

# 150年連続ランによる梅雨期極端降雨の将来変化と 段階的適応に向けた解析

## Analysis on Future Changes of Extreme Rainfall in Baiu Rainy Season for Stepwise Adaptation by Using 150-year Continuous Run

中北英一・原田茉知<sup>(1)</sup>・小坂田ゆかり

Eiichi NAKAKITA, Machi HARADA<sup>(1)</sup> and Yukari OSAKADA

(1) 京都大学大学院工学研究科

(1) Graduate School of Engineering, Kyoto University, Japan

### Synopsis

With the growing importance of taking stepwise adaptation measures to climate change, we conducted a future change analysis of rainfall during the baiu rainy season using 150-year continuous run. We analyzed two aspects about the baiu rainfall: baiu frontal zones based on average daily rainfall in July and baiu extreme rainfall based on hourly rainfall. The results show that the rainfall area gradually moves northward in both the frontal zone and location of the extreme rainfall events. The analysis of future changes in average daily rainfall by region showed that there was a marked tendency for rainfall to increase in northern Japan, but there were also regions that contained periods when rainfall was lower than the historical average. The reasons for this are discussed in terms of the influence of sea surface temperatures and typhoons. Furthermore, we showed that the duration of extreme rainfall events will gradually increase in the future.

**キーワード:** 気候変動, 梅雨, 豪雨, 時間連続, 適応

**Keywords:** Climate Change, Baiu Rainfall, Heavy Rainfall, Time-seamless, Adaptation

## 1. はじめに

### 1.1 研究の背景と目的

近年、梅雨豪雨が頻繁に発生し、甚大な被害をもたらしている。平成30年7月豪雨では主に西日本域において広範囲で長時間の降雨がもたらされ、気象庁<sup>1)</sup>は特定の豪雨事例に関して初めて地球温暖化の影響を示唆した。同年11月には「気候変動適応法」(環境省, 2018)が施行され、治水等の防災事業を気候変動に適応させる動きが加速している。

さて、気候変動に対する適応策は段階的に、地球温暖化の進行スピードとギャップを生まないよう進めることが重要である。まず、地球温暖化は一定の

スピードで進むとは限らず、急激に進行する可能性もあれば、進行が緩和される可能性もある。現に、世紀末の温暖化基準目標が2°C上昇であっても今後将来30年前後で2°C上昇に達する可能性が高いと示されている(IPCC第5次評価報告書)。また、世紀末の温暖化に適応した防災水準に達するための事業には費用や時間が膨大にかかってしまう。逆に、温暖化適応に関する技術革新にも期待できる。このことから、防災計画は21世紀末のみを想定するのではなく、段階的に、かつ世紀末を見据え手戻りのないよう考える必要がある。これを“後悔しない適応”という(中北, 2020)。以上の背景があり、段階的な適応に有用な気候変動予測情報が重要となっている。

こうした状況の中で、これまで梅雨の気候変動研究は多くなされてきた。例えば、Osakada and Nakakita (2018)では、RCP8.5シナリオに基づく5km解像度の領域気候モデルRCM05を用いて、客観的基準と目視により抽出した6～8月の梅雨豪雨の発生場所が、21世紀末将来気候で北海道などこれまで梅雨豪雨が発生しなかった地域へ拡大することを示している。また、小坂田・中北(2018)では、上記と同様の梅雨豪雨事例を用いて強雨継続時間及びその時間当たりの積算雨量が将来気候において増加することが示されている。しかしこのような気候変動予測は、ある特定の期間の現在気候と将来気候を計算したタイムスライス実験を用いて行われており、現在から将来への時間連続的な推移は明らかにされていない。

CMIP3 (Coupled Model Inter-comparison Project) や CMIP5では大気海洋結合モデルを用いて長期間のタイムシームレス計算が行われてきたものの、空間分解能は最も細かいものでも100km程度だった。そこで、台風や梅雨のような極端現象の将来変化を評価するため、海面水温予測を境界条件にして大気のみを計算する空間分解能60kmの全球大気モデルMRI-AGCM3.2H(以下、AGCM60)を用いて、SRES A1Bシナリオに基づき1986年から2099年の期間を計算した時間連続的な出力が作成された。この出力を用いて、Kusunoki et al. (2013)では東アジアにおける降雨について将来変化予測を行い、結果として年間平均日降水量は1970年以降単調増加していることや、強雨指標であるR5d (年最大5日雨量の総雨量)が将来増加傾向であることが示された。また大気場の観点からも考察しており、東アジア全域における地上気温の上昇や日本南海域の時計回り方向及び北緯30度付近の北東向きの水蒸気フラックス量の増加が中国南部などで雨量を増加させていると示した。しかし、この解析は現象別の詳細な解析は行っておらず、梅雨という現象に関するタイムシームレスな将来変化予測は未だ実現されていない。

