

複数温暖化シナリオに基づく線状対流系の擬似温暖化実験と 影響メカニズムに関する解析

**Analysis on the Future Change of Line Shaped Extreme Rain-band and Its Mechanisms
by Using Pseudo Global Warming Experiment Under the Multi-scenario**

小坂田ゆかり・中北英一

Yukari OSAKADA and Eiichi NAKAKITA

Synopsis

A high-resolution pseudo global warming experiments were conducted for line-shaped convective system, 2012 Kameoka event and 2014 Hiroshima event, under the RCP8.5 and RCP2.6 scenarios. For 2012 Kameoka event, line-shaped rain band was gradually intensified while for 2014 Hiroshima event line-shaped rain band gradually disappeared as the warming scenario became higher. This was due to the fact that the weak rainfall area upstream of 2014 Hiroshima event was enhanced antecedently by the warming effect, and disrupted the environmental field for the occurrence of the line-shaped convection system as expressed such as CAPE and bulk Richardson number. It is indicated that line-shaped convective system is generated when thermodynamical and dynamical various factors are well balanced, and the effects of ambient disturbances should be taken in to account when we apply pseudo global warming experiment.

キーワード: 線状対流系, 梅雨前線, 地球温暖化, 擬似温暖化実験, メカニズム

Keywords: line shaped rain-band, Baiu front, global warming, Pseudo Global Warming experiment, mechanisms

1. 研究の背景と目的

近年, 我が国の雨季には集中豪雨が多発している。その中でも, 梅雨前線に伴って発生するバックビルディング型の線状対流系(以下, 単に梅雨豪雨とも記す)は, 積乱雲が次々と繰り返し発生して降水系全体として定常な状態となることで, 局所的なエリアに数時間から半日に渡って停滞する。最近の研究では, 同じ梅雨豪雨であっても, 梅雨前線に付随して発生する比較的時空間スケールの大きな前線付随型梅雨豪雨や, 梅雨前線から南に大きく離れた場所で発生する時空間スケールの小さな孤立局所型梅雨豪雨のように, 異なる複数のタイプの梅雨豪雨が存在することも明らかになってきている(小坂田ら, 2020)。

全球平均気温4°C上昇シナリオであるRCP8.5に基

づく5km解像度の領域気候モデル将来予測データを解析した研究によると, 地球温暖化で21世紀末には梅雨豪雨の発生地域が拡大することや雨量も増加すること等が予測されている(小坂田ら, 2020; Kanada et al., 2012; Osakada and Nakakita, 2018)。加えて, 近年では2017年九州北部豪雨や2020年球磨川氾濫豪雨など, 記録的な梅雨豪雨による被害が頻発しており, 将来変化予測に矛盾しない現象が現実で既に生じ始めている。こうした観測事実や将来予測を踏まえ, 梅雨豪雨という現象のメカニズムは何が普遍で何が温暖化で将来変化するかを解明することは, 喫緊かつ重要な課題である。

梅雨豪雨のように局所的現象のメカニズムを解析するためには, 雲解像気象モデルによる超高解像度数値計算が必要となる。気象モデルによる温暖化予測手法の1つとして, ある事例の環境場に気温等の変

数の温暖化差分を与えて、擬似的に温暖化環境場を作成して数値計算を行う擬似温暖化実験 (Pseudo Global Warming; 以下, PGWと記す) という手法が存在し, 梅雨豪雨に対してもいくつかの既往研究でPGWが行われてきた (Hibino et al., 2018; Nayak and Takemi, 2020; 小坂田・中北, 2020). 例えばNayak and Takemi (2020) は平成29年九州北部豪雨に対してPGWを行い, 将来気候では降雨強度が増加することや気温変化に対する降雨強度の変化率が異なることを示している. 小坂田・中北 (2020) は孤立局所型梅雨豪雨である2012年亀岡豪雨に対してRCP8.5シナリオでPGWを行い, 将来は降雨強度や総雨量が増加することを示し, そのメカニズムとして積乱雲の組織化構造が強化されるという力学効果が存在することを示している. しかし, そもそも梅雨豪雨という現象のメカニズムは未解明な部分が多くモデル表現が困難で, PGWへの適用例も十分に多くはない. また, 既往のPGW研究の多くは単一温暖化シナリオに基づいており, 温暖化効果と梅雨豪雨の変化との関連も十分に明らかになっていない.

そこで本論文では, 温暖化効果と梅雨豪雨の関連を明確にするとともに梅雨豪雨メカニズムの将来変化を解明を目指して, 小坂田・中北 (2020) の既往研究にRCP2.6シナリオ (気温上昇を2°C未満に抑えるシナリオ) を追加した. 加えて, 新たな事例として, 2012年亀岡豪雨と同じく孤立局所型梅雨豪雨である2014年広島豪雨も対象にPGWを行うことで, 2012年亀岡豪雨に対するPGW結果との比較を行った. そして, 各実験結果に関して環境場指標の観点から詳細に要因分析をするとともに, 本解析から得られた重要な知見について述べ, 今後の課題を提示することを本論文の目的とする.

