

MRI-AGCM3.2S による短波放射の再現性評価と バイアス補正に関する基礎的研究

Fundamental Research on Evaluation and Bias Correction for Short Wave Radiation by MRI-AGCM3.2S

萬和明⁽¹⁾・奥村卓弥⁽¹⁾・立川康人⁽¹⁾

Kazuaki YOROZU⁽¹⁾, Takuya OKUMURA⁽¹⁾ and Yasuto TACHIKAWA⁽¹⁾

(1) 京都大学大学院工学研究科

(1) Graduate school of engineering, Kyoto University

Synopsis

It is essential to assess the crop growth state because the agricultural water usage is dominant to total water consumption whole the world. The crop growth models are utilized to simulate and to predict crop growth state and crop production under the meteorological projection with climate change assumption based on GCM. In general, GCM output has some bias, so bias correction is often implemented. Not so many bias correction methods to short wave radiation have been proposed compared with that to precipitation. In this study, short wave radiation by MRI-AGCM3.2S is validated to observation and simple bias correction method is applied and evaluated.

キーワード：短波放射，MRI-AGCM3.2S，全天日射量，クオンタイルマッピング，バイアス補正

Keywords: Short Wave Radiation, MRI-AGCM3.2S, Solar Radiation, Quantile Mapping Method, Bias Correction

1. 序論

昨今，人口増加が予想されることから食糧需要の増加が懸念されている．そのため農地で生産される食料の安定供給について思案し，今後の食料供給について予測することは重要である．現在世界で生産されている食料のうち40％は灌漑農地で生産されているという報告がある．将来必要とされる食料生産を確保するためには，将来気候条件下において農業用水が確保可能かどうかをもっとも危惧すべき要素のひとつといえる．必要な農業用水量を見積もるためには，水循環モデルに作物成長モデルを結合した

モデルを使用することが多い．これらのモデルを用いて将来気候条件下での農業用水を推定する際には GCM (General Circulation Model: 大循環モデル) の出力値を大気境界条件に用いることがほとんどである．しかしながら GCM 出力値をそのまま水循環モデル等の数値モデルの入力値として利用するには問題点が存在する．GCM は元来複雑な自然現象を，様々な方程式を用いて単純化して表現するモデルであるため，系統的なバイアスが存在するのである．そこで一般に GCM 出力を数値モデルの入力値に用いる際には，GCM 出力にバイアス補正を施すことが多い．作物の成長に大きく関係する気象要素は降水量だ

けでなく、気温や日射量である。たとえば作物モデルでは、作物収量を算出する際の要素として、短波放射量に係数を乗じることで作物の短波放射量収量を求め、それを収穫までの期間で積分していることが多い (Horie et al., 1995; Krysanova and Wechsung, 2000)。そこでGCM出力による短波放射量の値を作物モデルに入力する場合、作物の成育期間中に積算した短波放射量の精度が重要となる。降水量や気温に関するバイアス補正の開発や再現性評価などの研究が数多く行われてきた (Innomata et al., 2011; 渡辺ら, 2012; 渡辺ら, 2013) のに対して、短波放射量に関するバイアス補正や再現性評価の研究は田中ら (2008) や飯泉ら (2010) が行っているが数少ない。したがって本研究では、GCM出力の短波放射量のバイアス補正を行う。本研究で用いるGCMは、気象庁気象研究所の超高解像度全球大気モデルMRI-AGCM3.2S (Mizuta et al., 2012) である。再現性評価の対象とする観測値は気象庁観測による全天日射量である。また近未来気候、将来気候条件下でのMRI-AGCM3.2S出力値にバイアス補正を施し、将来の短波放射量変動を予測する。

2. 使用するデータ

2.1 MRI-AGCM3.2Sによる短波放射量推定

本稿では、気象庁気象研究所が開発した大気大循環モデルであるMRI-AGCM3.2S (Mizuta et al., 2012) による推定された短波放射量を分析する。MRI-AGCM3.2Sでは地球上を約20km間隔の格子で表現している。短波放射量は3時間単位の推定値が提供されているが、本稿では24時間分を積算し、日単位の短波放射量を分析に使用する。以後、MRI-AGCM3.2Sによる日単位の短波放射量の推定値をGCM出力値と呼ぶことにする。MRI-AGCM3.2Sの出力データ提供期間は、現在気候が1979~2008年、近未来気候が2015~2044年、将来気候が2075~2104年である。

2.2 気象庁による全天日射量観測

気象庁は、約50の地上気象観測所で全天日射量を観測している。全天日射とは、直達・散乱を合わせた、地表面が受け取るすべての太陽光を指す。全天日射量は気象庁のホームページで公開されている (気象庁, 2014)。公開されている全天日射量は、1989年までは日単位、1990年以降は時間単位である。MRI-AGCM3.2Sの再現性評価のために、1979年から1989年は日単位の全天日射量をそのまま使用し、1990年から2008年は1時間ごとの観測値を24時間分積算して日単位の全天日射量とした。以後、気象庁による日単位の全天日射量の観測値を気象庁観測値と呼ぶ。

Table 1 Selected JMA observation points in this study.

Prefecture	Point	Longitude	Latitude
Hokkaido	Sapporo	141° 19.7'	43° 03.6'
Hokkaido	Hakodate	140° 45.2'	41° 49.0'
Aomori	Aomori	140° 46.1'	40° 49.3'
Iwate	Morioka	141° 09.9'	39° 41.9'
Yamanashi	Kohu	138° 33.2'	35° 40.0'
Aichi	Nagoya	136° 57.9'	35° 10.0'
Chiba	Choshi	140° 51.4'	35° 44.3'
Nara	Nara	135° 49.6'	34° 41.6'
Osaka	Osaka	135° 31.1'	34° 40.9'
Hiroshima	Hiroshima	132° 27.7'	34° 23.9'
Fukuoka	Fukuoka	130° 22.5'	33° 34.9'
Kochi	Kochi	133° 32.9'	33° 34.0'
Oita	Oita	131° 37.1'	33° 14.1'
Kagoshima	Kagoshima	130° 32.8'	31° 33.3'
Okinawa	Naha	127° 41.1'	26° 12.4'

本稿では全天日射量を観測している約50ヶ所の気象庁観測点のうち、15ヶ所を選択して分析に使用した。選択した観測地点をTable 1に示す。

2.3 データ欠損

提供されているMRI-AGCM3.2Sの推定値は、世界標準時で出力されている。そのため、日本域では各気候区分の初日は日本時間午前9時からしか提供されない。したがって、本稿で対象とするGCM出力値は、各気候区分の最初の年は、1月1日の値が欠損となる。

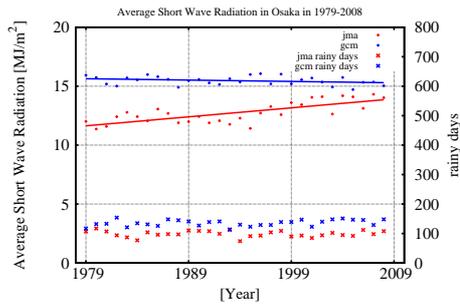
気象庁観測値は、対象とした15の観測地点で、1979~2008年の30年間で合計435日分が欠損であった。平均すると、各観測地点で毎年1日分の欠損ということになり、分析結果に大きな影響を与える重大な欠損ではないと判断する。

本稿では、GCM出力値と気象庁観測値との比較やGCM出力値同士の比較の際には、非超過確率ごとに比較を行う。必要に応じて内挿することにより、任意の非超過確率において値を比較することにする。本稿で用いる内挿法は後述する。

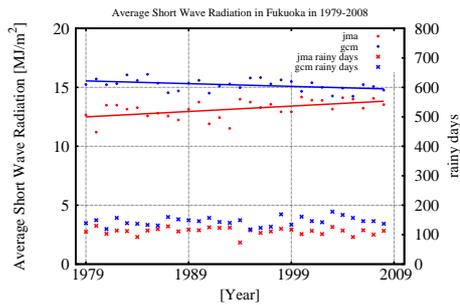
3. MRI-AGCM3.2Sによる短波放射の再現性評価

3.1 現在気候の経年変化と年平均値の比較

まず本節では、1979~2008年までの気象庁観測値とGCM出力値を比較する。観測15地点において、現



(a) Osaka



(b) Fukuoka

Fig. 1 Annual trend of short wave radiation in present climate.

