全球気候モデル出力のバイアス補正手法の違い による水文解析への影響

EFFECTS OF DIFFERENCES IN BIAS CORRECTION METHODS TO GENERAL CIRCULATION MODEL OUTPUT ON HYDROLOGICAL ANALYSIS

眞崎良光¹・花崎直太²・高橋潔³・肱岡靖明⁴

Yoshimitsu MASAKI, Naota HANASAKI, Kiyoshi TAKAHASHI and Yasuaki HIJIOKA

¹正会員 博(理) 国立環境研究所(〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2)

²正会員 博(工) 国立環境研究所(〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2)

³正会員 博(工) 国立環境研究所(〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2)

⁴正会員 博(工) 国立環境研究所(〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2)

We have compared differences in hydrological simulation results when two different types of bias correction methodologies were applied to general circulation model output. The methodologies are: (1) a shifting-and-scaling method and (2) a quantile mapping method. Similar seasonal variations of 30-year-mean river discharge were obtained for the both bias correction methods. However, for the maximum monthly discharge in 30 years, the shifting-and-scaling method tends to produce larger values than the quantile mapping method. This feature attributes characteristics on multiplication factors for producing future precipitation data: The maximum end of a precipitation range is selectively affected by the factor. This feature might overestimate future risks of flooding. Since future projection of the river discharge directly links to evaluation of risks accompanied with future climate changes, we should pay attention to bias correction methods when we interpret hydrological simulation results.

Key Words : River discharge, inundation probability, bias correction, climatic change, hydrological simulation

1. はじめに

温暖化に伴う水文量の将来予測, 特に将来の河川流量の把握は, 洪水や干ばつ等の社会的リスク評価にとって不可欠である。将来気候予測には全球気候モデル

(GCM) が用いられているが, 各GCMは固有のバイアスを含むため, それらを適切に補正する必要がある。バイアス補正手法は各種提案されてきたが, 主に(1)補正量の加乗演算により気候要素の平均値を合わせる手法と, (2)気候要素の度数分布を合わせる手法の, 2種類が多く用いられている。(1)は, 度数分布が現在気候の相似形にしか成り得ないものの, 簡単な算術演算で計算負荷が小さいことから, 多くのモデルで採用されている。一方, (2)は度数分布の補正が可能であるものの, 大きな計算負荷や作業労力を強いられるため, それらを負担できる研究組織に使用が限定される傾向があった。しかし, 実

際に発現し得る気象事象に即した将来予測研究への期待から, 近年, (2)の利用が急速に進みつつある。

これらの気象データを入力値としたモデル計算は世界各国で行われ, 将来の気候変動による影響予測は大きく進展したが, それに伴い, バイアス補正に対する気候変動予測結果の感度についても研究者の関心が集まっている。水文解析においても, GCMの気象要素に対するバイアス補正が, 将来の水文予測結果に与える影響について指摘されており¹⁾, バイアス補正に対する感度の検証が進みつつある。

そこで, 今回, 2つの異なる手法でバイアス補正された気候データを入力したとき, それらが水文解析結果に与える影響の評価を目的として, 解析を行なった。本報告では, (1)(2)両手法を用いたときに得られる流出量や河川流量の結果を比較して, その影響を調査した。

2. 手法

GCMとしてMIROC-ESM-CHEMを用い、これから得られた気象要素を $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ の空間分解能に補間して使用した。全球陸域を解析対象とし、将来予測対象期間は2011～2040年、および2041～2070年の各30年間である。将来の温室効果ガス排出濃度シナリオとして、代表的濃度シナリオ(RCP)²⁾の2.6および8.5を使用した。水文モデルはH08³⁾を使用し、日別値の気象要素を入力して、水文過程の積分計算の時間間隔を1日として計算した。バイアス補正の水文計算結果への影響に主眼を置いたため、ダム操作や灌漑等の人為的水操作は扱わない。本解析では、流出量および河川流量に着目した。河川流量については、世界43河川(図-1)の主要流量観測地点における日別流量を解析した。なお、この43河川は、 $2 \times 10^5 \text{ km}^2$ 以上の集水面積を持ち、特定の大陸や気候区分に偏在しないように選定されている。

