

全球気候モデルを用いた異常降雨とそのアジア モンスーン域における将来変化の解析

ANALYSIS OF ABNORMAL RAINFALL AND ITS FUTURE CHANGES IN ASIAN MONSOON REGION USING GENERAL CIRCULATION MODEL

木島梨沙子¹・中北英一²

Lisako KONOSHIMA and Eiichi NAKAKITA

¹学生員 工修 京都大学大学院 工学研究科 (〒615-8530 京都市西京区京都大学桂)

²正会員 工博 京都大学教授 防災研究所 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

The future changes in extreme (100-yr return value of annual maximum) precipitation of various temporal scales and the occurring seasons are studied in a 20 km-mesh atmospheric general circulation model (GCM20). The model performances to simulate extreme precipitation in different temporal scales are evaluated by daily rain gauge data. The daily extremes are simulated well in GCM20 in middle and high latitude countries, while only longer scale (15day) extremes showed good agreement with gauge data in low latitude countries. Increases in future extreme precipitation of different temporal scales are likely to occur in same areas in Asian Monsoon region. For occurring season of extremes, a significant change is seen in Mekong River basin, which occurring month of 15-day rainfall shifts from September to August in future. This earlier shift of extreme rainfall might result the annual flooding peak to come earlier in future climate.

Key Words : extreme rainfall, climate change, general circulation model, Mekong River basin

1. 研究背景

近年, 異常降雨による洪水災害の報告が世界中で後を絶たない. またGCM (General Circulation Model) を用いた将来予測では, 温暖化に伴う降水量の変動は平均値よりも極値において著しく(例えばKatz¹⁾, Allen and Ingram²⁾, Kharin and Zwiers³⁾), アジアモンスーン域においても極端な降水現象の強化が示されている⁴⁾. さらにこれらの気候変動に伴い, 将来気候では全球における洪水頻度の増加や, 主に融雪の変化による流出量のピークのずれも指摘されている^{5,6)}.

一方, 洪水のトリガーとなる異常降雨現象は, 流域スケールやその地域の気候特性に依存する⁷⁾. そのため将来の洪水災害に極端降雨の変化が与える影響を評価するには, 対象流域に応じて時間・空間スケールを考慮し, また生起する季節も検討する必要がある^{7,8,9)}.

しかしこれまでの多くのGCMは水平解像度が数百km程度と粗く, 大陸河川以外の中・小流域の空間スケールには対応していなかった. さらに, 将来気候では降雨強度の増加が示されているものの^{2,3)}, これらの粗い解像度のGCMでは日単位以下の短い時間スケールの極端降雨は再現が困難であった¹⁰⁾.

近年, 気象庁気象研究所が開発した超高解像度全球気候モデル (GCM20) は水平解像度が20 kmと極めて高く, 山岳域の強い降雨も100 km スケールで再現されている¹¹⁾. またアジアモンスーンも良好に再現されている¹²⁾. そのためGCM20により, さまざまな流域スケールに応じた将来の極端降雨の全球的な把握が期待できる. ただし, その極値の再現性については, 日本域や衛星観測情報を用いて全球で検証されているものの^{13,14)}, 全球で再現可能な極端降雨の時間・空間スケールの評価は未だ不十分である. さらに, 洪水をもたらすような再現期間の長い確率降水量の再現精度を評価するには, 長期間の観測データを用いた検証が必要となる.

そこで本研究では, GCM20によるさまざまな時間スケールの極端降雨の再現性を長期雨量計観測データを用いて検証し, 将来気候で起こりうる, 時間スケールの異なる極端降雨現象の変化とその変化が洪水へ与える影響の評価を行う. 具体的には, GCM20から推定されたさまざまな時間スケール D ($D = 1$ 日以上) の年最大雨量ならびにその100年確率降雨量の再現性を, モデルの出力年数より長い観測年数を保有する全球雨量計観測情報を用いて検証する. そしてアジアモンスーン域を対象として, さまざまな時間スケール D (時間, 日)

