

地形に起因する線状対流系の数値標高モデル感度実験 — 自己組織化構造におけるマルチフラクタル的性質 —

Sensitivity Experiments of Digital Elevation Models: toward the Identification of Topographically Induced Self-organization Structure of Linear Shaped Convective Systems

大野哲之・山口弘誠・中北英一

Akiyuki ONO, Kosei YAMAGUCHI, and Eiichi NAKAKITA

Synopsis

Complex topography can force lift up moisture air and cause convection initiation of linear-shaped convective systems. The current study conducted sensitivity experiments of the digital elevation models (DEM) for three heavy rainfall events to examine the topographic effects in terms of accumulated rainfall, and multifractality of water vapor flux and turbulence kinetic energy (TKE). The results showed that the accumulated rainfall of the experiments in which the terrain height was obtained by 30 m resolution DEM got greater than the one with coarser resolution DEM, especially near or the downstream side of the steep slope. The former experiments showed a much amount of topographically induced vertical moisture flux, causing the strong updraft and the resulting compensating flow. Multifractal analysis revealed that water vapor flux and TKE on the organization of rainfall systems show strong multifractality, which corresponds to increasing moisture inflow and upscaling the clouds.

キーワード： 線状対流系, 数値標高モデル, 積算降水量, 水蒸気フラックス, 乱流運動エネルギー, マルチフラクタル

Keywords: linear-shaped Convective Systems, digital elevation model, accumulated rainfall, water vapor flux, turbulence kinetic energy, multifractal

1. 研究背景

線状対流系は複数の積乱雲が有機的なつながりをもって帯状の降水域を形成し、数時間以上にわたり準停滞的な大雨をもたらす現象のことである。近年では線状対流系の発生に伴い中小河川流域で土砂災害や斜面災害が頻発している状況にある。本研究で扱う 1998 年南東北・北関東集中豪雨 (以下, N98), 2012 年京都亀岡豪雨 (以下, K12), 2014 年広島豪雨 (以下, H14) はそうした豪雨事例の一部である。これらの事例に共通する点は空間スケールが 100 km 程

度という, 所謂メソ γ スケールの現象であるということである (Fig. 1)。小坂田ら (2020) は, 梅雨期に発生する集中豪雨 (台風を除く) を, 前線付近で発生する空間スケールが比較的大きい「前線付随型」と, 前線からやや離れた場所で発生し空間スケールが比較的小さい傾向にある「孤立局所型」に分類した解析を行った。本研究で扱う事例群は後者のタイプに該当すると考えられる。このタイプの豪雨は発生において地形が重要な働きをすることが示唆されている。

一般に複雑な地形は空気塊の強制上昇や水平収束を促しその周辺で降水系を発生させることがあると

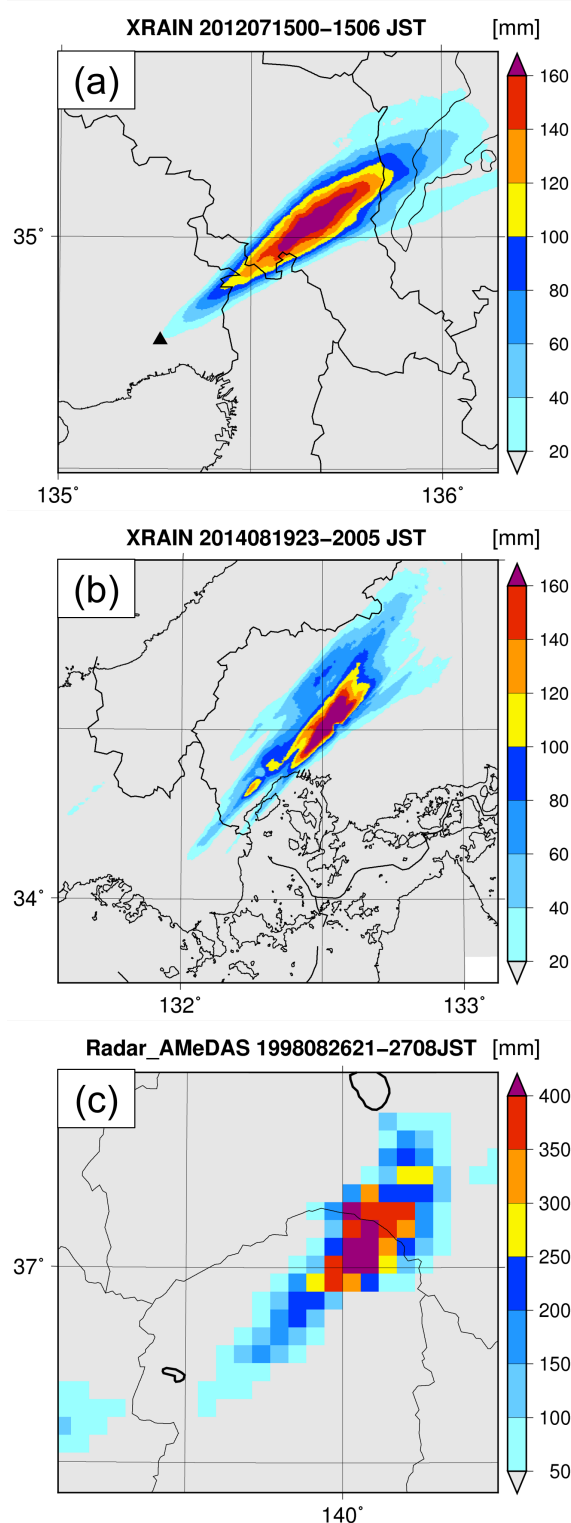


Fig. 1 6hr accumulated rainfall for (a) K12, (b) H14 obtained by xrain composite data. (c) shows 12hr accumulated rainfall for N98 obtained by radar-amedas analysis rainfall data.

考えられる。中北ら (2000) は N98 において観測されたレーダーエコー等に基づき、内部重力波の伝播が局所的な降水系の発生に寄与していたことを示唆

した。Chang et al. (2008) では地形による水蒸気の上向き輸送をモデル化し、水収支解析を通じて雲底高度以下におけるメソ対流系 (Mesoscale Convective Systems; MCS) 発達への寄与について議論している。こうした地形効果は日本に限らず、風の場の地形的なブロッキングにより強制上昇や水平収束が生じ、MCS を生じさせる原因になったとする事例も報告されている (Zhao 2015)。Takemi (2018) は、2017 年九州北部豪雨を対象に解像度の異なる数値標高モデル (Digital Elevation Model; DEM) を用いた感度実験を行い、地表面付近の水平収束量等が変化し積算降水量の大きな差異をもたらすことを指摘した。

一方で地形に誘起された強制上昇ないし水平収束が対流開始、積乱雲群の組織化、そして積算降水量へどのような影響を与えるか、という問題は自明なものではない。線状対流系という 3 次元的な現象を理解する上で、3 次元的な特徴量を算出することは、こうした問題に答えるヒントとなりうると思われる。そこで対象とする分布の値ごとにフラクタル次元を算出し定量化する概念であるマルチフラクタルが適用可能と考える。

