気候変動下での全球水資源量評価に向けた気候モデル出力値補正手法の開発と検証

Development and validation of the methods to correct the output from GCMs toward the water resource assessment under the climate change

渡部哲史[1]・沖大幹[2]・鼎信次郎[3]
Satoshi WATANABE, Taikan OKI and Shinjiro KANAE

[1] 学生会員　東京大学生産技術研究所　大学院博士課程（〒 153-8305 東京都目黒区駒場 4-6-1）
[2] 正会員　博士 (工学)　東京大学生産技術研究所　教授（〒 153-8305 東京都目黒区駒場 4-6-1）
[3] 正会員　博士 (工学)　東京工業大学情報環境学専攻　准教授（〒 152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1）

There is a gap between the output from a climate model and observation. This bias of the climate model should be considered when we assess the impact of climate change on water resources. Several studies have proposed the methods to assess it in consideration of the bias. However these methods for global scale study still have not validated enough. Therefore this study sorted out the characteristics of methods and validated the methods by using historical model output data and observation data. And this study made future projection data by using improved methods.

The results explained the properties of the methods. One of the proposed methods had better results in the projection of precipitation. This finding is worthwhile from the view point that this kind of validation of the methods for global scale have never tried. And this finding is useful for reveal the trend of the bias and the uncertainly of bias correction.

Key Words: *Climate change, Bias correction, GCM, Down scaling*

1. はじめに

今後二酸化炭素の排出量をいかに削減しようとも、温暖化の影響を避けることは不可能であるという報告がされている [1)]．何らかの変化が確実視されている現在，発生するであろう事象を予測し，対策を立てることは我々が今後解決すべき大きな課題のひとつである．

これまでのところ，水分野における温暖化の影響評価研究はさまざまなスケールで多数行われている [2)]．これらの影響評価のうちの多くは General Circulation Model (以下 GCM) の出力値を用いて行われている．GCM の出力値を水分野の影響評価に用いるためには 2 つの大きな問題が存在する．一方は時空間の解像度の問題であり，他方はモデルの出力値が持つバイアスの問題である．前者に関しては，GCM の出力値は水文モデルの入力値よりも解像度が大きいという空間解像度の問題と，時間単位や日単位といった短い時間スケールでは多くの不確実性を含んでいるという GCM 出力値の時間解像度の問題がある．後者に関しては GCM はモデルごとに異なる物理過程のチューニングや地形表現を行っており，出力値と観測値の間にはこれらから生じるバイアスが少なからず存在するという問題がある．

GCM 出力値の解像度の問題を克服する方法としては，GCM 出力値を境界条件とし，より解像度の小さなモデルをネスティングする方法（力学的ダウンスケーリング）と，現在までに得られている GCM 出力値と観測値との間から統計的な関係を見出し，GCM の出力値から統計的に小スケールでの将来の出力値を予測する方法（統計的ダウンスケーリング）がある。力学的ダウンスケーリングは，物理的に将来の予測値を求められることが利点であるが，計算負荷やモデル開発のコストが欠点と言える．

統計的ダウンスケーリングは力学的ダウンスケールと比べ容易に構築および利用することが可能である．従ってこれまでに多くの研究が行われてきた．これらの統計的ダウンスケーリングの方法は Weather Typing 法，回帰モデルによる方法，予測したい変数の統計的な特性を推定する Weather Generator 法などに分類される [3)]．

ここまでに述べた統計的ダウンスケールの手法は主に流域単位や地域単位で用いられている．しかし，統計的ダウンスケールの手法を全球で一様に適用することの可能性は明らかではない．また，本研究が目的とする全球をターゲットとした水資源の評価を行うための将来予測値を得るには上で述べたダウンスケール手法ではやや不都合な点が存在する．水資源の評価を行う際には GCM の出力値に対してどのような操作を行ったかが明確であることが好ましく，全球で一様の手法を用いることが必要であるため地域ごとに複雑な統計関係を仮定しなければならないダウンスケールの手法