2. 解析事例と実験設定について

2.1 解析事例について

2012年亀岡豪雨は典型的な線状対流系事例であり, 京都府の亀岡市を中心に局所的に猛烈な降雨をもたらした. 2012年7月15日00:00頃から神戸の六甲山を起点に次々と積乱雲が生まれて線状対流系が発生し, 亀岡市では外水氾濫や土砂崩れが発生した. この地域は紀伊水道と大阪湾を通過して南から豊富な水蒸気が流入することで豪雨が発生しやすい場所である. この地域の豪雨は, 大阪湾の淀川に沿ってしばしば亀岡豪雨のような線状の降水帯として形成されるため「淀川チャンネル型豪雨」として知られている (中北, 1990; 横田, 1992など).

一方の2014年広島豪雨も典型的な線状対流系事例であり, 大規模な土砂災害により70名以上の死者を

出した記録的な豪雨であった. 日本海上に停滞した秋雨前線 (秋雨前線時にも線状対流系が発生するため, 本論文では広島豪雨も梅雨豪雨と記す.) へ流れ込む水蒸気が豊後水道を通過して広島エリアへ供給され, 21:00頃から降雨が発生, 20日00:00頃から線状対流系が発生・停滞し始めた. この広島豪雨が発生した地域も, 豊後水道からの水蒸気供給によって豪雨が起こりやすい地域である.

Fig. 1に, 気象庁の解析雨量から作成した2012年亀岡豪雨と2014年広島豪雨の積算雨量の空間分布図を示す. 亀岡豪雨は2012年7月14日21:00 JST ~ 15日06:00 JSTの9時間, 広島豪雨は2014年8月19日18:00 JST ~ 20日05:00 JSTの11時間 (どちらも本解析でのモデル計算期間) の積算雨量である. 両事例の線状降水帯ともに, 長さが100km程度, 幅が数10km程度で, 3~5時間に渡って停滞した, 同様の時空間スケールの現象であった.

2.2 実験設定

本実験では, 大気モデルにCReSS3.4.3 (Tsuboki and Sakakibara, 2002) を用いた. CReSSはメソスケール現象の高精度なシミュレーションを目的とした雲解像の非静力学・準圧縮の大気モデルであり, バージョン3.4.3は雲粒子の落下速度も考慮されたモデルになっている. 水平解像度は全ての実験で500m, 鉛直解像度はストレッチングした平均250mとした. 初期値及び境界値には3時間毎の気象庁メソ客観解析値を用い, 海面水温は気象庁NEAR-GOOSの日平均海面水温を用いて計算を行った.

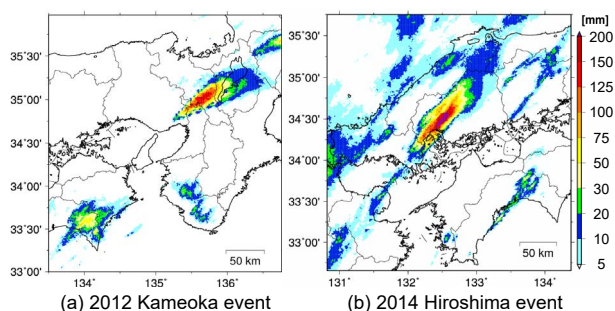


Fig. 1 The spatial distribution of accumulated rainfall calculated with Radar-AMeDAS rainfall data by Japan Meteorological Agency for (a) 2012 Kameoka event and (b) 2014 Hiroshima event. Accumulation period are (a) 9-hour (21:00 JST on 14th ~ 06:00 JST on 15th, July 2012) and (b) 11-hour (18:00 JST on 19th ~ 05:00 JST on 20th, August 2014).

2012年亀岡豪雨の計算は7月14日21:00JSTから15日06:00JSTまでの9時間、2014年広島豪雨の計算は8月19日18:00JSTから20日05:00JSTまでの11時間行い、初め3時間は降雨発生前のスピニングアップ期間とした。計算領域は、Fig. 2のように線状対流系発生場所と風上領域、そして紀伊水道と豊後水道の水蒸気流入経路を含む約300km四方の領域とした。計算条件の詳細はTable 1に示す。

疑似温暖化実験は現在再現実験の初期・境界値に温暖化差分を与えて計算する。温暖化差分には全球大気モデルMRI-AGCM3.2Sの結果を用い、温暖化シナリオはRCP8.5とRCP2.6の2つを用いた（以下、それぞれのシナリオに基づく実験をRCP8.5実験、RCP2.6実験と記す）。MRI-AGCM3.2SはCMIP5予測の3種類の海面水温（SST）分布と全平均の4種類のSST分布を用いてアンサンブル計算が行われており、今回は平均平均SST分布の結果を用いた。変数は月平均の温位 θ 、水蒸気混合比 q_v 、SSTを用い、将来（2075～2099年）と現在（1979～2003年）の25年平均値の差を温暖化差分とした。亀岡豪雨に関しては7月平均値、広島豪雨に関しては8月平均値の各変数をそれぞれ差分として与えた。