マルチフラクタルは地球科学分野の様々な分野において非線形的な時空間パターンを特徴づけるべく研究がなされてきている (Schertzer and Lovejoy 1987; Tessier et al. 1993; Olsson and Niemczynowicz 1996; De Lima and Grasman 1999; Wolfensberger et al. 2017; Paz et al. 2018)。高分解能のデータセットに対してマルチフラクタルを適用する長所は、大気場のデータの特徴をスケーリング指数の変動として捉えることが可能になるということである。Chigirinskaya et al. (1994) は、不均質性 (マルチフラクタル性が強いことに対応) が熱帯大気構造の安定性を高めるという重要な役割を果たしていることを指摘した。彼らは、その根底にある力学的マルチフラクタル過程が自己組織化臨界構造の現れであると結論付けた。Lee et al. (2020) は、ドップラー S バンドレーダで得られた降雨強度データセットのマルチフラクタル性と雲解像モデルでのそれを比較した。高度 5 km のレーダーと数値実験のマルチフラクタル性は比較的一致する一方で、それ以下の高度では一致しないことが示唆されている。また、層状性と対流性の雨ではデータのマルチフラクタル性が異なるという性質を利用して事例を分類することが可能とされている (Tchiguirinskaia et al. 2011)。Nogueira et al. (2013) は、雲解像モデルによる地形性降雨の理想実験における雲の場に対してマルチフラクタル解析を行った。

本研究では、上述の線状対流系 3 事例について異なる解像度の DEM を適用した実験を行い、地域毎

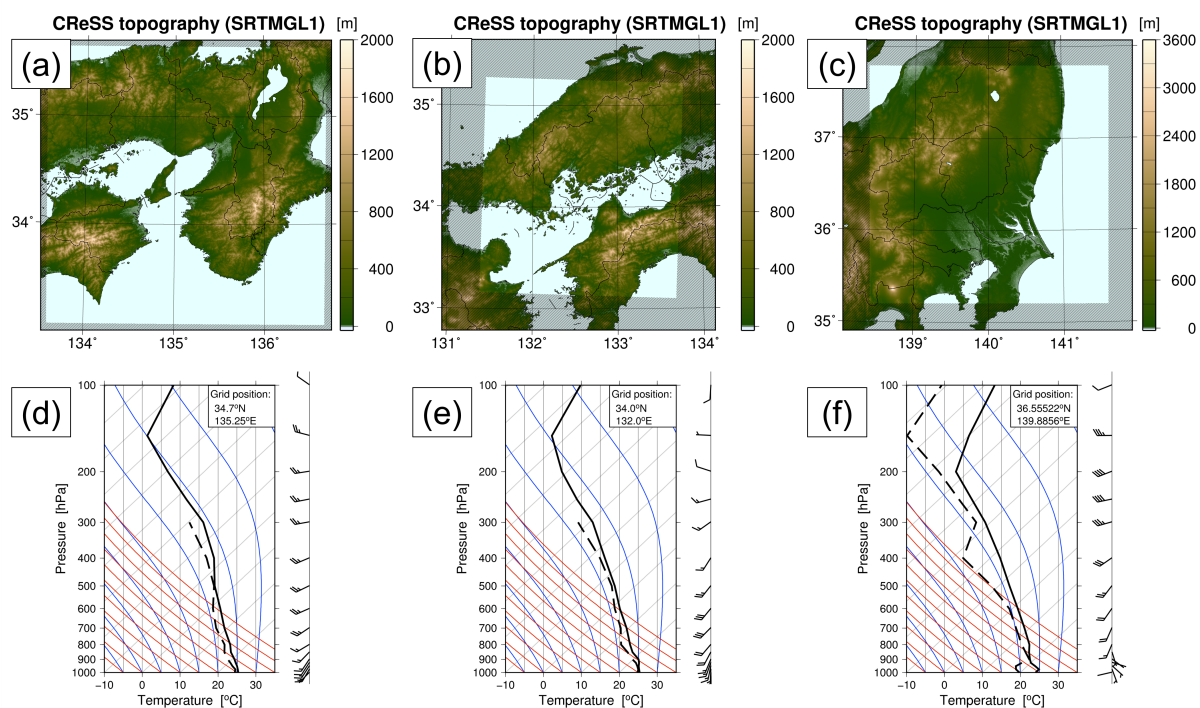


Fig. 2 (a), (b), and (c) illustrates the computation region of K12, H14, and N98, respectively. (d) shows the skew-T plot and the vertical profile of wind direction near the convection systems obtained by MSM analysis on 15UTC, 14 Jul. 2012. (e) and (f) was obtained by MSM analysis on 15UTC, 19 Aug. 2014, and DSJRA55 on 19 UTC, 26 Aug. 1998. Red and blue line indicates the dry and moist adiabatic line every 5 K. Full and half barb indicate 5, 2.5 m s^{-1} , respectively.

にモデル内の標高の変化に伴い線状対流系の雨量が変化するメカニズムの解析を行った。また線状対流系の対流が活発に発生する場所の水蒸気フラックス、乱流運動エネルギー (TKE) を対象としてマルチフラクタル解析を行い、対流発生から組織化に至るまでの現象を考察した。第2章では線状対流系の再現実験に関する実験設定、およびマルチフラクタル解析の手法について説明する。第3章では各実験やその解析の結果について説明する。第4章で解析を受けての考察、そして第5章で結論を述べる。

2. 研究手法

2.1 再現実験の実験設定

数値実験には雲解像モデル CReSS を使用した (Tsuboki and Sakakibara, 2002)。事例 K12 の初期値は 2012 年 7 月 14 日 12UTC の、H14 については 2014 年 8 月 19 日 09UTC の気象庁メソ客観解析値を使用した。また境界値も、初期時刻以降の客観解析値を利用して与えた。海面水温は気象庁 NEAR-GOOS を使用した。一方で N98 の初期値、および海面水温は 1998 年 8 月 26 日 17UTC における DSJRA55 のデー

タを与えた。

Fig. 2(a)~(c) に各事例の計算領域を示す。いずれの事例も共通して、水平解像度 500 m, 鉛直解像度 250 m(平均) とした。また渦粘性モデルには TKE を用いた 1.5 次のクロージャを、雲微物理過程には氷粒子の数濃度予測を含むバルク法パラメタリゼーションを用いた。ただし格子数は N12: $600 \times 600 \times 61$, H14: $620 \times 660 \times 81$, N98: $700 \times 700 \times 61$ とした。また側面境界スポンジ層数はそれぞれ 20, 100, 70 とした。Fig. 2(d)~(f) にメソ客観解析値、および DSJRA55 における豪雨が開始する直前の時間帯、位置での鉛直プロファイルを示す。K12, H14 ではほぼ全層で湿潤であり、下層では上空に向かって風向が時計回りであるため平均的に暖気移流であったことが示唆される。これは K12 では近畿地方の北側に梅雨前線が位置し、それに向かって下層ジェットが紀伊半島から大阪湾にかけてみられたこと、H14 では日本海上に停滞した秋雨前線へ流れ込む水蒸気が豊後水道を通して広島エリアへ供給されたことと対応する (小坂田・中北 2021)。

同時に鉛直シアがみられ、線状対流系が発生しやすい環境場であったことがわかる。一方で N98 の鉛

直プロファイル (Fig. 2(f)) では最下層で相対的に乾燥し、風向は反時計回りをしている。その上空では湿潤な層が見られることから、関東北部には局地的な前線が存在すると考えられる。ただし、降雨の集中した範囲はこの前線寄りもスケールが小さいため、形成された局地前線そのものが那須周辺の豪雨の原因であるとは結論できない (三隅 2001)。