の100年確率降雨量の将来変化を解析する。また、年最大D雨量の生起する季節にも着目し、降雨時期の変化ならびにその洪水への影響を検討する。なお、全球で得られる雨量計観測値は日単位のものが多いため、現段階では日以上の時間スケールについてのみ検証を行う。しかしGCM20は時間雨量が出力されていることから、数時間スケールの将来変化についても考察する。今後は衛星観測データの長期化により数時間スケールの極端降雨の検証も可能になることが期待される。

2. データ

(1) 全球気候モデル

GCM20は、気象庁気象研究所によって開発された超高解像度全球気候モデルで、モデルの水平格子は約 20 km である。モデルの詳細はMizuta et al.¹¹⁾に述べられているためここでは省略する。本研究で用いた計算結果は将来気候の計算条件（温暖化ガス排出シナリオ）としてA1Bシナリオを用いたものである。本研究では現気候再現（1979～2003年）、将来予測（2075～2099年）のそれぞれ25年間の時間雨量出力を用いて、例えば1日雨量はその24時間積算値として算出する。

(2) 雨量計観測データ

GCM20の検証に用いた観測データは、GDCN (Global Daily Climatology Network) Ver.1.0 であり、全球32,857ヶ所における雨量計観測の日雨量データである。この各観測点のデータを用い、全球 20 km メッシュの日雨量データを作成した。地点雨量から 20 km メッシュ雨量を算出するに当たっては、メッシュの中心から最も近い3つの観測点の観測雨量を用い、観測点からの距離重み付けをしてメッシュ値とした。ただし、選択する観測点は半径 60 km 以内のものとした。またGDCNのデータ期間は1840～2001 年であるが、観測年は観測点ごとに異なる。ここでは25年以上の観測年数をもつ観測点のみを用い、それらの観測点におけるもっとも新しい25年分のデータを用いた。この20kmメッシュデータを、以後RG20と記す。なお、GDCNのデータセットは、アメリカでは雨量計の観測密度も高くデータの信頼性も高いが、観測情報の精度は国によって大きく異なる¹⁵⁾。そこでここでは、日データに異常値の多く存在した国は、観測精度に問題があると判断し、25年以上のデータがある場合でも検証対象から除いている。

3. 解析方法

(1) 降雨の異常さ

異常降雨がもたらす洪水は、流域スケールと洪水を

もたらす異常降雨のタイプ (括弧内に示す) に応じて、a—Flash Flood (集中豪雨)、b—Short-rain Flood (局地的な豪雨)、c—Long-rain Flood (広範囲な持続的降雨) に分類される。これらの洪水タイプに応じた異常降雨のタイプは主に継続期間と空間スケールに依存する⁹⁾。

本研究では各異常降雨タイプの時間スケールとして、 $D = a-1 \cdot 3 \cdot 6$ 時間、 $b-12$ 時間・ $1 \cdot 3$ 日、 $c-7 \cdot 15$ 日を用い、各時間スケールDでの100年確率降雨量を次節に示す方法で推定する。また、降雨が生起する時期(季節)の算定には年最大D雨量の生起する月を用いる。

(2) 算定方法

100年確率降雨の推定方法は、中北・義本⁷⁾の異常降雨の解析手法に従う。ただし、中北・義本⁷⁾では年最大雨量の従う確率分布の候補に極値分布の種類が少ないということが課題として残されていた。そこで本研究では、まず、幾つかの極値分布の中から最適な確率分布型を選定した。ここで検討した確率分布型は、既往研究⁷⁾で用いられた正規分布、対数正規分布、Gumbel分布、Log-Gumbel分布、指数分布に加えて、GEV分布、PearsonIII型分布、Log-PearsonIII型分布である。上記8つの確率分布型のうち、対数正規分布、Gumbel分布、Log-Gumbel分布、GEV分布、Log-PearsonIII型分布の5つが、多くの地点で最も良い適合度を示した。なお、理論的には年最大値はGEV分布、Gumbel分布に収束するため、これら2つの確率分布がよく用いられることが多いが³⁾、これら2つの確率分布型のみでは適合度が不十分な領域も多く存在する。そのため本研究では上に挙げた上位5つを確率分布型として用いる。

