

気候変動による非超過確率1/10の少雨年の発生頻度の変化の計算

CALCULATION OF CHANGE IN OCCURRENCE FREQUENCY OF LOW RAINFALL YEARS WITH NON-EXCEEDANCE PROBABILITY OF 1/10 DUE TO CLIMATE CHANGE

西村宗倫¹・高田望²・坂本光司³・小池克征⁴・越田智喜⁵・竹下哲也⁶
Sourin NISHIMURA, Nozomu TAKADA, Koji SAKAMOTO,
Katsuyuki KOIKE, Tomoki KOSHIDA, and Tetsuya TAKESHITA

¹正会員 工学 国土技術政策総合研究所 河川研究部 水循環研究室 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1)

²正会員 工博 株式会社 気象工学研究所 (〒550-0003 大阪府大阪市西区京町堀1-8-5)

³非会員 理修 株式会社 気象工学研究所 (〒550-0003 大阪府大阪市西区京町堀1-8-5)

⁴非会員 環修 いであ株式会社 国土環境研究所 (〒224-0025 神奈川県横浜市都筑区早渕2-2-2)

⁵正会員 理修 一般財団法人 河川情報センター (〒102-8474 東京都千代田区麹町1-3)

⁶正会員 工博 国土技術政策総合研究所 河川研究部 水循環研究室 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1)

96の1級水系を対象に、地域気候モデルの出力を用いて、年流域平均降水量が非超過確率1/10以下となる少雨の発生頻度を計算した。地域気候モデルの出力は、気候変動適応技術社会実装プログラム(SI-CAT)によって、アンサンブル気候予測データ(d4PDF)を水平解像度5kmメッシュに力学的ダウンスケーリングされたデータをバイアス補正した上で用いた。その結果、96の1級水系の年流域平均降水量が非超過確率1/10となる少雨の発生頻度は、2℃上昇実験では過去実験の0.15倍～3.94倍となり、平均値は1.47倍、標準偏差は0.72倍となった。4℃上昇実験では過去実験の0.21倍～5.29倍となり、平均値は1.93倍、標準偏差は1.00倍となるなど、96の1級水系における気候変動による非超過確率1/10の少雨年の発生頻度は、多くの水系で増加傾向となることが確認されたものとする。その結果、気候変動の影響により、これまでに開発された水利流量・維持流量が多くの水系で減少傾向となる可能性があると推測する。そのため、将来の水資源に関する中長期的な計画では、気候変動の影響を考慮することが望ましいと提起する。

Key Words: climate change, low rainfall, regional climate models, first-class river system, d4PDF, SI-CAT, water resources

1. はじめに

水は生命の源であると共に、生活、産業や文化に必要な不可欠であり、2015年の国連サミットで加盟国の全会一致で採択された持続可能な開発目標¹⁾(SDGs)では、「すべての人々の水と衛生の利用可能性と持続可能な管理を確保する」ことが示されている。我が国において、2014年に制定された水循環基本法では、「水については(中略)その恵沢を将来にわたって享受できることが確保されなければならない」との基本理念が示されている。

一方で、2020年に公表された環境省の気候変動影響評価報告書²⁾では、水資源分野における気候変動による影

響として、無降水日数の増加や積雪量の減少、蒸発散量の増加による河川流量の減少が指摘されている。

関連する具体的な検討事例としては、Kawase et al(2015)³⁾は、全球気候変動予測を格子間隔20kmの非静力学地域気候モデル(NHRCM)でダウンスケーリングした結果を用いて、日本周辺における将来の冬季降水量の変化、及びその不確実性を調査し、日本海側の地域と日本の南の太平洋上で冬季降水量が減少すること、日本海側の降水量減少は冬季モンスーンの弱化との関係が示唆されたと報告している。また、伊藤ら⁴⁾は、淀川水系において、全球で定常的に4℃上昇した将来の利水安全度は、現況の1/10に対し、将来予測では1/2未満へ低下する結果を報告している。

2021年に策定された気候変動適応計画⁹⁾では、「気候変動に伴う渇水による維持用水（渇水時にも維持すべき流量）への影響（中略）に関しては、現時点で具体的な研究事例は確認できていない。」と記載されている。また、2022年に公表された淀川水系における水資源開発基本計画⁹⁾では、「気候変動の渇水への影響の予測・評価手法の更なる進展及び将来予測・評価結果並びに適応策に関する知見等を踏まえ、適時、本計画に反映していく」と記載されている。

