

高解像度d4PDFを用いた停滞前線性線状対流系の 再現性確認と将来変化予測

Future Projections and Reproducibility Confirmation of Line-shaped Convective System Associated with Stationary Front Using High-resolution d4PDF

仲ゆかり・岡田睦巳⁽¹⁾・中北英一

Yukari NAKA, Mutsumi OKADA⁽¹⁾ and Eiichi NAKAKITA

(1) 京都大学大学院工学研究科

(1) Graduate School of Engineering, Kyoto University

Synopsis

Line-shaped convective systems associated with stationary fronts bring localized and intense rainfall, causing serious disasters such as landslides and river flooding. In addition, in recent years, various meteorological disasters have become more severe with the progression of global warming. Therefore, we are concerned about future changes of line-shaped convective systems due to global warming. Under these circumstances, in 2023, the 5 km dynamical down scaling (DDS) d4PDF was created. The output data of 5km DDS d4PDF is characterized by high resolution and large ensembles. First, since 5km DDS d4PDF is the new output data, we ensured that it accurately represented the line-shaped convective systems. After that, we projected future changes about the frequency and occurrence season of line-shaped convective systems by using the 5km DDS d4PDF. As a result, we showed that the hazard risk of line-shaped convective systems increases.

キーワード: 線状対流系, d4PDF, 停滞前線, 地球温暖化

Keywords: line-shaped convective system, d4PDF, stationary front, global warming

1. はじめに

1.1 研究背景

「地球温暖化には疑う余地がない。」気候変動に関する政府間パネル(Intergovernmental Panel on Climate Change; 以下IPCCと記す)は、2007年に発表した第4次評価報告書(AR4)でこう記した。近年世界では地球温暖化に対する関心が急速に高まり、今や誰もが知る国際問題となっている。我々の身近においても、記録的な猛暑が毎年のように観測され、春や秋といった心地良い季節が短くなり、地球温暖化

が肌で感じられるような昨今である。

このように地球温暖化が進行する中で、様々な気象災害が激甚化・頻発化している。中でも梅雨前線や秋雨前線といった停滞前線に伴う線状対流系は、台風のような他の気象現象と比較して、局所的かつ突発的な現象であり、その猛烈な降雨によって河川の氾濫や土砂災害といった深刻な災害を引き起こす。

平成26年8月豪雨では、日本海付近に広く秋雨前線が停滞し、20日に広島県広島市で時間雨量120mmを超すような猛烈な雨を伴う局所的な線状対流系が発生した。その結果安佐南区や安佐北区を中心に土砂

災害が多発して山沿いに広がっていた住宅地に土砂が流れ込み、死者75名、住宅179棟が全壊するという被害をもたらした。

また、令和2年7月豪雨では、日本列島に沿うようにして梅雨前線が長時間停滞した。3日から4日にかけて熊本県の球磨川流域付近で大規模な線状対流系が発生し、時間雨量30mmを超える激しい雨が8時間にわたって降り続いた。その結果、一級河川である球磨川は34地点で氾濫し、周辺では土砂災害も発生した。熊本県内での死者は67名に上り、住居家屋やインフラ設備にも深刻な被害を出した。

以上に挙げたような過去の災害事例を始めとして、地球温暖化の経過途中段階にある現在の気候下においても、停滞前線に伴った線状対流系による深刻な災害は頻発している。このような状況下で、将来地球温暖化により線状対流系がどのように変化していくのかということが危惧される。災害をもたらす現象の今後の詳細を正確に掴むことは、限られた予算の中で的確に効率良く防災のためのインフラ設備を整えることにも繋がり、国土強靱化にとって重要である。

そこで将来の気候下における自然現象を予測・評価するために、各国の研究機関で作成されるのが気候モデルである。この気候モデルを使用した数多の既往研究によって、線状対流系の将来変化予測が行われ、線状対流系の将来変化に関する様々な事実が明らかにされてきた。しかし、線状対流系という気象現象は、空間的な規模が比較的小さく、発生頻度の低い極端な現象であるために、これを評価するためには既存の気候モデル実験で作成されたデータセットではサンプル数が少なく不十分であった。

そのような状況下で、2023年、従来の気候モデルを利用した新たな実験による高解像度かつ膨大なサンプル数で構成されるデータセットである、格子間隔5km解像度のd4PDF(以下、d4PDF05と記す)が完成し、非常に極端かつ空間規模の小さい気象現象に対する評価が十分にできるような環境が整った。

1.2 既往研究の概要

線状対流系の将来変化に関する既往研究は多数存在する。中北ら(2012)は、気象庁気象研究所によって作成された格子間隔5km解像度の非静力学領域気候モデルMRI-NHRCM05(以下、NHRCM05と記す)で出力された雨量画像データから、日本域における降水現象をTable 1の判断基準を用いて目視で確認し、梅雨前線に伴う豪雨(以下、梅雨豪雨と記す)を抽出した。NHRCM05中の現在気候(1979年から2003年の25年間)と21世紀末に二酸化炭素の大気中濃度が2倍になると仮定したシナリオに基づく気候(2075年か

