

将来変化倍率の逆転に着目した d4PDF 領域実験 における 2°C と 4°C 上昇の極端降水量の考察

渡部 哲史¹・内海 信幸²・北野 利一³・中北 英一⁴

¹ 正会員 京都大学特定准教授 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)
E-mail: watanabe@hmd.dpri.kyoto-u.ac.jp (Corresponding Author)

² 正会員 京都先端科学大学助教 ナガモリアクチュエータ研究所
(〒615-8577 京都府京都市右京区山ノ内五反田町 18)
E-mail: utsumi.nobuyuki@kuas.ac.jp

³ 正会員 名古屋工業大学教授 工学系研究科 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)
E-mail: kitano@nitech.ac.jp

⁴ 正会員 京都大学教授 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)
E-mail: nakakita@hmd.dpri.kyoto-u.ac.jp

本研究では大規模アンサンブルデータによる将来予測実験結果において、2°C 上昇実験結果における年最大日降水量の極値が、4°C 上昇実験におけるそれを逆転する場合について考察を行った。分析の結果からこのような逆転は一部の海面水温パターンの実験では日本域の 2 割から 3 割程度で生じることが明らかとなった。この原因の一つとして、逆転が多数生じる海面水温パターンでは 2 つの昇温実験における降水量の差が他の海面水温パターンの実験よりも小さいことを示した。さらに、治水計画の検討などこのような逆転が問題となる場合への対応として two-pass バイアス補正手法により逆転を防ぐ方法を示すと共に、そのような補正ではモデル出力値の 50% 近い値が加減される場合があり、注意が必要であることを示した。

Key Words: precipitation, climate change, ensemble simulations, d4PDF, bias correction

1. はじめに

令和 3 年 4 月に「気候変動を踏まえた治水計画の在り方」提言（以下「提言」と記す）が改定された¹⁾。この改定では全球平均気温 4 度上昇時に加えて、2 度上昇時を想定した降雨量の変化倍率が確定値として示されている。気候変動を踏まえた治水計画を検討するための基礎情報であり、その特性について理解することは激甚化・頻発化する水害への対応を検討することに有益である。

提言における降雨量変化倍率は、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 database for Policy Decision making for Future climate change (d4PDF)^{2) 3)} から得られる情報を基に算出されている。この d4PDF の特徴は多数のアンサンブル実験結果が収録されていることである。現在再現および将来予測のそれぞれで合計数千年に相当する実験結果が利用可能である。治水計画においては数十年から数百年に一度といった低頻度の事象に着目する必要があるため、この d4PDF から得られる将来変化倍率は治水計画に重要な情報を提供する。なお、d4PDF は全

球規模の実験とその結果を日本域周辺においてダウンスケーリングした領域実験から構成されるが、本稿では特に断りがない場合、領域実験の結果を指す。

提言においては 2°C 上昇した場合の降雨量変化倍率は 4°C 上昇時のそれよりも低く設定されている。これは、気温の上昇にともない大気中の水蒸気量が増え、極端な降水量の頻度や強度を高める⁴⁾という点から合理的なものである。しかしながら、特定の地域において数百年に一度といった稀な事例に着目して d4PDF の結果を解析した場合、2°C 上昇実験の予測結果が 4°C 上昇実験の予測結果を上回る例があることが報告されている⁵⁾。ただしこの結果から、解析した地域では極端な降水に関しては 2°C 上昇実験時の方が 4°C 上昇実験時よりも深刻であると結論づけることは早急である。なぜならば、同じ気候においても極端な降水が発生するか否かには偶然性がある。例えば、2°C 上昇実験時には数千年に 1 度の規模の事象が発生し、4°C 上昇実験時にはそれが生じない場合には、2°C 上昇実験時の結果が 4°C 上昇実験時の結果より大きくなる可能性が高い。

