

令和 4 年 6 月 21 日現在

機関番号：82111

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K06304

研究課題名(和文) 気候変動による水資源リスクへの適応：利根川流域の過去・将来120年の解析

研究課題名(英文) Adaptation to water resource risks due to climate change: analysis of the past and future 120 years in the Tone River Basin

研究代表者

吉田 武郎 (Yoshida, Takeo)

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・上級研究員

研究者番号：80414449

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：農業水利用と自然水循環を一体的に表現する分布型水循環モデルを利根川水系に適用し、渇水期間および累積渇水量により気候変動の影響を評価した。モデル精度の向上に向け、新たに開発した手法によりパラメータ同定を行い、流出推定精度が向上するとともに、同定されたパラメータの頑健性を確認した。次に、現在から将来の5期間ごと積雪水当量および灌漑期の渇水指標の評価を行った。積雪水当量は150年間で一貫して減少傾向にあり、規模の小さい渇水が減少し、大規模・長期間にわたる渇水が増加する傾向が示された。また、特徴的な渇水パターンを抽出すると、これまで夏季に生じていた渇水時期が早期化することが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

今後、累積渇水量を貯水池により開発すべき水資源と捉え、ハード的な適応策に必要なコスト評価を行う。また、渇水期間を農業用水の取水制限の期間やその頻度として、適応に要する農業者の社会経済的なコストに換算することにより適応策の評価に繋げる

研究成果の概要(英文)：A distributed water cycle model that integrates agricultural water use and the natural water cycle was applied to the Tone River system to evaluate the effects of climate change on the drought period and cumulative drought volume. To improve the accuracy of the model, parameters were identified using a newly developed method, and the accuracy of runoff estimation was improved and the robustness of the identified parameters was confirmed. Next, snow water equivalent and irrigation season drought indices were evaluated for each of five periods from the present to the future. The snow water equivalent showed a consistent downward trend over the 150-year period, indicating a trend of decreasing small-scale droughts and increasing large-scale and long-term droughts. The characteristic drought patterns indicate that droughts that used to occur in summer are now occurring earlier in the year.

研究分野：水文学

キーワード：水資源 気候変動 農業用水 水文モデル キャリブレーション

### 1. 研究開始当初の背景

気候変動に伴い、降水量やその分布、降雨強度等に代表される地球上の水循環が変化することが指摘されている (IPCC, 2014)。近年、こうした気候システムの変化が我々の生活にどのような影響を及ぼすかという点について広く研究が進められてきた。気候変動による日本域での水資源への影響評価研究によれば、東日本・西日本での年平均降水量の減少傾向や気温上昇による融雪の早期化により、農業水利用が集中する代かき期および出穂期の渇水リスクの増大が示されている。このような地球規模での気候変動が社会に及ぼす影響や、それに適応する方策は地域ごとに大きく異なる。平成 30 年 6 月に成立した「気候変動適応法案」では、現在生じており、または将来予測される被害の回避・軽減等を図る方策 (気候変動への適応) について、地方自治体ごとに計画を策定することが謳われている。水資源リスクに対する適応計画を策定するには、以下の 2 つの問いに答える必要がある。

- (1) 渇水発生の閾値：降雨の規模や継続時間という気象的要因のみで説明がつく洪水リスクに比べ、渇水は気象的要因と社会的要因 (貯水池の整備状況、水需要等) が相互に影響して起こる。そのため、両者が大きく変化する状況で、将来の渇水の生起を判断するための明確な閾値を得る。
- (2) 気候変動の時間スケール：気候変動により水資源に決定的な影響が現れるのはいつ頃か、また、適応のために許容される時間はどの程度かを明らかにする。

### 2. 研究の目的

本研究では、以下の 2 つの目的について研究を進める。まず、利根川流域における、過去 60 年間 (1951~2010 年) の気象および社会経済状況の変化を水文モデルの入力データとした連続計算を用い、同期間の渇水発生状況に及ぼした気象・社会的要因を明らかにする。次いで、将来 60 年間 (2051~2110 年) の気象将来予測データ、現在および将来の社会経済状況の予測シナリオの元で、渇水規模や生起頻度がどの程度、いつ変化するかを明らかにする。