ら2099年の25年間)の出力データに対して、Table 1のA)からC)の基準を全て満たすもの(複数項目が存在するアルファベットでは、いずれかを満たせば良い)を梅雨豪雨として抽出する操作を行い、解析を実行した結果、21世紀末気候シナリオにおいては、過去気候再現実験シナリオと比較して、7月上旬と8月上旬に線状対流系の発生頻度が増加することが明らかにされた。この研究で採用された、目視による梅雨豪雨の抽出手法が本研究にとって重要である。

また、Naka and Nakakitaは、過去の実際の発生事例とNHRCM05の過去気候再現シナリオ実験2アンサンブル(20年間分×2アンサンブル=40年間分)、RCP2.6シナリオ実験1アンサンブル(2℃上昇シナリオに相当、20年間分)、RCP8.5シナリオ実験4アンサンブル(4℃上昇シナリオに相当、各20年間分×4アンサンブル=80年間分)について解析を行い、停滞前線に伴う線状対流系の将来変化予測を行った。この研究は、各シナリオの20年間あたりの線状対流系の発生頻度を比較することにより、温暖化の進行に伴って発生頻度が増加傾向にあることを明らかにした。また、線状対流系の地域ごとの発生頻度の将来変化予測を行った。その結果、北日本(北海道地方、東北地方)においては温暖化に伴う線状対流系の発生頻度の顕著な増加が見られた。一方現在気候下でも発生頻度がやや高い西日本(東海地方、中国地方、九州地方)では北日本ほど顕著な増加は見られず、線状対流系の将来変化には地域差が存在することが明らかにされた。さらに、線状対流系1事例あたりの継続時間と積算降雨量についての解析も行った。その結果、NHRCM05の各シナリオ下における線状対流系の積算降雨量は温暖化に伴って増加する傾向があることが明らかにされた。一方、継続時間が温暖化に伴って変化する傾向は見られなかった。

さらに、Kawase et al.はd4PDF05を用い、3時間積算降水量が100mmを超える格子を含む、3時間積算降水量が80mmを超える格子域全体を強雨域として定義し、さらに、その強雨域の形状が線状であり、5時間以上停滞しているものを全て線状降水帯として定義して、解析を行った。過去気候再現実験と4℃上昇シナリオ実験を比較した結果、地球温暖化に伴って、線状降水帯の年間発生数や、線状降水帯1事例当たりの総雨量が増加することが示された。また発生地域に関しては、九州全土や、四国と東海の太平洋側で特に発生頻度が高まり、現在気候下では線状降水帯が発生しない、北日本でも線状降水帯が僅かに発生することが示された。

Table 1 Criteria for extracting Baiu heavy rainfall

Check the following
A) 30min-accumulated rainfall • Rainfall area ($\geq 50\text{mm/hour}$) stays for more than 2 hours • Two or more rainfall areas ($\geq 50\text{mm/hour}$) appear within two hours in the same area. B) 3hour-accumulated rainfall • Rainfall areas ($\geq 150\text{mm/hour}$) appear • Rainfall areas ($100\text{--}150\text{mm/hour}$) appear and stay for more than 3hours C) Baiu front • The horizontal gradient of equivalent-potential temperature at the ground surface is large.

1.3 本研究の目的

前節で紹介した既往研究を始めとして、線状対流系に関する研究は積極的に行われており、線状対流系が地球温暖化に伴って、将来どのように変化していくかということは徐々に明らかになってきている。しかし、既往研究においては、高解像度かつ膨大なデータ数を持つ気候モデルを使用した、停滞前線性の線状対流系のみに関する将来変化予測は行われていない。このような背景を踏まえて本研究では、2023年に新たに完成したデータセットである、空間解像度5kmの領域気候モデル実験出力d4PDF05を利用して、従来の研究と比較してより精確に停滞前線に伴う線状対流系の将来変化を評価することを目的としている。また、新たなデータセットを使用するため、そのデータセットの性能でどの程度、停滞前線性の線状対流系を再現できているかということについて確認することも本研究における大きな目的である。

2. 解析手法

2.1 使用データ

本研究では、5km解像度の領域気候モデル実験出力であるd4PDF05を用いて解析を行っている。d4PDFは地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベースとして作成された気候モデル実験出力である。非常に多数のアンサンブル計算をすることで作成された、膨大な量のデータセットで構成されており、発生頻度の低い極端な気象現象の再現と評価を十分に行うことが可能である。当初d4PDFには、気象庁気象研究所が開発した格子間隔が60km解像度の全球気候モデルMRI-AGCM3.2H(以下、AGCM60と記す)を使用した格子間隔60km解像度の全球モデル実験出力と、格子間隔20km解像度の非静力領域気候モデルMRI-NHRCM20(以下、NHRCM20と記す)を使用した格子間隔20km解像度の領域気候モデル実験

