

# 地球温暖化に伴う四国地方の 洪水リスク評価に関する考察

## THE STUDY OF FLOOD RISK ASSESMENT BY GLOABAL WARMING IN SHIKOKU REGION

和田一範<sup>1</sup>・石井琢哉<sup>2</sup>・櫻井康博<sup>3</sup>

Kazunori WADA, Takuya ISHII and Yasuhiro SAKURAI

<sup>1</sup>正会員 博(工)愛媛大学防災情報研究センター教授、副センター長(〒790-8577 松山市文京町3番)

<sup>2</sup>農修 財団法人日本気象協会 首都圏支社調査部(〒170-6055 東京都豊島区東池袋3-11-1)

<sup>3</sup>農修 財団法人日本気象協会 四国支店(〒760-0023 高松市寿町2-3-11)

The flood risk in Shikoku region caused by global warming is studied. By the analysis of past 100-yr daily precipitation, it's estimated that 100-yr annual maximum daily precipitation and the frequency of heavy precipitation record increased. About the future assessment, we use the output of the regional climate model RCM20 by Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency. The horizontal resolution of the model is about 20km and the model output is expected to be useful for the flood risk assessment of the future. First we confirmed the model output reproducibility by comparing the observed data with model output in 1981-2000. Subsequently we estimated the flood risk in 2081-2100 by using model output. According to the analysis, it's cleared that 100-yr annual maximum daily and 2days precipitation will increase.

**Key Words :** *flood, hazard risk global warming, regional climate model*

### 1. はじめに

地球温暖化に伴い、洪水などの極端な降雨現象が増大するのではないかと懸念されている。例えばIPCCの第3次評価報告書<sup>1)</sup>では、地球温暖化に伴い北半球の中高緯度では「強い降水現象が増加」する可能性が高いことを指摘している。また、過去の観測値の解析においても和田ら<sup>2)</sup>は、過去100年の日降水量の年最大値の解析により洪水リスクが増加していることや1/10少雨が減少傾向となっていることを示した他、山元ら<sup>3)</sup>も過去100年の年降水量の解析により、近年25年間は降水量の年々変動の程度が大きくなっていることを統計学的処理により明らかにした。

こうした洪水や渇水の将来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いるともあり、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。

このような、地球温暖化に伴う将来の降雨現象の変化

を評価するためには、数値シミュレーションを活用することが有用である。特に、気象庁気象研究所で開発されたMRI-RCM20-Ver. 2(以降「RCM20」という)は20kmメッシュの分解能を有しており、地域レベルの気候変動を評価することも可能である。和田ら<sup>4)</sup>は、このRCM20の性能に着目し地球温暖化進行後の2081~2100年の洪水リスクを評価し、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・南西諸島で増強することを明らかにしている。この種の研究は、気象庁<sup>5)</sup>でも実施しており、同じく2081~2100年を解析し、多雨期の7月の最大日降水量は、北海道や東北の一部で特に増加することを解析した。

しかしながらこれまでの地球温暖化進行後のリスク評価は、比較的広い範囲を対象としており、例えば四国地方など地域を限定した領域については、詳細に解析したものはない。本研究はこうした実状を踏まえ、洪水の危機意識が高まっている四国地方を対象に解析を行った。利用したデータは、過去100年間の日雨量観測値およびRCM20の出力値である。過去の極端な降水の変化傾向は、各地点の各年代の確率降水量や記録更新頻度の変遷を調べることにより明らかにした。また将来シナリオについては、日降水量の年最大値を元に求めた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。

## 2. 観測値による大雨の変化傾向

四国地域における集中豪雨など極端な洪水現象がどのような変化をしているかについて、過去100年間の気象官署の日雨量年最大値を用いて解析した。まず、はじめに、河川管理実務への政策展開において有効に活用されている100年確率年最大日降水量の変化傾向をみた。