100年確率降水量の算出の手順を次に示す。GCM20の25年の出力から算定した全球の各 20 km メッシュにおける年最大D (時間、日) 雨量を上記の5つの確率分布に当てはめる。確率分布の母数推定には、標本数が25年と少ないことから本研究ではL-積率法¹⁶⁾を用いる。また適合度評価は、中北ら^{7,9)}と同様にSLSC (標準最小二乗規準)¹⁷⁾を用いて行った。なおSLSCが0.05未満の確率分布モデルがないメッシュでは適合する確率分布型はないとした。以上から最も適合度の良い確率分布をそのメッシュでの年最大D雨量の確率分布と推定し、その再現期間が100年に対応する確率降雨量の算定を行った。

4. 雨量計観測情報を用いた検証

(1) 年最大雨量の比較

まず、GCM20で極端降雨が的確に再現可能な時間スケールを調べるため、GCM20の現気候再現出力から算定した年最大D (D=1日以上) 雨量とRG20からの算定値との比較を行う。ただし、2. (2) で述べたようにGDCNデータの観測精度は国によって異なるため、ここでは、観測雨量が十分にあり観測精度も安定している日本と

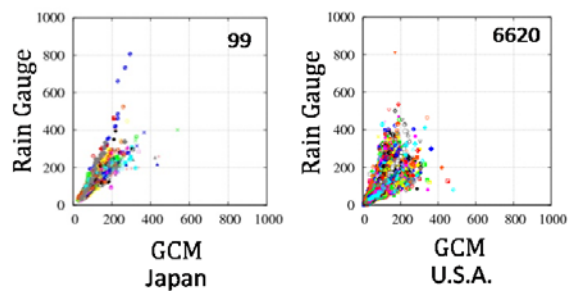


図-1 GCM20の現気候再現と雨量計観測による年最大日雨量
日本(左), アメリカ(右)

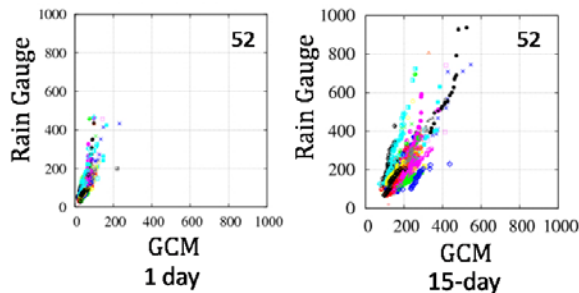


図-2 メコンでのGCM20の現気候再現と雨量計観測による
年最大日雨量(左), 年最大15日雨量(右)

アメリカ (図-1) ならびに、低緯度アジア域の中では観測精度が比較的安定していたメコン域 (図-2の左図) における年最大日雨量 ($D=1$ 日) の結果を示す。図の同じ色の25個の点が同じメッシュの各25年に対応する。図の右上に、各国で雨量計の存在したメッシュの数を示す。日本では、GCM20とRG20の年最大日雨量の相関はかなり良い。またアメリカではばらつきがあるものの、GCM20はRG20と同程度の値を示している。一方、メコンではGCM20がRG20に比べ大きく過小評価している。

全球的な傾向としては、GCM20は中・高緯度ではRG20と良い対応にあるのに対し、低緯度では過小評価する傾向にあった。これは気象擾乱の激しい低緯度の熱帯域では $D=1$ 日スケールの極端降雨現象として100 kmよりも小さいスケールの降雨現象が支配的であり、GCM20の再現可能な空間スケールが100 km程度であることを考えると¹¹⁾、低緯度における極値の再現性が低くなるためと考えられる。すなわち多くのGCM同様³⁾、GCM20でも低緯度ではモデルの精度が低下する傾向にある。

一方、長い時間スケール ($D=15$ 日) では年最大雨量を比較すると低緯度のメコン域でも良い相関が見られた (図-2, 右)。このことからGCM20では $D=15$ 日程度のスケールの極値であれば低緯度においても十分に捉えられていると考えられる。

