

Environment Research and Technology Development Fund

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

2RF-1802 企業の温暖化適応策検討支援を目的とした
公開型世界水リスク評価ツールの開発
(JPMEERF20182R02)
平成30年度～令和2年度

Development of an open global water risk assessment tool
to support investigation of adaptation measures to climate change
in the private sector

〈研究代表機関〉

国立研究開発法人国立環境研究所

〈研究分担機関〉

国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構

○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3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 全球水資源モデルの公開型世界水リスク評価ツールへの展開 （国立研究開発法人国立環境研究所）	23
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 全球水資源モデルのパラメータ同定のための全球河川流量解析に関する研究 （国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構）	34
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	
III. 研究成果の発表状況の詳細	46
IV. 英文 Abstract	49

I. 成果の概要

課題名 2RF-1802 企業の温暖化適応策検討支援を目的とした公開型世界水リスク評価ツールの開発

課題代表者名 花崎 直太（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）

重点課題 主：【重点課題⑦】気候変動への適応策に係る研究・技術開発

副：なし

行政要請研究テーマ（行政ニーズ） （２－３）国外の気候変動影響が我が国の社会経済活動にもたらすリスクに関する研究

研究実施期間 平成 30 年度～令和 2 年度

研究経費 (千円)

	契約額	実績額 (前事業年度繰越分支出額含む)
平成 30 年度	5,265	5,302
令和 1 年度	5,850	5,816
令和 2 年度	5,200	5,208
合計額	16,315	16,326

本研究のキーワード 温暖化、適応策、水リスク

研究体制

（サブテーマ 1） （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 花崎 直太、ブランジェ ジュリアン

社会環境システム研究センター 岡田 将誌

地域環境研究センター 仁科 一哉

（サブテーマ 2） （国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構）

農村工学研究部門地域資源工学研究領域 吉田 武郎

研究協力機関

研究協力機関はない。

1. はじめに（研究背景等）

2016 年にパリ協定が発効し、世界は長期的な温室効果ガス排出削減を進めていくことになった。しかし、野心的な削減の道筋に従っても地球温暖化は進行するため、国内外の気候変動影響が我が国の社会経済活動にもたらすリスクの軽減を図らなければならない。リスクの軽減のためには、国家的な温暖化適応策の推進に加えて、企業等の自主的な取り組みが重要である。

本研究は、国内企業の水分野に関する適応策検討の支援を目的とする。多くの企業は「水分野の温暖化の影響と適応」を「温暖化に関する水リスクとそのマネジメント」と呼んでおり、以降ではこの表現を用いる。企業の水リスクは直接操業リスク（製造・販売拠点）とサプライチェーンリスク（原材料の調達先）に分けられる。水リスクの多くは降水や河川流量の変動に起因し、温暖化による影響が大きい。水リスクへの対応は温暖化への適応と表裏一体の関係にあると言える。

2016 年、カーボン・ディスクロージャー・プロジェクト（CDP）による「CDP ウォーター日本版」調査が始まった。これは CDP が国内企業に対し水リスクの把握と対策への取り組みをアンケート調査し、A～F の評点とともに回答を機関投資家に提供する取り組みである。回答しない企業も無回答だったことが公表されるため、企業は調査への対応をせざるを得なくなっている。2011 年のタイの大洪水によって国内企業の海外拠点が大きく被災した事例もあり、国内企業の世界の水リスクへの関心が急激に高まっている。

現時点で企業が利用可能な世界の水リスク情報としては、水リスク指標の世界地図をウェブ上に公開した世界資源研究所（WRI）の Aqueduct などいくつかある。しかし、国内企業担当者に聞き取り調査したところ、リスクの程度はわかるものの、要因が分からず対策につなげられない、現地駐在員の感覚や情報と乖離した場合にもそれ以上検討できないといった問題が指摘され、要因を含んだ世界水リスク情報が求められている。

2. 研究開発目的

本研究は企業の温暖化適応策検討支援を念頭においた公開型世界水リスク評価ツールを開発することを目的とする。

人間水利用を含む地球水循環を統合的に解析できる全球水資源モデル H08 を利用して過去から将来にわたる長期シミュレーションを行い、世界の渇水・洪水・サプライチェーンに関する水リスクを分析する。結果を指標化するとともに、リスクの要因分析も行う。企業のニーズも設計に取り込みつつ、リスク指標と要因分析をウェブベースのインターフェースを介して視覚的にも分かりやすく提供することで企業の適応策検討を支援する（サブテーマ 1）。

また結果を広く公開するにあたり、H08 の精度を高め、情報を開示する必要がある。そこで、世界の河川流量観測データの大規模な解析を行い、流量観測の得られない地域も含めて全球水資源モデルの水文パラメータ推定を実施し、河川流量の推定精度を飛躍的に高める（サブテーマ 2）。

3. 研究目標

全体目標	本研究は企業の温暖化適応策検討支援を念頭においた公開型世界水リスク評価ツールを開発することを目的とする。 人間水利用を含む地球水循環を統合的に解析できる全球水資源モデル H08 を利用して過去から将来にわたる長期シミュレーションを行い、世界の渇水・洪水・サプライチェーンに関する水リスクを分析する。結果を指標化するとともに、リスクの要因分析も行う。企業のニーズも設計に取り込みつつ、リスク指標と要因分析をウェブベースのインターフェースを介して視覚的にも分かりやすく提供することで企業の適応策検討を支援する（サブテーマ1）。 また結果を広く公開するにあたり、H08 の精度を高め、情報を開示する必要がある。そこで、世界の河川流量観測データの大規模な解析を行い、流量観測の得られない地域も含めて全球水資源モデルの水文パラメータ推定を実施し、河川流量の推定精度を飛躍的に高める（サブテーマ2）。
------	---

サブテーマ1	全球水資源モデルの公開型世界水リスク評価ツールへの展開
サブテーマリーダー/所属機関	花崎直太／国立研究開発法人 国立環境研究所
目標	全球水資源モデル H08 を駆使することにより、ウェブベースの世界水リスク評価ツールを完成させる。まず、高精度気候データ・シナリオおよび社会経済データ・シナリオを利用して、全球水資源モデル H08 を利用したシミュレーションを行い、現在と将来の洪水と渇水に関する出力を得る。得られた出力は統計的手法を利用して5段階の水リスク指標へと変換する。サプライチェーンについては、主要農畜産物に対象を限定し、国際貿易を通じた水リスクの輸出入の分析を行う。また、人間水利用を含む地球水循環を統合的に解析できる H08 の強みを生かして水リスクの要因分析を行い、水リスク増減の要因を定量的に示す。ウェブインターフェースを2021年2月末までに開発し、指標と要因分析結果を視覚的にも分かりやすく表示する。研究期間中に企業やリスクコンサルティング業界のニーズと動向の調査も行い、設計・仕様に反映する。

サブテーマ2	全球水資源モデルのパラメータ同定のための全球河川流量解析に関する研究
サブテーマリーダー/所属機関	吉田武郎／国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構
目標	全球水資源モデル H08 の河川流量の推定精度を飛躍的に高める（具体的には水文モデルの性能評価に長く広く使われてきた Nash-Sutcliffe Efficiency を従来の世界平均0程度から0.3程度に高める）ため、全球河川流量の解析を行う。まず、これまでに蓄積した世界の河川流量観測データを解析し、各地域の流出特性を明らかにする。次に、流出特性を地形・地質に関連付けすることで、観測流量が得られない地域の特性についても推定する。得られた情報をもとに全球水資源モデル H08 のパラメータ同定を実施し、水リスク評価の精度向上に不可欠な全球河川流量の再現性を上記目標値に到達させることを図る。

4. 研究開発内容

4. 1 サブテーマ1 全球水資源モデルの公開型世界水リスク評価ツールへの展開

a) 全球水循環・水利用シミュレーション

気候変動による渇水・洪水・サプライチェーンのリスク評価には過去から将来にわたる信頼性の高い水循環・水利用情報が不可欠である。そこで、最新の全球水資源モデル H08 および、気候変動の影響評価に関する国際プロジェクト Inter Sectoral Impacts Model Intercomparison Project Phase 3 (ISIMIP3) に準拠した最新の気候・社会経済データ・シナリオを利用して長期の水循環・水利用シミュレーションを実施した。

本研究で利用したのは H08 の最新版である (Hanasaki et al. 2018)。H08 は地表面水文、河川、作物成長、貯水池操作、環境用水、取水の 6 つのサブモデルからなる。地表面水文サブモデルは日々の気象条件から蒸発量や流出量、地下水量を計算する。河川サブモデルは流出量を上流から下流にかけて流下させ、河川流量を計算する。作物成長サブモデルは日々の気象条件から作物の生育期間や生育状況を推定し、灌漑用水必要量を計算する。貯水池操作モデルは貯水池の緒元と流入量から個々の貯水池の貯水量や放流量を決定する。環境用水サブモデルは河川環境の維持に必要な河川流量を推定する。取水サブモデルは灌漑・工業・生活用水を河川・運河導水・貯水池・海水淡水化・地下水など 7 つの水源から取水する。

H08 の境界条件である気候・地理データは ISIMIP3 のプロトコル (<https://protocol.isimip.org/>) に準拠した (表 0-1)。これにより、境界条件開発の労力を減らすとともに、全球規模の気候変動影響評価におけるデファクトスタンダードとなった同プロジェクトに従うことで企業も結果を採用しやすくなると考えられた。放射強制力シナリオには RCP2.6/6.0 を用い、気候モデルには GFDL-ESM4, UKESM1.0-LL, MPI-ESM1.2HR, IPSL-CM6ALR, MRI-ESM2.0 の 5 種類を用いた。主要な地理情報については以下のように設定した。まず、灌漑面積 (灌漑用水量を決める最も重要な要素) は過去については土地利用データベース HYDE3.2 による実績値を、将来については 2015 年の土地利用で固定した。工業用水と生活用水は過去については FAO の水資源データベース AQUASTAT を基本情報とした過去の取水量データベースを、将来については 2015 年の水利用量で固定した。貯水池は過去については貯水池データベース GRand を利用した。将来については、根拠のある予測が極めて困難なことから、2015 年で固定とした。計算期間は過去 1901-2015 年、将来 2016-2100 年とした。計算及び出力の時間間隔は日単位とした。

表 0-1 渇水シミュレーションの主な境界条件

	過去 (1901-2015)	将来 (2016-2100)
放射強制力	-	RCP2.6/7.0/8.5
気候モデル	-	GFDL, UKESM, MPI, IPSL, MRI
灌漑用水 (灌漑面積)	ISIMIP3 (HYDE3.2)	2015 年で固定
工業用水	FAO AQUASTAT	2015 年で固定
生活用水	FAO AQUASTAT	2015 年で固定
ダム	GRand	2015 年で固定

b) 渇水リスク分析

洪水と異なり、渇水を直接表す物理量は存在しない。そのため、渇水リスクはこれまで多くの研究において、指標を使って分析されてきた。本研究では a) で得られた水循環・水利用シミュレーションに対して、「取りたいときにとりたい量の水が持続可能な水源から得られるか」を示す水充足指標 (Cumulative Abstraction to Demand; CAD) を計算した。この指標を使うと、雨季には水が豊富だが、乾季には水が不足するといった渇水問題の本質を的確に表現することができる。加えて、WRI Aqueduct で採用されている 5 つの指標も計算した。

c) 洪水リスク分析

全球規模の洪水に関する温暖化のリスクは、従来、河川流量が現在よりどれくらい増えるかという観点から行われてきた。近年、洪水氾濫を推定できる全球河川モデルが開発され、洪水氾濫面積や浸水深情報を利用した分析も行われるようになってきている (Hirabayashi et al. 2013)。そこで、本課題では全球水資源モデル H08 と全球河川氾濫モデル CaMa-Flood (Yamazaki et al. 2011) を結合し、a) の長期シミュレーションから洪水氾濫まで計算できるようにした。

CaMa-Flood は物理過程に忠実に一次元の河道流下を計算するモデルである。氾濫原等の地形情報を高解像度の地球観測データから取得することで、流量が増加した際に水位が上がり、河道から水があふれるといった洪水氾濫過程を全球規模で表現できる。CaMa-Flood の一つの課題は、貯水池操作を扱えないことである。1 次元モデルの特徴は河床と水位の勾配から流下量を推定するところにあるが、貯水池を導入するには、貯水池で河床を掘り込み、上流との水位の連続性を保ちつつ、貯水池への流入や放流を計算しなければならないが、それには極めて高い精度が必要で、本稿執筆時点で実現の目途が立っていないのである。

本研究では、水循環・水利用シミュレーションで得られた日単位の流出量を利用して CaMa-Flood を計算することで、洪水氾濫シミュレーションを実施した。貯水池操作は貯水池より下流の流量に変化をもたらす。そこで、貯水池が存在する場合、CaMa-Flood の流量を H08 のダム放流量で差し替えることで貯水池操作を CaMa-Flood に反映した。貯水池操作により、ほとんどの場合、ダム下流の洪水の頻度や強度は減少する（例外については、II-1 で述べる）。

d) サプライチェーンリスク分析

食料品・飲料製造業における原材料である主要農畜産物を対象に、サプライチェーン上流側の水リスク分析を実施する。近年、世界各地で干ばつによる穀物生産への被害が報告されており、サプライチェーン上流側での干ばつリスクの把握は国内外の企業や団体において急務な課題となっている。そこで、本研究では世界主要 4 作物（トウモロコシ、コメ、コムギ、ダイズ）を対象に、畜産飼料として需要の高いオオムギを加え、干ばつ発生時の穀物生産性の低下を降水変動から予測する統計学的なモデルの構築を行った。このモデルは標準化降水指数 6 ヶ月値の収穫前 3 ヶ月間の積算値を説明変数とする単回帰モデルである。構築したモデルを用い、複数の気候変化シナリオに基づいて、将来の干ばつによる世界の主要穀物生産への影響度合いやその影響の詳細な地理的分布の変化の特徴を解析した。

e) 企業調査

CDP Water 調査とは非営利団体 CDP が実施する企業の水リスクの取り組みに関する調査である。日本における調査は、一般社団法人 CDP Worldwide Japan（以下 CDP ジャパン）が質問書を日本企業に送付し、企業が期日までに回答し、CDP ジャパンが回答に応じてスコアを開示するという手順で行われる。2016 年調査は 150 社が対象であったが、2020 年調査は 333 社に拡大した。

本課題では、企業側がどのような体制で CDP ウォーター調査への回答を行っているのか、どのような水リスク評価ツールが利用されているのか、どのような水リスク評価ツールが必要と感じているか、ヒアリングを行って調査することにした。併せて調査の実施者である CDP ジャパンにもヒアリングを行い、CDP ウォーター調査の狙いや今後の展開について調査した。

調査は、企業の水リスク評価の専門家集団である東京海上日動リスクコンサルティング社 (TRC) と共同で実施した。今年度のヒアリング対象としたのは CDP Water 2017 評価で A-以上を取得した企業 7 社（食品、電機、化学、素材、生活、機械、サービス）および CDP ジャパンである。ヒアリング方法としては、質問書（表(0)-2）を事前に送付し、TRC 4 名と花崎が訪問し、1 時間のヒアリングを行った。

表 0-2 企業への質問項目の概要

企業への質問	CDP ジャパンへの質問
1. 水リスクに関心をもったきっかけ	1. 水リスク評価ツールを推奨する基準
2. CDP ウォーター調査への体制	2. 水リスク評価ツールへの要望
3. 水リスク評価ツールの利用状況	3. シナリオ分析に関する質問項目の狙い
4. 水リスク評価ツールの信頼性判断	4. 質問項目を追加する際のプロセス
5. 水リスク評価ツールへの要望	5. 研究者・モデル開発者への期待
6. シナリオ分析に関する質問項目の実施状況	6. CDP ウォーター調査の今後の方向性

f) 水リスクツール

企業関係者に a) の長期シミュレーションや b-d) のリスク分析の結果を見ていただくためにはウェブブラウザを介して分かりやすく情報提供する必要がある。また、製造拠点の洪水リスクや原材料生産地の渇水リスクなど、関心のある地点や要素を見やすく表示する必要がある。そこで、シミュレーションの結果を表示するウェブベースのインターフェースを開発した。表示対象となるのは長期シミュレーションで開発した水循環・水利用の出力のうち、表(0)-3 に示す 6 つの要素と、渇水リスク分析で開発した水充足指標である。ここで総取水量（水需要量）とは水源の有無にかかわらず、経済・産業活動に必要と推定される水の量である。持続可能な水源からの総取水量とは、河川水、貯水池、浅い地下水からの取水量の総和を指す。現実には、遠隔地からの運河導水、海水淡水化、深い地下水からの取水も行われているが、これらは持続可能性が低いと考えられている。これらの要素を全期間・全シナリオについてデータベース化して水リスク評価ツールに導入した。これらの要素は社会に広く浸透している Google 社の Google Map 上に重ね合わせて表示できるようにした。これにより、事業所のある地域が簡単に検索・拡大表示することができる。

表 0-3 水リスク評価ツール試作版で表示できる要素

要素		
水ストレス指標 （取水量）	水ストレス指標 （消費量）	年々変動
季節変動	地下水位低下	水充足指標
総取水量（水需 要量）	河川流量	持続可能水源からの取水量

4. 2 サブテーマ 2 全球水資源モデルのパラメータ同定のための全球河川流量解析に関する研究

a) 高解像度地理情報の整備

H08 の検証に用いたのは、世界河川流量データセンター（Global Runoff Data Center; GRDC）による観測月流量データである。まず、月流量が入手できる 3045 地点のうち、1) 流域面積 10,000km² 以上、2) 1961-1970 年で欠測がないという条件で 777 地点を抽出した。次に、GRDC の全観測地点を全球デジタル河道網上に配置した、公称の緯度経度に該当するグリッドを起点に河道網に沿って上流を探索して流域面積を得た他、隣接する 8 格子を起点として同様に上流探索を行い、流域面積を算出した。これらの 9 グリッドで算出した流域面積を公称値と比較し、両者の差が最も小さくなるグリッドを河道網上の観測点として採択した。

次に、全球貯水池データベース（Global Reservoir and Dam Database; GranD）に収録された 6832 基の貯水池を同様にデジタル河道網上に配置した。取水量のデータは食糧農業機関（FAO）の水資源データベース AQUASTAT に収録された 2005 年の国別の灌漑・工業・生活用水取水量データを 5 分の格子データに変換した。このとき、灌漑用水については全球 5 分解像度の全球灌漑農地地図（Siebert et al., 2010）を、工業・生活用水については全球 5 分解像度の人口分布地図（CIESIN and CIAT, 2005）を用いて国内分布を重みづけた。

表 0-4 ケッペン気候区分ごとの流域数

気候区分	略称	流域数
熱帯雨林	Af	3
熱帯モンスーン	Am	4
熱帯サバンナ	Aw	61
砂漠	BW	17
ステップ	BS	6
温帯（夏季高温）	Ca	99
温帯（夏季低温）	Cb	129
亜寒帯（夏季高温）	Da	18
亜寒帯（夏季低温）	Db	164
亜北極	Dc	262
ツンドラ	ET	14
合計		777

次に整備された情報を用い、流量観測点を起点に河道網を上流にさかのぼり、観測地点の上流にある貯水池の総貯水量、取水量を累計した。上流の総貯水量および取水量の累計を観測点の年平均流量で除し、流量に対する上流ダム貯水量（Storage over Discharge; SoD）および上流取水量（Withdrawal over Discharge; WoD）を算出した。

気象データには、全球気象データ WATCH Forcing Data (WFD; Weedon et al., 2014)を用いた。WFD は 1901 年から 2001 年の陸域の日気象データからなり、H08 を駆動する気温、比湿、風速、地上面気圧、下向短波放射、下向長波放射、降水量を含む。

本研究では、ケッペンの気候区分に基づき、気候が類似する流域をグループ化する。まず、WFD の気温、降水量に基づいて 0.5 度スケールの各グリッドの気候区分をした。次いで、流域内で最もグリッド数の多い気候区分を流域の代表気候区分として割り当てた（表 0-4）。

b) 観測流量分析

GRDC による河川流量観測データおよび H08 による計算結果を利用し、各流域の基本的な水文特性を表す基底流出指標（BFI）および流況曲線の傾き（SFDC）を分析した。BFI は河川流量における長周期成分で、地下水の寄与を表す。本研究では Hysep 法（Vogel and Kroll, 1992）により表面流出と基底流出に分離し、同期間の総流量で除して BFI を得た（図 0-1(a)）。SFDC は、流況曲線（長期間の流量を大きい順に並び替え、その対数を縦軸にして表示したもの）の中央部の傾きを指し、観測期間中の流量の変動の大きさを表す(図 0-1(b))。ここでは、上位 33%と 66%の勾配(以下 SFDC33)に加え、より極値のばらつきを評価する上位 10%と 90%の勾配（以下、SFDC10）を算出した。

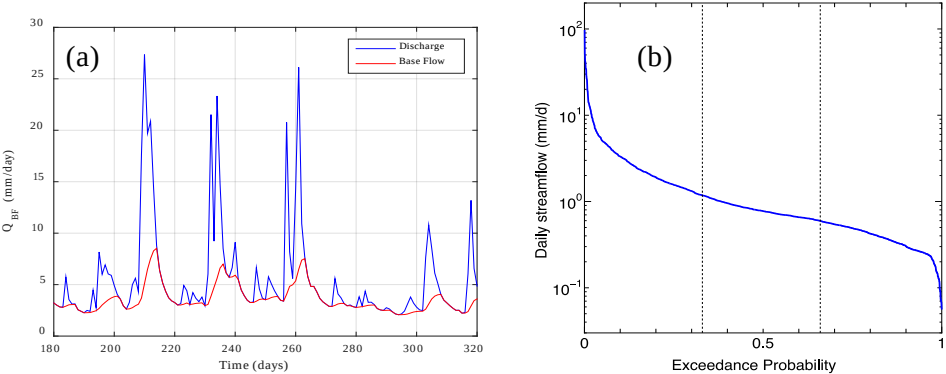


図 0-1 (a) 基底流出指標（BFI）および(b) 流況曲線の傾き（SFDC）の算出例

観測地点において得られた BFI および SFDC の観測値と計算値を、年平均の気候特性を指標化し

た乾燥指標 (Aridity Index) に着目して解析した。乾燥指標は、流域の年平均降水量を年平均可能蒸発散量で除したものであり、1 以下の流域は湿潤、1 以上の流域は乾燥と見なされる。ここでは、降水量データには WFDEI (Weedon et al. 2014)、可能蒸発散量には H08 の計算結果を用い、それぞれ 1984 年から 2013 年まで 30 年の平均値から乾燥指標を算出した。

c) パラメータ推定

これまでの研究により確認された、月単位流量の再現に最も感度の高い H08 の 4 つのパラメータ (土壌の深さを表す SD、蒸発効率を表す CD、地中流出を調整する γ と τ) を対象に、各気候区分の代表パラメータ値 (気候に基づくパラメータ) を以下のアルゴリズムで推定する：

