気候変動適応のための気候モデルバイアス補正における課題とその克服への取組

OVERCOMING THE CHALLENGES OF BIAS-CORRECTION IN CLIMATE CHANGE ADAPTATION PLANNING

ゴメス マルティン*・松村 明子*・小川田 大吉* Martin GOMEZ-GARCIA, Akiko MATSUMURA and Daikichi OGAWADA

Considering the effects of climate change is gradually becoming a standard requirement in several areas of engineering and consultant services. However, the information generated by the climate models cannot always be used directly in impact models without several computation processes like bias-correction. In this work, we demonstrate how a new method of bias-correction overcomes the issues that faced previous methods. Then, by employing the output of several climate models, we calculated future changes in climatological means and indices of extreme weather for three 30-year periods of the 21st century. These future changes, which are extremely useful in adaptation studies, can be freely accessed on the online interactive NK-ClimVault.

Keywords: climate change, climate model, bias correction, TR3S method, NK-ClimVault

1. 背景

温室効果ガスの大気への排出量は、年々増加しており、気 候変動を引き起こす要因となっている。今後、気候変動の影響 は、さらに大きくなると予測されている。2~3℃度程度の全 球平均気温が上昇するとしても大したことには思えないかも知 れないが、極端気象現象の頻度や強度は、大変厳しく変化す るものと言われている。熱波の長期間化や豪雨の頻発化など の気候変動による悪影響に対応するには、都市計画やエネル ギー政策、生活環境、防災計画、食料安全保障、生態系保 全などの様々な計画策定の考え方を見直さなくてはならない。 適応策の検討は、気候予測モデル (Earth System Model, ESM) によって得られる将来気候の予測情報が基本情報とな る¹⁾。これらのモデルは、複雑な地球規模で生じている物理的 プロセスの数学的な近似をしているため、観測値に対して系統 的な誤差であるバイアスを生じることが分かっている。そのため、 将来気候予測情報を適応策の検討に用いるためには、バイア ス補正と呼ばれる処理を施す必要がある。

モデルの出力データの統計量に基づいたバイアス補正手法が いくつか提案されているが、バイアス補正手法は、パラメトリッ ク手法とノンパラメトリック手法に分類することができる。パラメト リック手法とは、モデルの過去再現実験計算のデータが持つ 生起確率密度分布を、モデルが再現しているのと同期間にお ける観測値の分布に変換するような変換関数を求めるものであ る^{2)~4)}。一方、ノンパラメトリック手法とは、生起確率密度分 布の各クォンタイルやパーセンタイルの変換係数をそれぞれの 地点で求めるものであり、現在の強力な計算機能力を活かして 行われる^{5)~10)}。このため、ノンパラメトリック手法はより柔軟で、 基準データに正確に合わせることができる。

パラメトリック、ノンパラメトリック手法に関わらず、ESM 出力 データのバイアス補正では、以下の2つの重要な目標達成を 意図している。すなわち、

- ①ESMの過去再現実験データのバイアス補正したものが長期 間の観測データの生起確率密度分布を再現できること、そし て
- ②観測値の統計的な特性との一貫性を損なうことがないよう にESMの将来予測データを補正でき、かつ、ESMが表現している過去から将来に向けた生起確率密度分布の変化傾向 を損なわないことである。

筆者らが異なるバイアス補正手法を調査比較する中で、バ イアス補正の1つめの目標を満たす過程で生じている別の課 題があることが見出された。これらの新たな課題は、以下のよ うに4つにまとめられる。

• ESM が表現している気候変化傾向(climate trends) を保存すること:各 ESM では、バイアス補正のための キャリブレーション期間である過去から、予測の対象と なる将来に向かって気候変化を生じており、モデルに よって、この変化傾向が異なっている。つまり大気中の 温室効果ガス濃度に対する降雨量や気温変化の反応 が ESM によって異なっている。あるひとつの ESM で

^{*} コンサルティング事業総括本部 中央研究所 先端研究センター

現れる気候変化傾向は、温暖化シナリオごとに異なって おり、さらには、ESMごとに異なる温暖化シナリオが採 用されている。Pierce ら¹¹⁾は、ノンパラメトリック手法 が ESM の示している気候変化傾向を著しく変化させて しまい、新たな将来予測の不確実性を付け加えている ことを示した。この気候変化傾向を保存するように設計 されたのが、Hempel ら¹²⁾によるパラメトリック手法であ る。

