

マルチ解像度RCMにおけるゲリラ豪雨の再現特性の解析及び生起頻度の将来変化推定

Analysis of the Reproduction Features of the Guerrilla-heavy Rainfall and Estimation of Future Changes of the Occurrence Frequency in Multi-resolution RCMs

中北英一・森元啓太郎⁽¹⁾・野坂真也⁽²⁾

Eiichi NAKAKITA, Keitaro MORIMOTO⁽¹⁾ and Masaya NOSAKA⁽²⁾

(1) 国土交通省

(2) 気象庁気象研究所

(1) Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism

(2) Meteorological Research Institute, JMA

Synopsis

It has been increasingly important to project the future risk of small-scale torrential rainfall in summer, called ‘Guerrilla-heavy rainfall’ in urban areas in Japan. In this study, we implemented some analysis in August in Kinki Region, from the view point of both the rainfall distribution and the unstable atmospheric condition. First, we picked up Guerrilla-heavy rainfall events with both tracking algorithm and visual judgement of rainfall distribution of NHRCM05 output. Then, we analyzed the atmospheric stability of the events that was picked up, using a parameter SSI (Showalter Stability Index). As a result of T-test, it is implied that the number of days having Guerrilla-heavy rainfall will significantly increase at the end of August, and that this tendency corresponded to the more unstable SSI in the future. In conclusion, the season when Guerrilla-heavy rainfall is likely to occur will be longer in the future summer, with the more unstable SSI at the end of August,

キーワード: ゲリラ豪雨, 気候変動, RCM, SSI, セル追跡アルゴリズム

Keywords: Guerrilla-heavy rainfall, climate change, RCM, SSI, cell-tracking algorithm

1. 序論

1.1 研究の背景

近年、我が国では集中豪雨による災害が後を絶たない。2017年7月には九州北部地方において、梅雨前線に伴う記録的な大雨により河川の氾濫や大量の土砂・流木の流出による甚大な被害が発生した（国土交通省，2017）。豪雨災害の原因となる降水現象は様々な時空間スケールのものが存在するが、我が国の夏期におけるものとしては台風や梅雨期の集中豪雨のほかに「ゲリラ豪雨」が挙げられる。ゲリラ豪

雨とは突如発生・発達する単独の積乱雲によってもたらされる局地的な豪雨をさし、気象庁の予報では局地的大雨という用語が用いられている。ゲリラ豪雨は、水平スケールが数km～十数kmで寿命が1時間程度であり、他の降水現象と比較して時空間スケールが非常に小さいことが特徴である。そのために発生・発達の予測が難しく、人命にかかわる被害をもたらす危険性がある。2008年7月には神戸市都賀川において局地的な豪雨による突然の出水によって約50名が流され、5名の尊い人命が失われるという事故が発生した（土木学会，2009）。こういった悲惨

な災害の原因となってきた背景から、特に 2008 年以降、単独の積乱雲による局地的な豪雨に対して「ゲリラ豪雨」という言葉が一般的に使われるようになった。近年では、こうした被害を未然に防ぐことを目的として、降水レーダ情報や雲レーダ情報を用いたゲリラ豪雨の早期探知・危険性予測に関する研究が行われている（中北ら, 2017a; 中北ら, 2018a）。

また、こういった近年の豪雨災害の頻発化と気候変動の関連性に大きな注目が集まっている。気象庁の気候変動監視レポート2016（気象庁, 2017）では、我が国において最近41年間における短時間強雨発生回数の増加が報告されている。強雨の増加と温暖化の進行との関連性には未解明な部分もあるが、相次ぐ気象・水象災害への対策は待ったなしである。適応策の策定には将来気候に関する詳細な予測情報が不可欠であり、温暖化の影響について不確実性も含め定量的に予測・評価する必要性が高まっている。

温暖化の影響評価研究には一般的に気候予測モデル（以下、気候モデル）の計算結果が用いられる。気象庁気象研究所（以下、気象研）では、20km解像度の高分解能大気気候モデルMRI-AGCM3.2S(Mizuta et al., 2012)（以下、AGCM20）が開発され、台風などメソ α スケール以上の現象の再現が可能となった。さらに、このAGCM20を境界条件として5km解像度でネスティング計算(NHRCM05; Murata et al., 2015)が実施され、梅雨期の集中豪雨のようなメソ β スケールの現象の再現も可能となった。

気象災害に対する温暖化の影響評価研究は世界で行われており、大規模な降水現象に対してはある程度信頼性の高い将来予測結果が示されてきた。台風に関しては、温暖化に伴って熱帯低気圧の発生数が減少する一方で強度の大きな台風の数が増加すること(Sugi et al., 2002 ほか)が示唆されている。梅雨の挙動については、梅雨期集中豪雨の発生頻度が 7 月上旬と 8 月上旬中旬に増加すること（中北ら, 2018b ほか）を示す研究結果が出てきている。

上記のように、温暖化に伴う降水の変化を扱った研究について、日降水量・時間降水量に関するものや、台風や集中豪雨といった大きなスケールの現象に関するものは多く存在する。一方で、ゲリラ豪雨または局地的な豪雨を扱った研究は少ない。その例として、Takemi et al(2012)は総観規模擾乱の影響のない日について20km解像度全球気候モデル出力を用いて、環境場の特徴及び降水量の解析を行った。その結果、温暖化によって大気の成層が安定化する一方で、下層の水蒸気量の増大によって降水量が増加することが示唆された。

ゲリラ豪雨という時空間スケールの小さな降水現象について個々の現象に着目した研究はさらに少な

い。中北ら(2017b)は、NHRCM05の30分降水量出力を用いて8月の近畿地方におけるゲリラ豪雨発生日の将来変化を解析した。降水分布画像の目視によってゲリラ豪雨を抽出し、ゲリラ豪雨発生日の将来変化を解析したところ、8月全体で有意に増加し、旬別では8月下旬に有意に増加するという結果が示された。しかし、中北らの解析にはいくつか課題が残っている。まず、8月以外の月の解析や他地域における解析も必要であるが、目視による方法では大量のデータの解析に長時間を要する。また、強度やライフタイムといった、生起頻度以外の指標の統計的解析が困難である。今後、アンサンブル情報など大量の気候予測データの解析が必要になると予想されるなかで、ゲリラ豪雨に対する影響評価をより客観的かつ効率的に行う手法が求められてくると考えられる。

最近になって気象研では、NHRCM05を境界条件として5kmよりさらに細かい2km解像度でネスティング計算(NHRCM02; Murata et al., 2017)が行われた。NHRCM02の特徴として、対流スキームが非使用であることと、都市キャノピースキームが導入されたことが挙げられる。このNHRCM02では10分降水量が出力されているため、こういった詳細な情報を用いればゲリラ豪雨のような局地的な現象のより厳密な解析も可能だと考えられる。

ゲリラ豪雨による被害を少しでも減らすため、早期探知・予測に関する研究とともに、温暖化に伴う将来予測の必要性が増してきている。温暖化に伴うゲリラ豪雨のリスクの将来変化に関して詳細な情報を提供することが極めて重要である。

1.2 研究の目的

1.1 で述べた背景を踏まえ、本研究では複数の解像度の領域気候モデル出力を用いて、夏期におけるゲリラ豪雨の生起特性の将来変化をより厳密に推定することを主要な目的とする。さらに、その際、気候モデルにおけるゲリラ豪雨の再現特性を明らかにすることも目的とする。それらの目的の達成のために、本研究では次のような流れで解析を行った。

まず、ゲリラ豪雨を含む降水全体について、気候モデルの現在気候実験データの降水強度の再現性を評価する。NHRCM02 においては、都市域と非都市域の違いにも着目する。

次に、領域気候モデルの降水出力の時空間解像度で表現されるゲリラ豪雨の降水分布を把握するために、降水レーダの観測による降水分布情報の平滑化を行う。実際に発生したゲリラ豪雨 35 事例について、平滑化で得られた降水分布における表現の特性を把握し、気候モデル出力の解析で用いるための仮抽出基準を設定する。さらに、事例の解析によって得ら

れたゲリラ豪雨の空間スケールに基づき、各気候モデルにおけるゲリラ豪雨スケールの降水の再現特性を解析する。各気候モデルにおける再現特性を考慮して仮の抽出基準を補正し、気候モデル出力の解析における最終的な抽出基準を決定する。

さいごに、気候モデルの降水出力に対して降水セルの追跡手法を適用することにより、上記の基準を満たす降水イベントを抽出する。本研究では、ゲリラ豪雨が抽出される日の日数「ゲリラ豪雨発生日数」をゲリラ豪雨の主要なリスク指標と考え、期間別にその将来変化を解析する。日数の変化が統計的に有意な期間に対しては、環境場の将来変化の影響の観点から変化の原因を考察する。また、強度といった生起特性の他の指標の将来変化も解析する。

本研究は、複数の気候モデルにおけるゲリラ豪雨の再現特性の解析と生起特性の将来変化推定の双方を試みるものであり、ゲリラ豪雨に対する気候変動の影響評価研究のまさに先駆けとしての位置づけだと言える。

2. ゲリラ豪雨に対する気候変動影響評価研究

2.1 ゲリラ豪雨とは

第1章で述べたように、ゲリラ豪雨とは突如発生・急速に発達する単独の積乱雲によってもたらされる局地的な豪雨をさす。「ゲリラ豪雨」という用語は、気象庁の予報用語では使われておらず、代わりに「局地的大雨」が使用される。「天気予報等で用いる用語」（気象庁）によれば、局地的大雨は『急に強く降り、数十分の短時間に狭い範囲に数十mm程度の雨量をもたらす雨』と定義される。ゲリラ豪雨と似た使い方がなされる他の言葉として、「熱雷」が挙げられ、「夏期、強い日射により局地的に発生する雷」と定義される。関東地方では山地で発生した熱雷が発達して平野部に移動してくる現象がよくみられる。

牛山(2011)によれば、ゲリラ豪雨という単語がマスメディア等で日常的に使われるようになったのは2008年以降である。この2008年にはゲリラ豪雨による重大な事故が2件も発生した。2008年7月28日には、神戸市都賀川では、局地的な豪雨による突然の出水によって約50名が流され、5名の尊い命が奪われるという事故が発生した（土木学会，2009）。また2008年8月5日には、東京都豊島区の下水道工事現場で作業員5名が流されて死亡するという事故も発生した。

上述の通り、ゲリラ豪雨と類似した用語はいくつか存在する。しかし本研究においては、上に挙げたような悲惨な災害をもたらす危険な現象であることを強調するため、早期探知に関する既往研究（中北ら，2018aほか）と同様、ゲリラ豪雨という用語を使

用する。さて、時空間解像度が数100m・1分の降雨レーダ情報を用いて解析されるゲリラ豪雨は、時空間解像度数km・数10分の気候モデルの降雨出力では急速な発生や発達が必ずしも表現されていない可能性はある。したがって、本研究では異なる解像度の気候モデルによって表現されるゲリラ豪雨をモデルごとに推定し、それに基づいて解析を行った。

2.2 使用する気候モデルの概要

2.2.1 20km解像度の全球大気気候モデル

文部科学省は気候変動に関する研究プログラムを主催している。2007～2011年度には21世紀気候変動予測革新プログラム（以下、革新プロ）、2012～2016年度には気候変動リスク情報創生プログラム（以下、創生プロ）、2017年からは統合的気候モデル高度化研究プログラム（以下、統合プロ）がそれぞれ行われている。このうち革新プロにおいては、20km解像度の実験MRI-AGCM3.1(Kitoh et al., 2009)が行われた。つづく創生プロの中で、Mizuta et al. (2012)は高分解能大気大循環モデル(AGCM)による60km解像度の実験(MRI-AGCM3.2H)と20km解像度の実験(MRI-AGCM3.2S)（以下、AGCM20）を実施した。この計算に際しては、CMIP5（第5期結合モデル相互比較計画）の全球大気海洋結合大循環モデル(AOGCM)から予測された海面水温(SST)を底面境界条件としている。20km解像度のAGCM20では、その将来実験ではRCP8.5シナリオのもとで、異なるSST分布に基づいた4種類のアンサンブル実験が実施された。ここでRCP8.5（高位参照シナリオ）は「放射強制力が2100年で 8.5W/m^2 を超え、その後も上昇が続く」というシナリオ（気象庁，2014）をさす。このアンサンブル実験は、CMIP5の結果を用いてクラスタ分析により海面水温の将来変化パターンを3種類に分類(Mizuta et al., 2014)し、それぞれを平均したもの（クラスタ1, 2, 3）とすべてを平均したもの(Ensemble mean)を合わせた4種類の実験をさす。Fig. 1に4種類の海面水温の分布を示す。以下では、クラスタ1～3をc1～c3, Ensemble meanをenと記す。

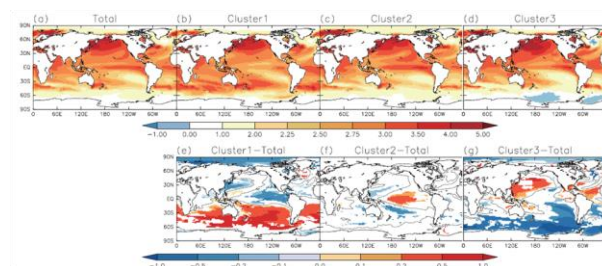


Fig. 1 (Upper) Four kinds of SST patterns for future climate simulation; (Bottom) Difference of SST between the total mean and each cluster (Mizuta et al. 2014)