1. 4 つのパラメータを物理的に説明可能な範囲内 (表 2) で設定した事前分布から N 通りランダムに発生させ、全球一様にそれらのパラメータを割り当てた計算を行う
2. 観測・計算流量を利用し、再現性指標として Nash Sutcliffe Efficiency (NSE; Nash and Sutcliffe, 1970) をパラメータごとに算出する。
3. 各気候区分に含まれる M 流域に対する N サンプルを母集団としてみなし、NSE 値が上位 X パーセンタイル以上となるパラメータの組み合わせを採択する。
4. 気候区分ごとにこの手順を繰り返す。

本研究では計算負荷の都合上、N を 5000 と設定した。

表 0-5 対象のパラメータと探索幅・デフォルト値

パラメータ	探索幅	デフォルト値
土壌深さ (SD)	0.05-4.0	1.0
バルク輸送係数 (C_D)	0.001-0.012	0.003
地下水流出の形状定数 (γ)	1-4	1-2
地下流出の時定数 (τ)	10-400	50-300

この方法により、パラメータの相互作用等や不確実性を考慮した事後分布が得られる。この事後分布から、気候区分ごとの水文特性の違いを反映し (代表性)、かつ気候区分内の多くの流域で満足のいく (頑健性) 結果が得られるパラメータの組み合わせを選定する。ここで、代表性と頑健性には以下のトレードオフの関係があると考えられる。すなわち、上記アルゴリズムの手順 3 で採択するパラメータセットの閾値を高くすれば、採択される流域数が少なくなり、全体の流域を代表する結果が得られづらい。逆に、閾値を低くすれば事後分布は事前分布 (一様分布) に近づき、絞り込みが十分行えない。また、事後分布のどの統計値 (最頻値、平均値、中央値) をパラメータ値として選択するかによっても結果は異なると考えられる。そのため、流域に 50 以上の流域が含まれる 5 気候区分 (Aw、Ca、Cb、Db、Dc) を対象に、サンプル分割テストを行って最適な閾値、統計値の組み合わせを決定した。まず、流域をランダムに二つの同定・検証グループに分け、同定グループにおいて 1~4 の手順を実施し、採択率を 5 通り (上位 0.1%、1%、5%、10%、20%)、統計値を 3 通り (平均値、中央値、最頻値) とした 15 通りの組み合わせでパラメータを同定する。次に、同定したパラメータを検証グループの流域に適用し NSE を算定する。この手順を各気候区分で 100 回繰り返す。

5. 研究成果

5-1. 成果の概要

5. 1. 1 サブテーマ1 全球水資源モデルの公開型世界水リスク評価ツールへの展開

a) 長期水循環・水利用シミュレーション

最新版の全球水資源モデル H08 を利用し、1901 年から 2100 年までの全球 0.5 度 (50km) 解像度・日単位の水循環・水資源シミュレーションを行った。

水循環のシミュレーションは各格子の日々の気象要素に対し、地表面での熱収支と水収支を解き、蒸発散量や流出量を求めている。流出量を上流から下流に流すことで、世界の任意の地点の河川流量を推定することができる。図 0-2(a) に示すのはタイのチャオプラヤ川の Nakhon Sawan 地点の年河川流量の結果である。過去から将来にかけて、大きな年々変動をしていることが分かる。将来期間には放射強制力 RCP8.5 (いわゆる 4 度超上昇) シナリオの結果を示しているが、この条件下においては、将来の流量は顕著な増減傾向を示さないことが分かる。水利用のうち、最も利用量が多いのは灌漑用水である。図 0-2(b) に示すのは全流域の総需要量 (農業・工業・生活用水の総和) である。1901 年から 2015 年の過去期間において、主に灌漑面積の拡大に伴い、需要は急増したことが分かる。2016 年以降の将来期間は変動しながらも漸増している。これは、今回採用した ISIMIP-3 プロジェクトでは土地利用や工業・生活用水需要を 2015 年で固定しており、以降は地球温暖化による気候変動の影響を受けて緩やかに農業用水需要が増えていくことを反映している (温暖化によって蒸発が促進されることから農業用水需要が増加する)。このように、各格子の気象条件や土地利用等の地理・社会経済条件を反映した高度な水循環・水利用シミュレーションを行い、以降のリスク分析の基盤情報とした。

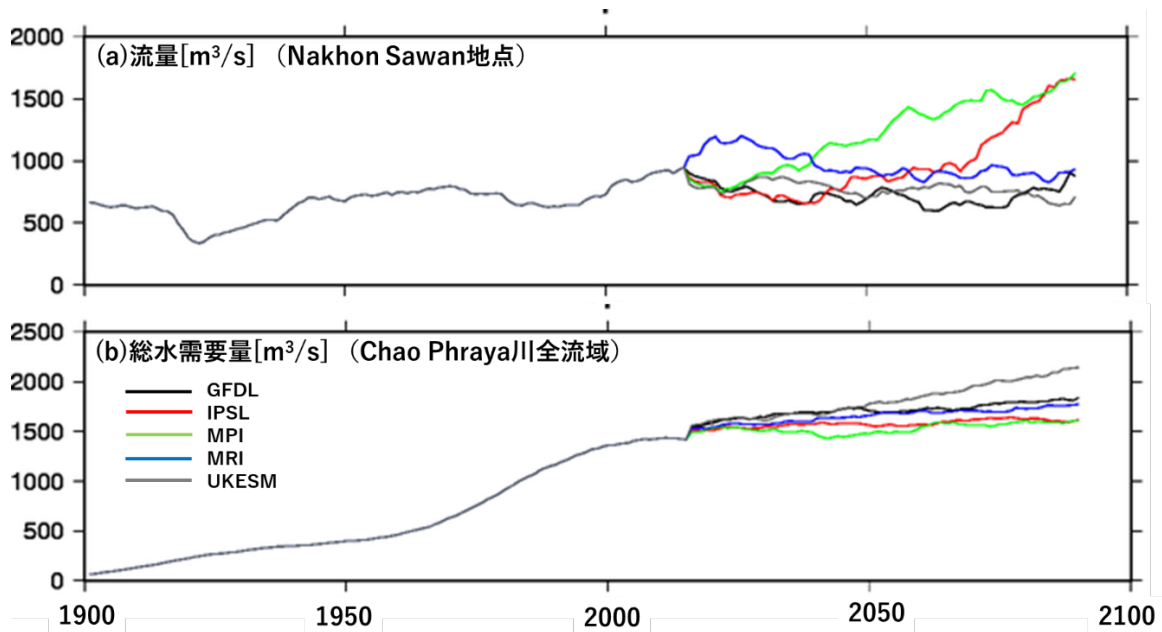


図 0-2 タイのチャオプラヤ川におけるシミュレーション結果。(a) Nakhon Sawan 地点での流量 $[m^3/s]$ 、(b) 全流域の総水需要量 $[m^3/s]$ 。

b) 渇水リスク分析

長期水循環・水利用シミュレーションを利用し、1901 年から 2100 年にわたる世界の渇水リスク評価を行った。渇水を表す適当な物理量は存在しないため、評価にあたっては水充足指標を用いた。

図(1)-2 に示すのは 1950 年、2015 年、2050 年、2100 年における水充足指標 CAD（取りたいときに取りたい量の水が持続可能な水源から得られるか）の結果である。1950 年は世界的に水利用が少なく、渇水（水不足）リスクが高い地域（赤で示される地域）は限られる。2015 年になると水利用は大きく拡大し（白で示される地域は渇水リスクは小さいものの水利用がある地域である）、特に華北平原、南アジア、西アジアで渇水リスクが高まった。2050 年はこの傾向がさらに強まり、周辺域へ拡大するとともに、アフリカ南部で渇水リスクが強まっているのが分かる。2100 年には二極化の傾向がみられる。すなわち、華北平原、南アジア、西アジア、および新たにアフリカ北部では極めて大きな渇水リスクがみられる一方、その他の地域では顕著な水リスクが発生していない。このように、長期水循環・水利用シミュレーションから水充足指標を計算することで渇水リスクを推定することができた。

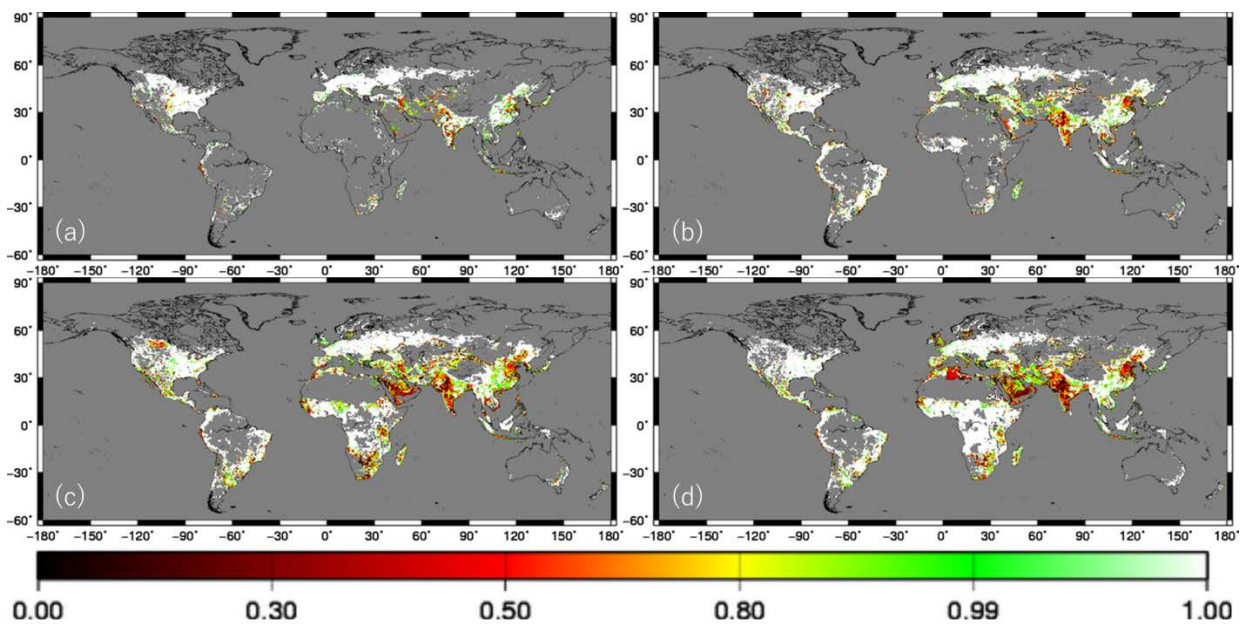


図 0-3 取りたいときに取りたい量の水が持続可能な水源から得られるかを表す CAD 指標の分布。(a) 1950 年、(b) 2015 年、(c) 2050 年、(d) 2100 年における結果。将来期間は放射強制力 RCP2.6（気温上昇 2 度未満）シナリオ下の気候予測を利用した。

c) 洪水リスク分析

全球水資源モデル H08 と全球河川モデル CaMa-Flood を利用して過去から将来にわたる全球氾濫シミュレーションを実施した。H08 を使えば貯水池操作などの人間活動を含む河川流量のシミュレーションができるが、河川サブモデルは単純で、氾濫面積や浸水深が推定できなかった。一方、CaMa-Flood を使えばそれらが推定できるが、人間活動が扱えないという問題があった。今回、二つのモデルを結合したことにより、特に洪水調節に大きな威力を発揮する貯水池操作を考慮しつつ、温暖化に伴う氾濫面積の変化をシミュレーションできるようになった。

本報告では、貯水池がある場合とない場合の洪水暴露人口の比較結果を取り上げる。洪水暴露人口とは現在気候の 100 年に 1 度の規模の洪水が発生した時に浸水域に居住する人口の総和である。貯水池は洪水時の流出をため込むため、洪水のピーク時の流量や氾濫面積を低減する効果が見込まれる。ダム下流の洪水暴露人口は、RCP2.6 および RCP6.0 を想定すると、2006 年から 2099 年の間にそれぞれ平均 720 万人と 1340 万人であった。これらの人口は、ダムによる流量調節を考慮していないシミュレーションと比較して、それぞれ平均 16.3%と 12.8%減少した（図 0-4）。21 世紀末の 2070 年から 2099 年の間に着目すると、それぞれ平均 20.6%と 12.9%の減少となった。これまでの全球規模の洪水に関する温暖化影響評価において、貯水池操作が考慮されることはなく、貯水池操作による洪水暴露人口の減少率が定量化されたのは世界で初めてである。これらの成果については、

Nature Communications 誌に論文が掲載された (Boulange et al., 2021)。

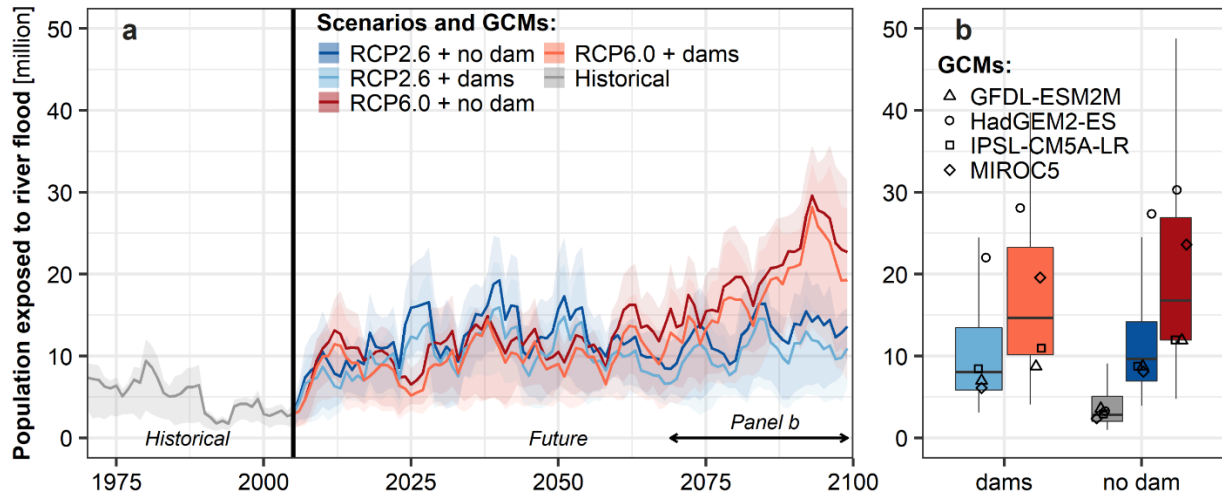


図 0-4 現在気候の 100 年に 1 度の洪水に対するダム下流の洪水暴露人口 (人口は 2010 年で固定)。(a) ダム下流で現在気候の 100 年に 1 度の洪水に暴露される過去と将来の人口の 5 年移動平均。範囲は GCM による結果のばらつきを表す。(b) 2070-2099 年における現在気候の 100 年に 1 度の洪水に対するダム下流の洪水暴露人口の 95 および 5 パーセンタイル値 (ひげ)、メディアン (線)、第 1・第 3 四分位 (箱)、ならびに各モデルの平均値 (シンボル)。

d) サプライチェーンリスク

本報告ではオオムギ生産における将来の干ばつリスク評価の結果を取り上げる。干ばつ時における収量減収率は特に地中海周辺において今世紀末にかけて拡大する方向であることを予測した (図 0-5)。主要生産国であるスペインのほとんどの耕地で減収率増加を示し、原材料調達先としてのリスクは増加する。一方でロシアやオーストラリアは半分の耕地で減収率増加、残り半分の耕地で減収率の軽減を示し、国内で調達先を調整することで干ばつリスクへの対応がとれる可能性を示唆した。降水量変動から穀物生産に対する将来の干ばつリスクを全球 0.5 度 (約 50km) の高解像度で評価した研究は世界的にほとんど例がない。得られたリスクマップ情報は干ばつによる国内外の穀物の安定的な輸出入や需給への貢献が期待できる。

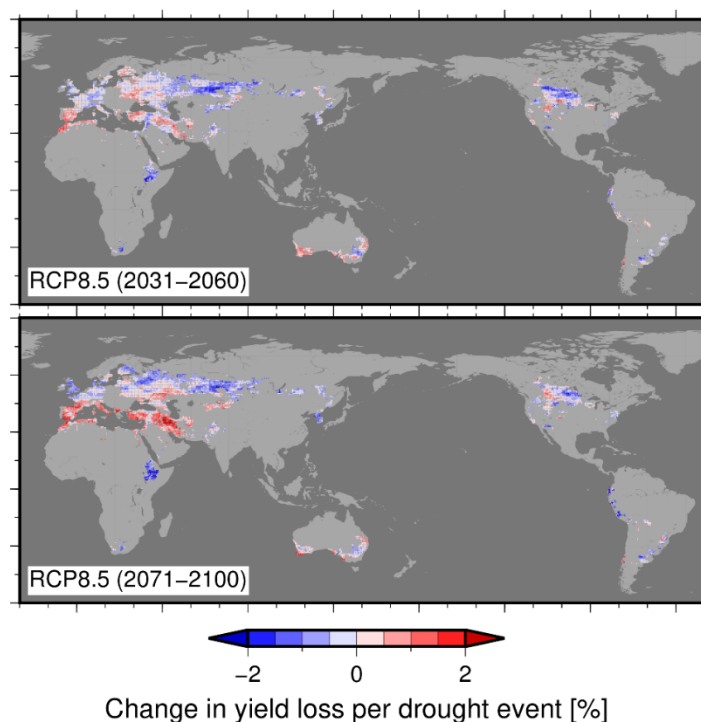


図 0-5 干ばつイベント発生時の干ばつ由来のオオムギ収量の平均減収率の変化。正（負）の値が大きくなるほど減収率は増加（低減）することを示す。

e) 企業調査

2018 年から 2019 年にかけて CDP ウォーター調査で A-以上の高い評価を得ている企業 7 社（食品・電機・化学・素材・生活・機械・サービス）にヒアリングを行った（質問は表 0-2 を参照のこと）。結果はそれぞれ 33 ページと 45 ページの調査報告書にまとめられているが、ここではその概要を報告する。

まず、質問 1 「水リスクに関心を持ったきっかけ」については、2 社が温暖化の次の地球環境問題は水と捉えていた。質問 2 「CDP ウォーター調査への体制」については、7 社とも担当者を一人以上置いて主要事業所の水リスク評価を自前で実施していた。質問 3 「水リスク評価ツールの利用状況」については、7 社とも世界資源研究所 (WRI) のオンライン水リスク評価ツール Aqueduct (<https://www.wri.org/our-work/project/aqueduct>) を挙げた。Aqueduct は主に海外の事業所の水リスクの洗い出しに使っている事例が多く、Aqueduct を使って主要な事業所の水リスクを調べ、「高い」と判定された地域の事業所に個別に問い合わせ、精査しているパターンが多かった。日本の事業所も同様に行おうとしているものの、解像度の低さにより断念していた。すなわち、Aqueduct は支流などをひとまとめでした「単位流域」ごとに水リスクを示しているが、地形が複雑な日本の場合、一級河川でさえ相当数がひとまとめでされているため、事業所単位の水リスク評価には使えないのである。質問 4 「水リスク評価ツール (Aqueduct) の信頼性判断」については、リスク評価の根拠が分からないという点が全社から異口同音に挙げられた。質問 5 「水リスク評価ツールへの要望」については、3 社とも似通っており、

- ・因果関係（リスク評価の根拠）を示してほしい（なぜリスクが高いか・低いか分からない）
- ・時間解像度を上げてほしい（アジアの場合、雨季と乾季で様相が全く異なる）
- ・空間解像度も上げてほしい（Aqueduct は流域の分割の根拠や意図が分かりにくい）
- ・評価ツールはリスクの洗い出しに使うため、過小評価だけはしないでほしい
- ・専門知識を持たない担当者が読んで分かるマニュアルを公開してほしい

といった要望が挙げられた。質問 6 「(2018 年調査から新たに加わった) シナリオ分析に関する質問項目の実施状況」については、ヒアリング実施時点で具体的なシナリオ分析の構想を持っていた

企業はなかった。

この他に、2019 年 1 月に CDP ウォーター調査を実施する CDP ジャパンにヒアリングを行った（質問は表 0-2 を参照のこと）。こちらでも調査結果の概要を報告する。質問 1 「CDP が特定の水リスク評価ツールを推奨する基準」については、非商用で多くの企業が利用しているツールを推奨しているとのことだった。質問 2 「水リスクツールへの要望」については、CDP ジャパンとして日本企業の拠点の多い東アジア・東南アジアの精度の向上を挙げていた。質問 3 「(2018 年調査から新たに加わった) シナリオ分析に関する質問項目の狙い」については、気候変動と水リスクの関わりが強いことを企業にも意識してもらうために追加したもので、実施の方法論については CDP ジャパンとしてもまだ手探りとのことであった。質問 4 「質問項目追加の際のプロセス」については、機関投資家らの要望と CDP 本部からの提案が半々であるという。質問 5 「研究者・モデル開発者への期待」については、企業の水リスク評価の質の向上や標準化ができるように支援してほしいとのことであった。気候変動対策における温室効果ガスの削減については評価手法が明確化されており、それに近づけるのが理想だという。質問 6 「CDP ウォーター調査の今後の方向性」については、CDP は科学 (science-based) にとどまらず、社会的・政治的背景も踏まえて有意義な水の目標を立て、実施していくという Context-based water targets という概念を押し出そうとしているとのことであった。事業を行う地域との対話や地域の実情を踏まえた目標設定が求められていくとのことであった。

今回の企業調査を通じて、水リスク評価ツールをいま開発・整備することの重要性を確信できた。企業の水リスクや CDP ウォーター調査への関心は驚くほど高く、Aqueduct などの現行の水リスク評価ツールも関係者は欠点も含めて全員が熟知していた。ESG 投資の概念の普及は目覚ましく、今後経営との結びつきは深まると思われる。本課題により開発される水リスク評価ツールは改善要望の中で、特に、因果関係の提示と時間解像度の向上を実現できる。

CDP ジャパンへの調査を通じて、CDP ウォーターの質問は今後も追加され、高度化されていくと認識した。特にシナリオ分析に対する要求は高度化すると見込まれ、定量的で具体的な分析を可能にする水リスク評価ツールの重要性や関心も今後高まると考えられた。その一方で、ヨーロッパ発祥の CDP は水リスクを主に渇水リスクととらえがちで、節水すればするほどよいという固定観念が現在の質問項目からは感じられる。アジアや日本での事業においてはナンセンスと感じられる質問項目もあり、証拠をもって反対することはいずれ必要になるかもしれない。その根拠を示すためのツールとしても、我が国が独自に水リスク評価ツールを開発することは重要と考える。