(2) 100年確率降雨の比較

(1)の結果からGCM20がRG20とよい対応を示した地域について、年最大 D ($D=1, 15$ 日)雨量の確率分布を推定した。GCM20とRG20から推定された年最大日($D=1$

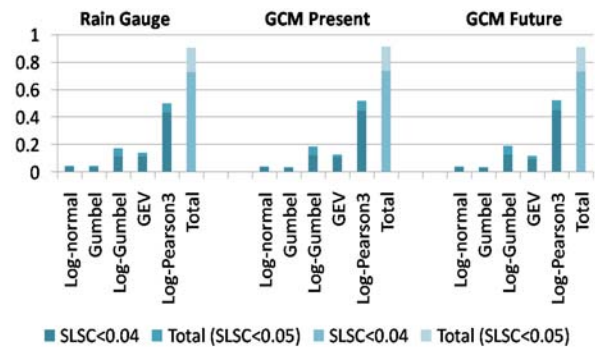


図-3 全球で推定された確率分布の割合(左から雨量計, GCM20-現在, GCM20-将来)

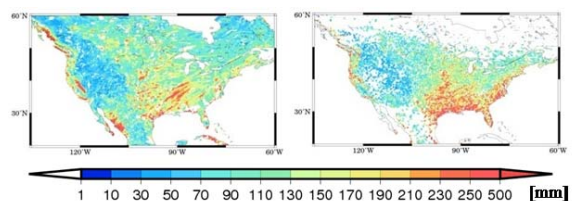


図-4 日雨量の100年確率降雨GCM20(左)と雨量計観測(右)

日) 雨量の確率分布の割合を図-3 に示す。GCM20から推定された確率分布とRG20から推定された各確率分布の割合は、ほぼ同じ割合を示し、このことからGCM20の年最大雨量のサンプルがRG20の年最大雨量とよく似た特徴を示していることがわかる。

また雨量計が広い範囲で均一に存在しているアメリカにおける、 $D=1$ 日雨量の100年確率降雨の結果を図-4に示す。右図の白抜きは雨量計のない範囲である。図-4より、GCM20から得られた100年確率降雨はRG20とよく似た空間分布をしており、一部メキシコ湾岸を除けば、推定値も非常に近いことがわかる。このことから、 $D=1$ 日の年最大雨量の再現性がよい地域では、 $D=1$ 日の時間スケールでの100年確率降雨も良好に再現されていることが伺える。メキシコ湾岸におけるGCM20の過小評価の原因は、ハリケーンの発生数とその経路にあり¹⁸⁾、25年という少ないサンプル数の影響が大きいと考えられる。

以上より、GCM20は、日本やアメリカのような中・高緯度では時間スケールとして $D=1$ (日)の100年確率降雨を良好に再現しているものの、メコン域といった低緯度のアジア域では、日スケールでは極値が十分に表現できていないとはいえず、極値の評価を行うには15日程度の時間積分が必要であることがわかった。ただし低緯度の結果については、今後、より多くの地域で信頼性のあるデータを用いた検証が必要である。

そのため次章では、アジアモンスーン域を対象としてGCM20から推定されたさまざまな時間スケールでの100年確率降雨の将来変化を考察するが、1日以下の短い時間スケールに関しては、将来変化のトレンドのみ