2.2.2 5km解像度及び2km解像度の領域気候モデル

Sasaki et al. (2008)は、革新プロのMRI-AGCM3.1を境界条件として、非静力学領域気候モデル(NHRCM: Non-Hydrostatic Regional Climate Model)を開発した。さらに、Murata et al. (2015)はこのNHRCMを用いて水平解像度5kmで日本周辺の領域についてアンサンブル計算を実施した(NHRCM05) (以下、RCM5)。この計算の初期条件・側面境界条件には創生プロのAGCM20による4本のアンサンブル出力を使用した4種類のアンサンブル実験が行われた。RCM5ではAGCM20とは異なり、静力学平衡を仮定しておらず、基礎方程式系として完全圧縮非静力学方程式を用いている。計算の対象期間は、20世紀末気候実験(以下、現在気候実験)で1980～1999年、21世紀末気候実験(以下、将来気候実験)で2076～2095年である。

さらにMurata et al. (2017)は、このRCM5を初期条件・境界条件として、Fig. 2の赤枠に示したような日本列島周辺の細長い領域について水平解像度2kmのネスティング計算(NHRCM02) (以下、RCM2)を実施した。計算の対象期間はRCM5と同じである。RCM2では1時間降水量と10分降水量が出力されている。ただし、将来気候の出力について、1時間降水量はc0, c1～c3の4種類が存在するのにに対し、10分降水量はc0の1種類のみである。

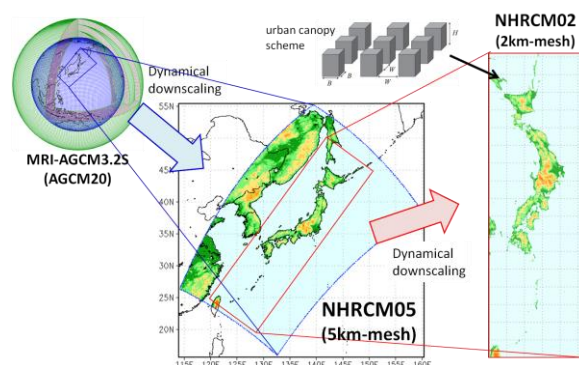


Fig. 2 Diagram of regional climate models developed in MRI-JMA. Shade denotes the model height.

RCM5とRCM2は、解像度の他に大きな違いが2つある。1つ目は積雲対流の扱いである。ゲリラ豪雨などの降水現象は積雲対流の物理過程が非常に重要であるが、これは一般的に気候モデルにおいて積雲対流スキーム(以下、対流スキーム)というパラメタリゼーションによって表現される。RCM5では、個々の積雲を鉛直次元で表現するKain and Fritsch (1993) (以下、KF)スキームが用いられている。一方で、RCM2は対流スキームを使用せずに計算された。このモデルは対流許容モデル(convection-permitting model)としての位置づけであり、対流スキームのパ

ラメータの設定に伴う不確実性を回避できる。2kmという比較的細かい水平解像度になれば積雲をある程度解像できるために対流スキームは不要である、という考えに基づき、計算が行われている。

2つ目は陸面過程の扱いである。気候モデルの下部境界である地表面は、熱や運動量、水蒸気の輸送に深く関わっている。ゲリラ豪雨は地表面付近の上昇流が重要であるといわれ、陸面過程の考慮も重要である。RCM5では全ての陸域についてMRI/JMA-SiB(Hirai et al., 2007)が使用され、予測期間中の積雪変化や土壌中の土壌水の流動等が再現されている。ただし、都市域については「乾燥した裸地」として扱われているが、その都市域としての再現性は十分でない。一方、RCM2においては、都市グリッドについてAoyagi and Seino(2011)の単層角柱都市キャノピースキームSPUC(Square Prism Urban Canopy)が使用されている。都市キャノピーモデルとは都市域の建築物等による複雑な熱収支や放射収支を表現するモデルのことであり、都市のヒートアイランド現象等の再現が期待される。夏季の関東地方を対象としたシミュレーションでは、SPUCの導入により、従来のスキームと比較して都市域の夜間冷却が抑えられ、ヒートアイランドの形成がより明瞭に表現された。上記のまとめとして、Table 1に2つの領域気候モデルの主な仕様について示す。

Table 1 Specification of NHRCM05 and NHRCM02

	NHRCM05 (RCM5)	NHRCM02 (RCM2)
水平解像度	5km	2km
水平格子点数	527×804	525×1721
鉛直層数	50	60
積雲対流スキーム	Kain and Fritsch	スキーム無し
雲物理過程	Lin et al. (1983), Murakami et al. (1994) ¹	
陸面過程	MRI/JMA-SiB	都市: SPUC 非都市: MRI/JMA-SiB
降水出力 (将来気候の出力数)	30分降水量 (4本en, c1, c2 c3)	10分降水量 (1本: en)

2つのモデルで再現される降水分布の違いについて簡単に述べる。局地的な降雨について、RCM5とRCM2による降水強度分布の画像を比較したものをFig. 3に示す。全体として、RCM5では降水が滑らかな表現になっており、積乱雲の組織化がわかりやすい。一方で、RCM2では個々の対流が細かく表現されているものの、組織的な構造が不明瞭なことがある。現象別にみると、台風のような大規模な現象に関してはある程度対応がみられるものの、梅雨前線に伴う集中豪雨や局地的な豪雨に関しては必ずしも対応が見られない。個々の対流現象が発生する位置やタ

イミングは、数値計算の条件設定のわずかな違いによって大きく変化するために、ネスティングの親モデル・子モデル間の対応をみる際には注意を要する。

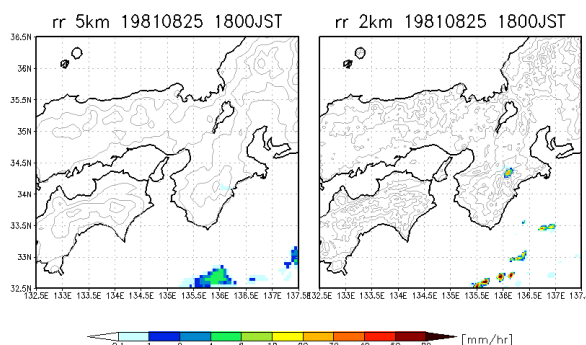


Fig. 3 A snapshot of rainfall distribution reproduced in RCM5 (left) and RCM2 (right). Shade denotes rainfall intensity (mm/h).

2.3 局地的な豪雨に対する気候変動の影響に関する既往研究

第1章でも述べたように、ゲリラ豪雨または局地的な豪雨に対する温暖化の影響評価研究は少ない。本節ではその例を2つ紹介する。

Takemi et al.(2012)は20km解像度全球気候モデル出力を用いて、関東平野を対象に、総観場の影響が弱い日における局地降水の環境場の将来変化を診断した。その結果、温暖化に伴い、気温は全層における上昇し気温の成層は安定化する一方で、下層における水蒸気量が增大するという結果が示された。Takemi et al.は、水蒸気量増大の効果が気温成層安定化の効果を上回れば、安定度指数 (SSIやKI等) としては不安定化し降水強度の増加につながるのではないか、と結論付けている。

中北ら(2017b)は、RCM5の降水出力を用いて、8月の近畿地方周辺におけるゲリラ豪雨の発生日数の将来変化を解析した。ここでは、台風や前線等の降水システムが出現する日 (擾乱日) を客観的に除外したうえで、以下のような4つの基準にもとづき、降水強度分布画像の目視によりゲリラ豪雨を抽出した。このとき、降水レーダ情報を平滑化することによって得られた5kmメッシュ・30分毎のゲリラ豪雨の降水分布を参照した。

- (1) 各時刻の降水セル面積が500km²以内である
 - (2) 降水セルのライフタイムが120分以内である
 - (3) 近畿地方の陸域で発生したものである
 - (4) 他の降水セルとは独立して発生したものである
- 現在気候と4つのアンサンブルの将来気候におけるゲリラ豪雨の発生日数はFig. 4のようになった。将来変化の有意性をT検定の片側検定で評価したところ、8月全体における増加は統計的に有意であることが

示された。また8月を10日間ごとに分けた旬別の変化をみたところ、8月上旬には有意な変化がなかった一方で、8月下旬において5%有意水準で有意な増加が示された。旬別の日数の推移に着目すると、現在気候では8月上旬から下旬にかけて発生日数の減少がみられた一方で、将来気候では減少が緩やかになる傾向がみられた。この結果から、ゲリラ豪雨による災害のリスクが温暖化時には8月の終わりまで長期化する可能性が示唆された。

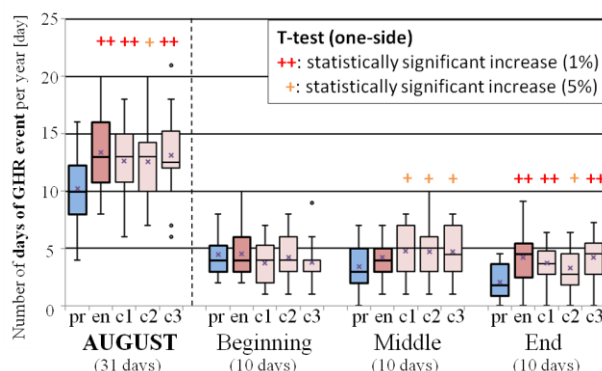


Fig. 4 Whisker plot for the future change of number of days having Guerrilla-heavy rainfall (中北ら, 2017b).

3. 気候モデルにおける降水強度再現性の評価

3.1 XRAINとは

我が国ではアメダス等の様々な観測機器を用いて雨量観測が行われているが、特にゲリラ豪雨のような局地的な現象の監視にはレーダによる面的な観測が不可欠である。国土交通省は2010年より全国の政令指定都市を中心としてXバンドMPレーダ(マルチパラメータレーダ、偏波ドップラーレーダ)の整備をすすめ、執筆現在では全国で39台のレーダが設置されている。このXバンドMPレーダによる観測ネットワークがXRAIN(X-band polarimetric RAdar Information Network; 国土交通省)であり、これにより1分ごと250m×250mメッシュという高い解像度でかつ高い精度の降水分布の情報が得られる。このXRAINを用いた研究によって、ゲリラ豪雨発生のメカニズムに関する解明がさらに進んできている。中北ら(2013)は、「ゲリラ豪雨のタマゴ」の早期探知と自動追跡、危険性予測の3手法を組み合わせたゲリラ豪雨の予報システムを開発した。こうした研究の成果は防災の現場で実用化されてきており、国土交通省では2014年度より近畿地方を対象としてXRAINを用いたゲリラ豪雨の早期探知と危険性予測システムを試験的に運用している(片山ら, 2015)。

3.2 RCM5 と RCM2 の比較

3.2.1 解析手法

本研究では、気候モデルによる降水強度分布データを使用するため、それに先立ってその再現性を評価した。評価の対象は 8 月の降水強度である。使用したデータについて述べると次のようである。気候モデルデータについて、RCM5, RCM2 いずれも現在気候データ 20 年間分を使用した。RCM5 については 30 分降水量, RCM2 については 10 分降水量を使用した。観測値については、XRAIN による 2012~2017 年の 6 年分の 1 分毎の地上合成雨量を使用した。対象領域は近畿地方の Fig. 5 青枠で示すような領域(北緯 34.3~35.2 度, 東経 135.0~136.0 度)である。片山ら(2015)によるゲリラ豪雨の早期探知の領域を参考とした。この理由としては、レーダ観測における降雨減衰の影響を避けるためである。当該領域は京阪神の都市域が集中している地域でもあり、常時 2 台以上のレーダによる高密度な観測が行われている。したがって、たとえあるレーダからの電波が減衰を受けても別の方向に設置されているレーダからの電波は減衰を受けずに観測が可能となっていることが多く、結果として、得られる合成雨量に対する降雨減衰の影響は小さいと考えられる。比較する降水量について、データによって出力の時間間隔は異なるが、それらを一体的に扱うため、各時刻の地上降水量を 1 時間当たりの降水強度(mm/h)に変換した。対象領域内の格子点すべてにおいて欠損値以外の降水強度値を集計し、各降水強度階級の相対頻度を算出した。例えば 20~22mm/h の相対頻度は、20~22mm/h の降水強度値の数を全ての降水強度値の数で割ることで算出した。

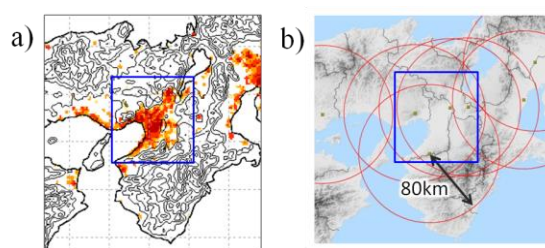


Fig. 5 Target area for evaluating the precipitation intensity (in the blue square). a) The contour and shade denote the model height and the urban grid point respectively. b) Red circles denote the observation area by radar.

