

全球気候モデル出力を用いた日本域の 100年確率日降水量の将来予測

ESTIMATION OF THE 100-YEAR DAILY RAINFALL OF JAPAN IN THE
FUTURE PROJECTED BY A GCM

小林健一郎¹・宝 馨²・中北英一³

Kenichiro KOBAYASHI, Kaoru TAKARA and Eiichi NAKAKITA

¹ 正会員 Dr.-Ing. 京都大学 生存基盤科学研究ユニット (〒 611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

² フェロー 工博 京都大学 防災研究所 (〒 611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

³ 正会員 工博 京都大学 防災研究所 (〒 611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

The Japan Meteorological Agency and Meteorological Research Institute have developed a super high resolution (20km) global climate model (GCM) and carried out a numerical experiment of climate variation for the present (1979-2003), near future (2015-2039) and future (2075-2099) periods under the climate change scenario. This paper estimates the 100-year daily rainfalls for the three periods using the GCM output. Firstly, the Mann-Kendall test has been carried out for the confirmation of the steadiness of the annual maximum daily rainfall time series which is the output of the GCM with non-steady sea surface temperature boundary conditions. The test confirmed that the steady hydrologic frequency analysis is applicable to each data set. Then, the 100-year daily rainfall of the GCM present climate is estimated and compared with the 100-year daily rainfall at the 51 meteorological observatories in Japan. The difference of the 100-year rainfall between the present and the future periods are analyzed. The results indicate that 100-year daily rainfall increases at 56% GCM output nodes in Japan for the near future, while it increases at 65% nodes for the future periods comparing with the present period.

Key Words: *climate change, 100-year daily rainfall, GCM data, Mann-Kendall, GEV*

1. はじめに

本稿では温暖化影響評価を目的に気象庁・気象研究所により開発された超高解像度全球大気モデル¹⁾により計算された現在(1979-2003年),近未来(2015-2039年),将来(2075-2099年)の日本近郊での時間降水量時系列を用いて,日本における近未来,将来の100年確率地点日降水量の現在からの変動を推定し,将来予測を試みる。「非定常な海面温度(SST)により計算される各25年期間内のGCM出力は基本的には非定常である²⁾」という点について検討するために,まず時系列のトレンド解析手法であるMann-Kendall手法を用いてGCM出力点の各25年間の年最大日降水量時系列の増減トレンドを分析する。これにより確率降水量推定のために定常水文頻度解析をGCMデータに適用することの妥当性を確認した。その後,極値理論に基づいた一般化極値分布(GEV)を用いて,近未来,将来の100年確率日降水量を推定し,現在からの変動を推定する。最終的には洪水災害リスクなどの将来変動予測を行うことが目的である。

本研究と類似の先行研究としては例えば東(2006)³⁾がある。東はIPCCデータセンタのA1B, B1シナリオに基づくそれぞれ12の全球気候モデルのデータを用い

て,東京(多摩川流域)の将来の200年確率降水量を求めている。結果,A1Bシナリオの下では2000年に比較すると2050, 2100, 2200, 2300年には同地域の200年確率降水量は1.07~1.20倍になると推定している。なお,対象は東京であり本稿のように日本全域ではない。また,和田ら(2008)⁴⁾はA2シナリオに基づくMRI-RCM20,及びA1Bシナリオに基づくMRI-GCM20を用いて日本近郊の現在(1979-1998年)と将来(2080-2099年)の100年確率地点日雨量を推定している。その結果,100年確率日降水量は全国的に増加し,RCM20においては北海道西部,東北北部,北陸地方で,CCM20については北海道西部,東北北部,紀伊半島等で40%以上増加すると結論づけている。本稿のGCMデータは和田らの用いたGCMデータと解像度は等しい。しかしながら,和田らが用いたGCM計算結果は気象研究所の大気海洋結合モデルのMRI-CGCM2.3.2による年々変動がある月平均海面水温を境界条件として計算されているのに対して,今回の全球気候モデルでは,海面水温を現在気候については観測値を与え,将来についても現在気候実験値とPhase 3 of Coupled Model Intercomparison Project(CMIP3)に基づく将来推定値から作成しているなど異なる⁵⁾。また,出力年数が20