- ・ 観測値の生起確率密度分布における極端現象に相当する クォンタイルを再現すること:これを改善するために、モ デルと観測値を対比する作業を季節ごと、または、各 月ごと、3カ月ごとの移動ウィンドウで補正することがバ イアス補正研究の初期に行われた。しかし、パラメトリッ ク手法は、変換関数のシンプルさゆえに、観測データ の生起確率密度分布の裾にあたる極端気象現象を必ず しも再現できない。このために、さらなる改善のために、 ガンマ分布やパレート分布などの混合分布の採用など も提案されている¹³⁾。結局のところ、ノンパラメトリック 手法はそのよりフレキシブルな構造によって、パラメトリッ ク手法よりもこの極端現象の問題をよりよく解決すること が出来るといえる。
- サンプリングエラーが引き継がれることを回避すること:
 キャリブレーションおよび補正は比較的短い期間の時系列に適用されるため、その短い観測期間での経験的確率では、特に低頻度で発生する降水量の多い方の分布の「裾」でサンプリングエラーを示す。対して、パラメトリック手法は変換関数のパラメータを推定することにより、キャリブレーション期間のサンプリングエラーが引き継がれることを回避できる。一方、ノンパラメトリック手法では、キャリブレーション期間のサンプリングエラーが対象期間にそのまま引き継がれてしまう。
- 他の時間スケールでの分布特性を補正すること: ほとんどのバイアス補正方法は、気象変数を日スケールで補正する。ただし、この慣行によって他の時間スケールの分布に悪影響を及ぼし、年々変動などに意図せず影響を与える可能性がある。

バイアス補正法の2番目の目標は、変換関数(パラメトリック 手法の場合)または個々の変換係数(ノンパラメトリック手法の 場合)を、キャリブレーション期間外の対象期間のESM出力 データに適用することで達成出来る。Pianiら⁴⁾によって開発 された手法のようないくつかの手法は、キャリブレーションされ た変換関数のパラメータを固定して、まったく同じ変換関数で 対象期間のデータを補正する。しかし、極端な気象は将来さ らに激しくなり、より頻繁になることが知られているため、キャ リブレーション期間の気象変数の確率分布とは間違いなく異な る。したがって、固定パラメータを使用しない方がよい良いと いう意見が一般的である。気候変動による確率分布への影響 を検討するために、パラメトリック手法とノンパラメトリック手法に は、キャリブレーションと対象期間の ESM 出力データの分布 の間で各クォンタイルの変化を比較することによって得られる変 換係数が含まれている^{60,80,14)}。

しかし、既存の手法は上記の課題を全て同時に解決できる というわけではない。逆に、一つの課題を解決しようとすると、 他の課題の悪影響が大きくなる可能性がある。著者らはこれら の課題に同時に対応できる手法としてTR3S法¹⁵⁾(TRendpreserving Synthetic Samples of Stable distributions) を開発した。本手法は、安定分布という確率分布の人工的な サンプルを用いて、時間スケールごとに観測した極値を再現、 気候変化傾向を保存することができる。TR3S法はパラメトリッ ク分布を利用するが、ESM出力データは変換関数によって変 換されるわけではない。このため、この方法は、パラメトリック にもノンパラメトリックにも分類できない。

将来気候に関する信頼できる情報が気候変動影響と適応 の研究に不可欠になっている一方で、専門家や意思決定者 は、ESM 出力に自分でアクセスしたり操作したりするにあたっ て困難に直面する。このため、気候変動関連のリテラシーの 向上とSDGs の達成に貢献する取組の一環として、日本工営 中央研究所の気候変動対策グループは、複数の ESM の世界 的な出力を収集し、バイアス補正し、極端な気象の指標を算 出してきた。そして NK-ClimVault というオンラインプラット フォーム (https://nk-climvault.com/)を通じて、インタラ クティブに将来気候を探索し、人口が多い都市の時系列をダ ウンロードできるサービスを提供している。本論文では、NK-ClimVault で公開しているデータの基礎となる TR3S 法につ いて、将来気候予測情報のバイアス補正に関連する上記の課 題の克服を目指した取組について、広く使用されているノンパ ラメトリック手法と比較しながら解説する。

2. 利用したデータおよび手法

バイアス補正方法の比較を実行するために、第5次結合モデ ル相互比較プロジェクト(CMIP5)に含まれている MIROC5 モデルを選択した。キャリブレーション期間は 1981 年から 2005 年の 25 年間に設定した。将来の対象期間は 2076 年から 2100 年の同じく 25 年間とし、RCP シナリオ¹⁶(温室効果ガス の将来の代表的濃度経路、Representative Concentration Pathways)は RCP4.5 と RCP8.5 を用いた。再解析データ である EWEMBI¹⁷⁾を基準データとしてバイアス補正のキャリ ブレーションに用いた。(EartH2Observe, WFDEI and ERA-Interim data Merged and Bias-corrected for ISIMIP)。EWEMBIの解像度は 0.5 度で、1979 年から 2016 年までの気象変数の日時系列が存在する。

