解析」に関する中核的な成果である。

食料と水は生命維持に不可欠である。食料と水の連環の理解を深めるには、食料生産と水資源の要求と利用可能性を同時にシミュレーションできる統合モデルを開発する必要がある。H08は、人間の水利用や管理（貯水池の運用や作物の灌漑など）を考慮した全球水文学モデルである。H08には、作物固有の暦を推定するための作物成長サブモデルが含まれているが、作物の種類ごとに世界一律のパラメータセットが使用されているため、収量の推定性能は低い。そこで、国別にパラメータを校正し、アルゴリズムを改良することでH08を拡張し、4つの主要な主食作物（トウモロコシ、小麦、米、大豆）の収量をシミュレートした。シミュレーションされた作物収量は、食糧農業機関（FAO）の国別収量統計および主要作物の歴史的収量のグローバルデータセット（GDHY）のグリッド別収量推定値と、長期平均値および年々変動の相関に着目して比較された。改良されたモデルは、FAOの国別収量と良好な整合性を示した。主要生産国の平均バイアスは、トウモロコシ、小麦、米、大豆でそれぞれ-4%、3%、-1%、1%と大幅に減少した。シミュレーション結果とFAO統計収量の決定係数（R²）は、トウモロコシ、小麦、米、大豆でそれぞれ0.01から0.98、0.21から0.99、0.06から0.99、0.14から0.97となり、二乗平均誤差（RMSE）は7.1から1.1、2.2から0.6、2.7から0.5、2.3から0.3 t/haへと減少した。他の主要な作物モデルと比較した結果、我々の改良モデルは、時間的な収量変動を捕捉する能力が同等であることが明らかになった。グリッドレベルの分析では、改良モデルは、局所的には大きな違いも見られたものの、広範囲での時間的変動の再現という点では、GDHYデータセットと同様の能力を持つことが示された。このモデルを用いることで、灌漑が世界の食糧生産に与える影響に関する先行研究を、改良したモデルを用いて再現できることが確認された。以上の改良により、H08は世界の主要作物の生産と水循環を同時に推定できるようになった。この枠組みは、世界の食料-水-土地-エネルギーの連環研究に有益である。

1. 研究開発目的

世界の気候安定化の目標としてパリ協定が、世界の持続可能性の目標としてはSDGsがある。また、今後見込まれる気候変動影響に対応するため、我が国でも気候変動適応計画が閣議決定されている。これらの気候目標（緩和と適応の両方を含む）とSDGsは同時に達成されなければならないが、気候目標とSDGsをそれぞれ達成しようとする際、双方にシナジーとトレードオフがあることが知られている。最初の包括的な分析は2018年に発行されたIPCC1.5度特別報告書の第5章で実施されたが、概念的な検討にとどまっていた。また、2019年に発行されたIPCC土地関係特別報告書では強力な緩和策としてバイオ燃料の大量生産について同種の検討がされたが、やはり定性的かつマクロな検討に留まっていた。定量的・かつ地域詳細なシナジーとトレードオフの検討が必要である。これまでの気候安定化目標とSDGsの検討において、死活的に重要な水環境が軽視されてきたという問題がある。気候政策の検討には、統合評価モデルと呼ばれるエネルギー経済モデルが中心として用いられてきた。この結果、エネルギーと経済の観点からは高い整合性が認められるものの、市場取引がされていない水資源については無尽蔵にあると仮定されたり、地域特性が極度に単純化されていたりしていた。そこで本研究は水資源に着目し、世界的にも高い評価を得る全球水資源モデルH08を拡張・活用することで、実施の際の水の量的制約を考慮しつつ、気候目標とSDGsのシナジーとトレードオフを定量的かつ地域詳細に整理し、同時達成の可能性を評価する。

2. 研究目標

本サブテーマでは以下の3つを目標とする。

- 1) 全球水資源モデルH08を用いることにより、低炭素シナリオとSDGs目標のうち、水力発電とバイオ燃料生産に着目したクリーンなエネルギー（SDG7）、および安全な水へのアクセスについて（SDG6）の水資源面でのシナジーやトレードオフを詳細に検討する。
- 2) 2度（1.5度）目標の達成にあたり、世界全体の水力発電の大幅な増加や、バイオ燃料の増産が前提になっている研究が散見される。前者に関しては、非現実的な水力発電の開発が前提となっていないかという軸から検討を行う。後者については、バイオ燃料増産により水循環の変化や灌漑需要の増加につながることはないかという軸などから詳細な検討を行う。
- 3) SDGsが高度に達成できたとしても世界の水需要は急には減らせない。特定の地域や期間に表流水や地下水の過剰取水をもたらす水利用に主に注目し、水資源制約に関する指標や地図を提示する。

3. 研究開発内容

本課題では、上記目標に向けて研究を実施し、4編の国際誌フルペーパーを出版・投稿した（Ai et al. 2020; 2021; 2022; 2023 under review）。そのすべてをここに記すのは紙面の都合上難しい。については、既にオープンアクセスとして出版済みの3編については割愛し、2023年3月31日時点で査読中の4編目の論文に絞り、研究開発内容を報告する。4編目の論文は令和4年度の研究計画にある「水資源に関するRCP、SSP、SDGsのシナジーとトレードオフの統合解析」の中核をなす研究である。

食料は人間社会にとって不可欠な関心事である。人口の増加と各種資源の制約に伴い、食糧安全保障は、気候変動のもとでの重要な世界的課題となっている。食料安全保障の重要な要素の一つは作物生産であり、特に降水量が十分でない地域において、灌漑用水の利用可能性に大きく影響される。例えば、現在、世界の作物生産の約40%は灌漑に依存している。灌漑用水は、世界の総取水量の約65%、世界の水消費量の90%を占めている。その結果、河川の分断や地下水位の低下など、地表水と地下水の両方のシステムに悪影響を及ぼしている。このような負の結果を最小限に抑えるために、持続可能な水利用を目指す声が高まっている。作物生産と持続可能な水管理の間の複雑な相互作用によりよく取り組むために、一貫したモデルの枠組みの中

で作物の成長と人間活動を伴う水循環の両方を正確に表現することは、モデル開発において非常に重要である。

3.1 全球水資源モデルH08

H08は、自然および人為的な水文過程を含む全球水文学モデルで、空間分解能は 0.5° 、時間分解能は1日である。このモデルは、地表水文、河川流下、作物成長、貯水池操作、環境流量、人為的取水という6つのサブモデルから構成されている (Hanasaki et al., 2008a)。さらに、近年になって地下水の涵養と取水、運河導水、海水淡水化、リターンフローと送水損失など、新しいスキームが追加されている (Hanasaki et al., 2018)。これらの新たに追加された機能により、H08は、セクター別および水源別の取水量と利用可能量の推定に利用できる最も詳細なグローバル水文モデルの1つといえる。農業分野では、H08はいくつかの機能により、灌漑用水の需要と供給を日単位およびグリッドセル単位で推定できる。特徴としては、第一に、再生可能・再生不可能の二種類の地下水源から灌漑用水の取水量を推定することができる。第二に、上流域での灌漑用水取水の下流での影響を考慮することができる。第三に、貯水池の運用が灌漑用水の利用可能性に及ぼす影響を考慮することができる。

3.2 作物成長サブモデル

作物成長サブモデルは、生理的成熟までの植物バイオマスを1日単位で蓄積し、収量のシミュレーションを行う。潜在的なバイオマスの1日の増加量 (ΔB) (kg ha^{-1}) は、日射量の利用効率に基づいて推定される。作物のフェノロジーの発達は積算温度理論に基づき、日積算温度値が潜在積算温度値と等しくなったときに成熟に達する。収穫指数は、総バイオマスの中の可食部の割合を推定するために使用される。収量の変動は水や気温などの調整因子によって表現される。

3.3 アルゴリズムの改良

次に、作物成長サブモデルを以下のように改良した。まず、H08の作物成長サブモデルに、SWATモデルで採用されている式とパラメータを用いて、CO₂施肥効果と飽差が日射エネルギー利用効率に与える影響を追加した (Neitsch et al., 2011; Arnold et al., 2013)。これにより、CO₂の上昇は作物の収量にプラスの影響を、飽差の増加はマイナスの影響を与えるようになる。

3.4 パラメータ較正

次に、Fader et al. (2010)の方法に従い、「管理強度」という概念を採用し、最大葉面積指数 (*bla*) と調整収穫指数 (*Harvest*) という主要パラメータを適宜較正した。なお、世界の多くの国において、FAOによる過去の年間作物収量は、明らかな増加傾向を示している。したがって、データを前半と後半の2つの期間に分ける (前者を較正用、後者を検証用とする) 標準的な手法はうまくいかなかった。そこで、偶数年の平均値を較正用に、奇数年の平均値を検証用に使用した。具体的には、1986年から2015年までの偶数年において、天水条件と灌漑条件の両方で、0.5から7.1までの値を0.3の間隔で繰り返し、最大葉面積指数を較正した。そして、平均シミュレーション収量と平均FAO統計収量の間の変りを最小化できる値を、各国の作物別最適最大葉面積指数として決定した。FAO統計収量やシミュレーション収量のデータがない国については、元の作物別デフォルト値を採用した。

3.5 気象データ

国際プロジェクト ISIMIP3aのGSWP3-W5E5と呼ばれる全球気象データの1980年から2015年までを、本研究のすべてのシミュレーションに使用した。GSWP3-W5E5 データの空間分解能は 0.5° である。日毎の8つの気象変数 (下方短波放射、下方長波放射、比湿、降雨、降雪、気圧、風速、空気温度) を使用してH08を実行した。

3.6 収量データ

シミュレーションした作物収量を校正・検証するために、空間解像度の異なる複数の収量データを収集した。1986年から2015年までのFAOの国レベルの収量データ (<https://www.fao.org/faostat/en/#data>) と、Global Dataset of Historical Yield (Iizumi et al., 2020)からグリッドレベル (0.5°) の収量データを使ってモデル性能を評価した。FAO統計収量は実収量として報告されたが、モデルシミュレーションは乾物収量として表示される。比較の一貫性のために、Farderら (2010) およびMüllerら (2017) が報告したように、FAO統計収量はWirsenius (2000) に従って作物特有の係数 (例えば、トウモロコシ、小麦、米、大豆については0.88、0.87、0.91) で乾燥物に変換した。主要作物の過去の収穫量のグローバルデータセット (GDHY) 収穫量データは、FAOの年次国家統計収穫量を、いくつかの衛星プロダクトから推定されたグリッド状の純一次生産に基づいてグリッドレベルの収穫量に変換する空間明示データセットである (Iizumi et al., 2020)。FAO統計収量とGDHY収量は、それぞれ国レベルおよびグリッドレベルでの作物モデルの性能を評価するために利用した (Müller et al., 2017; Iizumi et al., 2020)。

3.7 シミュレーションの設定と収量処理

アルゴリズムの改良とパラメータの最適化を行い、トウモロコシ、小麦、米、大豆の2種類のシミュレーションを1986年から2015年まで、天水と灌漑の両方の条件で、1日単位で実行した。シミュレーションは、各グリッドセルの仮想的な農地に4つの作物が植えられ、収穫されると仮定して、デフォルトモデルと改良モデルで行った。天水条件下では作物の生育に水ストレスがかかるが、灌漑条件下では作物の生育に水ストレスはかからない。

4. 結果及び考察

4.1 FAOの国別統計収量との比較

図-3.1に示すように、デフォルトモデルでシミュレーションした収量と比較すると、改良モデルは、FAO統計の作物別上位20大生産国の平均国別収量 (世界のトウモロコシ、小麦、米、大豆生産の約88%、86%、93%、99%を占める) との一致度が高いことがわかる。まず、主要生産国20カ国の平均バイアス (シミュレーションの平均国別収量とFAOの平均国別収量の差) はトウモロコシ、小麦、米、大豆でそれぞれ-4%、3%、-1%、1%と大幅に減少した。次に、シミュレーションの平均国別収量とFAOの平均国別収量の決定係数 (R^2) は、トウモロコシ、小麦、米、大豆について、それぞれ0.01から0.98、0.21から0.99、0.06から0.99、そして0.14から0.97へと増加した。さらに、対応する二乗平均平方根誤差 (RMSE) は、トウモロコシ、小麦、米、および大豆について、それぞれ7.1から1.1、2.2から0.6、2.7から0.5、2.3から0.3t/haに減少した。これらの結果は、改良されたシミュレーションが、4つの主要作物の長期平均の過去の収穫量を国レベルで再現できることを示唆するものであった。

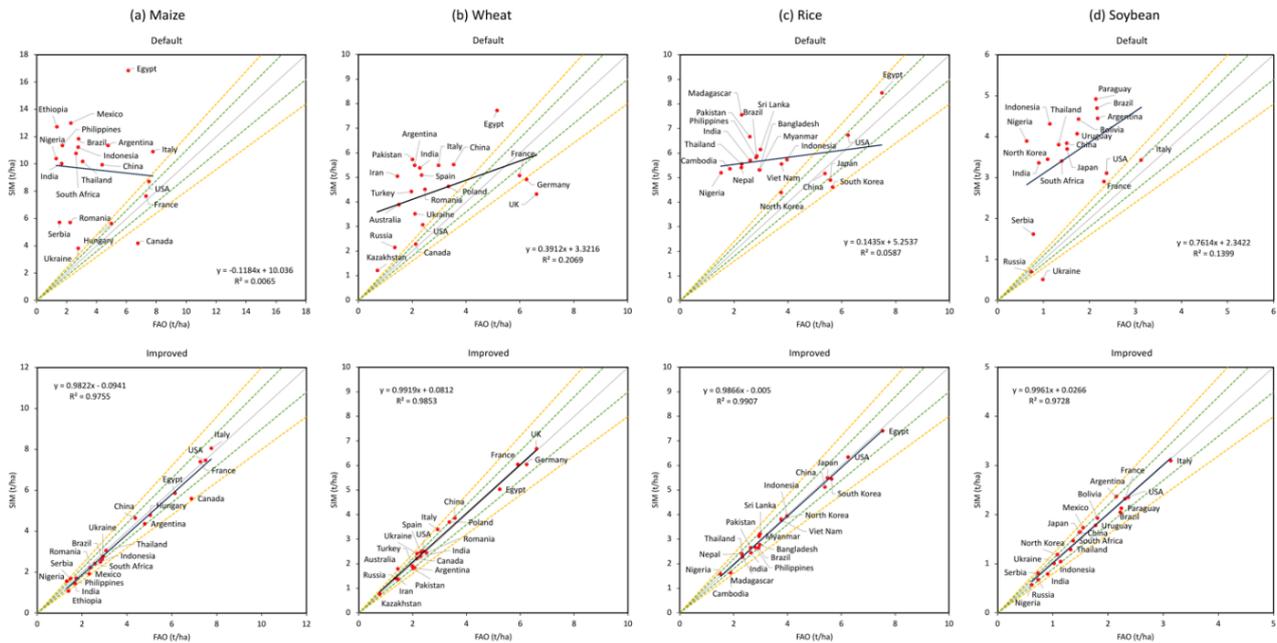


図-3.1：主要生産国上位20カ国におけるシミュレーションとFAO統計の1986年から2015年までの平均収量の比較。Defaultはデフォルトモデル、improvedは改良モデルを用いたシミュレーションをそれぞれ示す。緑色の破線と黄色の線はそれぞれ±10%、±20%の差を示す。SIMはシミュレーション収量、FAOはFAOから報告された収量。パネル (a) はトウモロコシ、(b) は小麦、(c) は米、(d) は大豆をそれぞれ示している。