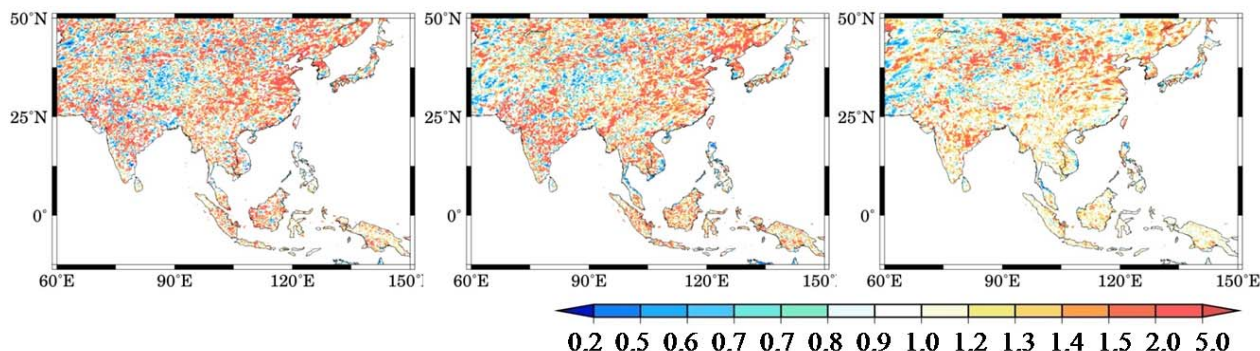


図-5 GCM20から推定した100年確率降雨の将来変化(将来/現在)(左から時間雨量, 日雨量, 15日雨量)

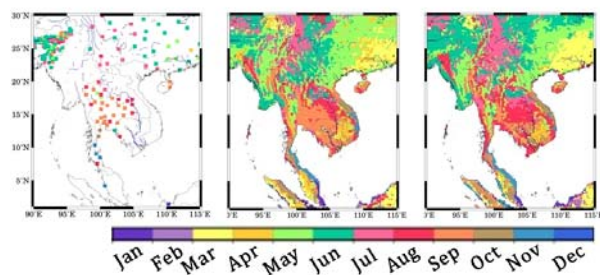


図-6 メコンにおける年最大15日雨量の生起する月
RG20(左), GCM20の現気候再現(中央), 将来予測(右)

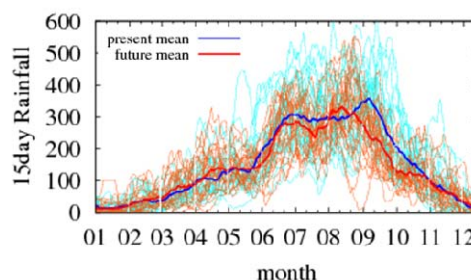


図-7 メコン域における15日雨量の現気候再現(青)と将来予測(赤)の時系列

を考察し, 定量的な評価は行わない. 一方, メコン域で十分な再現性が認められた15日雨量では, 生起する月も含めた定量的な評価を行うこととする.

5. 将来変化

(1) アジアモンスーン域

a. 時間スケールの異なる100年確率降雨

アジアモンスーン域を対象としてさまざまな時間スケールにおける100年確率降雨の将来変化を解析する.

図-5 にGCM20から推定した $D = 1$ 時間, 1 日, 15 日雨量の各100年確率降雨の将来変化(将来/現在)を示す. $D = 1$ 日スケール(図-5, 中央)は, これまで多くの結果で得られているように, 降雨量の多い地域での増加傾向や乾燥域や砂漠地帯における減少傾向が見られる^{3),14)}. また短時間スケールの100年確率降雨が長時間スケールに比べて変化が大きい傾向も, 将来, 極端な降雨現象が増し降雨日が減少するという傾向^{2),3)}や降雨の時間相関が短くなる^{19),20)}というこれまでの見解と一致する.

時間スケールによって将来変化が異なる傾向を示した地域は, $D = 1$ 日スケールで100年確率降雨が減少傾向を示したチベット付近とパキスタン周辺の中東アジアの2地域のみであったが, 少雨域であるこれらの地域では, SNR (Signal-to-Noise Ratio)²¹⁾を用いた検定の結果, 減少傾向についてはどの時間スケールにおいても有意な結果は得られなかった. 一方, $D = 1$ 日スケールで将

来, 100年確率降雨が増加傾向にある地域では, それ以外の時間スケールでも増加傾向を示し, 有意性も全ての時間スケールにおいて認められた. とくにmei-u-baiu前線の強化に伴う降雨量の増加が指摘されている中国東部の長江流域^{12),14)}では, 広範囲にわたる顕著な増加が認められる. すなわち, 時間スケールの違いによる将来変化の地域差はほとんど見られなかった. また, アジア全域での100年確率降雨の将来変化は時間スケールに関わらず約1.03~1.08%の増加にとどまり, 全域での増加割合についても時間スケールによる差はほとんどなかった.