は最適とは言えないのである．

そこで，本研究では全球で一様に適用可能な方法として目的とする変数（月平均気温と月合計雨量）に関して GCM が出力した値を解像度変換したものを直接観測値と比較することにより統計的な関係を見出し，その関係を将来の GCM 出力値に対しても用いることで将来の予測値を作成する方法を試みる．上記の統計的ダウンスケールの多くは目的とする変数の値を大気の状態などの他の変数から求めているのに対し，本研究で扱う手法は目的とする変数の出力値を直接観測値と比べる．これらを区別するために，本研究が試みる GCM の出力から直接目的とする変数を得てこれらを補正する手法を以後出力値直接補正と便宜上呼ぶこととする．

以下，本論文では 2 節で問題およびデータについて定義し，3 節で手法について示した後に，4 節および 5 節でそれぞれの手法の性能を比較・検討する．

2. 準備

(1) 問題定義

まず、本論文で扱う問題について定義する．扱う変数は月平均気温と月合計雨量であり，予測するデータの空間解像度は 0.5 度× 0.5 度とする．まず手法の検証のために 1951-1980 年までの GCM 出力値と観測値の統計的特性を比較し，この期間から得た情報を基に 1981-2000 年の GCM 出力値の補正を行い補正値と実際の観測値の比較を行う．次に 1951-2000 年の GCM 出力値と観測値を基に 2061-80 年の予測値を作成し，手法間でこの予測値がどのように異なるのかを比較する．

(2) データ

a) GCM

本研究では CMIP3 で提供されている大気･海洋結合モデルのうち，計算資源の都合から 6 つの GCM（CSIRO, GFDL, MIROC, MPI, MRI, UKMO) の出力値のみを使用した．2061-2080 年の期間において使用したシナリオは A1B である。これらの GCM のデータは出力値直接補正に先立ち，逆距離加重法を用いて 0.5 度× 0.5 度に解像度変換を行っている。

b) 観測値

本研究では Hirabayashi et al.[4] によって開発された気象外力データセット H08 を真値とみなして補正を行った．以後，このデータを観測値と表現する．H08 データは気温に関して Climate Research Unit(CRU)[5] によるデータ，降水量に関しては Chen et al.[6] のデータを基にして作成された 0.5 度× 0.5 度の全球グリッドデータであり，データの内挿手法や降雪量に関するアンダーキャッチの補正に特徴がある．

表-1 評価地域

地域分類 気温

番号	地域名		番号	地域名	
T1	熱帯	A	T6	北半球冷帯（高温）	Da
T2	北半球温帯（高温）	Ca	T7	北半球冷帯（中温）	Db
T3	北半球温帯（中低温）	Cb, Cc	T8	北半球冷帯（低温）	Dc
T4	南半球温帯（高温）	Ca	T9	北半球冷帯（極低温）	Dd
T5	南半球温帯（中低温）	Cb, Cc	T10	北半球寒帯	E
			T11	南半球冷帯･寒帯	D,E

地域分類 降水量

番号	地域名		番号	地域名	
P1	熱帯雨林気候	Af	P9	北半球冷帯湿潤気候	Df
P2	北半球熱帯モンスーン気候	Am	P10	北半球冷帯夏季少雨気候	Ds
P3	北半球熱帯サバナ気候	Aw	P11	北半球冬季少雨気候	Dw
P4	南半球熱帯モンスーン気候	Am	P12	北半球寒帯	E
P5	南半球熱帯サバナ気候	Aw	P13	南半球湿潤気候	Cf,Df,Ef
P6	北半球温帯湿潤気候	Cf	P14	南半球夏季少雨気候	Cs,Ds,Es
P7	北半球温帯夏季少雨気候	Cs	P15	南半球冬季少雨気候	Cw,Dw,Ew
P8	北半球冬季少雨気候	Cw	P16	乾燥帯	B

(3) 評価地域

各手法の性能は**表**-1 に示す地域ごとに評価を行った．この地域の分類は Köppen の気候区分 [7] を基にグリッド数を考慮して同様の地域を集めたものである．

3. 手法

(1) 既往の手法

全球をターゲットとした出力値直接補正の手法として挙げられるのは，Lehner et al. [8] が用いた差と比に基づく方法である．彼らは（将来の気温）＝（将来の GCM 出力値）＋（現在の観測値の平均）－（現在の GCM 出力値の平均）,（将来の降水量）＝（将来の GCM 出力値）×（現在の観測値の平均）／（現在の GCM 出力値の平均）として将来の予測値を求めた．

