

論文の内容の要旨

論文題目 旱魃の将来変化に対する水資源管理の効果に関する研究
(Study on impact of the water resources management on
projected future change of drought)

氏 名 佐藤 雄亮

本論文は、人為的な水資源管理プロセスを組み込んだ陸面過程モデルHiGW-MATのオフラインシミュレーションに基づき、水文的旱魃に関する全球温暖化影響評価の成果をまとめたものである。本論文は7章から成る。

1章では研究の背景と目的を述べた。気候変動に伴う極端現象に対する社会的注目度は高く、旱魃もその時空間分布は現在と異なった特徴を有するようになると考えられる。しかしながら現段階で旱魃に関する将来予測の信頼度は高くないとされており、さらなる研究が必要となっている。極端現象の中でも旱魃の時空間スケールはとりわけ大きく、その社会的・経済的ダメージの規模も甚大になるため、旱魃の将来予測に対する社会的要請は強い。

一方、現代の陸域水環境は貯水池の建設や取水などによる人為的な操作の影響を強く受けており、これらの影響の考慮無くして現実的な温暖化影響評価は難しい。これら、自然の変動を緩和し安定して水を供給する事を目的とする水資源管理は、温暖化に伴う環境変化の影響もある程度は緩和調整する事が期待される。しかしその重要性は認識されてきたものの、水資源管理を考慮した水循環の将来推計はまだ限られた数しか例がない。しかも、それらの多くは解析変数に年平均流量を取っており、旱魃に関係する低水状況の変化について、温暖化影響に対する水資源管理の効果に着目し定量評価および議論をした研究は把握する限りまだ存在していない。

適応策への貢献を見据え、本研究は3つの問いを立てそれらへの解答を目的とする。1

1つ目の目的は温暖化に伴って変化する世界の早魃について、不確実性も踏まえ、その時空間的な変化の特徴を定量的に推定する事である。2つ目は、既存の水資源管理基盤が温暖化に伴う早魃の変化をどの程度緩和もしくは悪化させるのかを見積もり、社会基盤を用いた温暖化適応能力を推定してその特徴を把握する事である。ところがもし、現在の水資源基盤が将来的な早魃に対して慢性的に力不足になる時が来るならば、我々はその時までには何らかの準備を進めておく必要がある。ではその時期はいつ頃なのだろうか。3つ目の目的は、適応の進め方を左右する猶予時間に関する情報を提案する事である。

2章では本研究が対象とする早魃の定義と解析手法を説明する。今回は水文的水早魃の中でも流況を解析対象とし、閾値法を用いて“自然現象である早魃”および“需給バランスに関する水不足”について、いずれも年平均早魃日数の変化を調べている。

3章でHiGW-MATと入力データ、検証用データについて記述した。早魃に関する温暖化影響は、陸面過程モデルHiGW-MATがシミュレートする現在/将来および水資源管理の考慮/無考慮の合計4タイプの早魃日数の差異から議論される。本研究では、取水・灌漑・貯水池操作・地下水汲み上げという4種類の人為的水循環操作を考慮し、下記の様に20世紀再現実験、将来推計Ⅰ、将来推計Ⅱと呼ぶ3つのシミュレーションを行なって段階的な2つの温暖化評価を進めた。

4章には再解析データをベースに作成された気象データをHiGW-MATに与えて1980-1999年のシミュレーションについての解析をまとめた。これを20世紀再現実験と呼ぶ。その目的は観測や統計データを用いてHiGW-MATの性能を検証する事で、地下水汲み上げ量、流量、水文早魃の3項目の再現性を評価した。ここでの判断基準は、HiGW-MATが広域モデルである事を考慮して、変数のオーダーが合っている事と季節～年単位の変動を再現出来ている事としている。地下水汲み上げ量に関しては、汲み上げ量が多い上位39か国について統計データと比較し、やや過小評価ながら同じオーダーの再現性を有しているので、シミュレーションは妥当範囲内と判断した。また流量ならびに年平均早魃日数に関しても、それぞれ季節と年々の特徴的な時系列変化を概ね捉えておりHiGW-MATの出力が今回の早魃温暖化評価に利用可能であると結論づけた。

20世紀再現実験に続き、1つのGCMの予測にしたがって2080-2099年のシミュレーションを行なった。これを将来推計Ⅰと呼ぶ。5章には、20世紀再現実験と将来推計Ⅰの20年ずつを比較するタイムスライス方式の擬似温暖化実験の成果をまとめた。この実験の目的はAR5に向けられて作成された最新の温暖化シナリオに基づいて、早魃の変化の空間的な特徴を整理する事と、水資源管理による温暖化影響の緩和/強化効果を推定する事である。この実験ではまず、現在気候下で人間活動が水文的水早魃に与える影響に関して解析を行なった。その結果、水資源管理を考慮すると陸域の76%で早魃が増加し、取水が早魃を増加させるという特性を確認した。貯水池操作は早魃を緩和しその有効性を示したが、効果はその下流のみで空間的な広がりは限定的である。続く温暖化影響解析では、水資源管理考慮した場合、温暖化により陸域の40%で有効早魃日が増加、45%

で減少を示した。このうち地中海、北米、中央アジアなどで早魃の増加が特に顕著な事がわかった。流域スケールの解析から、降水減少が原因で早魃が増加する地域の他に、中緯度では蒸発散過多で早魃が増える事や、時系列データから高緯度の融雪レジームの変化に起因する早魃の増加がある事など、変化要因についての考察を行なった。ここで、温暖化によって早魃が増加もしくは変化しないと予測された地域のうち、水資源管理がさらに状況を悪化せるケースが22%にのぼった。一方で、30%の地域では水資源管理により早魃日数が軽減されており、人間活動は温暖化影響に対してもポジティブにもネガティブにも作用する。そこでImpact Alter Ratio (IAR) という指標を提案して温暖化影響に対する水資源管理の効果を評価した。これにより、水資源管理が温暖化影響に与える影響が、予想される温暖化影響の10%~同程度以上のインパクトを持つ地域がある事がわかった。ただし、北米やヨーロッパから中央アジアにかけては取水による早魃の増加が危惧される地域が広がっており、これらの地域では水利用習慣の改善などが必要である事が示唆された。