上記の背景を踏まえ本研究では、20 km解像度の全球大気モデルMRI-AGCM3.2S (以下、AGCM20)でRCP8.5シナリオに基づき時間連続的に計算された最新のデータセット、150年連続ラン(以下、150年ランとも示す)を用いて、梅雨期の降雨がどのような経過をたどり将来変化していくのかについて、時間連続的な将来変化を予測する。すなわち、最新のタイムシームレスなデータセットを用いて梅雨期の降雨に特化し、現在から将来への推移傾向を示すという点で新規性を持つといえる。解析の視点として、7月平均日雨量という指標から優位なものとして読み取れる梅雨前線降雨帯の振る舞いの将来変化という定性的な視点と、時間雨量を用いた梅雨期の極端降

雨の発生場所や雨量の将来変化という定量的な視点の二つから解析を行う。特に、温暖化適応策を考える上で地方ごとにおける将来変化傾向を明らかにすることは非常に重要であるため、梅雨期降雨の空間分布の時間連続的な将来変化を解析し、加えて降雨の継続時間や総雨量といった、より工学的かつ定量的な指標について時間連続的な変化を示す。そして最後に時系列の変化の中でみられた特徴的な変動について、境界条件として与えられている海面水温や、台風除外日数との関連を考察した。

## 1.2 本研究で用いるデータセット

本節では、本研究の解析で用いるデータセットについて、詳しく説明する。本研究では、統合プログラムで作成された最新のデータセットである150年連続ラン(文部科学省, 2020)を用いる。このデータセットの大きな特徴は、タイムシームレスであるという点である。150年連続ラン(以下、150年ランとも記す)はRCPシナリオに基づくAGCM60及び20を用いて、過去気候(1950-2014年)と将来気候(2015-2099年)が連続して計算されたデータセットである。本研究では、梅雨前線による降雨に注目するため、前線帯の降雨を表現できるAGCM20の150年ランを用いる。なお、AGCM60に関しては革新プログラムにおいてSRES A1Bシナリオで対象期間1871-2099年の228年連続実験が行われており、これはKusunoki et al.(2013)で用いられたデータセットである。150年連続ランはこの228年連続実験を拡張した実験である。

実験設定の概要について説明する。150年ランは、第6次結合モデル相互比較プロジェクト(Coupled Model Inter-comparison Project; 以下、CMIP6)のうちの一つであるHighResMIP(高解像度モデル相互比較プロジェクト)の実験としてAGCM60および20の二つの解像度の全球モデルを使用して実験された。境界条件は、過去気候(1950～2014年)においてイギリスのハドレーセンターで作成された観測値であるHadISST2.2 0.25°格子の日別海面水温と海水密接度、将来気候(2015～2099年)においてCMIP5モデル平均のRCP8.5シナリオに対応する昇温量を上乗せした海面水温が使用されている。年々の自然変動成分は、HadISST2から1980～2015年の35年間分の時系列が作成され、2016年以降その時系列が繰り返し与えられている。そして、AGCM20の150年連続ランは過去気候で1アンサンブル、将来気候でRCP8.5シナリオのみ計算されている。すなわち、AGCM20の150年連続ランでは1アンサンブルのみと、統計解析を行うには不十分で、今後アンサンブル数を増やすことが課題となっている。しかし、タイムシームレスで気候変動がシミュレーションされたこのデータセット

は、段階的適応を考える上でたとえ一本の時系列であっても21世紀末へ向かう経過の一つの可能性を示すことができるという点で、非常に重要かつ有意義なものである。

## 2. 梅雨期降雨の定性的な将来変化

### 2.1 解析の流れ

本章では、梅雨期の降雨帯という定性的な将来変化について示す。梅雨期の降雨帯を表す指標として平均日雨量を用いた。梅雨前線帯の平均的な将来変化に着目するため解析期間は全国的に梅雨の影響を受ける7月を対象とした。そして、梅雨前線による日本陸域での降雨に着目するため、台風を除外する操作を行った。その手順は以下の通りである。まず気象庁気象研究所において作成されている台風トラックデータから日本近辺の領域（北緯23～50度、東経122～150度）に台風の中心が入った日を特定して、周辺の数日間を目視により確認し、台風や台風と判定されていない熱帯低気圧の直接降雨域が日本陸域に上陸した日を除外し、7月平均日雨量を求めた。Fig. 1はその除外例を示している。

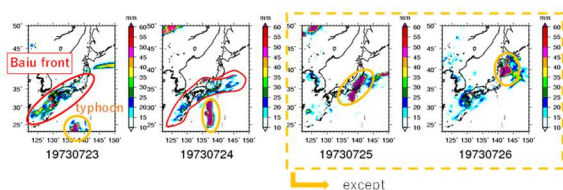


Fig. 1 Example of a day when a typhoon landed in Japan and was excluded.