流域や地域単位の研究ではこのほかに，GCM 出力値および観測値が正規分布に従うと仮定した手法 [9] や GCM 出力値と観測値を変数の大きさの順でソートした時の各順位の誤差（GCM 出力値－観測値）が常に一定であると仮定する手法 [10] などが存在する．

(2) 本研究での手法

既往の手法の考え方を基に，本研究の問題設定に合わせた形で手法を整理する．

a) 差・比手法

上で述べた Lener et al. の手法を基にした方法を差・比手法と呼ぶ事とする．本研究では GCM，観測値ともに現在までの平均を 1951 － 2000 年の 50 年間の平均とし，この値は月別に求めることとする．

b) 正規分布手法

1951 － 2000 年までの GCM 出力値の平均値 μ_{GCM_past}，分散 σ_{GCM_past}，観測値の平均値 μ_{OBS_past}，分散 σ_{OBS_past} を月毎に求める．また将来の GCM 出力値の平均 μ_{GCM_future}，分散 σ_{GCM_future} についても同様に求め，出力値直接補正後の予測値の平均 $\hat{\mu}$，分散 $\hat{\sigma}$ を

$$\hat{\mu} = \mu_{GCM_future} + \mu_{OBS_past} - \mu_{GCM_past} \quad (1)$$

$$\hat{\sigma} = \sigma_{GCM_future} \frac{\sigma_{OBS_past}}{\sigma_{GCM_past}} \quad (2)$$

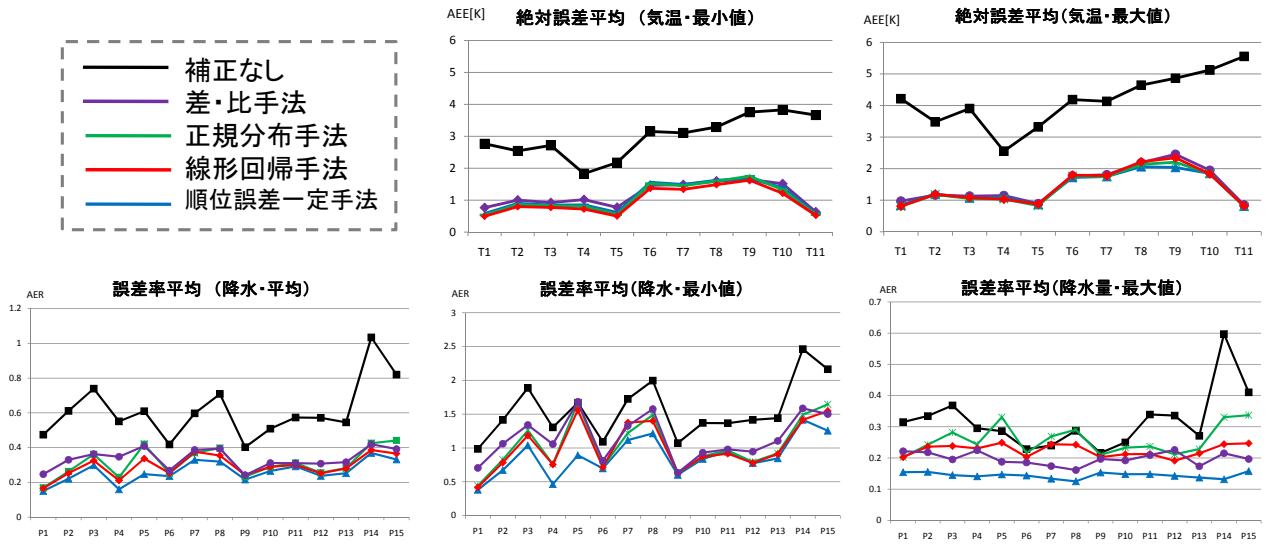

図-1 手法による検証結果の比較 （横軸：地域，縦軸：AEE[気温]，AER[降水量]）
1951-1980 のデータを用いて 1981 － 2000 年の補正を行った結果．

と求め，これらから将来の予測値 $\hat{x}$ を将来の GCM 出力値 x より

$$\hat{x} = \frac{\hat{\sigma}}{\sigma_{GCM_future}} x - \frac{\hat{\sigma}}{\sigma_{GCM_future}} \mu_{GCM_future} + \hat{\mu} \qquad (3)$$