一方で, 時間スケールが短いほど空間スケールも対応して局所的になる傾向が見られる. しかしながら, 1日以下の短い時間スケールでは, 地点間の変動が極めて大きくノイズが目立つことから, 各20 kmメッシュでの将来変化の値には, 降雨スケールに依存した降雨現象のもつ不確実性よりも, 積分時間に依存したモデルの不確実性^{10),21)}の影響が支配的であると考えられる. すなわち, 将来予測には多くの不確実性が含まれるために^{3),22)}, サンプル数の少ない各20 kmメッシュで将来変化を評価することは困難であることがわかる. そのため, 将来変化についてはより広い空間平均値^{3), 22)}を用いた評価が必要であるといえる.

b. 年最大雨量の生起する時期

異常降雨がもたらす洪水への影響を評価する際は,

降雨のスケールだけではなく、生起する時期も重要であることを1.で述べた。そこで極端降雨がもたらされる時期の将来変化についても考察を行う。

$D=15$ 日で年最大 D 雨量が最も多く生起した月を現在気候と将来気候で比較した。図-6 (中央, 右) に、将来変化が顕著であったメコン下流域での結果を示す。図-6 (中央, 右) から、メコン河下流域におけるタイ、カンボジアに属する広い範囲で、現在気候で9月に生起している年最大15日雨量が将来気候では8月にシフトしていることが見て取れる。

また、RG20を用いて同様に算定した結果を図-6の左図に示す。現在気候では主に9月に生起しているという観測結果をGCM20は良く再現していることがわかる。その他の地域もGCM20とRG20の結果とはほぼ合致する。また、モンスーンのオンセットとオフセット²³⁾についても良い再現性が得られていることから (図は省略)、GCM20は15日スケールの極値が生起する時期やモンスーンの時期といった、アジアモンスーン域での降雨のタイミングを良好に再現しているといえる。

そこで将来気候での年最大15日雨量が生起する月の移動を、メコン河下流域の洪水への影響も含めて次節で考察する。

(2) メコン河下流域における降雨時期の変化

メコン河全体の流域面積は79.5万 km^2 ほどで、上流域から最下流端のメコンデルタまでのピークのずれは1ヶ月近くある。すなわち、主に c (広範囲な持続的降雨) タイプの降雨が洪水をもたらす流域である。また、メコン河下流域のトンレサップ湖周辺やメコンデルタでは毎年雨季に洪水が起こり、その氾濫源に住む人々は洪水を前提とした生活を営んでいる。しかしメコンデルタにおいても2000年の事例のように、降雨の時期のずれは大洪水災害をもたらす²⁴⁾。洪水災害のあった2000年の月雨量を平年値と比較すると、この年は平年に比べモンスーンの早期到来とともに月雨量のピークが早まっており、その結果として、貯水池の役割を担うトンレサップ湖が早期に飽和し、洪水が例年よりも早い時期に起こったことがわかっている²⁴⁾。

図-6において、年最大15日雨量の生起する月が将来9月から8月に早まる地点において、現在気候および将来気候での15日雨量を時系列で示した (図-7)。図-7の水色の線がそれぞれ現在気候の各25年、橙色の線がそれぞれ将来気候の各25年の時系列を示し、青色と赤色の太線が現在と将来の25年平均値を示している。この時系列から、現在、7月初めと9月初めにある2つのピークが、将来は半月ほど早くそれぞれ6月と8月の中旬から下旬にかけて起こっていることがわかる。このような将来のパターンは大洪水の起こった2000年のケースによく似ている。またHirabayashi et al.⁸⁾では将来気候ではメコン河の流出のピークが早まることが示されている。

すなわち、15日降雨量のピークの時期の早まりが、将来、メコン河の洪水のピークを早めることに寄与する可能性があると考えられる。

加えて、図-7から明らかなもう一つの特徴は、将来気候では現在気候に比べて15日雨量の振幅が小さいことである。また2回目のピークが早まった分、現在よりも早く9月の降雨量の減少が始まっている。