これらを鑑み、将来の水資源に関する中長期的な計画において、気候変動の影響を考慮する必要性を判断するための基礎資料・根拠資料とすることを目的に、96の1級水系を対象に、地域気候モデルを用いて、気候変動による少雨の発生頻度の変化を計算した。本報告は、この結果を、計算方法と考察とともに報告するものである。

その際、確率規模は年非超過確率1/10とした。これは、「河川砂防技術基準 計画編 技術資料⁷⁾」では、河川の適正な利用及び流水の正常な機能の維持のために必要な流量の確保について、原則として10ヶ年第1位相当の渇水時においても必要な流量を確保することを参考としたことに因る。

また、降水量の集計対象は流域平均降水量とした。1級水系において、河川整備基本方針や河川整備計画、水資源開発基本計画は、一般的に、水系単位に定められている。これを念頭に、将来の水資源に関する中長期的な計画において、気候変動の影響を考慮する必要性を判断する上で、年流域平均降水量は有効な集計対象となり得ると考えたことに因る。

以下に少雨の発生頻度の具体的な計算方法を示す。

2. 計算方法

(1) 地域気候モデル

地域気候モデルについては、文部科学省の気候変動適応技術社会実装プログラム(SI-CAT)⁸⁾による大気近未来予測力学的ダウンスケーリングデータの降水量を用いた。このデータは、アンサンブル気候予測データベース(d4PDF)^{9),10)}の20km 解像度データを5km に力学的ダウンスケーリングしたものである。東北から九州に至る領域をカバーし、現在気候、産業革命時から全球2°C上昇(RCP 8.5 シナリオで近未来2040年ころ)、4°C上昇(RCP8.5 シナリオで21世紀末2090年ころ) 時の気候予測データである（以下、データ全体をSI-CAT DDS5TK、各々を過去実験、2°C上昇実験、4°C上昇実験とする）。SI-CAT DDS5TKの概要を表-1に、対象領域を図-1に示す。この領域には全国109の1級水系のうち、北海道の13水系をのぞく東北から九州の96の1級水系が含まれている。なお、SI-CAT DDS5TKは文部科学省の地球環境情報プラットフォームであるデータ統合・解析システム(DIAS)¹¹⁾から

表-1 SI-CAT DDS5TKの概要

項目	概要
モデル	非静力学地域気候モデル(JMA-NHRCM)
水平格子間隔	5km
初期値・側面境界値	d4PDF20kmRCM
計算期間	7月24日～翌年8月30日
過去実験年数	372年分（31年×12パターン） (1980年～2011年)
将来実験年数	372年分（31年×6SST×2摂動） 2K実験(2060年～2091年) 4K実験(2080年～2111年)

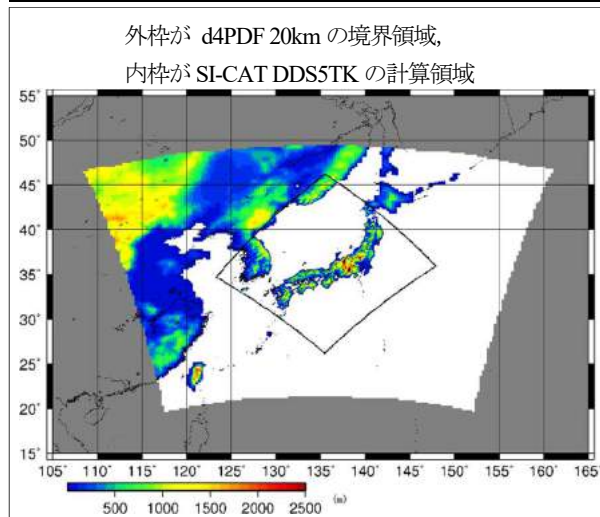


図-1 SI-CAT DDS5TKの対象領域

取得した。表-1に示す372年間のデータのうち、1月～12月の1年間のデータが確保できる360年分を計算対象とした。

(2) バイアス補正

バイアス補正について、気候変動適応情報プラットフォーム¹²⁾は、「気候モデルにはバイアスがあるが、気候変動に対する気候システムの変化は信頼する」という前提の下に行われる、シミュレーションを行う様々な分野で必須のプロセスと説明している。渡部(2020)¹³⁾は、気候変化の影響評価においてバイアス補正の手法選択や各手法を用いる上での留意点を整理している。