### 3. 研究の方法

水資源への気候変動影響を予測するために、河川の自然的な水循環と人為的な水利用系を一体的に解析するモデルを構築する。本研究で用いる分布型水循環モデル (吉田ら、2012; 図 1) は、流域を分割する矩形メッシュ (三次メッシュ: 解像度約 1km) ごとに降水量、気温、風速、短長波放射量等の気象データを日単位で与え、各メッシュでの河川流量を算定する。さらに、モデル上に貯水池や水利施設を配置し、その運用ルールをアルゴリズム化することにより、各施設での運用が河川流量に与える変化や、気候変動時の取水可能量の評価を行う。分布型水循環モデル (吉田ら、2012) を利根川水系に適用し、人間活動の影響を受ける流量観測地点における河川流況、特に低水流況を精度良く解析できることを確認した。渇水の指標として、モデルで算出した河川流量が利水基準点の正常流量を下回る日数 (渇水期間) および正常流量を下回った量の累積値 (累積渇水量) を用い、気候変動の影響を評価した。

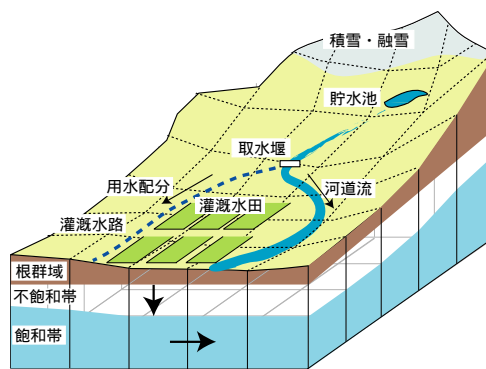


図 1 分布型水循環モデルの全体像

モデル精度の向上に向け、新たに開発した以下の手法によりダム流域でのパラメータ同定を行った。具体的には、ランダムに生成されたパラメータを用いた 5,000 回のシミュレーション結果から、目的関数 Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) の上位 5% のパラメータを抽出し、各パラメータの分布の中央値を同定値として選択する。次に、150 年連続ランの結果を 5 期間に分けてそれぞれの期間ごとにバイアス補正した。

さらに、分布型水循環モデルを用いて、各月初日の積雪水当量の変化および灌漑期の渇水指標の評価を行った。積雪水当量は、150 年間で一貫して減少傾向にあった。特に、21 世紀半ば以降は減少傾向が明確になり、5 月 1 日にはほとんど積雪が見られない状況になった。さらに、渇水指標を比較すると、規模の小さい渇水が減少し、大規模・長期間にわたる渇水が増加する傾向が示された。また、特徴的な渇水パターンを抽出すると、これまで夏季に生じていた渇水時期が早期化し、5 月下旬から長期間にわたる渇水の生じうることが示された。

### 4. 研究成果

流域内の水利施設 (貯水池・頭首工) の操作、農業用水の取水・還元を陽的に表現する分布型

水循環モデル(吉田ら, 2012)を利根川および信濃川水系に適用した。適用したモデルにランダムに生成されたパラメタセットの試行から, 未観測流域での流出推定精度が向上するとともに, 同定されたパラメータは土壌形成や蒸発散効率に関する物理的解釈と整合性を示し, パラメータの頑健性を確認した。これにより, 人間活動の影響を受ける流量観測地点における河川流況, 特に低水流況を精度良く解析できることを確認した。渇水の指標として, モデルで算出した河川

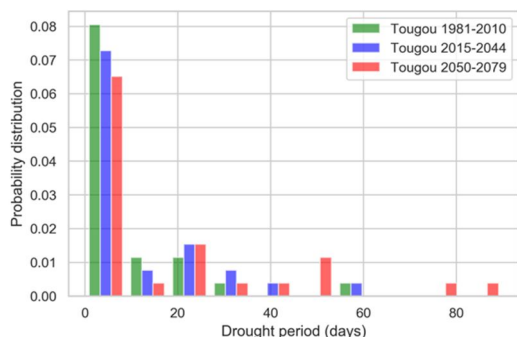


図 2 信濃川水系における渇水指標期間の将来変化。

流量が利水基準点の正常流量を下回る日数(以下, 渇水期間)および正常流量を下回った量の累積値(以下, 累積渇水量)を用い, 気候変動の影響を評価した。ここでは, 利根川流域の利水基準点である栗橋地点での正常流量を用いた。