### 2.2 梅雨前線帯の北上

以上のようにして得られた7月平均日雨量の降雨分布に、推移傾向を掴みやすくする為に前5年、後4年の10年移動平均を施した後、梅雨前線降雨帯の温暖化影響による北方浸潤について調べた。閾値を12 mm/dayと定め、閾値以上の平均日雨量であった日本陸上グリッドの北限緯度の推移を解析した。この閾値に関しては、10 mm/day等の他の値も検討した中で、目視により確認した強雨域で表現される梅雨前線帯の北上の動きとおよそ一致しており、かつ温暖化による北上の推移傾向が最も捉えやすかったため、12 mm/dayの結果を示している。その結果がFig. 2で、時系列の中で代表的な降雨分布Fig.を併せて示している。梅雨前線降雨帯の北方への浸潤の傾向は、2010年代までは見られず、2020年代から変動を含みながら北緯39度を超え始める。そして、2060年代以降は北緯39度から41度間の変動幅が小さくなる。北緯39

度から41度の位置は岩手県から青森県の位置にあたり、東北地方北部まで梅雨前線降雨帯が安定的に北上するといえる。そして、最後の2095年のみ北海道の地点を拾っており、降雨分布からも北海道への雨域の浸潤は確認できた。将来気候で北海道まで梅雨の影響が強まることは、極端降雨の解析結果ではあるがOsakada and Nakakita (2018)でも示されており、そのような年代が世紀末である可能性が初めて示唆されたことはタイムシームレスな解析ならではの点である。ただし、具体的な年としては、高々1アンサンブル数値実験結果の偶然の特徴であり、前後する危険性があると認識しておくことが重要である。

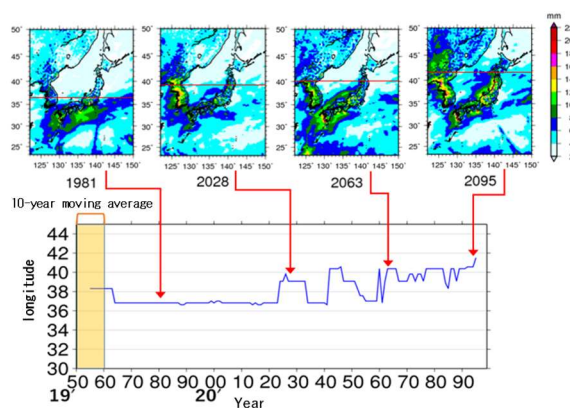


Fig. 2 10-year moving averages of the northern limit of the overland grid where the average daily rainfall in July exceeds 12mm/day. The upper images show representative rainfall distributions, and the pink lines indicate the location of the northern limit latitude.

### 2.3 地方別に見た平均日雨量の将来変化

#### (1) 地方別の平均日雨量の将来変化の結果

前節では梅雨前線降雨帯の北端に注目し、徐々に北進することを示した。では、次に地方別の変化傾向の違いを明らかにするため、9地方(北海道・東北・関東・北陸・東海・近畿・中国・四国・九州)に分け、過去気候からの平均日雨量の偏差を示す。過去平均値を1950-2010年と定めて2011年以降の将来気候について過去気候からの偏差を求める。Fig. 3は2011年以降10年ごと(世紀末のみ2091-2099年の9年)の平均値と過去平均値の偏差の空間分布Fig.である。またFig. 4は地方別の過去平均値からの偏差の10年移動平均の推移である。上が北日本(北海道・東北・北陸・3地方平均)、下がその他の地域(関東、東海、近畿、中国、四国、九州、6地方平均)の推移であり、赤いシェードはそれぞれのグラフの地方平均推移における2010年までの値の1σ区間を示す。

Fig.2から読み取れる大きな傾向として、先に2010年代で東北や北海道で雨量が増加傾向となり、遅れて2060年以降にほかの地方でも雨量が増加傾向を示

している。次に時系列の変化としてFig.3からも北日本では2020年代以降世紀末にかけて1 $\sigma$ 区間を超え雨量が顕著に増加傾向であることが確認できる。一方で、東日本や西日本の地域では、2000~2010年代や2030年代はそれ以前までと比べ、雨量が減少する時期となっていることがわかる。その後2060年以降21世紀末にかけて6地方平均は過去平均よりも増加傾向となった。この結果から、どの地域においてもおよそ2060年代以降は雨量の増加が見られる一方で、2010~2060年代までの変化推移に関してはむしろ過去平均と比較して雨量が減少している地域がある。この雨量の減少に関してはデータセットの境界条件や解析手法の影響について次項で考察する。

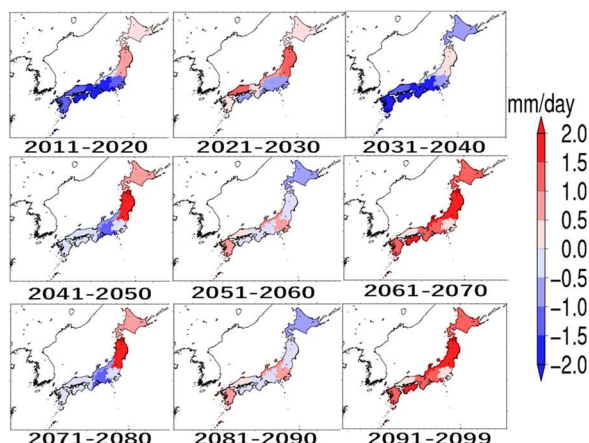


Fig. 3 Decadal deviations from the historical average for each region.