提言における降雨量変化倍率は、北海道北部や九州北西部といったように、降雨特性が類似している地域区分で推計されている。この区分の方法や検証に関しては議論⁹⁾が行われているが、日本全国を対象とする治水計画を策定する上で必要かつ適切な処置である。気候変動の影響は特定のグリッドのみではなく広く生じるものであるため、地域区分に応じた検討を行うことで、地域に共通する気候変動の影響を考慮することが必要である。

地域区分の倍率が有益である一方で、各流域においてd4PDFから得られる出力値を基に流出解析を行う際には個々のグリッドの変化情報が重要となる。すなわち、上述の2℃上昇時の予測結果が4℃上昇時の予測結果を上回る事例が生じ得る。このことは、提言により示された将来変化倍率と各流域で推計した将来変化倍率に差異が生じることを意味しており、治水計画の実務上無視できない課題である。全国で示された将来変化倍率と各流域で算出した値との整合性をとる方法、またその方法の適切さについて検討することが必要である。

限られた実験結果を基に、異なる昇温設定の下での実験結果を偶然性も踏まえて考慮することは、従前より気候変動予測情報の利用における重要な課題である。特に第5期結合モデル相互比較計画(CMIP5)の出力値などアンサンブル実験数が数個程度の場合、低頻度の事象について扱う際には実験結果から得られた値が気候変動に起因するものか、稀な事象が偶然実験結果に含まれたことによるものかを判断することは困難であった。この課題への対処の一つとして、バイアス補正の枠組みにおいて、現在再現実験結果の時系列にクオンタイルマッピング法により将来変化量を加える方法が提案されている⁷⁾。過去の時系列に対して、ピークなどのタイミングは変えることなく、その強度のみを目的の気候変動下でのものに变化させるものである。この方法をd4PDFに拡張した方法としてtwo-pass法⁸⁾がある。治水計画など全国での傾向と流域での傾向に整合性が求められる場合にはこのような方法の活用が必要である。

以上の課題を踏まえ、本研究ではd4PDF領域実験における2℃と4℃上昇それぞれから得られる降水量を対象に、1)将来変化倍率の逆転がどの程度生じているか、2)逆転が生じる可能性はどの程度あるかの2点を解明する。さらに3)two-pass法により逆転を防ぐ補正を行った場合の予測結果への影響に関する推計について推計する。アンサンブル数の異なる2つの昇温実験結果間で低頻度の降水量について考察する点、および逆転を防ぐバイアス補正について考察する点が本研究の新規点である。

2. データ

本研究ではd4PDFの20 km解像度の領域実験結果から

得られるグリッド単位での年最大日単位降水量に着目する。空間解像度は20kmであり、現在再現実験(1951年から2011年までの60年間)、産業革命(1850年)以前比全球平均気温2℃および4℃上昇時の将来予測実験の3つの実験結果を用いる。このうち、将来予測実験に関しては6つの異なる海面水温(SST)将来変化の空間パターン(CC,GF,HA,ML,MP,MR)がCMIP5参加モデルから与えられており、2℃(4℃)上昇実験において、それぞれのSSTに対して9(15)個のアンサンブル実験が行われている。したがって、合計年数は現在期間3000年相当(60年×50アンサンブル)、2℃上昇実験3240年相当(60年×6SST×9アンサンブル)、4℃上昇実験5400年相当(60年×6SST×15アンサンブル)である。SSTパターンや実験の詳細などはd4PDFの活用をまとめた総説⁹⁾および利用の手引き¹⁰⁾を参照されたい。

各グリッドにおける年最大日降水量をアンサンブル実験やSSTパターンの別を考慮せず、すべての年数で平均をとったものに対して沖縄と離島部を除く日本全域で空間平均したところ、2℃上昇時におよそ1.13倍(SSTによる幅1.11~1.16)、4℃上昇時におよそ1.28倍(SSTによる幅1.23~1.33)となった。気候モデル解像度や時間・空間平均方法、2℃上昇実験の推計方法など推計方法に異なる点があるものの、提言と同様の変化倍率となることが確認できた。変化倍率の空間パターン(図-1)についても、北海道や九州で高い値となっており提言と同様の傾向が確認できた。この点を踏まえて以下、本研究では各グリッドにおける値を対象として分析する。