年から 25 年間になり、出力年も異なっている。

これらの先行研究を踏まえつつ、本研究では日本で最新の超高解像度全球大気モデルによる将来の予測時間降水量時系列を用いて、日本全域で近未来・将来の 100 年確率地点日降水量を推定し、結果を分析する。

2. 全球 20kmGCM の概要

21 世紀気候変動予測革新プログラム⁶⁾では、気象庁現業数値予報モデル (GSM0103) が、水平解像度を TL959 (格子間隔約 20km)、鉛直層数を 60 層 (上端は 0.1 hPa) と高解像度化され、これを用いて検証用に現在気候 (1979-2003 年)、温暖化影響評価のために近未来気候 (2015-2039 年)、将来気候 (2075-2099 年) の 3 期間について実験が行われている。SST・海水密度は現在気候については英国ハドレーセンターが提供する HadISST⁷⁾ を用いており、海水厚については年々変動を含まない月平均気候値が使用されている。SST は将来実験においては現在気候実験で用いた値と IPCC 第 4 次報告書のために提出された CMIP3 の 18 のモデルのアンサンブル平均を用いて作成されている⁵⁾⁸⁾。二酸化炭素濃度は、現在気候実験では観測値、将来実験においては A1B シナリオに従った濃度を用いており、濃度は全球で一様な値を年ごとに変化させている。IPCC の Special Report on Emissions Scenarios によると A1B シナリオはグローバル化による経済成長が進展し、化石・非化石燃料をバランスよく消費するというもので、世紀末において地球平均気温は 2.5°C 上昇し、CO² 濃度は現在の 380ppm から 720ppm まで上昇するとされている。この全球気候モデル出力を用いた Kim ら⁹⁾ の分析では、将来に向けて年平均降水量は全国の大部分で増加し、北海道では 10.6% 増加するとしている。また最大時間雨量、最大日雨量の変化は地域によって異なり、中国地方や四国地方ではこれらの最大雨量は明確に増加するが、関東地方や東北地方の一部では若干減少するとしている。

3. Mann-Kendall 検定による定常水文頻度解析妥当性の検討

(1) Mann-Kendall 検定

Mann-Kendall 検定では、ある時系列の各要素が独立で同一の確率分布に従うという帰無仮説が成立するかどうかを検定する¹⁰⁾¹¹⁾。仮説が棄却されると、その系列は傾向変動を持つと判定される。n 個のデータ (x_1, x_2, \dots, x_n) が独立で同一の確率分布に従うとし、次の統計量 S を定義する。

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k)$$

ここに

$$\text{sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} 1 & (x_j - x_k > 0) \\ 0 & (x_j - x_k = 0) \\ -1 & (x_j - x_k < 0) \end{cases} \quad (1)$$

で、 S の平均と分散は

$$E(S) = 0 \quad (2)$$

$$\text{VAR}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} - \sum_{j=1}^k \frac{t_j(t_j-1)(2t_j+5)}{18} \quad (3)$$

で計算される。ここに t_j は (x_1, x_2, \dots, x_n) を昇順に並べ替えたときに、同じ値が連続する場合の個数を表し、 k はその組数を表す。 S を基準化した統計量 Z は

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{VAR}(S)}} & (S > 0) \\ 0 & (S = 0) \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{VAR}(S)}} & (S < 0) \end{cases} \quad (4)$$

となり、 $|Z| > 1.96$ の場合には有意水準 5% で帰無仮説を棄却する。またこの時、Mann-Kendall 傾斜として、任意のデータ対 (x_i, x_j) ($1 \leq x_i < x_j \leq n$) に対して

$$\beta = \text{median} \frac{x_i - x_j}{i - j} \quad \forall j < i \quad (5)$$

が計算できる¹²⁾。この時 $\beta < 0$ は減少トレンド、 $\beta > 0$ は増加トレンドであると判断する。ただし、Mann-Kendall 検定については、時系列に傾向変動があるにもかかわらず

- データの期間が短いため、傾向変動を検出できない。
- 経年変化率が小さいため、傾向を検出できない。

といった第 2 種の過誤の存在が指摘されており、日雨量が 100 年間で 25% 増加する時系列で、95% の確からしさで傾向変動を持つと判断するためには、110 年間の年雨量データが必要であるという西岡・宝 (2004)¹¹⁾ の報告もあるため、解釈には若干の注意が必要である。