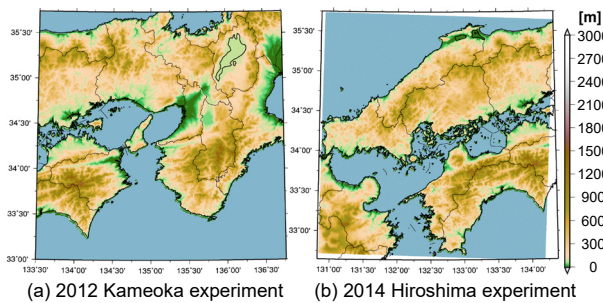


Fig. 2 Calculation domains for (a) 2012 Kameoka event and (b) 2014 Hiroshima event experiments.

Table 1 Experimental settings

Settings	
Resolution	Horizontal: 500m, Vertical: 250m (average)
grids	2012 event: Horizontal: 600 x 600, Vertical: 61 levels 2014 event: Horizontal: 620 x 660, Vertical: 61 levels
Height	Lowest level: 150m, Top: 15250m
Initial & boundary data	JMA-Meso analysis, NEAR-GOOS
Sub-grid turbulence process	The 1.5 order closure with TKE
Cloud microphysics process	The bulk cold rain parameterization with solving the tendency equation of number densities of ice phase hydrometeors (ice, snow and graupel)

3. 実験結果

3.1 降雨分布の将来変化

Fig. 3に、解析雨量及び現在・RCP2.6・RCP8.5各実験における亀岡豪雨（7月15日00:00～06:00）と広島豪雨（8月19日21:00～20日03:00）の6時間積算雨量を示す。

まず、現在再現実験は観測の雨域形状・雨量共に良く表現できていると言える。一方、将来変化は興味深いことに、亀岡豪雨実験では将来気候で徐々に雨量が増加しているのに対して、広島豪雨の実験結果では温暖化シナリオが強くなるにつれて徐々に線状の雨域が形成されなくなっていっていることがわかる。亀岡豪雨実験に対するPGWでは、温暖化シナリオとともに徐々に総雨量が増加しているにも関わらず、広島豪雨の結果は全く反対の結果を示していると言える。また、広島豪雨実験では温暖化程度が強まるにつれて徐々に梅雨豪雨が弱まっていることから、単にモデル計算上の問題で雨域が発生しなくなったのではなく、梅雨豪雨が発生するための環境場に対して温暖化効果が何かしらの影響を与えたことが示唆され、非常に興味深い結果を得た。

そこで次に、広島豪雨実験で温暖化程度が強まるにつれて徐々に梅雨豪雨が弱まった要因を解析するため、梅雨豪雨発生に重要な環境場指標について解析を行った。

3.2 環境場指標の解析

本解析では環境場指標として、対流有効位置エネルギー（Convective Available Potential Energy; CAPE）とバルクリチャードソン数（Bulk Richardson Number; BRN）を解析した。CAPEとBRNはそれぞれ下記の式で表される。

$$\text{CAPE} \equiv g \int_{LFC}^{LNB} \frac{T' - T}{T} dz \quad (1)$$

$$\text{BRN} = \frac{\text{CAPE}}{(\Delta u)^2 + (\Delta v)^2} \quad (2)$$

g は重力加速度、 T は環境場の気温、 T' は気塊の気温を表す。LFC（Level of Free Convection；自由対流高度）は、断熱的に持ち上げられた気塊の気温と環境場の気温が一致し、これより上空では浮力のみで気塊が上昇できる高度、LNB（Level of Neutral Buoyancy；平衡高度）は、持ち上げられた気塊の気温と環境場の気温が再び一致し、これより上空では気塊に沈降力が働く高度のことである。本解析では約250m（モデル2層目）から気塊を持ち上げたとし

てCAPEを算出した．一方，BRNはCAPEと風の鉛直シアアの比を表す指標であり， Δu と Δv は既往研究 (Unuma and Takemi, 2016) を参考に，地上から約6200m (モデル30層目) と約250m (モデル2層目) における差として計算した．

CAPEは値が大きいほど大気が不安定であり，BRNはその値によって降水システムの形態が分類できることが知られている (Unuma and Takemi, 2016 ; Bluestein and Jain, 1985) . Bluestein and Jain (1985) は，バックビルディング型の線状降水帯ではBRNが約32となることを示しており，またUnuma and Takemi (2016) でも線状の準停滞降水システムに対