なお、同様の解析は Murata et al.(2017b)も行っている。Murata et al.は地形の影響の少ない海洋領域において RCM5 と RCM2 の降水の再現性を評価した。Murata et al.と本研究の違いは、用いるデータの時間

解像度にある。Murata et al.は観測値としてアメダスデータを使用し、すべて時間降水量を評価した。本解析では、本研究で用いる出力の性能を直接評価することを主眼に置くので、時間積算した値などは使用せず、各時間間隔のデータを全て降水強度に換算したものを評価した。

3.2.2 結果

Fig. 6 に降水強度の対数相対頻度分布を示す。RCM5 については観測値と比較して、小さい値に偏っており、過小評価となっていることがわかる。80mm/h 以上の大きい降水強度階級においては、サンプル数の不足から平均値が振動していることが見て取れる。すなわち、5km 解像度の RCM5 では 80mm/h 以上の大きな降水強度を局地的に再現することは難しいことがわかった。一方、RCM2 については、90mm/h 以下の降水強度階級において観測値と近い分布をなしており、RCM5 と比較して再現性が良いことがわかる。この理由としては、モデルの高解像度化に伴う地形性の降水の改善や降水分布の詳細化などが考えられる。しかし、特に 90mm/h 以上の階級になってくると、過大評価であった。今回の結果は観測値にアメダスデータを用いた Murata et al.の解析でも同様である。

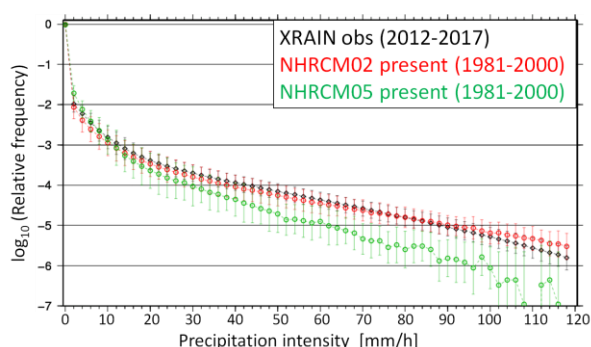


Fig. 6 Relative frequency distribution of precipitation intensity for RCM5, RCM2 and observation. Plot denotes the 20-year mean (the 6-year mean in the case of XRAIN), and the error bar denotes standard deviation of inter-annual variability.

3.2.3 RCM2 における過大な降水に関する考察

今回確認された RCM2 における降水強度の過大評価に関して、文献のレビューを中心に考察する。Murata et al.(2017b)の海洋地域を対象とした研究でも同じ傾向が指摘されており、下降流の表現の不十分さが原因だと結論付けている。

この問題について、気象庁の現業予報モデルの一つである LFM (Local Forecast Model; 気象庁, 2010) の特徴から考察する。LFM は 2km 解像度の

JMA-NHM をベースとしたモデルであり、RCM2 と同様、対流スキームを使用せずに計算されている。LFM では 5km 解像度の MSM(Meso-scale Model)では表現できなかったような局地的な現象の再現性が向上した。しかし、2km という高解像度をもってしても、より小さいスケールの現象は格子平均では表現できない。例えば、小規模な対流で徐々に不安定を解消し局所的な飽和に達して小規模な積雲を生成する、といった過程を表現することは難しい(気象庁, 2015)。したがって、不安定解消のためには格子平均した鉛直流が重要であるが、格子平均という大きなスケールの鉛直流が発生するためには、実際より過度に大きな不安定度が必要になってくる。対流の発生が遅れること、また格子内全体で飽和に達するまで凝結しないために凝結発生のタイミングも遅れることにより、雲や降水発生のタイミングが遅れる。一旦対流が開始すると不安定が一気に解消するため、多量の凝結によって過大な降水が算定される一方、弱い降水は少なくなる。RCM2 においては、LFM と同様の問題が起きていると考えられる。

3.3 都市域と非都市域の比較

3.3.1 RCM2 による都市域の解析

第2章で述べたように RCM2 の陸面過程モデルには都市キャノピースキーム SPUC が適用されている。SPUC の都市に関連する定数はさまざまなものがあるが、ここでは「格子内の建物のカバー率」を使用する。陸域のグリッドのうち、カバー率が 0.2 以上のグリッドを「都市グリッド」、それ以外のグリッドを「非都市グリッド」とし、それぞれ別に扱う。以下、都市グリッドの領域を「都市域」、非都市グリッドの領域を「非都市域」と記す。陸域における降水強度値を、都市域上のものと非都市域上のものに分類して集計し、それぞれの相対頻度を算出した。次に、対象とする時間帯について述べる。都市域においては、日射による建物や道路の加熱などによって特有の熱環境が形成されるため、日中と夜間で状態は異なると考えられる。そこで本解析では、ゲリラ豪雨の発生時間帯を含む、日中の 9~21JST を解析対象の時間帯とした。まず 3.2.2 と同じ近畿地方の領域 (Fig. 5 青枠内) に対して解析を行った。ただし、当該領域における地形に着目すると、都市域では平野が広がっている一方、非都市域では標高がやや高くなっていることに留意する必要がある。当該領域を解析に行った解析の結果を Fig. 7 に示す。頻度分布をみると、予想とは異なり、非都市域と比べ都市域において降水強度がわずかに弱くなった。

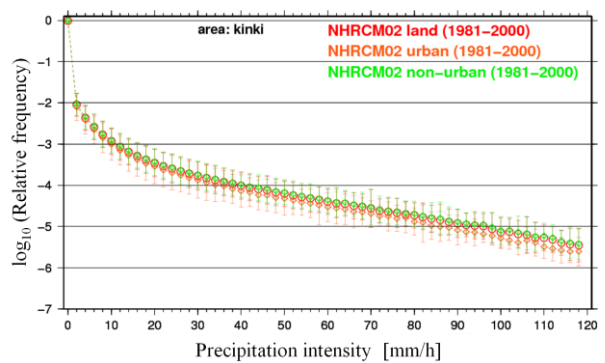


Fig. 7 Comparison of precipitation intensity reproduced in RCM2 for the urban/non-urban area in the blue domain of Fig. 5.

都市域において降水強度が小さくなるという近畿地方でみられた傾向について、その傾向が RCM2 出力において他の都市域でも当てはまるのかについて調べるため、関東地方でも同様の解析を行った。解析領域は Fig. 8 の緑枠で示す領域 (北緯 35.0~36.3 度, 東経 139.2~140.5 度) である。対象時間は同じ 9~21JST とした。この領域では都市域と非都市域で標高差はほとんどないため、都市域と非都市域の違いを純粋に比較できると期待できる。比較結果を Fig. 9 に示す。その結果、関東地方における降水強度の相対頻度は、都市域と非都市域でほとんど差が無いことが分かった。したがって、近畿地方でみられた傾向は、都市域と非都市域の違いによるものではなく、地形の違いを反映したものである可能性がある。すなわち、近畿地方を対象とした解析で得られた都市域と非都市域における降水強度の違いは、有意な違いではなかったと言える。

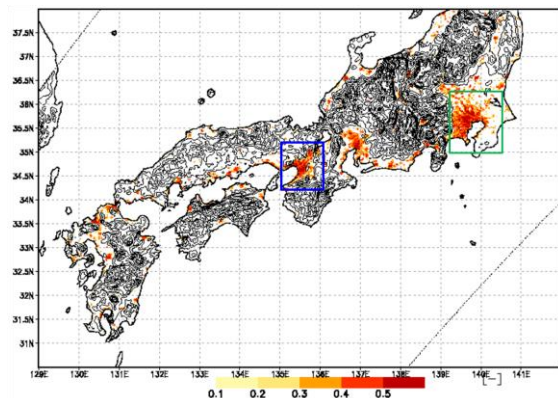


Fig. 8 Model height (contour) and urban grid point (shade, coverage of building) of RCM2. Blue square denotes the analysis area for Kinki Region and the green denotes that for Kanto Region.

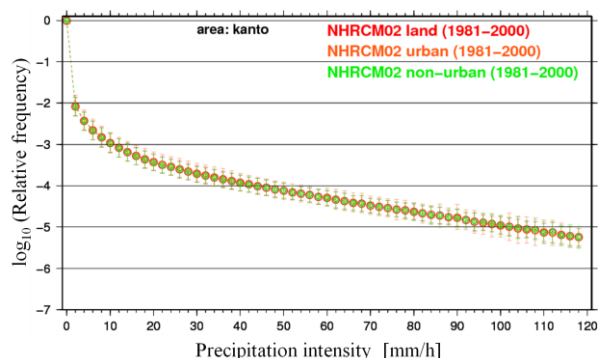


Fig. 9 Comparison of precipitation intensity reproduced in RCM2 for the urban/non-urban area for Kanto Region (in the green domain of Fig. 8)

3.3.2 観測値との比較

都市域・非都市域の比較に関して、観測値との比較を行った。都市域の解析にあたっては都市域の格子点データが必要であるが、本解析ではRCM2の都市格子点データを利用した。IDW (Inverse Distance Weighting: 逆距離加重法) により、2km のグリッドデータから距離 2km 以内にある値を、距離の重み付けによって平均した値を 250m のデータに与えた。

都市グリッドと非都市グリッドの定義は、RCM2, XRAIN とともに 3.3.1 に記したとおりである。都市域・非都市域それぞれについて降水強度の相対頻度を算出し、比較した。その結果を Fig. 10 に示す。観測では、降水強度 90mm/h 以下においては都市域と非都市域の差はほとんどなく、90mm/h 以上では都市域においてわずかに大きい、という結果であり、RCM2 の傾向とは逆であった。その原因として、2 点考えられる。まず、レーダによる観測値に降雨減衰の影響が考えられる。レーダによる観測値が非都市域において小さくなっていることである。解析領域では 2 台以上のレーダで観測が実施されている領域を選択したが、それでも降雨減衰の影響で都市の外側でわずかに弱くなった可能性がある。その結果として、都市域に比べて非都市域における値が相対的に小さくなったと考えている。また、降水強度の頻度といった統計量には都市の効果が現れにくかったのではないかと考えられる。本解析では 8 月の全ての気象状態の日を含んでいるため、大規模擾乱の影響のある日などにおいては都市域と非都市域で差が現れにくいと考えられる。今後は、こうした大規模な擾乱の影響が弱い日や風の弱い日に限定するなど、周囲の環境場の条件を設定して都市域と非都市域の比較を行うことにより、都市の効果をより詳細に調べることができると考えられる。

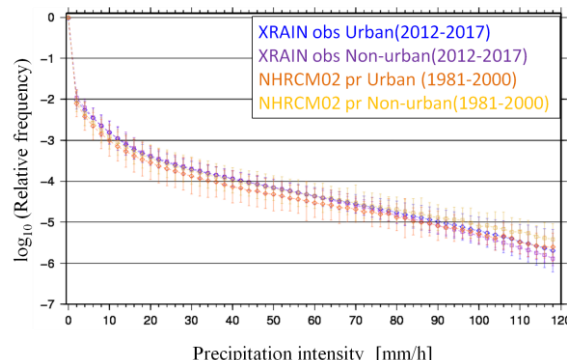


Fig. 10 Comparison of precipitation intensity reproduced in RCM2 and observation by XRAIN for the urban/non-urban area in Kinki Region (blue domain of Fig. 5).

4. 気候モデルにおけるゲリラ豪雨の再現特性の解析と抽出基準の設定

4.1 解析手法

4.1.1 降雨レーダ情報の平滑化

気候モデルで表現されるゲリラ豪雨の降水分布を推定するために、XRAIN (以下、レーダ) による降水強度分布情報の平滑化を行った。すでに述べたように、レーダ情報の時空間解像度は 250m・1 分毎であるために、波長の短い成分も反映し詳細な降水分布が得られる。一方、RCM5 と RCM2 の降水出力はそれぞれ 5km・30 分毎と 2km・10 分毎であるために、観測とモデルで時空間解像度の大きな隔たりが存在しており、空間解像度だけで比較してもそれぞれ 20 倍、8 倍の違いがある。そこで、レーダ観測で得られる降水分布をモデルにおける表現に近付けるために、レーダ情報に対して次の(1)~(3)に示す 3 段階の平滑化操作を施した。例として 5km・30 分への平滑化の流れを以下に示す。以下では気候モデルの水平格子点間隔を Δ と記す。

(1) 時間平均

まず、時間解像度を合わせるために、1 分ごとのレーダの降雨強度分布データを 30 個積算して平均することにより、30 分時間平均値 ($r_1(x, y)$ とする) を算出した。例えば 15:30 における時間平均値を求める場合、15:01 から 15:30 までの 30 個の降雨分布データを積算して平均した。

(2) 空間移動平均

つぎに、(1)で得られた 250m メッシュの時間平均値 $r_1(x, y)$ について空間移動平均を行うことにより、移動平均値 ($r_2(x, y)$ とする) を算出した。この操作の目的は、5km 解像度のモデルで表現されないような波長の短い成分の除去である。ここでの移動平均は次の(2-A)と(2-B)という 2 種類の方法を実施した。

(2-A) 単純移動平均 (Simple Moving Average)