本研究では DEM として、NASA が公開する SRTMGL1 (解像度約 30 m, 以下 ST1), および GTOPO30 (解像度約 1 km, 以下 G30) の 2 種類を使用した。いずれの DEM を用いた実験においても、モデル内の標高データは距離の重み付き平均を用いて作成した。

2.2 マルチフラクタル解析

マルチフラクタル性を推定する手法として大野ら (2022) の手法を適用する。解析領域をサイズ ε のピクセルに分割し、ゼロでない値を持つ各ピクセルにおける確率測度 $P_i(\varepsilon)$ を算出する。確率測度 $P_i(\varepsilon)$ の $(q-1)$ 次モーメントである分配関数 $Z_q(\varepsilon)$, および一般化次元 D_q を式 (1) のように定義する。

$$\begin{aligned} Z_q(\varepsilon) &\equiv \sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} \{P_i(\varepsilon)\}^q \\ D_q &\equiv \frac{1}{q-1} \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln Z_q(\varepsilon)}{\ln \varepsilon} \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 $N(\varepsilon)$ はゼロでない値を持つピクセルの総数である。パラメータ q を変化させて、分配関数 $Z_q(\varepsilon)$ に寄与する確率測度 $P_i(\varepsilon)$ の部分をチューニングすることが可能である。また一般化次元の定義より、 D_0 は有効な値が広がる領域全体のフラクタル次元を表している。サイズ ε を変えながら分配関数 $Z_q(\varepsilon)$ を算出し、分配関数 $Z_q(\varepsilon)$ がサイズ ε のべき乗則に近似されると仮定することで、最小二乗法を用いた一般化次元 D_q の推定が可能になる。解析対象の分布のうちパラメータ q でチューニングされた部分が空間的に均質に分布するか否かで分配関数 $Z_q(\varepsilon)$ の値は変化するため、空間的な偏り度合いの差が小さい場合、一般化次元 D_q のスペクトルは一定に近い値 (モノフラクタル) を示す。反対に偏り度合いの差が大きい場合、 D_q スペクトルは曲線 (マルチフラクタル) を示す (松下 2004)。

本研究では対象とする物理量のマルチフラクタル性の度合いを示す指標として、一般化次元の差 $\Delta D_q = D_2(D_1) - D_7$ を用いる。すなわち、マルチフラクタル指標が大きいほどマルチフラクタル性が強

く、小さいほどモノフラクタルに近いと判定することができる。

また、マルチフラクタル解析を行う前に地形に沿った座標系で出力されたデータを 500 m 解像度にアップスケールしてから解析を行っている。これはマルチフラクタル解析に使用するピクセルが等方性を仮定しているためである。

マルチフラクタル解析の対象変数は、式 (2) で定義される水蒸気フラックス、および雲解像モデル CReSS の予報変数の一つである TKE とした。ただし、 $''$ は平均的な流速からの偏差であることを示している。

$$\begin{aligned} QVF &= \rho q_v \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \\ TKE &= \frac{1}{2} (u''^2 + v''^2 + w''^2) \end{aligned} \quad (2)$$

3. 解析結果

3.1 積算降水量

Fig. 3(a)~(c) に、各事例の ST1 実験、G30 実験のモデル標高の差を示す。六甲山付近の南側斜面で ST1 実験の標高が下がり、山の尾根付近は標高が約 30 m 高くなっていることがわかる。また北摂山地も全体的に標高が高くなる傾向を示した。一方で山口県南東部から広島県西部にかけては標高が高くなった場所もあれば低くなった場所もあることがわかる。このことから予想されるのは、G30 実験に比べて ST1 実験では山と谷のコントラストがより明瞭になり斜面勾配がより急になったということである。さらに栃木県南西部から北部にかけて標高が高くなっていることがわかる。このことはより急勾配の斜面がモデル内に出現していることを意味する。

Fig. 3(d)~(f) に各事例における G30 実験の、(g)~(i) に ST1 実験の積算降水量を示す。K12 では主として北摂山地で対流が発生しその北東側の京都市周辺で大雨をもたらしていた。G30 実験では最大で約 190 mm の雨量が見られたのに対して、ST1 実験では 160 mm 以上の領域が拡大し最大値も約 240 mm と増加傾向を示した。H14 の G30 実験では広島市付近とその西側に 2 本の降水域が見られていた。これは降水系が時間とともに北側へゆっくりと移動していたためと考えられる。ST1 実験では両方の降水帯の雨量が増加していた。Fig. 3(b) で見たように、観測では広島市周辺で強い降水帯が見られていたのに対して、再現実験 ST1 では降水量のピークが西側にず