本研究においては、S. Watanabe et al(2020)¹⁴⁾によって提案されたDual-Window補正を用いてバイアス補正を行った。この提案手法では気候モデルの過去実験と将来実験との間の降水量に関する将来変化量とモデルの過去実験と参照データとの間のバイアスを2つの移動窓(moving window)を利用して求め、過去実験の順位統計量にこれらの変化量とバイアスを加えることで将来予測値の順位統計量としている。図-2にDual-Window補正によるバイアス補正手法の概念図を示す。

なお、バイアス補正のための参照データは、過去実験の計算期間を含めて観測されている約840の気象庁アメ

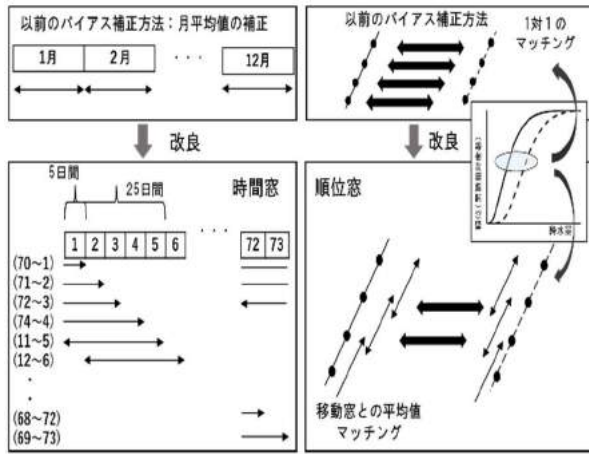


図-2 Dual-Window補正によるバイアス補正手法の概念図
(Watanabe et al.,(2020)より引用し改変)

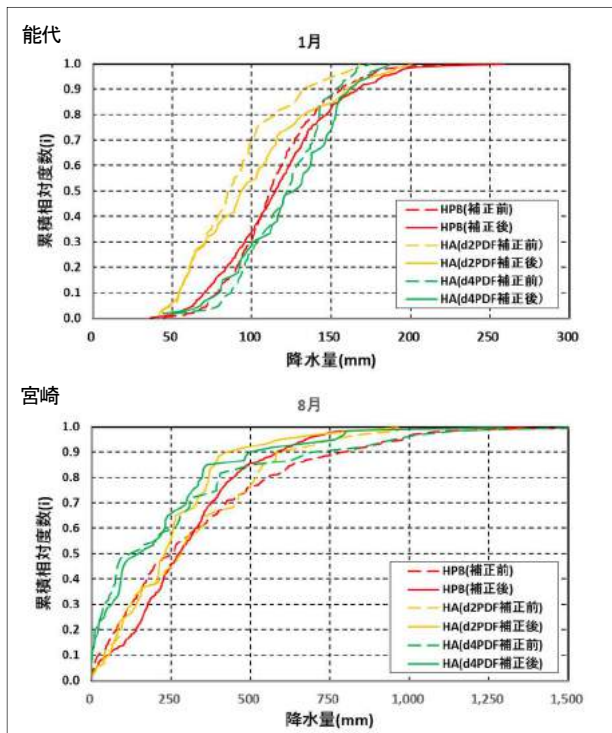


図-3 アメダス観測地点(能代, 宮崎)における
バイアス補正前後の降水量の累積度数分布図
(過去実験と将来実験(HA))

ダス観測データ及び国土交通省雨量観測データを用いた。その時間スケールは日単位とし、観測地点の周囲4点のグリッドのダウンスケーリングデータを逆距離補間法により内挿した値を補正の対象とした。欠測期間については、近傍地点の引用もしくは線形補間を行った。図-3に気象庁アメダス観測地点の能代と宮崎のバイアス補正前後の降水量の累積度数分布図を参考に例示する。この例は、能代(1月)と宮崎(8月)の6SSTパターンのうちHAメンバである。また、図-4に気象庁アメダス地点の能代、宮崎地点のバイアス補正前後の年平均降水量を参考に例示する。

