

# 高解像度全球モデルを用いた地球温暖化に ともなう四国地方の洪水・渇水リスクの評価

## STUDY ON THE FLOOD AND DROUGHT RISK ASSESSMENT OF GLOBAL WARMING BY HIGH RESOLUTION GENERAL CIRCULATION MODEL, IN SHIKOKU REGION

和田一範<sup>1</sup>・楠 昌司<sup>2</sup>  
Kazunori WADA and Shoji KUSUNOKI

<sup>1</sup>正会員 博 (工) 独立行政法人土木研究所研究企画監 (前愛媛大学防災情報研究センター  
教授, 副センター長) (〒305-8516 つくば市南原1-6)

<sup>2</sup>理博 気象庁気象研究所気候研究部第一研究室長 (〒305-0052 つくば市長峰1-1)

In order to implement policy measures on practical water management for the influences of rainfall characteristic variation arising from global warming, it is important to assess risks due to global warming from a practical point of view and develop actual water management measures including those related to floods and droughts. These risks are evaluated using the results of GCM20 high resolution general circulation model developed by Japan Meteorological Agency (JMA) and Meteorological Research Institute (MRI), calculated by using the super computer named the Earth Simulator. The horizontal resolution of the model is about 20km and the model output is expected to be useful for the flood and drought risk assessment of the future, in Shikoku Region Japan.

**Key Words :** *global warming, rainfall characteristic, flood, drought, high resolution general circulation model*

### 1. はじめに

気候変動に関する政府間パネル (IPCC) がまとめた第4次評価報告書では, 人為起源の温室効果ガスの増加が近年の気候変動の主要な要因であると判定した上で, 今後も地球温暖化は進行し, 想定されるシナリオによる程度差があるものの地球の平均地上気温は1980-1999年に比べ2090-2099年には1.1~6.4°C上昇し, 地球の海面水位は18~59cm上昇すると予想されている<sup>1)</sup>. 地球温暖化にともなう洪水や渇水の将来のシナリオを見極めることは, 河川計画や洪水管理の観点から重要であるだけでなく, 防災力向上の面からも非常に重要である.

特に, 四国地方は, 平成16年に6つの台風が上陸し各地で豪雨に伴う土砂災害や洪水が発生する一方で, 平成6年や平成17年には記録的な渇水に見舞われており, 洪水や渇水など極端な降雨現象の変化傾向に対する関心は高い. 和田ら<sup>2)</sup>は, 気象庁気象研究所で開発された, 20kmメッシュの分解能を有し地域レベルの気候変動を評価することも可能であるMRI-RCM20-Ver.2 (以降「RCM20」という) を用いて, 地球温暖化進行後の2081~2100年の

洪水リスクを評価, その結果, 洪水発生の指標となる100年確率日降水量は, 特に北海道西部・東北北部・北陸・南西諸島で増大することを明らかにしている. あわせて四国地方を対象に, 日降水量の年最大値を元に100年確率日降水量・2日降水量の変化率を求め, 温暖化進行後の四国地方の洪水発生リスクについて評価した. また渇水リスクの評価として, 渇水対策上特に生活面や産業面に対して影響力の大きい3ヶ月及び6ヶ月累積雨量の20年最小値が, 100年間でどの程度変化するかについて評価した<sup>3)</sup>.

一方, 文部科学省の「人・自然・地球共生プロジェクト」では, 地球シミュレータを用いた高分解能全球気候モデルによる地球温暖化の研究が進められた. Kusunoki et al. (2006) は20km水平分解能全球気候モデルGCM20を開発し, 温暖化時の梅雨の降水量変化について評価した<sup>4)</sup>. 和田ら<sup>5)</sup>は, このGCM20と前述のRCM20における日本全体の洪水リスク変化について評価し, その特性を明らかにしている.