として補正値を求める．

c) 線形回帰手法

上記の 2 つの手法は，GCM 出力値と観測値の間に一次の関係式を求めている．差･比手法は 1 つのパラメータを求めるのに対し，正規分布手法は 2 つのパラメータを求める必要がある．従って，より適切に GCM 出力値と観測値の分布の形状をとらえるのではないかと考えられる．

しかし，正規分布手法では 2 つのパラメータを正規分布が成り立つという下で予測しており，この仮定が成り立たない場所では不適切なパラメータを選択してしまう．そこで正規分布手法とは別に，現在までの期間の GCM 出力値と観測値から最小二乗法により直接 GCM 出力値と観測値の関係式を求め，求めた式を将来の GCM 出力値の対して当てはめることで補正値を求める方法を用いることとする．なお，関係式はそれぞれ月毎に求める．

d) 順位誤差一定手法

上記の 3 つの手法とは別に，ある一定期間の GCM 出力値と観測値を抜き出し，変数の大きさでそれらの順番をソートし同じ順位の GCM 出力値と観測値の差が常に一定と考える方法が存在する．本研究では 2061 － 2080 の 20 年間の予測値を作成するため，20 位それぞれの GCM 出力値と観測値を現在までの期間から得る必要がある．パラメータの較正に用いることができる期間は 1951 － 2000 年であるが，この期間から 20 年分の観測値と GCM 出力値の組合わせを取る場合は残りの 30 年分の情報が用いられない．そこで本研究では得られている 50 年の GCM 出力値と観測値のセットから複数の 20 年の組み合わせを作成しそれぞれの 20 年の組み合わせで 1 位から 20 位の順位誤差を求めこれらを各順位で平均したものを用いた．

4. 検証

(1) 検証方法

前節で述べた 4 つの手法と GCM 出力値をそのまま用いた場合の 5 つの手法の性能について，現在までのデータを用いて検討する．これまでに観測値が得られている区間のうち 1951-1980 年のデータを用いてそれぞれの手法のパラメータを求め，得られたパラメータを用いて 1981-2000 年の GCM 出力値に対して補正を行い，その結果を観測値と比較する．

(2) 評価指標

各手法の性能は次に示す絶対誤差平均 (AAE) を各グリッドごとに求め，これを各地域で平均したものを比較した．絶対誤差平均は j を 1981 － 2000 年の 20 個のデータを変数の大きさの順でソートした時の j 位を表す記号としたとき．予測値 P_j と観測値 O_j に対して

$$AAE = \frac{1}{20} \sum_{j}^{20} |P_j - O_j| \qquad (4)$$

と定義する．降水量に関してはグリッドごとの相対的な評価を可能とするために絶対誤差平均を 1951 年から 1980 年の観測値の平均値で割った誤差率平均 (AER) を評価指標とした．

