

## GCMデータによる日本における降水特性の再現性と将来変化について

道広有理・佐藤嘉展・鈴木靖

### 要 旨

CMIP3の17の全球気候モデル（GCM）と、格子間隔20kmもしくは60kmのMRI-AGCMの4つのGCMによる実験結果を用いて、日本国内の降水特性の再現性および将来変化を調べた。解析した項目は、20年間の平均月降水量および標準偏差、日降水量の上位2%強度、日降水量1mm未満で定義した無降水日数である。全ての項目について、現在気候の再現性はMRI-AGCMの方が良好であった。将来変化を現在と将来の比率で表して比較すると、CMIP3とMRI-AGCMのどちらもGCMごとに結果がばらついていて、平均するとどの項目についても概ね同じ程度の変化率となることがわかった。

**キーワード：** GCM, 気候変動, 降水量, 大雨, 渇水

### 1. はじめに

地球温暖化研究に用いられるGCM（Global Climate Model, 全球気候モデル）には、平均的な気候値の変化に加え、洪水や渇水の頻度や規模に対する予測が期待されている。台風の経路や勢力、前線に伴う集中豪雨など、個々の現象を数値モデル上で表現するためには、時空間スケールの小さい現象を含めた精度の高い予測が要求される。そのため、気候モデルの解像度はより詳細化され、GCMを元データとしたダウンスケーリングも盛んに行われている。ただし、モデルの高解像度化やダウンスケーリングは、非常に多くの計算機資源を必要とするため、必然的にケース数が乏しい傾向にある。それに対し、水平格子間隔が100km以上の粗いGCMは、複数の温室効果ガス排出シナリオに対する将来予測結果が存在したり、世界各国の複数機関が開発したGCMによるデータが利用できたりするなどの利点がある。

温暖化の影響評価には、GCMの予測結果を利用することが一般的であるが、当然ながら用いるデータによって結果は異なる。将来予測に対する不確実性に配慮した上で評価することが不可欠であり、個々のGCMによる予測結果の違いを把握しておくことは重要である。

そこで本研究では、IPCCの第4次評価報告書（IPCC, 2007）に用いられたCMIP3の17モデル（水平方向の解像度約100～400km）と、気象庁気象研究所の開発した高解像度大気モデルMRI-AGCM

（Kusunoki et al., 2011; Mizuta et al., 2012）のうち3.1H/3.2H（同60km）および3.1S/3.2S（同20km）の実験結果を解析し、日本国内における降水量特性の再現性および将来変化について検討した。

### 2. 解析手法

#### 2.1 対象データ

解析の対象とした要素は、月降水量および日降水量である。気候モデルによる実験結果については、Table 1に示すデータを収集した。将来気候に関しては、いずれも温室効果ガスの排出シナリオにA1B（大気中の温室効果ガス濃度が21世紀末頃に20世紀末の約2倍）を用いた実験結果である。これらに加え、現在気候の再現性を検証するためのデータとして、気象庁のアメダス観測値（全国約1000地点）を利用した。解析対象とした期間は、現在1980-1999年、将来2080-2099年の各20年間である。

#### 2.2 データの整理方法

データの解像度を揃えるため、道広ら（2011）が示した手法を用いて、地域一次メッシュ（緯度差40分、経度差1度の約80 km四方）単位に予め整理した。Fig. 1に示すように、CMIP3の17のGCMおよびMRI-AGCM-3.1H/3.2Hについては、直近の4格子の値を平均してメッシュの代表値とした。解像度の高いMRI-AGCM3.1S/3.2Sおよびアメダス観測値は、一次メッシュ内に含まれる格子点あるいは観測点を全て