するBRNは約32.8の値を取ることが示されている．すなわち，本解析の対象事例である亀岡豪雨や広島豪雨は約32のBRN値を取ることが期待される．

Fig. 4に，亀岡豪雨(上，15日00:00)と広島豪雨(下，20日00:00)のCAPEの空間分布を示す．(a) 現在再現実験，(b) RCP2.6実験，(c) RCP8.5実験で，モデル最下層(地上約150m)の風も矢印で示した．まず，亀岡豪雨では全ての実験で，紀伊水道から高いCAPEを持つ気塊が流入している．一方の広島豪雨は，現在とRCP2.6実験では豊後水道から高いCAPEを持つ気塊が流入している一方，RCP8.5実験では全く流入していない．

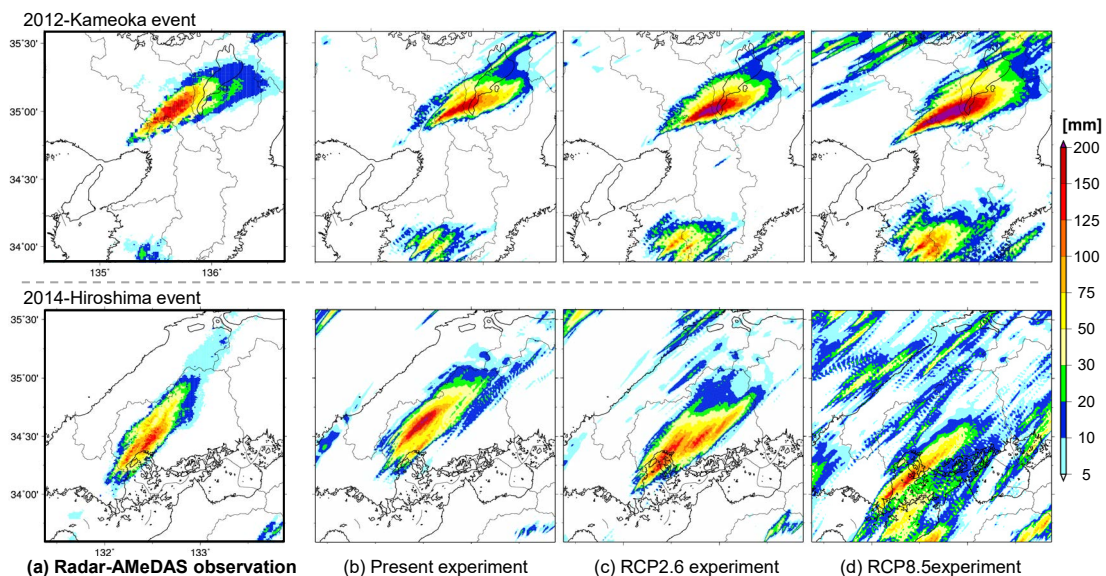


Fig. 3 The spatial distribution of accumulated rainfall for (a) Radar-AMeDAS observation, (b) present, (c) RCP2.6 and (d) RCP8.5 experiments. Upper is 2012 Kameoka event (00:00 JST on 15th ~ 06:00 JST on 15th, July) and lower is 2014 Hiroshima event (21:00 JST on 19th ~ 03:00 JST on 20th, August).

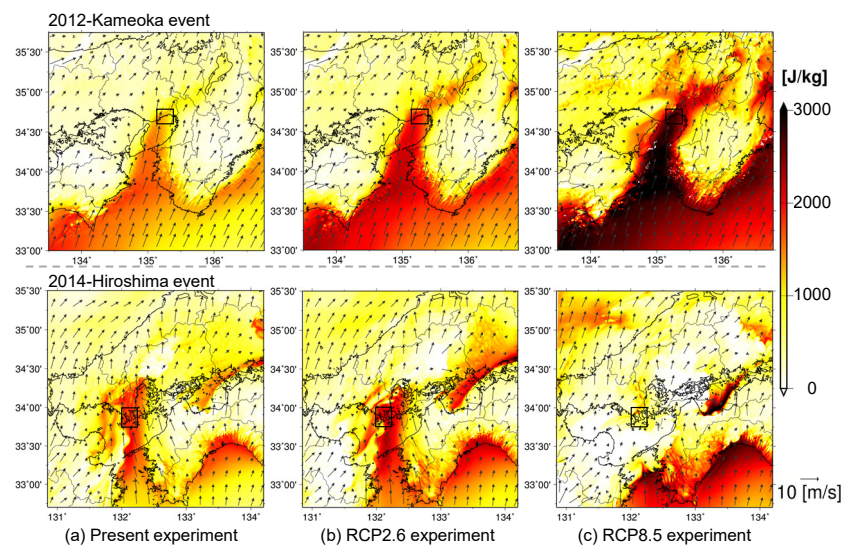


Fig. 4 The spatial distribution of CAPE and surface wind vector for (a) present, (b) RCP2.6 and (c) RCP8.5 experiments. Upper is 2012 Kameoka event and lower is 2014 Hiroshima event.