水文モデルの陸面過程計算のために入力する気象データは、2種類のバイアス補正手法に対応して2種類のデータセットを用意した。先述の(1)は、シフティング&スケールリングと総称される(以下、SS手法と称する)。SS手法では、GCMの30年間平年値をもとに、気候変化による変化量(気温)あるいは変化率(降水量・下向き長波放射)を月別に求めた後で、観測ベースの全球グリッド気象データであるWATCH気象データ⁴⁾の1971～2000年日別気象要素に変化量を加算あるいは変化率を乗算することで、将来の日別気象要素を作成した。一方、(2)では、Pianiらのアルゴリズム^{5,6)}を用いた(以下、Piani手法)。本解析では、ISI-MIPプロジェクトが作成し、配布・提供しているデータセットをそのまま使用した(詳細は同プロジェクト文書⁷⁾を参照)。これは、1960～1999年のWATCH気象データとGCMの気象データ

から、気象要素日別値の累積度数分布をそれぞれ求め、WATCH気象データの分布に合うように変換する関数を決める手法である。変換関数は月ごとに決めるものの、月界における不連続性を避けるため、変換関数のパラメータを補間し、日別気象要素に適用する。バイアス補正は、気温・降水量をはじめとする全気象要素入力値に適用される。

結果の解析手順として、まず平年値・全球規模での入力気象要素や流出量について、次に平年値での河川流量について、それぞれ両バイアス補正手法を用いたときに得られた結果の相違を調べる。もし、これらに顕著な相違が生じた場合は、その原因を調べる。

3. 結果

(1) 平年値の全体的傾向

まず、現在(1971～2000年)に対するRCP2.6, 2011～2040年の年平均気温・降水量の変化傾向(ここでは、Piani手法による結果)を図-2に示す。気温については、北半球高緯度の陸域で平均気温の上昇が大きい。これは、冬季における気温上昇を反映している。また、降水量も、北半球高緯度で増加傾向を示す。SS手法についてもほぼ同様の結果が得られており、両手法による結果を比較するため、基準期間平年値に対する2011～2040年の平均気温の変化量および降水量の変化率について、両バイアス補正手法間での差分をとった(図-3)。その結果、気温については 1°C 未満であった。降水量については、少雨地域を中心に、20%以上の相違を生じた地域がある。ブラジル中部は、多雨地域であるものの、10%程度の相違を生じた。それ以外の地域では、比較的軽微である。

図-1 解析対象とした43河川と流量解析地点(黒丸印)。黄色の領域は、流量解析地点の上流域を示す。

図-2 1971-2000年平均のWATCHデータに対するRCP2.6, 2011-2040年平均の気温の変化量(°C)(上)と降水量の変化率(下)。

図-4 RCP2.6, 2011-2040年におけるSS手法(上)による平均流出量(mm/d)と、両手法(SS-Piani)の平均流出量の差分(mm/d)(下)。

図-3 SS手法とPiani手法における気候変化傾向の違い。それぞれの基準期間(すなわち現在気候値)に対するRCP2.6, 2011-2040年の気温の変化量(°C)(上)および降水量の変化率(下)について、SS手法適用結果からPiani手法適用結果を差し引いたもの。

次に、RCP2.6, 2011~2040年における2種類のバイアス補正手法に基づくデータセットを用いて解析された平均流出量を図-4に示す。全体的な傾向は同一であるが、

両者の差分をとると、陸域の大部分で0.2 mm/d以下、多雨の地域でも0.5 mm/d程度の範囲内に収まっている。北半球高緯度ではPiani手法の流出量の方が、南半球ではSS手法の流出量の方が、それぞれわずかに大きい傾向が見られる。しかし、この傾向は、季節によっても異なるため、両手法間で著しい地域的特性の違いを生んでいるとは断定できない。