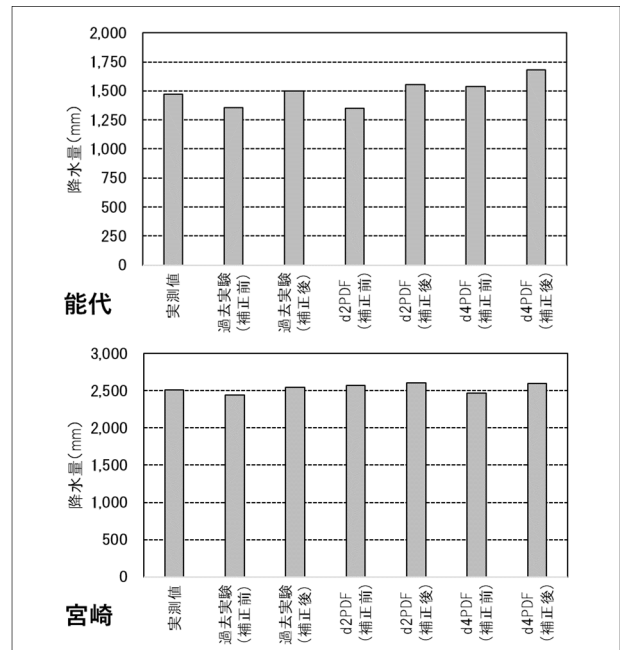


図-4 アメダス観測地点(能代, 宮崎)における
バイアス補正前後の年平均降水量

(3) 発生頻度の計算

発生頻度の計算は、年平均流域降水量を対象に計算した。年平均流域降水量は、各観測所でバイアス補正した日降水量をもとに、ティーセン法を用いて計算した。この計算は、バイアス補正には長期間の観測データが必要なこと、観測値とのバイアス量を把握する必要から観測所を基点としてバイアス補正したことによる。

その上で、過去実験の年平均流域降水量を対象に、ワイブル分布¹⁵⁾を適用し、過去実験における非超過確率1/10の年降水量を計算した。なお、ワイブル分布を適用した場合のSLSC(Standard Least Squares Criterion, 標準最小二乗規準^{16),17)})の度数分布図を図-5に示す。その結果、96水系のSLSCは0.009~0.047で、中央値は0.019、標準偏差は0.008となり、本考察・まとめは可能と判断した。

なお、大標本の水文頻度解析においては、寶(2006)¹⁸⁾がノンパラメトリック法の有用性を示している。本報告においては両方で計算したところ、図-6に示すとおり両者の相対誤差は2.2%未満となった。今後、より低頻度な確率規模で水文頻度解析を行った場合にワイブル分布で外挿し確率評価を行うことが想定され、その場合に手法を一致させるため、本報告ではワイブル分布を用いることとした。

一方で、図-7に例示した最上川水系のワイブル分布とノンパラメトリック法により算出した流域平均年降水量のとおりに、非超過確率1/10よりも低頻度な確率規模において、両手法間の差が大きくなる場合が認められる。より低頻度な確率規模で水文頻度解析を行う場合など、解析目的や解析結果の整理手法に応じて、水文頻度解析の手法の選択に留意する必要性の一端が確認されたものと考えられる。

