

線状対流系の発生・発達におけるマルチフラクタル特性 —水蒸気フラックスと降水粒子分布の観点から—

Multifractal Properties in Occurrence and Development of Linear Mesoscale Convective Systems: Characterized by Water Vapor Flux and Precipitation Particles Distribution

大野哲之・山口弘誠・中北英一

Akiyuki ONO, Kosei YAMAGUCHI, and Eiichi NAKAKITA

Synopsis

Multifractal has been widely applied as the tool of quantitative pattern analysis. We investigated multifractal properties of water vapor flux and precipitation particles distribution associated with line-shaped rain bands to identify the three-dimensional patterns of self-organization of convection systems. We analyzed water vapor flux obtained by the numerical simulation of the heavy rainfall event over Kameoka City on 15 July 2012. Before heavy rainfall occurred, water vapor flux approached to monofractal corresponding to increasing the convective instability at lower atmosphere. While during heavy rainfall, strong multifractality was shown due to the development of convection systems. Multifractal analysis was also conducted to characterize the multifractality of the mixing ratio distributions of ice-phase precipitation particles obtained by volume scans of X-band MP radars. The time period when the line-shaped rain band area began to expand and the regional averaged rainrate increased coincided with the one when the multifractality of the graupel and snowflake mixing ratio changed significantly.

キーワード : 線状対流系, マルチフラクタル, 水蒸気フラックス, 降水粒子

Keywords: linear Mesoscale Convective Systems, multifractal, water vapor flux, precipitation particles

1. 研究背景

我が国の河川流域における災害を引き起こす恐れのある線状対流系の組織化メカニズムや環境場は様々な観点から議論されている。梅雨前線帯, ならびに総観規模の大気の流れに伴う水蒸気流入 (Zhao et al. 2021), 高い海面水温 (Manda et al. 2014) 等は対流不安定な場の必要条件である。また, メソスケールの降水系において地形が下層の湿潤空気を輸送する働きに関する研究もなされている (Chang et al.

2008)。加えて, 大気下層～中層の気温減率に露点温度を加味した KI 等の指標が線状対流系の発生ポテンシャルの評価に有効であることが指摘されている (Takemi and Unuma 2019)。これは大気中層が湿潤であることで周囲の環境場との混合による対流の抑制効果が小さくなることと関連していると考えられる。

水蒸気に着目した議論もさることながら, 降水粒子の生成消滅に着目した論点も興味深い。雨粒の蒸発に伴う断熱冷却により生じる冷気プールは, バックビルディングタイプの線状対流系の発達に寄与する

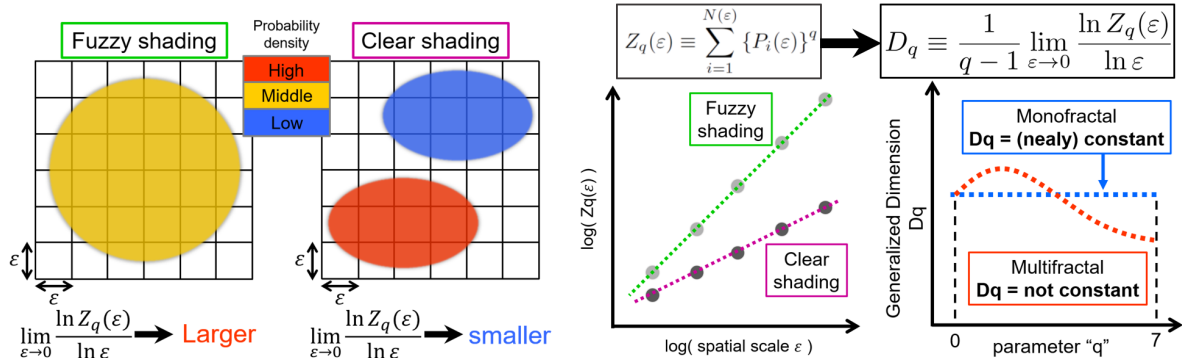


Fig. 1 Schematic images of multifractal analysis. The spatial homogeneity of the analyzed distribution is quantitatively evaluated by the partition function Z_q and the generalized dimension D_q .

ことが様々な研究で指摘されている (例えば Jeong et al. 2016 など). また山口ら (2017) は X バンド偏波レーダを用いて推定した氷相降水粒子混合比をデータ同化することにより, 直接的にモデル内の雲の表現を改善するのみならず, 環境場の変化を通して間接的にも降水予測精度向上の可能性のあることを指摘している. このように, 水物質の潜熱移動を始めとした雲微物理過程に伴い風速場や熱力学的な場が変化することもまた, 線状対流系の組織化の側面の一つであると考えられる.