また、Fig. 5に亀岡豪雨、Fig. 6に広島豪雨の、豪雨発生場所の上流域（Fig. 4の黒枠内領域平均）におけるBRNの、計算開始から終了までの時系列を示す。赤線は32.8（Unuma and Takemi, 2016）の値で陰影は ± 5 の幅を示している。また、黒い点線は各実験における梅雨豪雨発生から消滅までのおおよその時間を示している。

まず、Fig. 5とFig. 6からわかるように、梅雨豪雨が発生した全ての実験で、さらに梅雨豪雨が発生している時間において、32.8付近の値が継続していた。このことは、梅雨豪雨という現象がモデル内で発生するうえでの必要条件を示唆していると考えられ、重要な傾向を示していると言える。さらに、現在再現実験だけでなく擬似温暖化実験でも梅雨豪雨が発生した実験ではBRNが32.8付近で持続していた。これはBRN指標で見ると梅雨豪雨が発生するための環境場条件は将来気候でも変化しないという非常に重要な可能性を示唆している。加えて、梅雨豪雨はBRNが約32という指標で表されるように、熱力学的・力学的な要素（ここではCAPEと風の鉛直シア）が複雑に絡み合い、それらが微妙なバランスで成り立った時に初めて発生する現象であるという事も強調している結果であると言える。

一方で、梅雨豪雨が発生しなかった広島豪雨のRCP8.5実験ではBRN値は大きく変動しており、約32という適切なBRN値にはなっていなかった。これらの結果から、広島豪雨実験においては温暖化程度が強まるにつれて梅雨豪雨が発生するための環境場が徐々に崩れ、RCP8.5実験では完全に崩れていたと考えられる。

3.3 周囲の雨域の影響

それでは、なぜ広島豪雨に対するRCP8.5実験では梅雨豪雨が発生するための環境場条件が崩れたのか。Fig. 7に、RCP8.5実験でのCAPEと降雨強度を示す。降雨強度は青いコンターで表し、観測で広島豪雨が発生し始める前の8月19日21:00、22:00、23:00での空間分布を示す。

21:00時点では豊後水道から高いCAPEを持つ気塊が流入しており、広島県付近や西の大分県付近でも降雨が見られる。時間が進むにつれて、西方から雨域が強まりながら豊後水道や広島県付近へと進行してきて、それに伴い、CAPEがどんどん消費されている様子が見て取れる。すなわち、対象とする梅雨豪雨の周囲、特に時空間的に上流に存在した弱雨域がPGWの温暖化効果で先に強化されてしまい、CAPEを消費（不安定度を解消）してしまったことで、梅雨豪雨が発生するための環境場条件が崩れていたことがわかる。Fig. 1からもわかるように、亀岡豪雨・

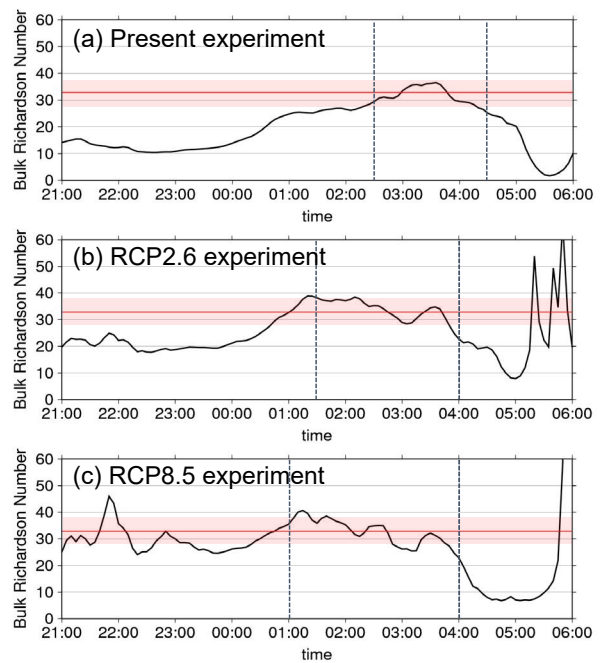


Fig. 5 Time series of BRN for 2012-Kameoka event's (a) present, (b) RCP2.6 and (c) RCP8.5 experiments. Red line represents BRN=32.8 and the shade represents the width of 32.8 ± 5 . Black dotted line represents approximately the start and end time of line-shaped heavy rainfall for each experiment.