これらの調査に加え、リスクコンサルティング 3 社との意見交換会を行い（2018 年 4 月、8 月、2019 年 3 月に実施）、CDP ウォーター調査に関するコンサルティング業界の動向について知見を得た。また企業の環境担当者が集まった水リスク勉強会で 3 度講師を務め（2019 年 3 月と 2021 年 3 月および 5 月）、各企業の取り組みと水リスクツールへの要望について広く知見を得た。

f) 水リスクツール

図 0-6 に水リスク評価ツールのスクリーンショットを示す。表示されているのは水資源量に対する取水量を示す水ストレス指標である。値が小さいほど渇水リスクが小さく、高いほど渇水リスクが大きいことを示す。ここで、仮にある企業がタイのバンコクの近辺（東経 100 度 30 分、北緯 13 度 45 分）に製造拠点を持っていたとする。図 0-6(b) に示されているのは、この地点の水ストレス指標の 20 世紀から 21 世紀中ごろまでの推移である。この事例では、20 世紀中に水ストレスが大きく増加したことが分かる。さらに、この水ストレスの増加の要因を分析する機能を持たせた。図 0-6(c) に示されているのは最も基本的な水資源量である河川流量（水ストレス指標の分母）の時系列である。これを見ると、21 世紀に地球温暖化に伴って増加する傾向があることが分かる。図 0-6(d) に示されているのは総取水量（水ストレス指標の分子）の時系列である。20 世紀初頭から 20 世紀末にかけて一貫して上昇し続けているのが分かる。その後は、a) で述べた通り、土地利用や水需要を 2015 年で固定しているため、値は横ばいになっている。ゆえに、図 0-6(b) に示されたこの地域の 20 世紀中の水ストレスの増加は主に総取水量の増加が大きな原因となっていることが分かる。図 0-6(e)

に示されているのは持続的な水源からの取水量である。この地点では取水量に対して十分な河川流量があるので、おおむね全ての取水は持続的な水源から行われていることが分かる。

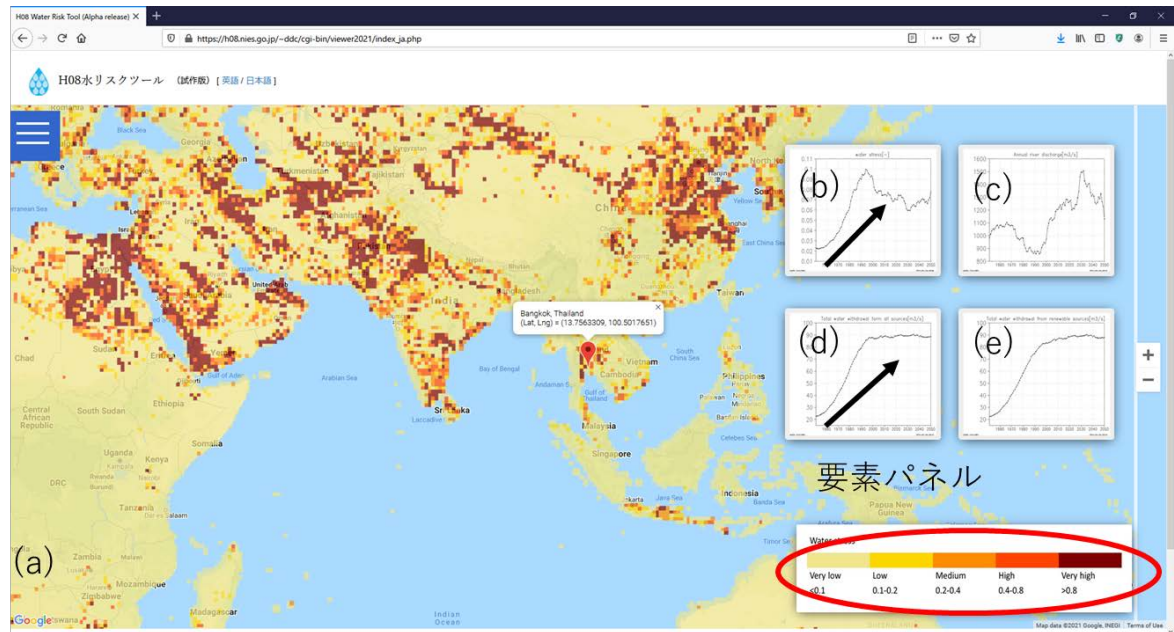


図 0-6 水リスク評価ツールのスクリーンショット。(a) 水ストレス指標の地図。選択された(タイのバンコク)地点の(b)水ストレス指標、(c)河川流量(水資源量)、(d)総取水量、(e)持続可能な水源からの取水量の時系列グラフ。左上の三本線アイコンを押すと現れるコントロールパネルから選択することで表示する地図やグラフの要素やシナリオは自由に変更できる。

現在広く使われているオンライン水リスク評価ツール Aqueduct でできることは基本的に図 0-6(a)までである。本ツールはまず図 0-6(b)のように時系列表示が可能で、長期・短期の変化や変動を捉えることができる。また図 0-6(c-e)のように関連要素の表示が可能で、リスクにつながった原因を分析することができる。ただし、本ツールはもともとの計算解像度をそのまま表示するため、流域や流路の関係がやや分かりにくい。今後も開発と改良を継続することにより、より分かりやすい水リスク評価ツールへと発展させていく必要がある。

5. 1. 2 サブテーマ2 全球水資源モデルのパラメータ同定のための全球河川流量解析に関する研究

a) 気候区分ごとのパラメータ同定

100 回のサンプル分割テストの結果を示す(図 0-7)。実施した全ての気候区分において、最頻値を用いた場合には検証グループで算定された NSE 値のばらつきが大きくなった。この傾向は特に気候区分 Dc で大きかった。平均値と中央値による違いは気候区分ごとによって異なり、明確な傾向は見られない。Dc を除いた 4 気候区分での総計から、採択率を 5% の事後分布の中央値を採択した場合に期待される NSE の中央値が最も高かった。以下では上述の条件で気候区分のパラメータ値を推定する。

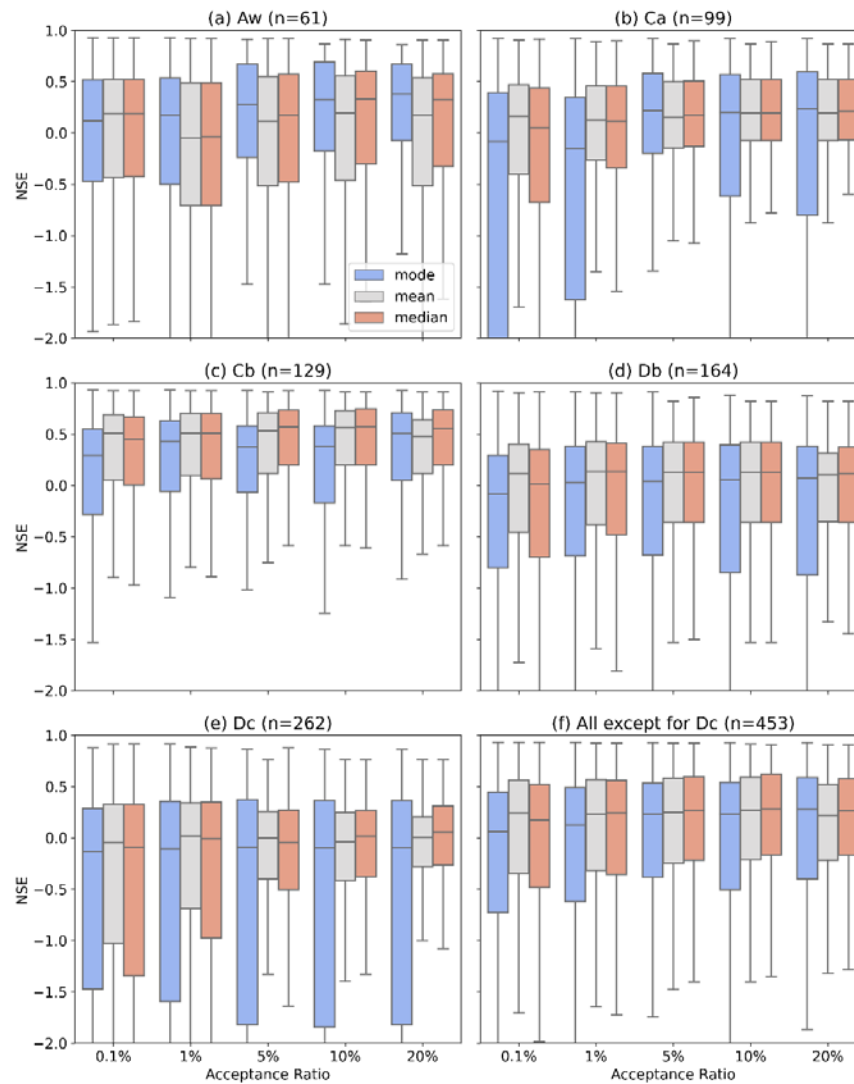


図 0-7 100 回の split-sampling テストによる NSE 値の比較。同定グループで得られたパラメータセットを、検証グループに適用して得られた NSE 値の中央値および変動幅を示す。

デフォルトパラメータで計算した NSE から、気候区分ごとのパラメータによる NSE への変化を 3 つの気候区分 (Aw、Cb、Dc) で示す (図 0-8)。気候区分 Aw では全ての流域においてデフォルトパラメータからの改善がみられた。さらに、気候区分に基づくパラメータは、全球一律で推定したパラメータと比較しても全流域で良い結果を示した。気候区分 Cb では 129 流域のうち 107 流域でデフォルトからの改善がみられた。全球一律と気候区分ごとのパラメータ値は同じものが選択され、両者に違いはなかった。一方で気候区分 Dc では、NSE 値が低下する流域が多い結果が得られた。

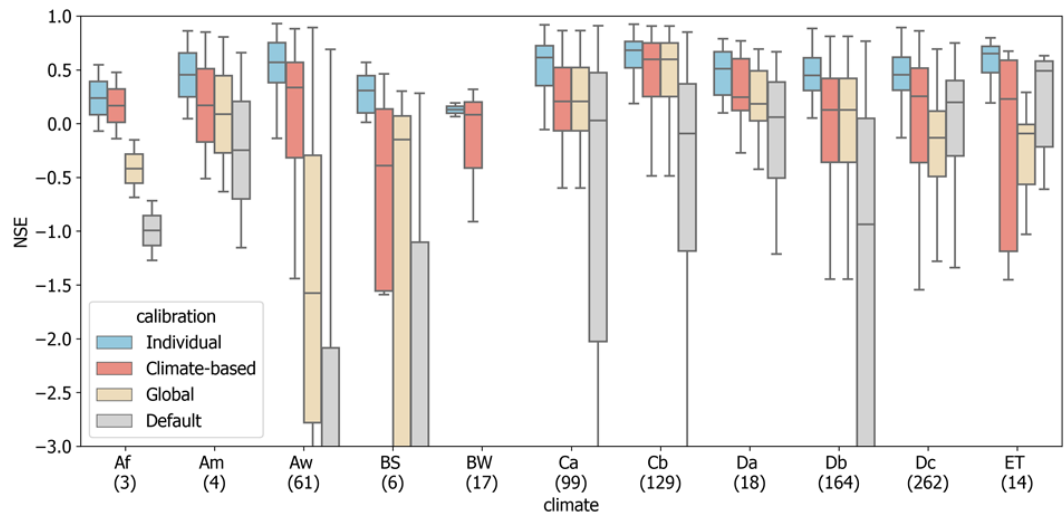


図 0-8 流域個別・気候区分ごと・全球一律・デフォルトパラメータによる NSE 値の比較

b) 流量のパフォーマンス

サンプル分割テストで確認した最適解の決定手法を全ての気候区分に適応して気候区分ごとのパラメータを求め、それにより全流域で得られた NSE を図 0-8 に示す。気候区分 ET を除く全ての気候区分で NSE の中央値はデフォルトパラメータによる NSE から上昇した。全流域のうち、NSE 値が 0.5 以上の「良い」結果は 30.1%、0.0 以上の「満足できる」結果は 61.7%の流域で得られた。

全球一律で同定したパラメータと比較して、気候区分ごとに同定したパラメータの優位性は Af、Aw、BS、BW、Dc、ET で確認できる。これは、この手法により気候区分の水文特性を十分に反映した代表性が高いパラメータが同定できたことを示す。気候区分 Ca、Cb、Db のパラメータは、全球一律で同定したパラメータ同じ組み合わせが選択された。これは、NSE 値が比較的高く、これらの気候区分から多数の流域が事後分布として抽出されたことや、3 気候区分の流域数が 392 と多いことが影響したためと考えられる。

図 0-9 に気候区分 Aw および Dc のそれぞれ 2 流域での河川流量の再現結果を示す。Aw の 2 流域（図 0-9 (a, b)）では洪水時の流量ピークがデフォルト値での計算結果から下がる変化を示した。一方で、Db の 2 流域（c, d）では洪水ピークが上昇する変化を示し、方向に流量が変化し、どちらも観測値との適合度が高まっている。それぞれの流域の NSE 値は以下のように変化した：(a)-5.58 から 0.43、(b) -8.30 から 0.39、(c)： 0.35 から 0.81；(d)： 0.07 から 0.66 であり、どの流域でも顕著な予測精度の向上が数値的にも示された。

一方、図 0-10 には改善の効果が限定的な流域の例を示す。図 0-10 (a) は、NSE 値はデフォルトパラメータの-288.0 から気候区分ごとのパラメータでの-30.5 へと上昇したものの、観測流量と計算流量の低水部に恒常的なバイアスが大きく残る。また、図 0-10 (b) では観測流量が極端に平滑化され、計算値の変化と整合しないこと（NSE 値は-52.0 から-21.0）、図 0-10 (c) では不規則な流量の変動を計算値が十分に捉えていないこと（NSE 値は-33.4 から-2.34）を示す。図 0-10 (d) では、視覚的には改善の効果が大きく認められるものの、気候区分ごとのパラメータによる NSE 値は-0.10 にとどまっている（デフォルトパラメータでは-14.1）。

図 0-10 のそれぞれの結果は、本研究により残されている問題を指摘する。図 0-10 (a) の観測地点の上流域には、総計 30,173 百万 m³ の有効貯水量を持つダム群、年間 14,062 百万 m³ の取水がある。本研究では自然状態での計算を行ったため、このような予測精度になったと考えられるが、本来 H08 は人間活動を考慮した水循環計算が行えるので、その状態で確認する必要がある。図 0-10 (b, c) は湖沼（ナイアガラ湖）や湿地（コンゴ盆地）の影響が大きいと考えられ、H08 では考慮していない湖沼や湿地のモデル化やパラメータリゼーションの研究の重要性を指摘している。図 0-10 (d) の結果は、NSE のみを目的関数としてキャリブレーションに利用したことに起因する。NSE

は流量の標準偏差（変動幅）に対する誤差の関係を示し、洪水流量とそのタイミングの影響が大きいこと、流量の変動自体が小さい河川ではスコアが低くなることが知られる。図 0-10 (d) で示された流域で、バイアス、相関係数、変動係数の 3 要素の誤差を平均化した KGE により評価すると、0.57 という高い値であった。このように、考慮されていない水循環過程に加え、洪水流量に着目してパラメータ同定が行われたことに注意する必要がある。

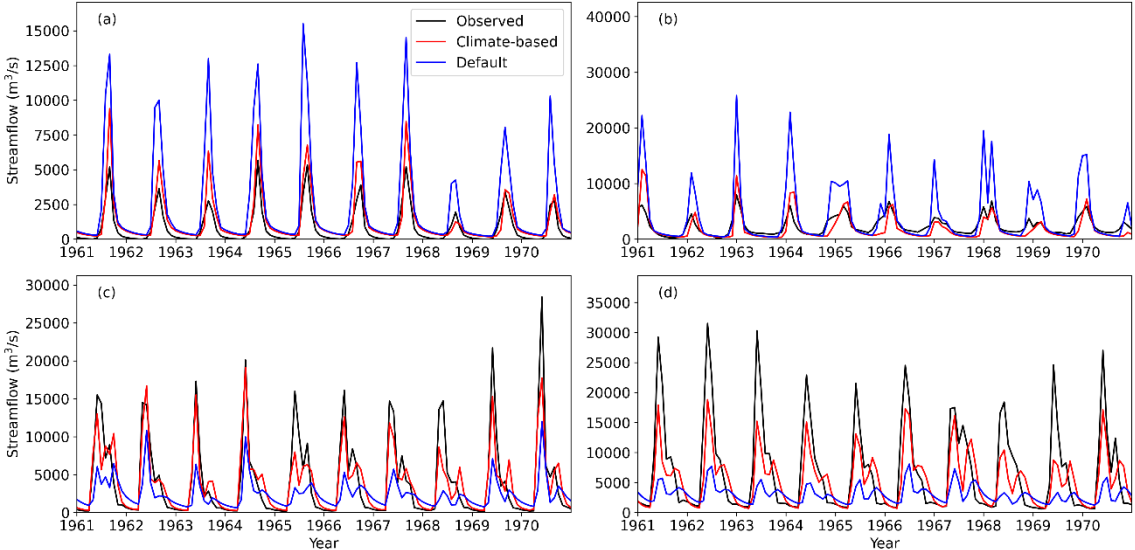


図 0-9 河川流量の再現性の例 (a) Bakel, Senegal River (Aw), (b) Morpana, Sao Francisco River (Aw); (c) Ohotsky Perevoz, Aldan River (Dc); (d) Tabaga, Lena River (Dc)

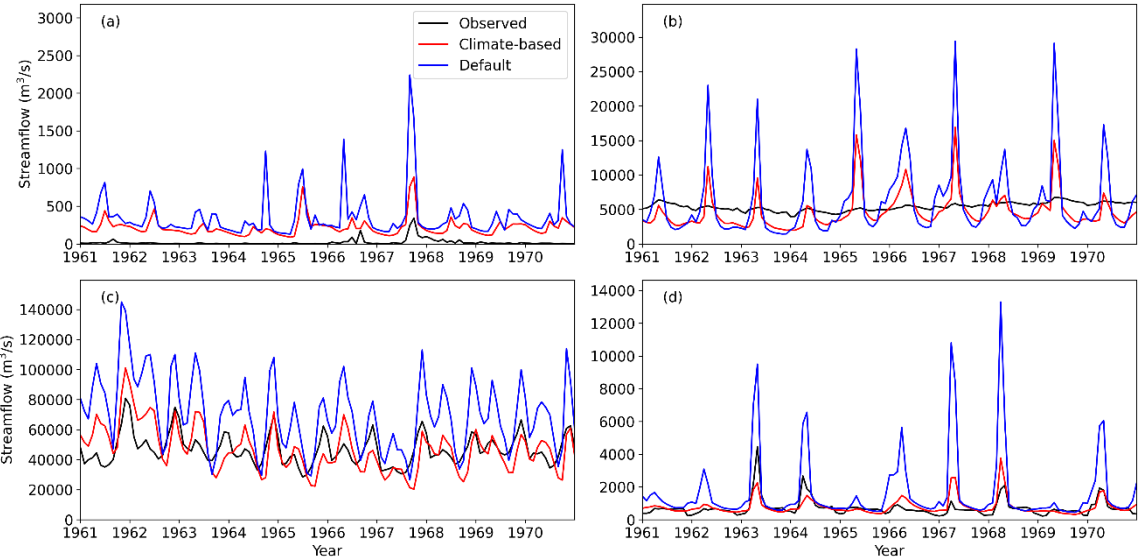


図 0-10 河川流量の再現例 (a) Matamoros, Rio Grande River (BS); (b) Queenston, Niagara River (Db); (c) Kinshasa, Congo River (Aw); (d) Razdorskaya, Don River (Db)

c) パラメータの検証

気候区分ごとのパラメータを図 0-11 の赤丸で示す。極端に流域数が少ない気候区分 (Af, Am, BS) を除き、気候区分ごとのパラメータは個別流域の最適値（同図中の青い箱ひげ図）の中央値付近にプロットされており、各気候区分の代表性を担保していることが確認できる。Dc は前述のように 6 地域に分けた値が示され、SD および γ の地域差が大きいことが分かる。

全体を見ると、気候区分のパラメータの感度が高く、不確実性が小さかったパラメータ SD と CD

は、熱帯から寒帯にかけて減少傾向にあることが示された。この違いは、高温湿潤地帯において冷涼乾燥地帯より土壌が発達することを反映したという、直感的な解釈と整合する。ただし本研究で示した SD は地中貯留量の総量を示すもので、土壌層だけでなく、深い基盤岩にも及ぶ。Milly (1994) は、北米大陸の河川流域において、長期間の水収支に地中貯留量が重要な役割を果たしていること、またそれが気候との相互作用により発達している事を示した。本研究で示された流量応答に対する SD の感度の高さ、およびその気候特性との関係はこの研究と整合する結果が世界の大河川でも成り立つことを強く示す根拠となる。

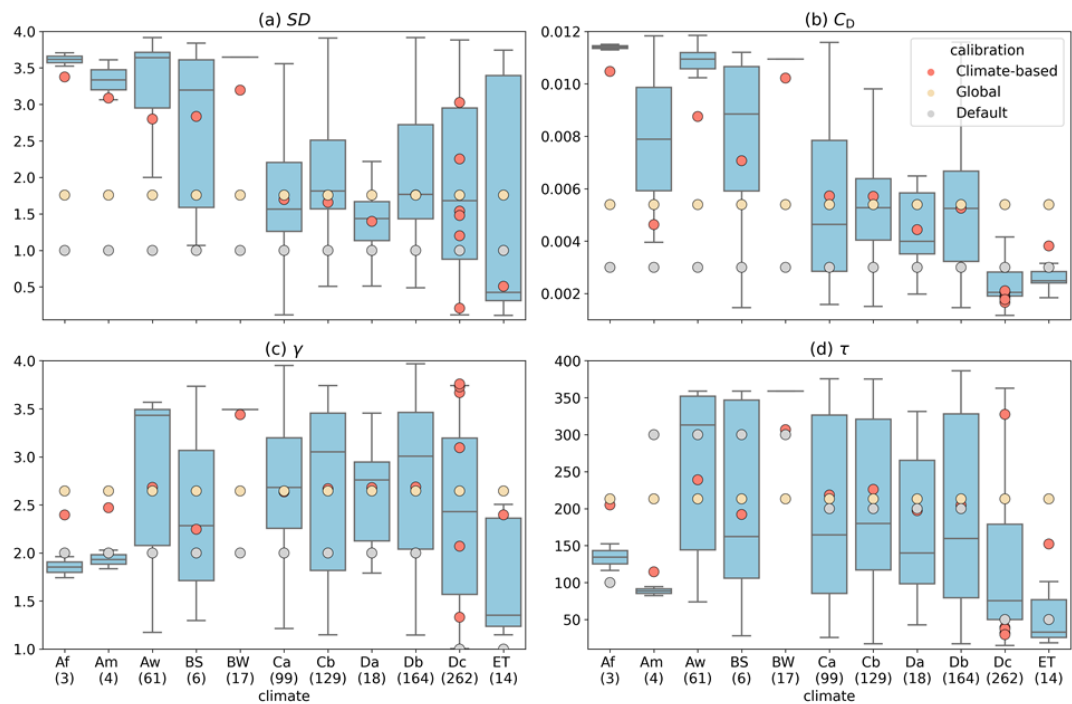


図 0-11 気候区分ごとのパラメータとデフォルト・全球一律・流域個別のパラメータの比較

また、CD が同様に熱帯から寒帯にかけて減少傾向にあることも、SD と同様、物理的に解釈できる。これは、古くから陸面過程モデルで行われている、植生に基づいたパラメータリゼーションを反映したものと考えられる。ただし、本研究では陸面過程モデルの規定値・文献値を参照することなく、複数の植生が存在する大流域での値を示せたことを強調したい。