これまでの研究<sup>2)</sup>では、過去100年を20年ずつの5区分に分けた100年確率年最大日降水量の変化について解析されている。しかし100年レベルの確率年を計算する際には、データサンプルの問題が懸念されることから、今回の検討では図1に示すように、1901～2000年のデータを40年間4期間に分け(20年ずつ重なる)、Gumbel法により各年代の100年確率降水量を算出した。また、地点についても新たにデータセットが整備された高知を付加した。

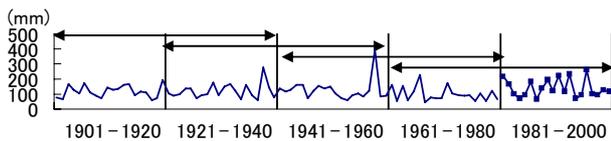


図-1 100年確率年最大日降水量算定に用いた資料区分

高 知	: +2.039mm/year
徳 島	: +0.284mm/year
多度津	: -0.044mm/year
松 山	: +0.373mm/year

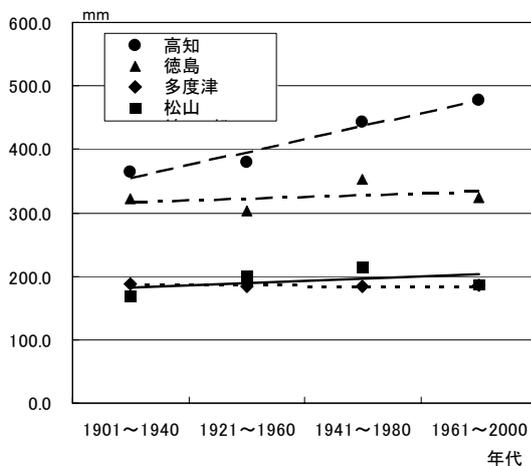


図-2 100年確率年最大日降水量算の経年変化

四国内の各観測点の結果を図2に示す。高知の増加は顕著であり、100年確率年最大日降水量は、100年で約200mmの増加が確認された。また、徳島、松山におけるトレンドも増加が確認され、徳島は100年で約30mm、松山も40mmと、いずれも100年確率年最大日降水量の増加が確認できた。四国における過去の洪水リスクの増大が認識される。

極端に激しい降雨現象は、その現象が激しければ激しいほどその発現頻度も稀であり統計標本数も少なくなるがゆえ、特に1カ所のみ観測所データのみの統計解析によって有意な結論を得ることは困難である。これに対し、Iwashima<sup>6)</sup>らは、複数観測所のデータを一括処理し、データサンプルを増やして解析する手法を試みている。本研究においても、この手法を用いて解析を行った。解析手順を以下に示す。

- ① 互いに独立な日降水の年最大値を100年分収集
- ② 各観測所につき第1～3位のデータを抽出
- ③ 25年代ずつ4つに分類し各年代における出現頻度を算出
- ④ 出現頻度が一定とした場合の期待値と、観測された各年代の頻度値を比較し $\chi^2$ 値を算出
- ⑤ 算出された $\chi^2$ 自由度3の $\chi^2$ を比較し、観測の頻度分布が統計的に一様であるかを検証

図3に四国内5観測所(多度津、松山、宇和島、高知、徳島)の1901～2000年における日降水量の最大記録(第1～3位)の出現時期の頻度分布を示す。結果、観測値より求められた $\chi^2$ 値は自由度3の $\chi^2$ 値よりも大きく、日降水量の記録更新頻度の増加傾向は5%の危険率で統計的に有意であることが明らかとなった。これより、四国全域の大雨の記録更新頻度は過去100年を通じて増加傾向にあり、特に1975年以降、記録更新を伴う大雨の発生頻度は増えていることが示唆される。