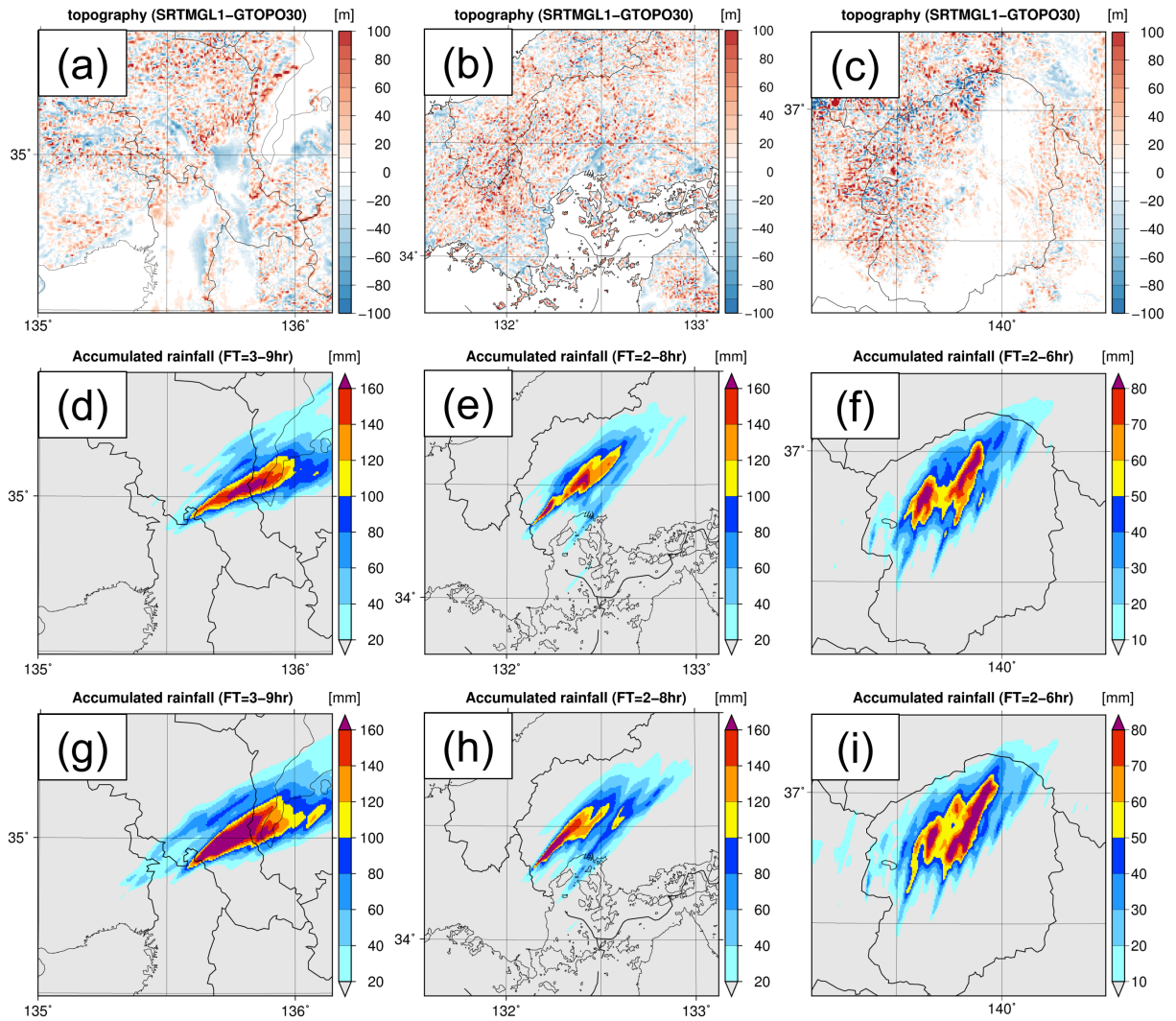


Fig. 3 (a), (b) and (c) indicate the difference of the elevation in the computation for K12, H14, and N98, respectively. Red color shows that the elevation based on SRTMGL1 got higher than the one on G30. (d), (e), and (f) shows the accumulated rainfall in the computations using G30. (g), (h), and (i) also the same but in the ones using ST1.

れていた。いずれの降水帯も山口県南東部の地形の影響を大いに受けているものと考えられる。

N98 では、栃木県西部の山間部とその南東斜面を中心に降水量のピークが見られた。特に後者は後述のように栃木県付近の風速の不連続線に沿って帯状の降水域が形成されていた。標高データを ST1 に変更したところ、山間部の降水系の雨量はあまり変化が見られないのに対して斜面側の降水系の雨量が顕著に増加していたことが確認された。ただし、那須における局所的な降水系は確認されず、帯状の降水域が形成されている時間も他の 2 つの事例に比べて短かった。DSJRA55 は 6 時間毎に出力がある再解析データ JRA55 のダウンスケーリング計算であるため、再解析データそのものではないことに注意が必要である。以上から、K12 と H14 については位置ず

れが見られるものの降水系を概ね再現しているのに対して、N98 では観測における主たる降水系の再現性は低いものの斜面付近の降水系において雨量の増加が見られたという興味深い結果を示した。

3.2 地形に伴う水蒸気輸送

次に地形の起伏が水蒸気鉛直輸送に与える影響を評価するために、式 (3) を定義する。

$$M_{\text{orog}} = q_v (\mathbf{V} \cdot \nabla h) \quad (3)$$

ここで、 q_v は水蒸気混合比 [kg kg^{-1}], $\mathbf{V}$ はモデル最下層の水平風 [m s^{-1}], h は離散化された標高 [m] である。すなわち水平風から斜面が応力を受けるようなベクトルの向きにある時に、上向きの水蒸

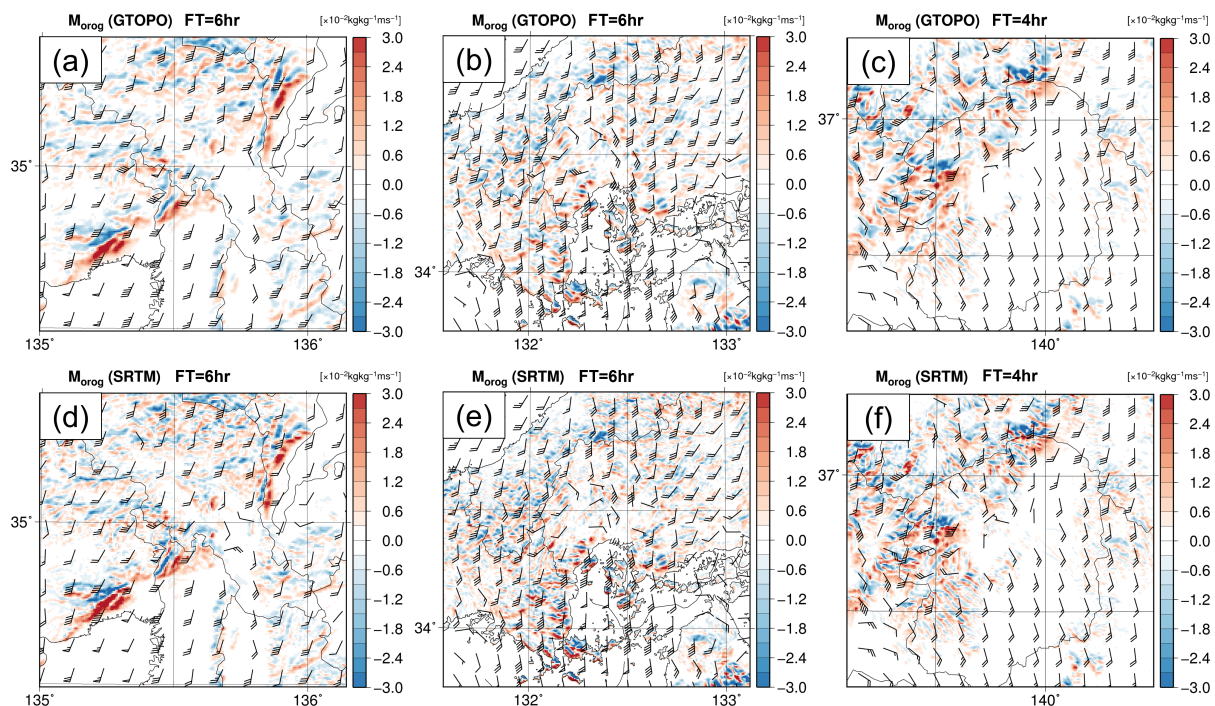


Fig. 4 Orographic moisture transport and the wind at the lowest layer of (a) K12, (b) H14, and (c) N98 in the computations using G30. (d), (e), and (f) also the same but in the computations using ST1. Full and half barb indicate, and 1 m s^{-1} , respectively.

気輸送があると判定することができる。

Fig. 4 は各実験の一時刻における水蒸気輸送 M_{orog} を表している。K12 の計算領域である Fig. 4(a), (d) では六甲山、および北摂山地で正の M_{orog} が見られた。ただし、G30 を用いた計算である Fig. 4(a) よりも ST1 を用いた計算 Fig. 4(d) の方が正負の分布がより明瞭にみられている。このことは、DEM の解像度が高くなったことでより急勾配の斜面がモデル内に出現し、地形強制力が増したことを示唆している。また大阪湾周辺の風速を比較すると、同じ予報時刻でも ST1 実験の方の風速が約 1 m s^{-1} 大きくなっていることがわかる。ちなみに本稿では予報開始 6 時間後のみの結果を掲載しているが、分布の大きな特徴には時刻によって大きな変化はなかった。次に H14 における水蒸気輸送 (Fig. 4(b), (e)) を見てみると、山口県南東部の斜面で正と負の M_{orog} が集中している点が特徴的だった。モデル内の線状対流系は山口県南東部をゆっくりと北上しながら北東側の広島市周辺に大雨をもたらしていた。H14 においても ST1 実験の方がより大きな地形に伴う水蒸気輸送が実現していたと考えられる。一方で N98 の計算結果を示す Fig. 4(c), (f) を見てみると、栃木県南西部から北東部にかけて風速場の不連続線が見られる。この前線がモデル内の帯状の降水域の要因の一