γ と τ は感度が低く、気候区分との明確な関係は見いだせなかった。これは、 γ と τ が気候との関連性が低いということを意味するのみで、H08 のこれまでの地域研究例ではこれらのパラメータの重要性が指摘されている。流域個別の最適値や事後分布を調べると、いくつかのクラスターがあることも示される。気候代表値とこうしたクラスター間にあるギャップを気候以外の要因を含めて追求することが、さらなる予測精度の向上に繋がると考えられる。

5－2．環境政策等への貢献

気候変動適応法5条（事業者の努力）には「自らの事業活動を円滑に実施するため、その事業活動の内容に即した気候変動適応に努める」とある。CDP 調査への対応を含む企業の水リスクへの取り組みは水に関する気候変動適応の中心となるものである。本課題はそのための基礎情報となる、最新の全球水資源モデルと気候・社会経済シナリオに基づく水リスク評価結果を分かりやすく公開しようとするものである。全球水循環モデルおよび水リスク評価ツールは全球を対象としたものであるが、日本企業の販売・製造・材料調達拠点は世界に広がっており、国内企業と国内関連政策を強力に支援するものである。実際、試作段階で企業関係者に提示したところ、いつ使えるのか、すぐにも使いたいという声を多数いただいている。

第5次環境基本計画の第2章1.(3)には「関係者が広く ESG 投資等の重要性を正しく認識し、今後は一層の拡大を促していくことが求められる」「企業価値の向上に向けて環境情報の開示に取り組む企業の拡大及び企業が開示する情報の質の適正化を図る」とある。本課題は、ESG 投資において最も参照されているデータの一つである CDP Water 調査に焦点を絞り最新の情報を提供し、高度化・専門化する傾向にある同調査の質問への回答を通じ、企業の環境開示を支援しようとするものである。

<行政等が既に活用した成果>

該当するものはない。

<行政等が活用することが見込まれる成果>

国立環境研究所の気候変動適応センターは、気候変動適応法に基づき、各種の気候変動影響評価に係る情報の収集と発信を行っている。開発した水リスク評価ツールは、現時点でのコンテンツの中で最も大規模かつ高度なものであり、今後の情報提供のひな形となっていくと考えられる。

環境省の水・大気環境局は、水循環基本法に基づく健全な水循環の重要性について、企業や自治体等の理解や関心をより高めることを目的として、CDP との共催で「CDP 水セキュリティレポート 2020 報告会×Water Project」を令和3年2月16日に開催している。このような活動や動きに対して、研究の最新の知見を届けるための仕組みとして、本研究で開発した水リスク評価ツールは有用である。

本研究は気候変動影響評価に関する国際プロジェクト Inter Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISIMIP)への参加の一環として行っており、本研究で実施したパラメータ同定の革新や、シミュレーション結果は ISIMIP の活動を支えるものである。また、成果は影響力のある国際誌に順次発表しており、引用等を通じて IPCC 第6次評価報告書の淡水資源に関する章にも貢献することが見込まれる。

本研究の基盤である全球水資源モデルはオープンソースであったが、利用目的は研究と教育に限定されていた。本プロジェクトを通じて、民間企業およびコンサルティング業界の全球規模の水リスク評価の関心の高さを目の当たりにしたため、2021年4月1日以降利用許諾を民間企業の受け入れやすい Apache ライセンス変更し、利用目的に関する条項も撤廃した。これにより、水リスクに関するビジネスにおいて、H08 の利用検討が加速するものと思われる。水資源のシミュレーションは極めて煩雑であり、ソースコードを提供したからと言ってすぐに企業やコンサルティング業者での利用が始まることは考えにくいですが、まずは研究者側が提供可能な情報を提供しきることが今後の展開に重要だと考える。

5－3．研究目標の達成状況

本研究は企業の温暖化適応策検討支援を念頭においた公開型世界水リスク評価ツールを開発することを目的としていたが、ほぼすべての目標を達成した。

サブテーマ1では人間水利用を含む地球水循環を統合的に解析できる全球水資源モデル H08 を利用して過去から将来にわたる 200 年間の長期全球シミュレーションを行い、世界の渇水・洪水・サプライチェーンに関する水リスクを分析した（5. 1. 1 a-d）。CDP 調査で A 以上の評価を受けた 7 社への企業インタビュー、コンサルティング会社 4 所へのヒアリング、3 回にわたる企業向けの水リスクのセミナーを通して、企業のニーズも設計に取り込みつつ（5. 1. 1 e）、5 段階のリスク指標と要因分析をウェブベースのインターフェースを介して視覚的にも分かりやすく提供することで企業の適応策検討を支援する体制を構築した（5. 1. 1 f）。複数の時系列を並列表示する機能により、リスクの要因分析も可能にした。

サブテーマでは水リスク評価ツールを広く公開するにあたり、H08 の精度を高め、情報を開示するため、世界の河川流量観測データの大規模な解析を行い（5. 1. 2 a）、流量観測の得られない地域も含めて全球水資源モデルの水文パラメータ推定を実施し、全世界にわたって河川流量の推定精度を飛躍的に高めた（5. 1. 2 b-c、特に図 0-8）。

総勢 5 名のコンパクトな研究体制であったが、全員が献身的にプロジェクトに貢献し、規模以上の成果を出せたと自負している。2 か月に一度会合を開き、常に研究の軌道修正を行ったことが効率の良い研究実施に繋がった。

6. 研究成果の発表状況

6－1. 査読付き論文

<件数>

6 件

<主な査読付き論文>

- 1) Hanasaki, N., S. Yoshikawa, Y. Pokhrel, and S. Kanae (2018), A Quantitative Investigation of the Thresholds for Two Conventional Water Scarcity Indicators Using a State-of-the-Art Global Hydrological Model With Human Activities, *Water Resources Research*, 54(10), 8279-8294. (IF 4.36)
- 2) Yokohata, T., K. Tanaka, K. Nishina, K. Takahashi, S. Emori, M. Kiguchi, Y. Iseri, Y. Honda, M. Okada, Y. Masaki, A. Yamamoto, M. Shigemitsu, M. Yoshimori, T. Sueyoshi, K. Iwase, N. Hanasaki, A. Ito, G. Sakurai, T. Iizumi, M. Nishimori, W. H. Lim, C. Miyazaki, A. Okamoto, S. Kanae, and T. Oki (2019), Visualizing the Interconnections Among Climate Risks, *Earth's Future*, 7(2), 85-100. (IF 6.14)
- 3) Boulangé, J., Hanasaki, N., Yamazaki, D., and Pokhrel, Y.: Role of dams in reducing global flood exposure under climate change, *Nature Communications*, 12, 417, 10.1038/s41467-020-20704-0, 2021. (IF 12.12)
- 4) Gudmundsson, L., Boulangé, J., Do, H. X., Gosling, S. N., Grillakis, M. G., Koutroulis, A. G., Leonard, M., Liu, J., Müller Schmied, H., Papadimitriou, L., Pokhrel, Y., Seneviratne, S. I., Satoh, Y., Thiery, W., Westra, S., Zhang, X., and Zhao, F.: Globally observed trends in mean and extreme river flow attributed to climate change, *Science*, 371, 1159-1162, 10.1126/science.aba3996, 2021. (IF 41.85)
- 5) Pokhrel, Y., Felfelani, F., Satoh, Y., Boulangé, J., Burek, P., Gädeke, A., Gerten, D., Gosling, S. N., Grillakis, M., Gudmundsson, L., Hanasaki, N., Kim, H., Koutroulis, A., Liu, J., Papadimitriou, L., Schewe, J., Müller Schmied, H., Stacke, T., Telteu, C.-E., Thiery, W., Veldkamp, T., Zhao, F., and Wada, Y.: Global terrestrial water storage and drought severity under climate change, *Nature Climate Change*, 11, 226-233, 10.1038/s41558-020-00972-w, 2021. (IF 20.89)
- 6) Lange S., J. Volkholz, T. Geiger, F. Zhao, I. Vega, T. Veldkamp, C. Reyer, L. Warszawski, V. Huber, J. Jägermeyr, J. Schewe, D.N. Bresch, M. Büchner, J. Chang, P. Ciais, M. Dury, K. Emanuel, C. Folberth, D. Gerten, S.N. Gosling, M. Grillakis, N. Hanasaki, A.-J. Henrot, T. Hickler, Y. Honda, A. Ito, N. Khabarov, A. Koutroulis, W. Liu, C. Müller, K. Nishina, S. Ostberg, S.H. Müller, S.I. Seneviratne, T. Stacke, J. Steinkamp, W. Thiery, Y. Wada, S. Willner, H. Yang, M. Yoshikawa, C. Yue, K. Frieler (2020), Projecting Exposure to Extreme Climate Impact Events Across Six Event Categories and Three Spatial Scales, *Earth's Future*, 8, e2020EF001616. 10.1029/2020EF001616 (IF 6.14)

6－2. 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

6－3. その他発表件数

査読付き論文に準ずる成果発表	0 件
その他誌上発表（査読なし）	0 件
口頭発表（学会等）	1 7 件
「国民との科学・技術対話」の実施	7 件
マスコミ等への公表・報道等	2 件
本研究に関連する受賞	0 件

7. 国際共同研究等の状況

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。2012 年に始まった ISIMIP Phase 1 の結果は権威ある米国科学アカデミー紀要の特集号に取りまとめられ、IPCC 第 5 次評価報告書第二作業部会に極めて重要な科学的知見を提供した。2014 年以降の Phase2 は IPCC1.5℃特別報告書にやはり大きく貢献した。現在実施されているのは Phase 3 であり、水リスクツールはこの Phase 3 の計算結果に基づいている。H08 は ISIMIP の始まった 2012 年から継続参加しており、全球規模の水資源への温暖化影響評価で世界で最も使われている 4 モデル（ドイツの WaterGAP2, ドイツの LPJmL, オランダの PCR-GLOBWB、日本の H08）の一角を占めている。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。

8. 研究者略歴

研究代表者：

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

研究分担者：

1) ブランジェ ジュリアン

Universite Joseph Fourier, Polytech Grenoble, Faculty of Engineering 卒業、東京農工大学大学院農学研究科修了、博士（農学）、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特別研究員

2) 岡田 将誌

筑波大学第一学群卒業、筑波大学大学院生命環境科学研究科修了、博士（理学）、現在、国立環境研究所社会環境システム研究センター地域環境影響評価研究室研究員

3) 仁科 一哉

名古屋大学農学部卒業、名古屋大学大学院生命農学研究科修了、博士（農学）、現在、国立環境研究所地域環境研究センター土壌環境研究室主任研究員

4) 吉田 武郎

東京農工大学農学部卒業、博士（農学）、現在、農業・食品産業技術総合研究機構 農村工学研究部門主任研究員

Ⅱ．成果の詳細

Ⅱ－１ 全球水資源モデルの公開型世界水リスク評価ツールへの展開

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

社会環境システム研究センター

地域環境研究センター

花崎 直太、ブランジェ ジュリアン

岡田 将誌

仁科 一哉

〔要旨〕

サブテーマ 1 では人間水利用を含む地球水循環を統合的に解析できる全球水資源モデル H08 を利用して過去から将来にわたる長期シミュレーションを行い、世界の渇水・洪水・サプライチェーンに関する水リスクを分析したうえで、企業のニーズも設計に取り込みつつ、リスク指標と要因分析をウェブベースのインターフェースを介して視覚的にも分かりやすく提供する水リスクツールの開発を行った。研究は全球水循環・水利用シミュレーション、渇水リスク分析、洪水リスク分析、サプライチェーン分析、企業調査、水リスクツールの開発の 6 つの要素から構成された。以下では、紙面の制約から、特に大きな開発項目となった①洪水リスク分析のためのダムを考慮した洪水氾濫モデルの開発と、②サプライチェーンリスク分析のための干ばつリスク評価モデルの開発に絞って説明を行う。

洪水リスク分析のためのダムを考慮した洪水氾濫モデルの開発では、全球水資源モデル H08 と全球河川動態モデル CaMa-Flood を結合し、気候変動影響評価シミュレーションを実施した。これまでに気候変動に伴う全球規模の洪水氾濫面積の変化の評価は行われてきたが、ダムの効果は含まれていなかった。そこで、気候変動に伴う流出量と世界の主要ダムの操作を推定できる H08 と、地形詳細な洪水氾濫面積の推定を可能にする CaMa-Flood を利用することでこの問題に取り組んだ。この結果、気候変動に伴って世界的に洪水リスクが将来増加すると予測されるものの、ダムでの洪水調節を見込むと、考慮しない場合と比較して 21 世紀中のダム下流の洪水暴露人口が世界的に約 15%減少することを明らかにした。

サプライチェーンリスク分析のための干ばつリスク評価モデルの開発では、世界の主要穀物（トウモロコシ、コメ、コムギ、ダイズ、オオムギ）を対象に、干ばつ発生時の穀物生産性の低下を降水変動から予測する統計学的なモデルの構築を行った。気候変動に伴うサプライチェーン上流側での干ばつリスクの把握は国内外の企業において急務となっており、気象学や水文学的な視点での将来の干ばつ予測研究も多くなされてきたが、農業、とりわけ穀物生産に対する将来の干ばつ被害予測を全球において評価した研究例はなかった。そこで、干ばつ時の減収を降水変動から高精度で推定できる統計学的手法（Kim et al. 2019）を利用し、全球の長期間の干ばつリスク情報を創出した。ここで、食用および畜産飼料として世界的に需要の高いオオムギの収量に関する全球規模のデータがなかったため、データの構築も併せて行った。この結果、主要生産国であるスペイン、ロシア、オーストラリアの多くの耕地で干ばつによる減収率が増加を示し、原材料調達先としてのリスクが増加することが分かった。

1. 研究開発目的

サブテーマ 1 では、人間水利用を含む地球水循環を統合的に解析できる全球水資源モデル H08 を利用して過去から将来にわたる長期シミュレーションを行い、世界の渇水・洪水・サプライチェーンに関する水リスクを分析したうえで、企業のニーズも設計に取り込みつつ、リスク指標と要因分析をウェブベースのインターフェースを介して視覚的にも分かりやすく提供する水リスクツールの開発を行った。本研究は全球水循環・水利用シミュレーション、渇水リスク分析、洪水リスク分析、サプライチェーン分析、企業調査、水リスクツールの 6 つからなる。以下では、紙面の制約から、特に大きな開発項目となった①洪水リスク分析のためのダムを考慮した洪水氾濫モデルの開発と、②サプライチェーンリスク分析のための干ばつリスク評価モデルの開発に絞って説明する。

1. 1 洪水リスク分析のためのダムを考慮した洪水氾濫モデルの開発

地球温暖化は、降水の分布、変動、および強度を変化させることにより、洪水リスクを高める。洪水の破壊的な被害を軽減し、人間が利用するための水資源を最大化するために、世界に 280 万のダムがこれまでに建設され、総貯水容量は 7,000~10,000 km³ に上ると推定されている。ダムは河川流量を調節することにより、一般的に毎年の洪水の頻度、期間、タイミングを改変する。世界では 3,700 以上の大規模ダムが計画中または建設中であり、気候影響研究におけるダムの役割を理解することがますます重要になっている。しかし、洪水予測に関するこれまでの研究では、データ不足、貯水池操作のモデル化の難しさ、および地球規模のモデルで扱われる水文のスケールよりダムが小さいという課題のために、ダムの役割はこれまで無視されてきた。これまでの洪水に関する地球規模の分析では、過去の洪水パターンの再現や、気候変動および社会経済変化を考慮した将来の洪水を予測などが行われてきた (Hirabayashi et al., 2013)。気候変動に関する政府間パネル (IPCC) の第 5 次評価報告書 (AR5) の重要な結論は、現在気候における 100 年に 1 度の河川洪水に相当するものに毎年さらされる人々の数は、温室効果ガス排出量が高い場合は低い場合に比較して 3 倍になると予測されたことであった。しかし、ダムが世界の多くの大河川の流れを制御しているにもかかわらず、ダムがモデルに統合されていないため、ダム操作が河川と氾濫原のダイナミクスに与える効果や、さらには、気候変動に伴う洪水流の変化が暴露人口に及ぼす影響は地球規模では未解明のままである。そこで、最先端の全球水文モデルと全球河川動態モデルを統合するモデル枠組みを使用して、気候変動下での将来の洪水リスクを軽減するうえでのダムの役割について、初めての地球規模の評価を行う。具体的には、モデル枠組みによって、ダムを考慮した場合、しない場合の現在気候の 100 年に 1 度の洪水の頻度の変化を定量化し、洪水にさらされる世界の人口に対する効果を推定する。本研究では、洪水とは、100 年に 1 度の確率で発生する極端な河川流量とし、洪水の頻度 (1 年あたりの洪水数) と最大洪水氾濫面積、およびこれらの洪水にさらされる暴露人口について検討する。

1. 2 サプライチェーンリスク分析のための干ばつリスク評価モデルの開発

世界各地で干ばつによる穀物生産への被害が報告されており、世界の安定的な穀物生産を脅かす主要な原因の一つとなっている。その被害規模の大きさから世界の食料サプライチェーンに度々大きな影響をもたらしてきた。

人口増加と発展途上国での社会経済発展により、世界の食料需要は 2050 年には現在の約 2 倍程度に増加すると見込まれている。一方で、世界の穀物生産性の増加は近年頭打ち傾向にあることや農地として拡大可能な土地はすでに限定的であることが観測事実として認識されており、さらに高緯度地域を除き、将来の気温上昇が大きいと穀物生産性は低下が顕著となることが予測されている。したがって、将来の穀物生産量の大幅な増加は困難であることが予想され、干ばつによる減収分へ

の補填は期待できない。今後気候変動による干ばつの頻度と強度が増加すると予測されており、サプライチェーン上流側での干ばつリスクの把握は国内外の企業や団体において急務な課題である。しかしながら、これまで気象学や水文学的な視点での将来の干ばつ予測研究は多くなされてきたが、農業、とりわけ穀物生産に対する将来の干ばつ被害予測を全球において評価した研究例はなかった。主要穀物の輸出量や生産量の約 80%が上位 5 カ国に偏っており、いずれかの国や地域で旱魃が発生した場合には世界の食料サプライチェーンに与える影響は甚大である。

そこで本研究では世界の主要穀物（トウモロコシ、コメ、コムギ、ダイズ、オオムギ）を対象に、干ばつ発生時の穀物生産性の低下を降水変動から予測する統計学的なモデルの構築を行う。構築したモデルを用い、 0.5° （約 50km）グリッドセルの高解像度で、将来の干ばつによる世界全体および主要生産国における主要穀物生産への影響度合いやその影響の地理的分布の変化の特徴を明らかにする。

2. 研究目標

全球水資源モデル H08 を駆使することにより、ウェブベースの世界水リスク評価ツールを完成させる。まず、高精度気候データ・シナリオおよび社会経済データ・シナリオを利用して、全球水資源モデル H08 を利用したシミュレーションを行い、現在と将来の洪水と渇水に関する出力を得る。得られた出力は統計的手法を利用して 5 段階の水リスク指標へと変換する。サプライチェーンについては、主要農畜産物に対象を限定し、国際貿易を通じた水リスクの輸出入の分析を行う。また、人間水利用を含む地球水循環を統合的に解析できる H08 の強みを生かして水リスクの要因分析を行い、水リスク増減の要因を定量的に示す。ウェブインターフェースを 2021 年 2 月末までに開発し、指標と要因分析結果を視覚的にも分かりやすく表示する。研究期間中に企業やリスクコンサルティング業界のニーズと動向の調査も行い、設計・仕様に反映する。

3. 研究開発内容

3. 1 洪水リスク分析のためのダムを考慮した洪水氾濫モデルの開発

3. 1. 1 モデル

2 つ全球モデルを使用して、世界の河川流量と氾濫原のダイナミクスを推定した。ダムによる制御を含む河川流量は、全球水資源モデル H08 によって推定した (Hanasaki et al., 2018)。洪水氾濫のダイナミクスは、CaMa-Flood モデルによって推定した (Yamazaki et al., 2011)。H08 は人間の水利用と自然の水循環との相互作用を考慮できる全球水文モデルである。CaMa-Flood は、HydroSHEDS (Lehner et al. 2008) による地形データを活用し、局所慣性方程式を明示的に解くことにより、氾濫原のダイナミクスを計算する新世代の全球河川モデルである。このモデルは、過去の流量の再現において、既存の全球河川モデルよりも優れていることが分かっている。この研究では 2 つの出力変数が使用された。グリッドセルで発生する総流量(河川流量と氾濫原の流れの合計)と浸水面積である。後者を出力するため、CaMa-Flood は、河川水が河道内に留まっているかを評価する。超えている場合、余剰水は氾濫原に貯水され、その地形 (HydroSHEDS によって決定) から洪水水位 (水位と氾濫原) を決定する。

氾濫原のダイナミクスに対する人為的活動の影響をシミュレートするために、H08 モデルと CaMa-Flood モデルを組み合わせた。現在の全球版 CaMa-Flood (バージョン v3.62) ではダムが含まれていないため、ダム放流量の推定には H08 モデルが必要である。結合手順は次のとおりである。まず、H08 モデルを使用してシミュレーションを実行する。H08 によって計算された日単位の流出は、CaMa-Flood の境界条件として使用される。ダムを含むグリッドセルでは、貯水池の操作規則に従う H08 の河川流量で CaMa-Flood モデルの流量を差し替える (図 1)。ダム操作による 2 つのモデル間の日

単位の流量の差異は、すべてのダムに設定された仮想の貯水池に記録することで、結合しても水収支を保った。

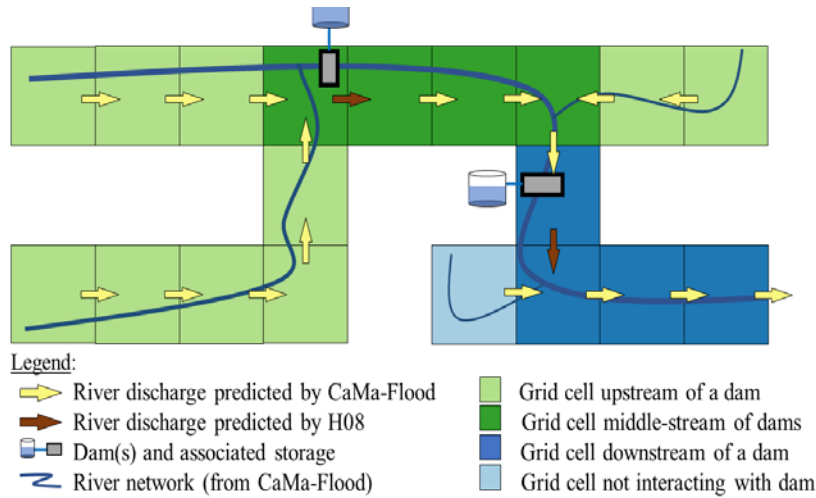


図 1-1 H08 と CaMa-Flood 結合の模式図

3. 1. 2 入力データ

入力気象データは、ISIMIP2b プロトコルに示された4つの大循環モデルの結果を使用した (Lange et al. 2019)。このデータは降水量、気温、下向き短波放射、下向き長波放射、風速、比湿、気圧で構成される。バイアス補正され、 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ グリッドの解像度にダウンスケールされている。本研究では過去（1861～2005）と将来（2006～2099）のシミュレーションをおこなった。将来については2つの放射強制力シナリオを使用した。低位（RCP2.6）および中位（RCP6.0）温室効果ガス排出シナリオである。過去は、データ同化がされたいないため、日々の観測された気象を再現したものではないことに注意が必要である。ダムの緒元（場所、貯蔵容量、建設年）はGRanDに記載されたものを利用し、H08 と CaMa-Flood で共通化した河道網に埋め込んだ（図 1-2）。