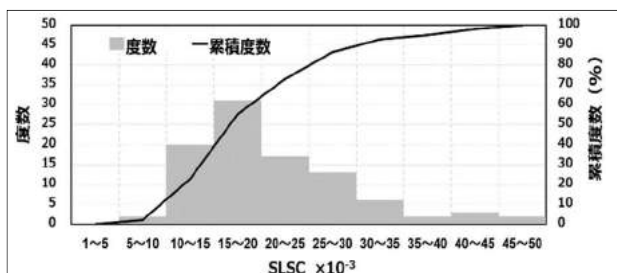


図-5 SI-CAT DDS5TKの過去実験にワイブル分布を適用した場合のSLSCの度数分布図

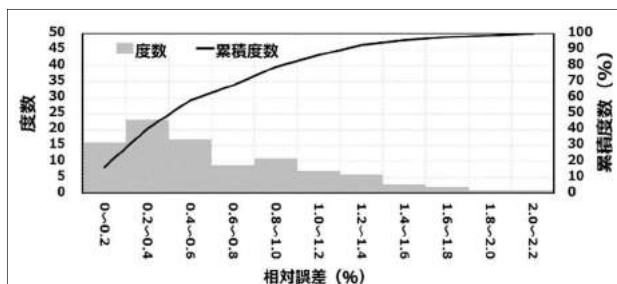


図-6 ワイブル分布とノンパラメトリック法により算出した非超過確率1/10の年降水量の相対誤差の度数分布図

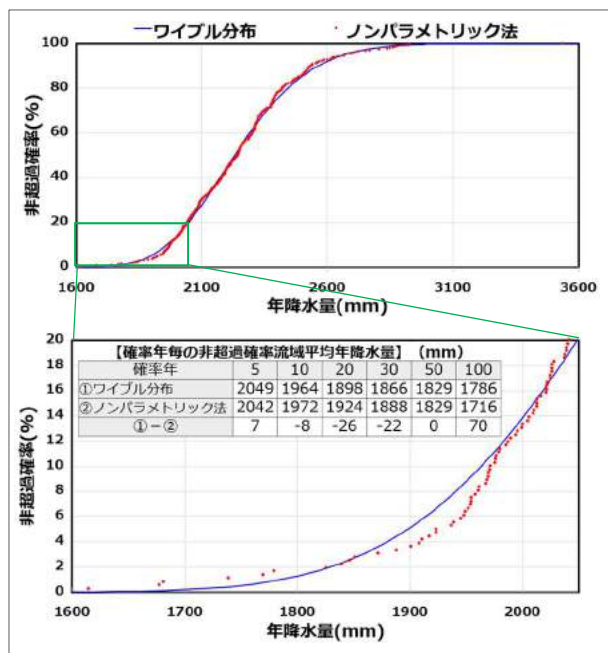


図-7 ワイブル分布とノンパラメトリック法により算出した非超過確率規模別の流域平均年降水量（最上川水系）

その上で、2℃上昇実験、4℃上昇実験の年平均流域降水量が、過去実験における年非超過確率1/10降水量を下回る頻度をカウントし、過去実験の頻度に対する比を計算した。比で整理することとした理由は、ティーセン法による流域平均降水量の算出やワイブル分布の適用等のデータ処理過程におけるバイアスの一部が相殺され、気候変動の影響をより明確に把握することが可能となると期待したことによる。なお、96水系の比の度数分布を図-8に、一覧表を表-2に、日本地図上に示した平面分布を図-9に示す。

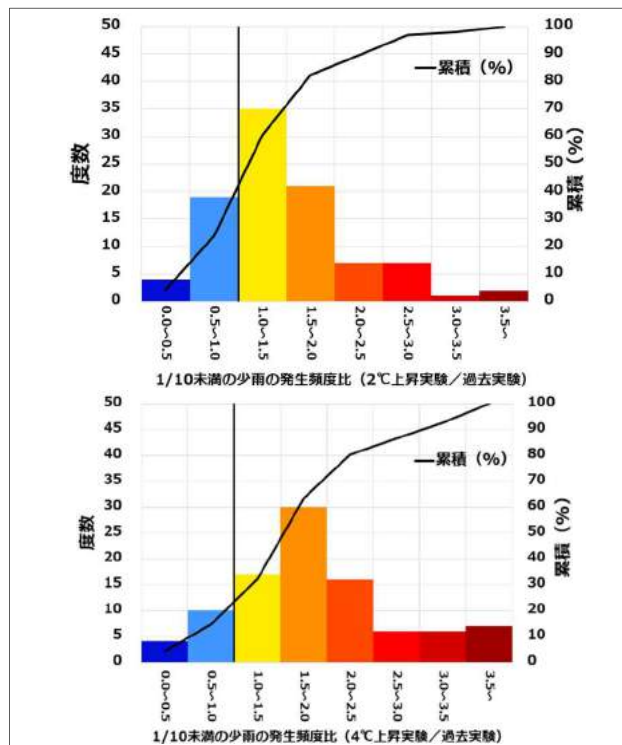


図-8 年平均流域降水量が年非超過確率1/10降水量を下回る頻度の過去実験に対する将来実験の比の度数分布図（上図:2℃上昇実験/過去実験、下図:4℃上昇実験/過去実験）