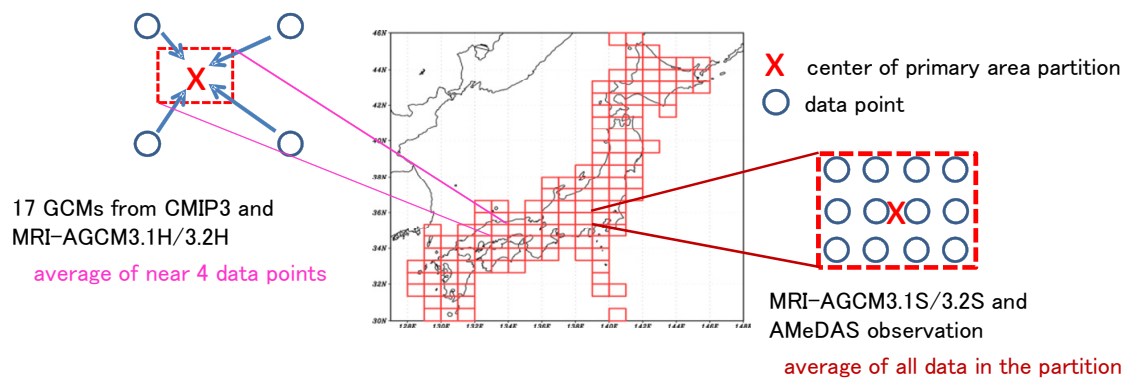


Fig. 1 Data arrangement based on primary area partition of grid square method

平均した。

その上で、日本をFig. 2に示す6つの地域（北日本、東日本、西日本のそれぞれ太平洋側および日本海側）に区分して解析を行った。Table 1に示すように、用いたGCMのうち、解像度の粗いものは格子間隔が400km以上でモデル上の日本列島の地形表現は不十分であり、本来は日本国内を地域分割した解析に耐えうる分解能はない。本研究では、こうした点も予測の不確実性の一部と捉えて解析し、様々なGCMによる予測のばらつきを調べた。

## 2.3 解析項目

GCMによる将来予測において、大雨や渇水の頻度や強度がどのように変化しているのかを把握するため、以下の項目について調査した。

### (1) 月平均降水量および変動

月降水量を用いて、20年間の期間平均値を月別に算出した。また、年ごとの変動幅を検証するために、

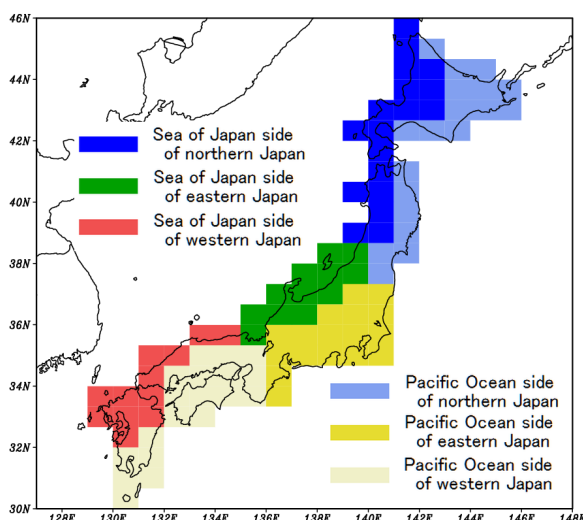


Fig. 2 Area classification

月別に標準偏差を求めた。一次メッシュごとに算出したこれらの値をFig. 2で示した地域ごとに平均して代表値とした。

### (2) 日降水量の上位2%強度

大雨を示す指標として、日降水量の上位2%降水強度に着目した。現在もしくは将来気候の20年間について、日降水量の大きいものから2%（146日分）の降水強度を算出し、比較した。日単位の降水は空間スケールが小さいことから、Fig. 2で示した地域別に、最も上位2%の降水強度が大きいメッシュを抽出し、それをその地域の代表値とした。現在気候と将来気候を比較する際は、降水強度最大のメッシュ同士で比較しており、同一のメッシュになるとは限らない。また、全期間のデータから大きい順に抽出している