バイアス補正を実行する前に、MIROC5の日降雨量と日最 高気温の時系列を、バイリニア内挿を利用して基準データの 解像度に変換した。対象地域は主に関東・東北地方をカバー する座標 33N135Eと41.5N143Eで区切られた領域である。

最もよく用いられているバイアス補正手法は、すべてのクォ ンタイル(値で昇順に並べたときの下位からの順位の全体 数に対する割合)で ESM がモデル化した傾向を保存する ことを目的としたノンパラメトリック手法である。以降、この手 法を QDM 法 (Quantile Delta Mapping) と呼ぶ。現在、 **QDM** 法と同様のバリエーション^{18),19)} は、気候変動影響評価 検討で数多く採用されており、極端気象現象の将来変化の評 価の基礎データとして用いられている。例として、国立環境研 究所によるノンパラメトリック手法でバイアス補正を施された日 本域の21世紀の気象データがある²⁰⁾。前述のように、平均 値に関する ESM による気候変化の傾向が保存されることは非 常に重要だが、平均値はクォンタイルで表現される値ではな い。対して中央値はクォンタイル (つまり 0.5) である。したがっ て、石崎らが確かめたように、QDM 法の同様な手法によって ESM が予測した気候傾向、例えば平均値の変化傾向が変化 する可能性がある手法といえる。

TR3S 法は、気候値、月平均のばらつき、日値のばらつきの 3 つの成分への分解を行い、それぞれの気象要素の日値の時 系列を補正し、上記の既存のバイアス補正手法のすべての課 題の克服を意図している。3 つの成分のうちの1 つを補正する 際に、他の2 つの成分に関する気候変化の傾向を変更しない ように配慮されている。気候値とは気象変数の長期平均値で ある。気候値の補正は単純であるが、月平均のばらつきおよ び日値のばらつきの確率分布の補正は、基準データに適合し た安定分布の人工的なサンプルに置き換えることによって行わ れる。キャリブレーション期間外の ESM 出力を補正する場合、 基準データの安定分布の分散、歪度、および極値の頻度は、 キャリブレーションと対象期間の ESM 出力の間に表示される比 例変化で調整される。

本論文では、TR3S 法および QDM 法を使用して、日最高気 温と日降雨量を修正した。どちらの手法でも、降雨量の補正 には、雨の日の頻度の調整が含まれる。これらの調整の詳細に ついては、Gomez-Garcia ら¹⁵⁾ と Cannon ら⁶⁾ それぞれを 参照することができる。

3. 結果

(1) 基準データの生起確率密度分布の再現性

適切にバイアス補正を実行できたかどうかを判断する1つの 着眼点は、基準データの確率分布の再現性である。基準デー タと ESM 出力の生起確率密度分布、または基準データとバ イアス補正済みのデータの生起確率密度分布の誤差は、二乗 平均平方根誤差 (RMSE) で表すことができ、これをバイアス補 正の性能評価の指標とした。RMSE の値がゼロに近ければ、 比較されているデータが同様の確率分布を持っていることにな る。

東京都が位置する 0.5 度グリッドに対応する MIROC5 出力の日最高気温と日降雨量の時系列を、TR3S 法と QDM 法で

補正した。日降雨量の補正には、0.1mmのしきい値を使用し て降雨日・無降雨日の頻度を調整した。図-1は、基準デー タ、MIROC5出力の生データ、およびバイアス補正済みの データの経験的生起確率密度分布を示している。基準データと MIROC5出力の生データの生起確率密度分布の平均距離 を測定するために計算された RMSE(RMSEraw)は、各 グラフの右下隅に赤字で表示され、基準データとバイアス補 正済みのデータの生起確率密度分布の平均距離を測定する RMSE(RMSEcor)は黒字で表示されている。さらに、図-1は、RCPシナリオにおける、対象期間の生データとバイア ス補正済みのデータの時系列の生起確率密度分布を示してい る。

(2) バイアス補正を経た気候傾向の変化

前述のように、バイアス補正手法の潜在的な悪影響は、ESM によって予測される気候変化の傾向を変化させ、不確実性を 手法によって新たに加えることになる。気温の場合、気候変化 の傾向は、キャリブレーション期間と対象期間の気候値の差で ある。対して雨の場合は差でなく比としてとらえる。生のデータ で計算された気候変化の傾向が、補正済みのデータのそれと 異なる場合、バイアス補正手法の影響により、気候変化の傾 向が変更されていることがわかる。ここで、CTCを、バイアス 補正によって気候傾向の変化を測定する指標とし、それぞれ 最高気温と降雨量について式(1)と式(2)で定義されている。