在気候におけるGCM出力値と気象庁観測値の1年平均の日単位の短波放射量を計算した。

結果の一例として大阪地点をFig. 1(a), 福岡地点をFig. 1(b)に示す。同図中で、赤丸点と青丸点、それぞれ短波放射量の気象庁観測値とGCM出力値を示し、赤×点と青×点、それぞれ毎年の1mm以上の降水日数を意味する。横軸は西暦、左縦軸は年平均日短波放射量(単位はMJ/m²)、右縦軸は1mm以上の降水日数である。また、短波放射量の気象庁観測値、GCM出力値ともに、最小二乗法を用いて変動傾向を一次関数で示した。

GCM出力値は、現在気候ではゆるやかな減少傾向を示しており、年平均値は観測値より大きな値を出力している。同図における大阪地点と福岡地点では、短波放射量のGCM出力値と気象庁観測値の年平均値の差は約3 MJ/m²である。また、GCM出力の降水日数は観測された降水日数より大きい傾向があり、短波放射量のGCM出力値、気象庁観測値ともに、降水日が多い年は短波放射量が小さくなり、降水日が少ない年は短波放射量が大きくなる傾向がある。よっ

Table 2 Annual change of daily short wave radiation (Unit is MJ/m²/year).

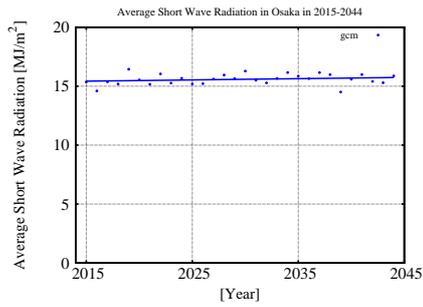
Point	GCM	JMA
Sapporo	8.319×10^{-3}	3.462×10^{-2}
Hakodate	-2.326×10^{-3}	-4.294×10^{-3}
Aomori	-6.351×10^{-3}	1.264×10^{-2}
Morioka	-1.920×10^{-2}	3.223×10^{-2}
Kofu	-1.697×10^{-2}	3.104×10^{-2}
Nagoya	-1.655×10^{-2}	5.510×10^{-2}
Choshi	-1.813×10^{-2}	6.256×10^{-2}
Nara	-1.196×10^{-2}	2.573×10^{-2}
Osaka	-1.154×10^{-2}	7.637×10^{-2}
Hiroshima	-2.007×10^{-2}	4.512×10^{-2}
Fukuoka	-2.323×10^{-2}	4.580×10^{-2}
Kochi	-1.697×10^{-2}	2.451×10^{-2}
Oita	-2.123×10^{-2}	4.342×10^{-2}
Kagoshima	-1.861×10^{-2}	5.749×10^{-2}
Naha	7.007×10^{-3}	3.384×10^{-2}

Table 3 The 15 points average of annual change and average of daily short wave radiation (Unit is MJ/m²/year).

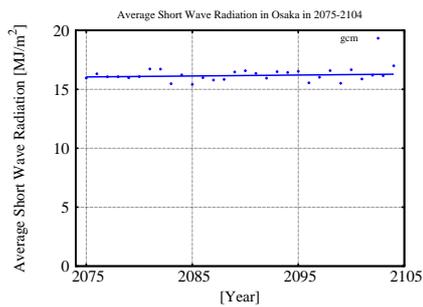
Term	Annual trend	Annual average
JMA	3.844×10^{-2}	14.71
GCM in present	-1.252×10^{-2}	17.00
GCM in near future	1.502×10^{-2}	17.16
GCM in future	1.390×10^{-2}	17.36

て短波放射量は降水量に影響を受けることがわかる。ただしGCM出力では、観測より降水日が多いにも関わらず短波放射量は観測値よりも大きいため、恒常的にGCMは観測値より大きな短波放射量を出力していることがわかる。

観測15地点における、1979~2008年までの30年間における年平均短波放射量の経年変化量をTable 2に示す。また、15地点平均の経年変化量と年平均短波放射量をTable 3に示す。気象庁観測値の年平均値の変化量は函館市を除いて正であり、15地点を平均すると 3.844×10^{-2} MJ/m²である。一方、GCM出力値の年平均値の変化量は、札幌地点と那覇地点を除いて負であり、15地点を平均すると -1.252×10^{-2} MJ/m²である。現在気候においてGCM出力値は気象庁観測値よりも過大であり、その差は15地点平均で約2.3 MJ/m²である。これは1日あたり蒸発散量にして約



(a) Osaka in near future climate



(b) Osaka in future climate

Fig. 2 Annual trend of short wave radiation in future climate.

1mmに相当し、GCM出力値の過大バイアスが地表面付近での水収支計算に与える影響は無視することはできない。

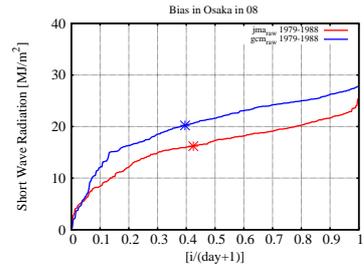
3.2 MRI-AGCM3.2Sによる短波放射量の将来変化

近未来気候と将来気候におけるGCMの変動傾向を考える。

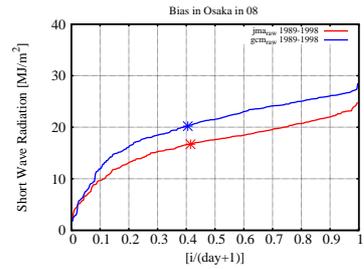
Fig. 2(a), Fig. 2(b)はそれぞれ大阪地点における近未来気候と将来気候の変動傾向を示す。またTable 3に分析対象期間ごとに観測15地点で平均した年平均短波放射量の変化量と日単位の短波放射量を示す。

Fig. 2(a)およびFig. 2(b)より大阪地点においては近未来気候、将来気候ともにそれぞれの期間内では変動直線はほぼ横ばいである。Table 3より現在気候においてGCM出力値は減少傾向を示しているものの、近未来気候と将来気候においては増加傾向を示している。日単位の短波放射量平均値は現在気候で17.00 MJ/m²、将来気候で17.36 MJ/m²である。

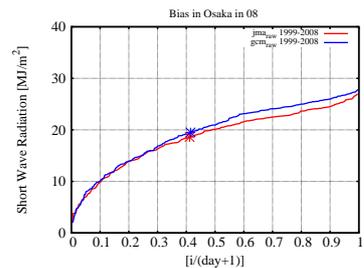
したがって現在気候においては年変化量は負であ



(a) 1979-1988



(b) 1989-1998



(c) 1999-2008

Fig. 3 Daily short wave radiation comparison at Osaka between MRI-AGCM3.2S estimation and JMA observation for 10 years term in present climate, August.