が存在した。このうち、本研究に関係するのは、より高解像度の格子間隔20kmを持つ領域気候モデル実験のd4PDF(以下、d4PDF20と記す)である。しかし、先述の通り、線状対流系を初めとした、メソβスケール以下の気象現象は格子間隔20kmの空間解像度では十分に再現することができない。そこで、線状対流系のような発生頻度が低く、かつ時空間スケールの小さい気象現象に関して、地球温暖化に伴う将来変化や不確実性、その気象現象により引き起こされる災害のリスクを十分に評価することを目指し、2023年に格子間隔20km解像度のd4PDF20を力学的ダウンスケーリングすることで、格子間隔5km解像度のd4PDF05が完成された。本研究では、このd4PDF05を用いて解析を行っている。

この新たに完成したd4PDF05は、時間間隔30分で、5km四方の格子毎での降水量や気温、気圧、風速、湿数、雲量などの様々な指標を出力しており、過去気候再現シナリオ、非温暖化実験、2℃上昇シナリオ、4℃上昇シナリオの4つのシナリオ実験における、各60年分×12アンサンブルメンバの、合計2880年分のデータが存在する。そのうち、過去気候再現シナリオ(1951年9月から2011年8月)、2℃上昇シナリオ(2031年9月から2091年8月)、4℃上昇シナリオ(2051年9月から2111年8月)の3つのシナリオ実験について、各60年分×5アンサンブルメンバの、合計900年分に対して、解析を行っている。また、梅雨期を含む夏季6月、7月、8月の3か月間に発生した線状対流系を解析対象としている。本研究では、後述するように、再現性の確認や事例抽出のために目視による雨量分布の確認を行っており、作業に長時間を要するため、まずは各実験でTable 2に示す5メンバの解析を完了した。今後、順次残りのアンサンブルメンバに関しても解析を進めていく。

また、d4PDF05において、線状対流系の再現性を確認する際、過去実際に発生した線状対流系の事例との比較を行っており、この比較には、気象庁の解析雨量のデータと、メソ数値予報の解析値(以下、MSMと記す)及びJRA-55領域ダウンスケーリングデータを用いた。Table 3に解析雨量の年代ごとの空間解像度と出力時間間隔を示す。

MSMは、数値予報モデルで、詳細な雲物理過程が組み込まれ、境界層過程も高度化されているのが特徴である。2001年3月に水平解像度10kmのモデルとして本運用が開始された。その後2004年9月に静力学スペクトルモデルから気象庁非静力学モデル(JMA-NHM)に移行し、2017年2月に水平解像度5kmの非静力学モデルasucaに移行した。

また、JRA-55領域ダウンスケーリング(以下DSJRA-55と記す)は、気象庁によって日本域における

顕著現象の長期変化等の気候特性の把握や顕著事例の事例解析を行うことを目的として作成された気候データセットである。気象庁55年長期再解析(以下JRA-55と記す)を初期値・境界値とした領域ダウンスケーリングを1958年～2012年の期間を対象に実施し、日本域の細かい地形を反映した現象を適切に再現可能な水平分解能5kmのデータセットとして作成されている。

本研究では、過去事例の環境場の指標として、MSM(2006年以降の事例について使用)とDSJRA-55(2006年より前の事例について使用)を用いて作成した、地表面水蒸気フラックスベクトルを確認した。

Table 2 List of ensemble member names to be analyzed in each scenario

Historical climate simulation	+2K Future climate simulation	+4K Future climate simulation
• HPB_m001 • HPB_m002 • HPB_m003 • HPB_m004 • HPB_m005	• HFB_2K_MP_m101 • HFB_2K_MP_m102 • HFB_2K_MR_m101 • HFB_2K_MR_m102 • HFB_2K_MI_m102	• HFB_4K_MP_m101 • HFB_4K_MP_m102 • HFB_4K_MR_m101 • HFB_4K_MR_m102 • HFB_4K_MI_m102

Table 3 Spatial resolution and output time interval in Radar-AMeDAS

Data period	Spatial resolution	Output time interval
1998.4-2001.3	5km	1hour
2001.4-2003.5	2.5km	1hour
2003.6-2005.12	2.5km	30minutes
2006.1-	1km	30minutes

2.2 線状対流系抽出の流れ

本節では、停滞前線性線状対流系の解析を目指して、d4PDF05で出力されている降雨量を用いた、解析対象事例の抽出について説明する。d4PDF05では、5km四方の各格子において、30分毎に、30分積算雨量が出力されている。まず、30分毎の30分積算雨量から、30分毎の、その時刻における前3時間積算降雨量を計算した。さらに、前3時間積算降水量の分布に対して辻本ら(2017)の手法で楕円近似を行い、仲ら(2024)で用いられた閾値を満たす楕円雨域を全て抽出した。