次いで, 150年連続ランの結果を3期間(現在期間: 1981-2010; 近未来: 2015-2044; 21世紀末: 2050-2079)に分けてバイアス補正した。さらに

, 信濃川流域に適用した分布型水循環モデルを用いて, 灌漑期(5月1日~9月30日)の水資源評価を行った。小千谷地点での灌漑期の流況曲線を3期間ごとに比較すると, 現在期間から近未来, 将来にかけて, 正常流量を下回る期間が長期化することが見て取れる(図2)。渇水期間・渇水量の全体的な変化傾向を調べると, 年平均の渇水期間は現在期間の6.75日から近未来: 10.2日, 21世紀末17.4日のように長期化した。また, 渇水期間の長期化のみならず, 渇水量自体も増大する結果が得られ, 年平均渇水量は現在期間の682万 $m^3$ から, 近未来: 1,383万 $m^3$ , 21世紀末: 2,876万 $m^3$ のように増加した(図3)。また, 21世紀末にはこれまでに想定されない80日を超えるような極端な渇水の発生も予測されていることに注意を払いたい。

検討した3期間ごとに最大渇水が生じた年のハイドログラフを図4に示す。信濃川流域では夏渇水の傾向が強い河川で, これまでに生じた渇水のほとんどが7月以降に生じているが, 梅雨期の少雨と少雪が同時に起こることにより, これまで渇水が生じなかった時期(6月)にも渇水が生じうることを示した(吉田ら, 2021)。

すなわち, 気候変動に伴う積雪量の減少や融雪の早期化が灌漑前期の水利用に及ぼす影響は限定的であり, その影響はむしろ灌漑後期の渇水の長期化として現れることを示唆する。

灌漑後期に生じる渇水の長期化には, 融雪量の変化の他, 蒸発散量の増大, 降水量の減少, 無降雨期間の長期化等のさまざまな要因が関係する。渇水の詳細な要因分析については未実施であるが, ここでは貯水池の貯水量の変化から考察する。信濃川水系で最も標高が低い地点に位置するダム(刈谷田川ダム, ダム地点標高271m)における5月から9月の貯水位の変化を図5に示す。現在期間(1981-2010年), 近未来(2015-2044年), 21世紀末(2050-2079年)の全データの上下限を陰付き部分で, 各期間の最大規模の渇水年の貯水位を実線で表す。4月から5月に現れる貯水量の減少時のパターンについて30年間の平均的な変化をみると, 近未来, 21世紀末になるにつれて貯水量の減少時期が早期化していることが見て取れる。また, 現在期間では最も

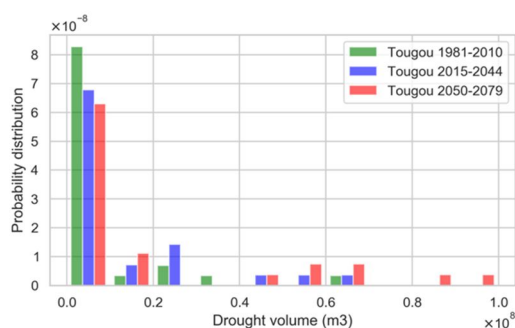
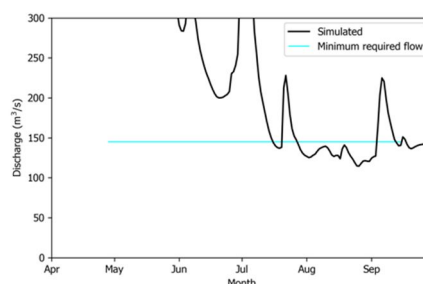
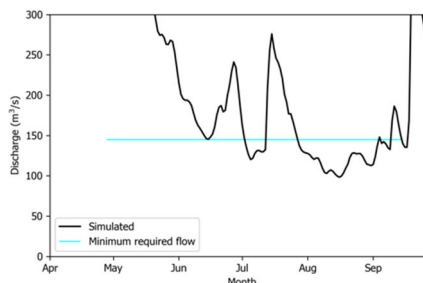