Table 1 List of GCMs from CMIP3 and MRI-AGCM

| model            | number of grid |      |           | distance of lat. (km) |
|------------------|----------------|------|-----------|-----------------------|
|                  | lon.           | lat. | total     |                       |
| INGV-SXG         | 320            | 160  | 51,200    | 125                   |
| MIROC3.2(hires)  | 320            | 160  | 51,200    | 125                   |
| CSIRO-Mk3.0      | 192            | 96   | 18,432    | 208                   |
| CSIRO-Mk3.5      | 192            | 96   | 18,432    | 208                   |
| GFDL-CM2.0       | 144            | 90   | 12,960    | 222                   |
| BCCR-BCM2.0      | 128            | 64   | 8,192     | 313                   |
| CGCM3.1(T63)     | 128            | 64   | 8,192     | 313                   |
| CNRM-CM3         | 128            | 64   | 8,192     | 313                   |
| MIROC3.2(medres) | 128            | 64   | 8,192     | 313                   |
| MRI-CGCM2.3.2    | 128            | 64   | 8,192     | 313                   |
| PCM              | 128            | 64   | 8,192     | 313                   |
| FGOALS-g1.0      | 128            | 60   | 7,680     | 333                   |
| IPSL-CM4         | 96             | 72   | 6,912     | 278                   |
| GISS-AOM         | 90             | 60   | 5,400     | 333                   |
| CGCM3.1(T47)     | 96             | 48   | 4,608     | 417                   |
| ECHO-G           | 96             | 48   | 4,608     | 417                   |
| INM-CM3.0        | 72             | 45   | 3,240     | 444                   |
| MRI-AGCM3.1S     | 1920           | 960  | 1,843,200 | 21                    |
| MRI-AGCM3.2S     | 1920           | 960  | 1,843,200 | 21                    |
| MRI-AGCM3.1H     | 640            | 320  | 204,800   | 63                    |
| MRI-AGCM3.2H     | 640            | 320  | 204,800   | 63                    |

ため、特定の年や季節に偏っている可能性があり、現在と将来の比較についても必ずしも同じ季節を対比している訳ではない。

### (3) 無降水日数

渇水を示す指標として、日降水量が1mm以下である日を無降水日と定義し、年間の平均無降水日数を比較した。無降水日が連続するかどうかについては考慮していない。渇水は比較的影響範囲が大きいことから、Fig. 2で示した地域別に、無降水日数を平均して代表値とした。

## 3. 解析結果

### 3.1 月平均降水量および変動

はじめに、日本国内の平均的な降水量の予測精度を把握するため、月降水量を用いて現在気候の再現性を確認した。Fig. 3はアメダス観測値とGCMによる予測値を比較したグラフであり、CMIP3については17のGCMによる平均値（マルチモデルアンサンブル）

を、MRI-AGCM3.1S/3.2Sおよび3.1H/3.2Hはそれぞれ2つのモデルの平均値を示している。CMIP3については、17のGCMの予測結果から標準偏差を計算し、エラーバーとして併記している。月別の12個のデータについてアメダス観測値を基準として相関係数およびRMSE（平均二乗誤差）を求めて評価した結果、いずれの地域においても、水平解像度が20kmで最も高いMRI-AGCM3.1S/3.2Sの再現性が高く、次いで解像度60kmのMRI-AGCM3.1H/3.2H、最も再現性の悪いのはCMIP3という結果であった。

CMIP3はマルチモデルアンサンブルにより、日本国内の地域差をある程度表現できているが、再現性はMRI-AGCMと比べると大きく劣っている。CMIP3の17GCMによる平均値±標準偏差の間にアメダス観測値が入っていない場合も多い。特に北日本および東日本の日本海側の地域において再現性が悪く、冬季の降水、つまり降雪を十分に予測できていないことがわかる。