具体的には、まず雨域の抽出にあたって、辻本ら(2017)の楕円による近似を参考に、線状対流系の雨域の長さ、幅、傾き等の形状特性を定量化した。定量化については、楕円で近似した場合の長軸、短軸、方位角により行った。線状対流系を構成する各メッシュの座標から、東西方向の分散 σ_x と南北方向の分散 σ_y を算出し、式(2.1)～式(2.5)によって、長軸 l 、短軸 s 、回転角 θ を得た。ただし、式(2.3)及び式(2.4)の C は95%確率長円を表す2.448を用いている。線状対流系抽出と楕円近似のイメージをFig. 1で示した。

$$\sigma_l = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + \sigma_{xy}^2}}{2}, \quad (2.1)$$

$$\sigma_s = \frac{\sigma_x + \sigma_y - \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + \sigma_{xy}^2}}{2}, \quad (2.2)$$

$$l = C\sqrt{\sigma_l}, \quad (2.3)$$

$$s = C\sqrt{\sigma_s}, \quad (2.4)$$

$$\tan\theta = \frac{\sigma_l - \sigma_x}{\sigma_{xy}}. \quad (2.5)$$

Table 4の左に示す雨域に対して楕円近似をした後、その楕円がTable 4の右に示す閾値を満たしていれば抽出した。

次に、抽出できた楕円雨域を同一事例ごとにまとめるという操作を行った。仲ら(2024)は目視で定性的に同一事例の判別を行っているが、本研究で扱うデータ数は膨大であるため、重複率と間欠時間という2つの指標を用いて定量的な定義を設け、同一事例を判別するという手法を採用している。重複率は、前後2つの楕円雨域が重なる部分の面積を、前後それぞれの楕円雨域の面積で除した値として定義される。間欠時間は前後2つの楕円雨域が抽出された時刻の差として定義される。そして、重複率が0.3以上(30%以上)かつ、間欠時間が2時間以下となる場合に、前後2つの楕円雨域は同一事例であると判断した。なお、楕円近似及び同一事例判定に用いたプログラムは、国土交通省国土政策総合研究所土砂災害研究部門から提供いただいた。

ここまでの操作が終了した段階で、抽出できた楕円雨域事例の例をFig. 2に示した。Fig. 2(A)は停滞前線性線状対流系のようである一方で、(B)はマルチセル、(C)は台風、(D)は寒冷前線の一部と見られ、本研究では解析対象としない、様々な気象現象が混ざったデータセットとなっていることが分かる。ここから、解析対象外の気象現象の事例を除いた、停滞前線性線状対流系の事例のみで構成されるデータセットの作成を目指した。

まず、台風が関連する雨域の事例を抽出・除外した。この際、Yoshida et al.(2017)による、格子間隔20km解像度のd4PDF(以下、d4PDF20と記す)での台風追跡データから、台風の中心の座標を取得し、それを楕円雨域の中心の座標と比較して、緯度差と経度差の両方が5度以内であれば、その楕円雨域の事例を台風関連事例と定義して、解析対象外とした。なお、d4PDF05はd4PDF20を力学的ダウンスケーリングしたものであり、同じアンサンブルメンバにおいて発生する台風は同一である。また、その軌道も概ね同一であるためこの手法で台風関連事例を抽出・除去

することができる。

次に、短時間事例の抽出・除去を行った。短時間事例とは、1時刻の楕円雨域のみで構成される事例、すなわち、3時間積算降水量で見た際に、楕円雨域が1時間以上持続しなかった事例である。このように、台風関連事例と短時間事例は定量的に、データセットから除外した。

最後に、台風関連事例と短時間事例を除いた、楕円雨域の事例のデータセットすべてに目を通し、目視で、停滞前線に伴う線状対流系を判別・抽出して、停滞前線性線状対流系のみで構成されるデータセットを完成させた。この操作においては、中北ら(2018)の梅雨豪雨の判定基準を参考にして作成したTable 5の指標を確認して線状対流系の判別を行った。この際、基準の指標を満たすかの判別が難しい場合は、解析対象としてデータセットに残している。なお、水蒸気フラックススペクトルと3時間積算降水量分布を共に表した図と、海面更正気圧と地表面相当温位を表した図から、これらの指標を確認している。

以上の操作により、d4PDF05の出力データを基にした、停滞前線に伴う線状対流系のみで構成されるデータセットが完成した。なお、一連の操作手順の概念図は、Fig. 3に示している。この操作により、過去気候再現シナリオ実験5678事例、2℃上昇シナリオ実験6614事例、4℃上昇シナリオ実験7628事例が線状対流系の事例として抽出できた。この停滞前線性線状対流系のためのデータセットを利用して、第3章で、d4PDF05における線状対流系の再現性確認を行い、第4章では、将来変化の解析を行っている。

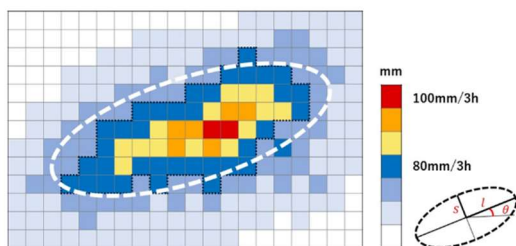


Fig. 1 Image of line shaped convective system extraction and quantification by elliptical approximation.