本研究では 2006 年度より新たにスタートした愛媛大学防災情報研究センター・気象研究所の共同研究において, 高解像度全球気候モデル (GCM20) による現在

(1979-1998年)と100年後(2080-2099年)の計算結果を用い、四国地方の洪水リスクと渇水リスクについて、GCM20の降雨の再現性を評価するとともに、降水変化の地域的な予測を行った。これら地方レベルでの洪水、渇水のリスク変化の評価を行うことにより、各河川の流域レベルでの実務政策的な対応の議論展開が可能となる。

## 2. 温暖化予測モデルGCM20の概要

気候モデルでは、さまざまな気候変化を物理的な根拠に基づいた方法で計算でき、種々の温室効果ガス排出シナリオのもとで、より現実的に起こり得る気候シナリオを作成することができる。また使用するモデルにより、計算対象となる大気現象、精度が異なるといった点等で課題があるものの、その課題・適用限界を十分に踏まれば将来の年々変動や季節変動、極端な大気現象についても有用な情報を得ることができるものと考えられる。

本研究では、将来の洪水リスクを評価するモデルとして気象庁・気象研究所の高解像度全球気候モデルGCM20を用いた。GCM20は、気象庁・気象研究所で開発された水平分解能20kmの全球大気モデルである(図-1)。本論文では、MRI-CGCM2で計算された海面水温を境界条件として、タイムスライス法と呼ばれる方法でGCM20を計算した結果を用いている。全球を予測対象とした気候モデルは分解能が粗いものが多いが、GCM20は地球シミュレータという高速計算機を使用することにより、20kmという地域気候モデルなみの高分解能で初めてテスト的に計算を行うことができた。GCM20のモデル仕様については表-1に示した。計算された期間は、現在の気候(1979~1998年)、将来の気候(2080~2099年)であり、将来の温室効果ガスはA1Bシナリオの条件で計算されている。A1Bシナリオは、人口が21世紀半ばにピークに達した後減少し、地域間所得格差が減少するシナリオのうちで化石、非化石エネルギー源のバランス重視のシナリオである。

表-1 MRI-GCM20の概要 (Mizuta et al., 2006<sup>7)</sup>)

基本となるモデル	AGCM(Atmospheric General Circulation Model)
水平分解能	20km
水平格子数	1920×960
鉛直層数	60
降水過程	Arakawa-Schubert+大規模凝結+対流調節
放射過程	長波放射+短波放射
鉛直拡散	Mellor and Yamadaのlevel2 クロジヤモデル
陸面過程	SiB モデル
海面水温	全球大気海洋結合モデル (MRI-CGCM2) から計算

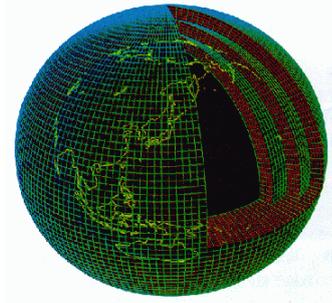


図-1 全球大気モデルのイメージ

## 3. モデルの再現性

### (1) 月別降水量の再現性

和田らは、MRI-CGCM2の日本付近の出力格子(280km間隔)12点を対象として、GCM20による現在の気候の計算期間(1979年~1998年)の結果を用いてモデルの再現性を調べ、結果として、大きな地域の問題はなく、GCM20は概ね実測の月別降水量(アメダス観測雨量の20年平均値の領域内平均)の変化を良好に再現しているとしている<sup>6)</sup>。ここでは、特に四国地域とその周辺(領域I,II,III)に着目して再現性を見てみる。図-2(a), 図-2(b)に示すように、各領域とも夏場の降水が若干低めに、冬場の降水が若干高めに再現される傾向にあるが、大きな差はなく、全体として概ね良好な再現性を見せている。