Pielke(1984)によれば、数値モデルで数値計算の4倍以上の波長の現象を再現できる。本研究では、これを空間の広がりとして Δ の4倍スケール以内の大きさの波をフィルタリングすべき、と考えた。平均化領域として、対象メッシュを中心とした直径4 Δ の円領域を考えた。平均化領域内の荷重関数は一定とした。したがって、今回の操作では、あるメッシュaから半径2 Δ 以内にあるメッシュの値を足して単純に平均したものを中心のグリッドaの移動平均値として与えた。なお、この方法は中北ら(2017b)の平滑化手法と同じものである。

(2-B) ローパスフィルタ(Low-pass Filter)を用いた加重移動平均

中北(1990)の地形データの平滑化にならい、ローパスフィルタ(Doswell, 1977)を用いた移動平均を行った。荷重関数として、次の式4.1に示すような距離に従う指数関数型の関数を用いた。

$$\bar{r}_{mn} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N w_{ij} r_{ij}}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N w_{ij}}, \quad w_{ij} = \exp\left(-\frac{x_{ij}^2}{4\alpha}\right) \quad (4.1)$$

ここで、 r_{mn} は平滑化後の降水強度の値、 r_{ij} はグリッド(i,j)における降水強度値、 w_{ij} はグリッド(i,j)における重み、 x_{ij} は対象グリッドとグリッド(i,j)との距離、 α はパラメータである。

(3) 領域平均

さいごに、水平解像度を合わせるために、(2)で得られた250mメッシュの移動平均値 $r_2(x, y)$ を領域平均し、気候モデルの格子点間隔に変換した。5kmメッシュの場合、20グリッド×20グリッドの移動平均値 $r_2(x, y)$ を平均して1グリッドの5kmメッシュ領域平均値とした。この領域平均値の分布が、今回目標とするゲリラ豪雨の平滑化された降水分布となる。

5km・30分毎に変換する場合の平滑化操作のフローチャートをFig. 11に示す。以下では、(1)→(2-A)→(3)のように単純移動平均を用いた平滑化で得られた降水分布データをSMA、(1)→(2-B)→(3)のようにローパスフィルタを用いた平滑化で得られた降水分布データをLPFと記す。また、比較のため、上記の(2)の移動平均の操作を行わず、時間平均と領域平均のみによって得られた降水分布、すなわち(1)→(3)の操作を経たもの(以下、noMA)も作成した。元のレーダ降水分布と平滑化の結果得られた降水分布の例(2012年8月21日)をFig. 12に示す。降水分布をみると、noMAでは降水強度の勾配が極端に急であるのに対し、LPFでは比較的自然的な分布をなしていることがわかる。一方、SMAではやや広がりすぎて

いるように思われる。ここで、平滑化操作の流れにおいて(2-B)と(3)を逆に行う手法、すなわち5km解像度に領域平均した後に移動平均する手法も考えられるが、それは本研究の手法とは意味合いが異なってくる。なぜなら、本研究の手法では幅広い波長の波に対して準連続的にローパスフィルタを施すことができるのに対し、(2-B)と(3)を逆にした操作では5km解像度にした際に細かい成分を5kmメッシュの中に入れてしまい、その後にローパスフィルタを施しても Δ の整数倍の波長の波に対してのみの離散的なフィルタリングになってしまい、波長の細かい他の成分の除去を十分に行うことが困難であるからである。したがって、本研究で用いた操作の順序の方が本来の平滑化の目的に即しており妥当だと考えられる。

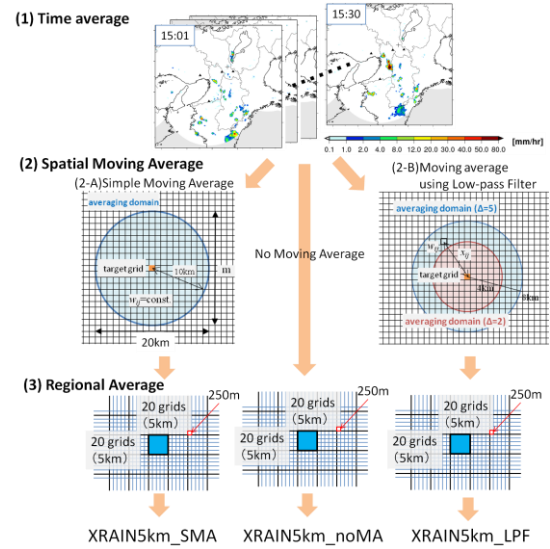


Fig. 11 Flow chart of smoothing method for converting from resolution of 250m/1min to that of 5km/30min.

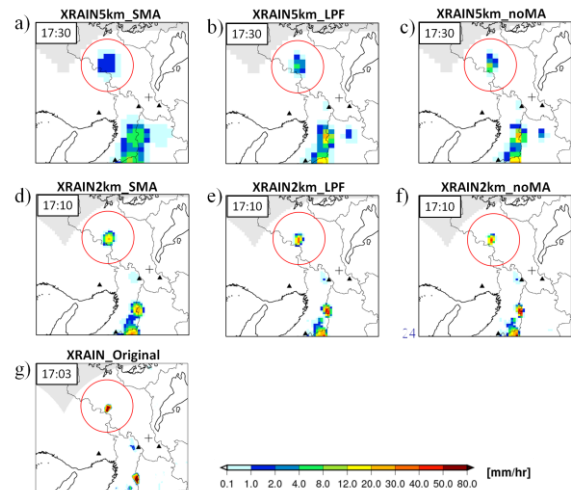


Fig. 12 Comparison of the original rainfall distribution (top, left) and ones that are smoothed (21st August 2012). The red circle shows that the cells are extracted as a Guerrilla-heavy rainfall.

4.1.2 降水セルの追跡手法と用いる 4 指標

降水セルを客観性の高い方法で抽出するため、セルの抽出・追跡アルゴリズムを適用した。本研究では増田・中北ら(2014)の方法を参考とした。増田らは、降水セルの各ステージにおける特徴を調べるために、X バンド MP レーダのデータに対して 2 次元のセル追跡アルゴリズムを適用した。セルの追跡には次の式 4.2 が示すような類似度 C_{ij} が用いられており、類似度 C_{ij} が最も小さいものを同一のセルとして識別し追跡を行う。

$$C_{ij} = w_1 D_{ij} + w_2 A_{ij}$$

$$D_{ij} = \sqrt{(\bar{x}_i - \bar{x}_j)^2 + (\bar{y}_i - \bar{y}_j)^2} \quad (4.2)$$

$$A_{ij} = \sqrt{|S_i - S_j|}$$

ここで C_{ij} は現時刻 t におけるセル j と前時刻 $t - \delta t$ におけるセル j の類似度を表す。 D_{ij} は現時刻と前時刻のセルの重心位置間の距離、 A_{ij} は現時刻と前時刻のセルの面積差を表す。また w_1 、 w_2 は重みであり、増田らと同様、 $w_1 = w_2 = 0.5$ とした。なお、降水セルの重心 $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$ は各メッシュの降水強度によって重み付けを行い、次の式 4.3 のように算出する。

$$\bar{x} = \frac{\sum_{k=1}^n x_k R_k}{\sum_{k=1}^n R_k}, \quad \bar{y} = \frac{\sum_{k=1}^n y_k R_k}{\sum_{k=1}^n R_k} \quad (4.3)$$

ここで、 n は降水セル内のメッシュの数、 x_k はメッシュ k の x 座標、 R_k はメッシュ k の降水強度値を表す。

本研究で扱う降水セルの定義について述べる。250m メッシュのデータを用いた増田らの研究では、「降水強度 5.0mm/h 以上の連続したメッシュで面積が 2km² 以上の領域」をセルと定義されている。しかし本研究の場合、用いるデータが 5km または 2km という粗い解像度であるため、単独の積乱雲が 1 つのメッシュで表現されることもあると考えられる。また、強度に関して、数 km 解像度の粗い気候モデルにおいては、局所的な現象の強度はレーダの観測値と比べて十分ではなく、5.0mm/h 以上という閾値は高すぎると考えられる。そこで、本研究では、「降水強度の格子点データにおいて 1.0mm/h 以上を示すメッシュの閉空間」と定義し、1 メッシュのみであってもセルとして扱うこととした。

さて、ここでゲリラ豪雨抽出に用いる指標について述べる。第 2 章で述べたように、ゲリラ豪雨とは「突如発生・発達する単独の積乱雲によってもたらされる局地的な豪雨」である。したがって、ゲリラ豪雨の特徴は、時空間スケールの小さいこと、そして急発達して高い降水強度に達することだといえる。

そこで本研究では、ゲリラ豪雨の指標として次の 4 つを使用した。

(1) セル内最大降水強度のピーク値 $R_{cellmax}$ [mm/h]

定義は、「各時刻の降水セル内における降水強度の最大値のうちの、ライフタイム中におけるピーク値」である。最大値を指標としたのは防災上の観点からである。

(2) 各時刻の降水セル面積 [km²]

降水セル内のメッシュ数に 1 メッシュ当たりの面積を掛けることにより算出される。ゲリラ豪雨の空間スケールを考慮し、上限値を設定する。ライフタイムの期間中に上限値を超えるものは抽出の対象から除外する。

(3) ピークに達するまでの時間 (Time-to-peak: T_{up}) [min]

定義は、「追跡開始時刻から降水強度のピークに達するまでの時間」である。降水セルの発達の速度を考慮する。ここで、追跡開始時刻とは、1.0mm/h 以上の降水強度が初めて検知された時刻をさす。例えば、追跡開始時点がピークであった場合は、 T_{up} は 0 分と算出される。

(4) ライフタイム [min]

定義は「追跡開始から追跡終了までの時間」である。ゲリラ豪雨の時間スケールを考慮する。例えば、30 分毎のデータにおいて、ある降水セルが 1 タイムステップでのみ確認された場合、そのライフタイムは 30 分と算出される。

4.2 ゲリラ豪雨事例の解析

4.2.1 ゲリラ豪雨事例の抽出

2012～2015 年 8 月の XRAIN による降水強度分布情報から、近畿地方で発生したゲリラ豪雨事例を抽出した。ここでの抽出基準は「降雨開始（降水強度 1.0mm/h 以上）から 30 分以内に 50mm/h 以上に達する単独の積乱雲による局地的な豪雨」とした。

抽出の流れを簡単に述べる。まず、1 分毎のレーダ降雨強度情報に対して追跡手法の適用した。4.1.2 の指標の設定は、 $R_{cellmax}$ を 50.0mm/h 以上、 T_{up} を 30 分以内とした。つづいて、抽出された降水セルのうち単独の積乱雲によるものを、降水分布画像の目視により抽出した。このような流れで条件を満たす事例を抽出したところ、35 事例が抽出された。

4.2.2 事例に対する解析と仮抽出基準の設定

4.2.1 で抽出されたゲリラ豪雨 35 事例にそれぞれについて、元のレーダ降水分布ならびに平滑化で得られた 5km 解像度の XRAIN5km_LPF と 2km 解像度の XRAIN2km_LPF における表現の特性を解析した。

各指標のうち2つの統計的な特徴を以下に述べる。

(1) セル内最大降水強度ピーク値

ヒストグラムを Fig. 13 に示す。XRAIN5km_LPF では、算定される降水強度は 4mm/h 以下であった。一方 XRAIN2km_LPF では、12～16mm/h をピークとした分布であり、最大で約 48mm/h であった。

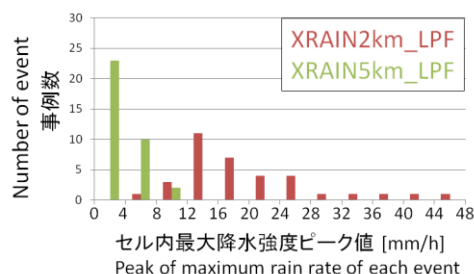


Fig. 13 Histogram of ‘Peak of maximum rain rate’ of 35 Guerrilla-heavy rainfall events.

(2) ピーク時の降水セル面積

ヒストグラムを Fig. 14 示す。XRAIN5km_LPF では幅広い値をとるものの、最大で 175km² であった。XRAIN2km_LPF では 25～50km² をピークとして、最大で 100km² であった。この分布から、ゲリラ豪雨の空間スケールは 5km で 200km² 以内、2km 解像度で 100km² 以内に表現されると推定した。

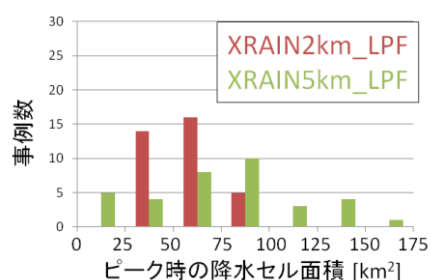


Fig. 14 Histogram of ‘Rain cell area on peak time’ of 35 Guerrilla-heavy rainfall events.