これらの15日雨量の将来変化をもたらした要因として、この付近に到来する台風の頻度のピークの時期が将来早まっていることがわかった。加えてモンスーンのオフセットも10月から9月に早まる傾向が見られた。

6. 結論

本研究では、GCM20が再現可能な極端降雨の時間スケールをさまざまな地域で検討し、その100年確率降雨の再現性を検証した。また異なる時間スケールでの100年確率降雨の将来変化や将来の年最大雨量が生起する月の変化を考察し、降雨の時期の移動が将来の洪水に及ぼす影響を検討した。

GCM20において再現可能な極値降雨の時間スケールを、GDCNの日雨量データを用いて、 $D=1$ 日以上 の時間スケールについて検証した結果、日本やアメリカといった中・高緯度の国においては $D=1$ 日の時間スケールでの年最大雨量の再現性は良く、100年確率降雨の推定精度も良いことがわかった。一方で、メコン域といったアジアの低緯度域における極値降雨の評価には、 $D=15$ 日程度の時間積分値が必要であることがわかった。しかし特にアジアの低緯度域については、一地域のみでの検証では不十分なため、今後より多くの地域で信頼性の高いデータ²⁰⁾を用いて検証を行う必要がある。

また、さまざまな時間スケールの100年確率降雨の将来変化をアジアモンスーン域で考察したところ、1日スケールでは多くの既往結果^{3,14)}と同様の将来トレンドを示した。また、短時間スケールの100年確率降雨は長時間スケールに比べより大きい将来変化を示したことも、これまでの見解^{2,3,19,20)}と合致する。一方、100年確率降雨の将来変化に時間スケールの違いによる有意な地域差は見られず、顕著な増加傾向を示した地域は全ての時間スケールでほぼ一致した。ただし各20 kmメッシュでの将来変化の値には、降雨スケールに依存した降雨現象のもつ不確実性よりも、積分時間に依存したモデルの不確実性^{10,21)}の影響が支配的であり、サンプル数の少ない各20 kmメッシュで将来変化を評価することは困難であることがわかった。すなわち、将来変化については広い空間平均値^{3,21)}を用いた評価が必要であるといえる。

極値降雨が生起する時期についてはメコン河流域において顕著な将来変化が見られ、将来、年最大15日雨

量の生起する時期が9月から8月に早まる傾向にあった。将来気候での15日雨量の時系列はメコンデルタで大洪水が起きた2000年の時系列とよく似ており、将来気候ではメコン河の流出のピークが早まる結果が報告されていることから⁸⁾、この15日降雨量のピークの時期の早まりが、将来、メコン河下流域の洪水のピークを早めることに寄与する可能性があると考えられる。また、将来気候では現在に比べて15日雨量の振幅が小さく、9月の降雨量は大きく減少する傾向にあった。これらの15日雨量の将来変化をもたらした要因として、この付近に到来する台風の頻度のピークの時期が将来早まっていることがわかった。またモンスーンのオフセットも10月から9月に早まる傾向が見られた。

本研究で得られた結果を検証するために、今後は 60 km アンサンブル出力や他のモデル出力を用いた解析を行う予定である。

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「超高解像度大気モデルによる将来の極端現象の変化予測に関する研究」のもとに実施した。また第一著者は日本学術振興会による特別研究員奨励費の助成を受けている。ここに併せて感謝の意を表する。