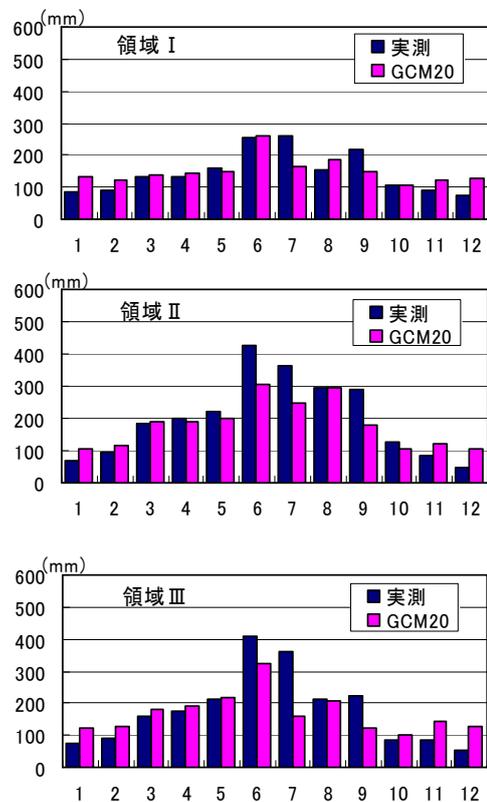


図-2(a) 実測とGCM20の月降水量の比較

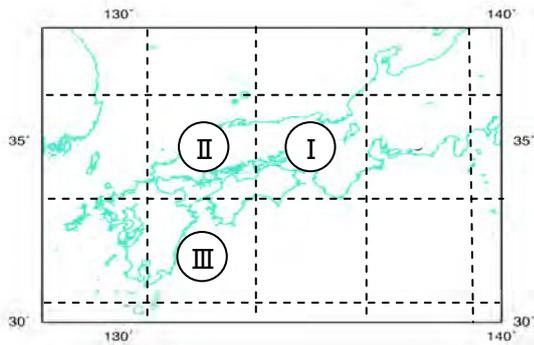


図-2(b) 検証に用いた領域区分

## (2) 年最大降水量の再現性

四国の洪水リスク評価への適用可能性を確認するために、現在の気候(1979年～1998年)の20年最大日降水量の再現精度を調べた。ここでは、アメダス観測値およびGCM20の格子の計算結果を図-3によって比較した。

四国山地を境にして南北で、太平洋気候と瀬戸内海気候に大きく分かれ、年最大降水量も大きく異なる点が決定的に再現されており、洪水リスクの分析をするに十分であると言える。

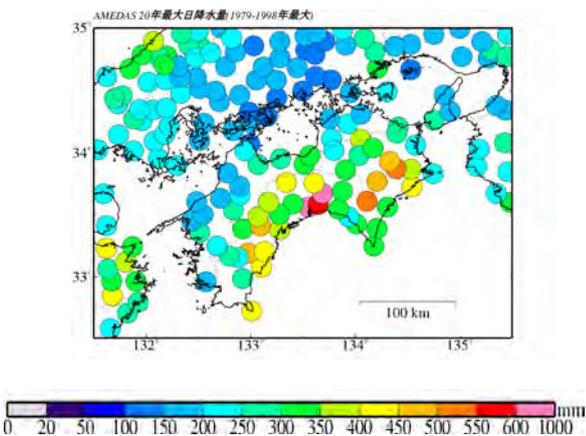


図-3(1) アメダス観測地点の20年最大日降水量

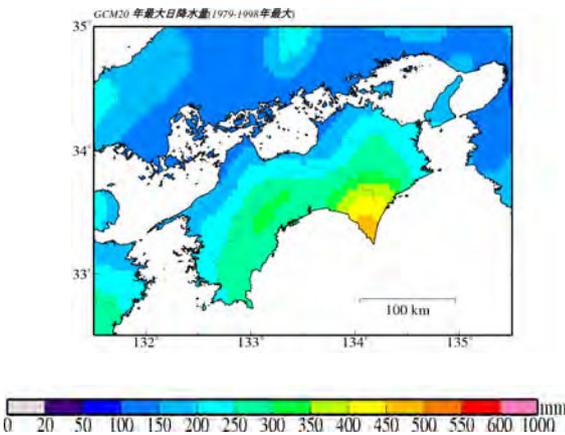


図-3(2) GCM20の20年最大日降水量

## (3) 降雨確率分布曲線の再現性

わが国の高水管理においては、日降水量・2日降水量の確率雨量を求め設計基準に用いることが多い。また、これらの確率雨量値は、豪雨などの極端な降水現象の変化の評価にも用いられることから、本研究では、これらの指標を用いて洪水リスクの評価を行うこととした。