(3) 結果

a) 手法の比較

まず，手法ごとの結果を**図**-1 に示す．

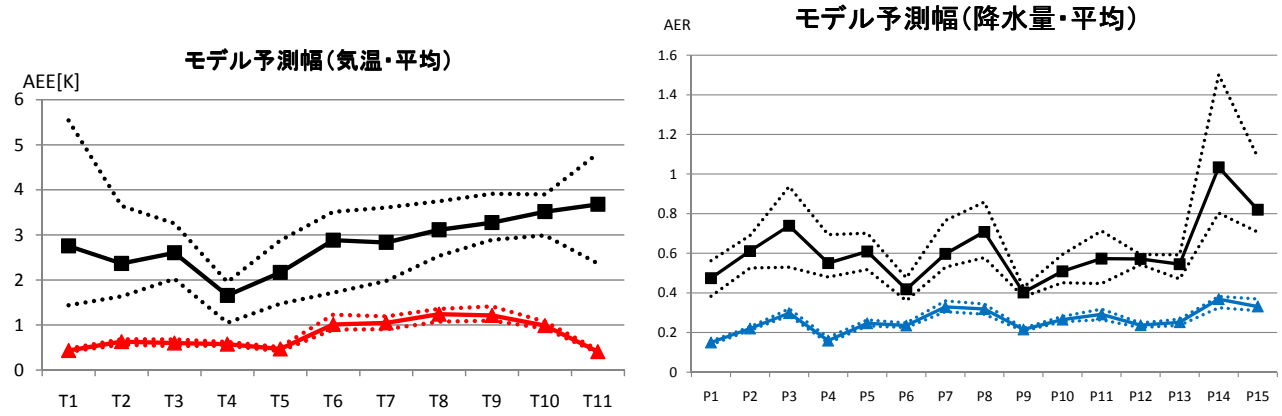

図-2 気候モデルの違いに注目した誤差の検証 （1951-1980 のデータを用いて 1981 － 2000 年の補正を行った結果.）
実線：6 気候モデルの平均値，点線：誤差最小（最大）モデルの結果
■印は補正なし，▲印は線形回帰手法（気温），順位誤差一定手法（降水量）

各図の横軸は評価する地域を表し，縦軸は気温に関しては AEE，降水量に関しては AER を表している．気温と降水量のそれぞれに対して，1981 － 2000 の 20 年間の結果のすべて（平均値）と上位 2 つ（最大値），下位 2 つ（最小値）の 3 つを比較した．ただし，気温の平均値に関しては補正なし以外の 4 つの手法間での結果の差が小さいため省略した．

検証結果より次のことが明らかとなった．(1) 平均値での結果に比べて最大値，最小値における結果では手法間の差が大きかった．(2) 気温の場合は用いた手法の違いによる検証結果の差は小さかった．(3) 降水量の場合，順位誤差一定手法が最も良い結果を示した．

降水量の検証結果は地域により傾向が異なっている．特に年々の変動が大きな地域の場合，結果が特に最小値で異なる傾向があった．これは AER の指標が観測値の平均値で誤差を割っているため，降水量の少ない地域では誤差が大きくなる傾向があることに起因する．従って，降水量の少ない地域で誤差が少ない傾向の順位誤差一定手法は，全体の平均の結果も良くなっているといえる．しかしながら，最大値においても順位誤差一定手法はどの地域についても他の手法に比べて誤差が少ない傾向を示しているため，順位誤差一定手法は最大値，最小値共に誤差を少なくする傾向があると言える．

b) 気候モデルの違いに注目した誤差の検証

次に，用いた 6 つの気候モデルの補正結果が補正手法によってどのように異なるかを，前節と同様に 1951-1980 年のデータを基にして 1981-2000 年のデータを補正した結果から調べた．この結果を**図**-2 に示す．紙面の都合からここでは上の検証で最もよい結果を示した線形回帰手法（気温）と順位誤差一定手法（降水量）のみについて図示した．■印実線は 6 つの補正なし気候モデル出力値の誤差の平均値であり，▲印実線は前述した検証で最も誤差の小さかった補正手法を 6 つの気候モデル出力値に用いた場合の誤差の平均値である．それぞれの実線の上下の点線は 6 つの気候モデルのうち最も誤差の大きい気候モデルの結果と小さい気候モデルの結果を表している．

図より出力値直接補正手法を用いることで最も誤差の大きな気候モデルの結果と最も小さな気候モデルの結果がどの地域でも小さくなっていることがわかる．つまり，出力値直接補正手法を用いることで気候モデルの出力値による結果の差が小さくなることが示された．

なお，ここでは最も結果のよい手法の平均値に関する結果のみを図示したが，そのほかの補正手法や最大値・最小値に関する補正結果に関しても同様の傾向が示された

c) 検証結果の考察

気温においては補正手法による結果の差はそれほど見られなかったが，降水量に関しては手法により特に最大値と最小値で結果が異なるという傾向が明らかとなった．今回用いた 4 つの出力値直接補正手法と補正なしを比較した場合，地域により差はあるが順位誤差一定手法が最もよい結果を示した．これら 4 つの補正手法のうち比手法，正規分布手法，線形回帰手法は降水量の値とバイアスの値に何らかの相関関係があるという考えに基づいている．特に今回は前述の 3 つの手法すべてが変数の値（この場合降水量）とバイアスの値との間に線形の関係式が成り立つことを仮定している．このことは降水量のバイアスに関しては，上述の線形の仮定が必ずしも適切ではない事を示唆している．