Table 4 Criteria for rain area and ellipse extraction in ellipse approximation

Rainfall threshold	Ellipse criteria
• Grid > 80mm/3hours	• $200\text{km}^2 < \text{Area} < 12,500\text{km}^2$
• Maximum > 100mm/3hours	• Major axis > 35km
	• Axis ratio > 2.5

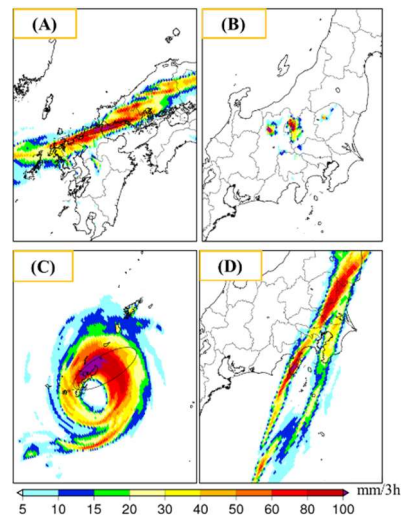


Fig. 2 Examples of various weather phenomena extracted by the ellipse extraction operation in d4PDF05.

Table 5 Criteria for extracting line-shaped convective systems by looking

Check the following
A) There is a stagnant line-shaped rainfall area.
B) Any typhoons and atmospheric depression aren't existence near the rainfall area.
C) The horizontal gradient of equivalent-potential temperature at the ground surface is large.
D) Water vapor flux is supplied from the south to the rainfall area.

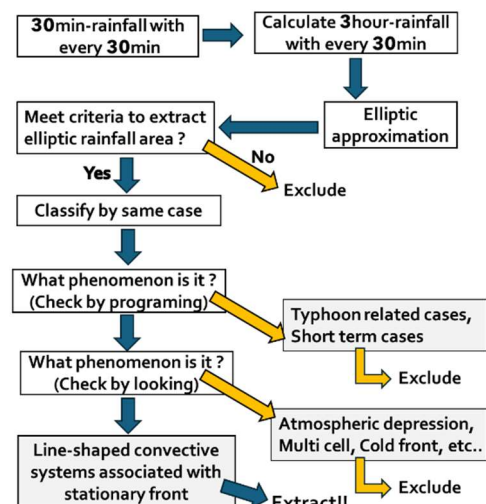


Fig. 3 Process to extract line-shaped convective systems associated with stationary front.

3. d4PDF05における線状対流系の再現性確認

d4PDF05の5kmという解像度における、線状対流系の表現程度を確かめるために、過去実際に発生し、大きな災害をもたらした重要な線状対流系事例と類似した現象がd4PDF05で再現されているかを目視で定性的に確認した。類似事例はd4PDF05の出力データから計算した3時間積算降水量分布を用いて確認し、抽出にあたっては、線状対流系の発生場所と雨域の形状が、過去事例の解析雨量による3時間積算降水量分布と類似することを基準とした。Table 6では、類似事例が抽出できた、過去事例の一覧を示した。各過去事例について類似事例は複数抽出され、Fig. 4ではその中でも特に再現状態が良好なものを一例として示した。Table 6内右部では、掲載した類似事例のd4PDF05上でのアンサンブル名と日付を示した。

この抽出操作の結果、d4PDF05において、様々な地域や時空間スケールで発生した過去事例との類似事例が再現されたことを確認することができた。特に、事例(E)亀岡豪雨や事例(K)九州北部豪雨は、非常に局所的な空間スケールで線状対流系が発生した事例であったが、d4PDF05でよく似た形状の雨域を持った現象の再現を確認することができた。従って、格子間隔5kmという解像度を持ったd4PDF05は停滞前線に伴う線状対流系をある程度良好に再現可能であり、線状対流系の将来予測評価に使用しても差し支えないと考えられる。また、類似事例抽出にあたっては、線状対流系発生地域と雨域形状のみに着目したが、線状対流系の時間スケールや、周囲の環境場まで類似した事例の再現も確認できた。逆に、雨域の形状や時空間スケールがある程度類似して再現できているにもかかわらず、周囲の環境場が異なっていた事例も確認できた。このことは、過去に深刻な災害をもたらした線状対流系が異なる環境場でも発生する可能性があることを示唆している。