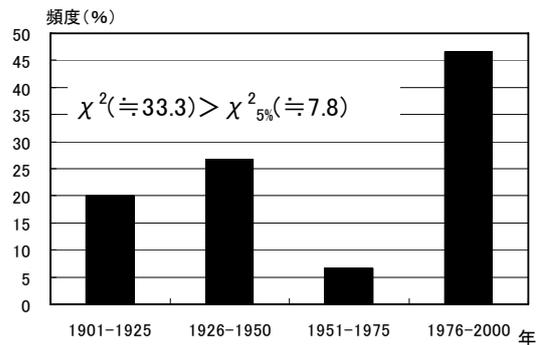


図-3 四国内5観測所(多度津、松山、宇和島、高知、徳島)の1901～2000年における日降水量の最大記録(第1～3位)の出現時期の頻度分布

### 3. 将来予測

地球温暖化進行後の将来の洪水リスクの検証にあたっては、地域気候モデルの出力値の解析を行い評価した。用いた地域気候モデルRCM20は、気象庁気象研究所で開発されたものであり、全球大気海洋結合モデルGCM2の出力値を境界条件としてダウンスケーリング（２段階にネスティング）させたものである。地球温暖化のシナリオは、IPCCが設定したSRESのA2シナリオ（経済志向、地域主義志向で、100年後の世界の人口は150億人になる）を採用し、CO<sub>2</sub>濃度を年ごとに漸増させている。

モデルの概要を表1に示す。

表-1 RCM20の概要

基本となるモデル	RSM(Regional Spectrum Model)
側面境界条件	280kmメッシュのGCM2出力値を２段階にネスティング
水平分解能	20km
水平格子数	129×129
鉛直総数	36
降水過程	Arakawa-Shubert+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1e12クローゼモデル
接地境界層	モニン・オブコフの相似則
地面・地中温度	4層モデルにより予想
海面水温	GCM2から計算
降雪	診断的に計算

### 4. 洪水リスクに関する評価

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。

#### (1) モデル出力値の再現性検証

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（例えばWilks<sup>7)</sup>）。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>4)</sup>）。本研究でも、この手法を用いて解析を進めた。なお、後述のメッシュサイズにおいては、和田ら<sup>4)</sup>の日本全国を対象にした研究で60km空間スケールでの再現性を確認しているため、ここでは、より局地的なモデル解析値の振る舞いをみるために、20, 40, 60kmのメッシュサイズでの検討を行った。解析手順を以下に示す。

- ① モデル出力値およびアメダス観測値を（1）式のGumbel分布に基づいて標準化
- ② 標準化したデータをメッシュサイズ別（20, 40, 60km）にまとめメッシュサイズ別の統計標本を作成
- ③ メッシュサイズ毎の統計標本からGumbelモデルの確率雨量算出に大きな影響を与える $\beta$ （location parameter）および $\xi$ （scale parameter）について、モデル出力値の $\beta$ 、 $\xi$ とアメダス観測値の $\beta$ 、 $\xi$ を比較し再現性を評価
- ④ メッシュサイズ毎の統計標本からGumbelモデルの確率密度関数を求め、目的変数をモデル出力値の確率密度関数の確率値、説明変数をアメダス観測値の確率密度関数の確率値として両者の相関係数を算出し再現性を評価

図4に、四国周辺のRCM20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。

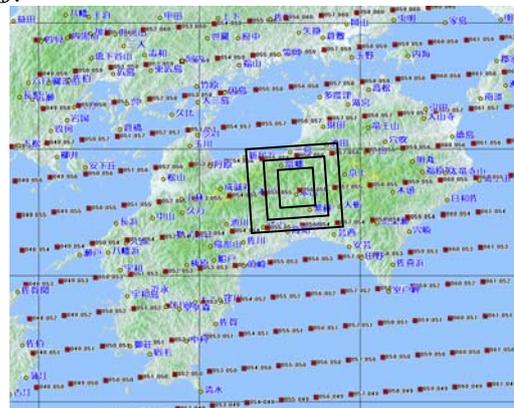


図-4 RCM20解析格子点とアメダス観測地点

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RCM20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、4都市の解析結果が上記条件をほぼ満たしているのは20kmメッシュであり、このメッシュを拡大してもこの条件の向上は特にみられないことがわかる。