続く6章は、前章の数値実験を拡張して5つのGCMの将来予測に基づき行なった120年分（1980-2099年）の計算結果の解析についてまとめている。この計算を将来推計Ⅱと呼ぶ。この章の前半では、需給バランスから議論される“水不足”と自然現象である“早魃”のそれぞれに関して空間的な温暖化影響評価を行ない、早魃変化のホットスポットの予測とその予測信頼性について結果を記した。後半では、全球陸域を26地域に分類し、地域毎に早魃の時系列変化の特性をまとめている。

水不足日の解析では、温暖化に伴う灌漑用水需要の増加も手伝い、全球の陸域の約57%で水不足日が増加する。特にヨーロッパ、アメリカ西部・中央部、ブラジル、東アジアにおける増加が顕著である。ただし、5 GCM間の分散値から、ヨーロッパや南米の結果については他の増加地域よりも信頼性が劣るという結果になった。日本は2~3倍以上の変化率の増加を示す。

早魃についての解析は将来推計Ⅰからの拡張を意識し段階的に行なった。まず、1980-1999と2080-2099の20年ずつを比較するタイムスライス実験を行なって早魃変化を調べ、さらに5GCM間の違いから将来予測の信頼性が高い地域と低い地域に分類した。比較的高い確信度（合意度+5で変化の標準偏差が1か月未満）で早魃の顕著な増加が予測されたのは、北米中央部と西部、地中海沿岸域、西アジアと中央アジア、南アジア東部と中国北部である。地中海沿岸域やアメリカ西部など、降水減少が原因で早魃が増加する地域は相対的に変化の標準偏差が小さく信頼性が高い。しかしながら、早魃日の増加が大きい地域のうち、北米東部、ウクライナやベラルーシ以西のヨーロッパ、中国の南部など、蒸発散量の増加が原因と考えられる地域では変化の標準偏差が大きくGCM間のばらつきが目立つ。ただし例外的に中央アジア近辺が蒸発散起因にも関わらず信頼性の高い増加を示した。

領域別のタイムスライス解析では、26地域中19の地域で21世紀前半の方が後半より早

魃日数の増加が大きくなる事が示された。早魃日数の確率分布は地域ごとに固有の分布を見せ、例外の3地域（カナダ東部～アイスランド、北アジア、オーストラリア北部）を除き、時間の経過とともに早魃日数の領域中央値が増加する。続いて、水資源管理の考慮/無考慮の違いに着目し、領域毎に早魃日数の領域代表値（領域中央値の早魃日数、同平均値、現在気候の95パーセンタイルの早魃日数を超える領域の面積率）の連続データを解析した。その結果、ほとんどの地域で人間活動を考慮した場合の方が、水資源管理が年々変動を小さくし、それに伴いGCM間のばらつきも小さくなって信頼性が向上する事を確認した。また、早魃日数の増加率が小さく影響が穏やかに現れるという特徴を示す事が出来た。つまり、水資源管理という人間活動が介在する事で短期的な変動と長期的な変化が小さく抑えられていると言う事である。これは3種類の領域代表値の全てに該当する特徴であった。この水資源管理考慮による変化緩和の有用性は、全球陸域グリッドをサンプルとしてカーネル密度推定を用い作成した確率密度分布からもその特徴がうかがえた。加えて時系列変化の様子から、早魃という自然現象は非線形的な変化特性を持たず、“Abrupt change”と表現される様な変化を見せるタイプの現象ではない事を改めて示せた事も成果である。

最後に、年早魃日数が増加を続け、現在とは異なる状況になってしまうのはいつ頃なのかを見積もった。既存の水資源管理基盤はこれまでのデータに基づき統計的・経験的に計画されているため、早魃が経験範囲を超えてしまうならば何らかの計画修正が必要になる可能性がある。今後の計画のために、その時期の把握が必要な情報である。そこで本研究では、1980-1999年の間の最小・最大早魃日数に基づいて経験レンジを設定し、領域の中で最も平均的な状況が既存の水資源基盤の想定を超え異常を迎える時期を“Timing of Perception Change for Drought (TPCD)”と呼び、その推定を行った。結果、時間方向の不確実性を考慮しても、26地域中13の地域で2050年代までにTPCDを迎える事がわかった。特に、大きな早魃日数の増加が予測される地域であるアメリカ西部(2017年)、チリ(2006年)、地中海沿岸(2027年)、中東および中央アジア西部(2024年)、中央アジア東部(2036年)、中国(2026年、2027年)の全ての地域で、かなり近い将来に領域の平均状態が慢性的に未経験の早魃状態に移行する事が示唆されており、対応のために残された時間は非常に少ないと言う結果を得た。

以上、2つの数値実験から、冒頭に挙げた3つの問いに対して解答を得る事が出来た。1つ目については、早魃増加が顕著な変化のホットスポットを特定し、その予測信頼性を示した。2つ目の問いには、水資源基盤を用いた社会の適応能力についてはその空間分布と温暖化影響に対する相対的な効果を推定し、時系列変化を穏やかにするという有効性を示した。そして猶予時間の情報については、一つの目安として領域毎のTPCDを推計し、早急な対応が求められると結論づけて3つ目の解とした。7章で本論文の結論として全体を総括し、今後の展望を示す。