つであったと考えられる。ST1 実験では、南西部の渓谷部における正の上向き水蒸気輸送がより大きくなっている。この領域で G30 実験に比べて強い上昇流が発生し、結果として積算降水量を増加させたと考えられる。以上から、同じ格子解像度でも、与える DEM の解像度の違いが線状対流系の雨量を左右する要因の一つになると言えよう。

3.3 マルチフラクタル解析

次に、対流系が発生した時刻における大気場の特徴を評価するべく対流系近辺の水平 60 km、鉛直約 15 km を対象にマルチフラクタル解析を行った。Fig. 5(a)~(c) は各事例における水蒸気フラックスの、Fig. 5(d)~(f) は TKE のマルチフラクタル指標の時系列である。ここで横軸は、各実験の対象領域において初めて 50 mm h^{-1} を超える降水強度を確認した予報時刻を基準とした時刻である。

Fig. 5(a) に示した K12 における水蒸気フラックスのマルチフラクタル指標は、ST1/G30 どちらの実験においても強雨開始約 30 分前から増加に転じている。強雨開始後 30 分までは両者にほぼ差はない一方で、開始後 1 時間以降では ST 実験の方がより強いマルチフラクタル性を示していることがわかった。強雨開始後 2 時間でピークに達し、その後マルチフラ

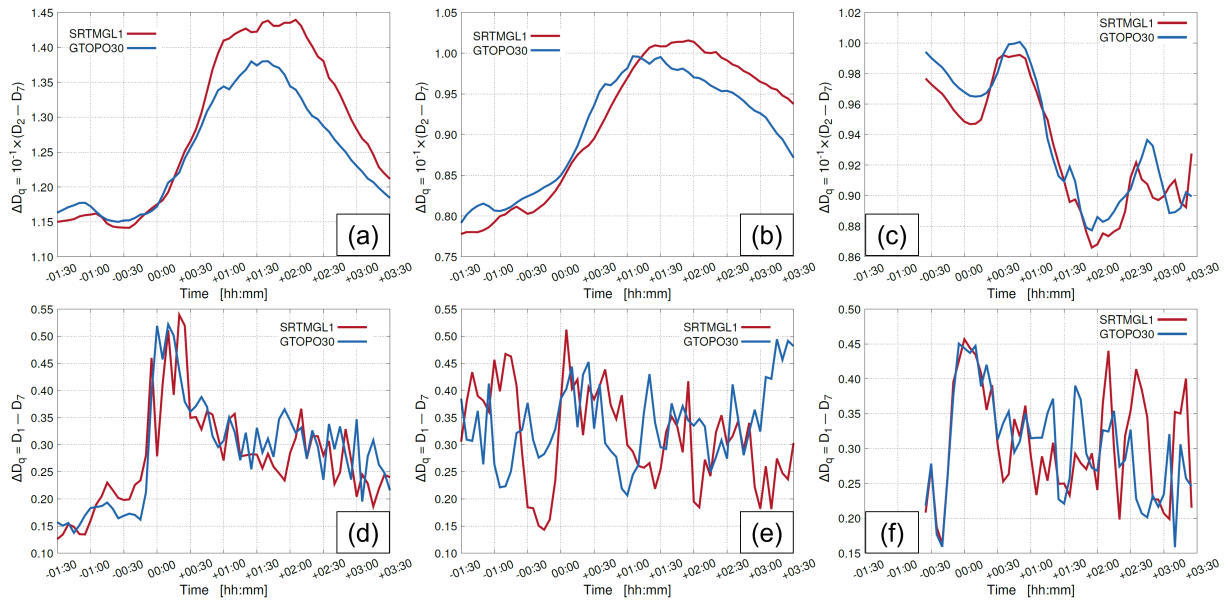


Fig. 5 Time series of the multifractal index of water vapor flux in (a) K12, (b) H14, and (c) N98. The time “00:00” corresponds to the time when the rainfall intensity over 50 mm h^{-1} was observed for the first time. (d), (e), and (f) also the same but the one of TKE.

クタル性が弱まる傾向が続いていた。一方で TKE のマルチフラクタル指標の時系列 (Fig. 5(a)) を見てみると、強雨開始前後でマルチフラクタル指標が極大に達し、その後一定の範囲内で推移していたことがわかる。ここで、TKE のマルチフラクタル指標の時刻ごとの変化量が大きい理由として、TKE 分布が対流の進展とともに時間的な変化が大きいことが考えられる。

H14 におけるマルチフラクタル指標も K12 と同様に強雨開始前から増加傾向が見られ、水蒸気フラックスは強雨開始後 2 時間でピークを取り減少に転ずる点が一致していた。ただし TKE の方の時系列では K12 とは異なりマルチフラクタル指標の増大と減少が複数回にわたって見られるような振る舞いをしていた。この増大と減少が対流の発生と減衰に対応しているか否かは今後詳細に精査したいと考えている。

N98 におけるマルチフラクタル指標については、スピニングの影響を鑑みて予報開始 2 時間後以降を対象としたため、時系列が強雨開始 35 分前からプロットされている。上述した 2 事例とは異なり、水蒸気フラックスのマルチフラクタル指標は強雨開始後に増加に転じて、その後減少していた。指標自体の値も G30 実験の方が大きい値を示していた。また TKE のマルチフラクタル指標では強雨開始直前でピークを取る点は他の 2 事例と共通していた。ただし ST1 実験の方がその後の時間的な変動が大きかった。

以上から、線状対流系が発生する直前から直後に

かけて水蒸気フラックス、TKE のマルチフラクタル性に顕著な変化が現れることがわかった。特に K12, H14 における水蒸気フラックスでは降水系形成時に ST1 実験の方がより強いマルチフラクタル性を示していたことが示された。

3.4 ST1 実験における線状対流系の鉛直断面

前節では再現性の高い K12, H14 の再現実験においてマルチフラクタル性に特有の変化を伴うことを見た。この変化は線状対流系が組織化する過程に対応したものであると期待される。この変化の要因を考察するために、K12 の ST1 実験における線状対流系を例に鉛直断面を見てみる。

Fig. 6 は K12 の ST1 実験における降水強度を示している。(a) は対流系に直接関連したセルで初めて 50 mm h^{-1} を超えた時刻である。この時刻では $20 \sim 30 \text{ mm h}^{-1}$ 程度の雨域が点在している程度であった。一方でその 1 時間後の (b) を見てみると、帯状の強雨域が形成されていた。この間の降水強度は孤立していた雨域同士が拡大しながら互いに結びつく「組織化」が見られていた。

Fig. 7(a), (b) に線状対流系の鉛直断面における上昇流、総降水混合比、水平風の分布を示す。ただし総降水混合比は雲解像モデル CReSS の予報変数である雲水混合比 q_c 、雨水混合比 q_r 、雲氷混合比 q_i 、雪片混合比 q_s 、霰混合比 q_g の合計である。Fig. 7(a) は強雨開始後 30 分に該当する時間帯である。東経