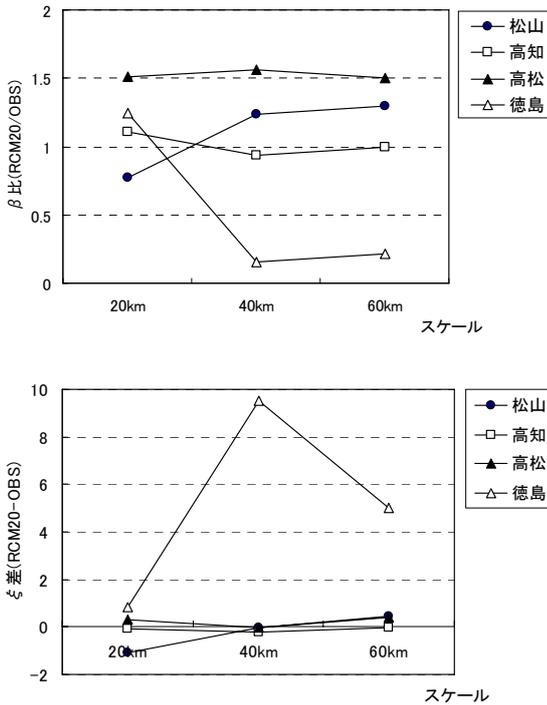


図-5 メッシュサイズ別にみた、観測値とRCM20の $\beta$ 比(上)および $\xi$ 差(下)

続いて四国全体レベルで面的にRCM20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、①RCM20モデル出力値及びアメダス観測値の $\beta$ 比、②RCM20モデル出力値及びアメダス観測値の $\xi$ の差、③RCM20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することにより検証した。

20kmメッシュおよび60kmメッシュにおける結果を図6, 7, 8に示す。いずれも、60kmメッシュに比して20kmメッシュの方が、四国全体で均一の値になっていることがわかる。図6の60kmメッシュの解析では、中予から南予及び東讃から徳島北部にかけて $\beta$ 比が0.2以下となるエリアが存在しているが、20kmメッシュの解析では $\beta$ 比が極端に小さく(また大きく)なっている地域の面積は60kmと比較してやや狭いことがわかる。また、図7の $\xi$ 差も、

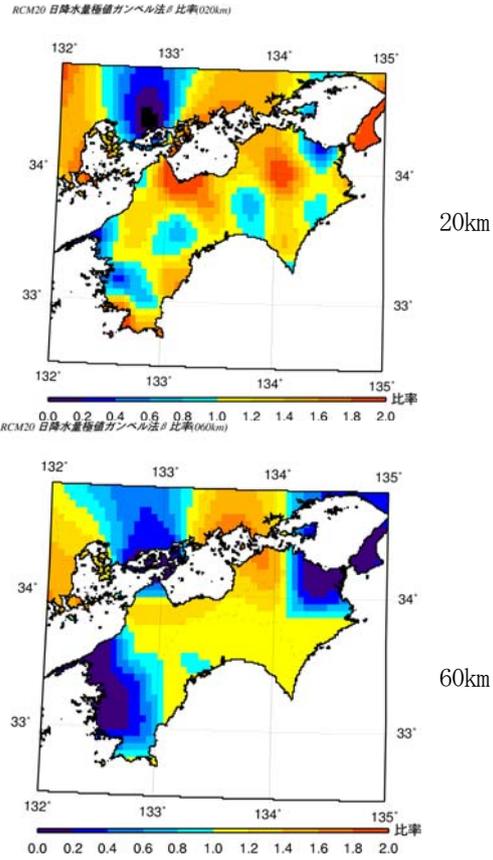


図-6 「日降水量年最大値」より求めた $\beta$ 比 (RCM20出力値とアメダス観測値の $\beta$ 比)