3. 将来変化倍率の逆転

年最大日単位降水量を対象として、2℃上昇実験結果と4℃上昇実験結果を比較した。ここでは治水計画上特

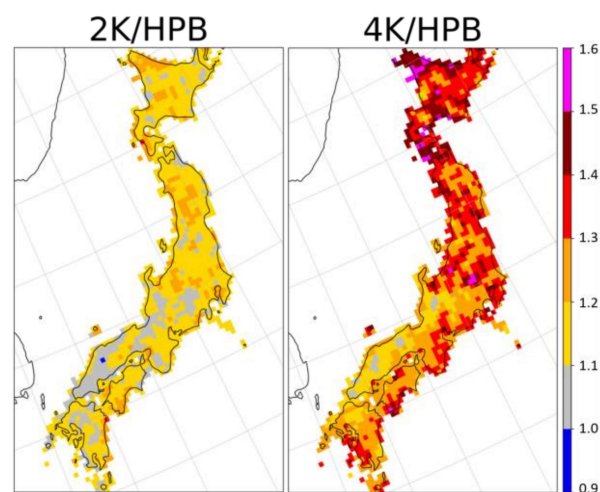


図-1 年最大日単位降水量の将来変化倍率。2℃上昇実験(左図)、4℃上昇実験(右図)における倍率。

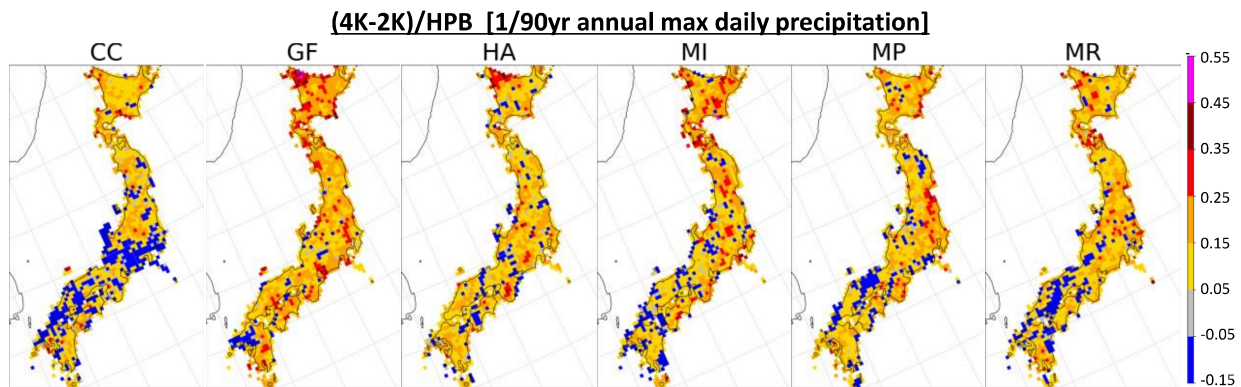


図-2 将来変化倍率差の現在再現実験比. 年最大日単位降水量 (1/90 年) の将来変化倍率の差 (4℃上昇-2℃上昇) を現在再現実験で除した比を 6 つの SST パターン別で推計した結果.

に重要となる低頻度降水量に着目する意図から、90 年に 1 度生じる降水量を対象として解析を行った. この再現期間は、各 SST パターンにおいてアンサンブル実験結果を合わせて考えた際の年数 (2℃上昇 540 年相当, 4℃上昇 900 年) を考慮した際に、順序統計量として、上位 6 位 (2℃上昇), 10 位 (4℃上昇) の降水量に該当する.