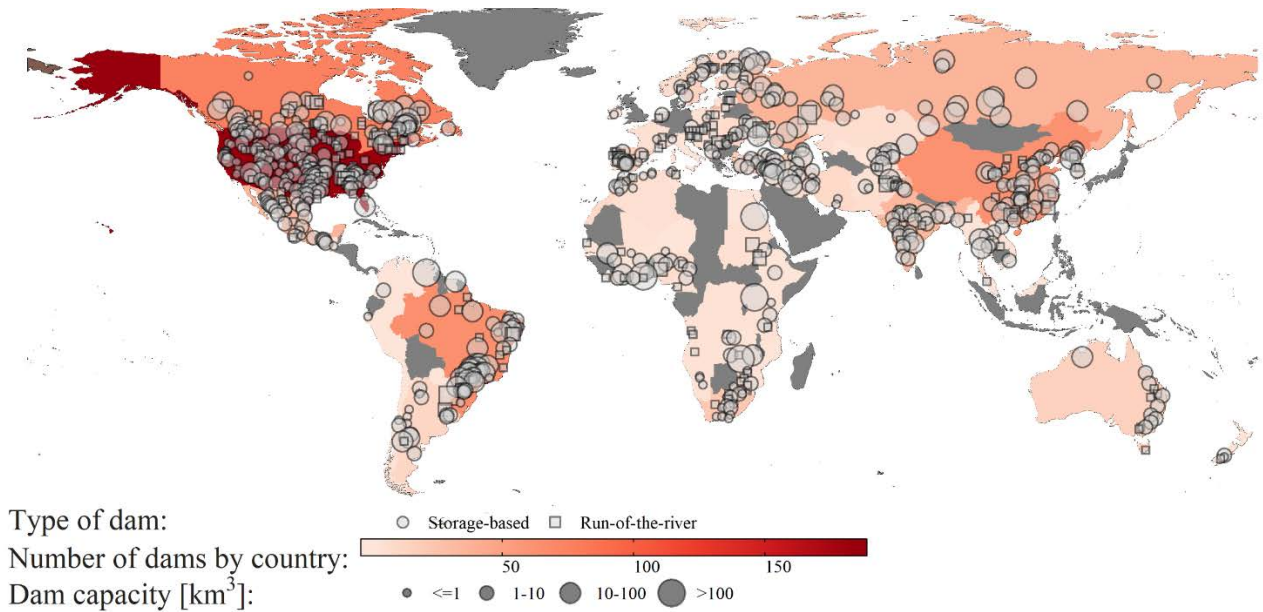


図 1-2 本研究で扱ったダムとその特徴

3. 1. 3 実験

将来のシナリオ（RCP2.6 および RCP6.0）では、2つの実験が行われた。最初の実験は、ダム操作を

考慮しないものである。このシミュレーションは従来の CaMa-Flood 単体によるシミュレーションと同様の結果となった。もう一つの実験では、世界の主要なダム操作を考慮したものである。水管理により、ダム下流においては過去 100 年間の極端な流出に関連する再現期間（年単位）は、ダム操作を考慮しない実験で得られたものと異なるはずである。これらの差異を、100 年に 1 度の洪水の再現期間の減少に対するダムの影響とみなした。

3. 1. 4 洪水イベントと極端な流出の定義

2 つの実験を使用して、過去（1975-2004）と予測された将来（RCP2.6 および RCP6.0；2070-2099）の洪水イベントの頻度を比較した。洪水イベントは、過去の 100 年に 1 度の極端な流出、つまり、任意の年に 1/100 の確率を超える可能性のある極端な流出として定義された。

3. 1. 5 洪水曝露人口

人口データセットとしては、2010 年の世界のグリッド人口（GPW、v4.11；CIESIN 2018）を利用した。人口は 2010 年で固定され、洪水への人口曝露に対する気候変動の影響のみを評価した。暴露評価の精度を高めるため、元の 0.5° の解像度の浸水深を 0.005° の解像度にダウンスケールした。最初に、100 年に 1 度に相当する洪水が起こったグリッドセルを特定した。次に、そのようなグリッドセルについて、年間最大浸水深を抽出した。該当しないグリッドセルは、浸水深をゼロに設定した。次に、CaMa-Flood に実装されたルーチンを使用して、結果を 0.005° の解像度にダウンスケールした。河川洪水への曝露人口は、人口と洪水深度のデータセットを重ね合わせることによって評価した。

3. 2 サプライチェーンリスク分析のための干ばつリスク評価モデルの開発

3. 2. 1 モデル

本研究では、干ばつ時の減収を降水変動から高精度で推定できる統計学的手法（Kim et al. 2019）を利用し、主要 4 作物（トウモロコシ、コメ、ダイズ、コムギ）に加え、食用および畜産飼料として世界的に需要の高いオオムギまで拡張した。具体的な手法を以下に説明する。まず、グリッドセルごとのある年 t における収量偏差 Ω_t [%] は以下の通りで示す。

$$\Omega_t = \frac{\omega_t - \bar{\omega}_t}{\bar{\omega}_t} \times 100, \quad (1)$$

ここで、 ω は収量 [t/ha]、 $\bar{\omega}$ は 5 年移動平均収量 [t/ha] である。グリッドセルごとのある年 t における干ばつ指数 Z_t は、Standardized precipitation index (SPI) を用い、6 ヶ月 SPI 値 ζ^6 の収穫月を含め前 3 ヶ月の積算値として定義する。

$$Z_t = -\sum_{j=0}^2 \zeta_{H-j,t}^6, \quad (2)$$

ここで、 H は収穫月、 j は月である。6 ヶ月 SPI 値 ζ^6 は以下の通りで求める。

$$\zeta_{j,t}^6 = \frac{x_{j,t}^6 - \mu_j^6}{\sigma_j^6}, \quad (3)$$

ここで、 X^6 、 μ^6 、 σ^6 は、ある年 t ある月 j における前 6 ヶ月の、月降水量 x 、月降水量平年値 μ 、月降水量標準偏差 σ の、それぞれの積算値である。

$$X_{j,t}^6 = \sum_{i=0}^{6-1} x_{j-i,t}, \quad (4)$$

$$\mu_j^6 = \sum_{i=0}^{6-1} \mu_{j-i}, \quad (5)$$

$$\sigma_j^6 = \sum_{i=0}^{6-1} \sigma_{j-i}. \quad (6)$$

次に、式(1)(2)より算出される収量偏差 Ω_t および干ばつ指数 Z_t を用い、グリッドセルごとに単回帰解析を行った。ただし、収量に対する干ばつ影響を捉えるため、 $Z_t \geq 0$ の年を解析対象とした。さらに、グリッドセルごとに得られた回帰パラメータ a 、 b はそれぞれ、グリッドセルごとの平年降水量 κ との間で空間相関解析を実施した。具体的には、平年降水量の 20 パーセンタイルのビンごとに、

当該グリッドセルの回帰パラメータ群による中央値を計算、ビンごとに得られたパラメータの中央値の回帰直線を引くことで、年間降水量との関係性を得た ($\alpha = 8.5 - 3.7\kappa, \beta = 7.9 - 3.3\kappa$)。

得られた収量偏差と降水量との統計的関係をもとに、グリッドセルごとのある年 t における干ばつ由来の収量減少率 Y_t [%]は以下で計算される。

$$Y_t = \alpha + \beta Z_t, \quad (7)$$

ただし、本研究は干ばつ由来の減収を推定することを目的としているため、 $Y_t \geq 0$ のみを分析に扱う。

最後に、干ばつ発生時の平均的な収量の減少率 $\bar{Y}$ [%]を次のように算出した。

$$\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_t, \quad (8)$$

ここで、 n は $Y_t \geq 0$ のときの年数である。

3. 2. 2 作物収量データ

全球 0.5° (約 50km) グリッドセルの高解像度収量データセット GDHY を使用した (Iizumi et al. 2014; 2020)。この収量データセットには含まれないオオムギ収量データについては同様の手法から本研究にて新しく作成した。作成方法は以下の通りである。まず全球栽培暦データ (Sacks et al. 2010) をベースに、播種日と収穫日の不確実性を加味した確率分布から数百の生育期間を設定、オオムギの栽培グリッドセルで各々の生育期間で播種日から収穫日までの衛星データ由来の純一次生産量 (NPP) を積算した。次に、国の栽培グリッドセル平均積算 NPP を計算し、各栽培グリッドセルの積算 NPP と国平均積算 NPP との比率を算出し、この比率を FAO の国別統計収量に乗じることで国内の収量の空間分布を推定した。なお、オオムギの春・冬作は作期間の積算 NPP の比率により生産量割合を考慮した。

3. 2. 3 その他データ

干ばつリスクモデルに用いる収穫月データは Sacks et al. (2010) を、降水量データは WFDEI (Weedon et al. 2014) を使用した。さらに将来の降水量変化に基づく干ばつ時の減収率の予測を行うため、モデル入力データとして、気候変化シナリオは 3 つの RCP シナリオ (2.6, 6.0, 8.5) を考慮したバイアス補正済みの 4 つの GCM 出力データ (GFDL-ESM2M, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR, MIROC5) を使用した。収穫日は現在固定とした。

4. 結果及び考察

4. 1 洪水リスク分析のためのダムを考慮した洪水氾濫モデルの開発

4. 1. 1 洪水への曝露人口

気候変動によって洪水のリスクは将来増加する (図 1-3)。ただし、ダム操作を考慮することにより、ダム下流の洪水暴露人口は、ダムを考慮しないシミュレーションと比較べて RCP2.6 シナリオで 16.3% (5.7–30.7%、括弧内の第 1 四分位数と第 3 四分位数は、GCM アンサンブルからの不確実性を表す)、RCP6.0 シナリオで 12.8% (4.2–27.5%) 減少した (2006–2099 年、図 1-3 を参照)。ダムの考慮による洪水暴露人口の減少は、いずれの RCP においても 21 世紀の最後の 10 年間で最も大きかった。RCP2.6 シナリオ下において、洪水暴露人口はダムを考慮しないシミュレーションでは 910 万人 (460–1810 万人) であったのに対し、考慮した場合は 720 万人 (350–15.1 百万人) であった。RCP6.0 シナリオでは、それぞれ 1530 (830–2720) 万人と 1340 (730–2430) 万人であった。

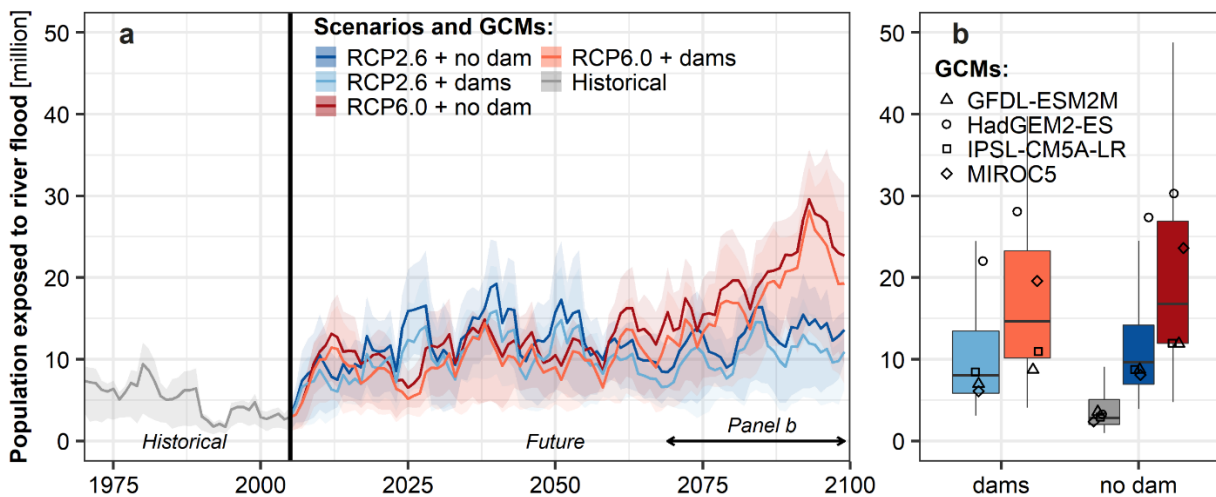


図 1-3 現在気候の 100 年に 1 度の洪水に対するダム下流の洪水暴露人口 (人口は 2010 年で固定)。(a)洪水暴露人口の 5 年移動平均。範囲は GCM による結果のばらつきを表す。(b) 2070-2099 年における現在気候の 100 年に 1 度の洪水に対するダム下流の洪水暴露人口の 95 および 5 パーセンタイル値 (ひげ)、メディアン (線)、第 1・第 3 四分位 (箱)、ならびに各モデルの平均値 (シンボル)。

4. 1. 2 将来の洪水の発生確率

ダムの下流では、ダムを考慮した実験では、ダムを考慮しない実験よりも過去における 100 年に 1 度の規模の洪水の発生頻度が低くなった。この効果が見られたのは RCP2.6 と RCP6.0 のそれぞれで、全対象グリッドの $66.6 \pm 4.2\%$ および $60.8 \pm 12.7\%$ であった (平均および GCM 全体の土標準偏差) (図 1-4)。これらの結果は、先行研究と同様の傾向を示す。たとえば、米国では、中規模または大規模のダムによる洪水削減効果が水文ユニットの 62% で報告されている (Zhao et al. 2020)。同様に、カナダでの研究では、ダムが過去の 10 年に 1 度以下の洪水の発生を完全に抑えたことが明らかになっている (Assani et al., 2006)。将来の洪水頻度の顕著な減少は、複数の大容量ダムのある河川の主河道 (ミシシッピ川、ドナウ川、パラナ川など) で見られた。ダムを考慮した実験において、100 年に 1 度の洪水頻度の減少は、下流へ移動するにしたがって減少し、例えば、アマゾン川、コンゴ川、レナ川の河口では無視できる (図 1-4 では灰色になる)。

いくつかの場所 (図 1-4 の青いセル) では、ダムの存在により、ダムなしの実験と比較して、100 年に 1 度の洪水が増加した (RCP2.6 と RCP6.0 でそれぞれ $6.7 \pm 2.4\%$ と $4.6 \pm 1.1\%$)。この現象は、Masaki et al. (2017) によってパルス効果と名付けられた散発的な貯水池の飽和と越流に関連しており、アメリカの一部の河川に見られる。すなわち、シミュレーション期間のほとんどでダムは飽和しないが、まれに越流した場合、極端な流量が、流量の頻度分布を歪め、統計学的に推定される 100 年に 1 度の洪水流量を極端な値にしてしまい、ガンベル分布への適合を損なうのである。大規模な出水までのリードタイムは、多くの場合、ダムに十分な貯水容量を確保するには短すぎるため、グローバルダムシミュレーションでは (そして現実も) 越流 (パルス) を完全に回避できない。

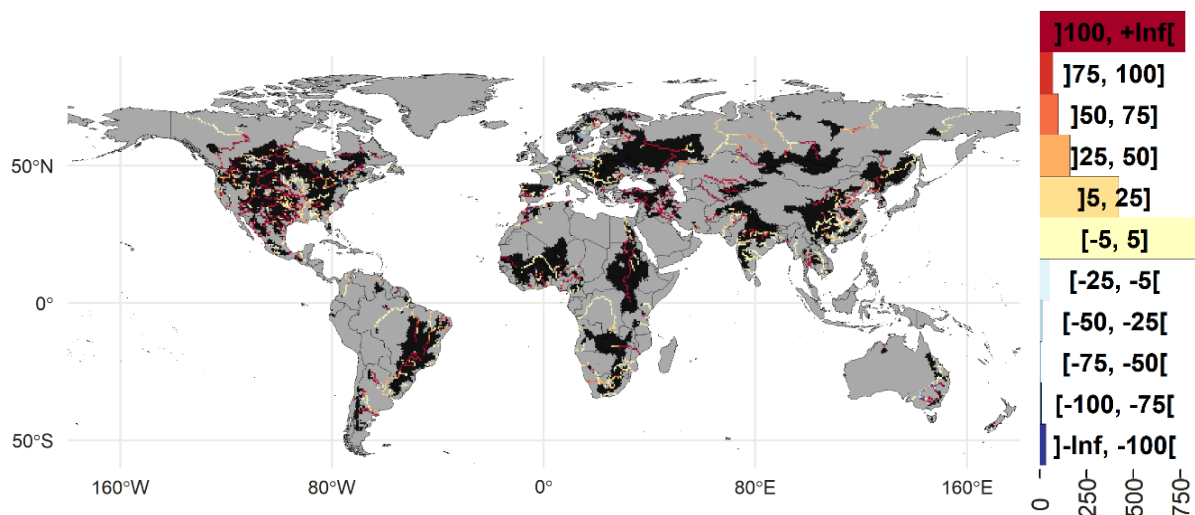


図 1-4 現在気候で 100 年に 1 度の規模の洪水の 21 世紀中の再起確率年数のダムの考慮の有無による差異。複数の GCM のメディアン。Köppen-Geiger 気候区分で *BWk*, *BWh*（それぞれ温暖と寒冷な砂漠気候）と *EF*（氷帽気候）ならびに 30 年に 1 度の洪水が $5\text{m}^3\text{s}^{-1}$ である地域は解析対象から除外した。温室効果ガスの排出シナリオとしては RCP6.0 を利用した。

4. 1. 3 考察

本研究により、ダム操作を明示的に考慮することにより、洪水に関する気候変動影響評価において、洪水暴露人口が大幅に減少することを明らかにした。21 世紀末のダムの下流では、ダム操作を考慮しない（する）場合、100 年に 1 回の洪水が RCP2.6 では平均して 107（79-168）年に 1 回、RCP6.0 では 79 年（55-103）に 1 回発生することが示された。RCP6.0 では、100 年に 1 度の洪水がより頻繁に発生した。ダムを考慮した実験と考慮しなかった実験では、それぞれ 59 年（39～110）と 46 年（33～75）に 1 回の発生となった。ほとんどの流域では、ダムは下流の洪水の頻度と氾濫面積の両方を減らした。一部の集水域では、ダムのパルス効果によって推定精度が損なわれている事象が特定されたが、いずれにせよ、研究結果は洪水に関する複数の指標に対して頑健だった。この問題は、将来の降水量の変動に対して複数ダムを連動させることで部分的に軽減できる可能性がある。本研究では日単位の降水量に伴う洪水について考察を行っており、極端な降水イベントの増加によるダム決壊の可能性や、ダムのライフサイクルにおける建設期間や試験期間などは明示的に考慮されていない。また、ダムの制度的、環境的、社会的影響についても考察の対象外としている。これらの制約はあるものの、本研究の結果はダムが頻度と強度の両方の点で将来の地球規模の洪水のリスクを大幅に減らし、21 世紀末の洪水暴露人口を RCP2.6 で 140 万人（70 万-310 万）、RCP6.0 では 230 万人（80 万-370 万）人減らすことを示唆した。

現在あるダムは、水文学的リスクを高める新たな気温、降雪、流出、洪水のパターンに直面している。気候変動に直面しても従来と同水準の洪水防御機能を維持するには、新しいダム操作ルールが必要になる。さらに、正確で信頼性の高い水文気象予報は、ダムの洪水防御機能を最大化し、過度の放流を回避するために非常に貴重である。本研究は、気候変動下での世界的な洪水暴露の削減におけるダムの役割のみに焦点を当てており、結果的に、ダムの利点を強調しすぎている側面がある。ダムの多くの環境的および社会的悪影響を考えると、水資源の持続可能な開発には、ダムのもたらす潜在的な利益と悪影響の両方を考慮した包括的な評価が必要である。より有効な世界の洪水リスクの将来分析のために残された課題としては、グローバルなダムと河川のデータセットのさらなる整備（ダムの所在地、緒元、河道の形状など）、より現実的な将来の人口分布予測、過去の観測データの同化による、過去期間の気象現象の再現性の向上、頑健なモデル検証のための過去の貯水池操作、流量、および氾濫に関するデータの蓄積と公開などが挙げられる。

4. 2 サプライチェーンリスク分析のための干ばつリスク評価モデルの開発

本研究で作成したオオムギ収量の推定精度を評価するため、世界全体の生産量の 60%以上をカバーする、32 の主要生産国における県州レベルの地域統計収量データを収集し、 0.5° のグリッドセルに割り付けを行なった。グリッドセルごとの推定収量と地域統計収量の比較結果を図 1-5 に示す。グリッドセル内の収穫面積が 5%以下では相関係数は 0.51 (RMSE 値は 37%) であり、精度は中程度であった。これは衛星データから推定した NPP は、オオムギ以外の土地利用によるバイアスの寄与が大きいことを示す。収穫面積が大きいほど推定収量と統計収量が良く一致し、収穫面積が 25%以上では相関係数は 0.94 を示した (RMSE 値は 15%)。本研究にて衛星データから推定した収量データは精度良く地域の実収量を捉えられていることを確認できた。

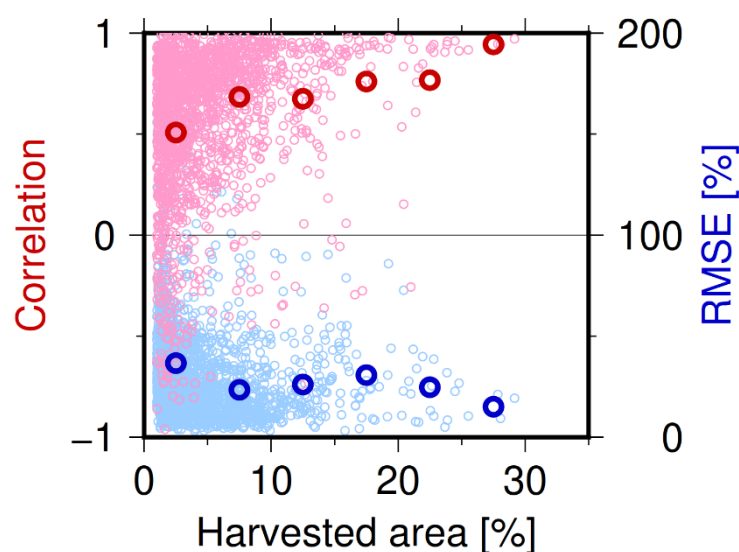


図 1-5 オオムギ推定収量と県州レベル統計収量との比較. ピンク (水色) 小点はグリッドセルごとの 2000-2016 年における相関係数 (RMSE) を示し、赤 (青) 大点は収穫面積 5% ごとの平均を示す.