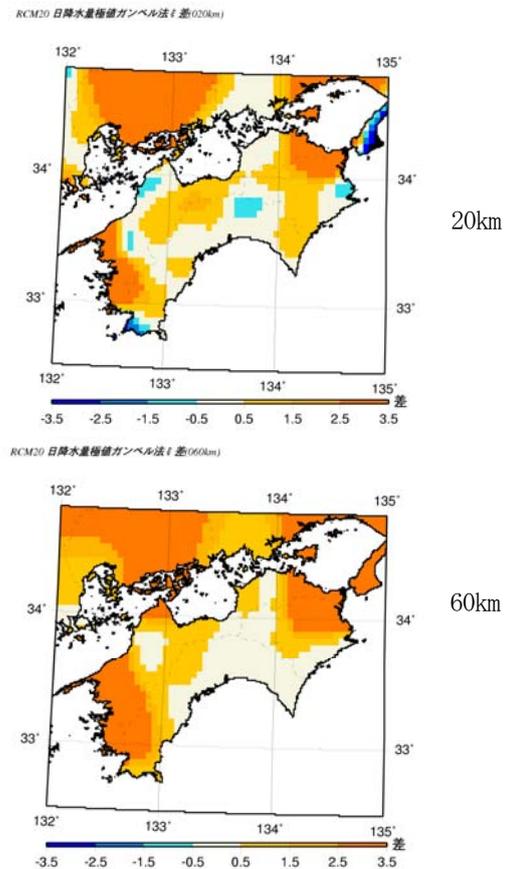


図-7 「日降水量年最大値」より求めた $\xi$ の差 (RCM20出力値とアメダス観測値の $\xi$ の差)

60kmの図と比して20kmの図の方が、 $\xi$  差が「-2.5～+2.5」の範囲にある面積は大きい。以上により、20kmメッシュによる解析は、他メッシュサイズの解析に比較して遜色なく再現性が確保されることが確認できる。なお、ここでは日降水量の年最大値について示したが、2日降水量の年最大値についても、ほぼ同様の結論を得ている。

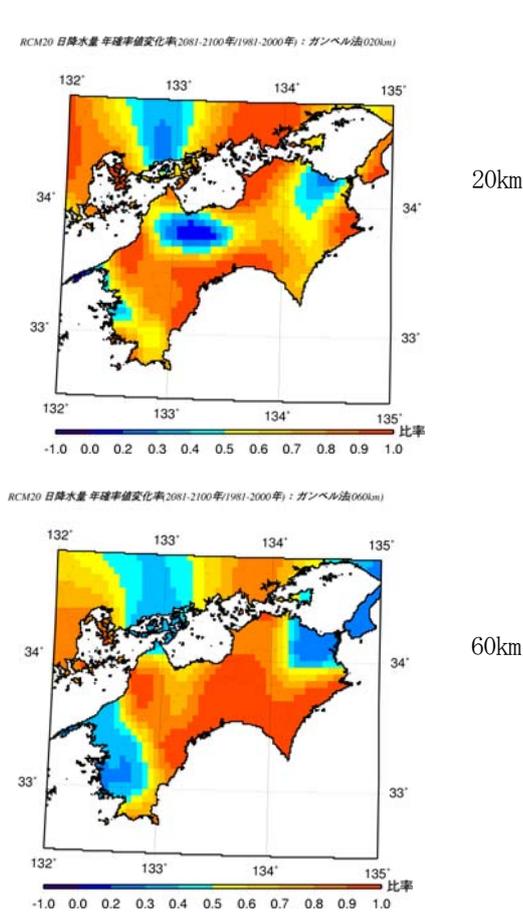


図-8 「日降水量年最大値」より求めたRCM20出力値とアメダス観測値の確率密度関数の相関係数

## (2) 100年後の確率降水量の変化率

CO<sub>2</sub>濃度増加後の2081-2100年のRCM20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年分の日降水量および2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。なお、(1)の検証により、RCM20出力値は20kmメッシュの再現性が高かったことから、ここでは20kmメッシュの確率雨量値の変化を分析した。