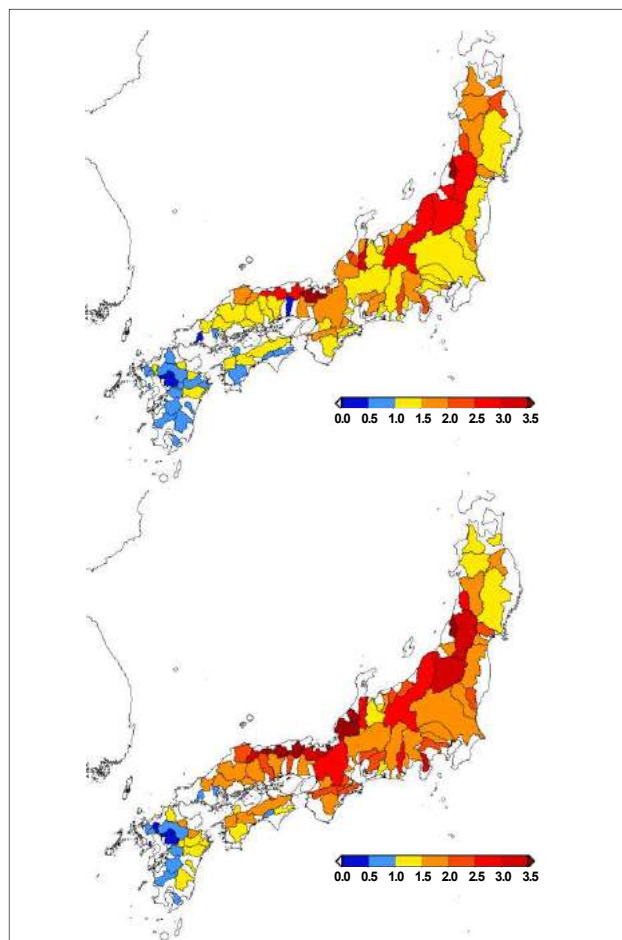


図-9 年平均流域降水量が年非超過確率1/10の降水量を下回る頻度の過去実験に対する将来実験の比の平面分布図（上図:2℃上昇実験/過去実験、下図:4℃上昇実験/過去実験）

表-2 年平均流域降水量が年非超過確率1/10降水量を下回る頻度の過去実験に対する将来実験の比の一覧

水系	2℃上昇 過去	4℃上昇 過去	水系	2℃上昇 過去	4℃上昇 過去
岩木川	1.92	1.42	円山川	2.86	4.89
高瀬川	1.94	1.32	加古川	1.63	1.84
馬淵川	2.00	1.54	揖保川	0.24	2.03
北上川	1.48	1.48	紀の川	1.50	2.15
鳴瀬川	1.80	2.40	新宮川	1.11	1.84
名取川	1.47	1.85	九頭竜川	1.94	3.55
阿武隈川	1.34	1.91	北川	2.37	3.85
米代川	1.64	1.25	千代川	2.97	5.29
雄物川	1.94	1.67	天神川	2.79	5.27
子吉川	2.33	2.67	日野川	1.66	3.15
最上川	2.87	3.40	斐伊川	1.50	2.11
赤川	3.94	3.81	江の川	1.05	1.77
久慈川	1.56	2.44	高津川	1.26	1.88
那珂川	1.46	1.71	吉井川	1.11	1.84
利根川	1.32	1.65	旭川	1.28	2.00
荒川	1.22	1.75	高梁川	1.02	1.56
多摩川	1.41	1.70	芦田川	1.22	1.81
鶴見川	1.85	2.15	太田川	1.03	1.58
相模川	1.31	2.06	小瀬川	0.56	0.83
富士川	2.52	1.70	佐波川	0.15	0.68
荒川	2.87	3.37	吉野川	1.13	1.68
阿賀野川	2.61	2.94	那賀川	0.90	1.10
信濃川	1.94	2.21	土器川	1.26	2.23
関川	1.59	2.24	重信川	0.83	1.40
姫川	1.69	1.71	肱川	1.06	1.67
黒部川	1.43	1.23	物部川	0.94	0.97
常願寺川	1.26	1.38	仁淀川	1.03	1.66
神通川	3.03	2.90	渡川	0.80	1.34
庄川	1.86	2.92	遠賀川	0.85	1.20
小矢部川	2.39	3.85	山国川	1.18	1.97
手取川	2.13	3.48	筑後川	0.71	0.66
梯川	2.40	3.37	矢部川	0.44	0.44
狩野川	1.59	1.76	松浦川	0.61	0.61
安倍川	1.35	1.82	六角川	0.54	0.54
大井川	2.17	2.51	嘉瀬川	1.21	0.45
菊川	1.11	1.63	本明川	0.51	0.35
天竜川	1.19	1.65	菊池川	0.32	0.21
豊川	1.32	1.45	白川	0.74	1.00
矢作川	1.60	2.14	緑川	0.78	0.83
庄内川	1.65	2.00	球磨川	0.62	0.88
木曽川	1.39	1.82	大分川	1.03	1.77
鈴鹿川	1.11	1.76	大野川	0.94	1.34
雲出川	1.54	2.08	番匠川	0.94	1.34
櫛田川	1.47	2.21	五ヶ瀬川	1.00	1.42
宮川	1.26	2.09	小丸川	0.83	1.29
由良川	3.71	3.49	大淀川	0.89	1.11
淀川	1.76	2.78	川内川	0.59	0.65
大和川	1.32	1.88	肝属川	0.89	0.94