確率雨量値は、日雨量・2日雨量の年最大値より算出される。また、年最大雨量値などの極値雨量値の確率分布曲線は一般に Gumbel モデルに適合することがわかっている。よって、ここでは、モデル出力値とアメダス観測値からそれぞれ求めた Gumbel モデルのパラメータならびに確率分布曲線を比較し、モデル出力値の再現性を確認した。検証期間は、モデル出力値とアメダス観測値双方が存在する1981～2000年である。

以下に、Gumbel モデルの確率密度関数の式を示す。

$$f(X) = \frac{1}{\beta} \exp \left[ - \exp \left\{ - (X - \xi) / \beta \right\} - (X - \xi) / \beta \right] \quad (1)$$

$$\beta = S_x \sqrt{6} / \pi \quad (2)$$

$$\xi = X_m - \gamma \beta \quad (3)$$

ここで、

$f(X)$  :  $X$ の出現確率密度関数

$S_x$  :  $X$ の標準偏差  $X_m$  :  $X$ の平均

$\gamma$  : オイラー定数(0.57721・・・)

であり、 $\xi$ は location parameter で分布のピークの位置を、 $\beta$ は scale parameter で分布の広がりを示す。

なお、これまでの研究により、数値モデル出力値の日降水量の年最大値の変化傾向を評価する際は、複数地点の観測データを一つのデータセットとして取り扱い、このデータセットの特性を評価することが有効であることがわかっている(例えば、和田ら<sup>2)</sup>)。

図-4に、四国周辺のGCM20モデル出力格子点およびアメダス観測点を示す。図中の四角枠は20km, 40km, 60km, 80km, 100kmの範囲を示している。再現性の評価は、四国内のモデル出力値点およびアメダス観測地点全てを対象として実施している。



図-4 GCM20の格子サイズとアメダス観測地点

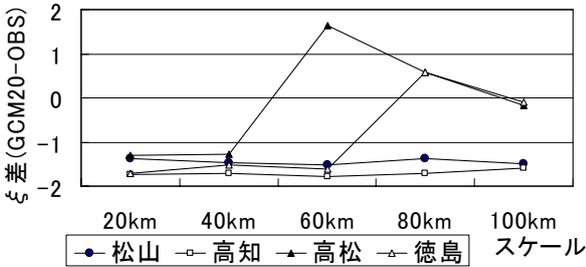
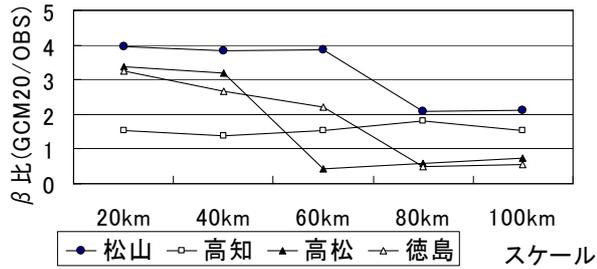


図-5 メッシュサイズ別にみた、観測値とRCM20の $\beta$ 比(上)と $\xi$ 差(下)

四国地方の各地点におけるモデル再現性をみるため、四国の4都市における Gumbel モデルの  $\beta$  (location parameter) 及び  $\xi$  (scale parameter) をメッシュサイズ別に比較した。 $\beta$  は確率密度曲線のグラフの先鋭度を表す指標であることから観測値と RCM20 出力のそれぞれの  $\beta$  の比を、また  $\xi$  は確率密度曲線のグラフの中心位置を示す指標であることから観測値と GCM20 出力のそれぞれの  $\xi$  の差を抽出し評価した。結果を図-5 に示す。

$\beta$  比は1に近くなるほど、また  $\xi$  差は0に近いほど再現性は高いと評価される。図-5 より、20km、40km と 60km 以上で  $\beta$ 、 $\xi$  値の傾向が異なるが、どのサイズでの結果が再現性が高い、という特徴的な傾向は見られない。ちなみに和田ら<sup>9)</sup>が同様の方法で、全国を対象として検討をした研究では 20km メッシュでの解析がもっとも適合性が良かった。