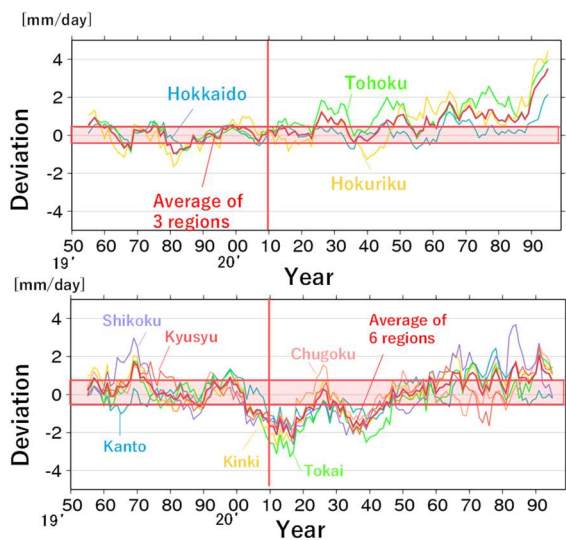


Fig. 4 Deviations from the historical average (1950 - 2010) for the three regions of northern Japan (top) and the six regions of eastern and western Japan (bottom).

## (2) 平均日雨量の将来変化で見られた時空間の変動に関する考察

前項で特徴的だった変動は、Fig.4でみられた東日

本や西日本の地方の雨量が2010年代や2030年代で減少していたことが挙げられる。本項ではこの変動が生まれる原因について、考えられる可能性を考察する。

まず初めに、150年ランの境界条件である海面水温の、年々自然変動成分による影響を考えるために、Fig.7に日本近海(北緯23~50度、東経122~150度)の海面水温の推移を示す。海面水温の年々変動成分は1.2でも述べたように1980年から2015年の年々変動の時系列を2016年以降繰り返し与えており、Fig.5においてもその挙動が見て取れる。しかし、海面水温の推移は温暖化トレンドとしては単調増加であり、Fig.3の東日本や西日本の10年単位程度の変動のような大きな変動はなく、海面水温が雨量の変動に対して影響を与えているとはいえない。

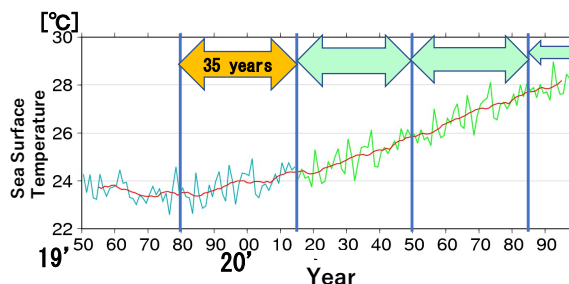


Fig. 5 Sea surface temperatures around Japan (23-50°N, 122-150°E). The blue line indicates past climate, the green line indicates future climate, and the red line indicates the decadal running mean. The arrows indicate the repetition period of the variability component.

次に降雨の変動と台風を除外した影響の関係を考えた。2.1における台風の除外日数を10年移動平均した結果と、Fig.4 (bottom)の平均日雨量の推移の比較をFig.8に示す。ここで台風は2.1に記載の方法で除外していることに注意されたい。Fig.6から、東日本や西日本で降雨量が減少している1980年代や2010年代で、台風の除外日数は多くなっており、台風の除外日数と雨量の推移には負の相関関係がみられ、台風の除外が適切でなく降雨量の減少に影響を与えた可能性がある。そこで、Fig.7に2000年代から2020年代の台風除外後と除外前の平均日雨量の推移を重ね、地域差がみられた一例を示す。九州や四国では、台風除外前後で雨量に差があり、台風を除外した影響が表れた。しかし、近畿では除外前後で差が表れず、台風の除外による影響が明瞭でなかった地方もあり、地方によって影響の出現が異なる様子があるため台風の上陸場所を考慮した解析が今後の課題として挙げられる。一方で、2030年代でも雨量の減少が特徴的であったが、ここでは台風の除外日数は減少している。しかし、気象庁(2020)では、将来気候で台風の発生個数は減少するが強度が増加することが示



唆されているため、台風一個あたりの強度についての解析が必要であると考え。以上のことから、梅雨による降雨量の変動と台風の除外日数に一部で対応がみられ、台風の上陸位置や台風の強度を考慮した解析が今後必要である。

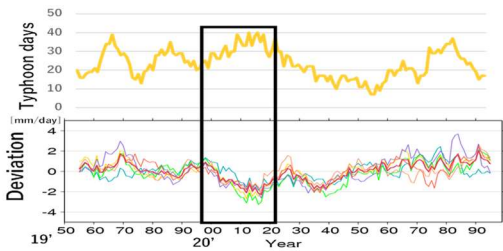


Fig. 6 Comparison of the 10-year moving average of the typhoon exclusion days (top) and the graph in Figure 3 (bottom).

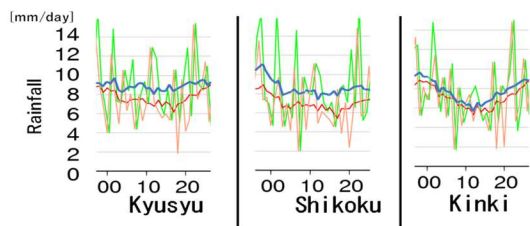


Fig. 7 Comparison of average daily rainfall in July before (blue and green) and after (red) the exclusion of typhoons for the years indicated by the black boxes in Fig. 6 for Kyushu, Shikoku and Kinki.