るが、1979年から2104年までのGCM出力値の変動傾向としては、分析対象期間はそれぞれ連続してはいないものの、若干の増加トレンドが存在するといえる。

年平均値についてGCM出力値には若干の増加トレンドが存在するが、各気候区分で大きな差はみられなかった。そこで、月平均値について将来気候において変化するかどうかを分析した。各気候区分について、大阪地点と福岡地点の1月、6月、8月におけるGCM出力値をFig. 4に示す。Fig. 4によると1月と8月はどの気候区分でも大きな差はないが、6月に

については、将来気候で現在気候よりも短波放射量が増加する傾向がある。

3.3 現在気候における10年ごとの比較

前節までで、1979~2008年において観測される短波放射量は増加傾向にあるが、GCM出力値はトレンドをもたず横ばい傾向であると述べた。このことから現在気候の1979年と2008年とではGCMの再現性に大きな差があり、2008年に近い方が再現性が高いと考えられる。現在気候を1979~1988年、1989~1998年、1999~2008年と3つの期間に分け、8月の大阪地点における気象庁観測値とGCM出力値をFig. 3に示す。各図中でGCM出力値は大きく変化していないのに対して、気象庁観測値は増加トレンドをもつため、大阪地点においては1999~2008年の短波放射量の観測値は、他の20年よりも大きくなっており、その結果GCM出力値の再現性が他の20年に比べ高くなっている。

3.4 地域ごとの比較

Fig. 5に8月の札幌、高知、大阪、福岡地点の気象庁観測値とGCM出力値を示す。図中において赤線は気象庁観測値、青線はGCM出力値であり、×印は平均値を示す。横軸はワイブル式から求めた非超過確率であり、縦軸は日単位の短波放射量である。

Fig. 5より、札幌地点で気象庁観測値とGCM出力値のグラフはほとんど重なっており、GCM出力値の精度が良好であることがわかる。高知地点でも気象庁観測値とGCM出力値のグラフはよく一致しているが、非超過確率0.5付近で観測値とGCM出力値の大小関係が逆転している。つまり、気象庁観測値とGCM出力値の大小関係が常に一定であるとは限らないことを示している。大阪地点ではGCM出力値と気象庁観測値のグラフの形状は似ているが、GCM出力値が過大算定であり、非超過確率0.6付近でその程度が特に大きくなっている。福岡地点では、大阪地点と同様にGCM出力値と気象庁観測値のグラフの形状は似ているが、GCM出力値が過大算定であり、非超過確率0.2付近でその程度が極大になっている。

以上のように、地点ごとに気象庁観測値とGCM出力値の関係は異なり、各地点におけるバイアスを評価し、それを適切に補正する手法を考案する必要がある。

3.5 季節ごとの短波放射量のバイアス

Fig. 5と同様に、大阪地点の3月、6月、9月、12月の気象庁観測値とGCM出力値をFig. 6に示す。短波放射量の最大値は6月で大きく12月で小さい。短波

放射量の最小値は月によらず0付近である。これは雨の日には短波放射量が著しく小さくなるためである。6月のような総短波放射量が多い月はGCM出力値と気象庁観測値の差も大きい。12月のような総短波放射量が少ない月は両者の差も小さい。各月の最大値はGCM出力値と気象庁観測値で近い値をとっている。

4. 短波放射量のバイアス補正手法の提案

本稿では、降水量のバイアス補正でよく用いられるクオンタイルマッピング手法を基本として短波放射量のバイアス手法を提案する。具体的には各地点の順位統計量を月ごとに補正する。

4.1 データ内挿法

気象庁観測値には欠損が存在しているため、GCM出力値の総データ数は気象庁観測値の総データ数よりも多い。そのためワイブル式で求めた非超過確率における任意のGCM出力値に対して、同じ非超過確率を持つ気象庁観測値が存在するとは限らない。そこで本稿では次のような手法を用いて観測値を内挿し、任意の非超過確率におけるGCM出力値の比較対象となる観測値を求める。

降順にソートした*i*番目のGCM出力値の非超過確率は $\frac{i}{n+1}$ であり、 $\frac{1}{n+1}$ から $\frac{n}{n+1}$ までの非超過確率に*n*個のデータが存在する。同様に観測値について、非超過確率が $\frac{1}{m+1}$ から $\frac{m}{m+1}$ までの*m*個のデータが存在する。ここで観測値とGCM出力値について、最小値と最大値のもつ非超過確率はそれぞれ等しいと仮定し、それぞれの非超過確率を $\frac{1}{m+1}$ から $\frac{1}{n+1}$ 、 $\frac{m}{m+1}$ から $\frac{n}{n+1}$ に変換する。次に観測値の隣り合う順位統計量をもつ非超過確率の差を $\frac{n-1}{m-1}$ 倍することで $\frac{1}{n+1}$ から $\frac{n}{n+1}$ の非超過確率をもつ*m*個の観測値が等間隔で存在するようにする。さらに*i*番目のGCM出力値に対応する観測値は隣り合う2つの観測値の内分点をあたえるものとする。以上を式で記述すると次のようになる。

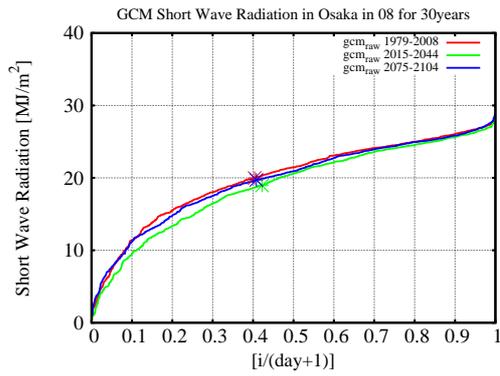
$$x'_i = x_{1+r} + (x_{2+r} - x_{1+r}) \left(\frac{(m-1)(i-1)}{n-1} - r \right) \quad (1)$$

ただし、

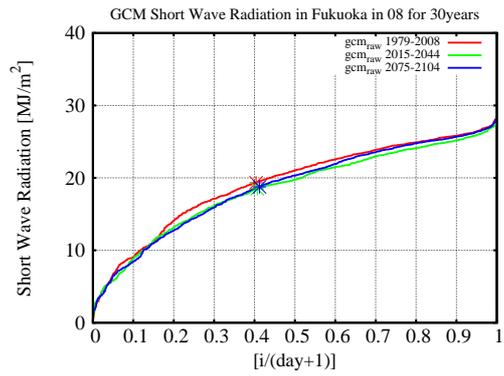
$$0 \leq \frac{(m-1)(i-1)}{n-1} - r < 1 \quad (2)$$

となるように整数*r*を定める。ここで、*i*: GCM出力番号、*x'*_{*i*}: *i*に対応する変換後観測値、*x*: 観測値、*m*: 観測値の個数、*n*: GCMの出力値個数、*m* ≤ *n*である。

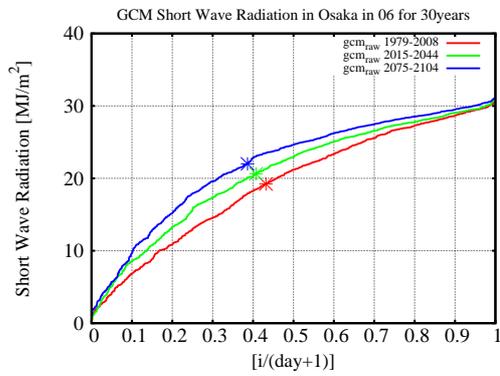
本稿に用いる内挿法はすべてこの方法とする。気象庁観測値を内挿することが主となるが、GCM出力