図9、10に結果を示す。100年後は、ほとんどの地域で確率雨量値は多くなり、特に東予～四国山地～室戸岬の地帯では現在よりも確率雨量値は日降水量の年最大1.4～3.0倍、2日降水量の年最大値で1.2～1.6となることわかる。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、2日雨量が大きな増大を示すことは重要な意味を持つ。また、2日降水量の年最大値よりも日降水量の年最大値の強度の方が強まる傾向になったことは、「地球温暖化に伴い、時間スケールの小さな降雨量が増える可能性」を示唆しており興味深い。

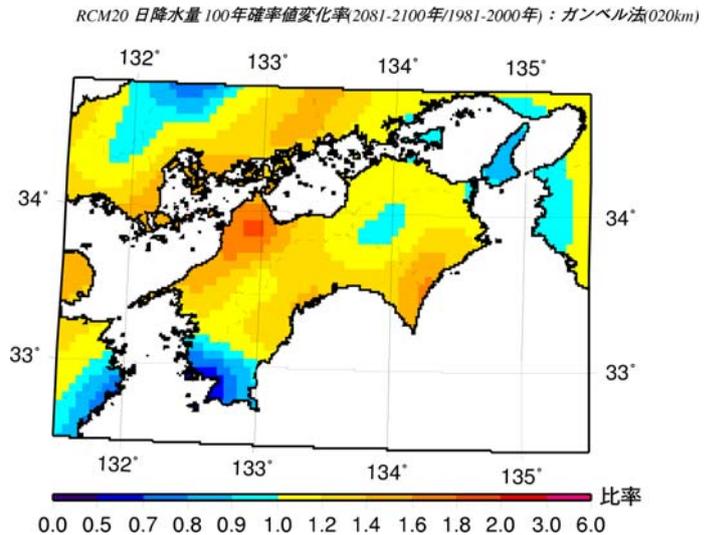


図-9 100確率日最大降水量の変化率（1981-2000年の出力値と2081-2100年の出力値を比較）

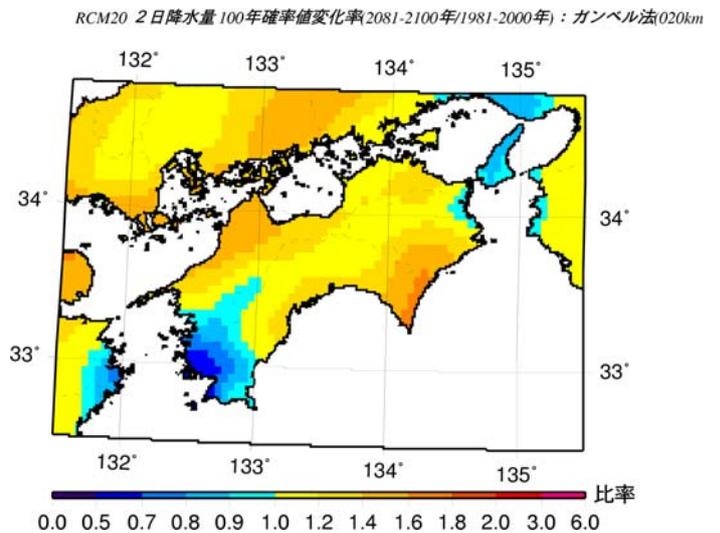


図-10 100確率2日最大降水量の変化率（1981-2000年の出力値と2081-2100年の出力値を比較）

気象庁<sup>9)</sup>は西日本太平洋側での大雨の変化傾向について、A2シナリオを適用したRCM20の出力値を解析している。その結果、「6～7月、9～10月は降水強度が増加」「7月は降水日数の増加だけではなく平均的な一雨あたりの降水量も増加する」ということを明らかにしている。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、全球レベルの大气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<sup>9)</sup>。