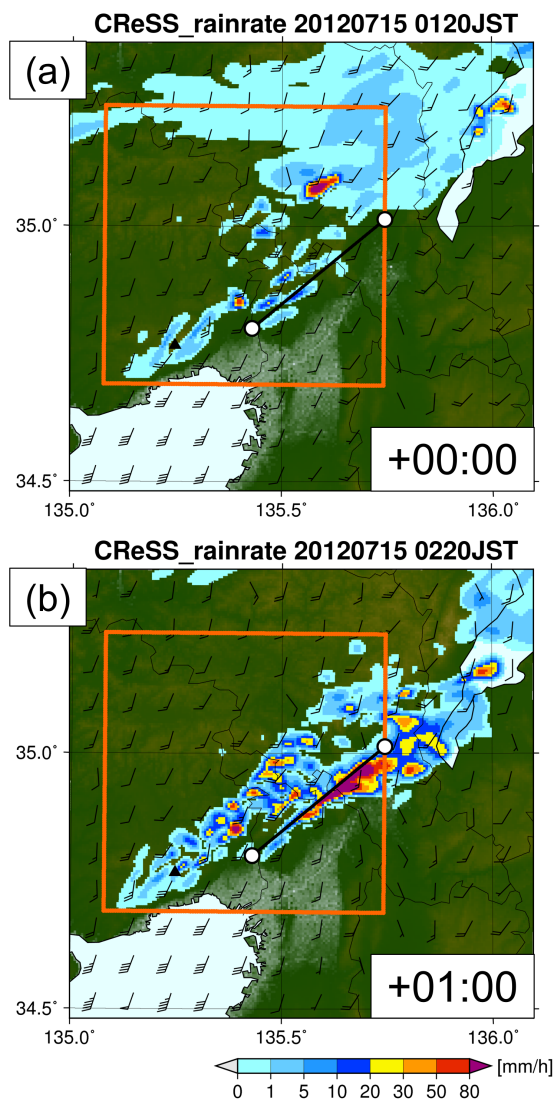


Fig. 6 (a) Rainfall intensity at FT=15600s in the computation using ST1. (b) is also the same but at FT=19200s. Orange square shows the target region of multifractal analysis.

135.65 度付近に発達した積乱雲が見られ、その風上側に発達途上の積乱雲が見られている。上昇流は東経 135.60 度付近の北摂山地の斜面付近で発達する様子を繰り返していた。その 30 分後である Fig. 7(b) では 5 m s^{-1} を超える上昇流域が拡大している様子がわかる。東経 135.70 度付近の下層では降水粒子の落下に伴う下降流域が見られ、上流側である東経 135.50 度付近で新たな積乱雲が発達するバックビルディング現象が見られている。このように、線状対流系の組織化は地上降水強度の拡大のみならず 3 次元的上昇流域が結びつく現象という側面を有している。

同時刻同断面における水蒸気フラックスの分布を Fig. 8(a) に示す。対流系発生前は高度 1 km 付近に

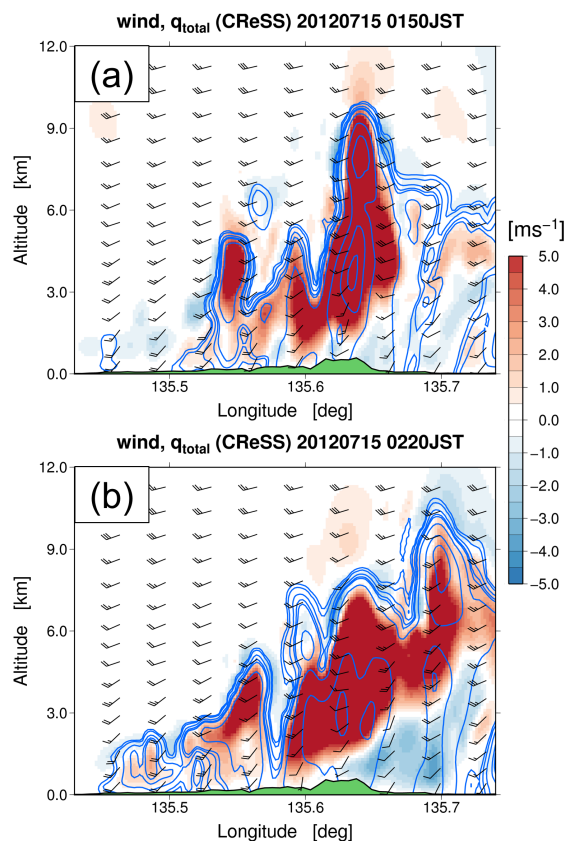


Fig. 7 (a) Color and blue contours shows vertical motion [m s^{-1}], and total precipitation particles mixing ratio [kg kg^{-1}] on the vertical cross-section shown in Fig. 6 at FT=17400s. (b) also the same but at FT=19200s. Green area indicates topography. Full and half barb means $5, 2.5 \text{ m s}^{-1}$, respectively.

のみ水蒸気フラックスの大きい領域が見られていた。これは近畿地方の北方に位置する梅雨前線に向かって湿潤な空気が流入する下層ジェットに対応するものと考えられる。対流系発生後は上昇流により上向きの水蒸気輸送が生じる。これにより水蒸気フラックスの大きい領域が水平方向のみならず鉛直方向にも拡大する。すなわち、対流による水蒸気の 3 次元的な浸潤が、Fig. 5 で見たようなマルチフラクタル性の強まりを引き起こしていると考えられる。

対流が発生することで対流系下層の気圧勾配も生じる。Fig. 8(b) は同断面における気圧偏差である。強雨開始直前から開始後にかけて下層の気圧偏差が高まる振る舞いが見られた。特に新たな積乱雲が繰り返し発生している東経 135.50 度付近では水平方向の気圧偏差勾配が大きい状態が維持されている様子が見られた。これは対流系の下流側で(気圧偏差の小さい)上昇流が発達し、その補償流として上流側の下層で気圧偏差勾配が作られ、結果として水蒸気流入を増加させている過程と対応するものと考えられる。

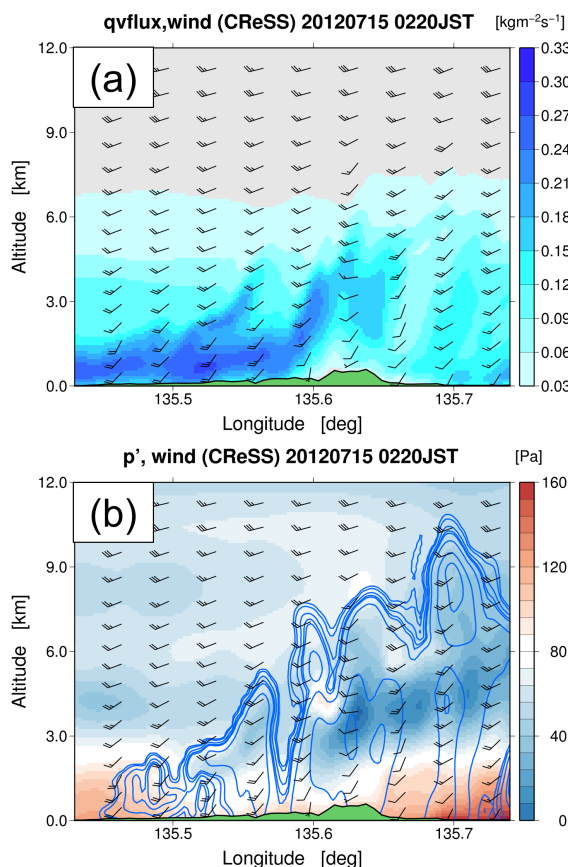


Fig. 8 (a) Water vapor flux, (b) pressure perturbation and horizontal wind on the vertical cross-section at FT=19200s.