以上の解析から、気候モデルの解析における仮抽出基準を設定する。仮抽出基準を Table 2 に示す。ただし、レーダから推定したこの値をそのまま気候モデルの降水出力に適用することはできないため、次節で述べるモデルの再現特性の解析に基づいて、この仮基準の補正を行う。

Table 2 Temporary criteria for extracting Guerrilla-heavy rainfall which estimated by XRAIN_LPF

	XRAIN 5km_LPF	XRAIN 2km_LPF
セル内最大降水強度ピーク値	1.51 mm/h 以上	10.65 mm/h 以上
降水セル面積	200 km ² 以下	100 km ² 以下
ピークに達するまでの時間	30 分以下	50 分以下
ライフタイム	90 分以下	90 分以下

4.3 領域気候モデルにおけるゲリラ豪雨規模降水の再現特性

4.3.1 ゲリラ豪雨規模降水

上記の基準を用いてゲリラ豪雨の抽出基準を設定したい。しかし、気候モデルにはバイアスが存在するため、XRAIN から推定した値をそのまま気候モデル出力に適用することはできない。そこで、モデルと XRAIN の再現特性を比較し、上記の仮基準を再考する。4.2.4 の解析により、5km 解像度及び 2km 解像度で表現されるゲリラ豪雨の空間スケールは把握できた。したがって、このセル面積については仮基準の値をそのまま使用し、降水セルの抽出を行った。この空間スケールの降水を「ゲリラ豪雨規模降水」と記す。他の指標についてはゆるやかに設定した。ゲリラ豪雨規模降水の抽出基準を Table 3 に示す。

Table 3 Criteria for extracting the ‘Guerrilla-heavy-rainfall-scale events’ for analyzing reproducing characteristics

	5km 解像度	2km 解像度
セル内最大降水強度ピーク値	1.0 mm/h 以上	6.0 mm/h 以上
降水セル面積	200 km ² 以下	100 km ² 以下
ピークに達するまでの時間	120 分以下	120 分以下
ライフタイム	120 分以下	120 分以下

4.3.2 各指標の解析

RCM と XRAIN の 3 種類の降水分布(SMA, LPF, noMA)の計 4 種類の分布について、ゲリラ豪雨規模降水の抽出を行い、4 つの指標によって特性を解析した。4 指標に関する統計的な特徴を以下に述べる。

(1) ピーク時の降水セル面積

本解析では空間スケールを決めて、抽出を行った。しかし、仮に閾値の周辺において高い頻度を示した場合、閾値の取り方によって抽出される降水セルの数が敏感に変化してしまう可能性がある。そこで

まず、面積の頻度分布を確認した。頻度分布を Fig. 15 に示す。閾値付近に着目すると 5km 解像度の場合と 2km 解像度の場合のいずれも、SMA を除いて、閾値付近の頻度は相対的に小さいことがわかる。このことから、空間スケールの設定は適切であったといえる。ただし、SMA では他の分布と比較して小さい値におけるピークはみられなかった

5km 解像度の分布について述べると、XRAIN5km_SMA を除いた 3 つの頻度分布は似た形をしている。RCM5 で最も小さく、つづいて XRAIN5km_noMA, XRAIN5km_SMA の順で小さい。次に、2km 解像度の分布について述べると、5km 解像度の場合と同様、XRAIN2km_SMA を除いた 3 つの分布は似た形をしている。RCM2 が最も小さく、ピーク値がずれる形で、XRAIN2km_noMA, XRAIN2km_LPF の順に小さくなっている。

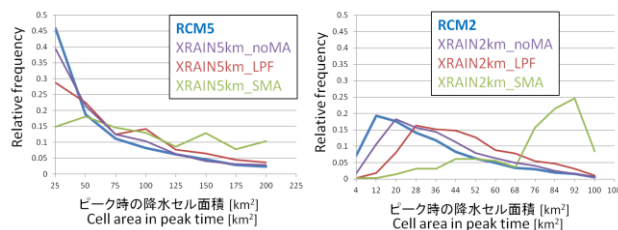


Fig. 15 Relative frequency distribution of 'Rain cell area in peak time' in 5km-mesh (left) and 2km-mesh (right).

(2) セル内最大降水強度のピーク値

頻度分布を Fig. 16 に示す。5km 解像度について比較すると、RCM5 ではかなり小さい強度を示すことがわかる。RCM5 の強度は、XRAIN5km_LPF と XRAIN5km_SMA の間である。XRAIN5km_LPF では XRAIN5km_noMA より RCM5 に近いことがわかる。つぎに 2km 解像度について比較すると、5km 解像度の場合とは傾向が大きく異なっていた。RCM2 は XRAIN2km_LPF よりもかなり大きな強度を示した。RCM2 は XRAIN2km_noMA よりも大きくなっていることから、時空間解像度から考えられるよりもはるかに大きな降水強度を算出することがわかる。XRAIN2km_SMA では過小であることが分かった。

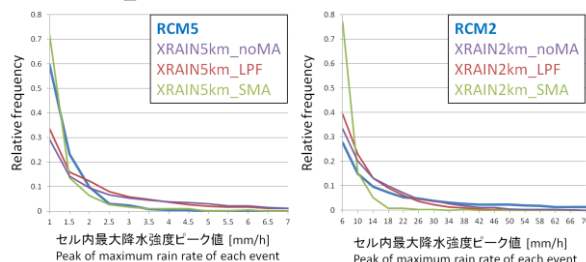


Fig. 16 Relative frequency distribution of 'Peak of maximum rain rate' in 5km-mesh (left) and 2km-mesh (right).

(3) ピークまでの時間

頻度分布を Fig. 17 に示す。5km 解像度の分布について比較すると、どの分布も似た傾向を示した。0 分をピークとして値が大きくなるにつれて頻度は小さくなった。抽出された降水イベントのうち大部分が 60 分以内の値を示しており、90 分以上となるものは非常に少ないことがわかる。2km 解像度の分布について比較すると 5km 解像度の場合とは傾向が異なっていた。XRAIN2km の 3 つの分布では 20 分をピークとした分布になっているのに対し、RCM2 では広い値に分布していることがわかる。特に 30 分以上の値では RCM2 の頻度が XRAIN2km に比べて大きくなっており、ピークまでの時間が長いものが多いことが分かった。

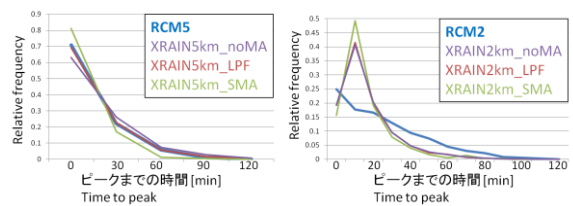


Fig. 17 Relative frequency distribution of 'time-to-peak' in 5km-mesh (left) and 2km-mesh (right).

(4) ライフタイム

頻度分布を Fig. 18 に示す。5km 解像度の分布について比較すると、どの分布も似た傾向を示した。30 分をピークとして、値が高くなるほど頻度は小さくなった。大部分は 90 分以内であり、120 分となるものは少ないことがわかる。RCM5 の分布は LPF とよく似た分布であった。一方 2km 解像度の分布について比較すると、5km 解像度の場合とは傾向が異なっていた。XRAIN2km による 3 つの分布では 20~30 分をピークとした分布であったのに対し、RCM2 では広い値の範囲に分布している。60 分以上では RCM2 の相対頻度が XRAIN2km と比較して過大となっており、ライフタイムの長い降水イベントの割合が多いことが分かった。

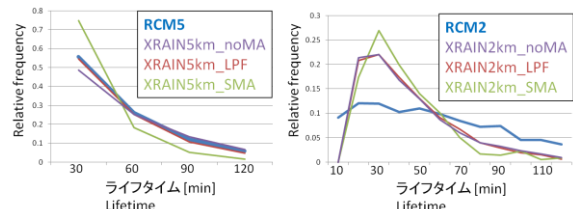


Fig. 18 Relative frequency distribution of 'lifetime' in 5km-mesh (left) and 2km-mesh (right).

以上の解析結果から、RCM におけるゲリラ豪雨規模降水の再現特性を、ローパスフィルタによって作成した LPF との比較によりまとめる。RCM5 では、

降水セル面積がやや小さく、強度は小さいものが非常に多かった。またピークまでの時間とライフタイムは XRAIN5km_LPF と同じ程度であった。一方 RCM2 では、降水セル面積が小さく、強度は高いものが多く、解像度に比較してシャープな降水が算出されていることが確認された。またピークまでの時間とライフタイムは XRAIN2km_LPF と比べて長くなる傾向が確認された。

この原因について考察する。面積以外の 3 つの指標については、解像度の違いの効果のほかに対流スキームの違いによる効果に関係していると考えられる。強度やライフタイムが推定と行っていたのは、同じ要因が原因だと考えられる。すなわち、RCM2 で過大な降水が算定される場合、ピークで到達する降水強度が大きい分、ピークに達するまでに時間を要するためだと考えられる。

本研究ではモデルの出力のみによって再現特性を解析したが、出力だけでは解析の結果を検証することが困難である。より詳細な再現特性の解明には、モデルを用いた計算を行う必要があるだろう。

4.3.3 抽出基準の決定

ゲリラ豪雨事例から推定した仮基準に対して、再現特性を考慮して補正することにより、気候モデル解析で用いる閾値を求める。まず、面積については再現特性の解析で設定が適切であったことがわかったため、引き続き同じ値を用いることとした。ライフタイムと T_{up} に関して、RCM5 は、4.3.2 で得られた傾向から、同じ基準を使用した。一方 2km 分布では 4.3.2 で得られた傾向をもとに、LPF による仮基準値よりも長い値を設定した。すなわち、ライフタイムを 120 分以内、 T_{up} を 60 分以内とした。

一方、強度に関しては、異なる分布における同じパーセンタイル値を用いることによって補正した。すなわち、仮基準の強度の値が LPF の強度に関する頻度分布において xx パーセンタイルであった場合、今度は RCM の強度の分布において xx パーセンタイル値を求め、それを補正後の基準値とする。この方法で補正した結果、RCM5 では 1.44mm/h から 1.23mm/h に補正され、RCM2 では 12.56mm/h から 14.55mm/h に補正された。決定したゲリラ豪雨の抽出基準を表 4.4 に示す。次章では、以上のように補正後の抽出基準にもとづき、気候モデルの降水出力を解析していく。

Table 4 Criteria for extracting Guerrilla-heavy rainfall in climate model output analysis

	RCM5	RCM2
セル内最大降水強度ピーク値	1.23 mm/h 以上	14.55 mm/h 以上
降水セル面積	200 km ² 以下	100 km ² 以下
ピークに達するまでの時間	30 分以下	60 分以下
ライフタイム	90 分以下	120 分以下

5. ゲリラ豪雨の生起特性の将来変化推定

5.1 ゲリラ豪雨抽出の解析手法

5.1.1 雲量を用いた対流性降水の特定

降水現象は大きく対流性降水と層状性降水の 2 種類に分類される。本研究が対象とするゲリラ豪雨に対応する降水現象を解析するためには、降水全体から層状性降水を除外し対流性降水を限定的に抽出する必要がある。一般的に、対流性降水では積雲が高い高度まで発達し地上に強い降水をもたらす一方、層状性降水では雲の厚さは薄く、もたらす降水は比較的弱い。RCM5 のような粗い解像度のモデル出力では、ゲリラ豪雨のような局地的な降水の強度はどの降水についても弱く表現され、降水強度のみによって降水の性状を判別することは困難である。しかし、RCM5 の地表面データには上層雲量・中層雲量・下層雲量という変数が、降水量と同様、30 分毎に出力されている。そこで本研究では、各格子における上層・中層・下層の雲量を簡易な雲の鉛直構造とみなし、これによって対流性降水と層状性降水を区別することを試みた。本研究における雲量の扱いについて具体的に述べる。RCM5 の各格子について、ある層の雲量が閾値以上であれば、その層に雲が存在すると判定した。ここでは雲量の閾値を 0.2 と設定した。この閾値を設定した根拠としては、(1)数 km という積乱雲の空間スケール(Fig. 19)を考慮したこと、(2)1.0mm/h 以上の降水における雲量を画像の目視で数事例確認したところ、おおむね雲量が 0.2 以上であったこと、という 2 点が挙げられる。Fig. 20 に降水と雲量の分布の例を示す。なお、RCM5 においては雲によるセルと降水セルは必ずしも一致せず、Fig. 20 のように雲の境界付近において降水がみられる場合も確認された。そこで、本研究では、降水セルのいずれかの格子において「3 層のうち連続した 2 層以上にわたって雲が存在する（雲量が 0.2 以上である）」場合、その降水セルが対流性であると判定することとした。それに該当しないものは層状性降水とし、解析の対象から除外した。

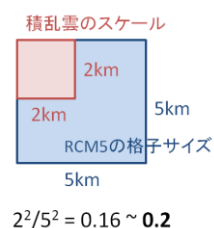


Fig. 19 Diagram of spatial scale of cumulonimbus cloud.

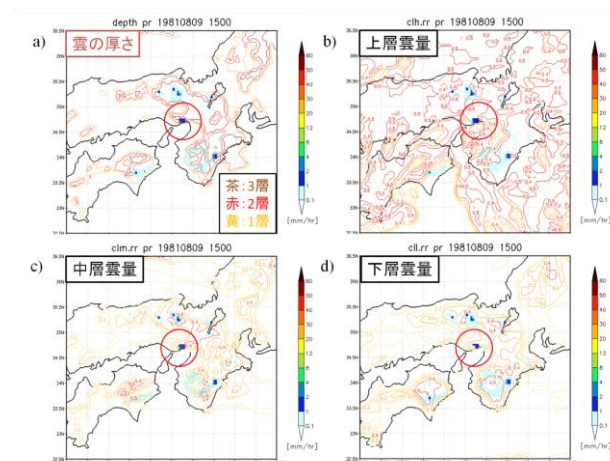


Fig. 20 Example of rainfall and cloud cover. Shade denotes precipitation intensity (mm/h). a) Contour denotes the thickness of cloud (1-3). b)-d) Contour denotes the cloud cover at each level.