### 3. 梅雨期降雨をもたらす大気場の将来変化解析

前章では、平均日雨量についての時間連続的な将来変化について述べ、特に東北や北海道などの北日本において顕著に雨量が増加することを示してきた。では次に、このような降雨に関する将来変化をもたらす大気場の将来変化を調べた。ここで大気場指標を、水蒸気輸送を表す指標として水平方向の地表面水蒸気フラックスを用いた。ここで、水蒸気フラックスとは、風ベクトルと比湿の積によって表わされ、水蒸気輸送を示す指標として多くの既往研究でも用いられている。例えば、中北・小坂田(2018)では、21世紀末における将来気候では水蒸気フラックスがより北方まで浸潤するようになることで、高相当温位気塊がより北まで到達し、それに伴って梅雨前線に伴う降雨帯も北上することが示されている。

水蒸気フラックスの空間分布の将来変化を見るため、7月の地表面水蒸気フラックスの前後5年ずつの10年移動平均空間分布を作成した。水蒸気フラク

スを求める際の比湿および風速は2章と同様に150年ランの日平均データを用い、7月梅雨平均日雨量データと同様に2.1で示した手法で台風上陸日の除外を施した上で7月平均値を作成した。

こうして得られた水蒸気フラックスの空間分布を確認したところ、東北地方は日本海側からも水蒸気が供給されるが、日本海側に比べ太平洋側南東の高気圧の上縁からの水蒸気フラックスの方が顕著に強まっていることが確認できた。そのため、梅雨前線帯の北上や北日本における雨量増加に寄与すると考えられる東北地方太平洋側の領域 (Fig.8のシェード部分) を切り取り、経度方向に平均した水蒸気フラックスの緯度方向の分布の時系列推移をFig.4に示す。ただし、本解析ではベクトル成分を考慮できていないものの、空間分布からこの領域で北向きベクトルが卓越していることを確認したため、南方からの水蒸気流入を表しているとして解析を行った。Fig.8から、北日本で降雨増加傾向がみられていた2020年代から2050年代で水蒸気の流入は増加しておらず、降雨の変化傾向とは必ずしも一致していない一方で、2060年代以降から強い水蒸気フラックスの浸潤が顕著になっており、梅雨前線降雨帯が安定して東北北部に達する年代と一致する。すなわち強い水蒸気フラックスの流入が梅雨前線帯の北上に寄与していることが示唆された。

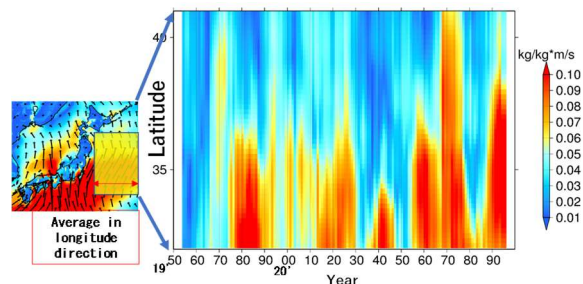


Fig. 8 Time series of latitudinal distribution of water vapor flux strength averaged over longitude in the shaded area.

### 4. 梅雨期極端降雨の定量的な将来変化解析

#### 4.1 解析の流れと台風の扱い

前章では梅雨前線降雨帯としての空間分布的变化について述べてきた。本章では、災害を及ぼす危険性の高い極端降雨の発生場所の変化についての解析を示す。極端降雨の将来変化に関する研究には、既出のOsakada and Nakakita (2018)や小坂田・中北(2018)がある。これらの先行研究を踏まえ、極端降雨の時間連続的な将来変化について解析した。

本解析では、AGCM20の150年連続ランにおいて最も時間解像度の高い、1時間雨量データを用いた。150

年間の1時間毎の出力データという膨大な量のデータであるため、先行研究の客観的抽出基準をなるべく保持した下記の客観基準により全て自動抽出で解析した。まず、解析期間は先行研究と同様に6~8月とした。そして、雨量基準を超える1時間雨量が同じグリッドで2時間以上継続した場合を1イベントとしてグリッド毎に抽出する。ただし、1イベントの継続時間に関しては、3時間以上の継続は1時間のみ間欠を許容して同じイベントとする。そして、台風による影響を除外する操作は2.1とは異なり、以下の通りである。まず、気象庁気象研究所作成の台風トラックデータを用い、抽出されたグリッドが台風の直径500 km以内であれば台風による直接降雨として除外する。これは大型の台風の強風域の直径がおよそ500 km以上1000 km未満であり、台風が刺激した梅雨豪雨を含めるため、最低限の台風の中心から直径500 km以内とした。そして、台風トラックデータと1時間雨量データの日時の対応は簡易的に日にちで対応させた。ただし、用いているデータは20km解像度であり、Osakada and Nakakita (2018)が用いた5km解像度のRCM05に比べ局所的極端降雨は表現されにくい。このような空間解像度による雨量表現の違いを踏まえ、先行研究において用いられた50 mm/hの雨量基準よりも少ない40 mm/hや30 mm/hの雨量基準も用いて極端降雨イベントの抽出を行った。