 $CTC_T = \left(M_{\bar{m}}^{\text{tar}} - M_{\bar{m}}^{\text{cal}}\right) - \left(\widehat{M}_{\bar{m}}^{\text{tar}} - O_{\bar{m}}^{\text{cal}}\right) \tag{1}$

 $CTC_P = \left[\left(M_{\bar{m}}^{\text{tar}} / M_{\bar{m}}^{\text{cal}} \right) - \left(\widehat{M}_{\bar{m}}^{\text{tar}} / O_{\bar{m}}^{\text{cal}} \right) \right] \times O_{\bar{m}}^{\text{cal}}$ (2)

ここに、

- CTC_T:気温の気候傾向の変化 [℃]
- CTC_P:降雨の気候傾向の変化 [mm/month]
- *O^{cal}* :基準データを使用したキャリブレーション期間のm月の気候値
- M_m^{cal} :ESM 出力の生データを使用したキャリブレー ション期間のm月の気候値
- M^{tar}: ESM 出力の生データを使用した対象期間
 のm月の気候値
- *M*^{tar}_m:バイアス補正済みのデータを使用した対象
 期間のm月の気候値
- $m : 1 \sim 12$

図-2は、TR3S法および QDM 法で補正済みのデータを 利用して得られた CTC の値を月ごとに表示している。例えば 1月の CTC は、対象期間(25年間)の全ての1月の月平均 値の平均値(気候値)で計算される。TR3S法の結果は、グ ラフ上ですべてゼロの CTC 値を示して見える。TR3S法での CTC 最大値は日最高気温と月降雨量でそれぞれ0.07[℃] と5.7[mm/month]である。これらの値は、QDM 法で得られ た値よりも明らかに小さい値であり、QDM 法に比べ、TR3S 法がバイアス補正手法に起因する気候変化の傾向の変更を抑 えていることが分かる。図-2では*CTC*の空間分布を示しているが、両手法の結果を比較しやすくするために、図-2(a)と2(b)、および図-2(c)と図-2(d)で同じカラーマップを使用している。

(3) 年々変動の補正

水資源や農業などの分野での評価や計画において、渇水年 や渇水月など年々変動や季節変動の把握が重要である。既 存のパラメトリック手法とノンパラメトリック手法を適用して月平均



※破線はバイアス補正前の生のモデル出力データを表し、実線は TR3S 法((a)と(b))および QDM 法((c)と(d))で補正されたデータを表す。

図ー1 東京都が位置する 0.5 度グリッドに対応する日最高気温((a)と(c))と降雨量((b)と(d))の経験的生起確率密度分布



図-2 バイアス補正手法により気候変化の傾向に加えられた変化 (CT)



※黒い点は、バイアス補正されたデータが使用されたことを示す。

図-3 日最高気温((a)と(b))と月間累積降雨量((c)と(d))の散布図

を補正することもできるが、一般的なのは、日値の時系列を補 正してから、補正した日値を月平均値に変換することである。 ただし、バイアス補正は日データの統計特性をあわせるように 行われるため、補正済みの月平均値の年々変動は、基準とな る観測値の変動と一致するとは限らない。

TR3S 法の特徴は、3 つの時間スケールに分解することによ り、ESM 出力をバイアス補正することである。特にこれら3つ の時間スケール変数のそれぞれに対する補正は、1 つの要素 の補正が他の2 つの要素の補正を変更しないように別々に実 行される。それにより、TR3S 法では日値ばらつきの確率分布 だけでなく、月平均値のばらつきの分布にも一致するように補 正される。

図-3は、月ごとに、基準および ESM 出力の日最高気温 の月平均値(図-3(a)と図-3(b))と月降雨量(図-3(c)と 図-3(d))の散布図を示している。2つのデータセット(基準 データとESM 出力、それぞれ25年間)を大きさ順で並べ替え、 同順位をペアにすることにより、データが散布図にプロットした ものである。キャリブレーション期間は25年であるため、各散 布図には、基準データと生の ESM 出力の関係を表す25個 の赤い点と、基準データと補正済みのデータの関係を表す25 個の黒い点がある。両方のデータセットの分布が類似している 場合、散布図のほとんどの点は斜めの灰色の線の近くに表 示される。図-3では、黒い点が赤い点よりも斜めの灰色の 線の近くに表示されていることがわかる。さらに、各散布図の 右下隅に RMSE の値を表示している。