96 水系の平均

最大値、最小値に着色

96 水系平均	過去実験	2℃上昇実験	4℃上昇実験
頻度	35.83 回 /360 年	51.75 回 /360 年	68.25 回 /360 年
過去実験 に対する比	—	1.47 倍	1.93 倍

3. 考察

(1) 計算方法について

本報告においては、地域気候モデルであるSI-CAT D D5TSK（アンサンブル数は360年）を対象にDual-Window補正によるバイアス補正を行った上で、ティーセン法を用いて流域平均降水量を整理した。これにワイブル公式を適用し、96の1級水系における気候変動による年非超過確率1/10の少雨年の発生頻度を推定した。公表データを対象として、論文等で具体内容が示されている手法

を用いて計算しており、追跡可能性が担保されていると考えている。

(2) 結果・課題について

上述のとおり、「河川砂防技術基準 計画編 技術資料」では、河川の適正な利用及び流水の正常な機能の維持のために必要な流量の確保について、原則として10ヶ年第1位相当の渇水時においても必要な流量を確保することとしている。本報告における「96の1級水系の年流域平均降水量が非超過確率1/10となる少雨の発生頻度」とは、この10ヶ年第1位相当と同程度の確率規模における河川流量の外力となる降水量の変化を計算したものである。

その計算結果は、過去実験との比較では、2℃上昇実験では過去実験の0.15倍～3.94倍となり、平均値は1.47倍、標準偏差は0.72倍となった。4℃上昇実験では過去実験の0.21倍～5.29倍となり、平均値は1.93倍、標準偏差は1.00倍となった。

2℃上昇実験と4℃上昇実験の比較では、上述のとおり1/10未満の少雨の発生頻度の平均値が1.47倍から1.93倍と上昇しているほか、図-8からは、2℃上昇実験では1.0～1.5倍の度数が最も多いのに対して、4℃上昇実験では1.5～2.0倍の度数が最も多い結果となった。各頻度の水系数では、少雨の発生頻度の比が1倍、1.5倍、2倍を超過する水系は、2℃上昇実験で96水系中72水系、36水系、16水系に対し、4℃上昇実験では96水系中81水系、65水系、33水系となり、いずれも2℃上昇実験に比して4℃上昇実験の水系数が上回った。

また、地域的には、図-9から、少雨の発生頻度の比は九州以外の殆どの水系で大きくなり、日本海側の水系では2℃上昇で1.5倍を超える傾向にあることが視覚的に判別出来ると考えている。なお、日本海側の頻度の上昇傾向は、1.で示したKawase et al(2015)の報告と整合すると考えている。今後の課題として、少雨の発生頻度の比の地域特性を詳細に分析し、その結果を気候変動下での気象現象の地域特性と紐づけて分析・理解することが課題と考えている。

これらから、「96の1級水系における気候変動による非超過確率1/10の少雨年の発生頻度は、多くの水系で増加傾向となる」ことが確認されたと考える。この確認は、「気候変動の影響により、非超過確率1/10の低水流量が多くの水系で減少傾向となる可能性がある」ことや、「気候変動の影響により、これまでに開発された水利流量・維持流量が多くの水系で減少傾向となる可能性がある」ことを示すと考えている。

これらを踏まえると、今後の河川計画・河川管理においては、「気候変動による既設ダムの利水容量・不特定容量の機能への影響を評価することが望ましい」こと、「将来の水資源開発に関する中長期的な計画においては、気候変動の影響を考慮することが望ましい」ことを提起する。

また、今後の課題として、気候変動による渇水リスクへの影響をより直接的に把握するために、降水量等を外力として流出解析により河川流量を算出することが課題になるものと考えている。具体的には、気温の上昇により変化する蓋然性が高いものと想定する蒸発散量や積雪量・融雪量の変化を反映させた上で、渇水時の河川流量の算出を想定する。流出解析の誤差による不確実性を踏まえた上で、渇水リスクをより直接的に把握することで水資源に関する中長期的な計画のより実効的な立案が可能となると考えている。

4. まとめ

本報告では、96の1級水系を対象に、地域気候モデルの出力を用いて、年流域平均降水量が非超過確率1/10以下となる少雨の発生頻度を計算した。その結果、96の1級水系における気候変動による非超過確率1/10の少雨年の発生頻度は、多くの水系で増加傾向となることが確認されたものとする。その結果、気候変動の影響により、これまでに開発された水利流量・維持流量は、多くの水系で減少傾向となる可能性があると推測する。そのため、将来の水資源に関する中長期的な計画では、気候変動の影響を考慮することが望ましいと提起する。