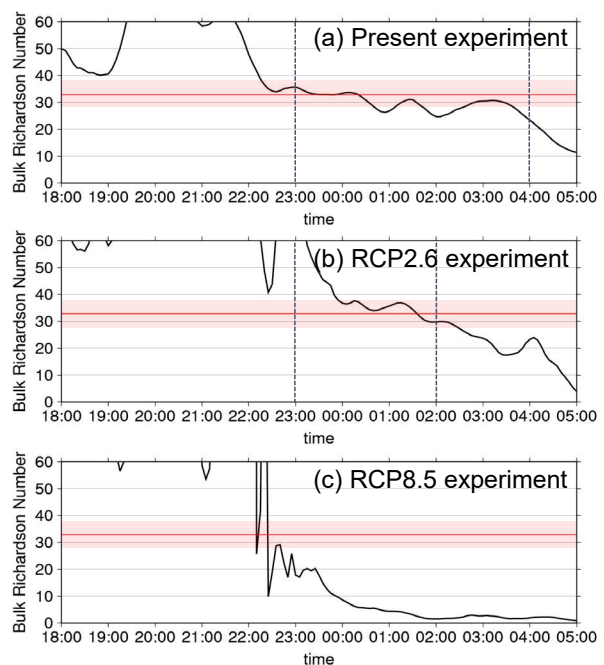


Fig. 6 Same as Fig. 5 but for the results of 2014-Hiroshima event experiments.

広島豪雨とともに非常に局所的な梅雨豪雨ではあるものの、広島豪雨は亀岡豪雨と比較して周囲にも弱雨域が存在しており、これらの弱雨域が本解析におけるPGWの結果に影響を与えたと言える。図は省略するが、広島豪雨のRCP2.6実験でも、RCP8.5実験ほどではないものの周囲の雨域が強化されてCAPEが消費されたことで、現在再現実験よりも弱い梅雨豪雨が実現されていた。

繰り返しになるが、梅雨豪雨という現象そのものが、BRNが約32という指標で表されるように、様々な熱力学的・力学的な要因が絡み合って上手くバランスして成り立った時に初めて発生する現象である。そして、Fig. 5とFig. 6で見たように、こうした現象としての特徴は温暖化した将来気候条件下であっても変化しない可能性が示唆された。そのため、擬似的に温暖化差分を与えて温暖化環境場を作成するというPGW手法においては、その環境場バランスが容易に崩れてしまう可能性があるとともに、対象とする現象の周囲に存在する擾乱への温暖化影響も十分に考慮する必要があるという、非常に重要な知見を得ることができた。

4. 広島豪雨実験の環境場指標の詳細解析

最後に本節では、広島豪雨実験におけるCAPEの変化について詳細に解析を行った。CAPEは環境場の気温鉛直プロファイル、気塊を持ち上げ始める高度での気温、そして下層水蒸気量で決まる。例えば、対流により大気が混合されて環境場の気温鉛直プロファイルは安定化方向に変化し、CAPEを減少させる。一方、下層に水蒸気が豊富に存在すると大気は不安定となり、気塊の気温の鉛直プロファイルがCAPEを増大させる方向に傾く。

Fig. 8に、広島豪雨実験での環境場及び断熱的に持ち上げた気塊の気温プロファイルの時間変化を示す。ただし、ここでは現在再現実験とRCP8.5実験の結果のみを示す。19日21:00から20日03:00までのプロファイルの色分けしており、実線で環境場の気温、点線で断熱的に持ち上げた気塊の気温を表している。これらの鉛直プロファイルは豪雨発生場所（東経132.0°～133.5°，北緯34.0°～35.25°）で領域平均した値である。

まず、現在実験では環境場と気塊の気温鉛直プロファイル共に大きな変化はない。一方のRCP8.5実験では、環境場の気温プロファイルは下層で安定化方向に少し傾いているものの大きな変化はなく、点線で示す気塊の気温鉛直プロファイルが20日00:00時点までに大きく傾きが変わっていることがわかる。すなわち、RCP8.5実験でのCAPEの減少は、気塊の気

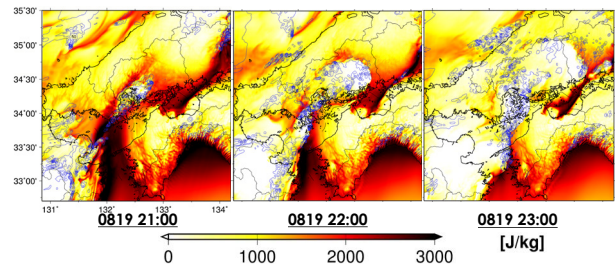


Fig. 7 The spatial distribution of CAPE (color) and rain-rate (contour) for 2014-Hiroshima RCP8.5 experiment.