各 SST パターンにおいて両者を比較したところ、その結果は SST パターンにより傾向が異なった (図-2). どの SST パターンにおいても逆転が生じているが、特に逆転 (図-2 において負の値で表示されている) が多く生じた SST パターン(CC)では中部や西日本を中心に逆転が多数生じている. 全体的な傾向として東北や北海道では逆転の発生割合は少ない. これらの地域は 4℃上昇における将来変化倍率の大きい地域と一致している. またすべての SST パターンで逆転している地域は僅かであり、SST パターンによる予測結果の差が大きいことが示された.

次に今回対象とした日本全域の陸域グリッド (合計 1048) の何割でこの逆転が生じているかについて、再現期間と共に推計した (図-3). 最も逆転の多い SST パターン(CC)では、図-2 で示した 90 年に 1 回の再現期間においておよそ 3 割程度のグリッドで逆転が発生しており、そのほかの SST パターンでは最も少ないもの(GF)で 5% 程度、残りが 10~20%程度で逆転が生じていた.

どの SST パターンにおいても低頻度のものほど逆転が多く生じており、再現期間が短くなり高頻度の事象となるにつれて逆転数が減少している. これは低頻度のものほどサンプル数が少ないため、逆転が生じやすいという点を踏まえると妥当と考えられる. 特に HA, MP, GF の 3 つの SST においては 15 年に 1 度程度よりも高頻度の事象においては逆転グリッド数は 0 に近づき、逆転にサンプル数の影響が大きいことが示唆された. 一方で、2 つの SST パターン(CC, MI)では高頻度の事象においても一

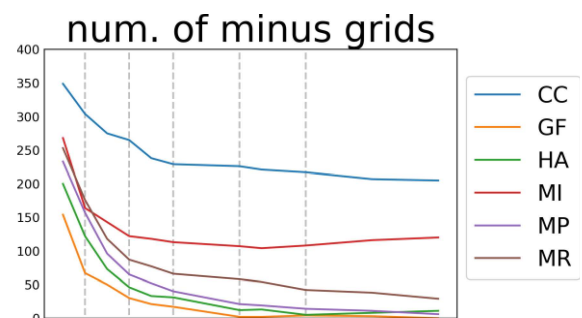


図-3 再現期間と逆転発生グリッド数. 年最大日単位降水量の再現期間 (横軸) に対する逆転グリッド数 (縦軸) を 6 つの SST パターン別に図示.

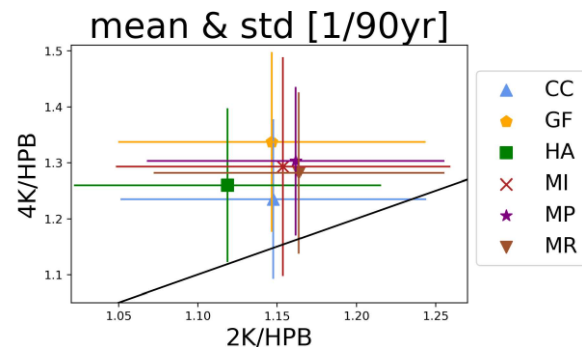


図-4 各 SST パターンの各昇温量における将来変化倍率. 全対象グリッドの平均値が点、標準偏差の幅を線として、2℃上昇時の将来変化量 (横軸) と 4℃上昇時の将来変化量 (縦軸) 上に図示. 両者の倍率が等しくなる点を黒色直線として示した.

定の逆転が存在することが示された.

各 SST パターンによる結果の差を 2℃上昇実験の結果と 4℃上昇実験の結果の対応関係 (図-4) から考察すると、逆転が多く生じている SST パターン (CC) では 4℃上昇時の平均値が他よりも低く、次に逆転が多く生じている SST パターン (MI) では 4℃上昇時の標準偏差が他よりも大きいことが示された. 一方で逆転の少ない SST