5. 将来予測

(1) 将来予測方法

各手法で 1951 － 2000 年までのデータから各月ごとにパラメータを求め，それらを基に 2061 － 2080 年までのデータを作成した．4 つの出力値直接補正手法に加え，補正なしモデルの出力値を含めた 5 つの手法の予測結果の比較を行った．比較の際は予測した各月の 20 年間のデータの平均値や最大値・最小値に注目した．

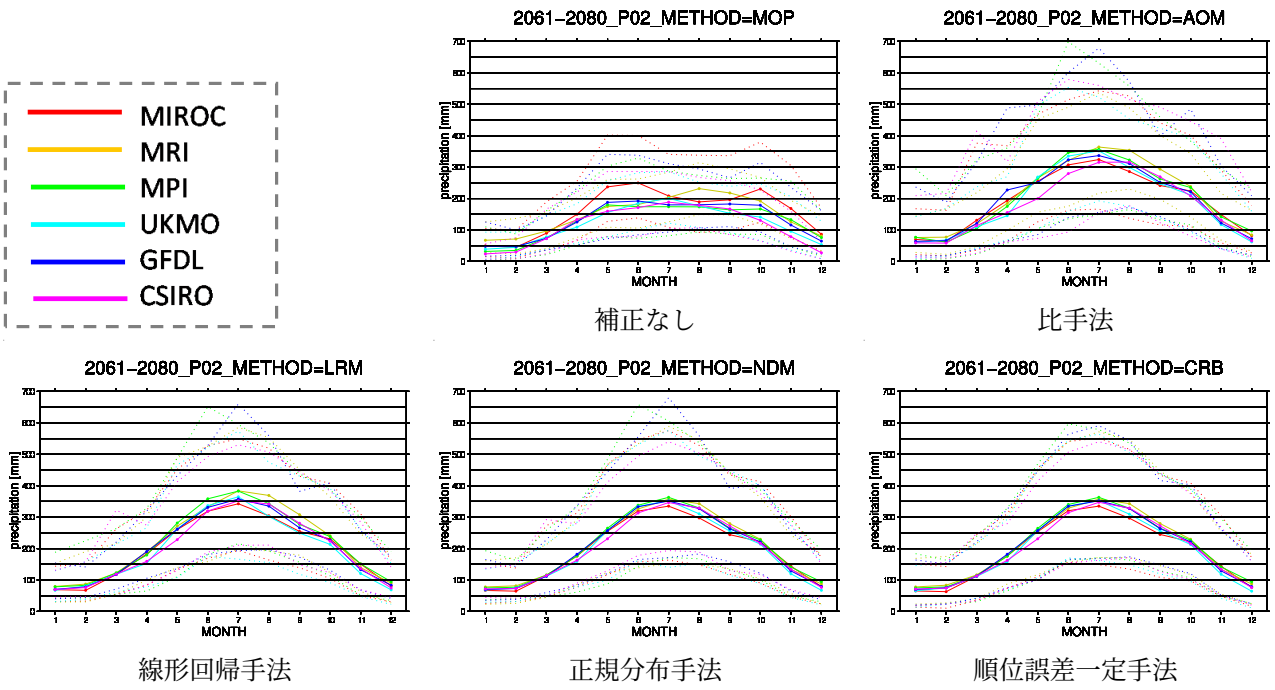

図-3 将来予測 (2061-2080) **結果** P02 **地域 （横軸：月，縦軸：降水量** [mm]）

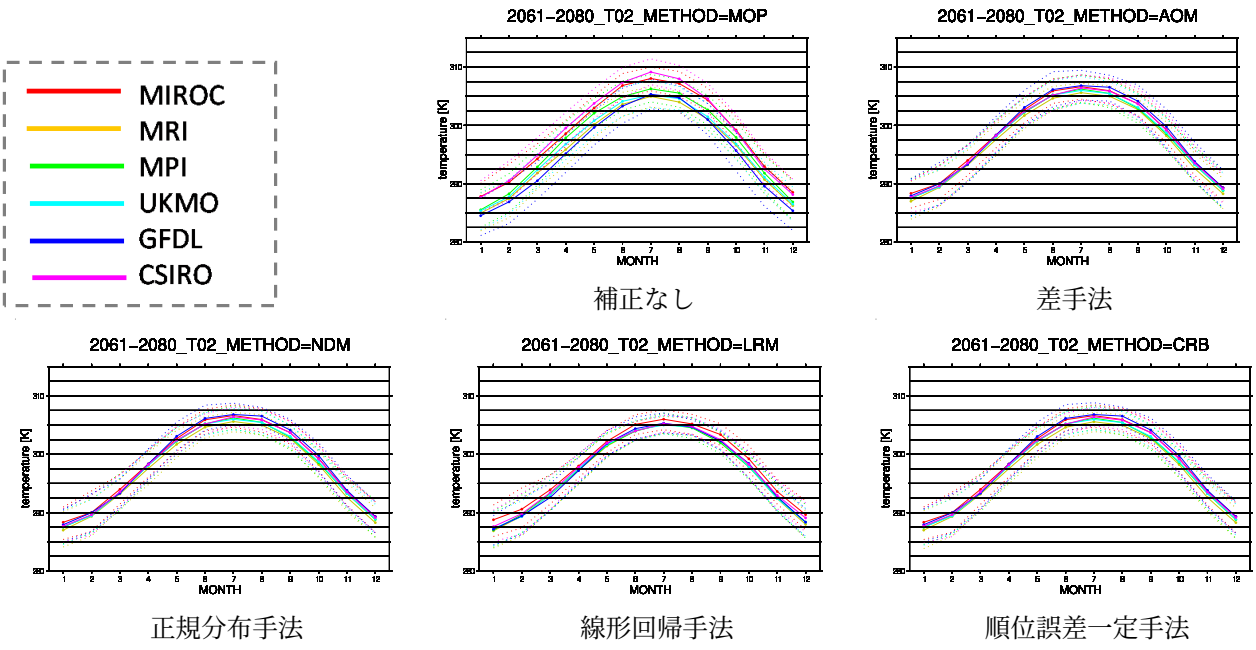

図-4 将来予測 (2061-2080) **結果** T02 **地域 （横軸：月，縦軸：気温** [K]）

(2) 結果

これらの予測結果のうち紙面の制約から，北半球熱帯モンスーン地域 [P02 地域] の降水量と北半球温帯高温域 [T02 地域] の気温のみを**図**-3 と**図**-4 に示す．図における実線は各モデルの各月の 20 年間の予測値の平均値を示し，実線の上下に位置する点線は各モデルの 20 年間の予測値の最大値と最小値を表している．実線および点線の色は予測したモデルの種類を表している．

全ての地域の予測結果に次のような共通した傾向があった．(1) 補正なしの予測結果は平均値および最大値・最小値の両方とも，出力値直接補正手法を用いた場合の予測結果と大きく異なった．(2) 出力値直接補正手法を用いることで，GCM 出力値を補正なしでそのまま用いた場合よりも平均値および最大値・最小値の両方において気候モデルによる予測結果の差が小さくなる傾向が存在した．