作成した推定収量データを用い、構築した干ばつリスク評価モデルに気候変化シナリオを入力し、将来の気候変動下における干ばつリスクシミュレーションを行なった。ここではオオムギを例に示す。図 1-6 は、干ばつ発生時の平均的な収量の減少率 $\bar{Y}$ の将来と現在の差分を示す。干ばつ時における収量減収率は RCP8.5 シナリオ環境下において、特に地中海周辺で今世紀末にかけて拡大する方向であることを予測した。GCM による予測不確実性はあるものの、GCM 平均では主要生産国であるスペインのほとんどの耕地で減収率増加を示しており、原材料調達先としてのリスクは増加する (図 1-7)。ロシアやオーストラリアもまた、およそ半分の耕地で減収率増加を示した。しかし一方で残りの耕地において干ばつによる減収率が軽減することがわかり、国内で調達先を調整することで干ばつリスクへの対応がとれる可能性を示唆した。本研究によって得られた全球 0.5 度解像度での穀物生産干ばつリスクマップの情報は干ばつによる国内外の穀物の安定的な輸出入や需給への貢献が期待できる。

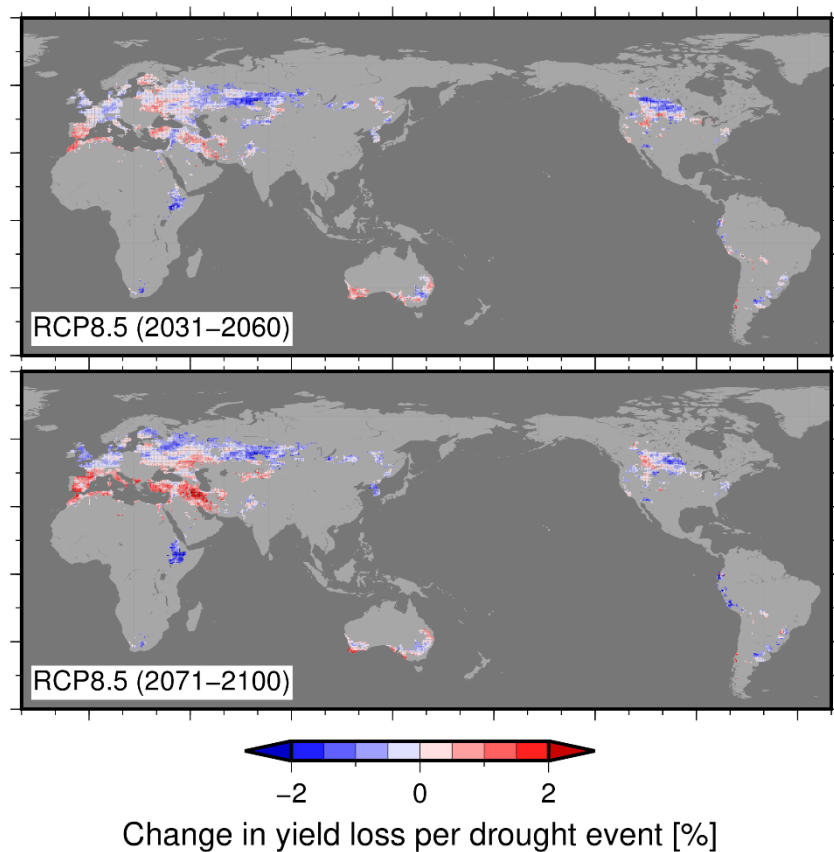


図 1-6 干ばつイベント発生時の干ばつ由来のおオムギ収量の平均減収率の変化. 正（負）の値が大きくなるほど減収率は増加（低減）することを示す.

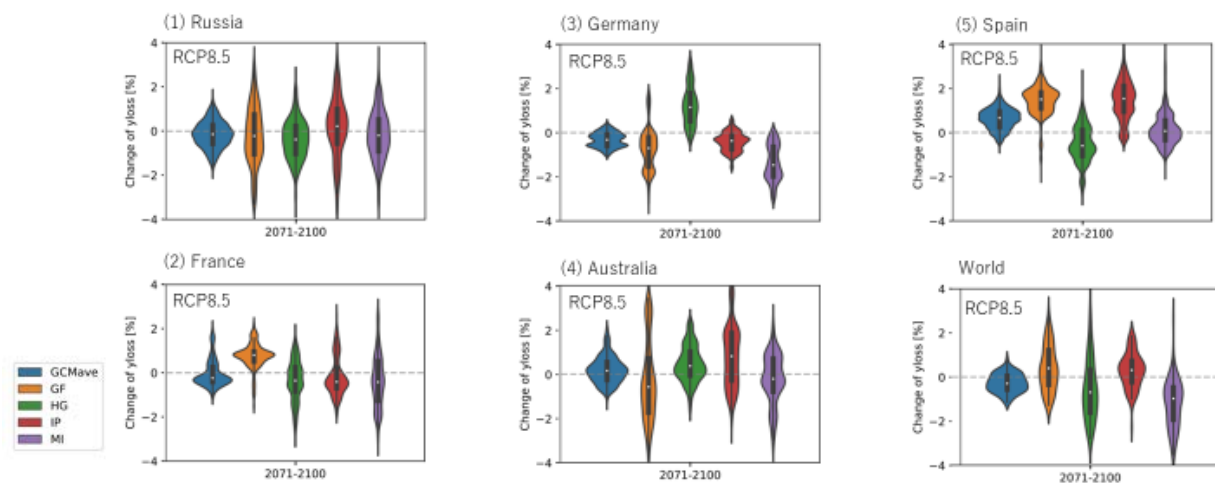


図 1-7 オオムギ主要生産国における、干ばつイベント発生時の干ばつ由来のおオムギ収量の平均減少率の変化の分布. プロットの領域は収穫面積で重み付けをした、その国に該当するメッシュ群のデータ分布を表す. 凡例の GF, HG, IP, MI は GCM 名の頭文字 2 文字に相当し、GCMave はそれら GCM の平均を示す.

5. 研究目標の達成状況

ほぼ研究目標は達成できた。まず、全球水資源モデル H08 を利用して、ウェブベースの世界水リスク評価ツールを完成させることができた。まず、高精度気候データ・シナリオおよび社会経済デー

タ・シナリオを利用して、全球水資源モデル H08 を利用したシミュレーションを行い、現在と将来の洪水と渇水に関する出力を得る。得られた出力は統計的手法を利用して5段階の水リスク指標へと変換する。サプライチェーンについては、主要農畜産物に対象を限定し、国際貿易を通じた水リスクの輸出入の分析を行う。また、人間水利用を含む地球水循環を統合的に解析できる H08 の強みを生かして水リスクの要因分析を行い、水リスク増減の要因を定量的に示す。ウェブインターフェースを 2021 年 2 月末までに開発し、指標と要因分析結果を視覚的にも分かりやすく表示する。研究期間中に企業やリスクコンサルティング業界のニーズと動向の調査も行い、設計・仕様に反映する。

6. 引用文献

- Assani, A. A., Stichelboud, É., Roy, A. G. & Petit, F. (2006) Comparison of impacts of dams on the annual maximum flow characteristics in three regulated hydrologic regimes in Québec (Canada). *Hydrological Processes* 20, 3485–3501.
- Center for International Earth Science Information Network - CIESIN - Columbia University. Gridded Population of the World, Version 4 (GPWv4) (2018) Basic Demographic Characteristics, Revision 11.
- Hanasaki, N., Yoshikawa, S., Pokhrel, Y. & Kanae, S. (2018) A global hydrological simulation to specify the sources of water used by humans. *Hydrology and Earth System Sciences* 22, 789–817.
- Iizumi, T., Yokozawa, M., Sakurai, G., Travasso, M. I., Romanenkov, V., Oettli, P., et al. (2014). Historical changes in global yields: major cereal and legume crops from 1982 to 2006. *Global Ecology and Biogeography*, 23(3), 346–357.
- Iizumi, T., & Sakai, T. (2020). The global dataset of historical yields for major crops 1981–2016. *Scientific Data*, 7(1), 97.
- Kim, W., Iizumi, T., & Nishimori, M. (2019). Global Patterns of Crop Production Losses Associated with Droughts from 1983 to 2009. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 58(6), 1233–1244.
- Lange, S. (2019) Trend-preserving bias adjustment and statistical downscaling with ISIMIP3BASD (v1.0). *Geoscientific Model Development* 12, 3055–3070.
- Lehner, B., Verdin, K. & Jarvis, A. (2008) New global hydrography derived from spaceborne elevation data. *Eos, Transactions, American Geophysical Union* 89, 93–94.
- Masaki, Y., Hanasaki, N., Takahashi, K. & Hijioka, Y. (2018) Consequences of implementing a reservoir operation algorithm in a global hydrological model under multiple meteorological forcing. *Hydrological Sciences Journal* 63, 1047–1061.
- Sacks, W., Deryng, D., Foley, J. & Ramankutty, N. (2010). Crop planting dates: an analysis of global patterns, *Global Ecology Biogeography*, 19(5), 607–620.
- Weedon, G. P., Balsamo, G., Bellouin, N., Gomes, S., Best, M. J., & Viterbo, P. (2014). The WFDEI meteorological forcing data set: WATCH Forcing Data methodology applied to ERA-Interim reanalysis data. *Water Resources Research*, 50(9), 7505–7514.
- Yamazaki, D., Kanae, S., Kim, H. & Oki, T. (2011) A physically based description of floodplain inundation dynamics in a global river routing model. *Water Resources Research* 47.
- Zhao, G., Bates, P. & Neal, J. (2020) The Impact of Dams on Design Floods in the Conterminous US. *Water Resources Research* 56, e2019WR025380.

Ⅱ－２ 全球水資源モデルのパラメータ同定のための全球河川流量解析に関する研究

国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構
農村工学研究部門地域資源工学研究領域 吉田 武郎

〔要旨〕

公開型世界水リスク評価ツールを広く公開するにあたり、全球水資源モデル H08 の流量予測精度を高める必要がある。サブテーマ 2 では、世界の河川流量観測データの大規模な解析を行い、流量観測の得られない地域も含めて H08 モデルのパラメータ推定を実施した。この研究では、気候特性が水文モデルの地域化に卓越した影響を持つことを前提に、類似した気候特性の流域群に共通する代表的なパラメータセットを得ることを目的とした。まず、H08 のモデル計算から抽出したパラメータの事後分布から、類似する気候帯に属する流域群の代表性を担保したロバストなパラメータ推定手法を検討した。次に、気候区分で得られた代表パラメータによる計算値を、全球一様で同定したパラメータおよび H08 のデフォルトパラメータによる計算値と比較し、その優位性を確認した。最後に、気候区分ごとに得られたパラメータの不確実性やその物理的な解釈について考察し、手法の評価をした。その結果、代表性を担保したロバストなパラメータ決定手法として、NSE の上位 5% で採択したパラメータの事後分布から、中央値を選択する手法を提案した。流域ごとに単一の最適値を選択するのではなく、パラメータ群を扱うことにより、パラメータの感度および不確実性の評価を可能とした。気候区分ごとに同定したパラメータにより、デフォルト・全球一律で設定したパラメータより流量の予測精度は大きく上昇し、全球の 30.1% の流域で $NSE > 0.5$ 、61.7% の流域で $NSE > 0.0$ の結果が得られた。さらに、気候区分ごとに得られたパラメータの差違は、水文循環に関するこれまでの物理的な解釈とも整合しており、未観測流域に適用際の確度を高める結果が得られた。

1. 研究開発目的

全球水文モデルは、地球の水循環と水資源を分析するための不可欠なツールである。これまで全球水文モデルの開発・利用に多くの努力がなされ、その適用例は水資源に対する気候変動の影響評価、環境フットプリント分析、および渇水の分析がなど多岐にわたる。一方で、多くの全球水文モデルではパラメータの同定が行われないうか不十分な状態であり、重要な出力変数である河川流量の不確実性が大きいことが指摘されている。全球水文モデルのパラメータ同定で大きな困難として、以下二つがあげられる。1) 多数の計算を全球規模で行うことによる膨大な計算負荷、2) 観測された河川流量がない流域でのパラメータ推定。観測データのある流域は陸域の 50% しかカバーしておらず、特に後者の解決が必要とされる。

全球水文モデルのパラメータの同定および地域化の取組は、過去 20 年ほど様々な研究が行われてきた。Nijssen et al. (2001)は全球水文モデル VIC を開発し、9 流域において手動で 6 つのパラメータを最適化した。次いで、最適化したパラメータを気候特性が類似する他の流域に適用し、精度向上を確認している。Döll et al. (2003)は、724 流域のパラメータを手動で設定し、気温、水域の面積、河川の長さを説明変数とする回帰分析によって、未観測流域へのパラメータ適用を行った。また、Widen-Nilson et al. (2007)は WASMOD-M で 1680 のパラメータセットを作成し、観測流域ごとに最適なパラメータの組み合わせを決定した。さらに、未観測流域では、近傍の観測流域で決定されたパラメータを用いて計算している。

より近年では、全球での水文データベースの整備が進んだことや、計算資源が増強されたことにより、多数の流域でのパラメータの最適化を行う研究が増えている。Burek et al (2020)は、CWatM による 1366 流域ごとのパラメータ最適化を行って、それぞれの地点は高い精度で河川流量を計算できることを示している。新たな全球水文データセットの開発により、例えば GSIM では 35, 000 地点以上の流量データやメタデータが整備されている (Do et al., 2018)。ただし、その領域は北米やヨーロッパ、限られた地域 (日本、オーストラリア、ブラジル等) に限られており、アジアやアフリカに大きな空間ギャップがある。そのため、未観測流域のパラメータ同定という本質的な問題は解決されていない。

未観測流域における水文パラメータの推定は「地域化」と呼ばれ、主に 3 つの手法に分けられる (Wagener and Montanari, 2011) : 1) 複数の流域ごとにパラメータを最適化し、単一のパラメータ値と流域特性 (気象因子、地理/地形特性) との回帰分析により両者の関係を示す関数を推定する方法、2) 流域の特性に関する既存の知見・関係性のみを参照する方法、3) 流域の流出をある精度以上で再現する複数のパラメータセットを採択し、その不確実性も含めて他の流域のパラメータを推定する方法。

第一の取組については、全球水文データの整備や近年の機械学習の進展に伴い、活発な研究が行われている。Beck et al. (2016) は、世界各地の 10,000km² 以下の 1787 流域を 674 のドナー流域と 1113 の検証流域に分け、ドナー流域で最適化した水文モデル HBV のパラメータを気候・流域特性の類似性に基づいて全球に展開し、0.5 度スケールのパラメータマップを作成した。その結果、気候特性が流域特性より卓越した影響を水文的挙動に対して持つことが示された。Beck et al. (2020)はさらに、全球 5000km² 以下の 4900 流域においても同様の検討を行っている。流域の水文的な振る舞いを BFI 等の水文指標で数値化し、それらを流域間の類似性の分析に使う研究も進められ、全米の 600 以上の流域で得られた水文指標の分類を行からは、Beck らの研究と同様、気候特性の影響が強いことが確認されている (Addor et al, 2017)。ただし、比較的小規模の流域への適用にとどまっており、全球水文モデルで扱う大流域へのアップスケールの課題は残されている。

地域化の第二のアプローチに基づき、Wang et al. (2021)は、衛星画像や全球で整備された地理・地形データと既存の文献等を参照して全球水文モデル FLEX のパラメータを設定し、予測精度の検証を行っている。ただし、このアプローチではパラメータの感度分析ができないこと、クラス間の非連続性があること、スケール依存があるため地点・流域で特定された既存の関数をアップスケール

ルすることの危険性が指摘されている (Samaniego et al., 2017)。

第一のアプローチに内在する課題として、最適化されるパラメータ値のもつ不確実性がある。水文モデルの最適化では、入力データ・観測データの誤差、水文過程やモデル構造に関する誤まった認識、パラメータの相互作用により、同程度により計算結果を生む複数のパラメータの組み合わせが得られる (equifinality: Beven, 2006)。そのため、最適化された単一のパラメータ値を地域化に用いることにより不確実性が拡大し、しばしば結論をミスリードする。Beck et al. 2016 はこれを回避するため、10 回のクロスバリデーションを行っている。

地域化の第三のアプローチでは、equifinality に起因するパラメータの不確実性を考慮するため、まず、水文モデルの良好な結果を生み出す複数のパラメータセットを抽出し、パラメータの事後分布を得る。次いで、流域特性とパラメータの事後分布の関係を利用して、類似流域のパラメータ推定を行う。この第 2 段階では、Buyaert and Beven (2009) がを想定した線形関数を皮切りに、遺伝的プログラミング (Athira et al., 2016) や経験的ベイズ (Smith et al., 2014) などの手法が様々な研究がなされているものの、一般的な手法は確立されていない。また、扱われる対象流域数はこれまで数流域に限定され、全球水文モデルには適用されていない。

本研究では、複数のパラメータセットによる不確実性を考慮した第三のアプローチを基に、全球水資源モデル H08 のパラメータ地域化を行う。ただし、データ・モデル構造に関する不確実性が大きい全球水文モデルを対象とすることと、数百の流域の地域化を対象とすることを考慮し、類似流域の推定手法を以下の通りやや単純に扱う。すなわち、気候特性が水文モデルの地域化に卓越した影響を持つことを前提に、類似した気候特性の流域群に共通する代表的なパラメータセットを得ることを目的とする。そのために、まず、H08 のモデル計算から抽出したパラメータの事後分布から、類似する気候帯に属する流域群の代表性を担保したロバストなパラメータ推定手法を検討する。次に、気候区分で得られた代表パラメータによる計算値を、全球一様で同定したパラメータおよび H08 のデフォルトパラメータによる計算値と比較し、その優位性を確認する。最後に、気候区分ごとに得られたパラメータの不確実性やその物理的な解釈について考察し、手法の評価を行う。

2. 研究目標

全球水資源モデル H08 の河川流量の推定精度を飛躍的に高めるため、全球河川流量の解析を行う。まず、これまでに蓄積した世界の河川流量観測データを解析し、各地域の流出特性を明らかにする。次に、流出特性を地形・地質に関連付けすることで、観測流量が得られない地域の特性についても推定する。得られた情報をもとに全球水資源モデル H08 のパラメータ同定を実施し、水リスク評価の精度向上に不可欠な全球河川流量の再現性を上記目標値に到達させることを図る。

3. 研究開発内容

3. 1 H08 の計算

気象データには、全球気象データ WATCH Forcing Data (WFD; Weeden et al., 2014) を用いた。WFD は 1901 年から 2001 年の陸域の日気象データからなり、H08 を駆動する気温、比湿、風速、地上面気圧、下向短波放射、下向長波放射、降水量を含む。

H08 の検証に用いたのは、世界河川流量データセンター (Global Runoff Data Center; GRDC) による観測月流量データである。まず、月流量が入手できる 3045 地点のうち、1) 流域面積 10,000km² 以上、2) 1961-1970 年で欠測がないという条件で 777 地点を抽出した。次に、GRDC の全観測地点を全球デジタル河道網上に配置した、公称の緯度経度に該当するグリッドを起点に河道網に沿って上流を探索して流域面積を得た他、隣接する 8 格子を起点として同様に上流探索を行い、流域面積を算出した。これらの 9 グリッドで算出した流域面積を公称値と比較し、両者の差が最も小さくなるグリッドを河道網上の観測点として採択した。

Hanasaki et al., (2018)のパラメータ設定、境界条件に従って H08 の計算を行った。ただし、水利用モデルに起因する不確実性が入ることを防ぐため、貯水池運用、取水両モジュールを考慮しない自然状態での計算を行った。

3. 2 パラメータの同定方法

本研究では、ケッペンの気候区分に基づき、気候が類似する流域をグループ化する。まず、WFDの気温、降水量に基づいて 0.5 度スケールの各グリッドの気候区分をした。次いで、流域内で最もグリッド数の多い気候区分を流域の代表気候区分として割り当てた（表 2-1）。

表 2-1 ケッペン気候区分ごとの流域数

気候区分	略称	流域数
熱帯雨林	Af	3
熱帯モンスーン	Am	4
熱帯サバンナ	Aw	61
砂漠	BW	17
ステップ	BS	6
温帯（夏季高温）	Ca	99
温帯（夏季低温）	Cb	129
亜寒帯（夏季高温）	Da	18
亜寒帯（夏季低温）	Db	164
亜北極	Dc	262
ツンドラ	ET	14
合計		777

これまでの研究により確認された、月単位流量の再現に最も感度の高い H08 の 4 つのパラメータ（土壌の深さを表す SD、蒸発効率を表す CD、地中流出を調整する γ と τ ）を対象に、各気候区分の代表パラメータ値（気候に基づくパラメータ）を以下のアルゴリズムで推定する：

1. 4 つのパラメータを物理的に説明可能な範囲内（表 2-2）で設定した事前分布から N 通りランダムに発生させ、全球一様にそれらのパラメータを割り当てた計算を行う
2. 観測・計算流量を利用し、再現性指標として Nash Sutcliffe Efficiency (NSE; Nash and Sutcliffe, 1970) をパラメータごとに算出する。
3. 各気候区分に含まれる M 流域に対する N サンプルを母集団としてみなし、NSE 値が上位 X パーセンタイル以上となるパラメータの組み合わせを採択する。
4. 気候区分ごとにこの手順を繰り返す。

本研究では計算負荷の都合上、N を 5000 と設定した。

表 2-2 対象のパラメータと探索幅・デフォルト値

パラメータ	探索幅	デフォルト値
土壌深さ (SD)	0.05–4.0	1.0
バルク輸送係数 (C_D)	0.001–0.012	0.003
地下水流出の形状定数 (γ)	1–4	1–2
地下流出の時定数 (τ)	10–400	50–300

この方法により、パラメータの相互作用等や不確実性を考慮した事後分布が得られる。この事後分布から、気候区分ごとの水文特性の違いを反映し（代表性）、かつ気候区分内の多くの流域で満足のいく（頑健性）結果が得られるパラメータの組み合わせを選定する。ここで、代表性と頑健性には以下のトレードオフの関係があると考えられる。すなわち、上記アルゴリズムの手順 3 で採択す

るパラメータセットの閾値を高くすれば、採択される流域数が少なくなり、全体の流域を代表する結果が得られづらい。逆に、閾値を低くすれば事後分布は事前分布（一様分布）に近づき、絞り込みが十分行えない。また、事後分布のどの統計値（最頻値、平均値、中央値）をパラメータ値として選択するかによっても結果は異なると考えられる。そのため、流域に 50 以上の流域が含まれる 5 気候区分（Aw、Ca、Cb、Db、Dc）を対象に、サンプル分割テストを行って最適な閾値、統計値の組み合わせを決定した。まず、流域をランダムに二つの同定・検証グループに分け、同定グループにおいて 1~4 の手順を実施し、採択率を 5 通り（上位 0.1%、1%、5%、10%、20%）、統計値を 3 通り（平均値、中央値、最頻値）とした 15 通りの組み合わせでパラメータを同定する。次に、同定したパラメータを検証グループの流域に適用し NSE を算定する。この手順を各気候区分で 100 回繰り返す。