謝辞： 本研究では文部科学省の気候変動適応技術社会実装プログラム(SI-CAT)により地球シミュレータを用いてd4PDFを力学的ダウンスケーリングしたデータを使用した。また、バイアス補正手法については、京都大学防災研究所気候変動リスク予測・適応研究連携研究ユニット渡部哲史特定准教授にはご助言を頂いた。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 外務省: 持続可能な開発目標(SDGs)と日本の取組, https://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/oda/sdgs/pdf/SDGs_pamphlet.pdf, (2023年2月26日閲覧)
- 2) 環境省: 気候変動影響評価報告書総説, pp.48, 2021, <https://www.env.go.jp/content/900516663.pdf>, (2023年2月26日閲覧)
- 3) H. Kawase, T. Sasai, A. Murata, M. Nosaka, and N. Ishizaki: Future changes in winter precipitation around Japan projected by ensemble experiments using NHRCM, Journal of the Meteorological Society of Japan, Vol. 93, p571-580, 2015.
- 4) 伊藤昌資, 菅野豊他: 気候変動が淀川水系の渇水リスクに及ぼす影響, 水文・水資源学会誌, Vol.33, No.3, p.83-97, 2020.
- 5) 気候変動適応計画, pp.49, <https://www.env.go.jp/content/900>

- 449799.pdf, (2023年2月26日閲覧)
- 6) 淀川水系における水資源開発基本計画, pp.9, 2022, <http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/mizsei/content/001483670.pdf>, (2023年2月26日閲覧)
- 7) 国土交通省 水管理・国土保全局: 河川砂防技術基準 計画編 技術資料, pp.2-22, 2021, https://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/gijutsu/gijutsukijunn/keikaku/pdf/gijutsushiryoku_02.pdf, (2023年2月26日閲覧)
- 8) 大気近未来予測力学的ダウンスケーリングデータ(東北から九州) by SI-CAT (SI-CAT DDS5TK) の概要, 2020, http://www.restec.or.jp/si-cat/_public/202003b/SI-CAT%20DDS5TK%E6%A6%82%E8%A6%81_200228.pdf, (2023年2月26日閲覧)
- 9) 地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース, <https://www.miroc-gcm.jp/d4PDF/index.html>, (2023年2月26日閲覧)
- 10) H. Kawase, T. Sasai, T. Yamazaki, R. Ito, K. Dairaku, S. Sugimoto, H. Sasaki, A. Murata, and M. Nosaka: Characteristics of Synoptic Conditions for Heavy Snowfall in Western to Northeastern Japan Analyzed by the 5-km Regional Climate Ensemble Experiments, Journal of the Meteorological Society of Japan, 96(2), p161-178, 2018.
- 11) DIAS: データ統合・解析システム (Data Integration and Analysis System), <https://diasjp.net/>, (2023年2月26日閲覧)
- 12) 気候変動適応情報プラットフォーム: 気候予測情報のバイアス補正とは?, https://adaptation-platform.nics.go.jp/climate_change_adapt/qa/05.html, (2023年2月26日閲覧)
- 13) 渡部哲史: 気候モデル出力値のバイアス補正(1) 特徴に基づく手法の整理, 水文・水資源学会誌, Vol.33, No.6, pp.243-262, 2020.
- 14) S. Watanabe, M. Yamada, S. Abe, and M. Hatono: Bias correction of d4PDF using a moving window method and their uncertainty analysis in estimation and projection of design rainfall depth, Hydrological Research Letters, 14(3), p117-122, 2020.
- 15) 杉山博信: Adahi Botou, Andrew C. Whitaker, 平井省吾, 水源域における流況評価のための確率流況曲線に関する考察, 農業土木学会論文集, No. 213, pp.33-4, 2001.
- 16) 宝馨, 宝棹琢馬: 水文頻度解析における確率分布モデルの評価基準, 土木学会論文集, 第393号/II-9, pp.151-160, 1988.
- 17) 国土交通省 水管理・国土保全局: 河川砂防技術基準 調査編, 第3章1節, pp.9-10, https://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/gijutsu/gijutsukijunn/chousa/pdf/chousa_all_220721.pdf, (2023年2月26日閲覧)
- 18) 寶馨: 大標本時代の水文頻度解析手法ーリターンピリオドを超えるようなサイズの標本に対する極値データ解析ー, 京都大学防災研究所年報, 第49号B, No.49, pp.7-12, 2006. (2023. 3. 24受付)