(2) 検定結果と考察

GCM により計算された全球の降水量時系列データから日本を覆う北緯 20-50 度、東経 120-150 度の範囲を抽出し、時間降水量から日降水量を求め、1 年 365 日の日降水量から年最大日雨量を抽出した毎年の年最大日雨量時系列データに Mann-Kendall 検定を行い、統計量 Z (式 (4)) を計算する。この範囲には合計で 26082 個の出力点 (約 20km × 20km のセルの中心点) が存在し、各出力点に対して年最大日雨量時系列データを現在気候、近未来気候、将来気候の 3 ケースについてそれぞれ 25 年間分整理した。各節点の統計量 Z を GIS に取り込み Inverse Distance Weight 法により内挿してラスタ化した結果を図 1 に示す。図 1 左は現在気候、中央は近未来気候、右は将来気候の検定結果である。 $Z \geq 1.96$ の場合に有意水準 5% で各出力点での降水量時系列は

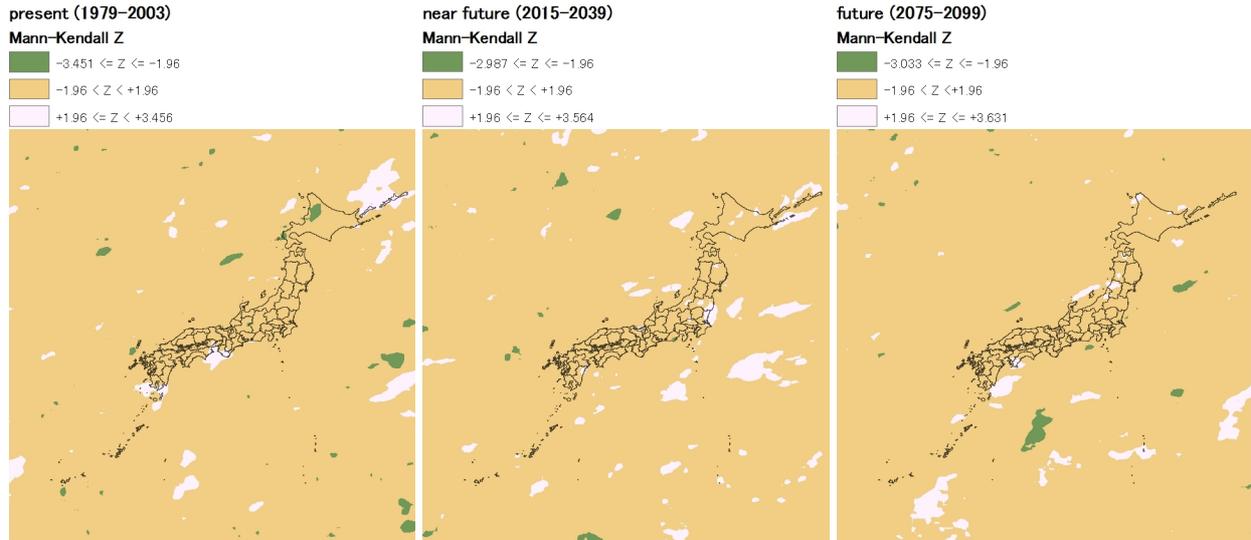


図-1 全球 20kmGCM により計算された 25 年間の年最大日雨量時系列に Mann-Kendall 検定を行った結果：現在気候（1979-2003：左），近未来気候（2015-2039：中央），将来気候（2075-2099：右）