4. 結果及び考察

4. 1 気候区分ごとのパラメータ同定

4. 1. 1 最適な推定手法の検討

100 回のサンプル分割テストの結果を示す（図 2-1）。実施した全ての気候区分において、最頻値を用いた場合には検証グループで算定された NSE 値のばらつきが大きくなった。この傾向は特に気候区分 Dc で大きかった。平均値と中央値による違いは気候区分ごとによって異なり、明確な傾向は見られない。Dc を除いた 4 気候区分での総計から、採択率を 5% の事後分布の中央値を採択した場合に期待される NSE の中央値が最も高かった。以下では上述の条件で気候区分のパラメータ値を推定する。

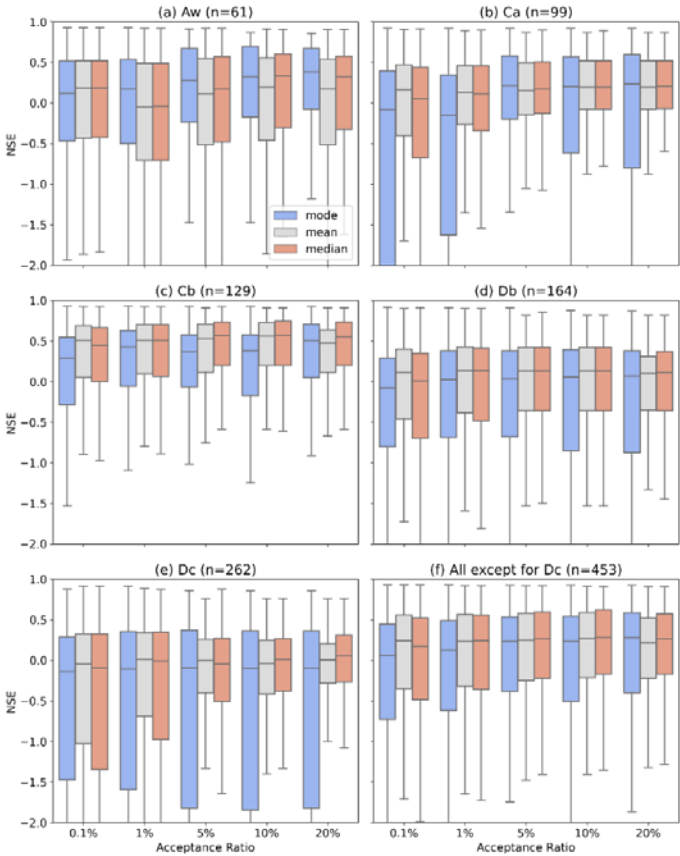


図 2-1 100 回の split-sampling テストによる NSE 値の比較。同定グループで得られたパラメータセットを、検証グループに適用して得られた NSE 値の中央値および変動幅を示す。

デフォルトパラメータで計算した NSE から、気候区分ごとのパラメータによる NSE への変化を 3 つの気候区分 (Aw、Cb、Dc) で示す (図 2-2)。気候区分 Aw では全ての流域においてデフォルトパラメータからの改善がみられた。さらに、気候区分に基づくパラメータは、全球一律で推定したパラメータと比較しても全流域で良い結果を示した。気候区分 Cb では 129 流域のうち 107 流域でデフォルトからの改善がみられた。全球一律と気候区分ごとのパラメータ値は同じものが選択され、両者に違いはなかった。一方で気候区分 Dc では、NSE 値が低下する流域が多い結果が得られた。

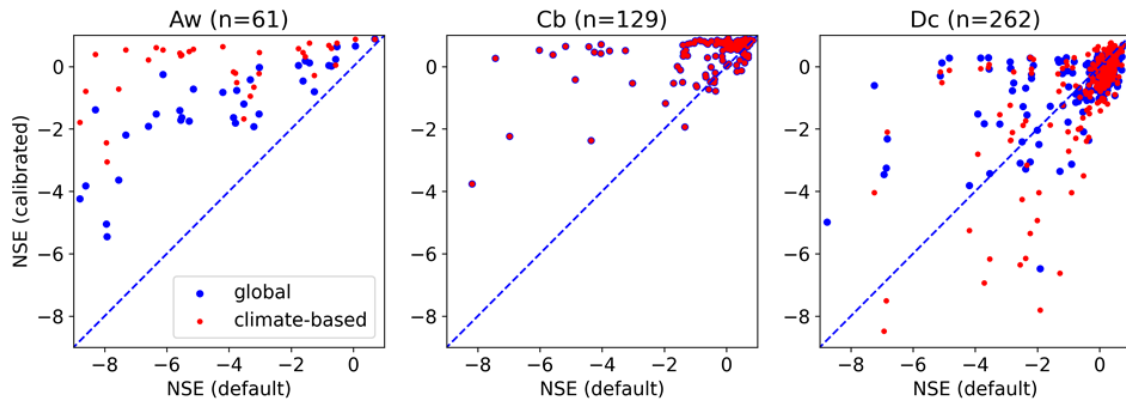


図 2-2 気候ベースのパラメータおよびデフォルトパラメータによる NSE 値の比較

4. 1. 2 気候区分 Dc の検討

気候区分 Dc で予測精度が低い原因は、抽出されたパラメータの事後分布および個別流域の最適値 (図 2-3、2-4) から推察でき、以下に示す手順で改称した。図 3、4 は気候区分 Cb および Dc における 4 つのパラメータの事後分布を 2 次元のプロットで表現したものである。気候区分の代表値による改善が大きかった気候区分 Cb で抽出した事後分布は、 $SD-C_b$ (図 3(a))、 $SD-\gamma$ (b)、 $C_b-\gamma$ (d) が比較的良く収束している。一方、気候区分 Dc では、個別流域の最適値および事後分布ともに複数の領域に分かれている。

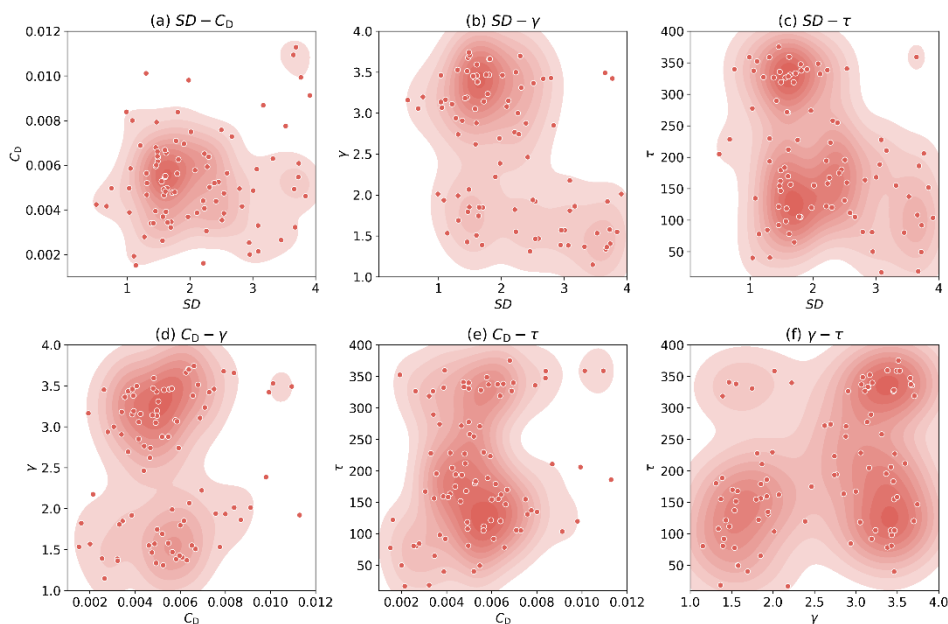


図 2-3 気候区分 Cb で得られた事後分布と流域ごとのパラメータ最適値

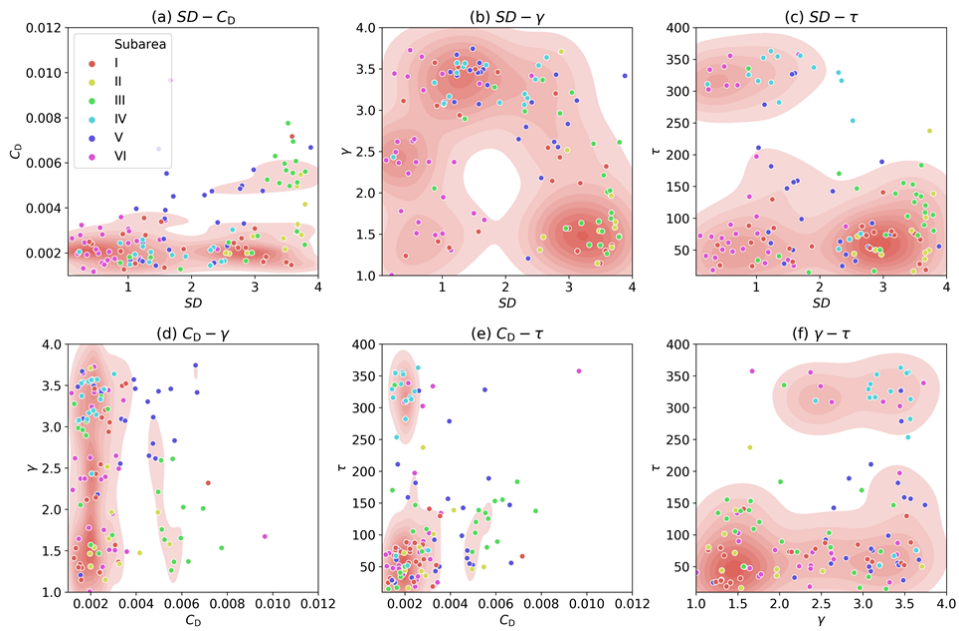


図 2-4 気候区分 Dc で得られた事後分布と流域ごとのパラメータ最適値

ただし、個別流域の最適値の空間的分布を調べると、地域ごとのまとまりが観察された。そこで、図 2-5 に示すように経度によって 6 区分に分割し、それぞれでパラメータを定めると予測精度が高まった (図 2-6)。

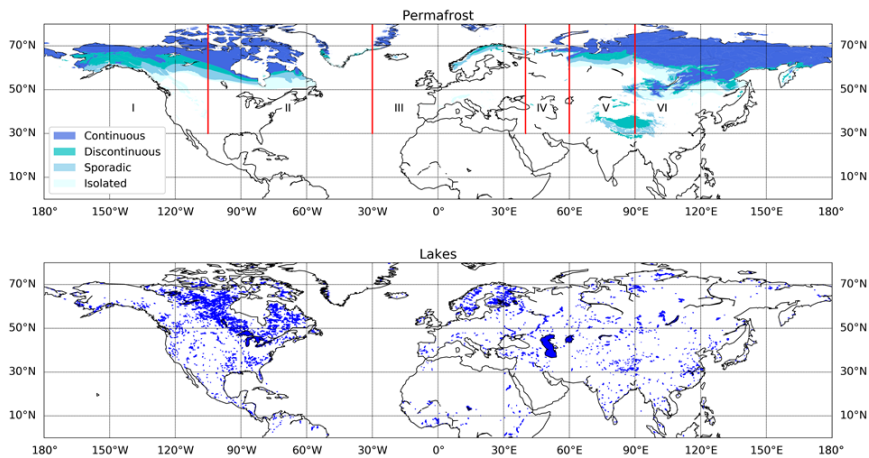


図 2-5 気候区分 Dc の 6 つの細分化された区間と永久凍土、湖沼の分布

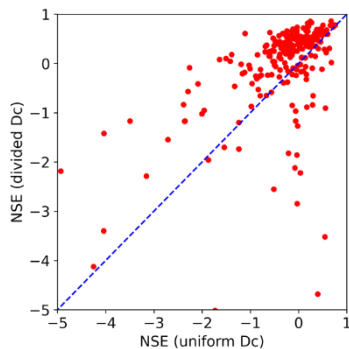


図 2-6 気候区分 Dc の一律パラメータと分割して設定したパラメータによる NSE

Dc の細分化に関して、なぜ 6 つなのか、これが最適な地域の分け方なのか、という点はさらなる研究が必要で、現時点ではこれがベストと考えるしかない。ただし、Dc の中で比較的降水量が多いアラスカ（細分地域Ⅰ）やスカンジナビア（Ⅲ）では、貯留量（SD）が大きく、降雨後の流出逓減が緩やか（ γ が小さい）であることや、一方、降水量が少なく、永久凍土の分布が多いシベリア（細分地域Ⅵ）は、貯留量が小さく、逓減が早い（ γ が大きい）ことは、物理的な解釈と整合する。カナダの中央平原（細分地域Ⅱ）は、細分化しても改善効果が小さいが、湖沼が多く分布しており、河川流量の変化が平滑化されたことがその要因として考えられる。

気候区分 Dc の結果は、気候だけが唯一の要因ではないことを意味し、さらなる検討の余地が残されているものの、サンプル分割テストを行った 5 気候区分のうち 4 気候区分で気候区分ごとに定めた水文特性（パラメータ値）がよい結果を生むことは、これまでに多くの研究で示唆された気候特性のパラメータ値との強い関係が、全球水文モデル H08 のパラメータにおいても成り立つことを確認できた。

4. 2 流量のパフォーマンス

4. 2. 1 NSE 値にみる改善

サンプル分割テストで確認した最適解の決定手法を全ての気候区分に適応して気候区分ごとのパラメータを求め、それにより全流域で得られた NSE を図 2-7 に示す。気候区分 ET を除く全ての気候区分で NSE の中央値はデフォルトパラメータによる NSE から上昇した。全流域のうち、NSE 値が 0.5 以上の「良い」結果は 30.1%、0.0 以上の「満足できる」結果は 61.7%の流域で得られた。

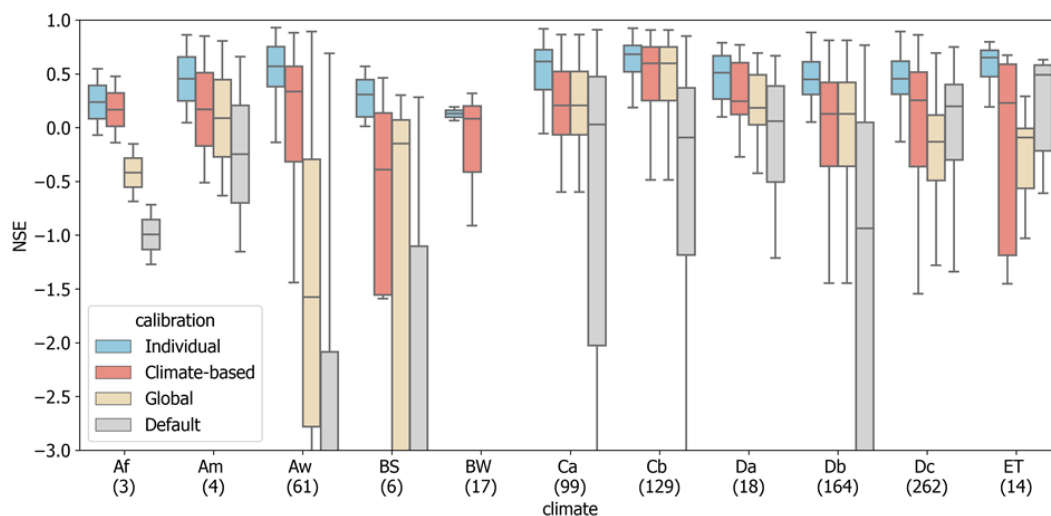


図 2-7 流域個別・気候区分ごと・全球一律・デフォルトパラメータによる NSE 値の比較

全球一律で同定したパラメータと比較して、気候区分ごとに同定したパラメータの優位性は Af、Aw、BS、BW、Dc、ET で確認できる。これは、この手法により気候区分の水文特性を十分に反映した代表性が高いパラメータが同定できたことを示す。気候区分 Ca、Cb、Db のパラメータは、全球一律で同定したパラメータと同じ組み合わせが選択された。これは、NSE 値が比較的高く、これらの気候区分から多数の流域が事後分布として抽出されたことや、3 気候区分の流域数が 392 と多いことが影響したためと考えられる。

4. 2. 2 流量の再現結果

図 2-8 に気候区分 Aw および Dc のそれぞれ 2 流域での河川流量の再現結果を示す。Aw の 2 流

域（図 2-8(a, b)）では洪水時の流量ピークがデフォルト値での計算結果から下がる変化を示した。一方で、Db の 2 流域 (c, d) では洪水ピークが上昇する変化を示し、方向に流量が変化し、どちらも観測値との適合度が高まっている。それぞれの流域の NSE 値は以下のように変化した：(a)-5.58 から 0.43、(b) -8.30 から 0.39、(c): 0.35 から 0.81; (d): 0.07 から 0.66 であり、どの流域でも顕著な予測精度の向上が数値的にも示された。

一方、図 2-9 には改善の効果が限定的な流域の例を示す。図 2-9 (a) は、NSE 値はデフォルトパラメータの-288.0 から気候区分ごとのパラメータでの-30.5 へと上昇したものの、観測流量と計算流量の低水部に恒常的なバイアスが大きく残る。また、図 2-9 (b) では観測流量が極端に平滑化され、計算値の変化と整合しないこと (NSE 値は-52.0 から-21.0)、図 2-9 (c) では不規則な流量の変動を計算値が十分に捉えていないこと (NSE 値は-33.4 から-2.34) を示す。図 2-9 (d) では、視覚的には改善の効果が大きく認められるものの、気候区分ごとのパラメータによる NSE 値は-0.10 にとどまっている (デフォルトパラメータでは-14.1)。

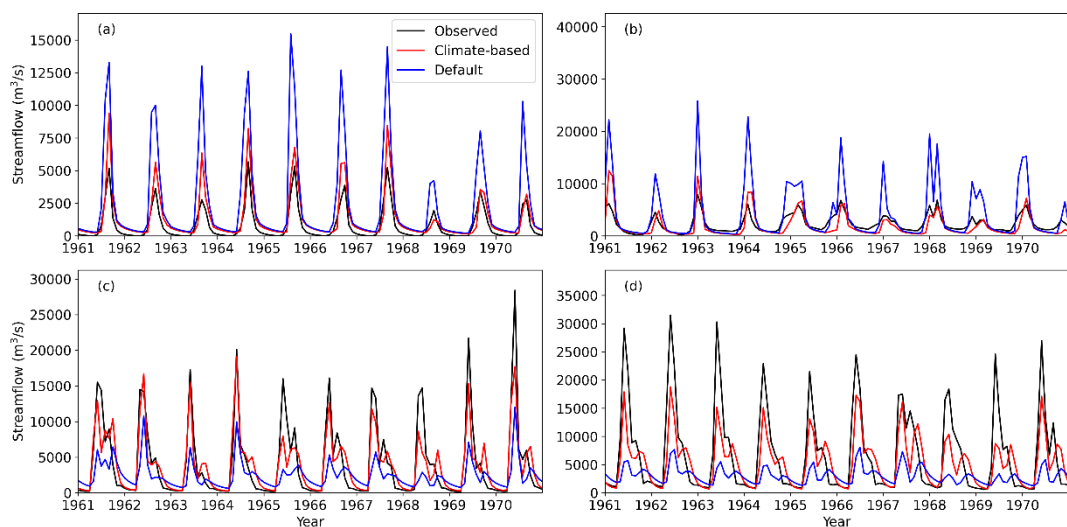


図 2-8 河川流量の再現性の例 (a) Bakel, Senegal River (Aw), (b) Morpana, Sao Francisco River (Aw); (c) Ohotsky Perevoz, Aldan River (Dc); (d) Tabaga, Lena River (Dc)

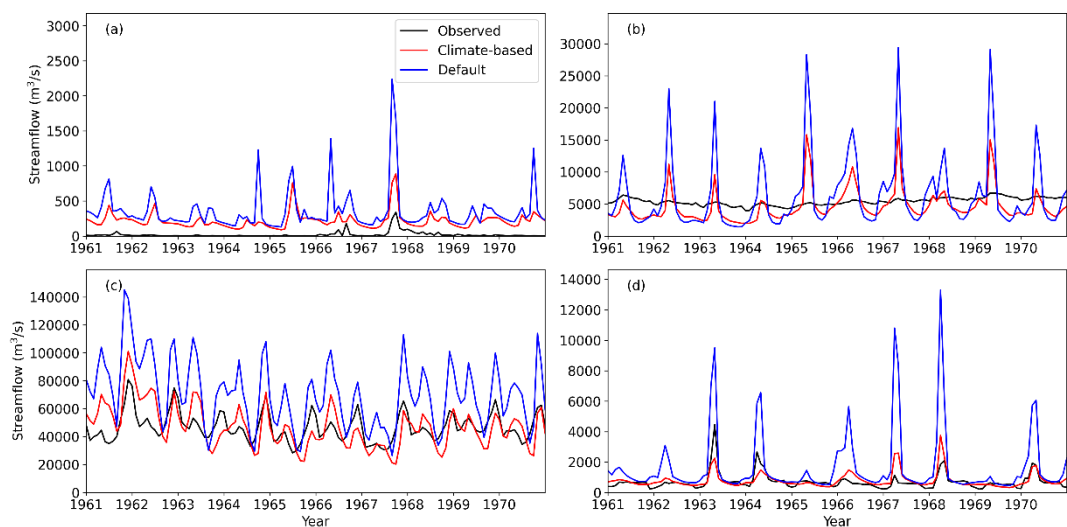


図 2-9 河川流量の再現例 (a) Matamoros, Rio Grande River (BS); (b) Queenston, Niagara River (Db); (c) Kinshasa, Congo River (Aw); (d) Razdorskaya, Don River (Db)

図 2-9 のそれぞれの結果は、本研究により残されている問題を指摘する。図 2-9(a)の観測地点の上流域には、総計 30,173 百万 m^3 の有効貯水量を持つダム群、年間 14,062 百万 m^3 の取水がある。本研究では自然状態での計算を行ったため、このような予測精度になったと考えられるが、本来 H08 は人間活動を考慮した水循環計算が行えるので、その状態で確認する必要がある。図 2-9 (b, c) は湖沼（ナイアガラ湖）や湿地（コンゴ盆地）の影響が大きいと考えられ、H08 では考慮していない湖沼や湿地のモデル化やパラメータリゼーションの研究の重要性を指摘している。図 2-9 (d) の結果は、NSE のみを目的関数としてキャリブレーションに利用したことに起因する。NSE は流量の標準偏差（変動幅）に対する誤差の関係を示し、洪水流量とそのタイミングの影響が大きいこと、流量の変動自体が小さい河川ではスコアが低くなることが知られる。図 9(d)で示された流域で、バイアス、相関係数、変動係数の 3 要素の誤差を平均化した KGE により評価すると、0.57 という高い値であった。このように、考慮されていない水循環過程に加え、洪水流量に着目してパラメータ同定が行われたことに注意する必要がある。