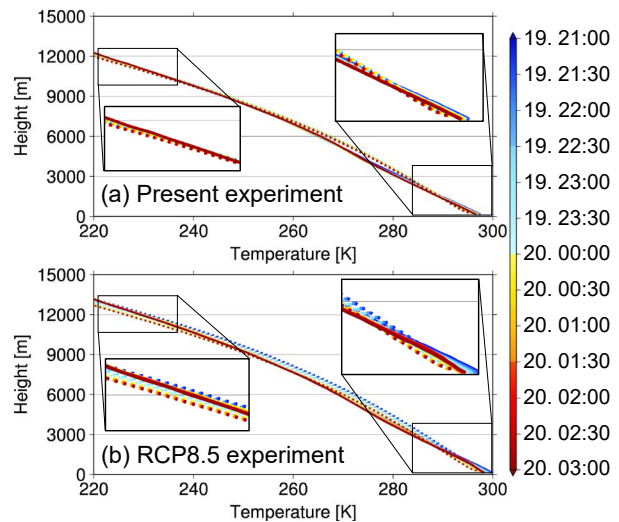


Fig. 8 Vertical temperature profile of environment (solid line) and lifted parcel (dotted line) for 2014-Hiroshima (a) present and (b) RCP8.5 experiments. The color represents the time.

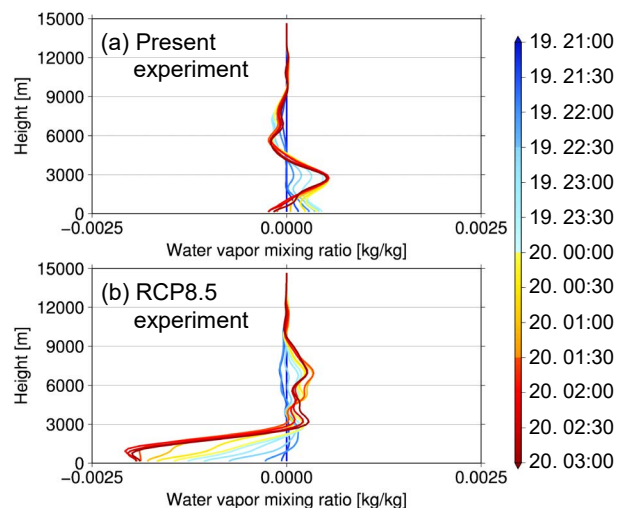


Fig. 9 Vertical profile of water mixing ratio for 2014-Hiroshima (a) present and (b) RCP8.5 experiments. The horizontal axis represents the difference from 21:00 JST on 19th.

温プロファイルが変化したことが主な要因であることがわかる。しかし、気塊の鉛直プロファイルは下層水蒸気量に加えて持ち上げ始める高度の気温にも依存するため、どちらの影響か不明瞭である。

そこで、Fig. 9に水蒸気混合比の鉛直プロファイルの時間変化を示す。ただし、Fig. 9は19日21:00時点からの差を表している。現在実験では19日21:00以降でも下層の水蒸気量に大きな減少は見られず、また時間が経過すると3000m付近の中層で対流による水蒸気量増加が見られる。一方、RCP8.5実験では下層で大きく水蒸気量が減少していた。

これらのことから、広島豪雨を対象としたRCP8.5実験では、線状対流系が発生・停滞し始める20日00:00時点までに周辺の弱雨域が先に強化されてしまい、水蒸気を大きく消費してしまったことでCAPEが減少した。加えて、Fig. 4に示したように力学場も変えてしまったことで豊後水道からの水蒸気の供給もなくなり、梅雨豪雨発生のための環境場を崩していたことがわかった。

5. まとめ

本論文は、温暖化効果と線状対流系の将来変化との関係を明確にするとともに、線状対流系のメカニズムそのものが将来どのように変化するのかを解明することを目指し、典型的な孤立線状対流系事例であった2012年亀岡豪雨と2014年広島豪雨を対象にして、全球平均気温約4°C上昇シナリオであるRCP8.5と気温上昇を2°C未満に抑えるシナリオであるRCP2.6に基づき擬似温暖化実験を行った。

本論文で行った擬似温暖化実験の結果、亀岡豪雨を対象にした実験では温暖化シナリオが強くなるにつれて徐々に線状対流系の雨量が増加し、温暖化効果で線状対流系が強化された。一方で、広島豪雨を対象にした実験では、温暖化シナリオが強くなるにつれて徐々に線状対流系が発生しなくなるという、亀岡豪雨実験とは正反対の結果を得た。

その要因を解析するため、環境場指標としてCAPEとバルクリチャードソン数BRNの解析を行った。その結果、広島豪雨の擬似温暖化実験で線状対流系が発生しなかった要因としては、広島豪雨発生時は時空間的上流に弱雨域が存在し、その弱雨域が温暖化効果によって対象とする線状対流系よりも先に強化されてしまい、不安定度指標であるCAPEを解消したためであることがわかった。CAPEが減少した主な要因は、強化された弱雨域が先に水蒸気を消費してしまったことに加え、周囲の雨域が発達したことで力学場が代わり、豊後水道を通過して陸域へ流入してくる南からの水蒸気の供給が減少したためであった。