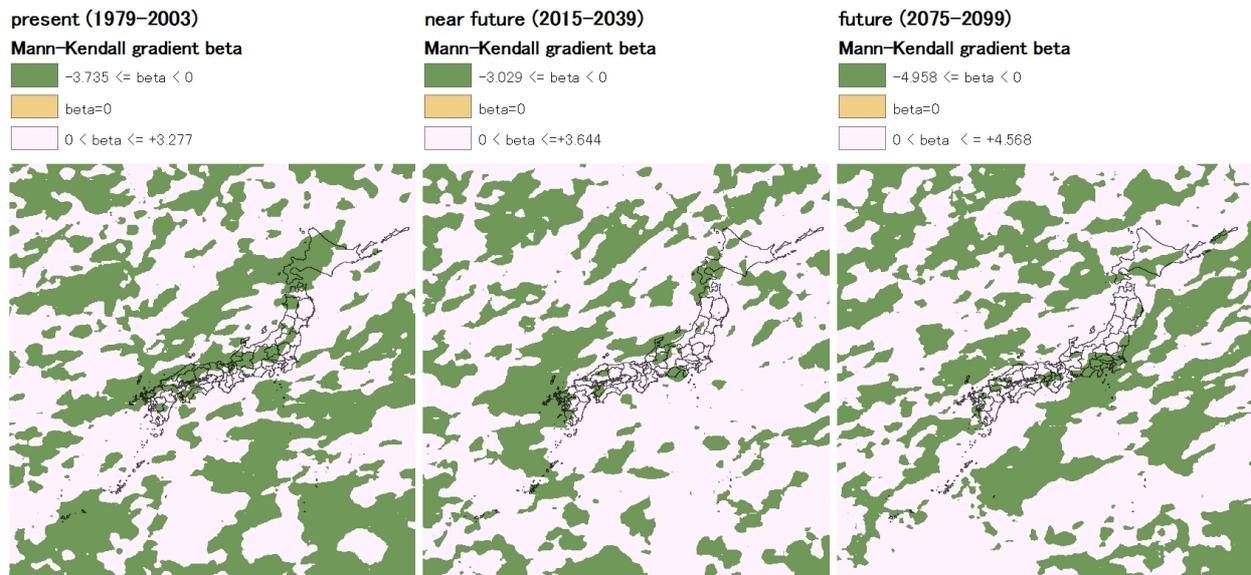


図-2 GCM により計算された各 25 年間の年最大日雨量時系列の Mann-Kendall 傾斜：現在気候（1979-2003：左），近未来気候（2015-2039：中央），将来気候（2075-2099：右）

増加傾向に、 $Z \leq -1.96$ で降水量時系列は減少傾向にあると判断する。これらの図からわかるように、局所的に増加あるいは減少傾向にある時系列は存在するものの、全体的には傾向変動がないと判断された時系列がほとんどで、ここでの各 25 年間のデータに対しては基本的には定常水文頻度解析が適用できると思われる。全 26082 点中、現在気候については $Z \geq 1.96$ が 983 点、 $Z \leq -1.96$ が 455 点、近未来気候についてはそれぞれ 1317 点、173 点、将来気候については 907 点、271 点であった。

図 2 には各気候の年最大日雨量時系列に対して Mann-Kendall 傾斜を計算した結果を示す。現在気候では全

26082 の時系列で Mann-Kendall 傾斜が正の値を示したものが 14147（全体の 54.2%）、0 が 2 つ、負の値を示したものが 11933（全体の 45.8%）であった。近未来気候では正の値を示したものが 17114（全体の 65.6%）、0 が 3 つ、負の値を示したものが 8965（全体の 34.4%）で、将来気候では正の値を示したものが 15425（全体の 59.1%）、0 が 2 つ、負の値を示したものが 10656（全体の 40.9%）である。有意水準 5% の基準からは外れるが、時系列自体は増加傾向にあるものが多いことが分かる。