参考文献

- 1) Katz, R. W. and B. G. Brown: Extreme Events in a Changing Climate: Variability is more Important than averages, *Climate Change*, **21**, 289-302, 1992.
- 2) Allen, M. R., and W. J. Ingram: Constraints on future changes in climate and the hydrological cycle, *Nature*, **419**, 224-232, 2002.
- 3) Karin, V. V. and F. W. Zwiers: Changes in the Extremes in an Ensemble of Transient Climate Simulations with a Coupled Atmosphere-Ocean GCM, *J. Climate*, **13**, pp.3760-3788, 2000.
- 4) Dairaku, K. and S. Emori: Dynamic and thermodynamic influences on intensified daily rainfall during the Asian summer monsoon under doubled atmospheric CO₂ conditions, *Geophysical Research Letters*, **33**, 2006.
- 5) Hirabayashi, Y., et al.: Global projections of changing risks of floods and droughts in a changing climate, *Hydrological Sciences*, **53**(4), pp.754-772, 2008.
- 6) Kiem, A., et al.: Future hydroclimatology of the Mekong River basin simulated using the high-resolution Japan Meteorological Agency (JMA) AGCM, *Hydrological Processes*, 2008.
- 7) 中北英一・義本欣司：時間・空間スケールを考慮した異常降雨のグローバル解析に関する基礎的研究，土木学会水工学論文集，**50**，pp.607-612，2006.
- 8) Merz, R. and G. Blöschl: Regional flood risk-what are the driving processes, Water Resource Systems-Hydrological Risk, Management and Development, *Proceedings of symposium HS02b held during IUGG2003, IAHS Pub.*, **281**, pp.49-58, 2003.
- 9) Nakakita, E. and D. Hanafusa: A study on global analysis of abnormal rainfall through various spatio-temporal scales and basin characteristics, *Proc. of Int. Conf. on Monitoring, Prediction and Mitigation of Water Related Disasters*, pp.7-12, 2005.
- 10) Fowler, H.J., et al.: Estimating change in extreme European precipitation using a multi-model ensemble, *Journal of Geophysical Research - Atmospheres*, **112**, D18104, 2007.
- 11) Mizuta, R., et al.: 20-km mesh global climate simulations using JMA-GSM model -Mean climate states-, *J. Meteorol. Soc. Japan*, **84**, 165-185, 2006.
- 12) Kitoh, A. and S. Kusunoki: East Asian summer monsoon simulation by a 20-km mesh AGCM, *Clim. Dyn.*, **31**, pp.389-401, 2008.
- 13) Mizuta, R., et al.: Changes in Extreme Indices over Japan Due to Global Warming Projected by a Global 20-km-mesh Atmospheric Model, *SOLA*, **1**, pp.153-156, 2005.
- 14) Kamiguchi et al.: Changes in Precipitation-based Extremes Indices Due to Global Warming Projected by a Global 20-km-mesh Atmospheric Model, *SOLA*, **2**, pp.64-67, 2006.
- 15) Groisman et al.: Trends in Intense Precipitation in the Climate Record, *J. Climate*, **18**, pp.1326-1350, 2005.
- 16) Hosking, J. R. M. and J. R. Wallis: Regional Frequency Analysis, 224p., Cambridge University Press, U.K., 1997.
- 17) 寶 馨・高埴琢馬：水文頻度解析における確率分布モデルの評価基準，土木学会論文集，393/II-9, pp.151-160, 1988.
- 18) 気象研究所，他：高精度・高分解能気候モデルの開発，平成18年度研究成果報告書，2007.
- 19) Konoshima, L. and E. Nakakita: Evaluation of the Changes of Temporal Correlation Length of Rainfall Intensity due to the Global Climate Changes using GCM and TRMM Observations, *Proc. of 4th Conference of the Asia Pacific Association of Hydrology and Water Resources*, 2008.
- 20) Konoshima, L. and E. Nakakita: Changes of Stochastic Parameters of Rainfall between Present and Future Climate in Asian Monsoon Regions Simulated from a Super-high Resolution Global Climate Model, 33rd IAHR Congress Proceedings, 2009.
- 21) von Storch, H., and F. W. Zwiers: Statistical Analysis in Climate Research, Cambridge University Press, 484 pp., 1999.
- 22) Barnett et al.: Quantifying uncertainty in changes in extreme event frequency in response to doubled CO₂ using a large ensemble of GCM simulations, *Clim. Dyn.*, **26**, pp.489-511, 2006.
- 23) 松本淳，他：東南アジアのモンスーン気象学，気象研究ノート，第202号，2002.
- 24) 義本欣司：時間・空間スケールを考慮した異常降雨のグローバル解析，京都大学修士論文，2006.
- 25) Yatagai, A., et al.: A 44-year daily gridded precipitation dataset for Asia based on a dense network of rain gauges, *SOLA*, **5**, 137-140, 2009.

(2009. 9. 30 受付)