作物収量の時間的変動の再現性を調べるために、トレンドを除去したトウモロコシの収量偏差の時系列をシミュレーションデータと、作物ごとの上位20大生産国のFAOデータを図-3.2に示した。FAO収量の経年変化を捉える能力についてはモデルは、コメよりもトウモロコシ、小麦、ダイズで優れた性能を示した。具体的には、トウモロコシ、小麦、米、大豆の生産量上位20カ国のうちそれぞれ18カ国、16カ国、11カ国、16カ国で正の相関が確認され、また、相関係数 (R) の平均値は0.48、0.51、0.31、0.36となった。改良されたモデルは、収量偏差の観点でも性能が改善した (特にトウモロコシと小麦では、デフォルトモデルよりも R が大きく、RMSEが小さくなった)。

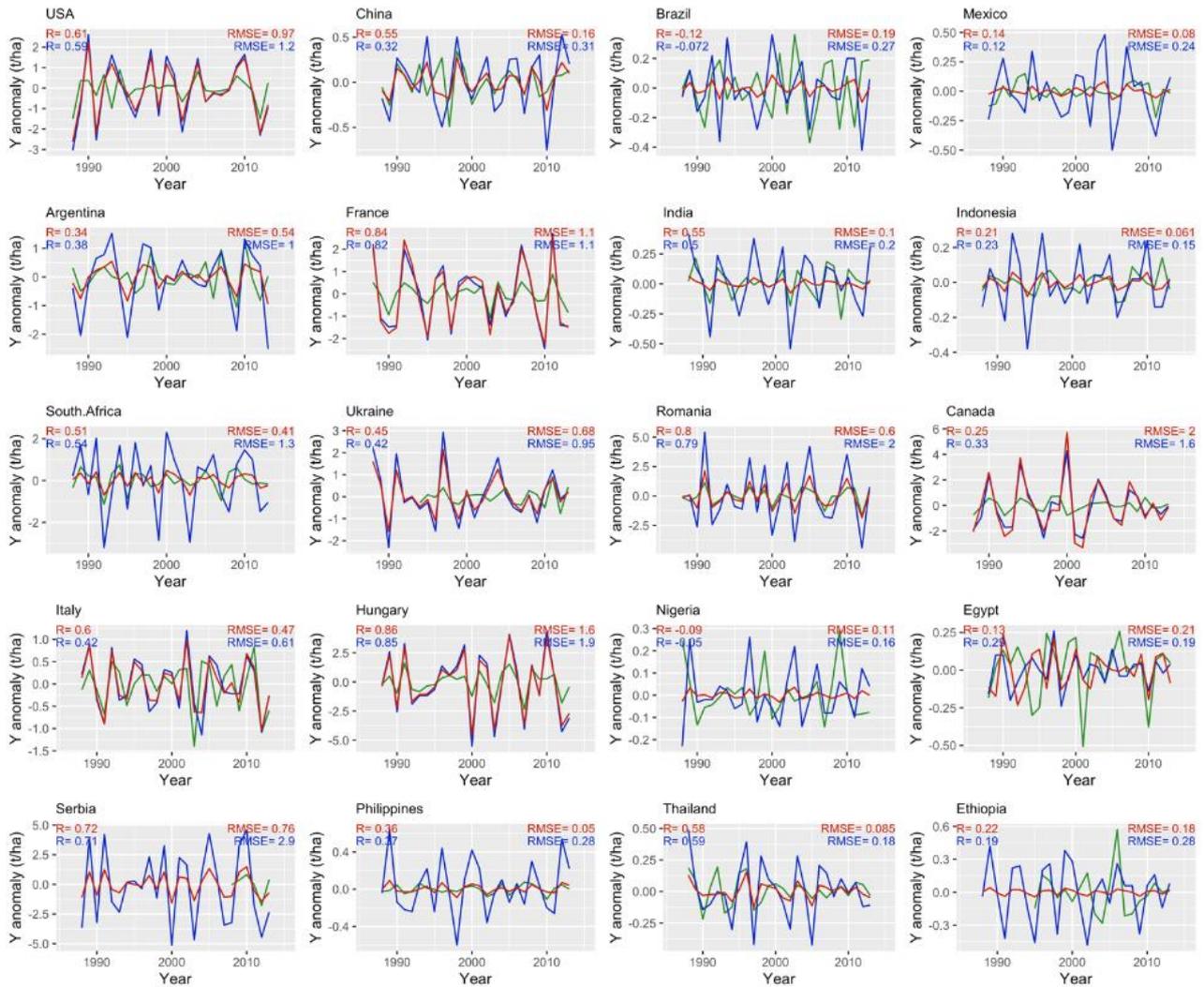


図-3.2：上位20大生産国についての改良後のシミュレーション（赤）、改良前のシミュレーション（青）、およびFAO統計（緑）によるトレンド除去済みのトウモロコシの収量偏差の時系列。Yは収量、Rは相関係数、RMSEは二乗平均平方根誤差を示す。

図-3.3は作物ごとに上位5位までの生産国のシミュレーション収量とFAO収量とのトレンド除去済み時系列の収量偏差のRとRMSEまとめたものである。上位5位までとしたのは、Jägermeyrらによる最新のグローバル作物モデル相互比較研究（2021年）と比較できるようにするためである。全体として、我々のシミュレーションのR値とRMSE値は、Jägermeyrら（2021）が報告した現在の主流作物モデルの範囲内であった。トウモロコシ、小麦、コメ、大豆については、我々の改良モデルのスコアはJägermeyrら（2021）が報告した複数の作物モデルのアンサンブル平均値と同等であり、コメについては、我々のシミュレーションのR値はより高く（バングラデシュと中国を除く）、より低いRMSE値を示した。しかし、いずれにせよ、Jägermeyrら（2021）の作物モデルも我々の改良モデルもスコアは低い（R値>0.5の国はほとんどない）。作物モデルによるシミュレーション収量は、経年的な気候シグナルを反映しているだけであり、現在の作物モデルが、過去の収量の経年的な変動を完全に捉えることが難しい状態が続いていることを示唆している（Jägermeyr et al., 2021）。このことは、主要生産国において、気候変動が収量の経年変化の主因ではない可能性も間接的に示唆している。

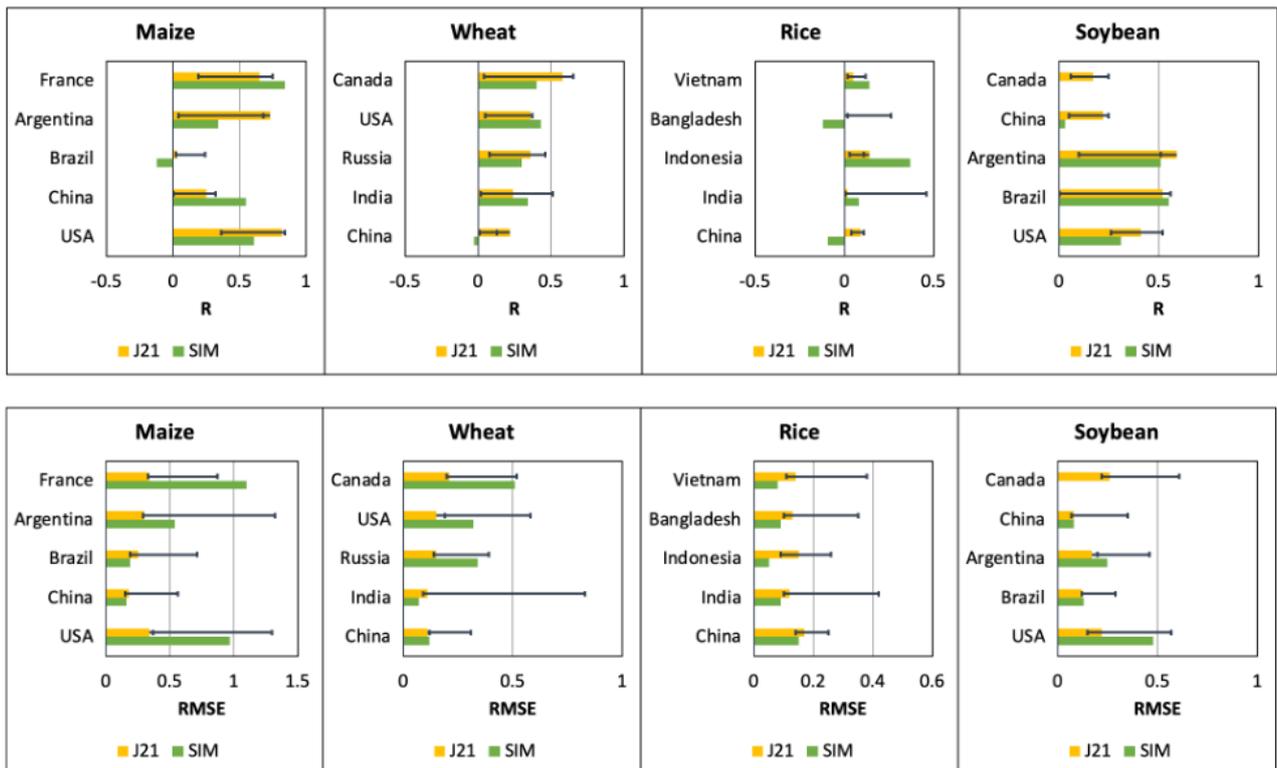


図-3.3：トレンド除去済みの収量偏差の時系列に関するRとRMSE値の比較。SIMは本研究、J21はJägermeyr et al. (2021)の研究で使用された複数の全球作物モデルのアンサンブル平均。エラーバーは、複数の全球作物モデル間の最大値および最小値を示す。

上記の推測をさらに検証するために、栽培期の総降水量および平均気温と作物ごとの年間収穫量の相関を分析することで、気候要素（すなわち、降水量と気温）が収穫量の経年変動に与える影響を調査した。トウモロコシを例にとると（図-3.4）、上位20大生産国のほとんど（17/20）で、降水量とFAO統計収量の間には統計的に有意な関係（ $p > 0.05$ ）は見られなかった。降水量とFAO統計収量の間には有意な正の相関（ $p < 0.05$ ）が見られたのは、ルーマニア、ハンガリー、セルビアの3カ国のみであった。作物収量の推定は、水の利用可能性に依存しているため、収量シミュレーションの変動は、主に降水量の変動を反映している。したがって、この3カ国では、FAO収量と降水量の間に明確な相関関係があり（図-3.2）、良好なシミュレーション性能が確認された（図-3.4）。また、生産国上位20カ国のほとんど（12/20）で、気温とFAO統計収量の間には統計的に有意な関係は見られなかった（図-3.5）。同様に、小麦、米、大豆についても、ほとんどの国で降水量/気温とFAO統計収量の間には統計的に有意な相関は見られなかった。

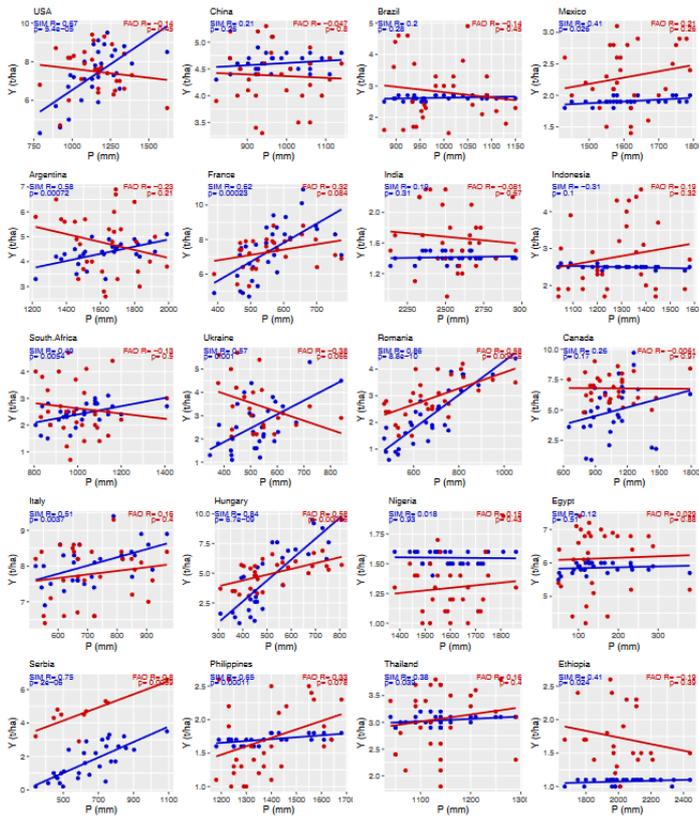


図-3.4：生産量上位20カ国におけるトウモロコシの収穫量（青：シミュレーション、赤：FAO）と生育期の総降水量の関係。1986年から2015年まで。Yは収量、Pは降水量、Rは相関係数。

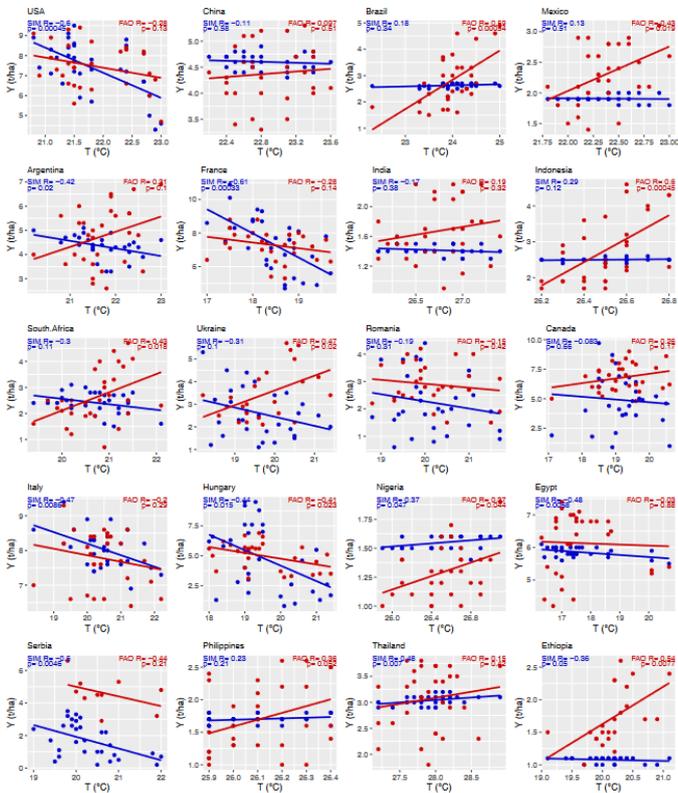


図-3.5：生産量上位20カ国におけるトウモロコシの収穫量（青：シミュレーション、赤：FAO）と生育期の平均気温の関係。1986年から2015年まで。Yは収量、Pは降水量、Rは相関係数。