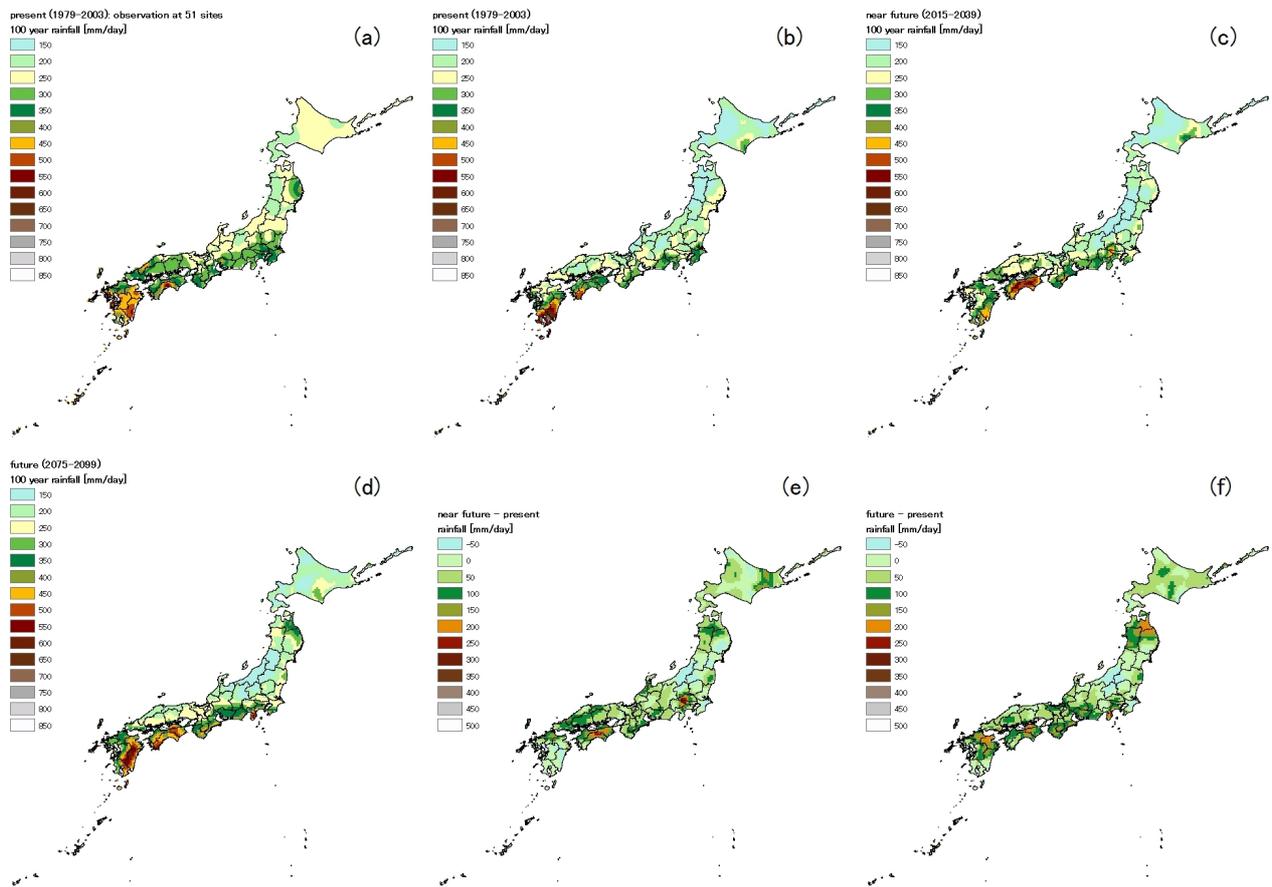


図-3 25年間の年最大日雨量時系列にGEV分布を適合させて計算した100年確率日雨量:(a)51気象官署地上雨量(1979-2003)(左上):(b)GCM現在気候(1979-2003)(中央上):(c)GCM近未来気候(2015-2039)(右上):(d)GCMの将来気候(2075-2099)(左下):(e)(c)と(b)の差(中央下):(f)(d)と(b)の差(右下):

4. 一般化極値分布による現在・近未来・将来の確率日降水量マップ

GCMにより計算された全球の降水量時系列データから抽出した日本列島の主要な島を含む1098個の出力点における各25年間の毎年最大日雨量時系列に一般化極値分布を適合させて計算した各出力点における100年確率日雨量をInverse Distance Weight法により0.12度で内挿してラスタライズした結果を図3に示す。一般化極値分布は極値理論に基づいており、逆関数の計算も容易なため今回用いた。まず、比較のためにGCMの現在気候と、同期25年間の全国51気象官署における年最大日雨量時系列にGEV分布を適合させて100年確率日雨量を計算し、内挿ラスタライズした結果を図3左上,中央上に示す。図3左上と中央上を見ると、どちらにおいても全般的には九州,四国などで高い100年確率日雨量を示し、東北地方や北海道に北上するにつれてこの値が小さくなっていくのがわかる。日本全体で見れば定性的な傾向は比較的良く一致している。なお、全国51気象官署については1900年から現在まで109年分の年最大日雨量データがあるため(本稿では省略しているが)109個の毎年最大日雨量データを用いて100年確率日雨量を推定できる。これを今回のよ

うな25年分のみによる推定値と比較すると短期間データによる推定値の特性がわかるため今回用いた。ただし内挿ラスタライズする場合、観測地点数が空間的に疎なため十分ではないと思われる。今後はアメダスデータを用いるなどして、地点間を補完する必要がある。