4. 考察

(1) 基準となる観測データの生起確率密度分布の再現性

基準データに対する現況気候データの補正の性能を比較した図-1のRMSEでの評価では、QDM法がTR3S法に比べてより良い再現性を有しているが、いずれの手法も十分に良い再現性を示している。

QDM 法は、基準となる観測データの生起確率分布の形状

に追随するフレキシブルな手法であるが、QDM 法で補正済 みのデータにゼロより大きい RMSE の値が得られた。その理 由は、QDM 法が3カ月の移動ウィンドウを使用して補正を行 なっており、例えば2月中の日データは、1月、2月、3月の データで作成されたノンパラメトリック分布から補間された変換 係数を使用して補正されるからである。ただし、図-1に示す データは、全期間の時系列を統計処理したものであり、それゆ え相違は僅かなものとなる。

TR3S 法は、気候値のバイアスを使用して、キャリブレーショ ン期間と他の期間の ESM 出力の気候値を補正する。しかし、 日値のばらつきと月平均値のばらつきは、相当する基準デー タのばらつきの分布に適合した安定分布から一定区間でサン プリングされたデータに置き換えられる。これにより、補正済 みのデータが、キャリブレーション期間の基準データおよび ESM 出力のサンプリングエラーとは無関係になる。その経験 的な生起確率密度分布は、基準データのよりも凹凸がないス ムーズな曲線となる。図-4 は、東京都が位置するグリッドの 月降雨量の基準データと相当する人工的なサンプルの経験的 な生起確率密度分布を示している。サンプリングエラーにより、 両方の生起確率密度分布間にわずかな違いがある。その結 果、図-1(a) および図-1(b) に示されている TR3S 法の RMSE の値は、QDM 法の RMSE の値(図-1(c)と図-1(d)) よりも大きくなる。

気候予測モデルにおいて一般的に知られている課題は、降 水量と降雨日日数の過大評価である。本研究では降雨日を「日 雨量強度が0.1mm以上になる日」と定義している。MIROC5 モデルは、キャリブレーション期間の約80%が雨の日であり、 この割合が将来のシナリオでさらに大きくなる可能性があること を予測している(図-1(b)と図-1(d))。QDM法、TR3S 法のどちらの手法でも、キャリブレーション期間の基準データ の降雨日数を一致させることができた。この状況は、図-1(b) および図-1(d)で確認できる。補正されたESM出力の時系 列の生起確率密度分布が、基準データと同じ超過確率で 0.1mmのしきい値を超えている。TR3S 法の結果は、将来



※月降雨量のばらつきの計算については、Gomez-Garciaら¹⁵⁾で詳しく説明されている。

図-4 東京都が位置するグリッドの月降雨量のばらつきの生起確率密度分布

気候での降雨日の割合が大きく、ESM の予測を変えることな く維持していることを示しているが、QDM 法の結果は増加を 示していない。降雨日の頻度を一致させることは、どちらの手 法でも期待どおりにうまくいかない場合もある。結果は、気候予 測モデルと場所によって異なる。通常、半乾燥または乾燥した 場所では、降雨日数が少ないために統計的検討を行うための サンプル数が少なくなるため、両方の手法で基準データの降 雨日を正確に一致させることができない場合がある。

(2) バイアス補正を経た気候傾向の変化

石崎ら²⁰⁾ または Pierce ら¹¹⁾ が指摘したように、パラメトリッ クおよびノンパラメトリックなバイアス補正は、ESM が予測した 気候変化の傾向を手法による変更を加える可能性がある。**図**-2(b) と**図**-2(d) では、QDM 法によって、MIROC5 がモデ ル化した気温と降雨の傾向が月ごとに変化したことを確認でき る。対象地域では、傾向の変化は、気温と降雨について、そ れぞれ約 -1 C ~ 1 C ≥ -80 mm/month ~ 80 mm/month 変 化しており、気候変動影響評価において無視し得ない大きな 影響をもたらしていることが分かる。

図-2(b)によれば、RCP8.5シナリオでESM が予測した気 温の変化傾向が約4.5℃である地域で、QDM 法によって生じ た1℃の気候変化傾向の誤差は影響がないように見えるかもし れないが、月平均値で1℃の誤差が加えられたという意味で あり、月最高気温などの極値では、1℃以上の誤差が加えられ ていると見られる。月平均値における1℃を超える推定誤差は、 気候変動適応評価やリスク評価にかなりの影響をもたらす可能 性がある。