月降水量の標準偏差については、全国的に同じような傾向を示した。Fig. 4に6地域の平均値を示した

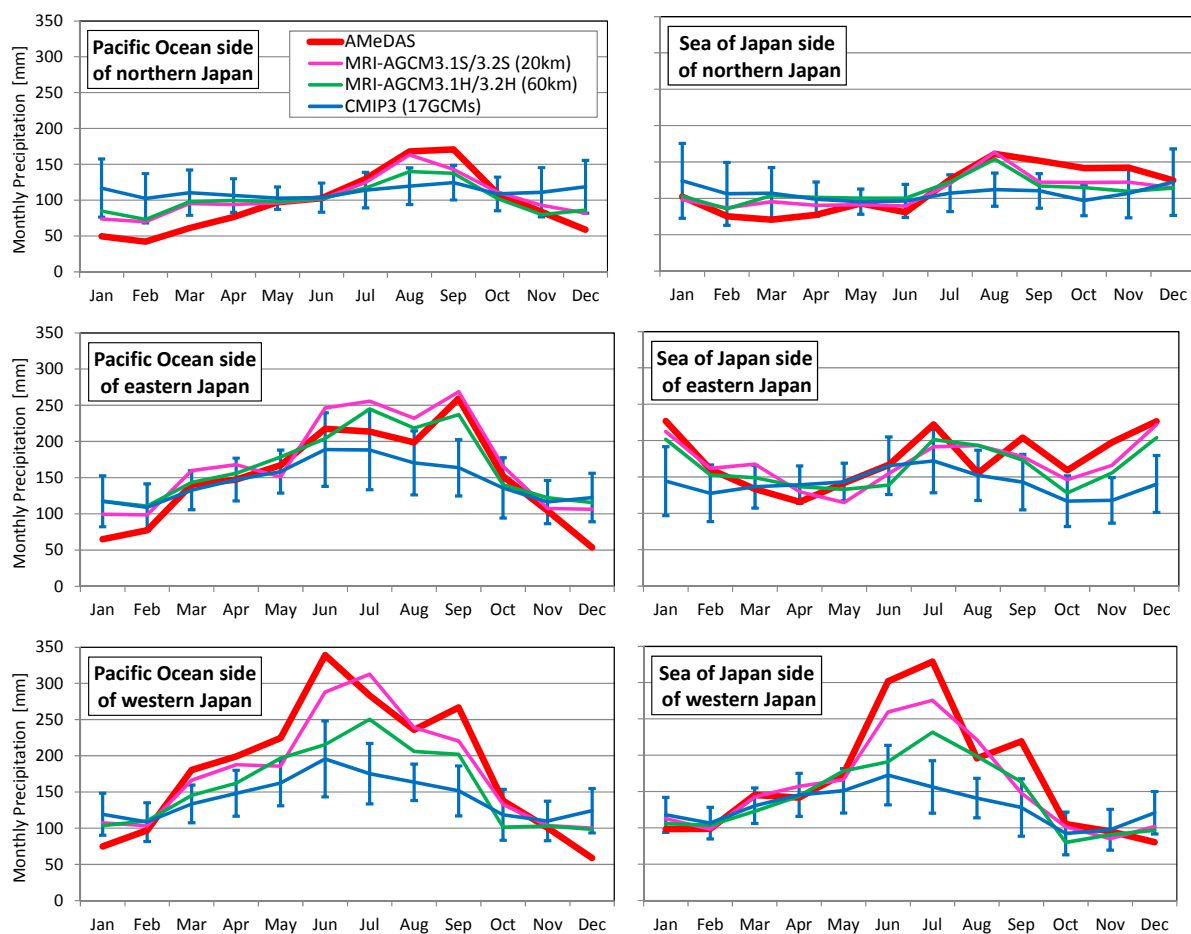


Fig. 3 Monthly mean precipitation for present climate (1980-1999), the bars show standard deviation of 17 GCMs from CMIP3

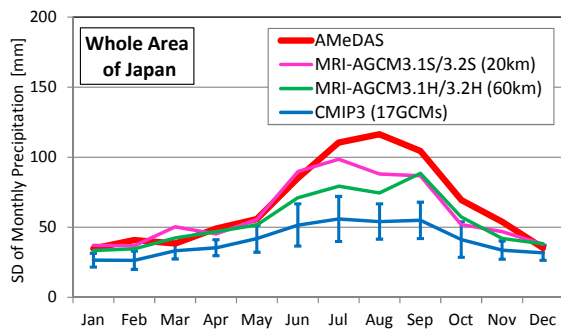


Fig. 4 Standard deviation of monthly precipitation for present climate (1980-1999), the bars show standard deviation of 17 GCMs from CMIP3

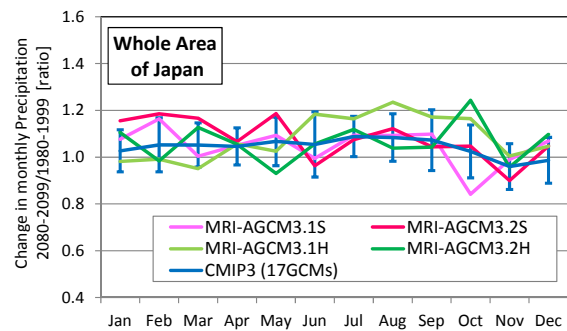


Fig. 5 Change in monthly precipitation between the present (1980-1999) and future (2080-2099), the bars show standard deviation of 17 GCMs from CMIP3

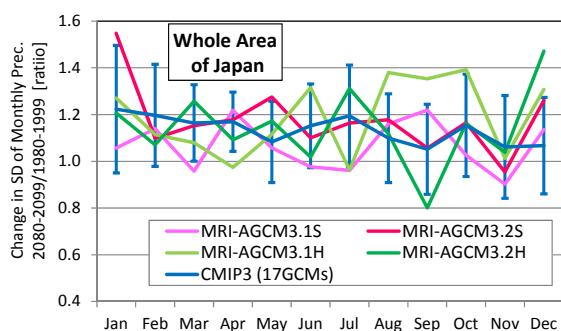


Fig. 6 Change in standard deviation of monthly precipitation between the present (1980-1999) and future (2080-2099), the bars show standard deviation of 17 GCMs from CMIP3