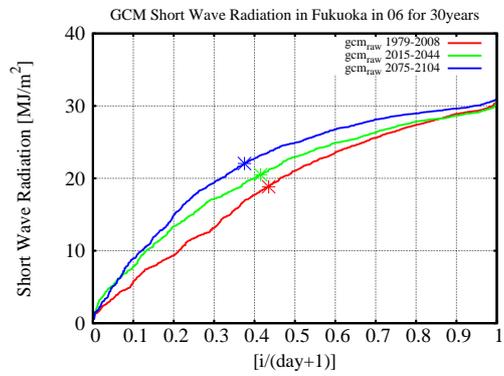
(a) Osaka, August



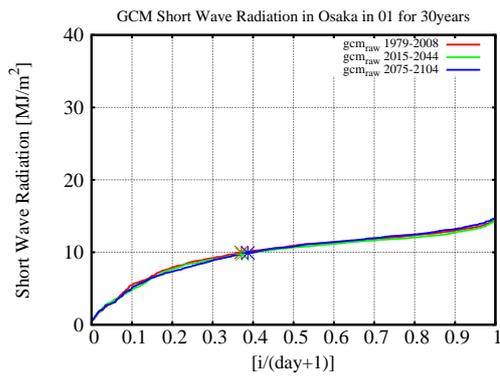
(b) Fukuoka, August



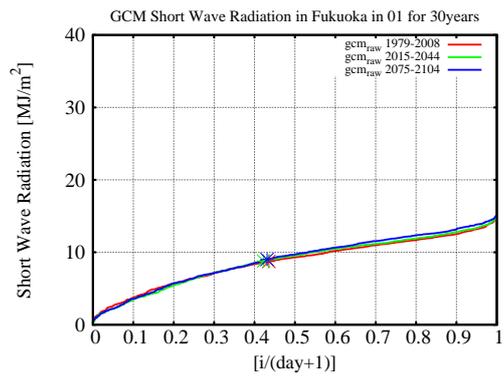
(c) Osaka, June



(d) Fukuoka, June

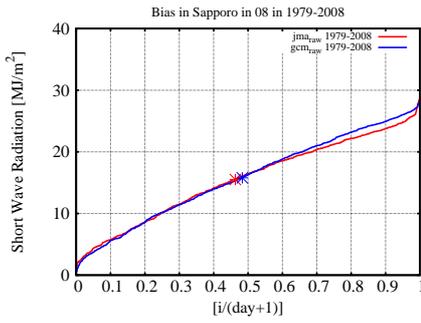


(e) Osaka, January

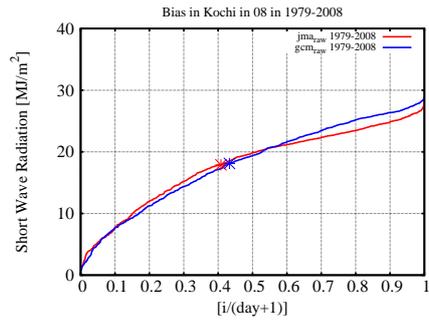


(f) Fukuoka, January

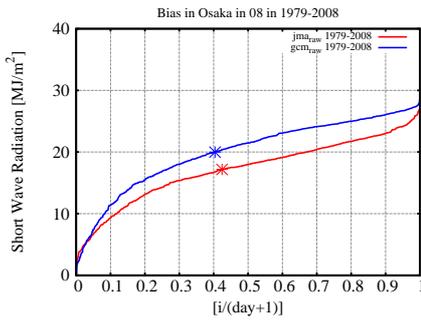
Fig. 4 Short wave radiation by MRI-AGCM3.2S.



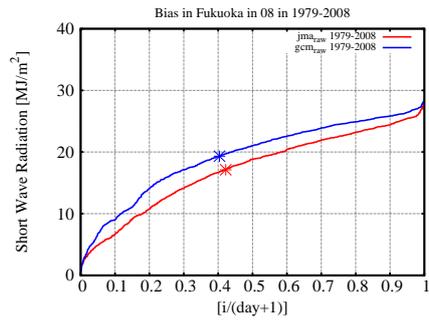
(a) Sapporo



(b) Kochi



(c) Osaka



(d) Fukuoka

Fig. 5 Daily short wave radiation comparison between MRI-AGCM3.2S estimation and JMA observation in present climate, August.

値が観測値よりも少ない場合は、同じ方法でGCM出力値を内挿することにする。常にデータ数の大きい方に合わせるようにデータ数の少ない方を内挿することにより、任意の非超過確率における数値データを与えるものとする。

4.2 バイアス補正手法の提案

前章では、地域や季節、対象期間が異なれば、GCM出力値と気象庁観測値とのバイアスの傾向も異なることを示した。現時点では、観測15地点のバイアスの傾向を、緯度経度や季節などで系統的に分類することが難しい。そこでクオンタイルマッピング手法を用いて、それぞれのGCM出力値と気象庁観測値の違いに対応したバイアス補正を施すことにする。

4.3 現在気候のバイアスを用いる手法

現在気候における観測値とGCM出力値のバイアスを、近未来気候および将来気候に適用するバイアス補正手法について述べる。この手法は、同じ順位統計量に対して現在気候でのバイアスを求め、将来

気候のGCM出力値を補正するものであり、次式のように表現される。

$$y_{i,\text{cor}}^f = y_{i,\text{raw}}^f + (x_i^p - y_{i,\text{raw}}^p) \quad (3)$$

$$y_{i,\text{cor}}^n = y_{i,\text{raw}}^n + (x_i^p - y_{i,\text{raw}}^p) \quad (4)$$

$$y_{i,\text{cor}}^p = y_{i,\text{raw}}^p + (x_i^p - y_{i,\text{raw}}^p) \quad (5)$$

ここで、 y_i : i 番目の補正前GCM出力値の順位統計量、 x_i : i 番目の内挿後観測値の順位統計量、下付き文字raw, corはそれぞれ補正前、補正後を表し、上付き文字 p , n , f はそれぞれ現在気候、近未来気候、将来気候を表す。また、'記号は内挿法を用いたことを示す。

式(3)は現在気候における気象庁観測値とGCM出力値のバイアスが、近未来、将来気候のGCM出力値がもつバイアスと等しいと仮定し、将来気候のGCM出力値に現在気候の気象庁観測値とGCM出力値の差を足すことで、将来気候のGCM出力値を補正するものである。式(4)も同様の方法で、近未来気候の