QDM 法による降雨データのバイアス補正では、気候モデル が予測している気候変化の傾向よりも大きな傾向の変化を加え ている可能性がある。たとえば、10月の東京都内の降雨量は、 平均で(1981年~2005年)である。MIROC5モデルは、 RCP8.5シナリオで、21世紀の終わり(2076年~2100年)ま でに31mmの増加を予測した。しかし、QDM 法を経た気候傾 向の変化は-36mmで、最終的な予測は-5mmとなった。同 様に、豪雨に対するこれらの変化の影響を定量化することは困 難であり、気温の場合よりも指数関数的に悪化する可能性がある。

ー方で、TR3S 法では、ESM が予測した気候傾向を保存 できていることが図-3(a) および図-3(c) で把握できる。バ イアス補正手法の一般的な課題である気候変動傾向の保存に 関する TR3S 法の優位性について確認できた。

(3) 年々変動の補正

QDM 法では、年々変動の補正を目的としたものではないが、 図-3(b)と図-3(d)は、月平均の分布がある程度補正され ていることを示している。10月に観測された値などのような極 端気象では、基準データとQDM 法でバイアス補正済みのデー タの間に約300mmの差がある。また、手法によって、将来 予測情報に誤差をもたらしうるという事実が広く認知されていな いことは、注意を要するものである。

一方、TR3S 法は、QDM 法よりも月平均値の分布をより適 切に調整することができる (図-3(a) および図-3(c))。この 状況は、TR3S 法と QDM 法の RMSE の値を比較することで 確認でき、ほとんどの場合、TR3S 方は QDM 法よりもはるかに 有利である。降雨については、TR3S 法により、月ごとに月降 雨量を補正する。つまり、降雨日の少ない月(12月~2月)は ほとんど変化しないが、降雨日の多い月(6月~11月)では 最適な結果が期待できる。図-3(c)の両手法の RMSE 値によ れば、雨季(6月~10月)の補正の結果は、乾期(12月~2 月)で表示されている結果と比較して、TR3S 法の QDM 法に 対する優位性が非常に顕著となっている。

5. NK-ClimVault

気候変動適応策立案において、気候変動予測情報は、検討 の基礎データであるが、データにアクセスすること、さらに、必 要な部分のみを空間的に抽出し、それを処理してバイアスを除 去することは容易ではなく、適応策に携わる技術者や行政担 当者にとっての実際上の大きな問題となっている。

日本工営中央研究所の気候変動対策グループは、気候情報 の最先端の処理・解析技術の開発に焦点を当てているだけでな く、エンジニア、研究者、学生、意思決定者がそれを利用 できるようにする方法についても研究開発を行っている。そ の成果として、オンラインの無償プラットフォームである NK-ClimVault (図-5(a) https://nk-climvault.com)を開発し、 一般に公開した。ClimVault 上で将来の気候予測をインタラ クティブに探索したり、ニーズに応じて解析できるよう、TR3S 法でバイアス補正済みのデータをダウンロードすることが可能 になっている。

NK-ClimVaultには、気候(気温と降雨の長期平均)と極端な気象の指標のインタラクティブでかつ世界的なマップを表示する「アトラス」の機能がある(図-5(b))。極端な気象の指標は、発生の確率は低いが、潜在的な社会的被害や生命を 脅かす結果を伴うイベントを予知するために、影響調査では特 に重要である。この目的のために、気候変動の検出と指標に 関する専門家チーム(Expert Team on Climate Change Detection and Indices・ETCCDI²¹⁾)によって提案された 指標を算出し、グローバルマップを表示できるようになっている。 現在のところは、まだすべての指標(**表**-1)の結果は公開 していないが、今後順次追加していく予定である。

NK-ClimVault のマップを生成するために使用された気候 データは、1 つの現況期間(1979 年~2005 年)と3 つの 将来期間(2010 年~2039 年、2040 年~2069 年、およ び 2070 年~2099 年)に対応する 30 個以上の CMIP5 の ESM 出力である。バイアス補正された気象変数は、日降水量、 平均・最高・最低気温である。

アトラスでは、任意地点をクリックするだけで、選択されてい

る気候値や指標が将来どの程度変化するかを確認できる情報 をポップアップして表示する機能がある。図-6(a)は、現況 期間のマップをクリックした後にアトラスに表示されるグラフを示 し、図-6(b)は、3つの将来期間のいずれかのマップをクリッ クした後に表示されるグラフを示している。