影響を除外する操作は2.1とは異なり、以下の通りである。まず、気象庁気象研究所作成の台風トラックデータを用い、抽出されたグリッドが台風の直径500 km以内であれば台風による直接降雨として除外する。これは大型の台風の強風域の直径がおよそ500 km以上1000 km未満であり、台風が刺激した梅雨豪雨を含めるため、最低限の台風の中心から直径500 km以内とした。そして、台風トラックデータと1時間雨量データの日時の対応は簡易的に日にちで対応させた。ただし、用いているデータは20km解像度であり、Osakada and Nakakita (2018)が用いた5km解像度のRCM05に比べ局所的極端降雨は表現されにくい。このような空間解像度による雨量表現の違いを踏まえ、先行研究において用いられた50 mm/hの雨量基準よりも少ない40 mm/hや30 mm/hの雨量基準も用いて極端降雨イベントの抽出を行った。

#### 4.2 極端降雨の発生場所の将来変化解析

本節では前節において述べた方法で抽出された極端降雨イベントの発生場所の将来変化について述べる。中北・小坂田(2018)によって50mm/h以上の降雨が2時間以上停滞するという基準で抽出した梅雨豪雨の発生場所が、21世紀末将来気候では北海道などこれまで梅雨豪雨が発生してこなかった地域まで拡大することを示されていた。それでは時間連続的にはどのような将来変化をするのだろうか。

前節において述べた方法で抽出基準を50mm/h, 40mm/h, 30mm/hとして、極端降雨イベントを抽出し、最初に極端降雨イベントが生じた年を色分けしてプロットした結果をそれぞれFig.9, 10, 11に示す。まず、抽出基準を50mm/hとしたFig.9においては、北陸や北海道の一部地域では150年間で一度もイベントが発生しない場所が存在していることや、梅雨前線の影響を大きく受ける九州地方でも2020年以降初めてイベントが発生している地域がある。これは、20kmという空間解像度において50mm/hの閾値は抽出基準として大きすぎたことが一因であると考えられる。しかし、東北や北海道などの北日本ではほとんどの極端降雨イベントが2020年以降から発生し始めており、その中でも北海道や北日本の内陸部、そ

して瀬戸内地方のように、比較的梅雨豪雨災害が発生しにくい地域でも2060年以降になると極端降雨イベントが発生し始めている。これらの点において九州などの他地域と差が表れていることは、非常に重要な傾向であると考えられる。次に抽出基準が40mm/hであるFig.10では、Fig.11よりも日本の南北の差が明瞭に表れた。北陸地方や北日本、瀬戸内では概ね2010年以降からの発生となっているのに対し、それ以外の地域では概ね2000年までに極端降雨イベントが発生している。また、東北よりも北海道のほうで2040年代以降に発生しているイベントの割合が多い。す

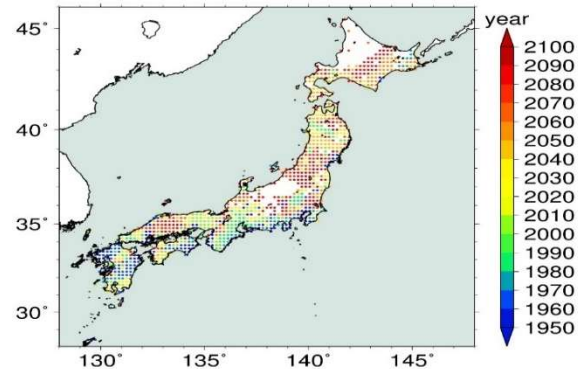


Fig. 9 Future changes in the distribution of rainfall events greater than 50 mm/h. The color indicates the year of first occurrence of the event in the grid.

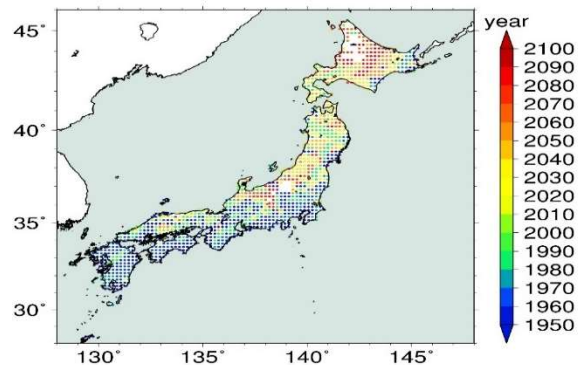


Fig. 10 Same as Fig. 9 except that the rainfall threshold is set to 40 mm/h.

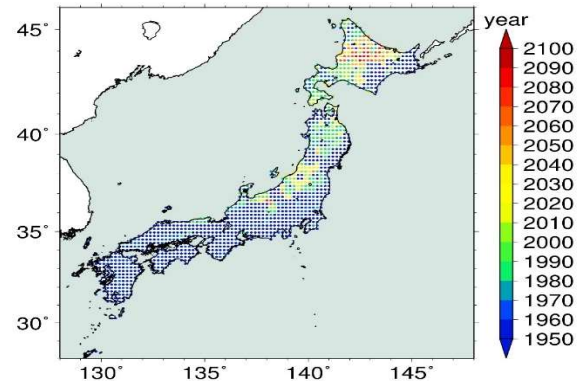


Fig. 11 Same as Fig. 9 except that the rainfall threshold is set to 30 mm/h.