5.1.2 ゲリラ豪雨抽出の流れ

ゲリラ豪雨災害リスクの将来変化を推定することを目的として、気候モデルによるゲリラ豪雨の解析を行う。そのために、第4章で得られたゲリラ豪雨の抽出基準に従い、気候モデルの降水出力からゲリラ豪雨を抽出する(Table 4)。解析の対象は、第3章・第4章と同様、8月の近畿地方周辺で発生するゲリラ豪雨である。対象とする時間帯は、ゲリラ豪雨が頻繁に発生する昼間の時間帯を考慮し、10~19JST（以下、日中時間）とした。解析領域は、Fig. 21 青枠に示す領域1（北緯32.5~36.5度、東経132.5~137.5度）と Fig. 21 赤枠に示す領域2（北緯33.0~36.0度、東経134.0~136.5度）の2種類を設定した。

解析の流れを述べると以下になる。まず、領域1において、台風や梅雨前線といった大規模擾乱の影響がある日（以下、擾乱日）をゲリラ豪雨解析の対象から除外した。ゲリラ豪雨は擾乱の影響の弱い大気不安定な環境において発生する現象であるため、擾乱の影響を除く必要がある。擾乱日の定義は「日中時間においてセル面積が2000km²以上の大規模な降水セルが6時間以上出現する日」とした。この閾値の設定に際しては、幅20km・長さが100km程度の梅雨前線の空間スケールを想定した。次に、

除外した残りの日に対して降水セルの追跡アルゴリズムを適用することにより、第4章で設定した基準を満たす対流性の降水セルを自動的に抽出する。対流性の定義は5.1.1に示した通りである。このとき領域1内で解析を行うが、領域2の内側においてピークに達するような降水セルのみを抽出する。これは解析領域の端を通過する大規模な降水セルが、局所的な降水セルであると判定されるのを防ぐためである。その後、基準を満たす降水セルのうち、ゲリラ豪雨のみを降水強度分布画像の目視により抽出する。このとき、中北ら(2017b)と同様に、「他の降水系の影響を受けずに独立して発生したもの」とであるかという観点でゲリラ豪雨であるか否かを判定した。本解析で抽出されたゲリラ豪雨の例を Fig. 22 に示す。目視による判定の結果ゲリラ豪雨が1事例以上抽出された日を「ゲリラ豪雨日」と定義し、擾乱日以外でゲリラ豪雨が抽出されなかった日を「非ゲリラ豪雨日」と定義する。解析の流れを Fig. 23 に示す。

ここで、目視による判定においてゲリラ豪雨ではないと判定された降水セルの例を挙げる。まず追跡アルゴリズムの中で除外されたものとしては、セル内降水強度が抽出基準1.23mm/hに達しなかったものや、ライフタイムが基準の90分を超えたものが挙げられる。さらに、追跡アルゴリズムで抽出されたが目視による判定で除外されたものは、他の降水系の影響を明らかに受けているような降水事例である。そうした事例では、組織化した降水系の周辺にある小さな降水を、多くの降水セルの発生として検知してしまっていた。このように追跡アルゴリズムは必ずしも万能ではなく、特にRCM5出力の場合30分毎であることが追跡をより困難にしている。本研究では、追跡アルゴリズムの不完全性を、目視による判定によって補うことで解析の不確実性の低減を試みた。すなわち、客観性のある程度担保したうえでの定性的判断を行った。

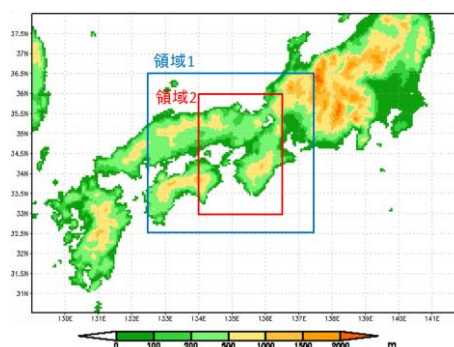


Fig. 21 Analysis area of our study. Shade denotes the model height.

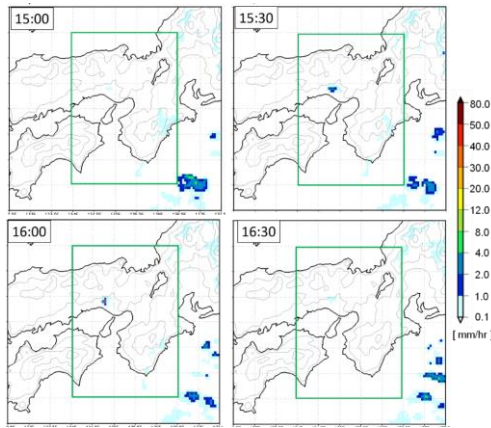


Fig. 22 Example of time series of rainfall distribution reproduced by RCM5. Green square denotes the target area. Red contour around the cell shows that the cell satisfies the extracting criteria.

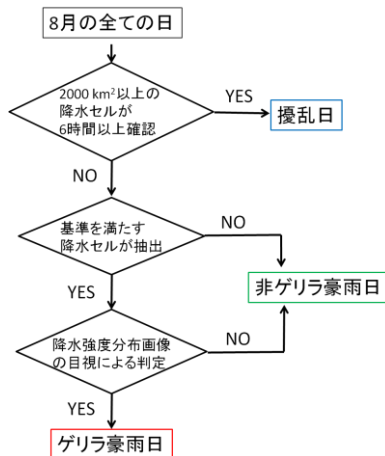


Fig. 23 Flow chart showing extracting 'days having Guerrilla-heavy rainfall' in RCM5 output.

5.2 ゲリラ豪雨日数の将来変化解析

5.2.1 ゲリラ豪雨日の抽出結果

5.1 で述べた手法により、RCM5 の現在気候、将来気候それぞれに対してゲリラ豪雨日を抽出した。8 月全体の分類した日数を Fig. 24 に示す。ゲリラ豪雨日数は現在気候に比べ将来気候のいずれのメンバーにおいても増加しているが、その増加の程度はメンバーにより異なる。一方擾乱日数に着目すると、c0 と c1 では pr に比べて減少し、c2 で c3 では pr と同程度の日数であるのがわかる。次に 8 月の旬別の日数を Fig. 25 に示す。ゲリラ豪雨日数に着目すると、pr では上旬から下旬にかけて減少している一方、将来気候のメンバーではそういった減少は明瞭ではない。また擾乱日数に着目すると、pr では上旬から下旬にかけて増加がみられる一方、将来気候では挙動はメンバーによって大きく異なる。

Fig. 24 と Fig. 25 でみられたゲリラ豪雨日数の将来変化が統計的に有意であるかを評価するため、8 月

全体と 8 月の旬別のそれぞれの日数に対して T 検定を行った。本研究では、帰無仮説として「現在気候と将来気候でゲリラ豪雨の生起日数の平均値に差がない」という仮説を立て、片側検定を行った。8 月の 1 年あたりのゲリラ豪雨日数に関する日数の変化とその変化の差に対する T 検定の結果を Fig. 26 に示す。8 月全体では c2 を除いた 3 つのメンバーで 5% の有意水準で有意に増加することが分かった。次に、8 月の旬別の T 検定結果に着目する。8 月上旬では 4 つ全てのメンバーでゲリラ豪雨日数の減少がみられ、特に c3 では 5% の有意水準で有意に減少することが分かった。8 月中旬では 20 年平均した日数の増加がみられるものの、いずれも有意な変化ではなかった。一方、8 月下旬においては、c2 を除く 3 つのメンバーで 5% の有意水準で有意に増加することが分かった。c2 においても有意ではなかったものの、日数の増加がみられた。以上の解析の結果、ゲリラ豪雨日数は 8 月全体で有意に増加すること、特に 8 月下旬において有意に増加する、とまとめることができる。

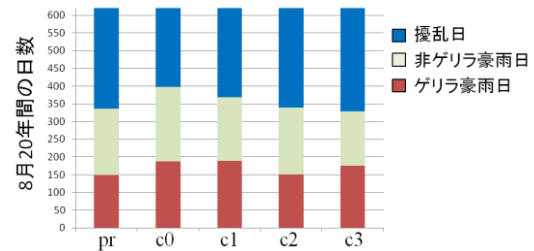


Fig. 24 Result of categorizing the whole August in 20 years.

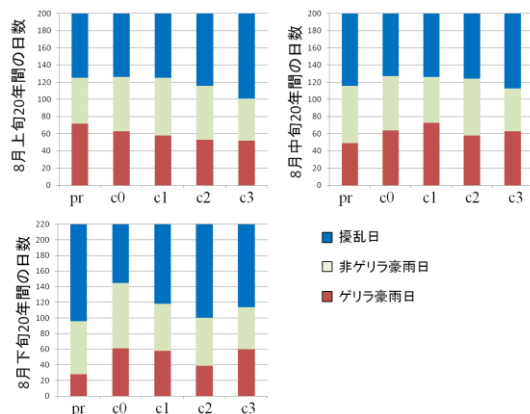


Fig. 25 Result of categorizing the a) Beginning, b) Middle and c) End of August in 20 years.

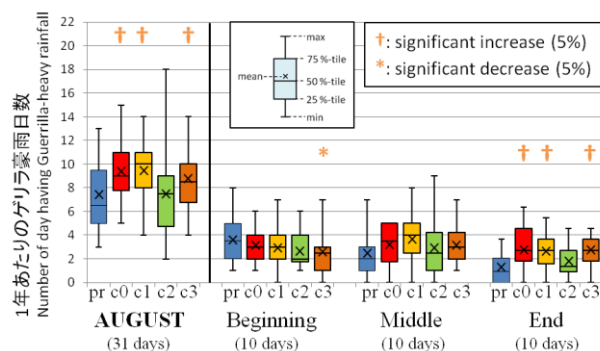


Fig. 26 Whisker plot of the number of 'days having Guerrilla-heavy rainfall' in August, which extracted using the tracking algorithm. The 'x' denotes the 20-year mean and the length of whisker reflects the inter-annual variability.

5.2.2 ゲリラ豪雨日相対頻度

5.2.1 では8月全体と8月下旬においてゲリラ豪雨日数の有意な将来変化が示されたが、ここで留意しなければならないのは、ゲリラ豪雨日抽出の際に擾乱日を解析対象から除外したことである。すなわち、例えばある時期でゲリラ豪雨日数が増加したとき、対象時期において単に除外される擾乱日数が少なく解析対象の日数が多くなったことが原因で抽出される数が多くなる、というケースが考えられる。ここで、1年あたりの擾乱日数の将来変化に関する箱ひげ図をFig. 27に示す。c0では擾乱日数が5%の有意水準で有意に減少しており、旬別では特に下旬において有意に減少することがわかる。実際、Fig. 24やFig. 25をみると、擾乱日数の少ないメンバーまたは時期においてゲリラ豪雨日数が多い傾向が一部でみられる。

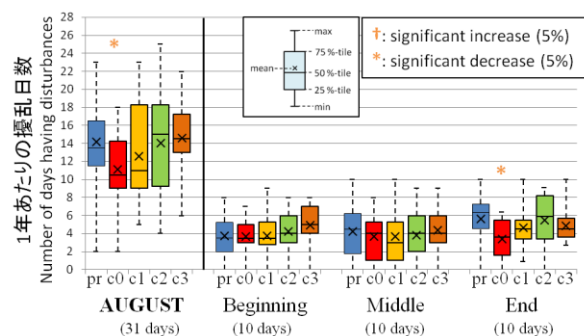


Fig. 27 Whisker plot of the number of 'days having large-scale disturbances' in August.

そこで、ゲリラ豪雨日数の将来変化に対する擾乱日除外の影響を考慮に入れるため、「ゲリラ豪雨日相対頻度」という指標を算出した。ゲリラ豪雨日相対頻度とは、式5.1で算出される指標である。

$$\begin{aligned} & (\text{ゲリラ豪雨日相対頻度}) \\ & = (\text{ゲリラ豪雨日数}) / (\text{擾乱日数を除いた日数}) \end{aligned} \quad (5.1)$$

ここで、ゲリラ豪雨日相対頻度という指標の意義を述べる。ゲリラ豪雨日数の将来変化に影響する要因として、擾乱の影響がある日数の将来変化の効果と、環境場の将来変化の効果の2つが考えられる。例として、ある期間にゲリラ豪雨日数が有意に増加したとする。もしこの期間でゲリラ豪雨日相対頻度の増加が有意であった場合、当該期間のゲリラ豪雨日数の増加に対して擾乱日数の変化の影響は小さく、環境場の将来変化の寄与が大きかったと推測できる。一方、相対頻度の増加が有意でなかった場合、対象期間のゲリラ豪雨日数の増加に対して、環境場の将来変化の寄与は小さく、擾乱日数の減少による影響が大きかったと推測できる。つまりゲリラ豪雨日相対頻度は、ゲリラ豪雨日数に対する環境場の将来変化の寄与の大小を判定できる指標だと言える。

このゲリラ豪雨日相対頻度の8月における将来変化をFig. 28に示す。

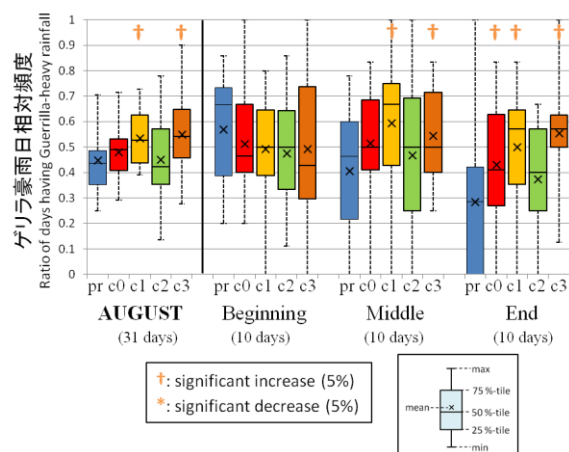


Fig. 28 Whisker plot of relative frequency of the number of 'days having Guerrilla-heavy rainfall' in August.