5. 研究目標の達成状況

ほぼ達成することができた。

まず、目標1「全球水資源モデルH08を用いることにより、低炭素シナリオとSDGs目標のうち、水力発電とバイオ燃料生産に着目したクリーンなエネルギー（SDG7）、および安全な水へのアクセスについて（SDG6）の水資源面でのシナジーやトレードオフを詳細に検討する」については、水資源・クリーンなエネルギー・安全な水へのアクセスに関するシナジーとトレードオフの中心にあるエネルギー作物・食料生産用の灌漑を時空間詳細に扱うためのH08の改良を行い、世界のミスカンサス、スイッチグラス、トウモロコシ、コムギ、コメ、ダイズ生産における灌漑の貢献度を国別に定量化することに成功した。これにより、灌漑（水）と収量（エネルギー・食料）のシナジー・トレードオフについての詳細を明らかにした（Ai et al. 2020; 2023 under review）。

次に、目標2「2度（1.5度）目標の達成にあたり、世界全体の水力発電の大幅な増加や、バイオ燃料の増産が前提になっている研究が散見される。前者に関しては、非現実的な水力発電の開発が前提となっていないかという軸から検討を行う。後者については、バイオ燃料増産により水循環の変化や灌漑需要の増加につながることはないかという軸などから詳細な検討を行う」については、水力発電については、達成可能な最大水力発電量を推計し、化石燃料に対する価格競争力が緩和策によって強化されるという以前の研究での知見（Zhou, Hanasaki et al. 2018）を確認した。バイオ燃料の増産については、全球水資源モデルH08を上述のように拡張することで、バイオ燃料作物が明示的に扱えるようにした。次に、拡張されたH08を利用することで、世界の二酸化炭素回収貯留付きバイオ燃料生産（BECCS）ポテンシャルに対する水資源の制約を明らかにし、持続可能な範囲の灌漑では大きなバイオ燃料増産が見込めないことを明らかにした（Ai et al. 2021）。

最後に、課題3「SDGsが高度に達成できたとしても世界の水需要は急には減らせない。特定の地域や期間に表流水や地下水の過剰取水をもたらす水利用に主に注目し、水資源制約に関する指標や地図を提示する」については、まず1）と2）の分析で主要な7つの水源に関して水資源制約を考慮しつつ、水利用の評価を行い各種指標の地図を提示した（Ai et al., 2020; 2021; 2023 under review）。さらに、エネルギー面から見て持続可能性の乏しい海水淡水化にも焦点を当てて、今後のプラントの分布を推定するモデルの構築を行った。これまでの傾向を踏まえると、今後もさらに海水淡水化プラントは世界的に増加することを明らかにした（Ai et al., 2022）。

6. 引用文献

- 1) Ai, Z., Hanasaki, N., Heck, V., Hasegawa, T., and Fujimori, S.: Simulating second-generation herbaceous bioenergy crop yield using the global hydrological model H08 (v.biol), *Geosci. Model Dev.*, 13, 6077-6092, 10.5194/gmd-13-6077-2020, 2020.
- 2) Ai, Z., Hanasaki, N., Heck, V., Hasegawa, T., and Fujimori, S.: Global bioenergy with carbon capture and storage potential is largely constrained by sustainable irrigation, *Nature Sustainability*, 4, 884-891, 10.1038/s41893-021-00740-4, 2021.
- 3) Ai, Z., Ishihama, F., and Hanasaki, N.: Mapping Current and Future Seawater Desalination Plants Globally Using Species Distribution Models, *Water Resources Research*, 58, e2021WR031156, <https://doi.org/10.1029/2021WR031156>, 2022.
- 4) Ai, Z., and Hanasaki, N.: Simulation of crop yield using the global hydrological model H08 (crp.v1), *Geosci. Model Dev. Discuss.* (under review), 2023, 1-22, 10.5194/gmd-2022-285, 2023.
- 5) Hanasaki, N., Yoshikawa, S., Pokhrel, Y., and Kanae, S.: A global hydrological simulation to

specify the sources of water used by humans, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 22, 789–817, 10.5194/hess-22-789-2018, 2018.

- 6) Iizumi, T., Yokozawa, M., Sakurai, G., Travasso, M. I., Romanenkov, V., Oettli, P., Newby, T., Ishigooka, Y., and Furuya, J.: Historical changes in global yields: major cereal and legume crops from 1982 to 2006, *Global Ecology and Biogeography*, 23, 346–357, 10.1111/geb.12120, 2014.
- 7) Jägermeyr, J., Müller, C., Ruane, A. C., Elliott, J., Balkovic, J., Castillo, O., Faye, B., Foster, I., Folberth, C., Franke, J. A., Fuchs, K., Guarin, J. R., Heinke, J., Hoogenboom, G., Iizumi, T., Jain, A. K., Kelly, D., Khabarov, N., Lange, S., Lin, T.-S., Liu, W., Mialyk, O., Minoli, S., Moyer, E. J., Okada, M., Phillips, M., Porter, C., Rabin, S. S., Scheer, C., Schneider, J. M., Schyns, J. F., Skalsky, R., Smerald, A., Stella, T., Stephens, H., Webber, H., Zabel, F., and Rosenzweig, C.: Climate impacts on global agriculture emerge earlier in new generation of climate and crop models, *Nature Food*, 2, 873–885, 10.1038/s43016-021-00400-y, 2021.
- 8) Zhou, Q., Hanasaki, N., Fujimori, S., Masaki, Y., and Hijioka, Y.: Economic consequences of global climate change and mitigation on future hydropower generation, *Climatic Change*, 147, 77–90, 10.1007/s10584-017-2131-9, 2018.

II-4 気候政策とSDGsの同時達成における食糧生産のシナジーとトレードオフ

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構 農業環境研究部門

気候変動適応策研究領域 作物影響評価・適応グループ 飯泉 仁之直

気候変動適応策研究領域 作物影響評価・適応グループ 金 元植

気候変動適応策研究領域 作物影響評価・適応グループ 野崎 乃倫子 (2021年12月～2023年3月)

気候変動適応策研究領域 作物影響評価・適応グループ 細川 奈々枝 (2020年9月～2021年9月)

【要旨】

サブテーマ4の目的は、食糧に関連するSDG2への気候政策のシナジー・トレードオフを評価することである。研究目標には、作物の播種・収穫面積の気候応答モデルの開発、収量と面積の気候応答を考慮した食糧生産の将来見通しの作成、気候緩和・適応策のSDG2へのシナジー・トレードオフについての知見の創出、の3つを設定した。目標はいずれも目標通りか、目標を上回る成果を上げた。研究成果は、①気候の面積影響と生産量の将来見通し、②農地への炭素貯留のシナジー、③BECCSによる水資源の競合を介したSDG2へのトレードオフ、④食糧生産の観点での気候対策のシナジー・トレードオフ、にまとめた。

成果①では、コメ多期作が行われているアジア6か国の農業統計から、面積と収量の年々変動を気象条件から説明する弾性ネット回帰モデルを構築した。開発した面積と収量の気候応答モデルに気候変動シナリオを入力し、面積と収量の気候応答が連動しない結果、コメ生産量への気候変動影響を軽減されるとの将来見通しを示した。さらに、極端気候によるコメ収穫面積（水田面積）の変動が農地を利用した緩和策の効果に影響を与える可能性を指摘した。

成果②では、作物収量、土壌、気候、栽培管理の全球グリッドデータを機械学習により解析し、農地管理による土壌への炭素貯留とその気候緩和効果を評価した。さらに、農地への炭素貯留のシナジーとして作物増収効果と無機窒素肥料の節減効果をそれぞれ定量化した。SDG6が掲げる水質保全にも寄与する可能性を踏まえて、窒素節減量の推計値をサブテーマ2に提供した。

成果③では、SDG2の指標である小規模農家の農業生産額を全球作物モデル出力から推定する手法を開発した。開発した手法を用いて、気候変動と社会経済発展を考慮した小規模農家の農業生産額の将来見通しを示し、気候緩和が小規模農家に寄与することを明らかにした。さらに、サブテーマ3の成果を踏まえて、BECCSを強力に推進した場合、水欠乏地域の低所得国では小規模農家と非小規模農家の間の灌漑導入率の格差縮小が困難になる可能性を指摘した。

成果④では、サブテーマ1から提供を受けた河川洪水の氾濫原分布を農地分布、作物収量と組み合わせ、洪水による世界の作物生産被害額を推計した。さらに、洪水に対する適応策（防護水準の向上）の小規模農家へのシナジーと、土壌炭素増により期待される窒素肥料の節減の水質へのシナジーについて相関解析を行った。しかし、統計的に有意な結果は検出できなかった。ここで使用した国レベルのデータではこれらのシナジーを特定するには空間解像度が不十分だったと考えられる。

サブテーマ4からは論文4報がIPCC第2作業部会第6次評価報告書に引用され、気候政策の国際的な議論を支える科学的知見を創出した。また、3件のプレスリリースを行い、国民への研究成果の発信に努めた。

1. 研究開発目的

この研究課題全体では、気候政策のSDGsへのシナジーとトレードオフの観点から、気候政策とSDGsの同時達成の可能性を評価し、その阻害要因を明らかにすることを目的とする。また、世界の地域的な気候緩和・適応とSDGsの同時達成における課題を抽出し、解決策の検討を行う。この研究課題全体の目的のうち、サブテーマ4では食糧に関連するSDG2を主な対象とする。

2. 研究目標

サブテーマ4では以下の3つを目標とする。

- 1) 播種前後および生育期間中の極端気象や水資源変動により播種・収穫面積が減少する効果をデータ解析により明らかにし、簡易モデルを提案する。
- 2) 全球作物モデル (Sultan et al. 2019) による全球の作物収量シミュレーションと上記の簡易モデルによる収穫面積影響、灌漑シナリオ (サブテーマ3)、土地利用変化シナリオ (サブテーマ1) を組み合わせて解析し、食糧生産の将来予測を行う。
- 3) それにより、気候緩和を推進するうえで食糧生産 (SDG2) にトレードオフが生じる地域を特定し、統合解析 (サブテーマ1) に資する知見を提供する。

3. 研究開発内容

サブテーマ4では上記の研究目標に沿って研究開発を進め、得られた結果を以下の4つの成果に取りまとめた。これらの成果は研究目標で掲げた3つの目標をすべて含む内容である。

- ① 気候の面積影響と生産量の将来見通し・・・極端気候が作物の播種・収穫面積に与える影響をデータ解析により明らかにし、簡易モデルを提案した。さらに、収量の気候応答に加えて、面積の気候応答を考慮し、食糧の生産量に対する気候変動影響評価を行った (研究目標1と2に対応)。
- ② 農地への炭素貯留のシナジー・・・農地の土壌炭素量を増やす栽培管理により期待できる気候緩和効果とそのシナジー (食糧増収、窒素肥料投入の節減) を全世界について地域別に定量評価した (研究目標3に対応)。
- ③ BECCSによる水資源の競合を介したSDG2へのトレードオフ・・・SDG2の評価指標の一つである小規模農家の農業生産額を全球作物モデル出力から推計する手法を開発し、気候変動と社会経済発展を考慮した将来見通しを示した。将来見通しでは、水欠乏地域の低所得国において小規模農家と非小規模農家の間に見られる灌漑導入率の格差を縮小させる灌漑シナリオを考慮した。さらに、サブテーマ3の協力を得て、炭素の回収と貯蔵を伴うバイオエネルギー (BECCS) の推進に伴う水資源の競合を介した小規模農家へのトレードオフの可能性について検討した (研究目標2と3に対応)。
- ④ 食糧生産の観点での気候対策のシナジー・トレードオフ・・・サブテーマ1の統合解析に資するため、サブテーマ1, 2, 3と協力して、気候緩和・適応策の推進に伴って生じるトレードオフやシナジーを食糧生産 (SDG2) の観点から整理した。その際、サブテーマ1から提供を受けた洪水氾濫原シナリオを農地分布と組み合わせ、洪水による食糧生産被害額を推計した (研究目標3に対応)。

4. 結果及び考察

以下、4つの成果の内容について記載する。

①気候の面積影響と生産量の将来見通し

サブテーマ4では、コメ多期作が行われているアジアの6か国の農業統計データを分析し、面積変動は収量変動と比べても無視できない大きさであることを明らかにした¹⁾。過去26年間 (1987~2012年) のデータから計算した面積と収量の偏差 (平年値からの乖離) の四分位範囲を比較した結果、インドネシア、マレーシア、タイでは面積変動 (四分位範囲: 3.3~5.9%) が収量変動 (7.4~12.5%) の半分程度であるが、バングラデシュ、ミャンマー、フィリピンでは面積変動 (4.8~5.8%) が収量変動 (4.7~5.2%) と同程度との結果だった (図-4.1)。生産量変動 (6.0~15.1%) は、マレーシアを除き、単独要因 (面積あるいは収量) の変動よりも大きかった。しかしながら、面積と収量が同じ符号方向に変動する国数は必ずしも多くなかった。解析した6か国のうち面積と収量の偏差の間に有意な相関 (R) が得られた国 (つまり、面積と収量の変動が連動していた国) は、バングラデシュ (R=0.530; p=0.005) とミャンマー (R=0.480; p=0.013) のみだった。

弾性ネット回帰モデルの回帰係数値を解析した結果、気候条件とアジアのコメ面積変動の間には次の2つの特徴があることが示された。フィリピンを例に説明すると (図-4.2)、第一に、生育期間の平均を表す気候指標が面積変動の要因の上位に来ることはほとんどないとの結果だった。すなわち、雨季作・乾季作にか

かわらず、最大連続無降水日数（CDD）や最大連続降水日数（CWD）に代表される極端気候が面積変動に大きな影響を与えることを示している。第二に、雨季作の気候指標のうち要因の上位1～3位には、播種前後の気候指標がより多く特定された。これは、生育期間中の気候条件よりも播種前後の気候条件が面積変動に大きく寄与していることを示している。フィリピンでは、雨期作面積は乾期作面積の約1.3倍と報告されており、年間の総面積の変動は雨期作の面積変動により強く左右されていると解釈できる。この二つの傾向は解析した6か国で共通して見られた。