多面的な要約統計量に着目した KGE を目的関数として用いることにより、上述のモデルやデータの診断をより明示的に行える。気候区分で同定したパラメータによる計算流量で評価した KGE 値およびそれを構成するバイアス、相関係数、変動係数それぞれの誤差の寄与度を示す（図 2-10）。三者の寄与度は、全地点の中央値はそれぞれ 0.30、0.27、0.30 であり、ほとんど違いはない。ただし、気候区分ごとにみると、乾燥帯、熱帯ではバイアス誤差が最も高く（Am: 0.79, Aw: 0.47, BS: 0.92, BW: 0.76）、NSE の値が低い原因にも、これらの地域での降水量データの誤差の影響した可能性を示唆する。さらに、複数の要約統計量を用いて事後分布の推定する近似ベイズ計算等（Fenicia et al., 2018; Kavetski et al., 2018）により、着目する要約統計量に応じたモデルの診断（Sadegh and Vrugt, 2013）に発展させることができる。

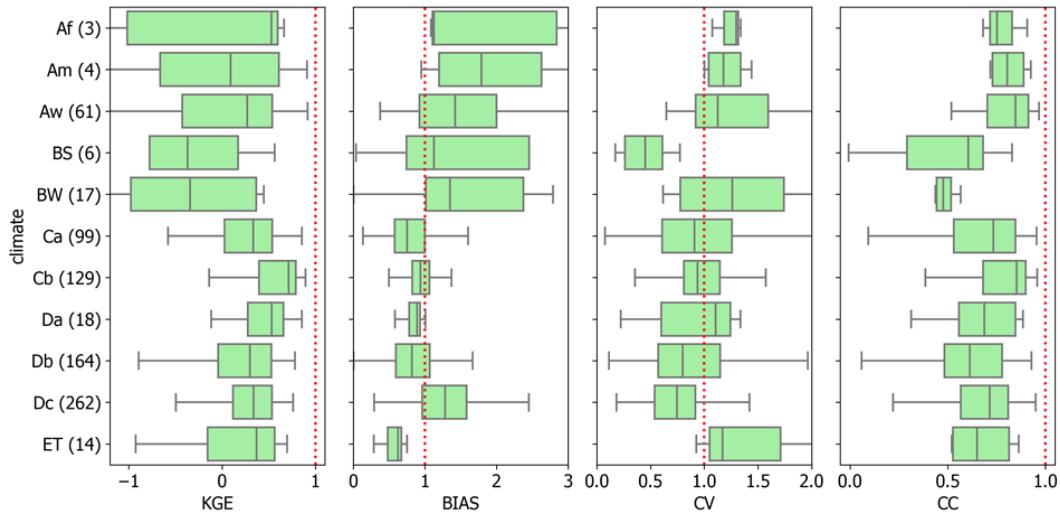


図 2-10 気候区分のパラメタによる KGE およびその構成成分の寄与率。赤線は最適値

4. 3 パラメータの検証

気候区分ごとのパラメータを図 2-11 の赤丸で示す。極端に流域数が少ない気候区分 (Af, Am, BS) を除き、気候区分ごとのパラメータは個別流域の最適値（同図中の青い箱ひげ図）の中央値付近にプロットされており、各気候区分の代表性を担保していることが確認できる。Dc は前述のように 6 地域に分けた値が示され、SD および γ の地域差が大きいことが分かる。

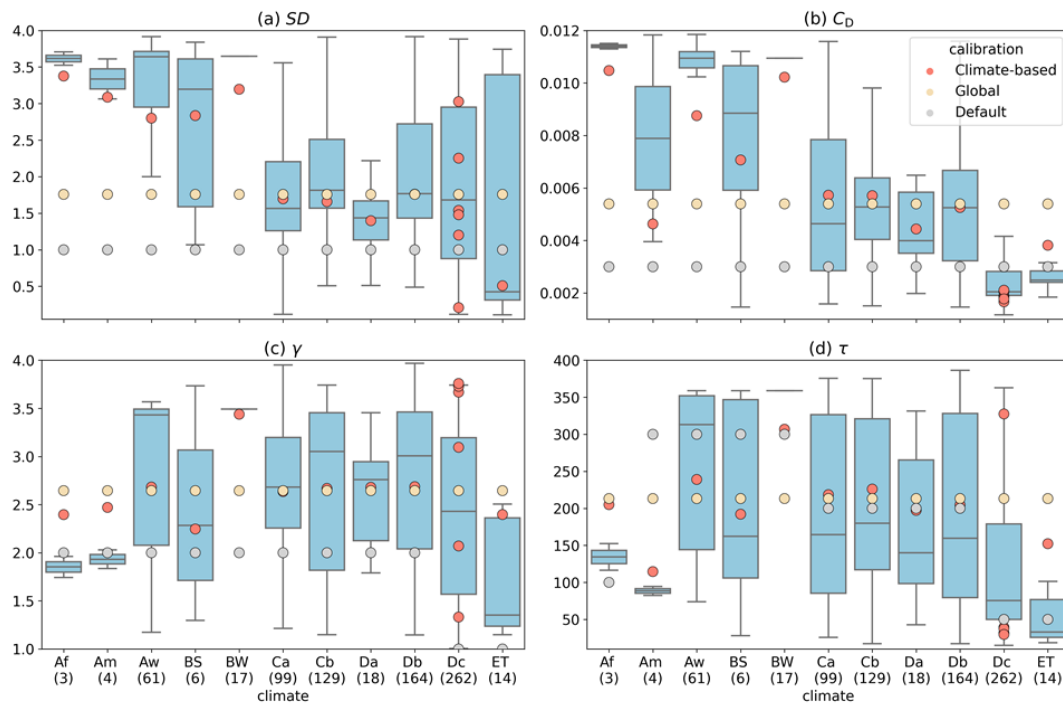


図 2-11 気候区分ごとのパラメータとデフォルト・全球一律・流域個別のパラメータの比較

全体を見ると、気候区分のパラメータの感度が高く、不確実性が小さかったパラメータ SD と C_b は、熱帯から寒帯にかけて減少傾向にあることが示された。この違いは、高温湿潤地帯において冷涼乾燥地帯より土壌が発達することを反映したという、直感的な解釈と整合する。ただし本研究で示した SD は地中貯留量の総量を示すもので、土壌層だけでなく、深い基盤岩にも及ぶ。Milly (1994) は、北米大陸の河川流域において、長期間の水収支に地中貯留量が重要な役割を果たしていること、またそれが気候との相互作用により発達している事を示した。本研究で示された流量応答に対する SD の感度の高さ、およびその気候特性との関係はこの研究と整合する結果が世界の大河川でも成り立つことを強く示す根拠となる。

また、 C_b が同様に熱帯から寒帯にかけて減少傾向にあることも、 SD と同様、物理的に解釈できる。これは、古くから陸面過程モデルで行われている、植生に基づいたパラメータリゼーションを反映したものと考えられる。ただし、本研究では陸面過程モデルの規定値・文献値を参照することなく、複数の植生が存在する大流域での値を示せたことを強調したい。

γ と τ は感度が低く、気候区分との明確な関係は見いだせなかった。これは、 γ と τ が気候との関連性が低いということを意味するのみで、H08 のこれまでの地域研究例ではこれらのパラメータの重要性が指摘されている。流域個別の最適値や事後分布を調べると、いくつかのクラスターがあることも示される（例えば図 2-3(f)）。気候代表値とこうしたクラスター間にあるギャップを気候以外の要因を含めて追求することが、さらなる予測精度の向上に繋がると考えられる。

4. 4 考察

この論文は、全球水文モデルの枠組みを用いてパラメータの地域化を行い、未観測流域でのパラメータの同定可能性や不確実性の評価を目指した最初の試みである。代表性を担保したロバストなパラメータ決定手法として、NSE の上位 5% で採択したパラメータの事後分布から、中央値を選択する手法を提案した。流域ごとに単一の最適値を選択するのではなく、パラメータ群を扱うことにより、パラメータの感度および不確実性の評価を可能とした。気候区分ごとに同定したパラメータにより、デフォルト・全球一律で設定したパラメータより流量の予測精度は大きく上昇し、全球の 30.1% の流域で $NSE > 0.5$ 、61.7% の流域で $NSE > 0.0$ の結果が得られた。さらに、気候区分ごとに

得られたパラメータの差違は、水文循環に関するこれまでの物理的な解釈とも整合しており、未観測流域に適用際の確度を高める結果が得られた。

5. 研究目標の達成状況

サブテーマの目標を完全に達成した。

全球水資源モデル H08 の河川流量の推定精度を飛躍的に高めるため、全球河川流量の解析を行った。まず、これまでに蓄積した世界の河川流量観測データを解析し、各地域の流出特性を明らかにした（紙面の都合上、中間報告書にのみ掲載）。次に、流出特性を地形・地質に関連付けすることで、観測流量が得られない地域の特性についても推定する技術を確立した（3. 1 と 4. 1）。得られた情報をもとに全球水資源モデル H08 のパラメータ同定を実施し、水リスク評価の精度向上に不可欠な全球河川流量の再現性向上を達成した（4. 2 と 4. 3）。

6. 引用文献

- Addor, N., Nearing, G., Prieto, C., Newman, A. J., Le Vine, N., & Clark, M. P. (2018), A ranking of hydrological signatures based on their predictability in space. *Water Resources Research*, 54(11), 8792-8812.
- Athira, P., Sudheer, K. P., Cibilin, R. & Chaubey, I. Predictions in ungauged basins: an approach for regionalization of hydrological models considering the probability distribution of model parameters. *Stoch Env Res Risk A* 30, 1131–1149 (2016).
- Burek, P. et al. Development of the Community Water Model (CWatM v1.04) – a high-resolution hydrological model for global and regional assessment of integrated water resources management. *Geosci Model Dev* 13, 3267–3298 (2020).
- Buytaert, W. & Beven, K. Regionalization as a learning process. *Water Resour Res* 45, (2009).
- Do, H. X., Gudmundsson, L., Leonard, M., & Westra, S. (2018). The Global Streamflow Indices and Metadata Archive (GSIM) – Part 1: The production of a daily streamflow archive and metadata. *Earth System Science Data*, 10(2), 765–785.
- Döll, P., Kaspar, F., & Lehner, B. (2003), A global hydrological model for deriving water availability indicators: model tuning and validation, *J. Hydrol.*, 270(1–2), 105-134.
- Hanasaki, N., Yoshikawa, S., Pokhrel, Y., & Kanae, S (2018), A global hydrological simulation to specify the sources of water used by humans, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 22(1), 789-817, doi: 10.5194/hess-22-789-2018.
- Milly, P. C. D. (1994), Climate, soil water storage, and the average annual water balance. *Water Resources Research*, 30(7), 2143-2156.
- Nijssen, B., O'Donnell, G.M., Lettenmaier, D.P., Lohmann, D., & Wood, E.F. (2001), Predicting the discharge of global rivers, *J. Climate*, 14(15), 3307-3323.
- Sadegh, M., & Vrugt, J. A. (2013), Bridging the gap between GLUE and formal statistical approaches: approximate Bayesian computation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(12), 4831-4850.
- Wang, J., Gao, H., Liu, M., Ding, Y., Wang, Y., Zhao, F., & Xia, J. (2021). Parameter regionalization of the FLEX-Global hydrological model. *Science China Earth Sciences*, 1–18.
- Wagener, T., & Montanari, A. (2011). Convergence of approaches toward reducing uncertainty in predictions in ungauged basins. *Water Resources Research*, 47(6).
- Widén-Nilsson, E., Halldin, E., S., & Xu, C.-y. (2007), Global water-balance modelling with WASMOD-M: Parameter estimation and regionalisation, *J. Hydrol.*, 340(1), 105-118.

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) Hanasaki, N., S. Yoshikawa, Y. Pokhrel, and S. Kanae (2018), A Quantitative Investigation of the Thresholds for Two Conventional Water Scarcity Indicators Using a State-of-the-Art Global Hydrological Model With Human Activities, **Water Resources Research**, 54(10), 8279-8294. (IF 4.36)
- 2) Yokohata, T., K. Tanaka, K. Nishina, K., Takahashi, S. Emori, M. Kiguchi, Y. Iseri, Y. Honda, M. Okada, Y. Masaki, A. Yamamoto, M. Shigemitsu, M. Yoshimori, T. Sueyoshi, K. Iwase, N. Hanasaki, A. Ito, G. Sakurai, T. Iizumi, M. Nishimori, W. H. Lim, C. Miyazaki, A. Okamoto, S. Kanae, and T. Oki (2019), Visualizing the Interconnections Among Climate Risks, **Earth's Future**, 7(2), 85-100. (IF 4.59)
- 3) Lange S., J. Volkholz, T. Geiger, F. Zhao, I. Vega, T. Veldkamp, C. Reyer, L. Warszawski, V. Huber, J. Jägermeyr, J. Schewe, D.N. Bresch, M. Büchner, J. Chang, P. Ciais, M. Dury, K. Emanuel, C. Folberth, D. Gerten, S.N. Gosling, M. Grillakis, N.Hanasaki, A.-J. Henrot, T. Hickler, Y. Honda, A. Ito, N. Khabarov, A. Koutroulis, W.Liu, C. Müller, K. Nishina, S. Ostberg, S.H. Müller, S.I. Seneviratne, T. Stacke, J. Steinkamp, W. Thiery, Y. Wada, S. Willner, H. Yang, M. Yoshikawa, C. Yue, K. Frieler (2020), Projecting Exposure to Extreme Climate Impact Events Across Six Event Categories and Three Spatial Scales, **Earth's Future**, 8, e2020EF001616. 10.1029/2020EF001616 (IF 6.14)
- 4) Boulange, J., Hanasaki, N., Yamazaki, D., and Pokhrel, Y. (2021) Role of dams in reducing global flood exposure under climate change, **Nature Communications**, 12, 417 (IF 12.12)
- 5) Gudmundsson, L., Boulange, J., Do, H. X., Gosling, S. N., Grillakis, M. G., Koutroulis, A. G., Leonard, M., Liu, J., Müller Schmied, H., Papadimitriou, L., Pokhrel, Y., Seneviratne, S. I., Satoh, Y., Thiery, W., Westra, S., Zhang, X., and Zhao, F. (2021) Globally observed trends in mean and extreme river flow attributed to climate change, **Science**, 371, 1159-1162, 10.1126/science.aba3996 (IF 41.85)
- 6) Pokhrel, Y., Felfelani, F., Satoh, Y., Boulange, J., Burek, P., Gädeke, A., Gerten, D., Gosling, S. N., Grillakis, M., Gudmundsson, L., Hanasaki, N., Kim, H., Koutroulis, A., Liu, J., Papadimitriou, L., Schewe, J., Müller Schmied, H., Stacke, T., Telteu, C.-E., Thiery, W., Veldkamp, T., Zhao, F., and Wada, Y. (2021) Global terrestrial water storage and drought severity under climate change, **Nature Climate Change**, 11, 226-233, 10.1038/s41558-020-00972-w (IF 20.89)

【サブテーマ2】

特に記載すべき事項はない

<その他誌上発表（査読なし）>

特に記載すべき事項はない。

(2) 口頭発表 (学会等)

【サブテーマ 1】

- 1) M. Okada, Y. Hijioka: Impact of irrigation on crop yield gain under future change in water resources, AGU Fall Meeting 2018, 2018
- 2) 岡田将誌: 気候変動に伴う水資源変動が作物生産に及ぼす影響の広域モデリングに関する研究, 統合的陸域圏研究連絡会, 2018
- 3) 岡田将誌, 飯泉仁之直, 肱岡靖明: 灌漑による穀物生産の適応効果は気候変動が進行すると有効性が低下する, 日本農業気象学会 2019 年全国大会, 2019
- 4) Boulangue, J., and Hanasaki, N.: Coupling the H08 model to the CaMa-Flood model for explicit representation of dams in global flood inundation simulations, EGU General Assembly 2019, Vienna, Austria, 2019.
- 5) 花崎直太: 企業の適応策検討支援を目的とした世界水リスク評価ツールの開発: 近似ベイズ計算による全球水資源モデルのパラメータ同定、日本地球惑星科学連合 2019 年大会、幕張、2019
- 6) Boulangue, J. and Hanasaki, N.: Representation of dams in global flood inundation simulations by coupling the global hydrological model H08 and the global hydrodynamic model CaMa-Flood, JpGU Meeting 2019, Makuhari, Japan, 2019
- 7) 花崎直太、水逼迫指標の閾値は何を表すのか? 人間活動を考慮した全球水資源モデルを用いた 2 つの水逼迫指標の閾値に関する定量的考察、水文・水資源学会 2019 年研究発表会、千葉、2019 年 9 月
- 8) Boulangue, J. and Hanasaki, N.: A global flood risk analysis with explicit representation of major dams, Annual Conference of Japan Society of Hydrology and Water Resources 2019, Chiba, Japan, 2019.
- 9) 花崎直太、全球水資源モデルを利用した世界水リスク評価ツールの開発に向けて、第 27 回地球環境シンポジウム、富山、2019
- 10) Hanasaki, N., Yoshikawa, S., Pokhrel, Y., and Kanae, S.: An investigation of the thresholds for two conventional water scarcity indicators using a global hydrological model with human activities, AGU Fall meeting, San Francisco, USA, 2019.
- 11) Boulangue, J. and Hanasaki, N.: Global flood inundation dynamics with explicit representation of major dams, AGU Fall meeting, San Francisco, USA, 2019.
- 12) Nishina K., Ito A., Developing Global Riverine N2O emission scheme used for a global ecosystem model. AGU Fall Meeting 2019, San Francisco, USA, 2019
- 13) 岡田将誌、肱岡靖明: 世界主要穀物生産に対する渇水リスク予測、日本農業気象学会 2020 年全国大会、大阪、2020.
- 14) Boulangue, J., Hanasaki, N., Yamazaki, D., Pokhrel, Y.: AGU Fall Meeting 2020 (2020), Quantifying the effect of dams in reducing global flood exposure under climate change.
- 15) 岡田将誌, 肱岡靖明 (2021) 気候変動による穀物生産の水リスク分布の変化, 日本農業気象学会 2021 年全国大会.
- 16) 花崎直太: 日本生態学会第 68 回全国大会 (2021) 水資源モデル H08 の開発と最新の展開について

【サブテーマ 2】

- 1) Yoshida, T., Hanasaki, N., and Nishina, K., Regionalized climatic parameters in global-scale hydrological models: Preliminary assessment, AGU Fall Meeting 2019, 2019

(3) 「国民との科学・技術対話」の実施

【サブテーマ 1】

- 1) 平成 30 年度郡山市農業委員会勉強会「第 2 回気候変動適応に関するセミナー（農業編）」（主催：郡山市農業委員会、2019 年 2 月 19 日、郡山市役所本庁舎、参加者約 100 名）にて岡田将誌が講演
- 2) 2018 年度市民公開講演会「気候変動影響・適応研究最前線：地球規模の水資源の観点から」気候変動による影響と適応政策・研究最前線（主催：環境科学会、2019 年 3 月 2 日、法政大学市ヶ谷キャンパス、聴講者約 100 名）にて花崎直太が講演
- 3) グローバル・コンパクト・ネットワーク・ジャパン環境経営分科会 2018 年度第 7 回（東京、2019 年 3 月 8 日、参加者約 80 名）にて花崎直太が「地球温暖化と水」と題して講演
- 4) 令和元年度国立環境研究所夏の公開（主催：国立環境研究所、2019 年 7 月 20 日、昨年度参加者 5000 名）にて花崎直太が水リスク評価ツール試作版を展示
- 5) えひめの環境の未来を考えるシンポジウム（主催：愛媛県、2020 年 10 月 3 日、愛媛大学城北キャンパス、参加者約 120 名＋オンライン同時配信）にて岡田将誌が講演、パネルディスカッションに参加
- 6) 第四回食品産業気候変動セミナー（主催：福岡大学、2021 年 2 月 24 日、オンライン、参加者約 40 名）にて花崎直太が「気候変動に伴う水資源への影響と水リスク評価」と題して講演。
- 7) 2021 年度 SPEED 研究会 総会・第 1 回研究会（2021 年 5 月 7 日、オンライン、参加者約 50 名）にて花崎直太が「花崎直太「企業の温暖化適応策検討支援を目的とした公開型世界水リスク評価ツールの開発」と題して講演。

【サブテーマ 2】

特に記載すべき事項はない。

(4) マスコミ等への公表・報道等＞

【サブテーマ 1】

- 1) 成果の記者発表（令和 3 年 1 月 22 日、於国立環境研究所、「気候変動下で増加する洪水に、ダムでの洪水調節が及ぼす影響を世界で初めて推定」）。
- 2) 「大型ダムに洪水被害者を最大 2 割減らす効果」日経コンストラクション 2021 年 3 月 8 日号、p23.

【サブテーマ 2】

特に記載すべき事項はない。

(5) 本研究費の研究成果による受賞

特に記載すべき事項はない。

IV. 英文 Abstract

Development of an open global water risk assessment tool to support investigation of adaptation measures to climate change in the private sector

Principal Investigator: Naota HANASAKI

Institution: National Institute for Environmental Studies, Tsukuba, Japan

Cooperated by: National Agriculture and Food Research Organization

[Abstract]

Key Words: Climate change, Adaptation, Water risk

In Sub-theme 1, long-term simulations from the past to the future were conducted using the global water resource model H08, which can comprehensively analyze the global water cycle including human water use, and water risks related to global droughts, floods, and supply chains were analyzed. By incorporating the requests of private companies into the design, we developed a water risk tool that provides risk indicators and factor analysis in an easy-to-understand manner through a web-based interface. The study consisted of six components, namely, global water cycle and water use simulation, drought risk analysis, flood risk analysis, supply chain analysis, private company interview, and water risk tool development.

For flood risk analysis, a climate change impact assessment simulation was carried out by combining the global water resource model H08 and the global river dynamics model CaMa-Flood. Although global flood risk is expected to increase in the future due to climate change, the world's flood-exposed population downstream of dams during the 21st century will be about 15% lower than if the dams were not considered.

For supply chain risk analysis, a statistical model was developed that predicts the decline in grain productivity during a drought from precipitation variations in the world's breadbaskets (corn, rice, wheat, soybeans, barley). We developed global gridded data for barley since not available. We found that croplands in Spain, Russia, and Australia, which are the major producers, showed considerable decrease in yield due to drought, which implies the increasing risk of supplying barley to the international market.

In Sub-theme 2, a global analysis of streamflow observation data, and parameter estimation of the H08 model was carried out including areas where flow observation was unavailable. To obtain a representative parameter set common to basins with similar climatic characteristics, we assumed that climatic characteristics have an outstanding effect on the regionalization of hydrological models. We proposed a method of selecting the median from the posterior distribution of the parameters adopted in the top 5% of the Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) as a robust parameter determination method that guarantees representativeness. Rather than selecting a single optimum value for each basin, it was possible to evaluate the sensitivity and uncertainty of the parameters by handling the parameter group. Due to the parameters identified for each climate category, the accuracy of flow rate prediction is significantly higher than the default and global uniform parameters, and $NSE > 0.5$ in 30.1% of the global basin and $NSE > 0.0$ in 61.7% of the basin.