51気象官署の観測値による結果と比較するために、図4に51気象官署の観測値による100年確率日雨量とGCM現在気候(1979-2003年)の観測所に最近隣のGCM出力点における100年確率日雨量の値をプロットした。この図には誤差パーセンテージ(error)=(51気象官署100年確率日雨量-GCM最近隣出力点の100年確率日雨量)/(51気象官署100年確率日雨量)×100も示している。

観測値とGCMの現在気候による100年確率日雨量を比較すると全51地点中43地点では観測値による100年確率日雨量が大きく、8地点ではGCM出力値による100年確率日雨量の方が大きかった。誤差が±10%以下の地点は帯広,岐阜,浜松,京都,神戸,大阪,松山の7地点である。最大誤差は浜田で67.2%,次に鹿児島で-64.3%であり、最も誤差が低い地点は大阪と彦根で、それぞれ1.0%,0.7%である。

浜田,鹿児島,大阪,彦根の気象官署とこれらの観測所と最近隣のGCM節点出力値の年最大日雨量時系

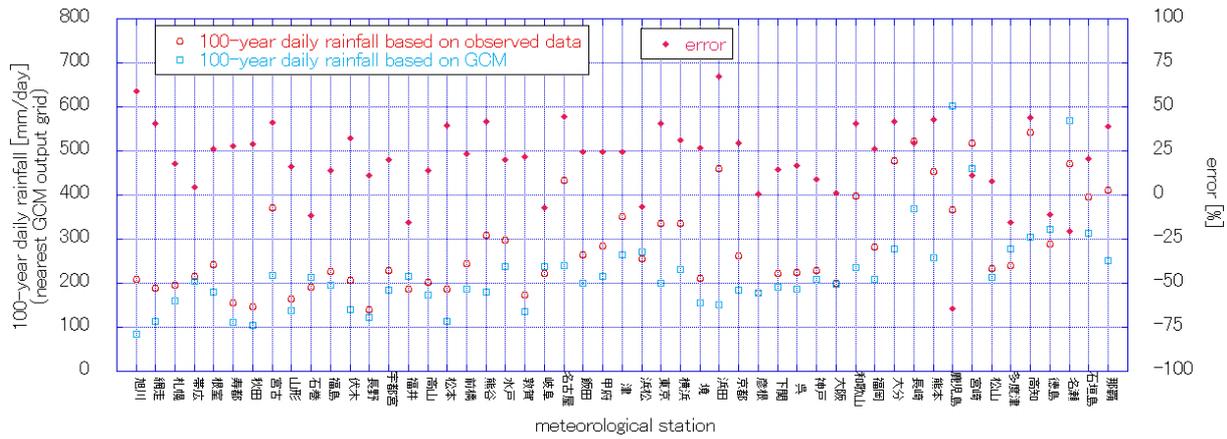


図-4 51 気象官署データ（1979-2003）と GCM 現在気候（1979-2003）により計算された 100 年確率日雨量の値の比較

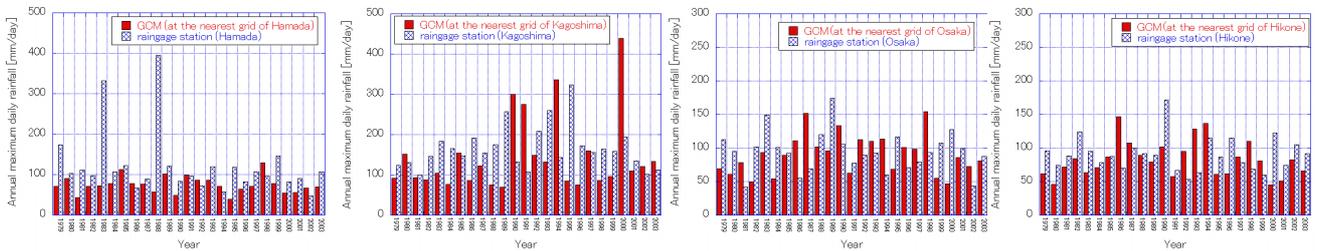


図-5 気象官署と同地点に最近隣の GCM 出力点における 1979～2003 年の 25 年間の年最大日雨量時系列の比較：浜田（左）：鹿児島（中央左）：大阪（中央右）：彦根（右）