なわち、東北から北海道へ極端降雨イベントの発生場所が徐々に北上していくことが読み取れる。一方で、**Fig.11**より、30mm/hの抽出基準だとほとんどの地方が2000年代までに極端降雨イベントが発生し始めており、地域による極端降雨イベント発生時期の差は見えにくい結果となった。

#### 4.3 極端降雨の継続時間と総雨量の将来変化解析

前節ではある閾値を超える1時間雨量を記録した降雨イベントをグリッド毎に抽出し、発生場所の将来変化について解析を行った。それでは、極端降雨イベントの積算雨量や継続時間はどのように変化するのだろうか。小坂田・中北(2018)では、RCP8.5シナリオのRCM05を用いて、現在と将来のタイムスライス実験の降雨出力から抽出した梅雨豪雨事例の強雨継続時間及びその間の積算雨量の将来変化予測を行っており、強雨継続時間当たりの積算雨量が大きい梅雨豪雨が、世紀末の将来気候において増加することを示している。この先行研究を踏まえ、本節では前節で抽出された極端降雨イベントの継続時間と総雨量についての時間連続的な将来変化解析を行う。

**Fig.12**は50mm/dayの基準で抽出された極端降雨イベントに関して、横軸を継続時間、縦軸に総雨量、色で発生年を表し、2099年から過去に遡る順番で上書きしながらプロットしたものである。そして、**Fig.13**、**14**はそれぞれ雨量の抽出基準値を**Fig.12**から40mm/h、30mm/hとしたものである。ただし、この1イベントはグリッドごとの抽出であるため、現象として同じ豪雨事例によるものが、複数のプロットとなっている可能性があることに注意が必要である。

まず、50mm/hの抽出基準である**Fig.12**の特徴について考察していく。継続時間の長さに関する横方向の広がりでは、継続時間が5時間以上になると2010年以前のイベントの割合が非常に少なくなっており、ほとんどが2010年以降のイベントとなっている。そして積算雨量に関する縦方向の広がりでは、継続時間が2時間から6時間すべてにおいて最も積算雨量の多い年代は2060年代以降の赤色となっている。すなわち、抽出基準50mm/hでは極端降雨イベントの継続時間が2010年ごろからより長くなり、世紀末にかけて積算雨量は増加しているといえる。この結果は本節の最初に述べた小坂田・中北(2018)とも整合的である。しかし、イベント数が少ないことから縦方向の広がりには小さく、時間連続的な変化としては見えにくい。次に40mm/hの抽出基準の**Fig.13**では、**Fig. 12**とほとんど同じ傾向が読み取れることに加え、イベント数が**Fig.12**よりも多く、縦方向の広がりがより大きくなった。すなわち、継続時間当たりの積算雨量

の幅が広がった。特に継続時間6時間や7時間において、徐々に継続時間あたりの積算雨量は増加していることが確認できた。次に、30mm/hの抽出基準の**Fig.14**ではさらにイベント数が増え、年数が増えるにつれて、グラフ上のプロットの分布がより右へより上へと拡大していく傾向が明瞭に見て取れる。すなわち、極端降雨の継続時間・積算雨量ともに徐々に拡大していることがわかる。さらに縦方向の広がりについては、継続時間6時間から8時間におけるイベントの発生年分布がカラーバーの配列と同じような分布となり、将来にかけて継続時間あたりの総雨量も徐々に増加している。

以上のことから、すべての抽出基準において、将来的に降雨継続時間当たりの積算雨量が増えること

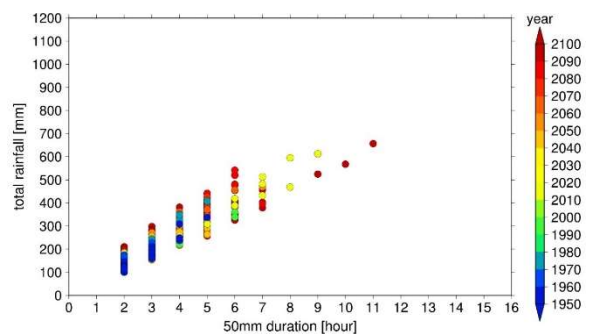


Fig. 12 Relationship between the duration of extreme rainfall events and total rainfall for the 50 mm/day rainfall threshold. The color indicates the year of the event.

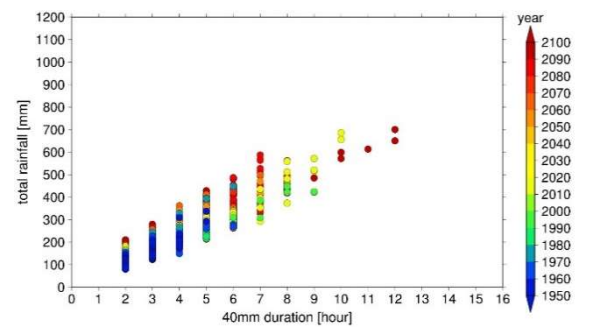


Fig. 13 Same as Fig. 12 except that the rainfall threshold is set to 40 mm/h.