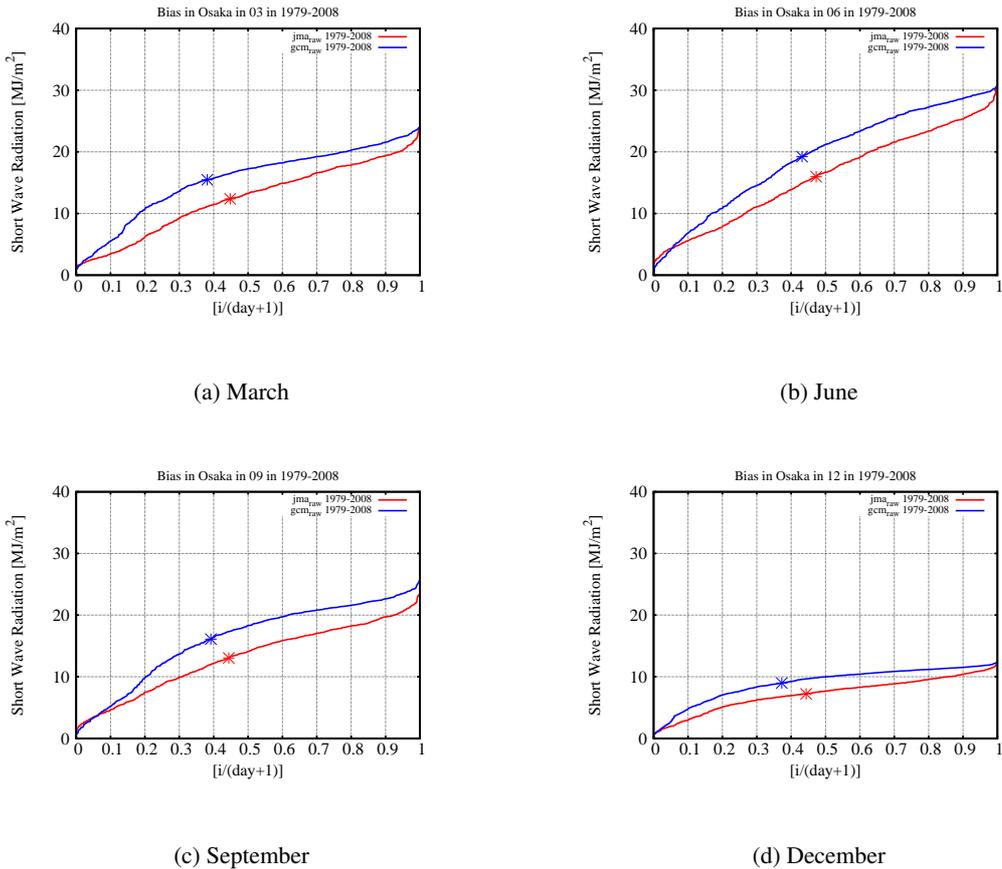


Fig. 6 Daily short wave radiation comparison between MRI-AGCM3.2S estimation and JMA observation in present climate, Osaka.

GCM出力値を補正するものである。式(5)も同様の方法で、現在気候のGCM出力値を補正するものであるが、現在気候におけるバイアスを補正しているので、補正後のGCM出力値は観測値と一致する。

本節で提案するバイアス補正手法による結果をFig. 7に示す。縦軸は日単位の短波放射量であり、横軸は非超過確率を表す。×印は平均値である。赤線は現在気候におけるバイアス補正後GCM出力値、緑線は近未来気候におけるバイアス補正後GCM出力値、青線は将来気候におけるバイアス補正後出力値である。

この手法によるバイアス補正が本稿では最も基本となるバイアス補正である。Fig. 5(c)でみられるバイアスをFig. 4(a)のGCM出力値に適用した結果がFig. 7(a)の大阪地点のバイアス補正結果となっている。また福岡地点についても同様であり、Fig. 5(d)でみられるバイアスをFig. 4(b)のGCM出力値に適用した結果がFig. 7(b)となっている。

大阪地点、福岡地点ともに、バイアス補正後のGCM出力値はバイアス補正前と比べ全体的に小さくなっ

ている。Fig. 7において、赤線は観測値と一致しているため、近未来気候と将来気候での総短波放射量は観測値と同じ程度か、もしくは少し小さくなることわかる。

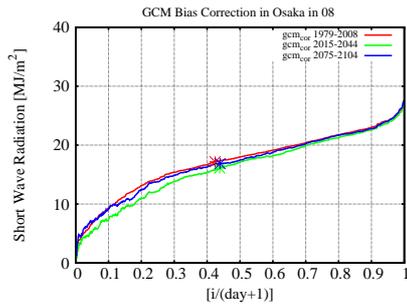
4.4 1999年から2008年のバイアスを用いる手法

前章で述べたように、GCM出力値は各気候区分においてトレンドは存在せず、また地球の明化傾向に沿うように気象庁観測値は上昇傾向にあるため、現在気候の1999~2008年の10年間のGCM出力値が他の20年間に比べ再現性が高い結果となっている。よって1999~2008年のGCM出力値と気象庁観測値のバイアスを、他の20年よりも近未来気候と将来気候のバイアスを表現していると仮定して、10年分のバイアスを用いて将来気候のGCM出力値を補正する。

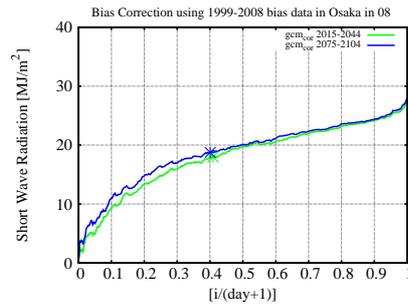
$$y_{i,\text{cor}}^f = y_{i,\text{raw}}^f + (x_{i,\text{raw}}^{p10'} - y_{i,\text{raw}}^{p10})' \quad (6)$$

$$y_{i,\text{cor}}^n = y_{i,\text{raw}}^n + (x_{i,\text{raw}}^{p10'} - y_{i,\text{raw}}^{p10})' \quad (7)$$

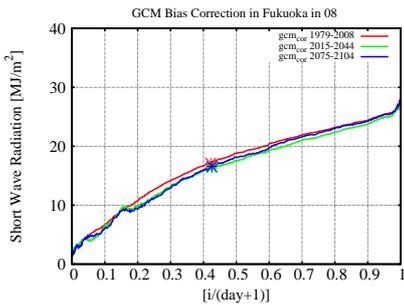
$$y_{i,\text{cor}}^p = y_{i,\text{raw}}^p + (x_{i,\text{raw}}^{p10'} - y_{i,\text{raw}}^{p10})' \quad (8)$$



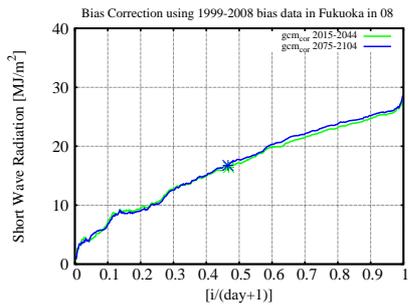
(a) Osaka



(a) Osaka



(b) Fukuoka



(b) Fukuoka

Fig. 7 Bias corrected short wave radiation in August by using bias in present climate.

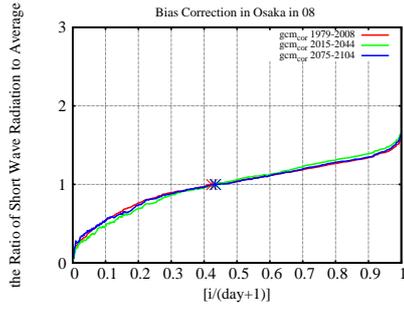
Fig. 8 Bias corrected short wave radiation in August by using bias from 1999 to 2008.