列を図 5 に示す．浜田のように正の誤差が最大の場合，図 5 左の 1983 年や 1988 年に見られるように観測値の年最大日雨量が GCM により計算されたものよりかなり大きいことがある．これらの観測値と GCM 出力値の時系列それぞれの平均値と標準偏差は観測値で 121mm，78mm，GCM の出力値で 75mm，21mm であった．逆に負の誤差が最大の鹿児島の場合，図 5 中央左の 1991 年，2000 年に見られるように GCM により計算された年最大日雨量が観測値よりも大分大きいことがある．日雨量時系列の平均値，標準偏差は観測値で 166mm，53mm，GCM 出力値で 144mm，94mm であった．このような浜田，鹿児島に見られる年最大日雨量の誤差は GCM の極端降雨（台風など）の再現性に依存しているのではないかと考えている．GCM による現在気候実験での台風の再現性についての分析は例えば安田¹³⁾に見られるが，数，強度ともに無視できない差があるとしている．この点についての詳細な解析は今後の課題である．

図 5 中央右，右の大阪や彦根のように観測値と GCM 出力値による 100 年確率日雨量の一致度が高い場合，個々の年最大日雨量は必ずしも一致していないが，平均値と標準偏差の値が近い．大阪の場合，観測値が 94mm，30mm，GCM 出力値は 90mm，30mm であった．彦根の場合は，観測値が 91mm，26mm，GCM 出力値が 83mm，27mm である．

次に，GCM の近未来気候，将来気候の年最大日雨量

時系列に GEV 分布を適合させて計算した 100 年確率日雨量を Inverse Distance Weighting 法でラスタ化した図 3 右上，左下に示す．近未来，将来においても九州，四国などにおいて 100 年確率日雨量が高い傾向は継続している．

比較のために，近未来気候の 100 年確率日雨量から現在気候の 100 年確率日雨量を差し引いた図 3 中央下，また将来気候から現在気候を差し引いた図 3 右下を示す．これらの図の数値を見ると，現在から近未来にかけて日本内の GCM 出力点で 100 年確率日雨量が増加した地点は全 1098 地点中 618 地点（56.3%），減少した地点は 480 地点（43.7%）であった．図 3 中央下を見てみると，九州南部，新潟，宮城，福島，茨城，栃木，山形，千葉，岩手，北海道の一部などでは 100 年確率日雨量が 0～100mm 減少しているのがわかる．逆に，四国中央，東京西部では 100 年確率日雨量が 200mm～300mm 上昇するという結果が出た．

現在から将来にかけては 100 年確率日雨量は 1098 地点中 710 地点（65%）で増加，388 地点（35%）で減少するという結果がでた．群馬，新潟，福島などで 50mm～100mm ほど 100 年確率日雨量が減少し，九州北部，香川，紀伊半島，伊豆半島などで 150mm～200mm 増加する．このように GCM 計算結果によると全体としては 100 年確率日雨量が増加する地点が多いことわかる．

和田ら⁴⁾は 100 年後の 100 年確率日雨量は全国的に

増加するという結論を提示しており、今回の結果はそれとは若干異なる。和田らは Gumbel 分布を適用しているなど 100 年確率日降水量を推定する手続きが違うのに加えて、前述したように GCM の海面水温などの計算条件が違うため異なる計算結果となっている。こうした境界条件等の不確定性の考慮のためには多数の予測アンサンブル計算と、それらの定量的化評価が必要である。

5. 結論

本稿では気象庁・気象研究所が開発した超高解像度全球大気モデルにより A1B シナリオに基づいて計算された将来の日本近郊の時間降水量時系列を用いて、現在 (1979-2003 年) から近未来 (2015-2039 年)、将来 (2075-2099 年) にかけて日本の 100 年確率日降水量がどのように変動していくかを推定した。得られた結果は以下の通りである。

- 日本近郊 (北緯 20-50 度, 東経 120-150 度の範囲) で、全球 20kmGCM の 26082 個の出力点における年最大日雨量時系列に Mann-Kendall 検定を用いてトレンド検定を行った。この範囲では 95% の信頼度で増加・減少トレンドが検出された地域は最大で 5% であり、非定常 SST により計算された降水量であっても出力期間の 25 年を考える場合には定常水文頻度解析が適用できるのではないかという結果を得た。
- GEV 分布と現在気候データによる日本の 100 年確率日降水量と、全国 51 気象官署における同期間の年最大日雨量時系列による 100 年確率日降水量を比べると、九州、四国などで高い雨量を示し、東北地方や北海道に北上するにつれて値が小さくなっていくなど、日本全体での定性的な傾向は比較的良く一致しているのがわかった。しかしながら、気象官署の 25 年間の年最大日雨量時系列と GCM の最近隣節点の時系列を比べると、年最大日降水量時系列の個々の値などは必ずしも近くないことがわかった。
- 現在から近未来にかけては日本全域の GCM 出力点 1098 地点中、100 年確率日降水量が増加する地点は 56%、減少する地点は 44%、また現在から将来にかけては 100 年確率日降水量が増加する地点は 65%、減少する地点は 35% という結果が出た。