(2) 上流域平均水文諸要素の平年値

河川流量の変動は、その上流の流出量の変動を反映したものであり、その流出量は、降水量と蒸発散量に依存する。そのため、降水量、蒸発散量、流出量について、観測地点上流域で平均化した値(面積による重み付け平均)を求め、バイアス補正手法間で比較した。なお、厳密には観測地点に流下するまでの時間ラグを考慮した議論が必要だが、本解析では、月別の時間分解能で議論することを勘案し、流下に要する時間ラグを無視する。

その結果、これらの要素についても、月別平年値では、バイアス補正手法間に大きな違いは見られなかった。また、ほかのRCP、将来予測期間についても同様、両手法間に大きな違いは見られなかった(図表未掲載)。

図-5 RCP2. 6における月別平均河川流量の季節変動 (m^3/s)。青線はSS手法、赤線はPiani手法によるバイアス補正結果であり、それぞれ2011-2040年の30箇年における平均（太線）と最大・最小値（細線）をプロットした。各パネルの番号は、図-1の流量解析地点の番号を示す。

(3) 河川流量

図-5は、43河川の流量解析地点における月別平均河川流量について、バイアス補正手法ごとに、30箇年における同月の平均値（つまり平年値）および最大・最小値を示したものである。平年値の季節変動を見る限り、一部の地点（地点#26, 32等）を除き、バイアス補正手法間の結果に顕著な違いや系統的な違いを見出すことはできなかった。

しかし、図-5において30箇年の最大値を見ると、Piani手法に比べ、SS手法の方が大きく評価された地点が多い。この現象は、季節別では豊流期に見られやすい。なお、この現象が見られた地点は、特定の地理的分布をするわけではなかった。なお、30箇年の最小値についても、渇水期を中心に同様の調査をしたが、バイアス補正手法間に顕著な差異はみられなかった。

ほかのRCP、将来予測期間については、補正値が異なるため、多少の差異はあるものの、同様の傾向が得られた。

(4) 上流域平均月別降水量の30箇年の順位分布

前項の河川流量の30箇年最大値に見られた較差の原因を調べるためには、平年値ベースではなく、順位ベースで比較することが必要となる。そこで、月別の上流域平

均降水量について、2種類のバイアス補正手法それぞれに対して同月のデータ30箇年分を昇順に並べ替えた上で、その散布図を作成した。これにより、両手法間で、月別降水量の順位分布や降水量頻度分布の違いを検出できる。ここでは、解析対象の43地点のうち、図-5においてPiani手法よりSS手法で大きな値を示した8地点（グループA；地点#2, 21, 25, 30, 31, 35, 36, 42）と、対照群として、逆に小さい値を示した2地点（グループB；地点#11, 18）を選び、その上流域平均月別降水量と、SS手法において適用した降水量変換係数 α の値を図-6にまとめた。

その結果、地点によって、SS手法とPiani手法の月別降水量が一致する1:1ラインから大きく外れ、両バイアス補正手法間で月別降水量の順位分布に大きな違いがあることが分かった。また、その違いは、地点のみならず季節によっても異なる。特に、ここに例示したグループAの8河川では、図-5のSS手法で最大月平均流量が大きめに見積もられた季節を中心に、上流域平均降水量についてもSS手法で大きめに見積もられる傾向がある。さらに、順位分布も1:1ラインの傾きより急傾斜を示す。これは、Piani手法で得られる30箇年の月別降水量のレンジに比べ、SS手法のレンジが大きいことを意味する。また、少ない月別降水量側（各パネルの左下隅）では1:1ラインに沿うものの、降水量が増えるとともに、上方に屈曲する分