ここで式(3)から式(5)と同一であり、上付き文字 $p10$ は現在気候内の1999年から2008年を表す。

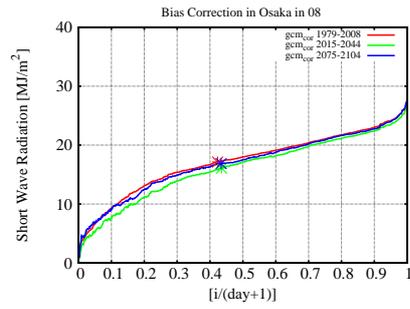
式(6)は現在気候の1999~2008年の気象庁観測値とGCM出力値のバイアスが将来気候のバイアスに等しいと仮定し、将来気候のGCM出力値に、現在気候の気象庁観測値とGCM出力値の差を足すことで、将来気候のGCM出力値を補正するものである。式(7)も同様の方法で、近未来気候のGCM出力値を補正するものである。式(8)も同様の方法で、現在気候のGCM出力値を補正するものである。本節で提案するバイアス補正手法を適用した結果をFig. 8に示す。同図で、青線は将来気候、緑線は近未来気候のバイアス補正済の短波放射量を示す。現在気候の補正結果については、この手法では観測値と一致するものではないため、示していない。Fig. 8(a)はFig. 3(c)でみられる10年間のバイアスを、Fig. 4(a)に適用したものである。Fig. 7(a)と比べると近未来気候、将来気候ともに短波放射量が増加している。Fig. 7(b)とFig. 8(b)を

比べると福岡地点については大きな変化はない。一方、大阪地点ではGCM出力値と気象庁観測値の差が、1979~2008年のFig. 5(c)に比べ、1999~2008年のFig. 3(c)は小さいため、短波放射の補正量は小さくなり、バイアス補正した短波放射量が増加する結果となった。

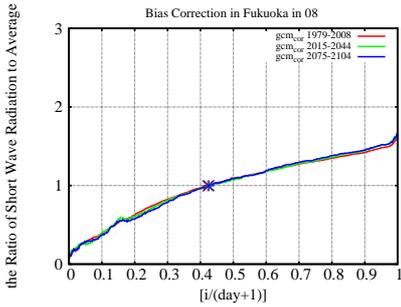
Fig. 8で示した福岡、大阪地点以外の地点にも、本節で提案するバイアス補正手法を適用し、前節で提案したバイアス補正手法の結果と比較した。紙面の都合上、結果の図表は示さないが、多くの地点、月で本節で提案するバイアス補正手法を施した方が、大きな短波放射量となる結果が得られた。これは、多くの地点で、大阪地点のように、1999~2008年のGCM出力値と気象庁観測値の差が、1979~2008年のGCM出力値と気象庁観測値の差より小さかったことを示している。このバイアス補正方法は、短波放射量が増加しているという観測事実を考慮した結果が表れているといえる。



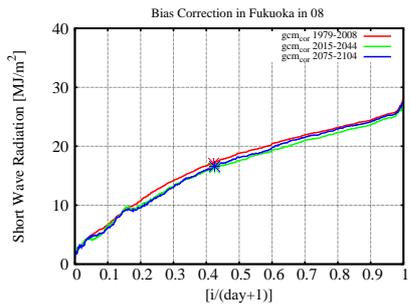
(a) Osaka



(a) Osaka



(b) Fukuoka



(b) Fukuoka

Fig. 9 The ratio of daily shot wave radiation to monthly average in August.

Fig. 10 Bias corrected short wave radiation in August by using bias of the ratio of daily value to monthly average.

4.5 平均値に対する比率を用いる手法

前節までで述べた方法では、同じ順位統計量に対するバイアスを求めそのバイアスのみを補正要素としている。この手法を15地点に適用したところ、非超過確率が小さいところで補正後のGCM出力値が負になる場合が存在した。非超過確率の小さいところで気象庁観測値とGCM出力値とのバイアスが負であり、その絶対値が適用される近未来気候や将来気候でのGCM出力値よりも大きくなってしまふと、補正後のGCM出力値が負になってしまうためである。

この問題点を解決し、またグラフの形状の違いをより適切に修正するようなバイアス補正手法を本節で提案する。提案する手法の具体的な手順は以下の通りである。

まず、順位統計量を平均値で除する。

$$Y^f_{i,raw} = \frac{y^f_{i,raw}}{y^f_{raw}} \quad (9)$$

$$Y^n_{i,raw} = \frac{y^n_{i,raw}}{y^n_{raw}} \quad (10)$$

$$Y^p_{i,raw} = \frac{y^p_{i,raw}}{y^p_{raw}} \quad (11)$$

$$X^p_i = \frac{x^p_i}{x^p} \quad (12)$$

ここで $\overline{y^f_{raw}}$, $\overline{y^n_{raw}}$, $\overline{y^p_{raw}}$, $\overline{x^p}$ はそれぞれ将来、近未来、現在のGCM出力値と気象庁観測値の平均値を意味する。式(9)から式(12)では、GCM出力値と気象庁観測値の順位統計量が、それぞれの平均値で除されているので、 $Y^f_{i,raw}$, $Y^n_{i,raw}$, $Y^p_{i,raw}$, X^p_i はそれぞれの平均値を1とし、その平均値に対する比率を表している。

次に式(13)から式(15)で、現在気候におけるバイアスをそれぞれのGCM出力値に足すことでバイアス補正を施す。

$$Y^f_{i,cor} = Y^f_{i,raw} + (X^p_i - Y^p_{i,raw})' \quad (13)$$

$$Y^n_{i,cor} = Y^n_{i,raw} + (X^p_i - Y^p_{i,raw})' \quad (14)$$

$$Y^p_{i,cor} = Y^p_{i,raw} + (X^p_i - Y^p_{i,raw})' \quad (15)$$

ここで、 $Y_{i,\text{cor}}^f$, $Y_{i,\text{cor}}^n$, $Y_{i,\text{cor}}^p$ は、それぞれの年平均日短波放射量に対する比率となっている。

以上の手順で年平均値に対する比率を補正した結果を Fig. 9 に示す。順位統計量を平均値で除したことにより、気象庁観測値とそれぞれの GCM 出力値がもつ平均値の差を無視し、グラフの形状、すなわち短波放射量の累積密度関数を補正することができる。

次に、現在気候における GCM 出力値と気象庁観測値の平均値のバイアスが近未来気候と将来気候も等しいと仮定して、式(16)から式(18)で補正する。

$$\overline{y_{\text{cor}}^f} = \overline{y_{\text{raw}}^f} + (\overline{x_{\text{raw}}^p} - \overline{y_{\text{raw}}^p}) \quad (16)$$

$$\overline{y_{\text{cor}}^n} = \overline{y_{\text{raw}}^n} + (\overline{x_{\text{raw}}^p} - \overline{y_{\text{raw}}^p}) \quad (17)$$

$$\overline{y_{\text{cor}}^p} = \overline{y_{\text{raw}}^p} + (\overline{x_{\text{raw}}^p} - \overline{y_{\text{raw}}^p}) \quad (18)$$

ここで、 $\overline{y_{\text{cor}}^f}$, $\overline{y_{\text{cor}}^n}$, $\overline{y_{\text{cor}}^p}$ は、バイアス補正後の平均値である。式(13), 式(16)より

$$y_{i,\text{cor}}^f = Y_{i,\text{raw}}^f \times \overline{y_{\text{cor}}^f} \quad (19)$$

であり、式(14), 式(17)より

$$y_{i,\text{cor}}^n = Y_{i,\text{raw}}^n \times \overline{y_{\text{cor}}^n} \quad (20)$$

であり、式(15), 式(18)より

$$y_{i,\text{cor}}^p = Y_{i,\text{raw}}^p \times \overline{y_{\text{cor}}^p} \quad (21)$$