続いて四国全体レベルで面的に GCM20 モデル出力値が再現性を確保しているかどうかについても、①GCM20 モデル出力値及びアメダス観測値の  $\beta$  比(モデル/観測)、②GCM20 モデル出力値及びアメダス観測値の  $\xi$  差(モデル-観測)、③GCM20 モデル出力値及びアメダス観測値の、Gumbel モデルの確率密度関数における確率値の相関係数をそれぞれ比較した。

20km メッシュおよび 60km メッシュにおける結果を図-6 に示す。ただしこれらの図からメッシュサイズによる大きな差は見られず、よって前述の 20km メッシュをもって、以降の解析を行なうこととする。

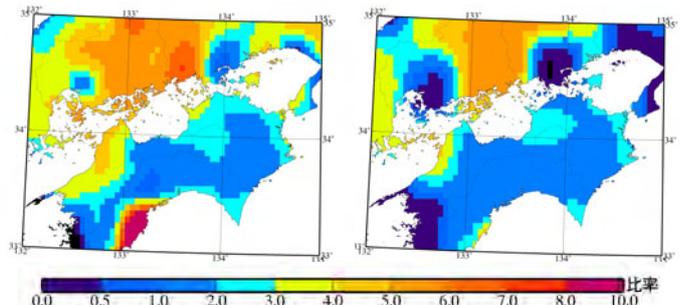


図-6(1)  $\beta$  比 (GCM/OBS) の分布 (左: 20km, 右: 60km)

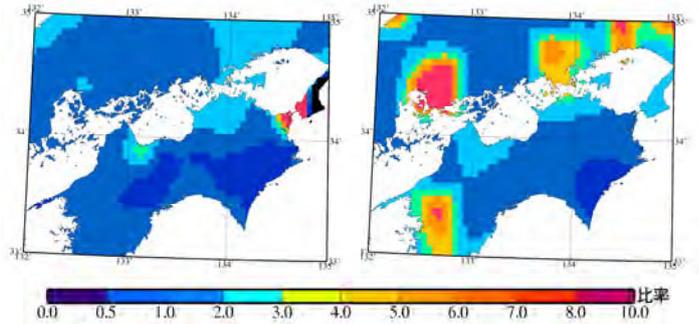


図-6(2)  $\xi$  差 (GCM-OBS) の分布 (左: 20km, 右: 60km)

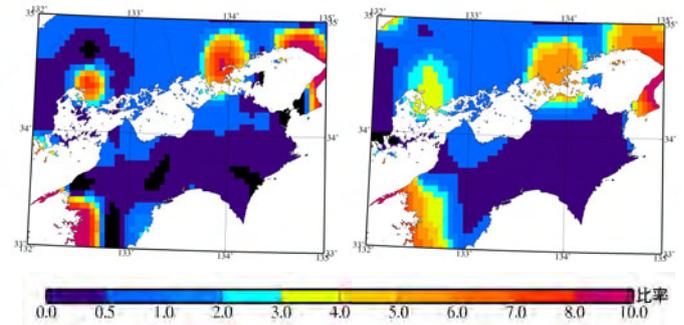


図-6(3) 日雨量の相関係数の分布 (左: 20km, 右: 60km)

#### 4. 温暖化進行時の洪水リスクの変化

CO<sub>2</sub> 濃度増加後の 2081-2100 年の GCM20 モデル出力値と CO<sub>2</sub> 濃度は現行と同じレベルで計算した 1981-2000 年の出力値を比較し、100 年後の洪水発生リスクを評価すべく確率雨量値の変化率を調べた。解析にあたっては、それぞれ20年分の日降水量の年最大値より100年確率降水量を求め、その比がどのように変化するかを確認した。図-7 に結果を示す。

100 年後は、四国全域で確率雨量値は高くなり、特に瀬戸内東予～西讃および、高知西部と徳島南部の各沿岸で 1.4~1.6 倍になることがわかる。また吉野川上流、仁淀川、四万十川、肱川、那賀川下流、土器川などの流域で 1.2 倍の増大を示す。これら河川計画の基本指標となる 100 年確率年最大日雨量が大きな増大を示すことは重要な意味を持ち、場合によってはこれらの地域では河川計画の修正が必要となる。