図-6 RCP2.6, 2011-2040年における月別降水量の2つのバイアス補正手法間の散布図。図-5において、Piani手法に比べSS手法で大きな値を示した8地点（グループA）および小さな値を示した2地点（グループB）について取り上げた。降水量は、流量観測地点より上流の領域での平均値。30年間の同月データについて、各手法の月別値をそれぞれ昇順に並べ替え、横軸にPiani手法、縦軸にSS手法による月別降水量値（単位mm/d）をとってプロットしたもの。 α は、SS手法の降水量変換係数を示す。

布形状も見られる。この場合、平年並もしくは少雨年では、月別降水量に両手法間での較差が見られないものの、十年に数回の頻度で発生する多雨年においては、その降水量がSS手法で大きめに見積もられることを意味する。

逆に、グループBの2河川では、SS手法で最大月平均流量が小さめに見積もられた季節を中心に、1:1ラインより緩い傾斜を示している。

4. 議論

(1) スケーリングによる降水量バイアス補正手法と極値への影響

SS手法による降水量のスケーリング変換は、基準期間における降水量データの値を α 倍にする。降水量は非負値であるため、基準期間の降水量レンジが $[0, P_{\max}]$ である場合、変換後のレンジは $[0, \alpha P_{\max}]$ となる。つまり、ある月の変換係数 $\alpha > 1$ であれば、バイアス補正後の最小降水量値は0で変わらないものの、最大値は必ずより大きな値へと変換される。逆に、 $\alpha < 1$ であれば、最大値はより小さな値に変換される。いずれにおいても、スケーリング変換によって、最大値側にあるデータほど大きな影響を受ける。結果として、30年間の気象データか

らSS手法により将来気象データを作成する場合、変換前の降水量データでは、 $P_{\max}$ の降水量は30年に1度生起するが、変換後の降水量データでは、 $\alpha P_{\max}$ の降水量が30年に1度、確実に生起することになる。

このようなスケーリングの変換特性は、図-5でバイアス補正手法間の差異として、30箇年の最大月平均流量からは検出できても、最小月平均流量からはほとんど検出できなかったことにも現れていると考えられる。

洪水頻度の将来予測は、水文解析にとって重要であるが、バイアス補正の変換特性から算術上生じる“洪水”を、将来気候下で実際に起こり得る洪水事象として解析してしまう危険性を内在している。その逆に、バイアス補正の特性次第では、洪水事象を見逃す危険もある。

なお、 $\alpha \sim 1$ であるにもかかわらず、図-6で急傾斜を示すいくつかの事例（地点#2の1月、#25の1月）も確認された。これらは、SS手法に比べてPiani手法の30箇年の降水量レンジが小さくなる特徴がある。本報告では、この原因を明らかにできなかったが、これらの流域は複雑な地形起伏のある山岳・丘陵地域にあるため、気象条件のわずかな違いによる降水特性への影響や、GCMによる観測降水特性の再現の難しさ等も影響している可能性がある。今後の課題としたい。

本研究では、冒頭でも述べた通り、バイアス補正手法

図-7 WATCH年平均降水量について「1971-2000年平年値」から「1960-1999年平年値」の差を、後方で規格化した値。

の違いによる水文解析結果への影響比較を通して、その危険性の一つを指摘した。しかし、これは両手法間の優劣を結論づけるものではない。両手法の特性の違いを把握した上で、水文解析の結果を解釈する際、注意することが重要だと考えられる。

(2) バイアス補正基準期間の違いによる影響

本解析で用いたフォーシングデータとしての気象データセットは、同じWATCH気象データに準拠してバイアス補正を施したものであるが、SS手法では1971-2000年、Piani手法では1960-1999年と異なる年次の平年値を基準にしている。数十年間という長期間の平年値といえども、基準期間の平年値自体に較差がある場合、バイアス補正後の気象データセットにもその影響が及ぶ可能性がある。そこで、両基準期間におけるWATCH年平均降水量の差（降水量の絶対値で規格化）を図-7に示した。乾燥域では、年間降水量が少ないため、稀な降雨事象や小さな降水量値での規格化により不安定的に高値を示すことはあるが、それを除けば、陸域の大部分で5%程度の相違にとどまり、バイアス補正基準期間の違いによる影響は、前項までに結果として示した両バイアス補正間の降水量較差と比べても軽微であると考えられる。