上述した面積の気候応答モデルを用いて、CMIP5の4つの気候変動シナリオに沿った将来見通しを作成した。収量の気候応答モデルは面積応答モデルと同様に弾性ネット回帰により作成した。気候変動シナリオは2つの代表的濃度経路—RCP2.6（r26）とRCP8.5（r85）—および2つの気候モデル—GFDL-ESM2M（gG）とHadGEM2-ES（gH）—からなる。アジアのコメ栽培地域の気温・降水量の将来変化が最も小さいシナリオと最も大きいシナリオがそれぞれr26gGとr85gHである。r85gGとr26gHの気温・降水量変化は他の2シナリオ（r26gGとr85gH）の中間に位置する。

マレーシアを例に結果を説明すると、3つの気候変動シナリオ（r26gG、r26gH、r85gH）で気候変動による将来の生産量変化は検出できなかった（図-4.3）。そのうち2つのシナリオ（r26gH、r85gH）では面積と収量の変化は傾向が異なり、相互の変化が打ち消し合った結果、統計的に有意な生産量の変化は検出されなかった。面積と収量の両方が減少した結果、生産量が減少するとの将来見通しを示したシナリオは1つのみ（r85gG）だった。しかしながら、将来見通しの信頼性は、遠い将来よりも近い将来で高く、降水量・気温変化が大きいシナリオよりも小さいシナリオ（例えば、r26gG）で高い。生産量が将来減少するとのr85gGシナリオに基づく見通しは信頼性が低いことを考えると、マレーシアのコメ生産量に対する将来の気候変動影響は小さい可能性が高い。

今回検討した6か国、4シナリオからなる24ケースのうち、生産量の将来変化はほとんどのケースで統計的に有意ではなかった（21ケース）。しかし、24ケース中7ケースでは、面積と収量のどちらか、あるいは両方が有意な将来変化を示した。その10年間あたりの変化率は、面積で-0.84%から+1.11%、収量で-0.34%から+0.77%だった。7ケース中4ケースでは、面積と収量の将来変化の符号が異なった結果、有意な生産量の変化とならなかった。これらの結果は、生産量への気候変動影響を評価するうえで、収量の気候応答だけでなく、面積の気候応答も考慮することの重要性を示すものである。

この解析の結果は、気候変動が作物の播種・収穫面積に及ぼす影響を軽減するための適応策の必要性を示しているだけでなく、農地を利用した気候緩和策に対する示唆を含んでいる。農地への炭素貯留など農地を利用した気候緩和策では、緩和策を実施する農地面積が気候緩和効果の規模を決める要因の一つである。これは、水田からのメタン排出削減の場合も同様である。コメ（水田）の場合、気候の年々変動による面積変動は平年の面積の4.8%～5.8%に上る。長期的な気候変動による面積変化はそれよりも小さく、10年間あたり-0.85%～+0.06%である。こうした播種・収穫面積の気候応答はこの解析により明らかになった新たな知見である。今後、農地を利用した緩和策の潜在性を評価する際には、面積の気候応答が他の要因と比較してどの程度大きいかを把握することが望ましい。

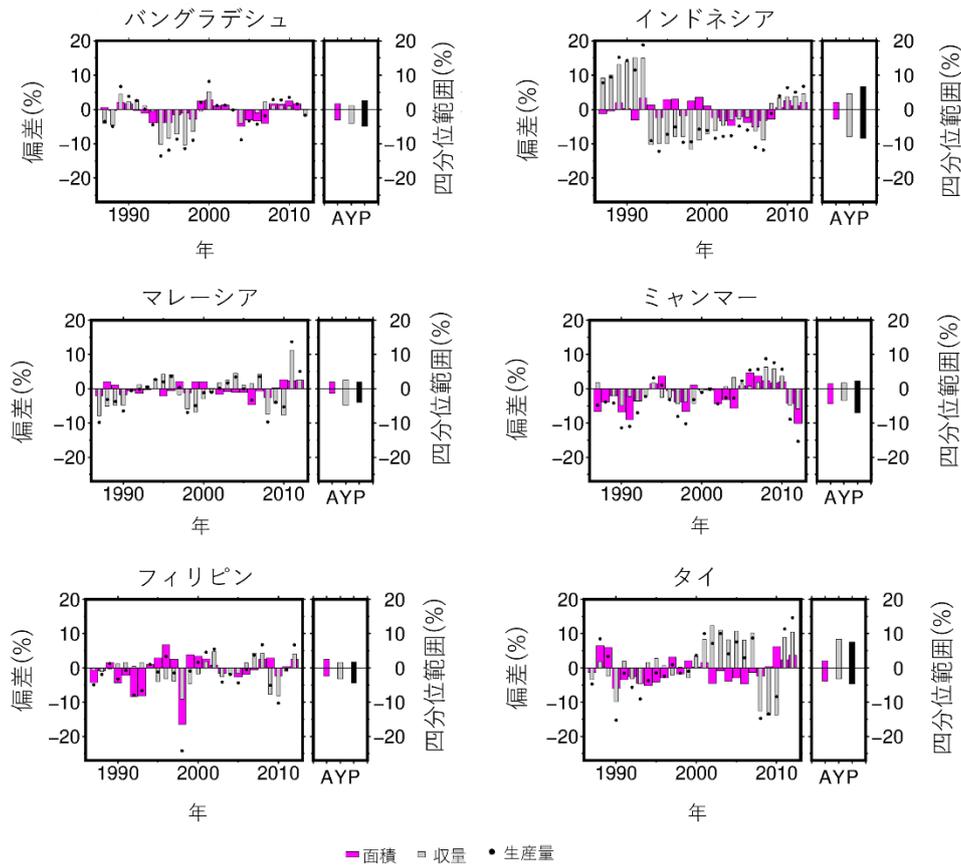


図-4.1 コメの面積・収量・生産量の偏差

過去26年間（1987～2012年）の農業統計データから得られた偏差の年々変動の四分位範囲を面積（A）・収量（Y）・生産量（P）のそれぞれについて示す。四分位範囲は25パーセントイル値から75パーセントイル値の幅を表す。

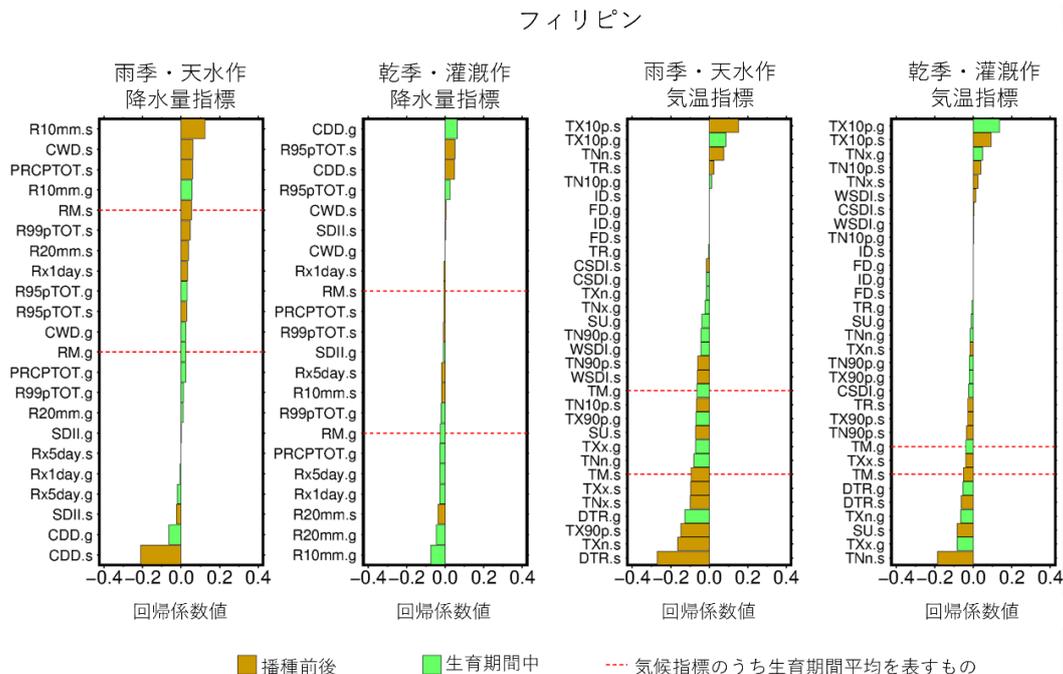


図-4.2 フィリピンにおける面積の気候応答

弾性ネット回帰モデルの標準化した回帰係数値を示す。正の回帰係数値は平年よりも面積増加に寄与、負の回帰係数値は平年よりも面積減少に寄与する。回帰係数値の絶対値が大きいくほど面積変動に大きく寄与する。

赤点線は気候指標のうち生育期間平均を表し、赤点線がない場合は気候指標のうち極端気候を表す。茶色（気候指標名に添え字sがある）は播種前後の期間の気候指標、緑色（添え字gがある）は生育期間中の気候指標を表す。

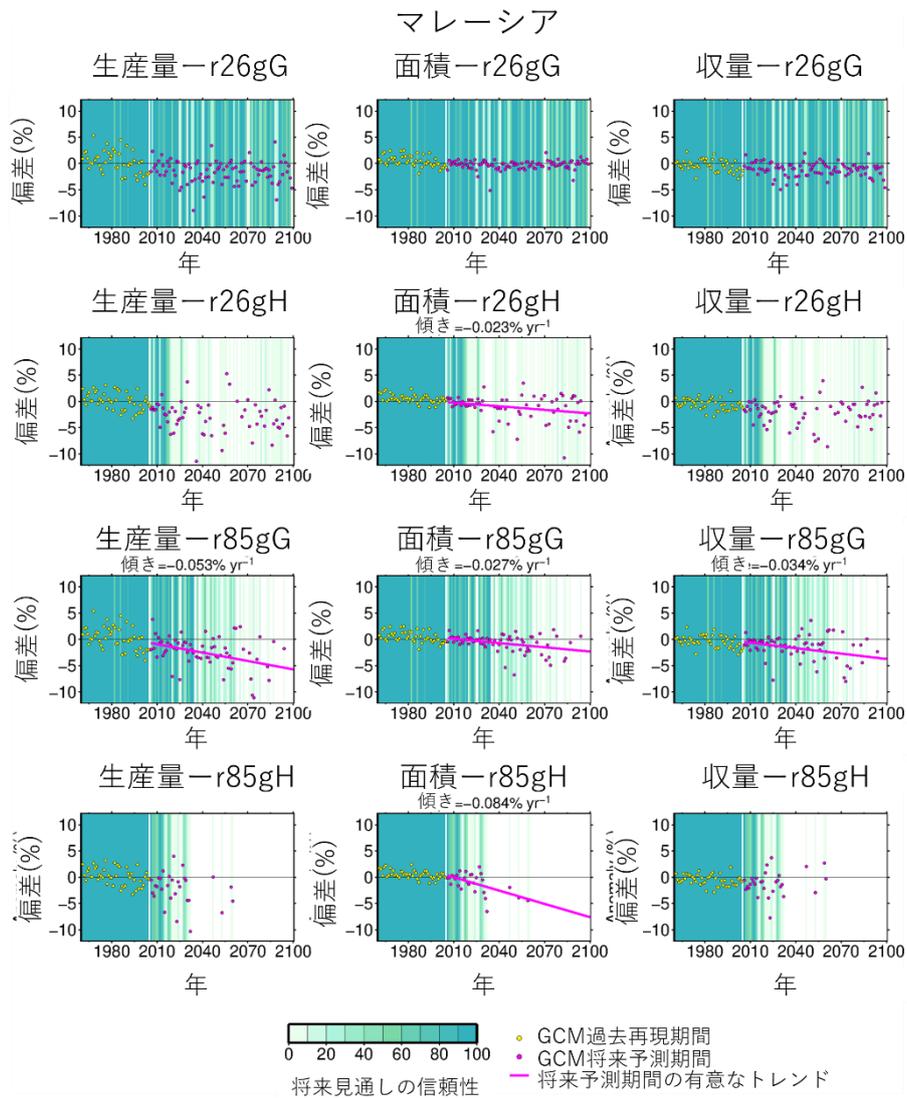


図-4.3 マレーシアの生産量・面積・収量の将来見通し

各パネルに重ねられたヒートマップは、それぞれの将来見通しの信頼性を示す。薄い緑と白の列は、将来見通しの作成に使われた気候指標の多くが過去に経験した範囲から逸脱しており、濃い緑の列の将来見通しよりも経験的な弾性ネット回帰モデルによる予測の信頼性が低いことを示す。信頼性の低い将来見通しの値は回帰直線の傾きの有意性を検定する際にサンプルから除外した。傾きの値は統計的に有意だった場合のみ表示した。

②農地への炭素貯留のシナジー

農地の土壌炭素を増加させる管理には、不耕起・省耕起、土面被覆、アグロフォレストリー（樹木の間で農作物を栽培）、緑肥、有機資材（堆肥やコンポスト、バイオ炭）の投入などが知られている。有機炭素は土壌中の有機物のうち多くの割合を占め、多孔質な土壌構造の発達に寄与し、土壌が水分を保持する機能を改善する。このため、土壌炭素量が多い農地では干ばつによる作物収量の低下が抑えられる。乾燥地域を中心とする世界の農地の70%では、土壌炭素の増加によって干ばつ年の作物生産額を最大16%増加できるとの研究報告もある²⁾。したがって、農地への炭素貯留は、気候変動の緩和策であると同時に、農業生産者にとっては

干ばつ被害軽減のための適応策でもある。開発途上国では2008～2018年における農業・畜産業の干ばつ被害は370億ドルに上り、総生産被害額の34%を占める³⁾。開発途上国の農業生産の多くは雨水に依存しており、常に干ばつの危険に晒されていることから、干ばつ被害の軽減はSDG2に掲げられた小規模農家の収入増加(指標2.3)に寄与する。

国連食糧農業機関(FAO)によれば、トウモロコシ、コメ、コムギ、ダイズ、ミレット、ソルガムの栽培面積は2017年には7億8000万ヘクタールに上り、世界の農地面積の約半分を占める。そこで、サブテーマ4ではこれら6作物を栽培する世界の農地について土壤炭素量の増加によるシナジーを評価した⁴⁾。作物収量と土壤、気候、栽培管理のデータを機械学習の一つであるランダムフォレストで解析した結果、農地管理により、6作物を栽培する世界の農地全体で土壤炭素量を127.8億トン増加できると見積もられた(図-4.4B)。この量の土壤炭素量の増加は、2018年の世界の年間CO₂排出量335億トン(炭素換算で91.5億トン)の1.4倍に上り、世界の平均気温の上昇を0.03℃抑制できる規模に相当する。この量の土壤炭素量の増加を達成するには50～75年を要すると考えられるものの、増加させた土壤炭素量を適切な農地管理の継続によって維持できれば、世界の作物生産を年間3,825万トン増加、無機窒素肥料の投入量を年間582万トン節減できると見積もられた(図-4.5)。このうち、小規模農家の寄与は炭素貯留量では28%、作物生産量では17%、窒素節減量では19%を占める。とりわけ、サブサハラアフリカ、ラテンアメリカ・カリブ海、中東・北アフリカなどの地域では小規模農家の寄与割合が大きい(図-4.5)。さらに、窒素肥料を追加投入せずに増収効果が得られることから、土壤炭素量の増加は過剰な無機窒素肥料の投入節減につながる。無機窒素の過剰投入を減らすことは流域の水質保全に寄与し、安全な水へのアクセス向上を掲げるSDG6にも貢献するものと期待される。