が、解像度の粗いCMIP3は年間を通じて過小評価であり、アメダス観測値と比較して月降水量の年々変動は小さくなっている。MRI-AGCMについても6月から10月にかけては過小評価になっている。

次に将来変化についてみると、いずれの地域においても現在気候再現性で顕著であったCMIP3とMRI-AGCMの違いは認められない。Fig. 5は現在気候（1980-1999年）と将来気候（2080-2099年）の比率により、全国の平均月降水量の将来変化を表したものである。同じGCMで比較しても地域や季節による違いは不明瞭であり、異なるGCM間のばらつきの方が大きい。平均的には、現在よりも降水量がやや増加する傾向にあるが、GCMにより予測結果は異なっている。MRI-AGCMの個々のモデルによる予測結果は、CMIP3の17のGCMから求めた標準偏差の範囲を超えてばらついており、月によっては降水量の増減が全く逆になる場合もある。ただし、MRI-AGCMの4つのモデルを平均すると、大部分がCMIP3の標準偏差内に収まっており、現在気候の再現性に依らず、概ね同程度の将来変化を示しているといえる。

これらの傾向は月降水量の標準偏差の将来変化についても同様であり、Fig. 6に示した全国平均の将来変化はGCMごとに異なる。CMIP3とMRI-AGCMをそれぞれ平均すると概ね同程度であり、月降水量の変動は将来大きくなる傾向であることから、異常渇水や異常多雨のリスクが増加することを示している。

### 3.2 日降水量の上位2%強度

大雨を表す指標として解析対象とした日降水量の上位2%に該当する平均降水強度について、Fig. 7にアメダス観測値を基準としたバイアス比を示した。ほぼ全ての地域およびGCMでバイアス比は1を下回っており、モデル上での強雨は実際よりも過小評価になっている。特にCMIP3については、降雨強度が実測の半分程度であり、解像度の粗いGCMを用いて時空間スケールの細かい現象を再現することの限界を表している。MRI-AGCMについては、20kmと60kmの解像度の違いよりも、3.1と3.2の違いの方が大きく、全体的に3.2S/3.2Hの再現性が良好であった。3.1と3.2の違いは、積雲対流スキームの変更が主要な点であり（Mizuta et al., 2012）、この影響で予測精度が改善したと考えられる。特にMRI-AGCM3.2Sについては、北日本および西日本の太平洋側を除くと、アメダス観測値と非常によく一致している。

次に日降水量上位2%の強度の将来変化について、Fig. 8に現在気候（1980-1999年）に対する将来気候（2080-2099年）の比率を示した。全てにおいて大雨時の降水強度は増加する傾向にある。個々のGCMをみると地域による差があるものの、異なるGCM間で傾向は異なるため、明瞭な地域差は認められない。CMIP3とMRI-AGCMを比較すると、CMIP3の標準偏差を超えてMRI-AGCMの個々のモデルがばらついており、平均すると両者のGCM群で同程度の将来変化を示している。

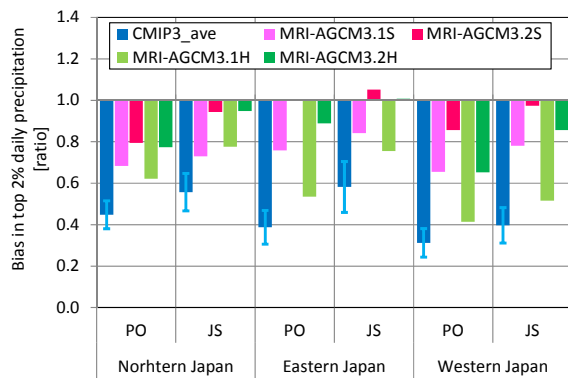


Fig. 7 Bias in top 2% daily precipitation for present climate (1980-1999), the bars show standard deviation of 17 GCMs from CMIP3, PO means Pacific Ocean side, JS means Japan Sea side