5. 結論

GCMによる将来気候変動予測において、よく用いられる2種類のバイアス補正手法（SS手法、Piani手法）で生成された2種類の気象データを水文モデルに入力し、その結果の比較を通して、バイアス補正手法の水文解析への影響を検証した。

流出量や河川流量の平年値には、両バイアス手法間の顕著な相違は見られなかった。しかし、30箇年における最大月平均流量など、最大側極値において、SS手法で大きめに見積もられる傾向が見られた地点があった。これは、将来気象データセットを作成する際、降水量に対するスケール変換特性によって、降水量の最大値が増幅される影響を反映したものと考えられる。

温暖化に伴う気候変動によって、洪水や干ばつをはじ

めとする極値現象の発生頻度の増加や強度の強化は、既に多数の論文で報告されている。洪水の発生頻度やその規模は、その社会的リスクの大きさから、水文シミュレーションなどにより熱心に取り組まれている将来影響予測の研究テーマの一つである。SS変換によるバイアス補正は、簡便な温暖化実験を可能にし、多数の価値ある成果を生み出してきたが、極値現象の解析には、長期間のデータを用いることによる解析結果の安定化を過信せず、単年ごとのデータ特性についても確認を行なった上で活用することが重要である。

謝辞：本研究は、環境省環境研究総合推進費(S-10)により実施された。入力気象データとして使用したPiani手法のMIROC-ESM-CHEM気象データは、ISI-MIPにより作成・配布されたものを使用した。改稿にあたり、3名の匿名査読者から有益な意見をいただいた。

参考文献

- 1) Hagemann, S., Chen, C., Haerter, J.O., Heinke, J., Gerten, D. and Piani, C.: Impact of a statistical bias correction on the projected hydrological changes obtained from three GCMs and two hydrology models, *J. Hydrometeorol.*, Vol.12, pp.556-578, 2011.
- 2) Moss, R.H., Edmonds, J.A., Hibbard, K.A., Manning, M.R., Rose, S.K., van Vuuren, D.P., Carter, T.R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G.A., Mitchell, J.F.B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S.J., Stouffer, R.J., Thomson, A.M., Weyant, J.P. and Wilbanks, T.J.: The next generation of scenarios for climate change research and assessment, *Nature*, Vol. 463, pp. 747-756, 2010.
- 3) Hanasaki, N., Kanae, S., Oki, T., Masuda, K., Motoya, K., Shirakawa, N., Shen, Y. and Tanaka, K.: An integrated model for the assessment of global water resources – Part 1: Model description and input meteorological forcing, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, Vol.12, pp.1007-1025, 2008.
- 4) Weedon, G.P., Gomes, S., Viterbo, P., Shuttleworth, W.J., Blyth, E., Österle, H., Adam, J.C., Bellouin, N., Boucher, O. and Best, M.: Creation of the WATCH forcing data and its use to assess global and regional reference crop evaporation over land during the twentieth century, *J. Hydrometeorol.*, Vol.12, pp.823-848, 2011
- 5) Piani, C., Haerter, J.O. and Coppola, E.: Statistical bias correction for daily precipitation in regional climate models over Europe, *Theor. Appl. Climatol.*, Vol.99, pp.187-192, 2010.
- 6) Piani, C., Weedon, G.P., Best, M., Gomes, S.M., Viterbo, P., Hagemann, S. and Haerter, J.O.: Statistical bias correction of global simulated daily precipitation and temperature for the application of hydrological models, *J. Hydrol.*, Vol.395, pp.199-215, 2010.
- 7) The Intersectoral Impact Model Intercomparison Project (ISI-MIP): *Project design and simulation protocol*, Version 1.3, 2012.

(2012. 9. 30受付)