図-6(b)では、ESMごとの予測結果のばらつきを4つの RCPシナリオごとに示している。

NK-ClimVault の実際の利用ニーズでは、表-1 にリストさ れている指標では気候変動影響を評価するのに十分でない場 合があり、専門家は独自の指標を計算したり、他の統計分析 を行いたいケースがある。そのような場合、NK-ClimVault は、 世界中の 1,000 を超える都市の TR3S 法でバイアス補正され た気象変数の時系列をダウンロードする機能を提供している。 モデル別の時系列データをダウンロードできる都市は、人口が 50 万人を超える都市、もしくは、その国の首都である。

6. まとめ

この論文では、気候変動影響評価や適応策立案における不可欠な基礎作業である気候予測モデルバイアス補正の課題を 明らかにした。また、いくつかの既存のバイアス補正手法がこれらの課題を解決できず、手法により、新たな不確実性を追加しうることを示した。

ESM が予測した気候変化の傾向を保存すること、基準デー タの生起分布の裾の極端現象にあたる区間のクォンタイルを再 現すること、サンプリングエラーを引き継ぐことを回避すること、 日データの生起確率分布だけでなく他のタイムスケールでの分 布を補正することを目的とし、TR3S 法は革新的な数学的改良 に基づいて開発された。広く使用されている QDM 法と開発し た TR3S 法の比較では、TR3S 法が基準データの生起分布 を再現するという点でノンパラメトリック手法に匹敵する能力を



(b) アトラス



図- 5 NK-ClimVault プラットフォームの(a)ホームページおよび(b)アトラスのスクリーンショット

備えつつ、バイアス補正によって生じる新たな不確実性を抑え ることができることを実証した。QDM法などのバイアス補正手 法による新たな不確実性の付加を定量的に評価したが、この ような影響はあまり認知されておらず、気候変動影響評価結果 や適応策検討に大きな影響を与えうることを示した。

最後に、TR3S法による将来気候予測情報を一般に公開しているNK-ClimVaultを紹介した。気候変動影響評価と適

応策検討において、将来気候の予測の信頼できる情報源として NK-ClimVault を役立てていただけることを期待している。

ID	Index Name	Index Definition	Units
TXx	Maximum tasmax	Maximum value of daily max temperature	°C
TNx	Maximum tasmin	Maximum value of daily min temperature	°C
TXn	Minimum tasmax	Minimum value of daily max temperature	°C
TNn	Maximum tasmin	Minimum value of daily min temperature	°C
TN10p	Cool Nights	Percentage of time when daily min	%
		temperature < 10th percentile	
TX10p	Cool Days	Percentage of time when daily max	%
		temperature < 10th percentile	<u> </u>
TN90p	Warm Nights	recentage of time when daily min	%
TX90p DTR	Warm Days Diurnal Temperature Range	Percentage of time when deily may	% °C
		recentage of time when daily max	
		temperature > 90th percentile	
		temperature	
FD	Frost Days	Annual count when daily minimum	days
		temperature $< 0 \circ C$	
SU	Summer Days	Annual count when daily max temperature	days
		$> 25 \circ C$	
TR	Tropical Nights	Annual count when daily min temperature >	days
		20 °C	
WSDI	Warm Spell Duration	Annual count when at least six consecutive	days
		days of max temperature > 90th percentile	
CODI	Cold Spell Duration	Annual count when at least six consecutive	days
CSDI		days of min temperature < 10th percentile	
RX1d	Maximum 1-day pr	Maximum 1-day precipitation	mm
RX5d	Maximum 5-day pr	Maximum consecutive 5-day precipitation	mm
SDII	Simple Daily Intensity Index	The ratio of annual total precipitation to	mm/day
		the number of wet days ($\geq 0.1 \text{ mm}$)	
R10	Number of Heavy pr Days	Annual count when precipitation $\geq 10 \text{ mm}$	days
R20	Number of Very Heavy pr Days	Annual count when precipitation $\geq 20 \text{ mm}$	days
CDD	Consecutive Dry Days	Maximum number of consecutive days when	days
		precipitation < 0.1 mm	
CWD	Consecutive Wet Days	Maximum number of consecutive days when	days
		precipitation < 0.1 mm	
R95p	Very Wet Days	Annual total precipitation from days > 95th	mm
		percentile	
R99p	Extremely Wet Days	Annual total precipitation from days > 99th	mm
		percentile	
PRCPTOT	Annual total wet-day pr	Annual total precipitation from days ≥ 0.1	mm
		mm	

表一1 極端な気象の ETCDDI 指標

(a)



※現況期間(a)と2070年~2099年の期間(b)について、NK-ClimVaultのアトラス機能(世界地図上での表示)で東京湾の場所 をクリックするときに表示される CMIP5 の気候モデルに相当する最高 気温気候値のモデル内変動