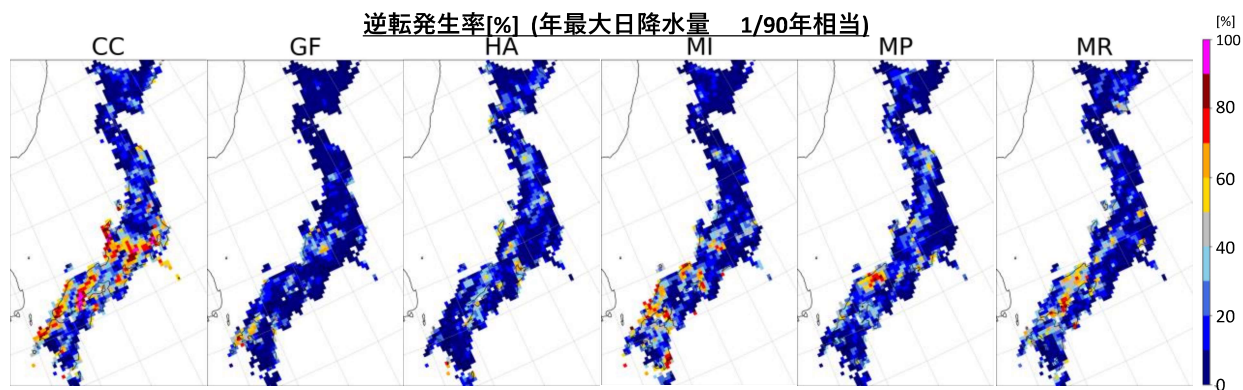


図-5 将来変化倍率に関する逆転発生率。年最大日単位降水量のうち再現期間 90 年に相当するものに関して 2℃上昇実験結果が 4℃上昇実験結果よりも大きくなる割合を繰り返し実験から推計した結果。

パターン（HA,GF）は両方の昇温時の変化倍率が小さい（HA）、大きい（GF）という差はあるものの、2つの倍率の差が他よりも大きいという特徴がみられた。このように SST パターンによる差が 2つの昇温実験における領域平均と分散により説明可能であることが示された。

4. 逆転が生じる割合に関する統計的な考察

逆転が広く発生していること及び SST パターンにより一部の地域で集中的に発生していることを踏まえて、この逆転が稀な現象の有無に関わらずどの程度生じやすいものであったかを検討した。逆転の有無には、対象とする実験結果における非常に稀な値の有無が大きく影響すると考えられる。ここで、ある気候の下での稀な値の発生は、気候システムが有する自然の揺らぎ（内部変動）が影響する点に注意が必要である。この点を踏まえ、ある気候の下で、どのような規模の降水量が生じたかという点を考慮すべく、降水量に関するイベントのサンプリングに伴うばらつきがどの程度かという点を検討した。

前章における検討では順序統計量により検討を行った。つまり、再現期間が同じとなる順位のもの进行比较した。これに対してサンプリングに伴う差を評価するために、d4PDF から得られた各 SST パターンにおける各グリッドの年最大降水量に対して一般化極値分布を適合し、2℃上昇実験において 540 個、4℃上昇実験から 900 個の降水量を適合した一般化極値分布からランダムに抽出する。それぞれ得られた降水量から再現期間に相当する順位の降水量を抜き出し比較する。この比較を 10000 回繰り返すことで、各グリッドで逆転がどの程度生じるかを推計した（以降、本実験を繰り返し実験と称する）。

繰り返し実験から得られた逆転の割合（図-5）から、図-2 において示された逆転が、どれくらいの割合で生じるものであったかを評価することが可能である。図-2 において最も多くの逆転が生じた SST パターン(CC)では、

特に瀬戸内や北陸、中部において 80%以上の高い割合となっており、2℃上昇実験結果における値が高い割合で 4℃上昇実験結果を上回ることが示された。その他の SST パターンにおいては 50%を超える地点も一定数確認できる一方で多くの地点がそれを下回っていた。