(3) 出力値直接補正手法のうち，順位誤差一定手法を用いた場合，最も気候モデルによる結果の差が小さくなった．特に降水量ではその傾向が強かった．(4) 出力値直接補正手法を用いた予測結果の平均値に関して，正規分布手法と順位誤差一定手法ではほぼ同様であったが，差・比手法と線形回帰手法を用いた場合の予測結果の平均値はその他の手法とやや

異なる傾向があった．

(3) 予測結果の考察

まず，補正手法を用いることで誤差のモデル間の差が小さくなっていた点に注目する．将来予測の結果でモデル間の予測差が，補正を行った場合に補正なしの場合と比べて小さくなったということは，検証においても誤差のモデル間の差が小さくなる傾向があったことを考えると，今回の結果は現在までの区間のモデルと観測値のバイアスにより将来の予測値のモデル間の予測差を説明できるということを示唆していると言える．これまでの研究において，現在までの区間のデータに当てはまる傾向が将来も同様に当てはまるのかどうかについて確かではない．この点は将来予測を行う上で非常に大きな課題であり，そのような研究が精力的に行われている現状を考えると，今回の結果は非常に興味深いものといえる．

次に，手法間の結果の傾向について考察する．前節で誤差のモデル間の差について検証を行ったが，このときは補正なしの場合を除いて手法による違いはそれほど大きくなかった．しかし，将来予測においては順位誤差一定手法以外の手法では補正手法により程度の違いはあるものの，モデル間の予測差が最大値もしくは最小値で大きい季節がいくつか見られた．この原因としては今回検証を行った観測値が得られている現在までの期間では気候変動の変化量が小さいためそれほど手法間の違いが大きくなかったが，将来の予測においては気候変動による変化量が現在よりは大きく，その変化量の大きな季節や地域では手法による違いが大きくなったのではないかと考えられる．