Table 6 The list of past observation cases in real and similar cases in d4PDF05

No	Region	Observation by AMeDAS	Similar cases in d4PDF05	
		Date	Ensemble name	Date
A	Nasu	1998/8/27	HFB_2K_MI_m102	2076/8/31
B	Niigata and Fukushima	2004/7/13	HFB_4K_MP_m102	2092/7/8
C	Fukui	2004/7/18	HFB_2K_MI_m102	2082/7/17
D	Kani	2010/7/15	HFB_4K_MP_m102	2061/7/9
E	Kameoka	2012/7/15	HPB_m004	1998/8/17
F	Uji	2012/8/14	HPB_m001	1971/8/29
G	Shimane	2013/8/24	HFB_4K_MP_m102	2069/8/17
H	Fukuchiyama	2014/8/17	HFB_2K_MR_m102	2053/7/31
I	Hiroshima	2014/8/20	HFB_4K_MR_m102	2094/8/23
J	Iburi	2014/9/11	HFB_4K_MR_m101	2080/8/5
K	Northern Kyushu	2017/7/05	HPB_m005	2010/7/22
L	Kumagawa	2020/7/14	HFB_2K_MP_m101	2032/7/21

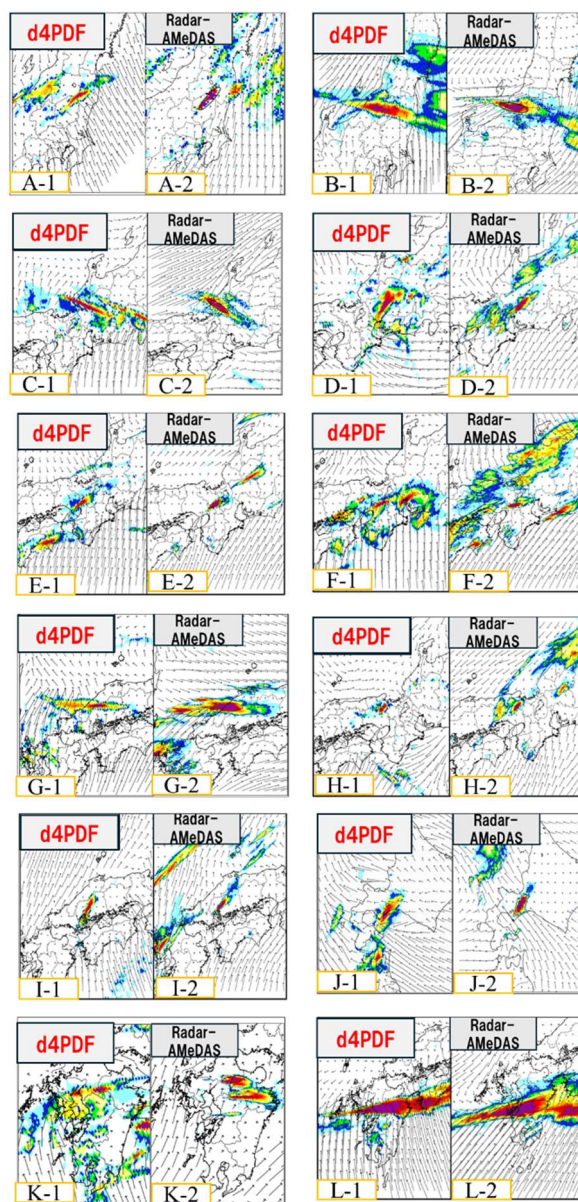


Fig. 4 (1)Past real cases in Radar-AMeDAS and (2)Similar cases in d4PDF05 at (A)Nasu, (B)Niigata and Fukushima, (C)Fukui, (D)Kani, (E)Kameoka, (F)Uji, (G)Shimane, (H)Fukuchiyama, (I)Hiroshima (J)Iburi, (K)Northern Kyushu, and (L)Kumamoto.

4. 線状対流系の将来変化予測

本章では、d4PDF05 から作成した停滞前線に伴う線状対流系のデータセットを使用して、線状対流系の将来変化の評価を行う。5.1 節では、線状対流系の発生頻度に関する議論を行っている。また、5.2 節では線状対流系の地域性に関する将来変化の評価を行い、続く 5.3 節では線状対流系の発生時期に関する将来変化の評価を行い、最後に 5.4 節では線状対流系の継続時間と積算降雨量の将来変化に関する評価を行う。

4.1 発生頻度

本研究においてd4PDF05の出力から抽出できた、過去気候再現シナリオ実験で5678事例、2℃上昇シナリオ実験で6614事例、4℃上昇シナリオ実験で7628事例という線状対流系の事例数から、d4PDF05における線状対流系の発生頻度が温暖化の進行に伴って増加するという傾向が確認できた。d4PDF05における各シナリオ実験の発生事例数を比較すると、過去気候再現シナリオ実験と比較して、2℃上昇シナリオ実験は $6614 \div 5678 \approx 1.16$ 倍、4℃上昇シナリオ実験は $7628 \div 5678 \approx 1.34$ 倍となっていた。既往研究として紹介したNaka and Nakakita(2023)ではNHRCM05の過去気候再現シナリオ実験(20年間分×2アンサンブル=40年間分)、RCP2.6シナリオ(2℃上昇シナリオに相当)実験(20年間分×1アンサンブル)、RCP8.5シナリオ(4℃上昇シナリオに相当)実験(20年間分×4アンサンブル=80年間分)を用いて線状対流系の解析が行われている。この研究での線状対流系の抽出のための判断基準が厳しい。線状対流系の発生頻度に関して、本研究において抽出したものと単純な比較はできないが、その将来変化の倍率という観点から既往研究と比較を行った。NHRCM05の線状対流系の発生頻度は、過去気候再現シナリオ実験と比較して、RCP2.6シナリオ実験では1.2倍、RCP8.5シナリオ実験では1.5倍以上となっており、温暖化の進行に伴う頻度の増加傾向が確認できた。d4PDF05においてはこの結果ほど顕著な増加傾向は見られなかったものの、多アンサンブルのデータにおいても線状対流系の増加傾向が確認できた。既往研究と同じ傾向が得られたことから本研究における抽出結果における傾向も尤もらしく、まして既往研究より大量のアンサンブル数から得られている結果であるため、統計的な有意性も高いと考えられる。