繰り返し実験の結果においても SST パターンにより傾向が大きく異なっていた。前述の高い割合を示した瀬戸内に関しては他の SST においては 0%に近い値であり、他の地域よりも値が低い。また、逆に鳥取付近では全体としては逆転が少ない SST パターン(MP)において割合が高くなっており、全国的に逆転の多い SST パターン(CC)の結果においては他地域よりも低い割合となっている。

繰り返し実験の結果を基に、年最大日降水量が逆転する割合が 50%以上となるグリッド数を各再現期間に対して求めた（図-6）。全体的な傾向は図-3 で示した結果と同様であることが確認できた。一方で、特に低頻度の降水量などにおいて図-3 に示した結果よりも該当グリッド数が少なくなっている。つまり、前章において示した逆転の原因に、順序統計量を用いることによるサンプ

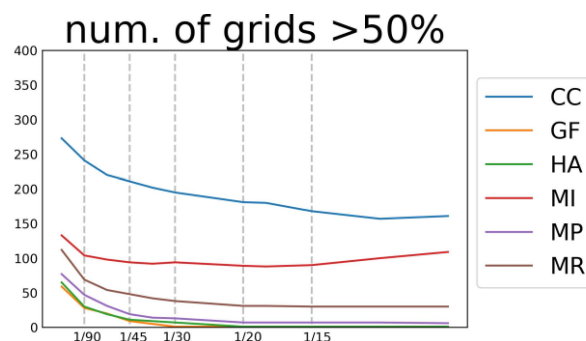


図-6 繰り返し実験における逆転発生割合が 50%を超えるグリッド数。年最大日単位降水量の再現期間（横軸）に対する逆転発生割合が 50%を超えるグリッド数（縦軸）を 6つの SST パターン別に図示。

リングの影響があることが示唆されたと言える。

数千年規模の実験結果を有する大規模アンサンブル実験結果では、数百年に1度の事象に関しても複数のサンプルが得られることから順序統計量が扱われる場合も多い。しかしながらここで示したように、逆転が問題となるような場合にはパラメトリックな方法を用いることが必要になると考えられる。治水計画において得られた降水量を基に流出解析を行う場合についても、個々の降水量に着目することに加えて複数の降水量から得られる結果を統計的に検討するなどの工夫が必要となる。例えば再起年数に該当する降水量に注目する際に、当該の順位で得られる極値の確率分布の振る舞いを分析する方法¹⁾などが有益と考えられる。

5. 逆転を防ぐ two-pass 法による補正

極端な降水量に関して一定の割合で 2℃上昇実験結果と 4℃上昇実験結果の間で逆転が生じることが示されたが、治水計画においてはこれらの逆転は提言で示された倍率との整合性という観点からも対策が必要である。このための対応方法として two-pass バイアス補正⁸⁾の活用を検討した。この two-pass バイアス補正はバイアス補正手法の分類¹²⁾において将来変化量の保存が可能な生起率型である。バイアス補正は、 y を参照値、 x をモデル出力値、 $\cdot'$ で将来期間の値としたとき、

$$y' = x' + y - x \quad (1)$$

とする操作を行うことが一般的である。ここでは、将来変化量とバイアスを合わせる形で操作が行われている。

一方、two-pass バイアス補正では、

$$y' = x + (x' - x) + (y - x) \quad (2)$$

とする操作を行う。このことで、(2)式第2項の将来変化量と第3項のバイアスに分解でき、将来変化量を陽に調整することが可能となる。この(2)式第2項に全国で示された逆転が生じていない 2℃上昇実験と 4℃上昇実験の将来変化量を与えることで、両者で逆転が生じないようにすることができる。

本稿では活用の一例として、逆転を防ぐために、2℃および 4℃上昇実験における変化倍率を日本全国で一律と仮定した場合について考察した。これは提言において各昇温実験の結果として示された倍率が保たれることと同様の設定である。ここでは、各 SST パターンの各昇温量における将来変化倍率が保存されるように補正を行った。すなわち(2)式の第2項の将来変化量として図-4において示された倍率（各 SST パターンの点に該当する）を与えた。