この意味で、水蒸気フラックスのマルチフラクタル性の変化は線状対流系の自己組織化過程を反映しているものと捉えられる。

さらに TKE と相当温位 θ_e の鉛直断面を Fig. 9(a) に示す。TKE は上昇流域の上端で比較的大きな値を取っていることがわかる。TKE 生成項の一つである浮力項は、雲が発生している領域では相当温位の鉛直勾配が大きいほど大きな値を示す (Tsuboki and Sakakibara 2007)。対流コア付近では相対湿度が高く湿潤であるため、その上側では相当温位の鉛直勾配が大きい状態となり、TKE 生成を促す役割を果たしていると考えられる。強雨開始前後では TKE も発達段階の積乱雲内部にのみ分布していた一方で、積乱雲群として組織化を見せ始める強雨開始後 30 分以降は上昇流上端および対流コア付近で大きな TKE が分布し、時刻ごとに差異はありつつも一定範囲内で TKE のマルチフラクタル性が推移していた。

4. 考察

解像度の異なる DEM を用いた実験を比較するこ

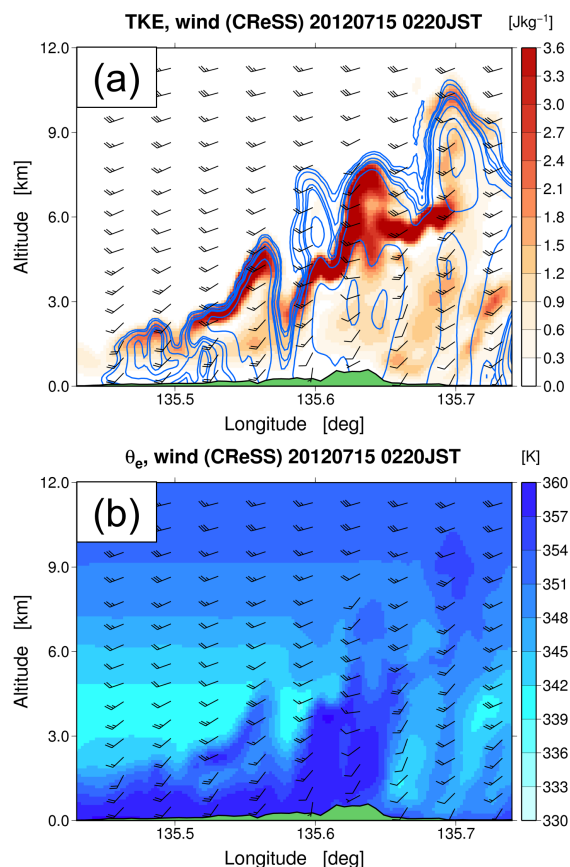


Fig. 9 (a) TKE, (b) equivalent potential temperature and horizontal wind on the vertical cross-section at FT=19200s.

とで見えてきたことは、我が国の急峻な地形と風速場の関係が線状対流系がもたらす数時間分の積算降水量に多大な影響を与える場合があるということである。近年利用可能な計算資源が増えてきたことに伴い、1 km より格子解像度の高い気象モデルが適用されることが多くなっている。湿潤な空気が地形強制力を受けて上昇・凝結し自由対流高度を突破することが対流発生のきっかけとなると考えられる。対流発生時における上昇流の強度や位置の予測は、線状対流系に伴う雨量を見積もる上で重要な課題であると考えられる。本研究のような数百 m オーダーの格子解像度の数値実験では、ST1 のような高い解像度を持った DEM を使用することで地形強制力が雨量に与える影響をより現実に近い形で評価することが可能となる。ただし線状対流系の主たる発生要因は地形だけではないことに注意が必要である。実際梅雨期では梅雨前線を移動するメソ低気圧 (mesoscale BFDs) が対流圏下層の水蒸気フラックスを強化する役割を果たす場合があることが知られている (Araki et al. 2021)。

その中でも本研究で扱った事例 K12 では、DEM を

変更することで対流系上流側の下層の風速が強まり、積算降水量も増加傾向を示した。このことが示唆するのは、より急峻な斜面勾配がモデル内に実現することで結果として生じる上昇流や降水粒子も増加したということである。前述のように、地形強制力が増したことで空気塊が自由対流高度を突破し対流として成長しやすくなったことが考えられる。そしてより強い上昇流が生じることでその上流側では補償流としての水蒸気フラックスの強化が見られたと考えられる。これが Fig. 5 に示したような ST1/G30 実験において水蒸気のマルチフラクタル性のピークに差異が見られた理由と考えられる。

一方で、TKE では強雨開始とともにそのマルチフラクタル性がピークに達していた。マルチフラクタルは分布中の値ごとに、それがどの程度特異な性質を有しているかを定量的に評価するという側面がある。対流発生時の場合は、それまで周囲に TKE がほぼゼロであるような分布をしていたため、対流発生に伴う TKE は特異性が高い分布であったことを示唆している。その後水蒸気の上向き輸送が活発になり対流の規模が大きくなることで上昇流の空間的なスケールが広がり、対流雲同士の組織化が進行する。それと同時に TKE の比較的大きい領域も上昇流の上端部分を中心に広がりを持つことになる。TKE が持つこの性質をマルチフラクタル的に見れば、対流系が維持されている期間では分布の特異性はさほど変化しないものであると推測される。それは上流側での水蒸気フラックス、対流コアを中心とした凝結の活発な領域、降水粒子の落下に伴う下降流域といったメソスケール規模での性質が動的に維持されていることと密接な関連があることを示唆している。つまり、本研究で扱う空間的なスケールリング指数は統計的な量でありつつも、対象とする分布の物理的な性質 (Navier-Stokes 方程式、熱力学的方程式、雲微物理過程等) を色濃く反映させた解析手法であると考えられる。

以上の議論を受けて、線状対流系の自己組織化過程をマルチフラクタル的な観点と現象論的な観点の双方からまとめてみたい。前者の観点では、対流活動が活発になるにつれて水蒸気フラックスのマルチフラクタル性が強まり、TKE が対流発生と同時にマルチフラクタル性のピークに達し、その後雲同士の結合が進むにつれてマルチフラクタル性が時間的に準定常的な振る舞いを見せる。また後者の観点から記述すれば、以下のような正のフィードバックが存在すると考えられる。

1. 下層ジェットの強まりにより対流不安定度が

増す。

2. 水蒸気の凝結に伴い潜熱が放出され、雨滴が落下する (地形強制力の影響も在り得る)。
3. 空気塊が浮力を得ると同時に、TKE 生成が活発化する。
4. 急峻な斜面の周辺で上昇流が強化される。
5. 上昇流の補償流として、対流の上流側下層で気圧偏差勾配が発生。
6. 下層で水平収束が強まる (落下した雨滴の蒸発の影響を受けて高圧部が生じることも関与)。
7. 上流側における水蒸気フラックスが強化される。