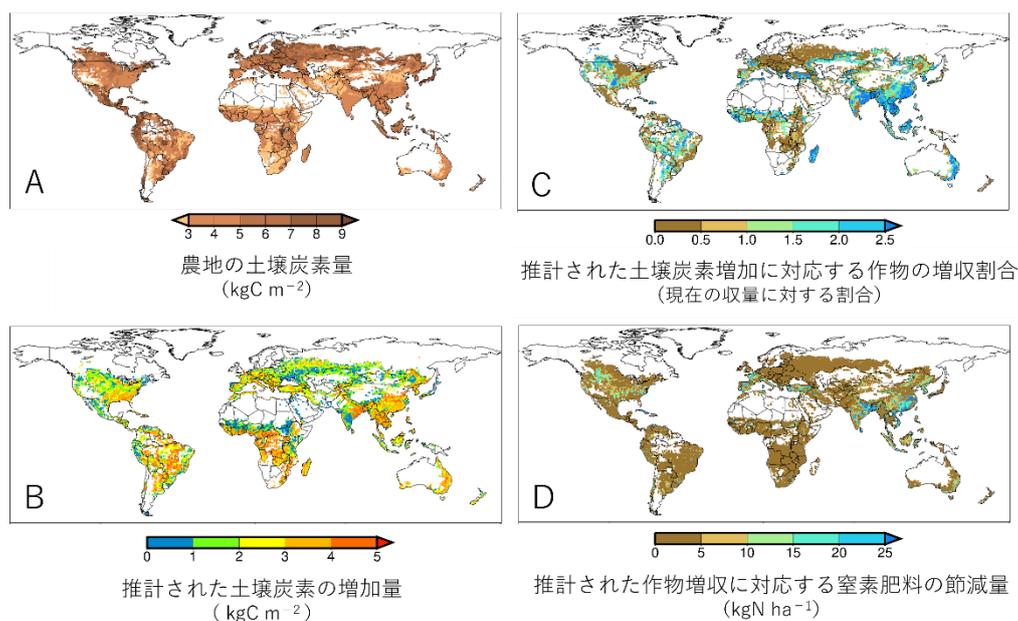


図-4.4 現在の土壤炭素量と推計された土壤炭素量の増加、土壤炭素量の増加がもたらす増収効果と節減できる窒素量

Aは農地の土壤表層30cmに含まれる現在の有機炭素量。Bは農地管理により期待される土壤炭素増加量の推計値(6作物計)。Cは推計された土壤炭素増加量に対応する増収効果(栽培面積の違いを考慮したうえで6作物を平均)。Dは推計した作物生産量の増加に対応する無機窒素肥料の節減量(栽培面積の違いを考慮したうえで6穀物を平均)。白色の地域は栽培されていない地域。

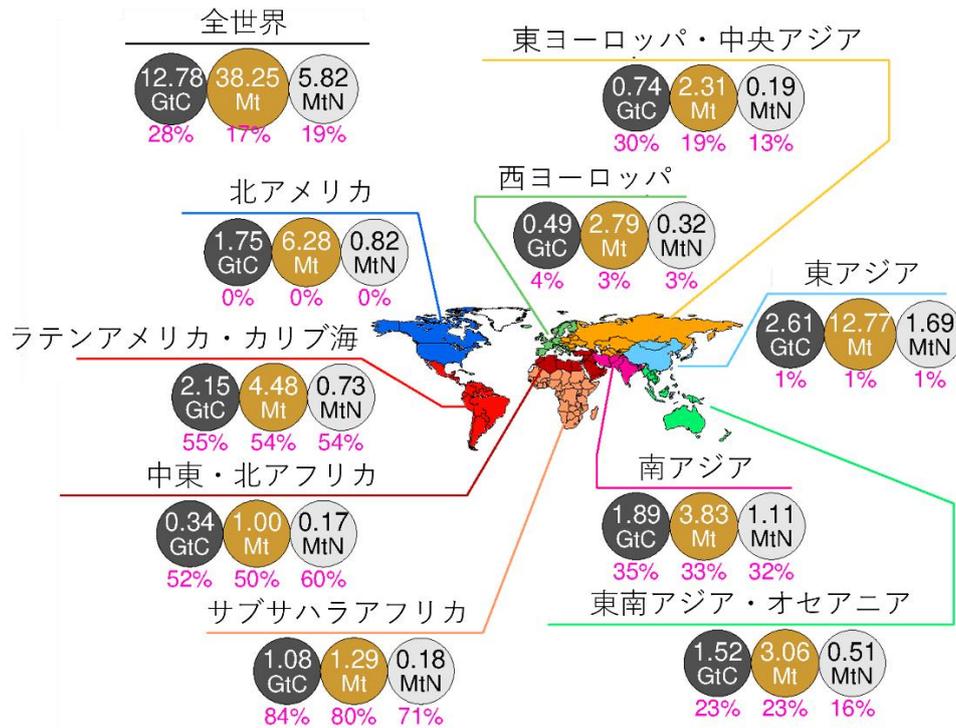


図-4.5 全世界および地域別に集計した農地の土壌炭素量の増加、作物増収量、無機窒素節減量
 それぞれの円の下のピンク色の数字は小規模農家の寄与割合。GtC (ギガトン炭素) は炭素換算での貯留量 (1ギガトン炭素=10億トン炭素)。Mt (メガトン) は乾物重での穀物収穫量 (1メガトン=100万トン)。MtNは窒素換算での節減量 (1メガトン窒素=100万トン窒素)。全世界で集計した作物生産量の増加量3,825万トンはフランスの2010年代のコムギ年間生産量(3,800万トン)に匹敵する。窒素投入の節減量582万トンは2000年代の世界の窒素投入量8,073万トンの7.2%に相当する。

③BECCSによる水資源の競争を介したSDG2へのトレードオフ

水欠乏地域の低所得国における灌漑導入率は小規模農家で37%、非小規模農家で42%と報告されている⁵⁾。SDG2が掲げる小規模農家の収入増加を達成するためには、この灌漑導入率の格差5%を縮小することが重要である。サブテーマ4では、まず、全球作物モデルCYGMAの出力を用いて世界の小規模農家の農業生産額を推計する手法を開発し、推計値(図-4.6)が国連の報告値と概ね整合的であることを確認した。気候変動(CMIP6)を考慮したCYGMAモデルによるシミュレーションを行い、世界の他機関の作物モデルによる収量の将来見通しと比較した⁶⁾。そのうえで、気候変動に加えて、社会経済(SSP)の将来シナリオを考慮したCYGMAモデルによるシミュレーションを行い、気候緩和が達成されるSSP126シナリオでの今世紀末の小規模農家の農業生産額は、SSPで想定される開発途上国での技術水準の向上と気候変動の悪影響の軽減によって、現在の水準に対して51.0%増加するとの結果を得た(図-4.7A)。この値は、低・中所得国の平均では、気候変動が進行するSSP585シナリオの場合よりも52.7%高く、気候緩和が小規模農家の農業生産額に好影響を及ぼすことを明らかにした(図-4.7B)。さらに、灌漑導入率を現在より5%上昇させた場合、SSP585シナリオでも小規模農家の農業生産額はアジアでは13~17%、アフリカでは4~11%増加するとの見通しを示した(表-4.1)。この農業生産額の増加割合は、非水欠乏地域で灌漑導入率を5%上昇させた場合に期待される農業生産額の増加割合(3~5%)より遥かに大きく、水欠乏地域における灌漑導入率の格差縮小の重要性を裏付けるものである⁷⁾。

上記の結果を踏まえ、BECCSの推進が水資源の競争を介して灌漑導入率の格差縮小に及ぼすトレードオフについて検討した。食糧生産など他の水利用と競合しない範囲内でエネルギー作物に灌漑する場合、取水量の増加は世界全体で年間298 km³に抑えられるものの、BECCSによる炭素貯留量は年間20.9億トンに留まることがサブテーマ3により明らかにされている⁸⁾。パリ協定が掲げる1.5℃目標または2℃目標の達成のために必

要なBECCSによる炭素貯留量は年間16～41億トンと言われており、年間20.9億トンの炭素貯留では気候緩和目標の達成には不十分な可能性が高い。しかしながら、エネルギー作物に十分に灌漑した場合、BECCSによる炭素貯留量は世界全体で年間34.2億トンに増加するものの、取水量の増加は年間3,929 km³に上ると報告されている⁸⁾。サブテーマ3の報告によれば、この取水量の増加は2010年の世界の総取水量4,001 km³に匹敵するほど膨大な量である。この場合には、アジアやアフリカでは、他の水利用との競合を避けた場合の取水量と比べて20～21倍もの水が必要になると見積もられており、小規模農家の灌漑導入率を上昇させる余地がないことは明らかである。すなわち、エネルギー作物に十分に灌漑することを想定した強力なBECCSの推進は、世界の水欠乏地域での水利用の競合をさらに悪化させ、水欠乏地域の低所得国で小規模農家の灌漑導入率に見られる格差を縮小することを阻む恐れがある。

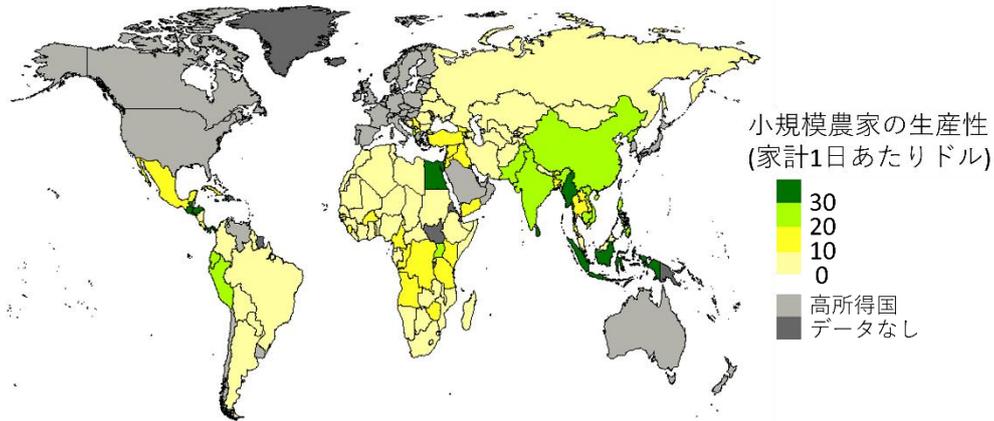


図-4.6 低・中所得国における2005年の小規模農家の生産性の推計値

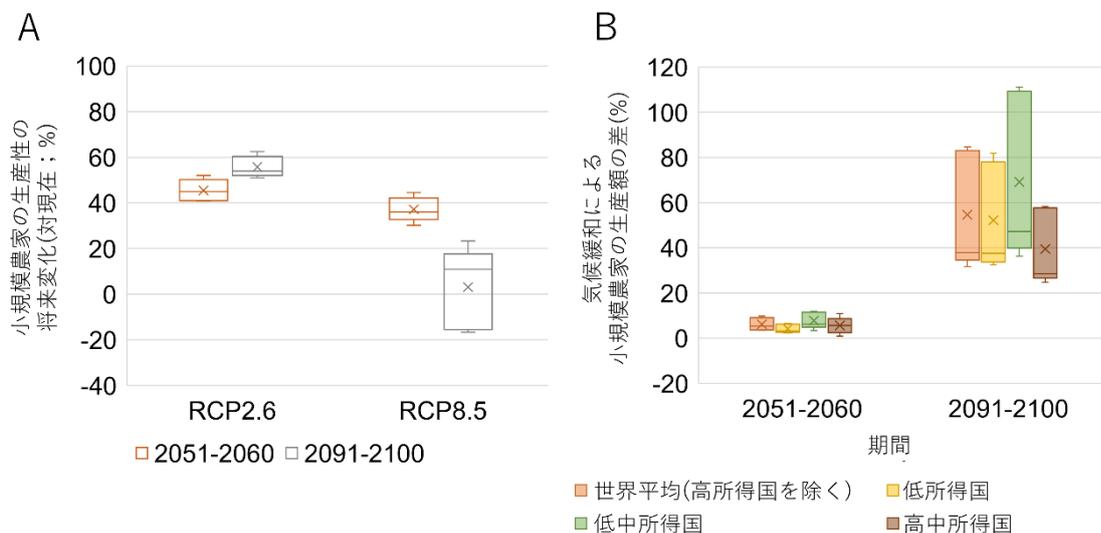


図-4.7 気候緩和が小規模農家の農業生産額に及ぼす影響

Aは、気候緩和が進むシナリオ (SSP126) と気候変動が進行するシナリオ (SSP585) それぞれでの今世紀半ばと今世紀末の農業生産額の将来変化見通しを示す (対：現在)。Bは、国の所得水準ごとに示したSSP585シナリオでの農業生産額の将来見通しとSSP126シナリオでの将来見通しの差であり、気候緩和の影響を示す。結果は、まず、3つの社会経済シナリオ (SSP1、SSP3、SSP5) と適応の有無の組み合わせからなる6つの将来見通しをGCMごとに平均した。箱ひげ図は5つのGCM間の結果のばらつきを表す。中央値 (箱の中の水平線)、平均値 (×印)、25～75パーセンタイル (箱)、最小～最大幅 (ひげ) を示す。ここで考慮したSSPとRCPの組み合わせの中には、SSP1-RCP8.5やSSP3-RCP2.6といった現実的でないものも含まれるが、同じ社会経済条件での気候変動影響に焦点を当てるため、こうした組み合わせも用いた。

表-4.1 全世界および地域別に集計した灌漑面積の格差縮小による小規模農家の農業生産額の増加と、BECCSによる取水量の増加

小規模農家の農業生産額の増加は水欠乏地域の低所得国についてのみ示した。

	Goal 2	Goal 6		
	水欠乏地域の低所得国において灌漑面積を現在から5%拡大した場合に期待される小規模農家の農業生産額の増加(%)	BECCSによる取水量の増加(km ³ yr ⁻¹)		
		A. 他の水利用と競合してもエネルギー作物が必要とする量を十分に灌漑	B. 他の水利用と競合しない範囲内でエネルギー作物に灌漑	A/B
アジア	13-17	784	40	20
アフリカ	4-11	1,089	52	21
オセアニア	-	100	2	50
ヨーロッパ	-	485	100	5
中央・南アメリカ	-	1,113	83	13
北アメリカ	-	306	19	16
世界	10-11	3,929	298	13