4.2 地域性

日本のどの地域で線状対流系の発生頻度が高いかという地域性に関して評価を行うため、抽出した停滞前線性線状対流系の事例に対して空間頻度分布図を作成した。具体的には、各事例における最初の時刻に楕円近似された格子を全て記録し、その操作を全ての事例について行った後に、各格子における記録された回数(頻度)の空間分布を出力している。以上の手法で作成した、d4PDF05における、線状対流系の空間頻度分布をFig 5の3つの図に示した。それぞれd4PDF05の(左)過去気候再現シナリオ(以下HPBと記す)、(中央)2℃上昇シナリオ実験(以下HFB_2Kと記す)、(右)4℃上昇シナリオ実験(以下HFB_4Kと記す)における5アンサンブル(300年間分)ずつの発生頻度の空間分布を示している。これらの図から、線状対

流系の地球温暖化に伴う将来変化に関して、太平洋側では目立った増加傾向が見られない一方、日本海側で顕著な増加傾向を見て取ることができる。また、HPBでは線状対流系の発生が珍しい北日本地域(東北地方・北海道地方)においても、将来気候下では線状対流系の発生頻度が高くなることが分かった。元来大雨の発生頻度が低い北日本では、治水インフラが脆弱であるため、その強靱化を急ぐ必要がある。

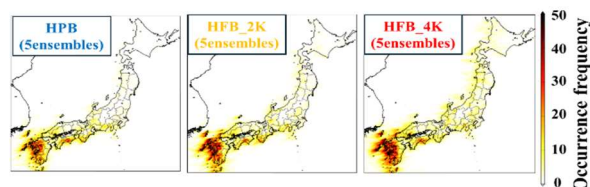


Fig. 5 Future change about occurrence religion of line-shaped convective systems in d4PDF05.

4.3 発生時期

線状対流系が発生する時期の地球温暖化に伴う将来変化を評価した。具体的には、6～8月の各月を上旬・中旬・下旬にそれぞれ3分割し、1年あたりの、線状対流系の旬別発生数が、どう将来変化するか調べるため、Fig. 6を作成した。またそれに際して、検定統計量 $Z = (\text{群1平均値} - \text{群2平均値}) \div \text{標準誤差}$ を用いて、HFB_2KとHFB_4Kにおける線状対流系の旬別発生数をHPBにおけるそれと比較し、検定を行った。

その結果、HFB_2Kでは7月中旬のみに、HFB_4K下では6～8月の多くの旬で将来増加傾向が見られ、特に6月上旬と7月中旬における増加傾向が顕著であった。日本本土における梅雨は通常6月上旬から7月中旬にかけての時期に訪れることを踏まえると、将来気候下では、梅雨前線が活発な時期が長期化することを示唆する結果であると言える。

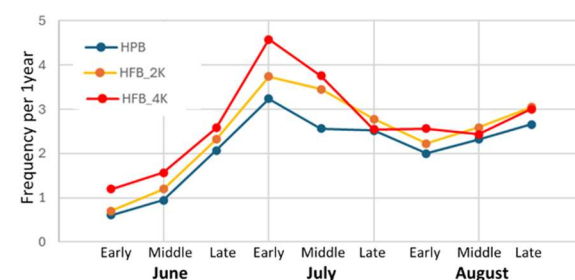


Fig. 6 Future change about occurrence season of line-shaped convective systems in d4PDF05.