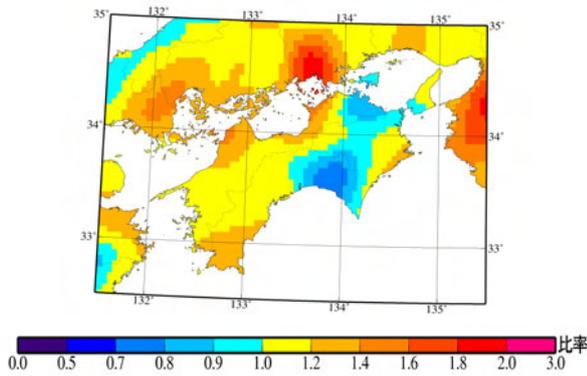


図-7 100年確率年最大日降水量の変化(20km)

気象庁<sup>8)</sup>によれば、年平均降水量の統計的に有意な増加が九州の東シナ海沿岸、瀬戸内海付近、および北海道の一部に見られ、10mm以上の降水日数および単純日降水強度の増加もほぼ同じ地域で見られる。これは、西日本を中心に梅雨前線の活動が活発となり降水量が増加する変化に関係している。

このような夏季における降水強度の強まりの原因としては、全球レベルの大気海洋結合モデルの解析により、以下のプロシージャーが想定されている。

- ① 温暖化進行によりエルニーニョ型の海面水温偏差パターンが増加。
- ② 日本の南側が高気圧偏差となり日本付近は低気圧偏差となる。
- ③ 暖かく湿った南西風が西日本中心に入り込みやすくなり梅雨前線が日本付近に停滞しやすくなる。

上記で指摘される総観気象パターン（南西風の暖湿流の入り込み、日本付近前線停滞）はいずれも四国地方に大雨をもたらすものであり、このような気象条件を満たす日が増加すれば、100年確率降水量も増加するものと考えられ、本研究結果と一致する。

## 5. 温暖化進行時の渇水リスクの変化

100年後の渇水リスクを評価するため、渇水対策特に生活面や産業面に対して影響力の大きい3ヶ月及び6ヶ月累積雨量の20年最小値が、100年間でどの程度変化するかについて評価した。図-8、9に結果を示す。

総じて渇水についての顕著な特徴としては、特に7～9月（3ヶ月）および4～9月（6ヶ月）の期間の夏場の渇水、並びに10～3月（6ヶ月）の冬場の渇水が予想される点あげられる。夏場の渇水は吉野川上中流、仁淀川、四万十川、重信川および那賀川、土器川などの各流域で顕著であり、冬場の渇水は吉野川上下流、仁淀川、那賀川、土器川などの各流域で顕著となる。

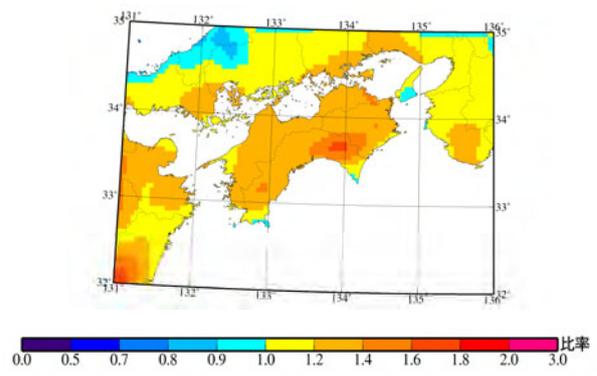


図-8(1) 20年最小3ヶ月降水量1～3月の変化率(将来/現在)