④食糧生産の観点での気候対策のシナジー・トレードオフ

農地管理による炭素貯留のシナジーと、BECCS推進に伴うトレードオフについては上で既に述べたが、その他のシナジー・トレードオフについて食糧生産の観点から検討した結果も報告する。この検討はサブテーマ1, 2, 3と協力して行った⁹⁾。

気候変動適応のために堤防の防護水準を向上させると洪水リスクに晒される人の数を全世界で2,700万人減らすことができ、SDG1・SDG11が掲げる災害による被害軽減に直接的に寄与することが、サブテーマ1の解析により明らかになっている¹⁰⁾。サブテーマ4ではサブテーマ1と協力して洪水による主要作物（トウモロコシ、コメ、コムギ、ダイズ）の収量被害を推計し（図-4.8）、生産被害額に換算した。その結果、過去35年間（1982～2016年）の洪水による生産被害額は全世界で56.2億ドルと推計された¹¹⁾。この結果から、洪水防護水準を向上させる適応策により、小規模農家の農業生産額にシナジーが期待できる。しかしながら、回帰分析の結果は、洪水リスク人口が10万人減少すると小規模農家の年間農業生産高は1世帯あたり0.053ドル増加することが示唆されたものの、この関係は統計的には有意ではなかった（ $p=0.549$ ）（図-4.9）。また、農地への炭素貯留により窒素肥料の投入を節減できる可能性があり、それに伴って水質にシナジーが期待される。しかしながら、回帰分析の結果は、窒素肥料投入量が100万トン節減されると水質が良い水域割合は63.8%増加することが示唆されたものの、有意な結果は得られなかった（ $p=0.427$ ）（図-4.9）。今回、相関解析に用いたデータは国レベルのものである。洪水被害の軽減による小規模農家へのシナジーや農地への炭素貯留による水質へのシナジーは地理的に局所的と考えられ、国レベルのデータでは空間解像度が不十分だったと考えられる。播種日の移動や品種の切替は適応策として気候変動下の小規模農家の農業生産額を増加させるが、SDG1, 6, 11といった水に関連するSDGsへの寄与の有無については今回の相関解析からは分からなかった（図-4.9）。

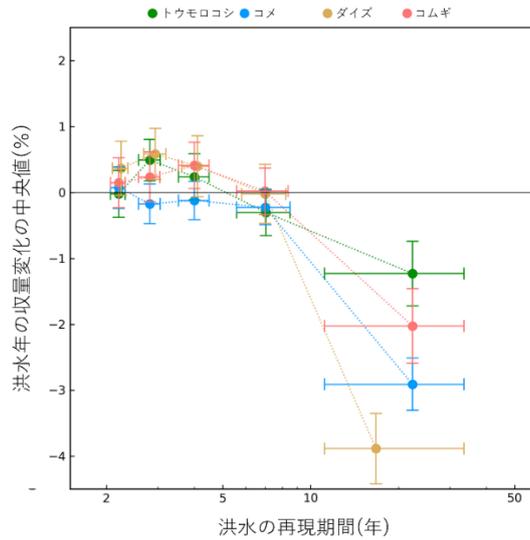


図-4.8 洪水の再現期間と洪水年の収量変化の中央値

横軸の再現期間は洪水の強度を表す。縦軸は、対象作物が栽培されているグリッドセルにおいて対象とする強度の洪水が発生した年の収量変化（対：平年収量）をサンプルとして計算した中央値。解析期間は35年間（1982～2016年）。縦横の線はブートストラップにより推定したそれぞれの95%信頼区間。

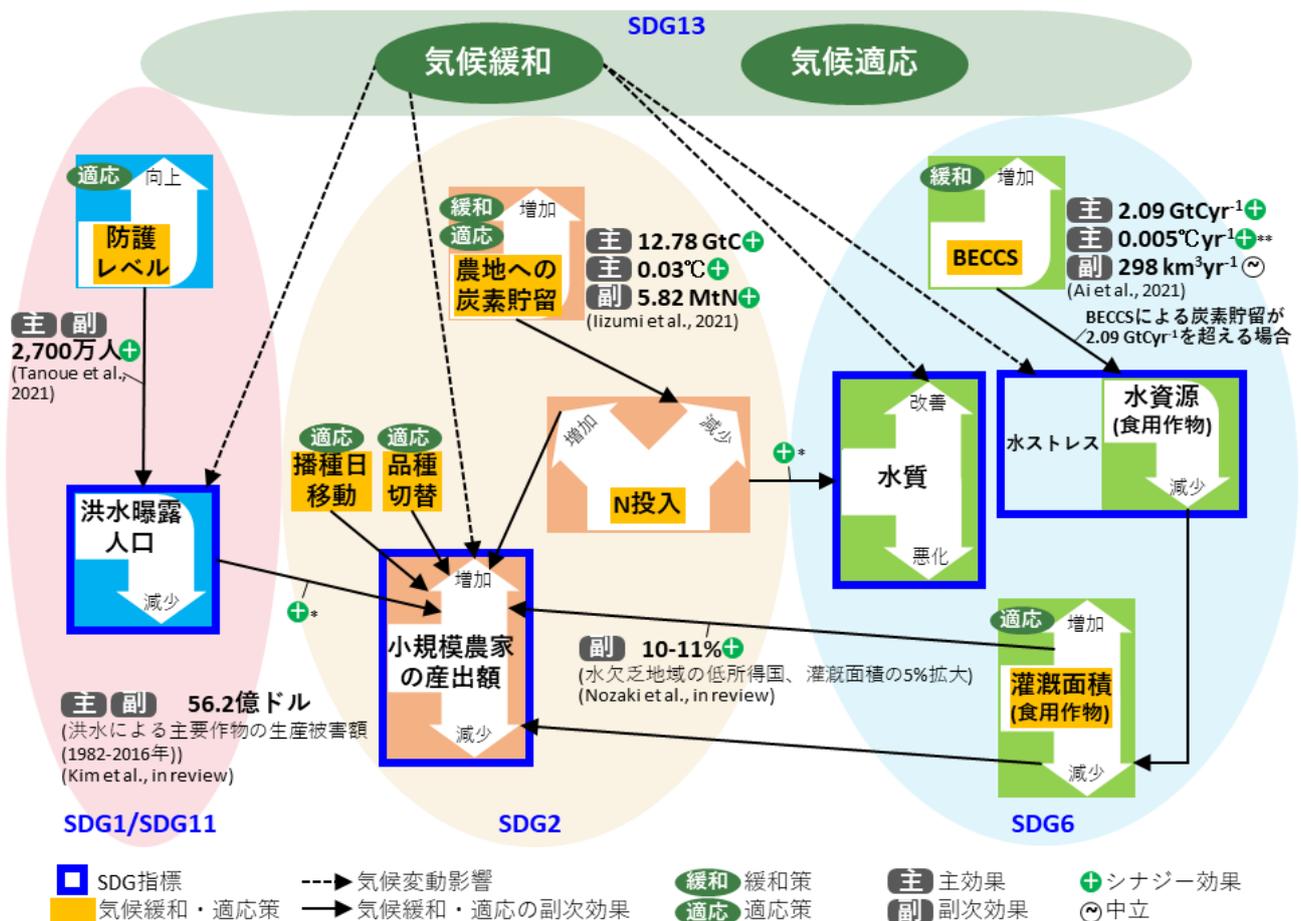


図-4.9 気候緩和・適応による水・食糧に関するSDGsへの副次効果

図中の*は、回帰分析の結果、傾きの符号は一般的な予想と整合的だったものの、統計的に有意な結果ではなかったことを示す。**は、気温上昇抑制効果は、1870年以降の累積CO₂排出量と1850-1900年の10年ごとの世界平均気温の変化との経験的な関係²⁾に基づいて算出した。

5. 研究目標の達成状況

研究目標に掲げた3つの目標はいずれも目標通りか、目標を上回る成果を上げた。

目標1については当初の目標を上回り、論文投稿¹⁾に至った。この目標に対応した研究では、コメ多期作が行われているアジア地域の6か国について農業統計データを収集し、コメ収穫面積の年々変動を気象条件から説明する経験的なモデルを構築した。モデルは、平年に対する各年の面積の乖離を被説明変数、播種前後の期間および生育期間中の極端な気温と降水量を説明変数とする弾性ネット回帰である。交差検証法によりモデルの予測が頑健であることを確認した。また、面積の場合と同様に収量の年々変動についてもモデルを構築・検証した。

目標2については概ね目標通りの成果を上げた。この目標に対応した成果は主に3つの研究にまたがる。第一に、目標1で開発した面積と収量の気候応答モデルに気候変動シナリオを入力し、面積と収量の気候応答が必ずしも連動しないことが、アジアのコメ生産量に対する気候変動影響を軽減するとの将来見通しを示した¹⁾。さらに、水田面積が各国のメタン排出量の決定要因の一つであることに鑑みると、コメ収穫面積（水田面積）の変動が農地を利用した緩和策の効果の規模に影響を与える可能性を指摘した。第二に、気候変動と社会経済発展を考慮した全球作物モデルのシミュレーション出力を用いて、SDG2の指標である小規模農家の生産額の将来見通しを示し、気候緩和が小規模農家の生産額の増加に寄与することを明らかにした⁷⁾。さらに、サブテーマ3で得られたBECCSと他の水利用との競合に関する知見を踏まえて、BECCSを強力に推進した場合、水欠乏地域の低所得国では小規模農家と非小規模農家の間の灌漑導入率の格差縮小が困難になる恐れがあることを指摘した⁹⁾。この一連の研究のうち全球作物モデルのシミュレーション結果については、CMIP6に基づく予測では世界の穀物収量に対する気候変動影響の将来見通しが顕著に悪化し、従来の想定より早い時期に適応の正念場を迎えるとのプレスリリースを国立環境研究所と共同で行った¹²⁾。また、世界の穀物生産における気候変動への適応費用は2°C上昇で年間610億ドルに上るとのプレスリリースを国際農林水産業研究センターと共同で行った¹³⁾。第三に、作物収量と農地分布、サブテーマ1から提供を受けた河川洪水の氾濫原分布データを組み合わせて解析し、過去35年間（1982～2016年）の洪水による世界の作物生産被害額を推計した¹¹⁾。

目標3については発表した論文⁴⁾に基づいてプレスリリース¹³⁾を行うなど当初の目標を上回る成果を上げた。この目標に対応した研究では、作物収量、土壌、気候、栽培管理の全球グリッドデータを解析し、農地管理による土壌炭素量の増加とそれに伴って期待できる気候緩和効果を明らかにした。さらに、農地への炭素貯留によるシナジーとして、作物増収効果と無機窒素肥料の節減効果をそれぞれ定量化し、SDG6が掲げる水質保全にも寄与する可能性を指摘した。農地への炭素貯留による窒素節減量データは、水質保全へのシナジーの定量化を目指し、サブテーマ2に提供した。

6. 引用文献

- 1) N. Hosokawa, Y. Doi, W. Kim and T. Iizumi: *Sci. Rep.*, 13, 6219 (2023) (IF=4.997), Contrasting area and yield response to extreme climate contributes to stabilized rice production in Asia. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-33413-7>
- 2) T. Iizumi and R. Wagai: *Sci. Rep.*, 9, 19744 (2019) (5-year IF=5.516), Leveraging drought risk reduction for sustainable food, soil and climate via soil organic carbon sequestration.
- 3) FAO: (2021), *The impact of disasters and crises on agriculture and food security: 2021*.
- 4) T. Iizumi, N. Hosokawa and R. Wagai: *CABI Agric. Biosci.*, 2, 43 (2021) (IF=N.A.), Soil carbon-food synergy: sizable contributions of small-scale farmers.
- 5) V. Ricciardi, A. Wane, B. S. Sidhu, C. Godde, D. Solomon, E. McCullough, F. Diekmann, J. Porciello, M. Jain, N. Randall and Z. Mehrabi: *Nat. Sustain.*, 3, 836-844 (2020), A scoping review of research funding for small-scale farmers in water scarce regions.
- 6) J. Jägermeyr, C. Müller, A. C. Ruane, J. Elliott, J. Balkovic, O. Castillo, B. Faye, I. Foster, C. Folberth, J. A. Franke, K. Fuchs, J. R. Guarin, J. Heinke, G. Hoogenboom, T. Iizumi, A. K. Jain, D. Kelly, N. Khabarov, S. Lange, T.-S. Lin, W. Liu, O. Mialyk, S. Minoli, E. J. Moyer,

- M. Okada, M. Phillips, C. Porter, S. S. Rabin, C. Scheer, J. M. Schneider, J. F. Schyns, R. Skalsky, A. Smerald, T. Stella, H. Stephens, H. Webber, F. Zabel and C. Rosenzweig: *Nat. Food*, 2, 873-885 (2021) (IF=20.443), Climate impacts on global agriculture emerge earlier in new generation of climate and crop models.
- 7) N. Nozaki, N. Hosokawa, Y. Doi, W. Kim and T. Iizumi: *Environ. Res. Commun.*, 5, 031006 (2023) (IF=3.237), Global modeling of indicators related to small-scale farmers used in sustainable development goals: testing in a changing climate. DOI:10.1088/2515-7620/acc3e2
- 8) Z. Ai, N. Hanasaki, V. Heck, T. Hasegawa and S. Fujimori: *Nat. Sustain.*, 4, 884-891 (2021) (IF=27.157), Global bioenergy with carbon capture and storage potential is largely constrained by sustainable irrigation.
- 9) N. Nozaki, Z. Ai, N. Hanasaki, T. Iizumi, M. Kiguchi, W. Kim, T. Oki, A. B. Rimba, D. Tokuda and Y. Hirabayashi: *Environ. Res. Lett.*, in review, Side effects of climate mitigation and adaptation to sustainable development related to water and food.
- 10) M. Tanoue, R. Taguchi, H. Alifu and Y. Hirabayashi: *Nat. Clim. Chang.*, 11, 823-826 (2021), Residual flood damage under intensive adaptation.
- 11) W. Kim, T. Iizumi, N. Hosokawa, M. Tanoue and Y. Hirabayashi: *Environ. Res. Lett.*, in print, Flood impacts on global crop production: advances and limitations.
- 12) 国立環境研究所と農研機構の合同プレスリリース, 最新の予測では世界の穀物収量に対する気候変動影響の将来見通しが顕著に悪化～気候変動適応の正念場、従来の想定より早い時期に～. 2021年11月1日.
- 13) 農研機構と国際農林業研究センターの合同プレスリリース, 世界の穀物生産における温暖化への適応費用を試算 2° C上昇で年間610億ドル、対策困難な被害の増加も. 2020年10月1日.
- 14) 農研機構プレスリリース, 農地の炭素量増加による3つの相乗効果を世界規模で定量的に推定—作物増収、温暖化緩和、窒素投入量の節減. 2022年3月29日.