確率日降水量を推定するための分布形の採択基準、25 年間という比較的短い期間のデータを使って 100 年確率日降水量を推定することの是非、推定された確率日降水量が近接点でかなり違うことがあること理由の解釈、また離散点で推定した確率日降水量を内挿して可視化することの意義、アンサンブル計算の必要性など多くの検討点が残されている。こうした点について

は更に検討していく予定である。

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において地球シミュレータを用いて行われた全球気候モデルによる気候変動影響評価実験結果を用いて行った。ここに謝意を表す。また、気象研究所の楠昌司博士、鬼頭昭雄博士、JAMSTEC の杉正人博士、京都大学防災研究所 Kim Sunmin 博士には貴重なご助言をいただきました。ここに記して御礼申し上げます。

参考文献

- 1) Mizuta, R., Oouchi, K., Yoshimura, H., Noda, A., Katayama, K., Yukimoto, S., Hosaka, M., Kusunoki, S., Kawai, H. and Nakagawa, M.: 20-km-mesh global climate simulations using JMA-GSM model -Mean climate states-, J. of the Meteorological Soc. of Japan, Vol. 84, pp. 165-185, 2006
- 2) 中北英一他：流域圏を総合した災害環境変動評価研究, 21 世紀気候変動予測革新プログラム 平成 19 年度研究成果報告書, pp.135-136, 2008
- 3) 東博紀・大楽浩司・松浦知徳：地球温暖化による豪雨発生頻度の変化と洪水氾濫への影響評価, 水工学論文集第 50 巻, pp. 205-210, 2006
- 4) 和田一範・川崎将生・富澤洋介・楠昌司・栗原和夫：高解像度全球モデルおよび地域気候モデルを用いた地球温暖化にともなう洪水リスクの評価, 水文・水資源学会誌, Vol. 21, No. 1, pp.12-22, 2008
- 5) Kusunoki, S. and Mizuta, R.: Future changes in the baiu rain band projected by a 20-km mesh global atmospheric model: sea surface temperature dependence, Scientific Online Letters on the Atmosphere (SOLA), The Meteorological Society of Japan, 4, pp.85-88, 2008
- 6) 文部科学省地球・環境科学技術推進室：21 世紀気候変動予測革新プログラム平成 19 年度研究成果報告会要旨集, 2008
- 7) Rayner, N.A., Parker, D.E., Horton, E.B., Folland, C.K., Alexander, L.V., Rowell, D.P., Kent, E.C., and Kaplan, A.: Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century, Journal of Geophysical Research, 108, No. D13, 4407, doi:10.1029/2002JD002670, 2003
- 8) Kitoh, A. and Kusunoki, S.: East Asian summer monsoon simulation by a 20-km mesh AGCM, Climate Dynamics, DOI 10.1007/s00382-007-0285-2, 2007
- 9) Kim, S., Nakakita, E., Tachikawa, Y. and Takara, K.: Precipitation changes in Japan under the A1B climate change scenario, 水工学論文集第 54 巻, 2009
- 10) Kendall, M.G.: Rank Correlation Measures, Charles Griffin, London, 1975
- 11) 西岡昌秋・宝 馨：Mann-Kendall 検定による水文時系列の傾向変動, 水文・水資源学会誌, Vol. 17, No. 4, pp. 343-353, 2004
- 12) 徐宗学・竹内邦良・石平博：日本の平均気温・降水量時系列におけるジャンプ及びトレンドに関する研究, 水工学論文集第 46 巻, pp.121-126, 2002
- 13) 安田誠宏・高田理絵・金洙列・間瀬肇：地球温暖化予測データに基づく台風極端化特性の評価と高潮シミュレーション, 海岸工学論文集第 55 巻, 2008

(2009.9.30 受付)