5. 結論

本研究では実際に発生した線状対流系事例について異なる解像度を有する DEM を用いた実験をそれぞれ行い、モデル内の標高の変化に伴い線状対流系の雨量が変化するメカニズムを現象論、そしてマルチフラクタル的な解析を通じて議論した。3 つの事例ともに解像度約 30 m の ST1 を使用した実験の方が積算降水量が増加する傾向を示していた。地形に伴う水蒸気の上向き輸送を比較し、ST1 実験の方が地形強制による水蒸気輸送が大きいことが示唆された。またマルチフラクタル解析の結果、線状対流系が発生・組織化する中で特徴的な変化を示すことがわかった。特に水蒸気フラックスを対象にした解析では ST1 実験の方がより強いマルチフラクタル性を示し、先述の地形に伴う水蒸気輸送の解析と整合する結果であった。TKE のマルチフラクタル性は ST1/G30 実験で明瞭な差異は認められなかったものの、線状対流系が組織化しつつあることを定量的に判定する手法としての応用可能性が期待される。

ここで本研究の将来的な展望について述べる。上述した線状対流系の組織化における正のフィードバックは 1 事例を参考に提案された枠組みであるため、その一般性については今後事例を増やしながら吟味する必要があると考えられる。マルチフラクタル解析においては、N98 に関する解析でも見たように帯状の降水域が形成される時間が短い、あるいはまったく見られない計算の場合は特徴的なシグナルを把握することは困難であると予想される。こうした課題に取り組むためには、アンサンブル予報のような確率的な手法を応用することが必要不可欠である。アンサンブル予報を行うことで、線状対流系の組織化における正のフィードバックのうちどの部分が偶然性に支配された要因なのか、その時に得られるマルチフラクタル的シグナルとは如何なるものな

のかを解析することが可能になると考えられる。また、本研究ではマルチフラクタル解析の対象変数を水蒸気フラックスと TKE の 2 つとした。組織化過程を記述する上でこの 2 変数以外にどのような変数を解析すればよいかを検討することも重要な課題の一つである。例えば、霞といった雲微物理過程を反映し降水強度にも影響を与える変数について解析を進めることなどが挙げられる。

参考文献

- 大野哲之・山口弘誠・中北英一 (2022): 線状対流系における水蒸気フラックス・降水粒子分布のマルチフラクタル特性, **78**, 2, pp.319-324.
- 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), **76**, 2, pp.7-12.
- 小坂田ゆかり・中北英一 (2021): 線状対流系の疑似温暖化実験に周辺擾乱が与える影響と環境場指標の解析, 土木学会論文集 B1(水工学), **77**, 2, pp.1255-1260.
- 中北英一・矢神卓也・池淵周一 (2000): 1998 那須集中豪雨の生起・伝播特性, 水工学論文集, **44**, pp.109-114.
- 松下貢 (2004): フラクタルの物理 (II) -応用編-, 裳華房.
- Araki. K., Kato. T., Hirokawa. Y., Mashiko. W., (2021): Characteristics of Atmospheric Environments of Quasi-Stationary Convective Bands in Kyushu, Japan during the July 2020 Heavy Rainfall Event, *SOLA*, **17**, 8-15. <https://doi.org/10.2151/sola.2021-002>
- Chang, L. T.-C., Chen, G. T.-J., Cheung, K. K. W., (2008): Mesoscale simulation and moisture budget analyses of a heavy rain event over southern Taiwan in the Meiyu season. *Meteorol. Atmos. Phys.* **101**, 43-63. <https://doi.org/10.1007/s00703-008-0286-7>
- Chigirinskaya. Y., Schertzer. D., Lovejoy. S., Lazarev. A., Ordanovich. A., (1994): Unified multifractal atmospheric dynamics tested in the tropics: part I, horizontal scaling and self criticality. *Nonlin. Processes Geophys.*, **1**, 105-114, 1994. <https://doi.org/10.5194/npg-1-105-1994>
- de Lima., and Grasman. J., (1999): Multifractal analysis of 15-min and daily rainfall from a semi-arid region in Portugal, *J. Hydrol.* **220**, 1-11.
- NASA, 30-Meter SRTM Tile Downloader, <https://dwtkns.com/srtm30m/> [閲覧日: 2023 年 8 月 21 日]
- Nogueira. M., Barros. A. P., Miranda. P. M., (2013): Multifractal properties of embedded convective structures in orographic precipitation: toward subgrid-scale predictability. *Nonlin. Processes Geophys.*, **20**, 605-620. <https://doi.org/10.5194/npg-20-605-2013>
- Olsson. J., Niemczynowicz. J., (1996): Multifractal analysis of daily spatial rainfall distributions. *J. Hydrol.* **187(1-2)**, 29-43. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(96\)03085-5](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(96)03085-5)
- Paz. I., Willinger. B., Gires. A., Ichiba. A., Monier. L., Zobrist. C., Tisserand. B., Tchiguirinskaia. I., Schertzer. D., (2018): Multifractal Comparison of Reflectivity and Polarimetric Rainfall Data from C- and X-Band Radars and Respective Hydrological Responses of a Complex Catchment Model. *Water* **2018**, **10(3)**, 269. <https://doi.org/10.3390/w10030269>
- Schertzer. D., Lovejoy. S., (1987): Physical Modeling and Analysis of Rain and Clouds by Anisotropic Scaling Multiplicative Processes. *J. Geophys. Res.* **92(8)**, 9693-9714. <https://doi.org/10.1029/JD092iD08p09693>
- Takemi. T. (2018): Importance of Terrain Representation in Simulating a Stationary Convective System for the July 2017 Northern Kyushu Heavy Rainfall Case. *SOLA*, **14**, 153-158.
- Tchiguirinskaia, I., Schertzer, D., Hoang, C. T., Lovejoy, S., (2011): Multifractal study of three storms with different dynamics over the Paris region. In 12th International Conference on Urban Drainage, Porto Alegre, Brazil.
- Tessier. Y., Lovejoy. S., Schertzer. D., (1993): Universal Multifractals: Theory and Observations for Rain and Clouds. *J. Appl. Meteorol.* **32(2)**, 223-250. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1993\)032%3C0223:UMTAOF%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1993)032%3C0223:UMTAOF%3E2.0.CO;2)
- Tsuboki. K., Sakakibara. A., (2002): Large-scale parallel computing of Cloud Resolving Storm Simulator. *High Performance Computing*, H. P. Zima et al., Eds., Springer, 243-259. https://doi.org/10.1007/3-540-47847-7_21
- Tsuboki. K., Sakakibara. A., (2007): A Numerical Prediction of High-Impact Weather Systems, Text Book for The Seventeenth IHP Training Course (international Hydrological Program). [閲覧日: 2023 年 8

月 21 日]

- Wolfensberger. D. Gires. A., Tchiguirinskaia. I., Schertzer. D., Berne. A., (2017): Multifractal evaluation of simulated precipitation intensities from the COSMO NWP model. *Atmos. Chem. Phys.* **17**, 14253–14273. <https://doi.org/10.5194/acp-17-14253-2017>
- Zhao. Yuchun (2015): A study on the heavy-rain-producing mesoscale convective system associated with diurnal variation of radiation and topography in the eastern slope of the western Sichuan plateau. *Meteorol. Atmos. Phys.* **127**, 123-146.

<https://doi.org/10.1007/s00703-014-0356-y>

謝辞

本研究は JSPS(課題番号 22KJ1845), JST(課題番号 JPMJSP2110) の助成を受けました。メソ客観解析値, DSJRA55 データ, 海面水温, レーダーアメダス解析雨量は気象庁から提供を受けました。また XRAIN 合成雨量は国土交通省から提供を受けました。

(論文受理日 : 2023 年 8 月 31 日)