Ⅲ. 研究成果の発表状況の詳細

(1) 誌上発表

<査読付き論文>

【サブテーマ1】

- 1) A. Rimba and Y. Hirabayashi : Water 15, 613 (2023) (IF: 3.530), Interlinkages of water-related SDG indicators globally and in low-income countries.
 - 2) H. Alifu, Y. Hirabayashi, Y. Imada and H. Shioyama: Scientific Reports, 12, 20687 (2022) (IF=4.997), Enhancement of river flooding due to global warming, doi:10.1038/s41598-022-25182-6.
 - 3) 津村悠虎・関山大輔・田上雅浩・平林由希子: 土木学会論文集B1(水工学), 78巻, 2号, I_559-I_564 (2022) (IF=N.A.), 世界の建設費用要素の多変量解析に基づく河川堤防の建設単価費用推計モデルの提案.
 - 4) M. Tanoue, R. Taguchi, H. Alifu and Y. Hirabayashi: Nat. Clim. Chang., 11, 823-826 (2021) (IF=28.862), Residual flood damage under intensive adaptation.
 - 5) R. Taguchi, M. Tanoue, D. Yamazaki and Y. Hirabayashi: Water 14, 967 (2021) (IF=3.530), Global-scale assessment of economic losses caused by flood-related business interruption, doi:10.3390/w14060967.
 - 6) Y. Hirabayashi, M. Tanoue, O. Sasaki: Scientific Reports 11, 3740 (2021) (IF=4.997), Global exposure to flooding from the new CMIP6 climate model projections. doi:10.1038/s41598-021-83279-w.
 - 7) J. Takakura, S. Fujimori, K. Takahashi, N. Hanasaki, T. Hasegawa, Y. Hirabayashi, Y. Honda, T. Iizumi, C. Park, M. Tamura and Y. Hijioka: Geoscientific Model Development, 14, 3121-3140 (2021) (IF=6.892), Reproducing complex simulations of economic impacts of climate change with lower-cost emulators, doi:10.5194/gmd-2020-349.
 - 8) Y. Hirabayashi, H. Alifu, D. Yamazaki, G. Donchyts, Y. Kimura: Hydrological Research Letters 15 (2), 37-43 (2021) (IF=N.A.), Detectability of variation in river flood from satellite images, doi:10.3178/hrl.15.37.
 - 9) Y. Hirabayashi, H. Alifu, D. Yamazaki, Y. Imada, H. Shioyama, Y. Kimura: Progress in Earth and Planetary Science, 8, 36 (2021) (IF=3.604), Anthropogenic climate change has changed frequency of past flood during 2010-2013, doi: 10.1186/s40645-021-00431-w.
 - 10) M. Tanoue, R. Taguchi, S. Nakata, S. Watanabe, S. Fujimori and Y. Hirabayashi: Water Resources Research, 56 (2020) (IF=4.310), Estimation of direct and indirect economic losses caused by a flood with long-lasting inundation: Application to the 2011 Thailand flood.
 - 11) H. Alifu, J.-F. Vuillaume, B.A. Johnson, Y. Hirabayashi: Geomorphology, 369, 107365 (2020) (IF=4.406), Machine-learning classification of debris-covered glaciers using a combination of Sentinel-1/-2 (SAR/optical), Landsat 8 (thermal) and digital elevation data.
 - 12) 吉岡伸隆・井手浄・守田優・平林由希子: 土木学会論文集B1(水工学), 76巻, 2号, I_55-I_60. (2020) (IF=N.A.), 地球温暖化による豪雨の変化と都市河川洪水への影響.
 - 13) K. Kakinuma, M.J. Puma, Y. Hirabayashi, M. Tanoue, E.A. Baptista, S. Kanae: Environmental Research Letters, 15 (12), 124029 (2020) (IF=6.947), Flood-induced population displacements in the world, doi:10.1088/1748-9326/abc586.
- 4、6、7、9、13がIPCC WG2 AR6に引用されたサブテーマ1の研究者が関連する論文。

【サブテーマ2】

- 1) D. Tokuda, H. Kim, D. Yamazaki, and T. Oki: Geoscientific Model Development, 14, 5669-5693 (2021) (IF=5.240), Development of a coupled simulation framework representing the lake and

river continuum of mass and energy (TCHOIR v1.0), doi: 10.5194/gmd-14-5669-2021.

- 2) 横島徳太・高橋潔・江守正多・仁科一哉・田中克政・井芹慶彦・本田靖・木口雅司・鼎信次郎・岡本章子・岩崎茜・前田和・沖大幹: 環境科学会誌、34(5), 214-230 (2021) (IF=N.A.), 地球温暖化による影響の連鎖の全体像の可視化と市民対話, doi: 10.11353/sesj.34.214.
- 3) C.-Y. Zhang, and T. Oki: *Water*, 13, 2253 (2021) (IF=3.530): Optimal multi-sectoral water resources allocation based on economic evaluation considering the environmental flow requirements: A case study of Yellow River Basin, doi: 10.3390/w13162253.
- 4) T. Oda, J. Takakura, L. Tang, T. Iizumi, N. Itsubo, H. Ohashi, M. Kiguchi, N. Kumano, K. Takahashi, M. Tanoue, M. Tamura, Q. Zhou, N. Hanasaki, T. Hasegawa, C. Park, Y. Hijioka, Y. Hirabayashi, S. Fujimori, Y. Honda, T. Matsui, H. Matsuda, H. Yokoki, and T. Oki: *Environmental Research Letters*, in press, Total economic costs of climate change at different discount rates for market and non-market values.

【サブテーマ3】

- 1) Z. Ai, N. Hanasaki, V. Heck, T. Hasegawa, and S. Fujimori: *Geoscientific Model Development*, 13, 6077-6092 (2020) (IF=5.240), Simulating second-generation herbaceous bioenergy crop yield using the global hydrological model H08 (v.biol), doi:10.5194/gmd-13-6077-2020.
- 2) Z. Ai, N. Hanasaki, V. Heck, T. Hasegawa, and S. Fujimori: *Nature Sustainability*, 4, 884-891 (2021) (IF=12.08), Sustainable irrigation largely constrains the global BECCS potential, doi:10.1038/s41893-021-00740-4.
- 3) Z. Ai, F. Ishihama, and N. Hanasaki: *Water Resources Research*, 58, e2021WR031156 (2022) (IF=6.16), Mapping Current and Future Seawater Desalination Plants Globally Using Species Distribution Models, doi:10.1029/2021WR031156.

【サブテーマ4】

- 1) T. Iizumi, Z. Shen, J. Furuya, T. Koizumi, G. Furuhashi, W. Kim, and M. Nishimori: *Clim. Res.*, 80, 203-218 (2020) (IF=2.023), Climate change adaptation cost and residual damage to global crop production, doi:10.3354/cr01605.
- 2) T. Iizumi, Y. Takaya, W. Kim, T. Nakaegawa, and S. Maeda: *Weather Forecast.*, 36, 285-299 (2021) (IF=2.950), Global Within-Season Yield Anomaly Prediction for Major Crops Derived Using Seasonal Forecasts of Large-Scale Climate Indices and Regional Temperature and Precipitation, doi:10.1175/WAF-D-20-0097.1.
- 3) A. C. Ruane, M. Phillips, C. Müller, J. Elliott, J. Jägermeyr, A. Arneth, J. Balkovic, D. Deryng, C. Folberth, T. Iizumi, R. C. I. N. Khabarov, P. Lawrence, W. Liu, S. Olin, T. A.M. Pugh, C. Rosenzweig, G. Sakurai, E. Schmid, B. Sultan, X. Wang, A. de Wit, and H. Yang: *Agric. For. Meteorol.*, 300, 108313 (2021) (IF=4.651), Strong regional influence of climatic forcing datasets on global crop model ensembles, doi:10.1016/j.agrformet.2020.108313.
- 4) T. Iizumi, N. Hosokawa and R. Wagai: *CABI Agric. Biosci.*, 2, 43 (2021) (IF=N.A.), Soil carbon-food synergy: sizable contributions of small-scale farmers.
- 5) T. Iizumi, Y. Masaki, T. Takimoto and Y. Masutomi: *Euro. J. Agron.*, 130, 126367 (2021) (IF=5.722), Aligning the harvesting year in global gridded crop model simulations with that in census reports is pivotal to national-level model performance evaluations for rice.
- 6) J. Jägermeyr, C. Müller, A. C. Ruane, J. Elliott, J. Balkovic, O. Castillo, B. Faye, I. Foster, C. Folberth, J. A. Franke, K. Fuchs, J. R. Guarin, J. Heinke, G. Hoogenboom, T. Iizumi, A. K. Jain, D. Kelly, N. Khabarov, S. Lange, T.-S. Lin, W. Liu, O. Mialyk, S. Minoli, E. J. Moyer, M. Okada, M. Phillips, C. Porter, S. S. Rabin, C. Scheer, J. M. Schneider, J. F. Schyns, R.

- Skalsky, A. Smerald, T. Stella, H. Stephens, H. Webber, F. Zabel and C. Rosenzweig: Nat. Food, 2, 873-885 (2021) (IF=20.443), Climate impacts on global agriculture emerge earlier in new generation of climate and crop models.
- 7) K.-H. Kim, Y. Doi, N. Ramankutty and T. Iizumi: Environ. Res. Lett., 16, 093005 (2021) (IF=6.947), A review of global gridded cropping system data products.
- 8) Y. Doi, Y. Shin, W. Kim, J. Choi and T. Iizumi: J. Agric. Meteorol. 78, 66-77 (2022) (IF=1.375), Assessing the subnational-level yield forecast skills of the 2019/20 season NARO-APCC Joint Crop Forecasting Service for Southern Hemisphere countries.
- 9) T. Iizumi, M Tsubo, A. Maruyama, I. S. A. Tahir, Y. Kurosaki and H. Tsujimoto: Clim. Res., 89, 85-98 (2023) (IF=1.459), High-temperature indicators for capturing the impacts of heat stress on yield: lessons learned from irrigated wheat in the hot and dry environment of Sudan.
- 10) N. Nozaki, N. Hosokawa, Y. Doi, W. Kim and T. Iizumi: Environ. Res. Commun., 5, 031006 (2023) (IF=3.237), Global modeling of indicators related to small-scale farmers used in sustainable development goals: testing in a changing climate. DOI:10.1088/2515-7620/acc3e2
- 11) R. Yoshida and T. Iizumi: Environ. Res. Lett., 16, 093005 (2023) (IF=6.947), Climate mitigation sustains agricultural research and development expenditure returns for maize yield improvement in developing countries DOI:10.1088/1748-9326/acc543. (2023年3月17日受理)
- 1、2、3、6がIPCC WG2 AR6に引用されたサブテーマ4の研究者が関連する論文。

<その他誌上発表(査読なし)>

【サブテーマ1】

該当するものはない

【サブテーマ2】

該当するものはない

【サブテーマ3】

- 1) Ai, Z., and Hanasaki, N.: Simulation of crop yield using the global hydrological model H08 (crp.v1), Geosci. Model Dev. Discuss., 2023, 1-22, 10.5194/gmd-2022-285, 2023. (注: 査読中の論文のプレプリント)

【サブテーマ4】

該当するものはない

(2) 口頭発表(学会等)

【サブテーマ1】

- 1) 川崎公輝, 平林由希子, Rimba Andi, Zhipin Ai, 花崎直太, 水に関する再生可能エネルギーから見たインドネシアにおけるSDG7.2の達成可能性評価, 水文・水資源学会2022年度研究大会, 京都大学, 2022年9月4-7日 (9/4)
- 2) Andi Rimba and Yukiko Hirabayashi, Global investigation of synergy and trade-off between water-related SDGs indicators, 水文・水資源学会2021年度研究大会, オンライン, 2021年9月15-18日 (9/18)
- 3) 平林由希子, 山田果林, 山崎大, 石川悠生, 企業実務への活用を想定した全球の洪水ハザードマップの比較評価, 水文・水資源学会2021年度研究大会, オンライン, 2021年9月15-18日 (9/16)
- 4) 吉岡伸隆, 井手浄, 花崎直太, 平林由希子, 降水量データの違いが日本域の河川流量再現性に与える影響の評価, 水文・水資源学会2021年度研究大会, オンライン, 2021年9月15-18日 (9/15)
- 5) Haireti Alifu, Yukiko Hirabayashi and Dai Yamazaki, Attribution of floods events (2010-2013) to climate change, 水文・水資源学会2021年度研究大会, オンライン, 2021年9月15-18日 (9/15)

- 6) 山田利紀, 平林由希子, 藤田凌, 山崎大, 物理過程および地形の違いによる全球河川モデルの感度の地域間比較, 土木学会全国大会第76回年次学術講演会, オンライン, 2021年9月9日
- 7) 山田利紀, 平林由希子, 藤田凌, 田上雅浩, 山崎大, 全球河川モデルの不確実性および洪水リスクの変化, 水文・水資源学会2021年度研究大会, オンライン, 2021年9月15-18日(9/16)
- 8) 吉岡伸隆, 平林由希子, 都市流域における温暖化影響を考慮した計画降雨の提案, 令和2年度土木学会全国大会第75回年次学術講演会(2020), オンライン
- 9) 塚本篤輝, 平林由希子: 大規模アンサンブル実験を用いた過去60年間の洪水への温暖化の影響の評価, 令和2年度土木学会全国大会第75回年次学術講演会(2020), オンライン
- 10) 山田利紀, 平林由希子, 日本における記録的な豪雨と洪水の関係についての分析, 令和2年度土木学会全国大会第75回年次学術講演会(2020), オンライン
- 11) 平林由希子, 田上雅浩, 佐々木織江, Zhou Xudong, 山崎大, CMIP6温暖化実験における河川洪水への曝露人口予測, Japan Geoscience Union Meeting 2020(2020), オンライン

【サブテーマ2】

- 1) Oki, T., 1st Japan-Thailand Hydrology Seminar (2022) “Collaboration in Thailand for 30 years” (国外)
- 2) 木野佳音, 日本気象学会秋季大会(2022)「イベント的暖湿気流入が南極降水同位体比に与える温暖バイアスの評価」(国内)
- 3) 徳田大輔・奈良秀春・金炯俊, 第67回水工学講演会(2022)「自然湖と貯水池の水面面積変動の違いに関する全球分析」(国内)

【サブテーマ3】

- 1) Z. Ai, N. Hanasaki: Quantification of the Impacts of Sustainable Irrigation on Global BECCS Potential, AGU Fall Meeting 2020(2020), online
- 2) Z. Ai and N. Hanasaki (2021): How would irrigation enhance the global BECCS potential in view of sustainable water use?, EGU General Assembly 2021
- 3) Z. Ai and N. Hanasaki (2021): Global seawater desalination plants prediction using species distribution models, Japan Geoscience Union Meeting 2021
- 4) Z. Ai, N. Hanasaki, F. Ishihama (2021): Prediction of global seawater desalination plants distribution using species distribution models, Japan Society of Hydrology and Water Resources
- 5) Z. Ai, F. Ishihama, and N. Hanasaki (2022): Identifying the geographic distribution of seawater desalination plants globally using species distribution models, EGU General Assembly 2022
- 6) Z. Ai and N. Hanasaki (2022): Improved simulation of crop yield in a global hydrological model H08: A case study of maize, Japan Society of Hydrology and Water Resources 2022

【サブテーマ4】

- 1) T. Iizumi: Climate change adaptation cost and residual damage to global crop production. France-Japan Workshop: Maximizing climate, land-use and biodiversity synergies for food security. October 19-20, (2020) Webinar.
- 2) T. Iizumi: Evaluating the 2019 NARO-APCC Joint Crop Forecasting Service yield forecasts for Northern Hemisphere countries. The 13th Asia-Oceania Group on Earth Observations (AOGEO) Symposium: The Task Group 5 - Asia RiCE (Agriculture and Food Security) Online Session. February 24, (2021) Webinar.
- 3) T. Iizumi, Y. Shin, J. Choi, M. van, der Velde, L. Nisini, W. Kim and K.-H. Kim: Evaluating the 2019 NARO-APCC Joint Crop Forecasting Service yield forecasts for Northern Hemisphere countries, AGU Fall Meeting (2020)
- 4) J. Jägermeyr, C. Müller, A. C. Ruane, J. Elliott, J. Balkovic, O. Castillo, B. Faye, I. Foster, C. Folberth, J. A. Franke, K. Fuchs, J. Guarin, J. Heinke, G. Hoogenboom, T. Iizumi, A. K. Jain, D. Kelly, N. Khabarov, S. Lange, T.-S. Lin, W. Liu, O. Mialyk, S. Minoli, E. J.