6. まとめ

気候変動時の水資源の影響評価を行うためにGCM出力値を直接補正する手法として，月平均気温と月合計降水量に関してこれまでに用いられている出力値直接補正手法を整理し，それらに改良を加えたものの検証および予測値の傾向の把握を行った．本研究の検証では，何らかの補正手法を用いることでGCM出力値を補正なしでそのまま用いた場合に比べ誤差を減らすことができた．降水量の最大値や最小値に関しては，補正の手法によって結果が少なからず異なった．なお，今回の検証では順位誤差一定手法がそれらにおいては良い結果を示した．また，将来予測データに補正手法を用いた時の結果の傾向を調べた結果，補正手法によって気候モデル間の予測結果の差に違いが見られた．検証において誤差がより少ない手法ほど，気候モデルの違いによらず予測結果が似た値を示す傾向があった．

今回比較した手法のうち順位に注目した手法である順位誤差一定手法が，検証および将来予測で共に出力値直接補正により気候モデルの違いによる結果の差を小さくするという同様の傾向を持っていたことは興味深い．また，順位ごとの誤差を一定とする方法は，他の手法が変数の値と誤差との間に何らかの線形の関係式を仮定しようとするのとは異なる仮定に基づいており，出力値直接補正の方法として今後さらに検証を進めていく必要があると考えられる．

謝辞：本研究は文部科学省「21 世紀気候変動予測革新プログラム」ならびに日本学術振興会科学研究費補助金 (S)19106008 の成果の一部である。

参考文献

1) Susan Solomon, Gian-Kasper Plattner, Reto Knutti, and Pierre Friedlingstein: Irreversible climate change due to carbon dioxide emissions *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, Vol.106, pp.1704-1709, 2009.
2) 例えば，Niguel W. Arnell: Climate change and global water resources: SRES emissions and socio-economic scenarios *Global Environmental Change*, Vol.14, pp.31-52, 2004.
3) RL Wilby, SP Charles, E Zorita, B timbal, P Whetton, LO Mearns: Guidelines for Use Climate Scenarios Developed from Statistical Downscaling Methods. http://www.ipcc-data.org/guidelines/dgm_no2_v1_09_2004.pdf, 2004.
4) Yukiko HIRABAYASHI, Shinjiro KANAE, Ken MOTOYA, Kooiti MASUDA and Petra Döll: A 59-year (1948-2006) global meteorological forcing data set for land surface models. Part I: Development of daily forcing and assessment of precipitation intensity *Hydrological research letters*, Vol.2, pp.36-40, 2008.
5) Mitchel TD, Jones PD: An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids, *International journal of climatology*, Vol25, 693-712, 2005.
6) Chen M, Xie P, Janowiak JE: Global land precipitation: a 50-yr monthly analysis based on gauge observation, *Journal of hydrometeorology*, Vol.3, 249-266, 2002.
7) Markus KOTTEK, Jurgen GRIESER2, Christoph BECK, Bruno RUDOLF and Franz RUBEL: World Map of the Koppen-Geiger climate classification updated *Meteorologische Zeitschrift*, Vol.15, 259-263, 2006.
8) Bernand Lehner, Petra DÏl, Joseph Alcamo, Thomas Henrichs and Frank Kaspar: Estimating the impact on flood and drought risks In Europe: A continental, Integrated analysis *Climatic Change*, Vol.75, 273-299, 2006.
9) Takara Kaoru, Sunmin Kim, Yasuto Tachikawa and Eiichi Nakakita: Assessing climate change impact on water resources in the Tone River basin, Japan, using super-high-resolution atmospheric model output *Journal of Disaster Research*, Vol.4, 12-23, 2009.
10) A.W.Wood, L.R.Leung, V.Sridhar and D.P.Lettenmaier: Hydrologic implications of dynamical and statistical approaches to downscaling climate model outputs *Climatic Change*, Vol.62, 189-216, 2004.

（2009.9.30 受付）