Table 7 Significant check about future change of occurrence season. Red circle means significant increase and x-mark means not significant.

month	June			July			August		
	1~10	11~20	21~30	1~10	11~20	21~31	1~10	11~20	21~31
+2K	×	×	×	×	○	×	×	×	×
+4K	○	○	×	○	○	×	○	×	×

4.4 継続時間と積算雨量

停滞前線に伴って発生する線状対流系の1事例あたりの継続時間と積算雨量の将来変化に関する予測評価を行った。なお、継続時間と積算雨量はそれぞれ以下の式(4.1)と式(4.2)で定義した。

継続時間 $\equiv$ 抽出終了時刻 - (抽出開始時刻 - 3) (4.1)

積算降雨量 $\equiv$ 抽出開始時刻の2時間前から
終了時刻の前1時間雨量の積算値 (4.2)

Fig 7では左部のヒストグラムに積算雨量別で見た線状対流系の発生頻度を示し、上部のヒストグラムに継続時間別で見た線状対流系の発生頻度を示した。また中央部には、1事例ごとに、縦軸に積算雨量、横軸に継続時間を取り、プロットした分布図を示した。まず、左部と上部に示したヒストグラムから、温暖化の進行に伴って、線状対流系1事例あたりの積算雨量は増加、継続時間は長期化する傾向が見られた。

次に継続時間と積算雨量を表した中央の分布図から、分布の上部の裾野が、温暖化が進んだシナリオになるにつれて徐々に広がっており、継続時間あたりの積算雨量が温暖化に伴って増加していることが読み取れた。すなわち、将来気候下では、降雨強度がより強い線状対流系の発生頻度が増加すると言える。

また、緑円で示す過去事例の分布が過去気候シナリオでの事例の分布内に収まっており、d4PDF05が線状対流系を定量的にも良好に再現可能なことが確認できた。なお、この過去事例は、仲ら(2024)による過去実際に発生した線状対流系(2006年から2020年における計242事例)の解析雨量について、本研究で定義した同一事例の決定基準を適用して作成した。

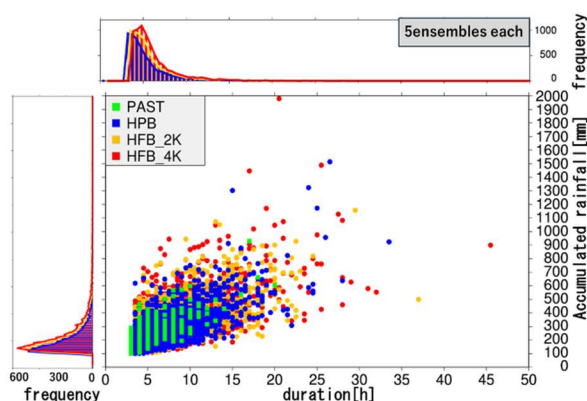


Fig. 7 Duration (horizontal axis) and accumulated rainfall (vertical axis) for each line-convective system. Past cases (green circles), HPB (blue), HFB_2K (yellow), and HFB_4K (red). The upper and left figures show histograms of each indicator.

5. まとめ

新しい領域気候モデル実験である5km 解像度のd4PDF05が、定性的かつ定量的に線状対流系を良好に再現可能であることを確認できた。そしてその上で、線状対流系は温暖化に伴って頻度・強度共に増加し、災害リスクが増大する方向へ将来変化することを示した。今後、全アンサンブルの線状対流系抽出を終えた上で解析を行い、メカニズム的観点からの線状対流系の再現性確認や、将来変化に関するその他の指標についての検証を進めていく予定だ。

謝 辞

本研究は気候変動予測先端研究プログラム領域課題4「ハザード統合予測モデルの開発」(JPMXD0722678534)の助成を受けて実施されました。

参考文献

- 辻本浩史・増田有俊・真中朋久(2017): 現業レーダデータを用いた土砂災害事例における線状降水帯の抽出, 砂防学会誌, 6, pp.49-55
- 中北英一・宮宅敏哉・Kim Kyoungjun・木島梨沙子(2012): 気候変動に伴う梅雨期の集中豪雨の将来変化に関する領域気候モデルを用いた基礎的研究, 土木工学論文集B1(水工学) Vol68, No4, I_427-I_432
- 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), 74(4), I_139-I_144
- 仲ゆかり・福田果奈・中北英一(2024): 時空間特性を考慮した停滞前線性線状対流系の過去事例における発生・発達条件の統合解析, 土木学会論文集特集号(水工学), 80 (16):23-16006
- H.Kawase, M.Nosaka, S.I.Watanabe, K.Yamamoto, T.Shimura, Y.Naka, Y.-H.Wu, H.Okachi, T.Hoshino, R.Ito, S.Sugimoto, C.Suzuki, S.Fukui, T.Takemi, Y.Ishikawa, N.Mori, E.Nakakita, T.J.Yamada, A.Murata, T.Nakagawa, and I.Takayabu(2023): Identifying robust changes of extreme precipitation in Japan from large ensemble 5-km-Grid regional experiments for 4K warming scenario, Journal of Geophysical Research: Atmospheres
- K.Yoshida, M.Sugi, R.Mizuta, H.Murakami, M.Ishii (2017): Future changes in tropical cyclone activity in high-resolution large-ensemble simulations, Geophysical Research Letters, Volume44,

Issue19,Pages9910-9917

Y.Naka and E.Nakakita(2023): Comprehensive future projections for the line-shaped convective system associated with Baiu front in Japan under RCP

scenarios using regional climate model and pseudo global warming experiments, Erontiers in Earth Science

(論文受理日：2024年8月30日)