Moyer, M. Okada, M. Phillips, C. Porter, S. Rabin, C. Scheer, J. M. Schneider, J. F. Schyns, R. Skalsky, A. Smerald, T. Stella, H. Stephens, H. Webber, F. Zabel and C. Rosenzweig: Climate change signal in global agriculture emerges earlier in new generation of climate and crop models, AGU Fall Meeting (2021)

- 5) T. Iizumi, Y. Masaki, T. Takimoto and Y. Masutomi: Aligning the harvesting year in global gridded crop model simulations with that in census reports is pivotal to national-level model performance evaluations for rice, AGU Fall Meeting (2021)
- 6) N. Hosokawa, T. Iizumi and R. Wagai: Soil carbon-food synergy: sizable contributions of small-scale farmers, AGU Fall Meeting (2021)
- 7) T. Iizumi: Towards closer linking agricultural monitoring, seasonal crop forecasting and climate change adaptation planning, European Commission's Joint Research Centre (EC/JRC) Seminar: Food4Thought (2021)
- 8) 野崎乃倫子、細川奈々枝、土井康弘、金元植、飯泉仁之直: 小規模農家に関連した持続可能な開発目標のモデル推計と気候変動の影響評価, 日本農業気象学会2023年全国大会 (2023)

(3) 「国民との科学・技術対話」の実施

【サブテーマ1】

- 1) 全国高校生社会イノベーション選手権 (主催: 東京大学社会基盤学科、2020年8月16日、オンライン、参加者約100名) にて講演「IPCCと温暖化予測」
- 2) 芝浦工業大学附属高校における理系講座「温暖化対策とSDGsのシナジーとトレードオフ」(2020年9月12日、聴講者30名) にて研究紹介
- 3) School for Young Scientists (主催: Water Problems Institute of Russian Academy of Sciences、2020年9月25日、オンライン、参加者約500名) にて講演「Modelling and forecasting of river flows and managing hydrological risks: towards a new generation of methods」
- 4) 芝浦工業大学公開講座にて講演「地球温暖化による世界の洪水リスクの変化と対策」(2020年9月26日、オンライン、聴講者50名)
- 5) GEA 国際会議 2020 にて講演「地球温暖化による世界の水リスク」(2020年12月14日、ザ・キャピトルホテル東急、参加者約50名)
- 6) 東村山市公民館市民講座にて講演「水の危機を学ぶ」(2021年2月24日、東村山市中央公民館、聴講者19名)
- 7) 日本地球惑星科学連合 2021 にて講演「全球洪水リスク研究の進展と展望」(2021年6月4日、オンライン、参加者170名)
- 8) Kaist 大学特別講演にて講演「Climate-Flood-Economy Nexus」(2022年4月2日、オンライン、約10名)
- 9) IPCC 報告書連携シンポジウムにて講演「気候変動と Climate Resilient Development」(2022年4月26日、オンライン、視聴者1176名)
- 10) 化学工学秋季大会シンポジウムにて講演「IPCC 第6次評価報告書における水に関する影響予測と適応策」(2022年9月16日、信州大学およびオンライン、参加者・視聴者約100名)
- 11) 第50回日本救急医学会総会・学術集会にて講演「気候変動がもたらす洪水の変化」(2022年10月19日、京王プラザホテル、参加者約100名)
- 12) Climate change and human health in Asia: Current impacts, future risks, and cobenefits にて講演「Climate change and water - implication to health」(2022年11月16日、東京大学医学部鉄門臨床講堂、約30名)
- 13) 平林由希子, IPCC シンポジウム「IPCC 第6次評価報告書から考える私たちと気候変動」にてパネルディスカッションに登壇(2022年12月1日、有楽町国際フォーラムおよびオンライン、参加者・視聴者約500名)

【サブテーマ2】

- 1) 日本学術会議「SDGs×COVID-19」（主催：日本学術会議、2020年6月2日、オンライン）
- 2) Kashiwanoha Innovation Fes 2020「人間が地球とともに生き続ける、サステナブル社会の実現に向けて（クロストーク）」（主催：柏の葉イノベーションフェス実行委員会、2020年11月1日、オンライン）
- 3) なぜSDGs？材料分野におけるSDGsシンポジウム～QWSアカデミア（東京大学）～「なぜ企業はSDGsに取り組むのか」（主催：SHIBUYA QWS、2020年11月27日、オンライン）
- 4) 滋賀経済同友会忘年懇談例会「水と持続可能な地域の未来」（主催：滋賀経済同友会、2020年12月8日、オンライン）
- 5) IPCCシンポジウム「気候変動対策と持続可能な未来」（主催：環境省、2021年1月13日、オンライン）
- 6) SDGsシンポジウム2021：学際的科学から解決策を考える食料、水、気候、生態系の持続可能な開発目標「データ分析と好奇心を原動力に地球システム科学からSDGsを考える」（主催：Nature、2021年3月26日、オンライン）
- 7) STI Forum 2021「Introduction and "Outbreak Risk Management and Future City"」（主催：日本工学会アカデミー(EAJ)科学技術イノベーション2050委員会、2021年5月6日、オンライン）
- 8) 朝日地球会議2021パネル討論：子どもたちに残したい 私たちの家「地球」（主催：朝日新聞社、2021年10月17日、オンライン）

【サブテーマ3】

該当するものはない。

【サブテーマ4】

- 1) NARO-FFTC International Symposium: Climate Change and Food System - synergies of adaptation and mitigation, and advanced utilization of climate information for sustainable and climate-resilient agriculture（主催：農研機構、Food and Fertilizer Technology Center、2022年10月17日、つくば国際会議場、観客約200名）にて講演
- 2) 日本気象学会第56回夏季大学「世界の穀物生産における気候変動影響と適応」（2022年8月8日、オンライン、観客約150名）
- 3) 鳥取大学乾燥地研究センター公開講座「農業生産における世界の気候変動影響と適応」（2022年3月22日、オンライン、観客約50名）

(4) マスコミ等への公表・報道等**【サブテーマ1】**

- 1) 科学新聞（2021年1月1日、6面、「渇水と洪水の全球将来予測」）
- 2) 朝日新聞（2021年7月27日、Web版、「気候危機に立ち向かう IPCC7年ぶりの報告書公表へ」）
- 3) 日経産業新聞（2021年8月18日、「大洪水への温暖化影響を解析」）
- 4) 朝日新聞（2022年1月9日、全国版、2面、「気候危機 残された時間は」）
- 5) 読売新聞（2022年1月27日、全国版、7面、「海面上昇、洪水頻発…脅威に対応」）
- 6) 読売新聞（2022年6月29日、全国版、25面、「異常干ばつ常態化恐れ…40年までに南米・欧州など」）

【サブテーマ2】

- 1) ニュースイッチ（2020年4月16日、インターネットメディア、「新型コロナから考える「グローバル化」と「世界村」」）
- 2) 日刊鉄鋼新聞（2020年10月22日、全国版、5面、「東大生産研 JX 金属寄付ユニット 11月に「材料分野におけるSDGsシンポ」」）
- 3) 日刊建設産業新聞（2020年11月10日、全国版、8面、「施設老朽化対策、道半ば 管路耐震化など課題報告 国土審」）

- 4) 日刊建設工業新聞（2020年11月20日、全国版、2面、「水を考えるつどい 11月7日にウェブ配信 国交省 沖東大大学院教授の講座など」）
- 5) 日経産業新聞（2020年11月30日、全国版、16面、「東大生研 材料分野 SDG s オンラインでシンポ」）
- 6) 日刊鉄鋼新聞（2020年11月30日、全国版、4面、「東大生産研 JX 金属寄付ユニット SDG s テーマにシンポ開催」）
- 7) 産経新聞（2021年10月5日、全国版、「「気候モデルの父」気さくな人柄、後進に励み 沖大幹・東京大教授」）
- 8) 朝日新聞（2021年10月22日、全国版、「私たちの地球、子どもたちに残すには 市川海老蔵さんが専門家と議論」）
- 9) 土木学会誌（2021年10月号 Vol.106、インタビュー「カーボンニュートラル達成へ向けた土木分野からの貢献」）

【サブテーマ3】

該当するものはない。

【サブテーマ4】

- 1) 日本農業新聞（2020年10月1日、全国版、1面、「世界の気温2℃上昇で穀物被害8.4兆円」）
- 2) 農業共済新聞（2020年10月1日、全国版、1面、「[温暖化]穀物生産への被害試算 2度上昇で8兆4000億円に」）
- 3) 日本農業新聞（2020年10月16日、全国版、3面、「[世界食料デー]飢餓撲滅へ行動しよう」）
- 4) 一般社団法人全国米麦改良協会『米麦改良』（2021年3月22日、ページ2-5、「世界の穀物生産における気候変動への適応費用を試算」）
- 5) 公益社団法人農林水産・食品産業技術振興協会『JATAFF ジャーナル』（2020年8巻7号、ページ14-17、「過去30年間の気候変動による穀物生産被害は世界全体で年間424億ドルに上る」）
- 6) 読売新聞（2021年11月18日、3頁、「温暖化 トウモロコシ24%減」）
- 7) 日本農民新聞（2021年11月17日、8頁、「将来の気候変動による穀物収量への影響「顕著に悪化する」」）
- 8) 農業共済新聞（2021年11月10日、2頁、「温暖化影響 想定より早く」）
- 9) 読売新聞（2021年11月9日、7頁、「「気候変動で食糧危機」警鐘」）
- 10) 日本農業新聞（2021年11月2日、1頁、「穀物 温暖化影響早まる」）
- 11) 日刊工業新聞（2021年6月29日、5頁、「未来を変える 不適切な農業起因の土壌劣化抑止」）
- 12) 週間東洋経済（2022年9月3日、56-57頁、「干ばつ頻発、穀物生産は減少へ 異常気象が常態化する」）
- 13) 一般財団法人総合科学研究機構『CROSS T&T』（2022年7月1日、ページ15-18、「農地の炭素量増加による相乗効果 作物増収・温暖化緩和・窒素投入量の節減」）
- 14) 日本経済新聞（2022年2月13日、5頁、「IPCC 部会が報告書 農業への被害深刻に」）
- 15) 農業共済新聞（2022年1月9日、1頁、「気候変動に対応した増産技術を」）

（5）本研究費の研究成果による受賞

- 1) 第17回（令和2（2020）年度）日本学術振興会賞、日本学術振興会、2021年2月、平林由希子
- 2) 2021年国際水文学賞 Dooge メダル、国際水文学会（IAHS）、2021年3月、沖 大幹
- 3) 日本気象学会 2021年度堀内賞、日本気象学会、2021年12月、飯泉仁之直
- 4) AI Zhipin, Young Scientist Best Paper Award 2021, International Association of Chinese Youth in Water Sciences, 2021年12月19日

（6）その他の成果発表

該当するものはない

IV. 英文Abstract

Synergies and Trade-offs among Climate Policies and Sustainable Development Goals in terms of Water Sector

Principal Investigator: Yukiko HIRABAYASHI

Institution: Shibaura Institute of Technology, 3-7-5, Toyosu, Koto-ku, Tokyo, JAPAN

Tel: +81 03-5859-8353 / Fax: +81 03-5859-8551

E-mail: hyukiko@shibaura-it.ac.jp

Cooperated by: The University of Tokyo, National Institute for Environmental Studies, National Institute for Agro-Environmental Sciences

[Abstract]

Key Words: Mitigation, Adaptation, Water resources, Water-related disasters, SDGs

The implementation of mitigation and adaptation measures for climate change is expected to have significant synergies with efforts to achieve the Sustainable Development Goals (SDGs). However, there are also trade-offs that need to be considered. While the IPCC 1.5° Special Report published in 2018 and the IPCC Special Report on Climate Change and Land published in 2019 conceptually examined the issue, a more detailed quantitative analysis is needed.

To address this, a study was conducted that analyzed future estimates of SDG indicators for water and examined the synergies and trade-offs between mitigation and adaptation measures on a country-by-country and region-by-region basis. The study identified multiple synergies between these climate policies and water-related SDG indicators in Southeast Asia, Africa, North America, and South America. Mitigation measures had greater synergy with the water-related SDG indicators in Africa and the Indochina Peninsula. The study also estimated the affected population for each climate policy measure, finding that mitigation measures benefited 0.12-120 million people (0.17-1.7% of the global population) from the synergies of the water-related SDG indicator, while the population facing trade-offs was 0.2 million - 2.8 million. Adaptation measures had synergies of 0.17-390 million people (0.2-5.3%) for SDG indicators related to water. The trade-off from adaptation measures is 0.5 billion people (0.7%) in water resources.

These results indicate that mitigation and adaptation measures generally have greater synergies than trade-offs with respect to water-related SDG indicators and should be actively pursued, and that measures to reduce their impacts are needed in countries where trade-offs are a concern.

To increase synergies and reduce trade-offs between climate policy and water-related SDG indicators, various measures can be taken. These include providing funding for river protection in developing countries to prevent water-related disasters and improving agricultural management practices to adapt to reduced grain production without relying on fertilizer application and to conserve water quality by reducing nitrogen concentrations. The expansion and consideration of different technologies, such as carbon sequestration in soil, can also be useful.

In addition, when promoting strong mitigation measures through increased biofuel production, it is crucial to consider regions with high water stress, such as part of Africa, and the sustainability of local water resources. These findings offer valuable suggestions for future international contributions related to climate policy and the sustainable development goals.