前章までと同様に年最大日降水量のうち再現期間が 90 年に該当するものに対して、補正前後による値の変化を求めた（図-7）。地域によりそれぞれの昇温実験結

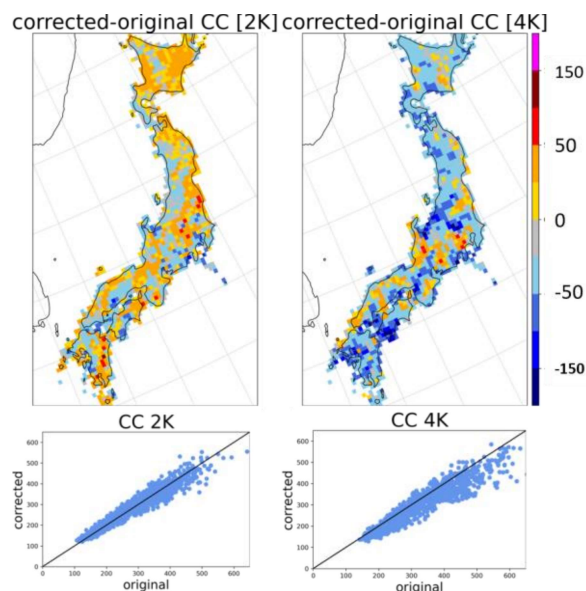


図-7 補正による年最大日降水量の変化 [mm/day]. 年最大日降水量（再現期間 90 年）の補正前後の値を 2℃上昇（左列）、4℃上昇（右列）に関して空間分布（上行）と横軸を補正前、縦軸を補正後とした各グリッドの結果に関する散布図（下行）に図示した。

果における補正による変化の正負が異なる。図-2 において逆転が生じていた瀬戸内に着目すると、2℃上昇実験においては補正により年最大日降水量が減少する一方で、4℃上昇実験においては増加しており、逆転が解消される方向の補正が行われたことが確認できる。

全国的な傾向を見た場合、特に 4℃上昇実験においては、補正により値が減少している点が多い傾向がみられた。特に顕著な地域においては 50%近く減少される結果となった。本手法は各地において様々に示された将来変化倍率を全国平均として示された値へと修正するものである。この操作は治水計画という側面では、2℃上昇と 4℃上昇の逆転を生じさせないという点や、全国で一律の倍率を保つという観点で正当化される。ただし、d4PDF によって示した各地域における変化情報を日本全域平均することで無視するという操作を行っており、その操作は一部の地域ではかなり大きな値となっている。従って、手法の適用には注意が必要であると言えよう。

6. まとめ

本研究では、d4PDF から得られる年最大日降水量を対象として、2℃上昇実験時と 4℃上昇実験時の極端降水量の逆転について3点を明らかにした。

第一に、これまで一部の流域で示されていた逆転と同様の現象が全国的に発生するものであることを明らかにした。将来変化倍率の逆転は、SST パターンにより結果が大きく異なること、最も逆転の多い SST パターンでは、

再現期間 90 年の場合におよそ 3 割程度の地点で逆転が発生していることを示した。特に、中部、北陸、中国、四国、九州北部では、隣接したグリッドで逆転が多数発生しており、地域に関連する要素が逆転に影響していることが示唆された。第二に、一部の SST パターンにおいては、2°C 上昇実験と 4°C 上昇実験の差が小さく、逆転が生じやすい傾向があり、偶然性だけでは説明が難しいことを明らかにした。第三に、two-pass 法により逆転が有効に修正される一方で、地域によっては予測値の半分に近い修正が行われるため適用に注意が必要であることを明らかにした。

本研究では実務上の利用を想定し、全国で示された将来変化倍率を保存するバイアス補正手法として two-pass 法を示した。ただし、その修正に伴う値の変化は大きく、各流域で得られた値ではなく、全国で示された将来変化倍率を用いることの課題が明らかとなった。各流域に即した将来変化情報の設定が治水計画における今後の課題と言えよう。本研究が、全国的な視点で示された提言における知見を各流域において適用する上で有益となることを期待したい。