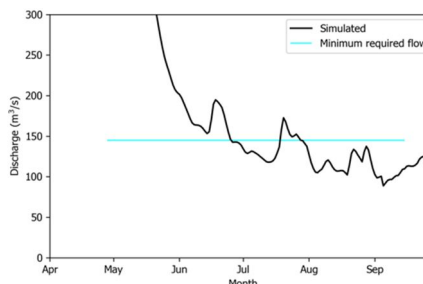
図 3 信濃川水系における累積渇水量の将来変化。



(a) 1981-2010年



(b) 2015-2044年



(c) 2050-2079年

図 4 検討期間における最大渇水時の流況

遅ければ6月上旬まで満水位が維持されているのに対し、21世紀末には5月上旬には貯水位の減少が始まることも分かる。さらに、最大規模の渇水年の変化を見ると、21世紀末には満水位に達しないまま灌漑期を迎える状況が示されている。これらは、融雪が早期化するとともに、貯水池の放流量が流入量を上回る状況が5月頃から生じやすくなることを意味する。夏季の貯水位は、洪水制限水位に上限を支配されているものの、平

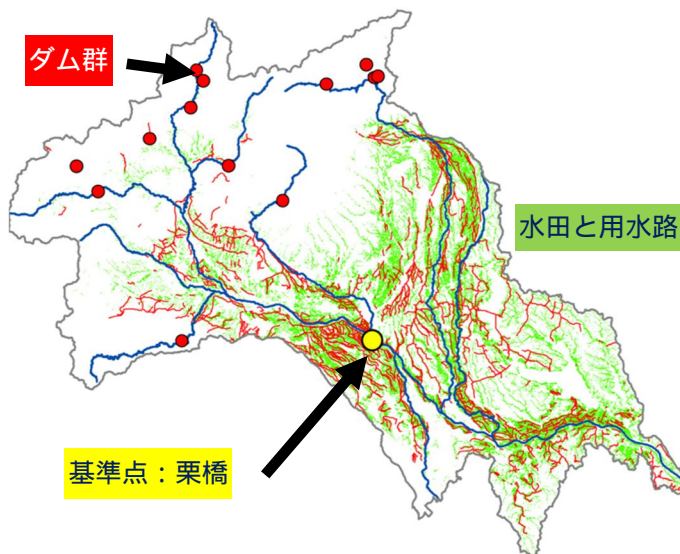


図6 利根川流域の水利施設，土地利用と基準点。

均的に見れば期間ごとに明瞭な変化のパターンは見いだせない。ただし、最大規模の渇水年に着目すると、現在期間では有効貯水量を使い切る状況が生じないのに対し、近未来では15日間、21世紀末では28日間に渡って有効貯水量がゼロになる期間が生じた。この期間は、近未来では8月中下旬に発生したのに対し、21世紀末ではより早期化した時期（6月下旬から7月上旬中）に生じていることは、小千谷地点で得られた渇水期間の早期化・長期化と整合する結果である。

同様の検討を、利根川水系（図6）でも実施した結果を示す。150年連続ランの結果を5期間（過去期間：1951-1979，現在期間：1980-2009；近未来：2010-2039；21世紀半ば：2040-2069；21世紀末：2070-2099）に分けてバイアス補正した。さらに、利根川流域に適用した分布型水循環モデルを用いて、各月初日の積雪水当量の変化および灌漑期（5月1日～9月30日）の渇水指標の評価を行った。積雪水当量は、150年間で一貫して減少傾向にあることが分かる（図7）。特に、21世紀半ば以降は減少傾向が明確になり、5月1日にはほとんど積雪が見られない状況になることも示された。さらに、渇水指標を比較すると、信濃川水系と同様に、規模の小さい渇水が減少し、大規模・長期間にわたる渇水が増加する傾向が示された（図8）。また、特徴的な渇水パターンを抽出すると、これまで夏季に生じていた渇水時期が早期化し、5月下旬から長期間にわたる渇水の生じることが示された。