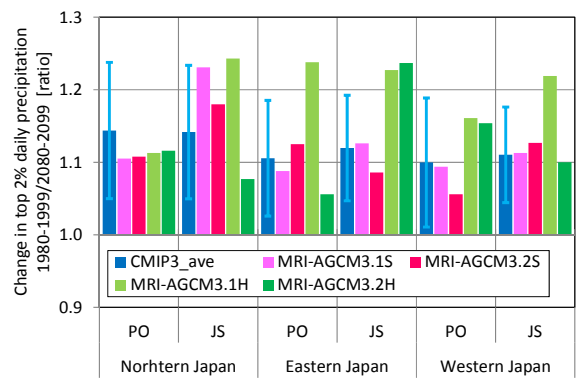


Fig. 8 Change in top 2% daily precipitation between the present (1980-1999) and future (2080-2099), the bars show standard deviation of 17 GCMs from CMIP3, PO means Pacific Ocean side, JS means Japan Sea side

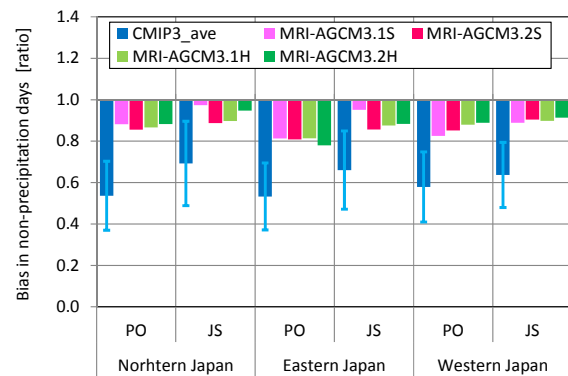


Fig. 9 Bias in non-precipitation days defined as daily precipitation < 1mm for present climate (1980-1999), the bars show standard deviation of 17 GCMs from CMIP3, PO means Pacific Ocean side, JS means Japan Sea side

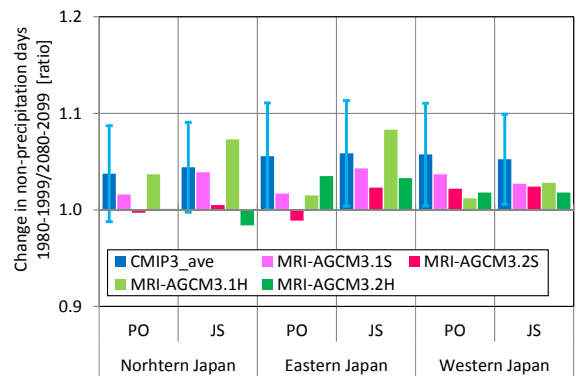


Fig. 10 Change in non-precipitation days defined as daily precipitation < 1mm between the present (1980-1999) and future (2080-2099), the bars show standard deviation of 17 GCMs from CMIP3, PO means Pacific Ocean side, JS means Japan Sea side

### 3.3 無降水日数

1mm未満の降水量であった日を無降水日と定義し、その年間平均日数について解析を行った。Fig. 9はアメダス観測値を基準としたバイアス比である。全ての地域およびGCMで1を下回っているため、モデル上での予測においては、現実よりも無降水日が少なくなっている。特にCMIP3で過小傾向は大きく、平均的にモデル上の無降水日は現実の6割程度しかない。MRI-AGCMについては、4つのGCMに大きな違いはなく、平均的に1割程度の過小評価になっている。

Fig. 7で示した大雨の再現性とあわせると、GCMを用いた予測は大雨については弱く、無降水日については少なくなっている。この傾向は程度の差はあるものの、MRI-AGCMでも同じである。Fig. 3で示したように、MRI-AGCMは年間を通した平均的な降水量の再現性は良好であることを勘案すると、GCMの予

測は降水量の表現に関して時空間的なメリハリが弱い、ということができる。

Fig. 10は無降水日数の将来変化を、現在気候(1980-1999年)に対する将来気候(2080-2099年)の比率で示したものである。全体的に現在よりも無降水日数はやや増加する傾向にあり、渇水が深刻化する可能性を示唆している。地域別では、平均的に北日本の太平洋側で増加率が小さく、東日本の日本海側で増加率が大きいといえるが、個々のGCMに着目すると、その傾向は顕著ではない。CMIP3については、解像度が粗いこともあり、将来変化についても地域差があまりない。一方、MRI-AGCMについては、個々のGCMについては地域により将来変化に差があるものの、GCMによりその傾向は異なるため、4つのモデルを平均すると地域差は平滑化される。MRI-AGCMの個々のGCMの予測結果は、概ねCMIP3