同時に、線状対流系が発生していた全ての実験では、BRNが約32という値が維持されているという共通点も明らかになった。

以下に、本論文で得られた重要な知見についてまとめる。

- ・ 線状対流系はBRNが約32という、熱力学的・力学的な要素が極めて微妙にバランスした環境場で発生する現象である。そして、この線状対流系が発生するための必要条件は、温暖化した将来気候下でも変化しない。
- ・ そのため、PGWのように特定の変数に関して温暖化差分を与えることで擬似的に将来気候の環境場を作り出す実験では、線状対流系発生のための環境場条件が崩れやすい。すなわち、線状対流系にPGWを適用する際には、環境場に影響を与え得る周囲の擾乱の影響も十分に考慮する必要がある。

本論文では、広島豪雨に対する擬似温暖化実験で線状対流系が上手く発生しなかったものの、上記のようにPGWの課題、ひいては線状対流系が発生する際の環境場の不安定さとモデル表現の難しさが強調されたという点で、非常に意味のある実験であったと考えている。

一方で、広島地域の特徴について考えると、2014年広島豪雨が発生した地域は豊後水道から豊富な水蒸気が供給されるため、もともと非常に豪雨が発生しやすいエリアである。そして、こうした特徴は将来気候下でも変わらないと考えている。これは、亀岡豪雨が発生した地域も同様である。

もし将来、広島豪雨のような線状対流系が発生したらどうなるのか、そしてメカニズムはどのように変化するのか、を解明したい。そのために、今後はより多くの線状対流系事例を解析することで現象のメカニズムとその将来変化を明らかにすること、加えて、どのような事例に対しても将来気候下での線状対流系をモデル内で表現できる新たなPGW手法を構築することを目指す。そして、線状対流系が発生するための微妙な環境場条件を表すための新しい指標を創出することも目指していきたい。さらに、今回は気象モデルとしてCReSSを用いたが、異なる様々なモデルを用いて同様の解析を試みることも重要であろう。

高解像度計算が可能なPGW手法で将来変化予測と現象メカニズムの解明を並行して行う中で、それぞれの知見をフィードバックしながら現象の理解を深めていき、そこから演繹的に将来の現象を想像して理解していくことが非常に重要であると考えている。

謝 辞

本論文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」JPMXD0717935498の助成を受けました。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（2020）：線状対流系の擬似温暖化実験における解像度依存性と将来変化のマルチスケール解析, 土木学会論文集B1(水工学), 第76巻, 2号, pp.I_1-I_6.
- 小坂田ゆかり・中村葵・中北英一（2020）：梅雨期集中豪雨の時空間特性を考慮した強雨継続時間と積算雨量の将来変化の統計分析, 土木学会論文集B1(水工学), 第76巻, 2号, pp.I_7-I_12.
- 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, 京都大学工学部工学研究科博士論文.
- 横田寛伸（1992）：淀川チャンネル型大雨の比較解析, 日本気象学会関西支部年次講演予稿集, pp.14-18.
- Bluestein, H. B. and M. H. Jain (1985): Formation of mesoscale lines of precipitation – Severe squall lines in Oklahoma during the spring, *J. Atmos. Sci.*, Vol. 42, pp. 1711-1731.
- Hibino K., I. Takayabu, Y. Wakazuki and T. Ogata (2018): Physical responses of convective heavy rainfall to future warming condition: Case study of the Hiroshima event, *Frontiers in Earth Science*, Vol. 6, No. 35, doi:10.3389/feart.2018.00035.
- Kanada S., M. Nakano, and T. Kato (2012): Projections of future changes in precipitation and the vertical structure of the frontal zone during the Baiu season in the vicinity of Japan using a 5-km-mesh regional climate model, *J. Meteor. Soc. Japan*, Vol. 90A, pp. 65-86.
- Nayak S., and T. Takemi (2020): Clausius-Clapeyron scaling of extremely heavy precipitation: Case studies of the July 2017 and July 2018 heavy rainfall events over Japan, *J. Meteor. Soc. Japan*, Vol. 98, No. 6, pp. 1147-1162.
- Osakada Y., and E. Nakakita (2018): Future change of occurrence frequency of Baiu heavy rainfall and its linked atmospheric patterns by multiscale analysis, *SOLA*, Vol. 14, pp. 79-85, doi:10.2151/sola.2018-014.
- Tsuboki, K. and A. Sakakibara (2002): Large-scale parallel computing of cloud resolving storm simulator, *High Performance Computing, Springer*, pp. 243-259.
- Unuma, T., and T. Takemi (2016): A role of environmental shear on the organization mode of quasi-stationary convective clusters during the warm season in Japan, *SOLA*, Vol. 12, pp. 111-115, doi:10.2151/sola.2016-025.

(論文受理日：2021年8月31日)