- 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。

また、Yoshizakiら<sup>10)</sup>は詳細な5kmの非静水圧モデルを解析し、地球温暖化進行後、「梅雨期間は長くなり、梅雨の終わりが不明瞭になるケースが増加」「梅雨前線の活動は活発化」することを示した。

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比が増加すれば、100年確率降水量も増加するものと考えられ、本研究結果とも一致する。

なお、四国地方に記録的な豪雨をもたらす気象擾乱は台風を含む熱帯性低気圧及び熱帯性低気圧の前面に存在する前線が大半である。現時点では、地球温暖化に伴い、熱帯性低気圧の発生数は減少するが風速レベルからみた強度は増加することが指摘されている<sup>11)</sup>。しかしながら、熱帯性低気圧に伴う西日本周辺の降水変化に関しては明瞭な解析がなされていない。今後、四国地方の大雨要因についても、治水計画策定の観点から詳細に解析していく必要がある。

## 5. 結論

過去100年間の日雨量観測データ及び気象庁気象研究所の地域気候モデルMRI-RCM20-ver. 2の出力結果を解析し、四国地方の過去100年間及び温暖化が進行した100年後の洪水リスクの変化を評価した。

- (1) 過去100年の100年確率年最大日降水量は四国各地で増加しており、特に高知の増加量は203.9mmになっていることが明らかとなった。また、四国各地の日降水量の最大記録（第1～3位）の記録更新頻度は、近年増加傾向にあり、四国全体でみて、大雨の発生頻度が増加していることが確認された。
- (2) 1981～2000年のRCM20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。
- (3) 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RCM20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及び2日

降水量は、四国の大半の地域で増加することが確認された。特に東予～四国山地～室戸岬に至る地帯の100年確率値は、現在の1.2～1.4倍に増加し、洪水発生リスクは地球温暖化に伴って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。

本研究により、四国地方の洪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：本研究にあたり、総合科学技術会議の重点分野の環境プロジェクトにおいて設定された地球温暖化研究イニシアティブの温暖化リスク評価研究プログラムの枠組みの下で、気象庁・気象研究所によるRCM20出力値の提供を受けた。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: Climate Change 2001: The Scientific Basis B.6 Observed Changes in Climate Variability and Extreme Weather and Climate Events, Cambridge University Press, UK
- 2) 和田一範, 村瀬勝彦, 富澤洋介: 地球温暖化に伴う降雨特性の変化と洪水・渇水リスクの評価に関する研究, 土木学会論文集, No796/II-72, 23-37, 2005
- 3) 山元龍三郎, 奥田昌弘, 金近治, 鬼頭昭雄, 石原幸司: 年降水量の年々変動度の長期的増加傾向, 第6回水資源に関するシンポジウム論文集, pp. 555-560, 2002
- 4) 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
- 5) 地球温暖化予測情報第6巻, 気象庁, 57pp, 2005
- 6) Iwashima, T & Yamamoto, R. : A statistical analysis of the extreme events : Long-term trend of heavy daily precipitation J. Meteor. Soc. Japan. 71, 637-640, 1993
- 7) Wilks, D. S., Statistical Methods in the Atmospheric Sciences, Academic Press, 467pp, 1995
- 8) 異常気象レポート2005, 気象庁, 373pp
- 10) Yoshizaki, M., C. Muroi, S. Kanda, Y. Wakazaki, K. Yasunaga, A. Hashimoto, T. Kato, K. Kurihara, A. Noda, and S. Kusunoki : Changes of Baiu (Mei-yu) Frontal Activity in the Global Warming Climate Simulated by a Non-hydrostatic Region Model SOLA, Vol11, 25-28, 2005
- 11) Oouchi, K., J. Yoshimura, H. Yoshimura, R. Murata, S. Kusunoki, A. Noda : Tropical Cyclone Climatology in a Global-Warming Climate as Simulated in a 20km-Mesh Global Atmospheric Model : Frequency and Wind Intensity Analyses J. Meteor. Soc. Japan. 84 259-276, 2006

(2006. 9. 30受付)