まず8月全体の変化に着目すると、将来の4つのメンバー全てで相対頻度は増加したものの、有意に増加したのはc1とc3のみであった。c0では、ゲリラ豪雨日数では増加が有意だったが、相対頻度の増加は有意ではなかった。したがって、c0での増加には擾乱日数の減少の影響が大きいのではないかと推測できる。次に8月の旬別の変化をみる。旬毎の季節変化に着目すると、現在気候では上旬から下旬にかけて相対頻度の顕著な減少がみられた一方、将来気候ではそういった明確な減少はみられない。つづいて、時期別に将来変化の有意性に着目すると、上旬では相対頻度のわずかな減少がみられるものの、いずれの変化も有意ではなかった。また中旬ではc1とc3で有意な増加がみられた。一方下旬では、c2を除

く 3 つのメンバーにおいて相対頻度の有意な増加がみられた。以上をまとめると、将来気候では 8 月の上旬から下旬にかけてのゲリラ豪雨日相対頻度の減少は緩やかになる傾向があると言え、これには環境場の季節的な推移の将来変化が影響しているのではないかと推察される。次節では、相対頻度と大気環境場をより関連付け、8 月下旬における顕著なゲリラ豪雨日数増加に関して、その原因を探っていく。

5.3 環境場の将来変化とゲリラ豪雨日数の将来変化の関係

5.3.1 SSI の将来変化

橋本(2018)は、中北ら(2017b)が示した 8 月の近畿地方におけるゲリラ豪雨日数の増加の原因を環境場の観点から明らかにすることを目的として、大気安定度や比湿に加えて SSI (Showalter Stability Index: ショワルターの安定指数) や KI (K 指数) の将来変化を解析した。橋本は、各日の環境場を代表する指標として、15JST における SSI の近畿地方陸域最小値 (以下、 SSI_{min}) を使用し、8 月においてその値が温暖化に伴って有意に不安定化することを示した。 SSI_{min} の不安定化した時期とゲリラ豪雨日数が増加する時期には対応関係がみられたことから、この指標はゲリラ豪雨発生時の環境場を解析するうえで有効であると言える。

そこで本研究においても、近畿地方の環境場を代表とする指標としてこの SSI_{min} という指標を用いることとした。擾乱日を除いた日全てに対して SSI_{min} を算出し、その値の将来変化を解析した。Fig. 29 に 8 月の SSI_{min} に関する箱ひげ図を示す。8 月の旬別の季節推移に着目すると、現在気候では上旬から下旬にかけて SSI_{min} の安定化がみられる一方、将来気候ではそういった SSI_{min} の安定化は非常にゆるやかであり、8 月下旬においても不安定な値を維持することが確認され、この結果は橋本(2018)と同様である。ゲリラ豪雨日相対頻度の将来変化との対応をみると、ゲリラ豪雨相対頻度の減少が緩やかである傾向と、 SSI_{min} の不安定が 8 月下旬まで維持される傾向は対応していると言える。しかし、この解析だけでは未解明な点がある。すなわち、温暖化に伴って SSI が不安定化するとき、その不安定な日にゲリラ豪雨が実際に抽出されているのかが明らかでないという点である。そこで次項では、その対応関係を確認し、環境場の指標とゲリラ豪雨日をより密接に関連づける。

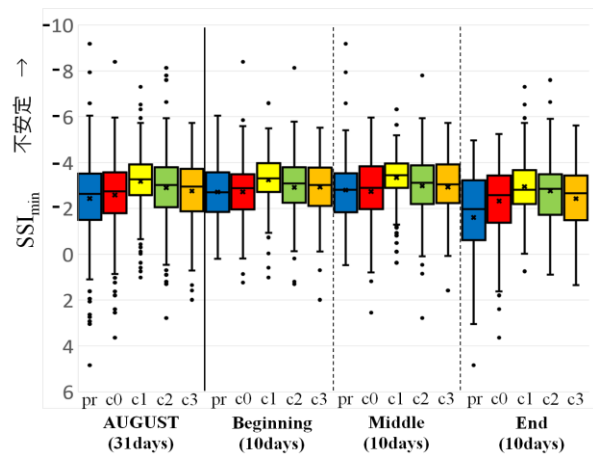


Fig. 29 Whisker plot of the SSI_{min} value in days except for the 'days having disturbances' in August.

5.3.2 大気不安定な日とゲリラ豪雨日の対応

まず抽出したゲリラ豪雨日の妥当性を確認するため、ゲリラ豪雨日と非ゲリラ豪雨日の SSI_{min} をそれぞれ調べた。このとき、RCM5 の現在気候と将来気候の 4 つのメンバーから計算された SSI_{min} のデータ全てを使用した。ここでは、ゲリラ豪雨が発生する際の SSI の値は現在気候でも将来気候でも同じであるという前提に立っている。ただし、水蒸気流入経路の変化など、大きなスケールの観点でみた発生時の環境場は温暖化に伴って変化する可能性はあるが、本研究では対象としない。ゲリラ豪雨日と非ゲリラ豪雨日の SSI_{min} の相対頻度分布を Fig. 30 に示す。ゲリラ豪雨日では非ゲリラ豪雨日に比べて SSI_{min} が小さくなっている、すなわち、より不安定であることがわかる。したがって、本研究のゲリラ豪雨日の抽出はおおむね妥当であったと言える。

各 SSI_{min} 値を示す日のうち、ゲリラ豪雨日数と非ゲリラ豪雨日数の頻度分布を Fig. 31 に示す。各 SSI_{min} 値についてゲリラ豪雨日数の割合に着目すると -4 から 0 の値の範囲内ではゲリラ豪雨日と非ゲリラ豪雨日の日はともに 5 割に近く、この条件下ではゲリラ豪雨発生の有無はどちらも起こりうると言える。一方、 SSI_{min} が -4 以下 (または -5 以下) になるとゲリラ豪雨日の割合が多くを占めてくることがわかる。同様に、 SSI_{min} が 0 以上と大きくなってくると非ゲリラ豪雨日の割合が大きくなってくることがわかる。本研究では、この SSI_{min} の分布の特徴を踏まえ、ゲリラ豪雨発生日数の割合が大きい「大気不安定な日」と、非ゲリラ豪雨日の割合が大きい「大気安定な日」を定義した。すなわち、 SSI_{min} が -4 以下である日を「不安定日」、 SSI_{min} が 0 以上である日を「安定日」と定義した。また、 SSI_{min} が -5 以下である日で定義した不安定日も解析の対象とした。

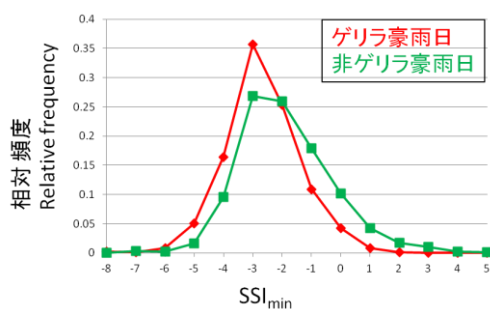


Fig. 30 Relative frequency distribution of SSI_{min} in G (days having Guerrilla-heavy rainfall, red) and Non-G (the others, green).

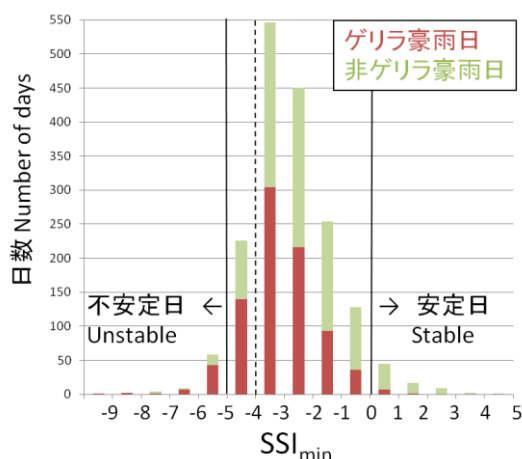


Fig. 31 Histogram of SSI_{min} in G (red) and Non-G (green).

5.3.3 大気不安定日数及び安定日数の将来変化

5.3.2 で定義した不安定日と安定日について、その日数の将来変化を解析するとともにその中に含まれるゲリラ豪雨日の割合を確認した。本研究では、ゲリラ豪雨相対頻度の増加と SSI_{min} の増加がともに有意であった 8 月下旬に着目し解析を行った。

まず SSI_{min} が -4 以下である日によって定義した不安定日の日数の変化を Fig. 32 に示す。まず、不安定日数そのものの変化をみると、将来気候ではどのメンバーでも現在気候に比べて顕著に増加することがわかる。さらにその中に含まれるゲリラ豪雨日数を確認したところ、これも顕著な増加がみられた。ここで留意しなければならないのは、上記の日数の変化に対して非擾乱日の日数の違いを考慮する必要があるということである。そこで、不安定日数をその期間で非擾乱日（ゲリラ豪雨日と非ゲリラ豪雨日の和集合）の総数で正規化した「不安定日割合」も算出した。この不安定日割合においても、不安定日数の変化と同様の傾向がみられた。また、不安定日を SSI_{min} が -5 以下である日によって定義した場合の不安定日数の将来変化を Fig. 33 に示す。この場合、現

在気候における不安定日数はゼロであったのに対し将来気候では 2~8 日存在するという結果となり、SSI_{min} が -4 以下である日によって定義した場合と比べて不安定日数の将来変化がより顕著に現れた。一方、Fig. 34 に示すように安定日の日数の将来変化も確認したところ、現在気候と比較して将来気候において顕著な減少がみられ、この傾向は「安定日割合」でも同様であった。またこの安定日においてゲリラ豪雨はほとんど発生しないことも確認された。以上の解析結果から、8 月下旬においては温暖化に伴って不安定な日が増加し安定な日の日数が減少することによって、ゲリラ豪雨日数が増加する、とまとめることができる。

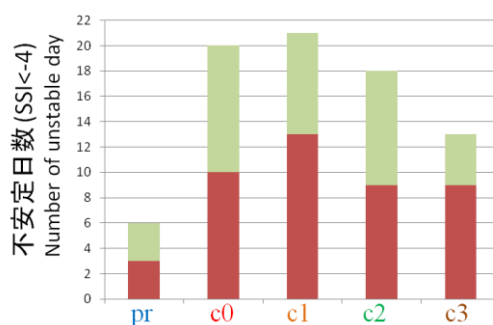


Fig. 32 Future change of the number of 'atmospheric unstable days (SSI_{min}<-4)' in G (red) and Non-G (green).

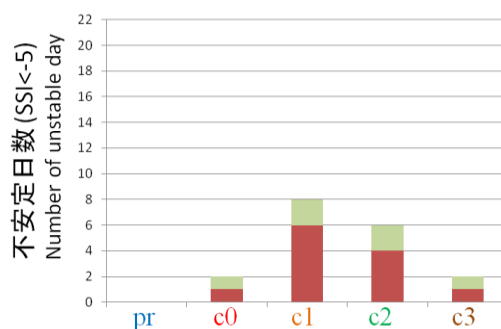


Fig. 33 Future change of the number of 'atmospheric unstable days (SSI_{min}<-5)' in G (red) and Non-G (green).

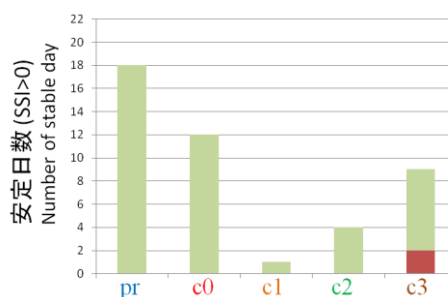


Fig. 34 Future change of the number of 'atmospheric stable days (SSI_{min}>0)' in G (red) and Non-G (green).