が導かれる。以上が、本節で提案する、平均値に対する比率を用いるバイアス補正手法の手法である。

この手法では、式(19)から式(21)を用いて累積密度関数を補正した値に、バイアス補正後の平均値を乗じている。本手法を用いたバイアス補正後の短波放射量を Fig. 10 に示す。Fig. 10 を 4.3 で行ったバイアス補正結果である Fig. 7 と比較すると、平均値は変化していないが、グラフの形状は少し変化している。この補正方法によるバイアス補正が 4.3 における補正結果と違う点は、累積密度関数を補正していることである。

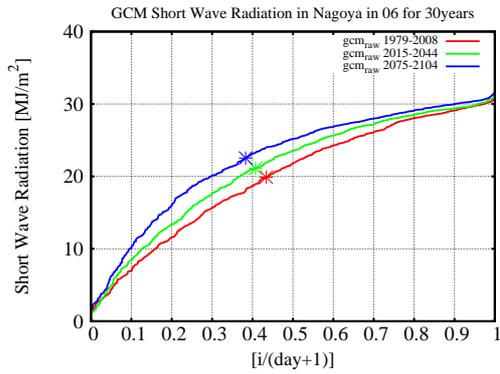
本稿で対象とする観測 15 地点の全月を対象に、本章で提案するバイアス補正手法を施した。紙面の都合上、手法間で結果に大きな変化がある 6 月の名古屋地点の補正結果を Fig. 11 に示す。

Fig. 11(a) は GCM 出力値である。このグラフに補正を施すことになる。Fig. 11(b) は現在気候における GCM 出力値と気象庁観測値を示している。気象庁観測値と GCM 出力値をそれぞれのもつ平均値で除すると Fig. 11(c) のようになる。ここで Fig. 11(b) の現在気候の GCM 出力値である青線と観測値である赤線

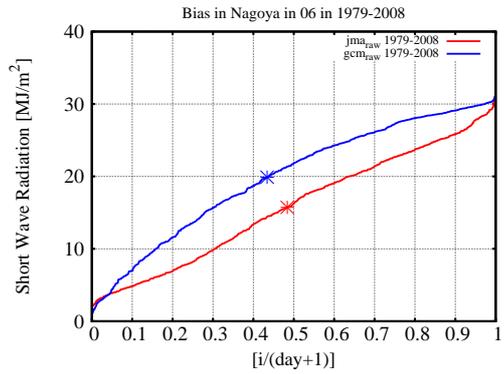
Table 4 Number of rainy days in present climate (10958 days).

Points	JMA	GCM	
	>1mm	>1mm	>2mm
Sapporo	4,147	6,725	5,493
Hakodate	3,894	4,180	3,216
Aomori	4,922	4,528	3,378
Morioka	3,924	5,954	4,701
Kofu	2,713	6,249	5,196
Nagoya	3,161	3,551	2,983
Choshi	3,346	3,877	3,143
Nara	3,179	3,555	2,954
Osaka	2,962	4,072	3,429
Hiroshima	2,937	3,706	3,116
Fukuoka	3,356	4,351	3,566
Kochi	3,338	4,548	3,932
Oita	2,929	4,947	4,069
Kakgoshima	3,604	4,583	3,905
Nawa	3,650	4,891	3,885
Average	3,470	4,647	3,797

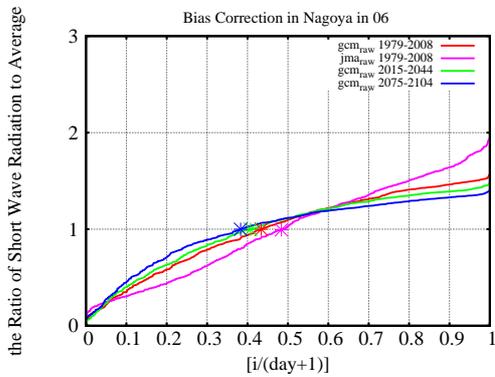
は、Fig. 11(c) の赤線とピンクの線にそれぞれ表現されている。現在気候のバイアスを利用する手法では、Fig. 11(b) において非超過確率が 0.3 から 0.8 の範囲で GCM 出力値が大幅に減少するように補正し、それ以外の領域では少し減少するように補正する。一方、平均値に対する比率を補正する手法では、Fig. 11(c) において非超過確率が 0.1 から 0.5 の範囲で GCM 出力値が少し減少するように補正し、0.7 より大きい範囲で GCM 出力値が増加するように補正する。平均値に対する比率を補正した結果が Fig. 11(d) である。これにバイアスを補正した平均値をかけることで、Fig. 11(e) の補正結果となる。現在気候のバイアスを利用する手法を適用した結果である Fig. 11(f) と比べると、将来気候を表す青い曲線は非超過確率が 0.1 から 0.4 で落ち込み、0.7 より大きい範囲では上昇している。現在気候のバイアスを利用する手法よりもバイアス補正の結果が Fig. 11(b) の赤線が示す観測値のグラフの形状に近づいている。また短波放射量の平均値は Fig. 11(e) と Fig. 11(f) で変化していないことから、平均値に対する比率を用いるバイアス補正手法は、現在気候のバイアスを利用する手法の総バイアス補正量を保存しつつ、気象庁観測値のもつ特性、すなわちグラフの形状をより近づけることができるバイアス補正手法であるといえる。



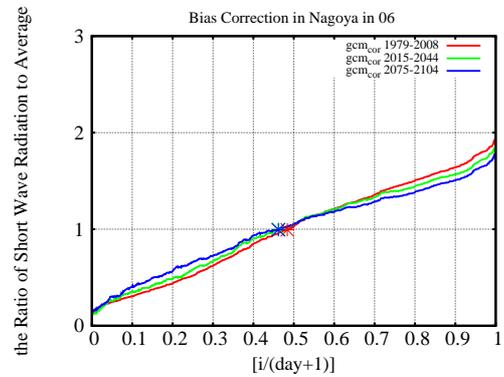
(a) GCM estimations



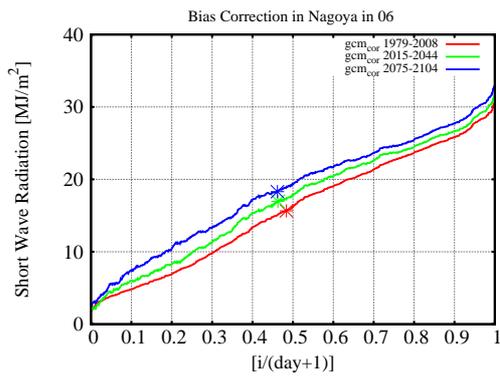
(b) Present GCM estimation and observation



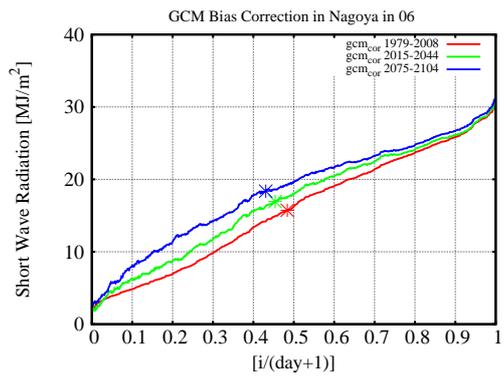
(c) Ratio of daily value to monthly average



(d) Corrected ratio

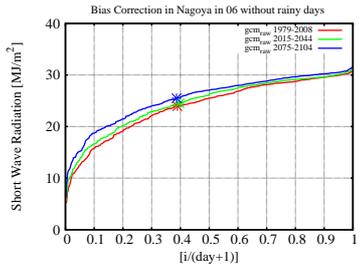


(e) Bias corrected values using ratio

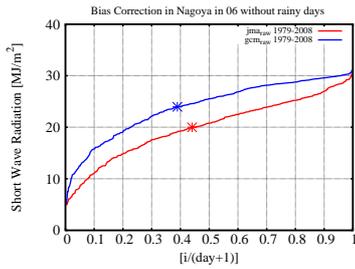


(f) Bias corrected values using quantile

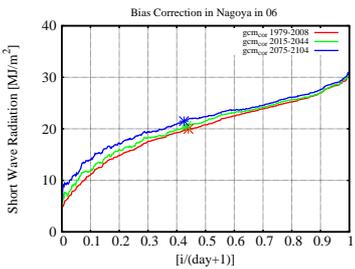
Fig. 11 Short wave radiation at Nagoya in June.