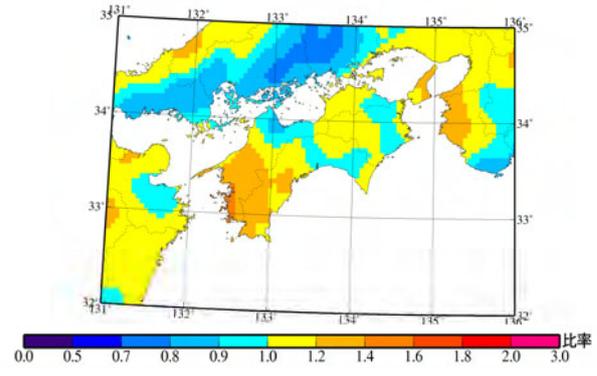


図-8(2) 20年最小3ヶ月降水量4～6月の変化率(将来/現在)

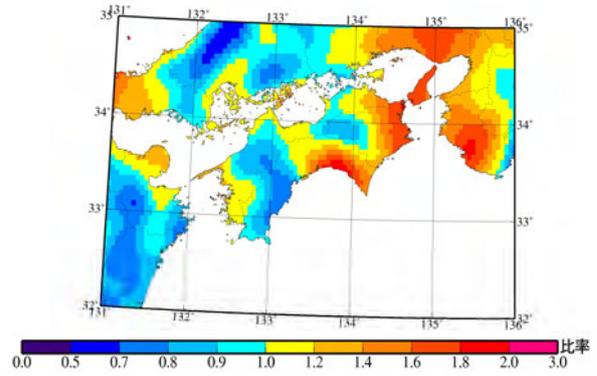


図-8(3) 20年最小3ヶ月降水量7～9月の変化率(将来/現在)

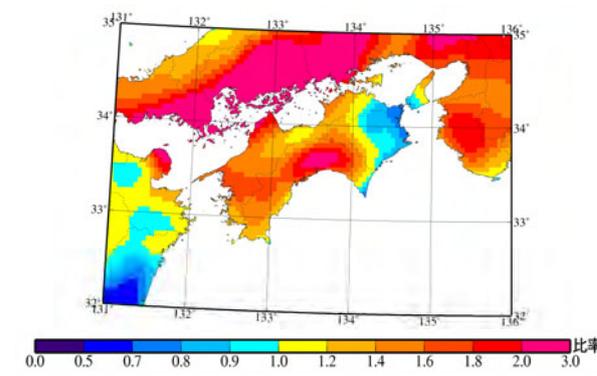


図-8(4) 20年最小3ヶ月降水量10～12月の変化率(将来/現在)

これらの原因については、冬季については南岸低気圧の通過頻度が少なくなる、温暖化進行によって大陸と海洋の気温差が縮まるため冬型の気圧配置が弱くなり山岳

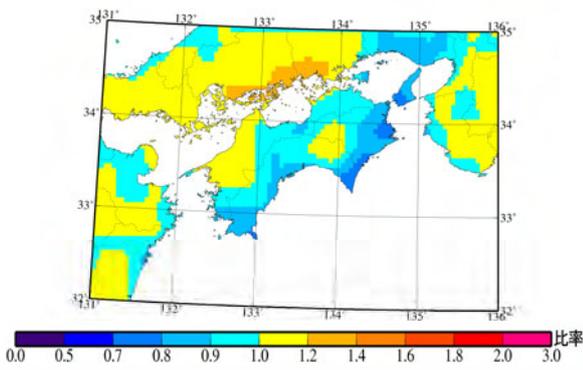


図-9(1) 20年最小6ヶ月降水量10~3月の変化率(将来/現在)

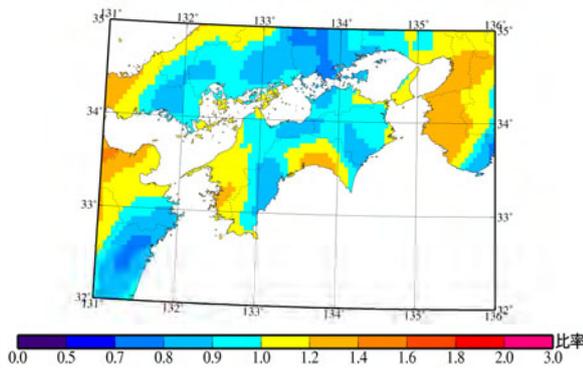


図-9(2) 20年最小6ヶ月降水量4~9月の変化率(将来/現在)