図-6 気候モデルごとの予測結果のばらつき

参考文献

- Flato, G.M.: Earth system models: an overview. WIREs Clim Change, 2, pp.783-800, 2011
- Ines, A. V. M., & Hansen, J. W.: Bias correction of daily GCM rainfall for crop simulation studies. Agricultural and Forest Meteorology, 138 (1-4), pp.44-53, 2006
- Li, H., Sheffield, J., & Wood, E. F.: Bias correction of monthly precipitation and temperature fields from Intergovernmental Panel on Climate Change AR4 models using equidistant quantile matching. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 115 (10), 2010
- Piani, C., Weedon, G. P., Best, M., Gomes, S. M., Viterbo, P., Hagemann, S., & Haerter, J. O.: Statistical bias correction of global simulated daily precipitation and temperature for the

application of hydrological models. *Journal of Hydrology*, 395 (3-4), pp.199-215, 2010

- Boé J., Terray, L., Habets, F., & Martin, E.: Statistical and dynamical downscaling of the Seine basin climate for hydrometeorological studies. *International Journal of Climatology*, 27, pp.1643-1655, 2007
- Cannon, A. J., Sobie, S. R., & Murdock, T. Q.: Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: How well do methods preserve changes in quantiles and extremes? *Journal of Climate*, 28 (17), pp.6938-6959, 2015
- Déqué, M., Rowell, D.P., Lüthi, D., Giorgi, F., Christensen, J. H., Rockel, B., et al.: An intercomparison of regional climate simulations for Europe: assessing uncertainties in model projections. *Climatic Change*, 81 (Suppl 1), pp.53-70, 2007
- Themeßl, M. J., Gobiet, A., & Heinrich, G.: Empiricalstatistical downscaling and error correction of regional climate models and its impact on the climate change signal. *Climatic Change*, 112 (2), pp.449-468, 2012
- Wang, L., & Chen, W.: A CMIP5 multimodel projection of future temperature, precipitation, and climatological drought in China. *International Journal of Climatology*, 34 (6), pp.2059-2078, 2014
- 10) Watanabe, S., Yamada, M., Abe, S., Hatono, M.: 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 巻, 3 号, pp.117-122, 2020
- Pierce, D. W., Cayan, D. R., Maurer, E. P., Abatzoglou, J. T., & Hegewisch, K. C.: Improved Bias Correction Techniques for Hydrological Simulations of Climate Change. *Journal of Hydrometeorology*, 16 (6) , pp.2421-2442, 2015
- 12) Hempel, S., Frieler, K., Warszawski, L., Schewe, J., & Piontek, F.: A trend-preserving bias correction – The ISI-MIP approach. *Earth System Dynamics*, 4 (2), pp.219-236, 2013
- 13) Volosciuk, C., Maraun, D., Vrac, M., & Widmann, M.: A combined statistical bias correction and stochastic downscaling method for precipitation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21 (3), pp.1693-1719, 2017
- 14) Michelangeli, P.-A., Vrac, M., & Loukos, H.: Probabilistic downscaling approaches: Application to wind cumulative distribution functions, *Geophysical Research Letters*, 36, pp.2-7, 2009
- 15) Gomez Garcia, M., Matsumura, A., Ogawada, D., & Takahashi, K.: Time scale decomposition of climate and correction of variability using synthetic samples of stable distributions. *Water Resources Research*, 55, pp.3632-3658, 2019
- 16) van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi,

K., Thomson, A., Hibbard, K., et al.: The representative concentration pathways: An overview. *Climatic Change*, 109 (1), pp.5-31, 2011

- 17) Lange, S.: EartH2Observe, WFDEI and ERA-Interim data Merged and Bias-corrected for ISIMIP (EWEMBI) [Data set]. GFZ Data Services, 2019
- 18) 飯泉仁之直、西森基貴、石郷岡康史、横沢正幸:統計的ダウン スケーリングによる気候変化シナリオ作成入門、農業気象、66 (2): pp.131-143, 2010
- 19) Willems, P., & Vrac, M.: Statistical precipitation downscaling for small-scale hydrological impact investigations of climate change. *Journal of Hydrology*, 402 (3-4), pp.193-205, 2011
- 20) Ishizaki, N. N., Nishimori, M., Iizumi, T., Shiogama, H., Hanasaki, N., and Takahashi, K.: Evaluation of two biascorrection methods for gridded climate scenarios over Japan. SOLA, 16, pp.80-85, 2020
- 21) Zhang, X.L., Alexander, G., Hegerl, C., et al.: Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data, *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2, pp.851-870, 2011