Table 2 Future changes of precipitation characteristics in Japan, PO means Pacific Ocean side, JS means Japan Sea side

| Characteristic                              | GCM      | Northern JP |      | Eastern JP |      | Western JP |      |
|---------------------------------------------|----------|-------------|------|------------|------|------------|------|
|                                             |          | PO          | JS   | PO         | JS   | PO         | JS   |
| total precipitation                         | MRI-AGCM | 1.06        | 1.10 | 1.06       | 1.05 | 1.07       | 1.09 |
|                                             | CMIP3    | 1.06        | 1.05 | 1.04       | 1.05 | 1.03       | 1.04 |
| Standard deviation of monthly precipitation | MRI-AGCM | 1.16        | 1.21 | 1.14       | 1.14 | 1.16       | 1.15 |
|                                             | CMIP3    | 1.14        | 1.16 | 1.15       | 1.16 | 1.13       | 1.16 |
| top 2% precipitation                        | MRI-AGCM | 1.11        | 1.18 | 1.13       | 1.17 | 1.12       | 1.14 |
|                                             | CMIP3    | 1.14        | 1.14 | 1.11       | 1.12 | 1.10       | 1.11 |
| non-precipitation days                      | MRI-AGCM | 1.01        | 1.03 | 1.01       | 1.05 | 1.02       | 1.02 |
|                                             | CMIP3    | 1.04        | 1.04 | 1.06       | 1.06 | 1.06       | 1.05 |

の標準偏差内に入っており、平均するとCMIP3の方が若干増加率は大きい結果となった。

### 3.4 降水特性の将来予測の不確実性

月降水量について平均値および標準偏差、日降水量について上位2%強度および無降水日数についてそれぞれ解析を行ったが、いずれの項目についても、現在気候の再現性はCMIP3に比べてMRI-AGCMの方が優れている結果となった。モデルを高解像度化する目的がこのようなスケールの小さい現象を精度よく予測することであるため、ある意味では順当な結果であるといえる。特にMRI-AGCMの3.2S/3.2Hは、日降水量上位2%の強度における再現性が顕著に向上しており、モデルの高度化は現在気候の予測に対する不確実性を低減につながっている。

一方、将来気候の予測については、モデルの高解像度化や現在気候の再現性の向上が、ほとんど反映されていない。現在気候の再現性が良好であったMRI-AGCMも、将来変化を取り出して比較した場合、モデルによって結果は異なっており予測の不確実性は大きい。再現性を向上させても将来予測はある値に収束しているわけではないため、非常に扱いが難しくなる。例えば、温暖化の影響評価を行う場合、GCMの実験結果を外力として扱うことが一般的であるが、用いるGCMによって予測が異なるため、どのような高解像度・高精度のGCMを用いたとしても、単一のデータだけでは信頼性に乏しい。

また、いずれの項目で比較しても、CMIP3による将来の気候変化はMRI-AGCMとそれほど変わらないことも特徴的である。勿論、降水量の分布や時系列変化など、解像度の細かいMRI-AGCMはCMIP3よりも精確に予測されており、地域に応じた降水特性を表現している。しかし、現在と将来の変化分に着目した場合、解像度の影響は打ち消されてMRI-AGCMとCMIP3の差は小さくなっている。加えてモデルごとのばらつきは大きく、CMIP3だけでなく

MRI-AGCMの4モデルだけで比較しても、地域ごとの明瞭な特徴はみられない。平均的な降水量だけでなく、日降水量の上位2%強度や無降水日数でも地域に応じた変化傾向はみられないため、温暖化による将来変化は局地的な条件よりも、空間的に大きなスケールの寄与が大きいと考えられる。

一方、CMIP3とMRI-AGCMで将来変化に大きな差がないことから考えると、解像度の粗いCMIP3のGCMの予測結果を、日本国内の温暖化影響評価に用いることも可能である。解像度の粗いGCMでは、出力値をそのまま利用するのは難しいとされるが、将来的にどの程度降水量が増えるのか、といった変化の情報に限定すれば、時空間的に緻密な再現性は要求されない。MRI-AGCMは高解像度で再現性も非常に良好であるが、計算機負荷が膨大であることから、温室効果ガスの排出シナリオはA1Bの1種類しかない。CMIP3はモデルによっては、数種類のシナリオに対してそれぞれ予測結果が存在するため、影響評価に用いることが可能なデータは飛躍的に増加する。