部で降雪が減る, 等の原因が考えられる。夏季については太平洋高気圧が強まるほか, GCM20 の予測では台風の発生頻度が少なくなることが指摘されており<sup>8)</sup>, この結果, 夏の渇水を招くことが考えられる。

## 6. 結論

本研究では, 気象庁・気象研究所が開発した高解像度全球モデル GCM20 の温暖化予測結果について, 精度検証を行い, 四国地方の洪水・渇水リスクを予測, 解析した。その結果, 以下のことが明らかになった。

- (1) 1981~2000年のGCM20の出力値とアメダス観測値を比較し, モデル出力値の再現性を評価した。その結果, 20km空間スケールで評価した場合, 四国全体において, モデル出力値とアメダス観測値の, 月別降水量, 年最大降水量, 確率分布曲線の一致度は高く, モデル出力値の再現性が確保できることが明らかとなった。
- (2) 地球温暖化進行後の2081~2100年及び現在の気候である1981~2000年のGCM20モデル出力値を比較した結果, 100年間で100年確率年最大日降水量は瀬戸内東予~西讃, 高知西部と徳島南部で増大し, 地球温暖化に伴って洪水発生リスクが高まることが示唆される。場合によってはこれらの地域では河川計画の見直し等が必要となる。

- (3) 渇水対策上特に生活面や産業面に対して影響力の大きい3ヶ月及び6ヶ月累積雨量の20年最小値が, 100年間でどの程度変化するかについて評価した結果, 総じて四国地方は夏場および冬場においてそれぞれ最小降水量が減少する可能性がある。

本研究により, 四国地方の洪水・渇水リスクは地球温暖化に伴い高まることが確認された。今後, より具体的な河川計画や洪水管理に資するためには, 地球温暖化に伴いどのような降雨パターンが増加していくのかなど, より詳細な解析を実施していくことが必要である。

**謝辞:** 本研究は, 愛媛大学防災情報研究センターと気象庁気象研究所の共同研究として実施したものである。また本研究の資料整理にあたっては(財)日本気象協会石井琢哉氏にご協力いただいた。ここに記して感謝の意を表する次第である。

## 参考文献

- 1) IPCC(2007): Climate Change 2007: The Physical Science Basis, *Summary for Policymakers.*, <http://www.ipcc.ch/SP/M2feb07.pdf>, 13-14p.
- 2) 和田一範, 村瀬勝彦, 富澤洋介: 地域気候モデルを用いた地球温暖化に伴う洪水リスクの評価に関する考察, 水工学論文集, 第50巻, 2006, pp613-618.
- 3) 和田一範, 石井琢哉, 櫻井康博: 地球温暖化に伴う四国地方の洪水リスクの評価に関する考察, 水工学論文集, 第51巻, 2007, pp433-438.
- 4) 櫻井康博, 石井琢哉, 和田一範: 地球温暖化に伴う四国地方の極端な降雨現象の変化傾向, 土木学会四国支部第13回技術研究発表会講演概要集, 2007, pp134-135.
- 5) Kusunoki, S., Yoshimura, J., Yoshimura, H., Noda, A., Oouchi, K., and Mizuta, R. (2006): Change of Baiu rain band in global warming projection by an atmospheric general circulation model with a 20-km grid size, *J. Meteor. Soc. Japan*, 84, pp.581-611.
- 6) 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よる洪水リスクの評価, 水文学資源学会論文集 (投稿中, 査読済), 2007
- 7) Mizuta, R., Oouchi, K., Yoshimura, H., Noda, A., Katayama, K., Yukimoto, S., Hosaka, M., Kusunoki, S., Kawai, H. and Nakagawa, M. (2006): 20-km-mesh global climate simulations using JMA-GSM model - mean climate states -. *J. Meteor. Soc. Japan*, 84, pp.165-185.
- 8) 文部科学省研究開発局: 高精度・高分解能気候モデルの開発平成17年度研究成果報告書, 新世紀重点研究創生プラン Research Revolution 2002 (RR2002) 人・自然・地球共生プロジェクト, 30p, 2006

(2007. 9. 30受付)