5.4 ゲリラ豪雨の強度の将来変化

前節まではゲリラ豪雨の生起頻度を中心に述べてきたが、本節ではゲリラ豪雨の強度に着目し、その将来変化を解析した。RCM5 の 8 月の降水出力から抽出されたゲリラ豪雨全てに対して、降水セル内最大降水強度のピーク値 $R_{cellmax}$ を集計した。 $R_{cellmax}$ の相対頻度分布を Fig. 35 に示す。現在気候と比較して将来気候では 4 つ全てのメンバーにおいて $R_{cellmax}$ のわずかな強化がみられた。また、メンバー間の分布の違いに着目すると、c2 では他のメンバーと比較して、強度の増加がより顕著であることがわかる。c2 の高い強度階級をみると、6mm/h 付近と 7mm/h 付近という高い強度のゲリラ豪雨事例がある。

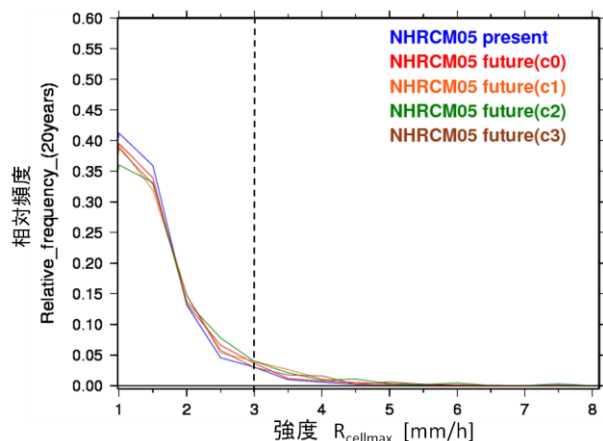


Fig. 35 Future change of relative frequency distribution of ‘Peak of maximum rain rate’ $R_{cellmax}$ of the extracted Guerrilla-heavy rainfall in RCM5 output.

ここで、 $R_{cellmax}=3.0\text{mm/h}$ を基準として、 3.0mm/h を超えるような、相対的に強度の大きいゲリラ豪雨の事例数とその割合を Table 5 に示す。その結果、現在気候に比べて将来気候では 4 つのメンバー全てで強いゲリラ豪雨の発生割合が増加していた。また c2 においてはゲリラ豪雨事例数の抽出数がほかのメンバーに比べて少ないにも関わらず、全事例に占める強いゲリラ豪雨の割合がもっとも高い。この強度の増加の原因としては、前節で述べたような SSI が特に不安定な日の日数の増加などが考えられるが、詳細な解析は今後の課題としたい。本研究において追跡アルゴリズムを適用することにより、生起頻度に加え、こうした強度等の指標の解析も可能となった。

Table 5 Ratio of number of events whose $R_{cellmax}$ exceed 3.0 mm/h of the all extracted events

	3.0mm/h を 超える割合	3.0mm/h を超 える事例数	抽出され た事例数
現在気候	5.132 %	37	721
将来気候 c0	6.606 %	51	772
将来気候 c1	8.795 %	81	921
将来気候 c2	9.313 %	61	655
将来気候 c3	7.875 %	63	800

6. 結論

本研究では、平滑化した降水レーダ情報を用いて数km解像度でのゲリラ豪雨の再現特性を解析し、それに基づいて5km解像度の領域気候モデルの出力によって8月の近畿地方におけるゲリラ豪雨の生起特性（発生日数、強度）の温暖化に伴う将来変化を解析した。その結果、8月下旬においてはゲリラ豪雨の発生する日が有意に増加し、この増加は当該期間におけるSSIの不安定化が寄与していることが示された。以下に、第1章から第5章までの内容を簡潔にまとめる。

第1章では、ゲリラ豪雨に対する気候変動の影響評価研究の意義を述べ、数km解像度の領域気候モデルによるゲリラ豪雨という局地的な現象の解析への挑戦を述べた。

第2章では、ゲリラ豪雨の特徴と使用する気候モデルの特徴について述べた後、局地的な豪雨に対する影響評価研究のレビューを行った。モデルの解像度の制約等により、ゲリラ豪雨に対する気候変動の影響を調べた研究は少ないが、より高解像度の気候モデルの開発などにより徐々に始められてきていることを述べた。

第3章では、5km解像度と2km解像度の領域気候モデルにおける降水強度の再現性について述べた。RCM2ではRCM5と比較すると降水の再現性は高いものの、降水が過大になることを確認した。2kmという格子内に蓄積する過剰なCAPEによって過大な降水が算定される、という現業LFMで指摘される問題点が、RCM2でも当てはまるのではないかと考察した。

第4章では、平滑化した降水レーダ情報から気候モデルの時空間解像度におけるゲリラ豪雨の再現特性を解析した。ゲリラ豪雨規模の降水の特性を調べたところ、RCM5では強度がかなり小さいもののライフタイムは通常の値であった一方、RCM2では強度が大きく算定される上にライフタイムも長い傾向がみられた。この再現特性を踏まえて気候モデル出力の解

析におけるゲリラ豪雨の基準を設定した。

第5章では、第4章で得られた基準にもとづいて RCM5出力からゲリラ豪雨を抽出し、ゲリラ豪雨発生日数の将来変化とゲリラ豪雨強度の将来変化を解析した。その結果、8月のゲリラ豪雨日数は下旬において有意に増加することがわかった。この下旬における増加は、ゲリラ豪雨日数の上旬から下旬にかけての急激な減少が将来気候ではゆるやかになることを意味しており、この日数の挙動とSSIの不安定化と対応がみられた。ゲリラ豪雨日とSSIが不安定な日には対応関係がみられ、ゲリラ豪雨が起きやすい大気不安定な日は8月下旬において顕著に増加することがわかった。またゲリラ豪雨の強度は温暖化に伴ってわずかに増加することが確認された。

以上の結果を踏まえ、今後の課題を述べる。本研究では8月下旬におけるゲリラ豪雨日数の有意に増加することを示したが、その後の他の月における挙動は明らかでない。また、2km解像度のRCM2による時空間的に詳細な情報を用いることにより、本研究でみられた将来変化を確認する必要がある。本研究は、数km解像度の気候モデルを用いてゲリラ豪雨の生起頻度の将来変化解析に挑戦し、環境場の変化と関連付けることができた点において、大きな意義がある。本研究が、今後のゲリラ豪雨災害のリスクに対する温暖化の影響評価研究、そして防災政策の策定の一助となれば幸いである。

謝 辞

本研究は文部科学省の気候変動リスク情報創生プログラム及び統合的気候モデル高度化研究プログラムの協力のもと、気象庁気象研究所によって開発された気候モデルのデータを利用して行いました。データ利用の際には、高敷出様をはじめ気象研究所の皆様にご助言と多大なるご協力を頂きました。ここに深く感謝申し上げます。

参考文献

牛山素行(2011):「ゲリラ豪雨」と災害の関係について、*水工学論文集*, 第55巻, pp.S_505-S_510.
片山勝之・山路昭彦・中村文彦・森田宏・中北英一(2015): 局地的豪雨探知システムの開発, *河川技術論文集*, Vol.21, pp.401-406.
気象研究所(2001): 気象研究所技術報告「気象研究所数値予報課統一非静力学モデル」, 第42号, 50pp.
気象研究所(2015): 気象研究所技術報告「気象研究所非静力学地域気候モデルによる日本付近の将来気候変化予測について」, 第73号, 90pp.

気象庁(2010): 局地モデルの試験運用開始と数値予報システムの改善, 数値予報解説資料(数値予報研修テキスト), 第43巻, pp.1-27.

気象庁(2015): 異常気象と気候変動の将来見通し, 異常気象レポート2014, pp.156-161.

気象庁(2017): 気候変動監視レポート2016, 90pp.

気象庁: 「天気予報等で用いる用語—降水」

http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/yougo_hp/kousui.html (閲覧日: 2018年2月8日)

国土交通省 水管理・国土保全局(2017): 水害レポート2017, 39pp..

国土交通省: 雨量情報「XRAIN エックスレイン」の配信エリアを拡大します!

<https://www.hkd.mlit.go.jp/ky/release/splaat000000m1td-att/splaat000000xpdn.pdf>

(閲覧日 2018年2月7日)

土木学会都賀川水難事故調査団(2009): 都賀川水難事故調査について, 平成20年度河川災害に関するシンポジウム.

中北英一(1990): 地形が降雨場に及ぼす影響を考慮した短時間降雨予測手法の開発と3次元レーダー情報の利用に関する研究, 京都大学大学院博士論文, 219pp., pp.70-72.

中北英一・小坂田ゆかり(2018b): 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, *水工学論文集*, Vol.74, No.4, I_139-I_144.

中北英一・佐藤悠人・山口弘誠(2017a): ゲリラ豪雨予測の高精度化に向けた積乱雲の鉛直渦管生成メカニズムに関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第60号B.

中北英一・新保友啓・佐藤悠人・山口弘誠・大東忠保(2018a): Kaバンドレーダーを利用した積乱雲生成段階に関する研究, *水工学論文集*, Vol.74, No.4, I_55-I_60.

中北英一・西脇隆太・山邊洋之・山口弘誠(2013): ドップラー風速を用いたゲリラ豪雨のタマゴの危険性予知に関する研究, *土木学会論文集 B1(水工学)*, 第57巻, pp.325-330.

中北英一・森元啓太郎・峠嘉哉(2017b): 5km 解像度領域気候モデルを用いたゲリラ豪雨生起頻度の将来変化推定, *水工学論文集*, 第61巻, pp.I_133-I_138.

橋本郷志(2018): ゲリラ豪雨の生起頻度変化へ大気安定度及び水蒸気流入量の気候変動に伴う将来変化が及ぼす影響, 京都大学卒業論文, 執筆中, 2018.

増田有俊・中北英一(2014): Xバンド偏波レーダを用いた降水セルのライフステージ判別手法の開発, *土木学会論文集 B1(水工学)*, Vol.70, pp.I_493-I_498,

- 2014.
- Aoyagi, T., et al.(2011): A square prism urban canopy scheme for the NHM and its evaluation on summer conditions in the Tokyo metropolitan area, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Vol. 50, No.7, pp.1476-1496.
- Doswell, C. A. III (1977): Obtaining Meteorologically Significant Surface Divergence Fields Through the Filtering Property of Objective Analysis, *Monthly Weather Review*, Vol.105, pp.885-892.
- Hirai et al. (2007): Development and Validation of a New Land Surface Model for JMA's operational global model for JMA's Operational Global Model Using the CEOP Observation Dataset, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, pp.1-24.
- Kain, J. S. et al. (1993): "Convective Parameterization for Mesoscale Models: The Kain-Fritsch scheme", *American Meteorological Society*, Boston, Vol. 24, pp.165-170.
- Kitoh, A. et al. (2009): Projection of changes in future weather extremes using super-high-resolution global and regional atmospheric models in the KAKUSHIN Program: Results of preliminary experiments, *Hydrological Research Letters*, Vol. 3, pp.49-53.
- Mizuta, R. et al. (2012): Climate simulations using MRI-AGCM3.2 with 20-km grid, *Journal of Meteorological Society of Japan*, Vol.90A, pp.233-258.
- Mizuta, R. et al. (2014): Classification of CMIP5 Future Climate Responses by The Tropical Sea Surface Temperature Changes, *SOLA*, Vol.10, pp.167-171.
- Murakami, M. et al. (1994): "Numerical Simulations of Convective Snow Clouds over the Sea of Japan; Two-Dimensional Simulations of Mixed Layer Development and Convective Snow Cloud Formation", *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Vol.72, pp.43-62.
- Murata A. et al. (2015): Projection of Future Climate Change over Japan in Ensemble Simulations with a High-Resolution Regional Climate Model, *SOLA*, Vol.11, pp.90-94.
- Murata, A. et al. (2017): Evaluation of precipitation over an oceanic region of Japan in convection-permitting regional climate model simulations, *Climate Dynamics*, Vol.48, pp.1779-1792.
- Murata et al. (2017): Projection of Future Climate Change over Japan in Ensemble Simulations Using a Convection-Permitting Regional Climate Model with Urban Canopy, *SOLA*, Vol.13, pp.219-223.
- Y. Ookuchi, M. Segal, R. C. Kessler and R. A. Pielke (1984): Evaluation of Soil Moisture Effects on the Generation and Modification of Mesoscale Circulations, *Monthly Weather Review*, 112, pp.2281-2292.
- Rayner et al. (2003): Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century, *J. Geophysics, Res.*, 108(D14), 4407.
- Sugi, M., A. Noda and N. Sato (2002): Influence of the global warming on tropical cyclone climatology : An experiment with the JMA global model, *Journal of Meteorological Society of Japan*, Vol.80, pp.249-272, 2002.
- Takemi, T. et al. (2012): A Regional-Scale Evaluation of Changes in Environmental Stability for Summertime Afternoon Precipitation under Global Warming from Super-High-Resolution GCM Simulations: A Study for the Case in the Kanto Plain, *Journal of Meteorological Society of Japan*, Vol. 90A, pp. 189-212.
- Sasaki et al. (2008): Preliminary Experiments of Reproducing the Present Climate Using the Non-hydrostatic Regional Climate Model, *SOLA*, Vol.4, pp.025-028.
- Sasaki et al. (2011): Reproducibility of Present Climate in a Non-Hydrostatic Regional Climate Model Nested within an Atmosphere General Circulation Model, *SOLA*, Vol.7, pp.173-176, 2011.

(論文受理日 : 2018年6月13日)