現在気候の再現性を向上させたところで、将来予測をある特定の値に収束させることは困難であることが示唆されたことから、単一のGCMを使うのではなく、なるべく多くのGCMによる予測結果を考慮することは重要である。予測の不確実性を低減する方法の一つとしては、マルチモデルアンサンブルがあげられる。Table 2はこれまで解析した結果を、地域別にまとめたものであり、数字はCMIP3とMRI-AGCMのGCM群の平均値である。この値が正解というわけではないが、複数のモデルが平均的に示している結果として目安となる数字である。

## 4. まとめ

解像度の粗いCMIP3の17のGCMと、格子間隔20kmもしくは60kmのMRI-AGCMの4つのGCMによる実験結果を用いて、日本国内の降水特性の再現性および

将来変化を調べた。解析した項目は、20年間の平均月降水量および標準偏差、日降水量の上位2%強度、日降水量1mm未満で定義した無降水日数である。

現在気候の再現性は、全ての項目でMRI-AGCMが上回り、地域に応じた降水特性を再現していた。CMIP3は解像度が粗いことから、マルチモデルアンサンブルを行っても明確な地域差が出にくい傾向にあった。CMIP3は特に日降水量の上位2%強度および無降水日数について過小評価であった。

将来変化については、CMIP3およびMRI-AGCMのGCM群をそれぞれ平均した場合、大きな差はみられず、どの地域の将来変化も同じような値であった。GCMによる予測のばらつきが大きく、再現性の高いMRI-AGCMの4つのモデルだけで比較しても、ある特定の値に収束するという事はなかった。

MRI-AGCMの4モデルおよびCMIP3の17モデルから得られた将来変化は、以下の通りである。

- ・ 平均的に降水量は増加することが予測されており、1.05～1.10倍（MRI-AGCM）、1.03～1.06倍（CMIP3）
- ・ 月降水量の変動量は増加することが予測されており、1.14～1.21倍（MRI-AGCM）、1.13～1.16倍（CMIP3）
- ・ 大雨時の降水強度は増加することが予測されており、1.11～1.18倍（MRI-AGCM）、1.10～1.14倍（CMIP3）
- ・ 無降水日数は増加することが予測されており、1.01～1.05倍（MRI-AGCM）、1.04～1.06倍（CMIP3）

今後の課題としては、新たな全球気候モデルによる実験結果や、ダウンスケーリングされたデータについても収集し、モデルによる将来予測の特徴を解析することが挙げられる。

## 謝 辞

本研究の一部は、環境省地球環境研究推進費（S-5-2）および文部科学省21世紀気候変動予測革新プログラムの支援により実施された。記して謝意を表する。

## 参考文献

- 道広有理・鈴木 靖・佐藤嘉展（2011）：気候変動情報データベースの開発とその利用，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol. 67, No. 2, pp.I\_1211-I\_1215.
- IPCC (2007): Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, 996 pp.
- Kusunoki, S., Mizuta, R. and Matsueda, M. (2011): Future changes in the East Asian rain band projected by global atmospheric models with 20-km and 60-km grid size, Climate Dynamics, Vol. 37, pp.2481-2493.
- 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, 90A, pp.233-258.

（論文受理日：2012年6月8日）

## **Reproducibility and Future Change of Precipitation Characteristics in Japan Using GCMs Data**

Yuri MICHIIHIRO, Yoshinobu SATO and Yasushi SUZUKI

### **Synopsis**

The outputs of 17 Global Climate Model (GCM) from CMIP3 and 4 GCM from MRI-AGCM with 20km/60km grid are used to analyze precipitation characteristics in Japan for reproducibility of present climate and future climate change. The target characteristics are monthly precipitation, standard deviation of monthly precipitation, top 2% daily precipitation and non-precipitation days defined as daily precipitation < 1mm during 20 years. About all characteristics, the reproducibility of present climate with MRI-AGCM is better. Though the future change ratio, calculated from present and future climate predictions, vary in each GCM, there are no clear differences between CMIP3 and MRI-AGM.

**Keywords:** GCM, climate change, precipitation, heavy rain, drought