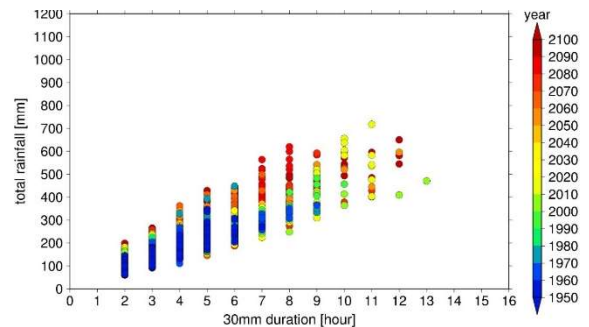


Fig. 14 Same as Fig. 12 except that the rainfall threshold is set to 30 mm/h.

がわかり、先行研究における結果と整合しているといえる。また、2010年ごろから降雨継続時間がより長くなり、降雨継続時間当たりの積算雨量も徐々に増加していることがわかった。

## 5. おわりに

本論文では、梅雨期の降雨について、平均日雨量を指標とした前線帯としての降雨の将来変化と時間雨量を用いた極端降雨の二つの側面から、150年連続ランを用いて時間連続的な将来変化予測を行った。

まず7月平均日雨量を用いた梅雨前線による降雨帯の北上や地方別の雨量変化の解析から、2020年代から梅雨前線帯の北進が始まり、21世紀末には北海道まで到達する可能性が示唆された。現在梅雨による影響が少ない地域における雨量の増加傾向は防災の観点からも非常に重要な結果である。また、東日本や西日本では、計算あるいは解析条件により値が変動する年代もあった。こうした時系列の中でみられた特徴的な変動について、境界条件として与えられている海面水温や、台風除外日数との関連を考察した。海面水温の年々変動成分の繰り返しの関連性はみられなかった一方で、台風の除外による影響がみられる年代や地域があった。今後は台風の上陸場所や、台風の強度を考慮した解析が必要である。さらに、大気場の観点として、2060年代以降東北地方太平洋側領域において、より強い水蒸気フラックスが北方へ流入することを確認し、これが梅雨前線降雨帯の北上に寄与していると考えられる。今後は水蒸気の供給経路について物理的メカニズムを考慮して検討していく。

4章では、時間雨量を用いた極端降雨についての解析による結果を示した。極端降雨の発生場所は、2000年代までに西日本や東日本（関東や東海）で既に発生し、それ以降東北、北海道へと徐々に拡大することを示した。そして、極端降雨の継続時間とその時間当たりの積算雨量について、ともに増加していくことが明らかとなり、先行研究で示された傾向を時間連続的に示すことができた。

最後に、本研究では1アンサンブルのみの解析であったため、自然変動を除去するために移動平均を施して解析を行ったものの、やはり1アンサンブルでは、10年変動のような大きな変動は取り除くことができない。今後、より多くのアンサンブルを用いて平均を取ることができれば自然変動と大きな変動の影響を減らしたより滑らかな温暖化トレンドを得ることが期待できると考えている。

## 謝 辞

本研究は文部科学省統合的気候モデル高度化研究プログラム領域テーマD「統合的ハザード予測」で出力されたデータを利用しました。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 小坂田ゆかり・中北英一（2018）：領域気候モデルによる梅雨豪雨継続時間と積算雨量の将来予測と過去の事例を用いた検証，土木学会論文集B1（水工学），Vol.74, No.5, pp.I\_19-I\_24.
- 環境省（2018）：環境省ホームページ「気候変動への適応」<http://www.env.go.jp/earth/tekiou.html>，閲覧日：2021年6月29日。
- 気象庁（2018）：報道発表資料，「平成30年7月豪雨」及び7月中旬以降の記録的な高温の特徴と要因について，<https://www.jma.go.jp/jma/press1808/10c/h30gouon20180810.pdf>.
- 気象庁（2020）：日本の気候変動2020—大気と陸・海洋に関する観測・予測評価報告書—，<https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ccj/index.html>，閲覧日：2021年6月29日。
- 中北英一（2020）：近年の豪雨災害と気候変動への適応，一般財団法人全国建設研修センター，国づくりと研修vol.144 特集『気候変動により激甚化する水災害への対応』pp.16-19.
- 中北英一・小坂田ゆかり（2018）：気候変動に伴う梅雨期集中豪雨と大気場の将来変化に関するマルチスケール解析，土木学会論文集B1（水工学），Vol.74, No.4, pp.I\_319-I\_144.
- 文部科学省気候変動リスク情報創生プログラム（2020）：令和元年度研究成果報告書。
- Kusunoki, S. and R. Mizuta (2013) : Changes in precipitation intensity over East Asia during the 20th and 21st centuries simulated by a global atmospheric model with a 60 km grid size, JOURNAL OF GEOPHYSICAL RE-SEARCH: ATMOSPHERES, VOL. 118, pp.11,007-11,016, doi:10.1002/jgrd.50877.
- Osakada, Y. and E. Nakakita (2018): Future change of occurrence frequency of Baiu heavy rainfall and its linked atmospheric patterns by multiscale analysis, SOLA, 14, 79-85, doi:10.2151/sola.2018-014.

（論文受理日：2021年8月31日）