以上の通り、150年シームレス計算を用いて、信濃川・利根川水系における農業水利用に対する影響を評価した。信濃川水系では、灌漑期の渇水指標が将来気候下では悪化し、灌漑期後半の水利用に影響を及ぼしうることが示された。その原因として、積雪量の減少・融雪の早期化という直接的な影響に加え、貯水池の貯水量の減少時期の早期化という間接的な原因が寄与していることも示された。利根川水系においても同様に、積雪水当量の連続的な減少とそれに伴う渇水規模の増大が示唆されたが、ダム群の連携運用のモデル化や農業水利用時期との関係については課題が残された。

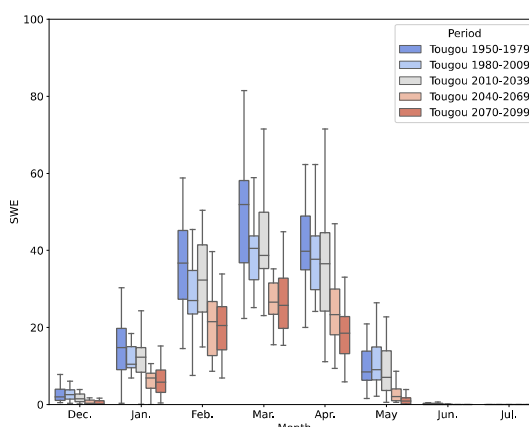


図7 利根川流域の各月初日の積雪水当量の変化。

特に、21世紀半ば以降は減少傾向が明確になり、5月1日にはほとんど積雪が見られない状況になることも示された。さらに、渇水指標を比較すると、信濃川水系と同様に、規模の小さい渇水が減少し、大規模・長期間にわたる渇水が増加する傾向が示された（図8）。また、特徴的な渇水パターンを抽出すると、これまで夏季に生じていた渇水時期が早期化し、5月下旬から長期間にわたる渇水の生じることが示された。

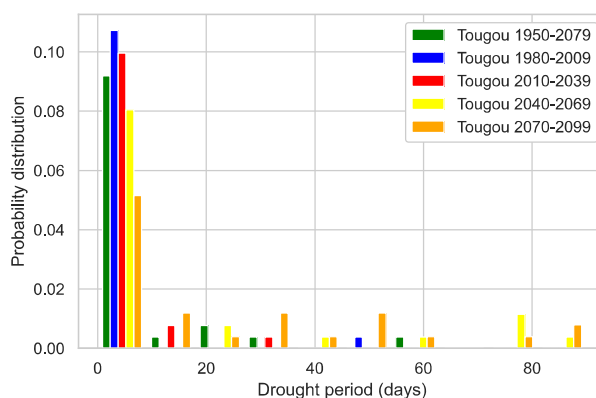


図8 利根川流域の渇水日数の将来変化。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 T. Yoshida, N. Hanasaki, K. Nishina, J. Boulange, M. Okada, P. A. Troch	4. 巻 58
2. 論文標題 Inference of Parameters for a Global Hydrological Model: Identifiability and Predictive Uncertainties of Climate Based Parameters	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Water Resources Research	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2021WR030660	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 吉田武郎、宮島真理子、松尾洋毅、森田孝治、相原星哉、皆川裕樹、河島克久	4. 巻 33
2. 論文標題 少雪条件下での灌漑期水資源の統計的予測 - 2019-20年積雪条件下での信濃川流域における検討 -	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 応用水文	6. 最初と最後の頁 11-20
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 吉田武郎、花崎直太、仁科和哉
2. 発表標題 Regionalized climatic parameters in global-scale hydrological models: Initial assessment of climate controls on transferability
3. 学会等名 American Geophysical Union Fall Meeting 2019, San Francisco, USA. (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉田武郎、宮島真理子、森田孝治、皆川裕樹、相原星哉
2. 発表標題 2019-20年積雪条件下での灌漑期の水資源予測
3. 学会等名 農業農村工学会大会講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉田武郎、工藤亮治、相原星哉、皆川裕樹
2. 発表標題 気候変動が積雪流域の灌漑期水資源へ及ぼす影響
3. 学会等名 農業農村工学会大会講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------