(a) GCM



(b) GCM and JMA in present climate



(c) bias corrected

Fig. 12 Bias correction for non-rainy days in June in Nagoya.

4.6 非降水日のバイアスを用いる手法

前節までの分析より、6月はGCM出力値が気象庁観測値の傾向を表現できていないことがわかった。日本の6月の特徴として梅雨が挙げられるため、降水の有無によってGCM出力値の精度に影響があると考えられる。しかしこれまでバイアス補正に降水の影響は考慮していない。3.1では短波放射量が降水の影響を受け、降水日数が多い月は総短波放射量は減少することを指摘した。したがって、降水が短波放射量に与える影響を考え、降水日以外の日のみの短波放射量を利用してバイアス補正を行うことを考

える。

まず、Table 4に気象庁観測値とGCM出力値の降水日数を示す。同表より、GCM出力値では1mm以上の降水があった日を降水日とすると、気象庁観測値より平均して年間約40日も降水日数が増えるため、GCM出力値では2mm以上を降水日の定義に用いる。

名古屋地点の6月において、非降水日のみを対象にバイアス補正を実施した結果をFig. 12に示す。補正方法は現在気候のバイアスを用いる手法に従う。なお、6月の降水日数はTable 5にまとめて示している。名古屋地点の現在気候では降水日数は5日しか変わらないため、降水の有無の精度はMRI-AGCM3.2Sは良好であると考えられる。しかしFig. 12(b)ではFig. 11(b)にあったような大きなグラフの形状の差がなくなっている。約350日が降水日であるため、Fig. 11(b)のグラフの降水日を取り除き、約3分の2の点で再作成した図がFig. 12(b)であるといえる。降水日を含めた短波放射の場合、両図を比較すると非超過確率0.1以下は降水日であるといえる。また、Fig. 12(b)では降水日などの短波放射が少ない日を対象としておらず、Fig. 11(b)と比較すると、非超過確率の小さい部分ではよりグラフの形状の違いが改善されている。

このことからGCM出力値では降水日を含めた短波放射量の累積分布関数の再現性が低いことがわかる。また短波放射量の平均値は異なるが、非降水時における短波放射量の累積分布関数の再現性は比較的高い。非降水日と降水日は短波放射量を別々に補正する方が望ましいことが示唆される。

5. 結論

本稿では日本域を対象に、MRI-AGCM3.2Sが出力した短波放射量について、気象庁の全天日射量の観測と比較することで再現性を評価し、基本的なバイアス補正手法について検討した。

まず、全天日射量の観測値から、短波放射量は現在増加傾向にあることが示された。しかし、GCM出力の短波放射量には増減トレンドはみられなかった。加えて、GCM出力の短波放射量は観測値よりも大きく推定されており、結果的に検証期間の初期と後期で、GCM出力値と観測値の差が異なることがわかった。

再現性評価の結果をふまえ、本稿では4つのバイアス補正方法を検討した。現在気候30年間のバイアスを用いる手法、1999~2008年までのバイアスを用いる手法、月平均値の比率を用いる手法、非降水日のみを対象とする手法である。それぞれのバイアス補正手法を比較すると、観測値のもつトレンドを生

Table 5 Number of rainy days in June.

Point	JMA	GCM		
	Present	Present	Near future	Future
Sapporo	197	292	305	327
Hakodate	226	224	254	259
Aomori	247	204	234	265
Morioka	286	343	332	347
Kofu	313	587	530	523
Nagoya	353	358	301	280
Choshi	330	286	239	243
Nara	353	391	329	316
Osaka	337	384	336	341
Hiroshima	337	364	306	283
Fukuoka	347	365	281	277
Koshi	390	485	440	403
Oita	365	437	387	366
Kagoshima	446	481	417	366
Nawa	307	425	453	461

かした手法である1999~2008年までのバイアスを用いる手法では、総バイアス補正量は少なくなる。また月平均値の比率を用いる手法では、現在気候30年間のバイアスを用いる手法と同様に平均値を保存しつつ、より観測値のもつ累積密度関数の形状に応じた補正ができる。非降水日のみを対象とする手法による結果では、GCM出力値のグラフの形状は観測値のグラフの形状に近づいた。したがって、降水が短波放射量に与える影響は大きく、GCM出力では降水または降水時の短波放射量の特徴を表現できていないことが示唆される。

本稿では観測点を15地点としたが、これを全観測地点に拡大し、短波放射量のバイアスに空間的な特徴が存在するかどうかを調べるのが課題となる。また降水量と短波放射量の間関係性を求め、降水量に応じたバイアス補正手法の開発を目指し、より精度の高いGCM補正値を数値モデルに利用できるように取り組みたい。特に本稿では非降水日のみをバイアス補正したが、降水日の短波放射量もバイアス補正する必要がある。

参考文献

飯泉仁之直・西森基貴・石郷岡康史・横沢正幸(2010): 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(J. Agric. Meteorol.), 66, (2): 131-143.

気象庁のホームページ, <http://www.jma.go.jp/jma/index.html> (参照日:2014/2/2)

田中賢治・萩澤佑樹・佐久間良一・小尻利治(2008): 気候モデルのバイアス検出と補正, 京都大学防災研究所年報, 第51号B, pp.723-736.

渡辺哲史・鼎信次郎・瀬戸心太・沖大幹(2012): GCM出力値補正手法により生じる月平均気温および月降水量の予測差, 土木学会論文集B1(水工学), V.68, pp.L439L444.

渡辺哲史・内海信幸・鼎信次郎・瀬戸心太・沖大幹・平林由希子(2013): GCM, RCPシナリオ, バイアス補正手法の選択が日降水量極値の将来予測に与える影響の考察, 土木学会論文集B1(水工学), V.69, pp.L385-L390.

Horie, T., Nakagawa, H., Centeno, H.G.S. and Kropff, M.J. (1995): The rice crop simulation model SIMRIW and its testing, Modelling the Impact of Climate Change on Rice in Asia, CAB International, pp.51-66.

Inomata, H., Takeuchi, K. and Fukami, K. (2011): Development of a statistical bias correction method for daily precipitation data of GCM20, Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, V.67, pp.L247-L252.

Krysanova, V. and Wechsung, F. (2000): SWIM (Soil and Water Integrated Model) User Manual Version: SWIM-8, pp.32.

Mizuta, R., Yoshimura, H., Murakami, H., Matsueda, M., Endo, H., Ose, T., Kamiguchi, K., Hosaka, M., Sugi,

M., Yukimoto, S., Kusunoki, S. and Kitoh, A. (2012):
Climate Simulations Using MRI-AGCM3.2 with 20-km
Grid, J. meteor. soc. japan., Vol.90A, pp.233-258.

(論文受理日: 2014年6月11日)