謝辞：本研究は、文部科学省委託事業統合的気候モデル高度化研究プログラム「統合的ハザード予測 (JPMXD0717935498)」，JSPS 科研費 (18K13834, 18H01543, 21H01442, 21H04571) により実施された。本研究では、文部科学省による複数の学術研究プログラム (「創生」，「統合」，「SI-CAT」，「DIAS」) 間連携および地球シミュレーターにより作成された d4PDF を使用した。

参考文献

- 1) 国土交通省，気候変動を踏まえた治水計画のあり方提言，2021
- 2) Mizuta R. et al.: Over 5,000 Years of Ensemble Future Climate Simulations by 60-km Global and 20-km Regional Atmospheric Models. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 98, 1383–1398, 2017.
- 3) Fujita, M. et al.: Precipitation changes in a climate with 2-

- K surface warming from large ensemble simulations using 60-km global and 20-km regional atmospheric models. *Geophysical Research Letters*, 46, 435–442, 2019.
- 4) Utsumi N, Seto S, Kanae and Oki T: Dose higher surface temperature intensity extreme precipitation? *Geophysical Research Letters*, 38, L16708, 2011.
- 5) 貝塚正邦, 嶋田 嵩弘, 上原 勇一, 金本 裕史, 山本朗宜, 島田高伸, 佐伯勇輔, 栗山康弘, 渡部 哲史: 大量アンサンブル気候予測データの空間解像度詳細化における治水計画への活用上の課題, 土木学会論文集 B1(水工学), 印刷中.
- 6) 本田洋平, 渡部哲史, 知花武佳: アンサンブル気候予測データベースを用いた降水量地域区分の妥当性に関する検証, 第 28 回地球環境シンポジウム講演集 p69-73, 2020.
- 7) Watanabe S. et al: Application of performance metrics to climate models to projecting future river discharge in the Chao Phraya River basin, *Hydrological Research Letters* 8(1): 33-38, 2014
- 8) Watanabe S., Yamada M., Abe S., and Hatono M.: Bias correction of d4PDF using a moving window method and their uncertainty analysis in estimation and projection of design rainfall depth. *Hydrol Res Lett* 14(3):117–122. 2020.
- 9) Ishii M. and Mori N.: d4PDF: large-ensemble and high-resolution climate simulations for global warming risk assessment. *Progress in Earth and Planetary Science*, 7, 58, 2020
- 10) 文部科学省, 気象庁気象研究所, 東京大学大気海洋研究所, 京都大学防災研究所, 国立環境研究所, 筑波大学, 海洋研究開発機構: 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利用手引 (抜粋), 2015.
- 11) 北野利一, 渡部哲史, 小林健一郎: 単純極値変数と超過数の視点から見た降水量の極値の数理特性, 土木学会論文 B1(水工学), 印刷中.
- 12) 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, 33(6), 243–262, 2020.

(Received June, 30, 2021)

(Accepted September, 3, 2021)

A DISCUSSION ON EXTREME PRECIPITATION UNDER 2°C AND 4°C WARMING IN d4PDF FOCUSING ON THE INVERSION OF FUTURE CHANGE

Satoshi WATANABE, Nobuyuki UTSUMI, Toshikazu KITANO,
and Eiichi NAKAKITA

This study discusses the case in which the maximum annual daily precipitation is larger in the 2-degree warming experiment than in the 4-degree warming experiment in the future projection by large ensemble dataset. The results show that such inversions occur in about 20% to 30% of the Japanese area in some experiments. One of the reasons is that the difference in results between two warming experiments is smaller in the SST pattern where many inversions occur than in the other SST pattern experiments. In order to avoid such an inversion problem, a two-pass bias correction method is presented. However, it is important to note that the bias correction can result in a correction of up to 50% before and after the correction.