本研究では, こうした線状対流系の自己組織化を捉える枠組みとしてマルチフラクタルを提案する. 自己組織化とは深い対流がない大気場から内部, 外部の制御装置やリーダーの存在無しに対流が生じ, 冷たい雨を含む積乱雲群が組織化された振る舞い (長時間に渡る帯状の降水域の発生) を見せることである. またマルチフラクタルとは, 時間的・空間的な分布の局所的なスケーリング指数 (べき乗則) を推定し, 分布全体でのスケーリング指数のゆらぎ度合いを定量的に評価する概念である. マルチフラクタルは降水現象を始め水工学が対象とする様々な分野で見出されている性質である (Olsson and Niemczynowicz (1996) など). また Lee et al. (2020) は台風事例の S バンドレーダの立体観測から推定された降水強度のマルチフラクタル性をシミュレーションのものと比較し, 高度別に観測・モデルの雨量分布の類似性を議論している. このように, 降水現象のような複雑なパターンを定量的に解析するツールとしてマルチフラクタルは応用されてきた. しかし降水現象に伴う水蒸気フラックス, ならびに氷相降水粒子分布のマルチフラクタル性はほぼ研究されていない. さらに線状対流系の自己組織化においても, マルチフラクタルの観点から特有のパターンを示すことが予想される. 積乱雲の発達には 3 次元空間で生じる, かつ

時間発展を見せる現象であるため, 3 次元かつ可能な限り時間分解能の高いデータセットを用いた種々の物理量のパターン解析を行う必要がある. そこで本研究では, 線状対流系に伴う水蒸気フラックス, および氷相を含む降水粒子分布を対象に, 線状対流系が自己組織化される前後において見られるマルチフラクタル特性の事例解析を目的とした. 3 次元かつ時間分解能の高いデータセットとして, 数値シミュレーションならびに X バンド偏波レーダの立体観測に基づいて推定された降水強度・混合比分布を用いる.

2. 解析手法

2.1 マルチフラクタル解析

Fig. 1 のように解析領域をサイズ 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 $P_i(\epsilon)$ を算出する. 確率測度 $P_i(\epsilon)$ の $(q-1)$ 次モーメントである分配関数 $Z_q(\epsilon)$, および一般化次元 D_q を式 (1) のように定義する.

$$Z_q(\epsilon) \equiv \sum_{i=1}^{N(\epsilon)} \{P_i(\epsilon)\}^q \quad (1)$$

$$D_q \equiv \frac{1}{q-1} \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\ln Z_q(\epsilon)}{\ln \epsilon}$$

ここで, $N(\epsilon)$ 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 $Z_q(\epsilon)$ に寄与する確率測度 $P_i(\epsilon)$ 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 $Z_q(\epsilon)$ を算出し, 分配関数 $Z_q(\epsilon)$ 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、モデルにおける水蒸気フラックス、雨水混合比、および立体観測に基づく3次元降水強度分布に対しては一般化次元 D_7 を採用した。また氷相降水粒子混合比の分布に対しては一般化次元の $0 \leq q \leq 7$ における一般化次元 D_q の分散 σ^2 を採用した。水蒸気フラックスはモデルの性質上 D_0 が時間により一定であり、 D_q スペクトルの際が q の大きい領域に現れていたためである。この場合、 D_7 が空間の次元である3より小さな値を取るほどマルチフラクタル性が強いと判定される。雨水の分布は時間的に変動するためフラクタル次元 D_0 も変動するものの、 D_q スペクトルの曲線度合いが大きいほど D_7 の値が小さくなるという対応関係が概ねみられていた。一方で、氷相降水粒子分布ではこうした対応関係を見出すことが困難であったため、分散 σ^2 を用いた評価が適当と考えられる。この場合は分散 σ^2 が大きいほどマルチフラクタル性が強いと判定される。(各物理量の D_q スペクトルの一部を付録に掲載している。)

2.2 線状対流系の再現実験と解析変数

本研究における解析事例は2012年7月15日に京都府亀岡市を中心に大雨をもたらした亀岡豪雨とした。雲解像モデル CReSS (Tsuboki and Sakakibara, 2002) を用いた再現実験の計算領域を Fig. 2(a) に示す。水平解像度は500 m、鉛直解像度は平均250 m、格子数は水平600格子、鉛直61層に設定した。初期値・境界値には気象庁 MSM の水平風・気温・相対湿度を、海面水温には気象庁 NEAR-GOOS の日平均海面水温を用いた。乱流パラメタリゼーションには乱流運動エネルギーを用いた1.5次のクロージャを、雲微物理過程に氷物質の数密度予報を含めた氷相を含むバルク法パラメタリゼーションを使用し、14日21JSTから9時間に渡り計算を行った(小坂田・中北 2021)。

CReSS における予報変数の一つである水蒸気混合比 q_v [kg kg^{-1}]、および風速場の成分 u, v, w [m s^{-1}] を用いた水蒸気フラックス QVF を式(2)のように定義し、解析変数とした。

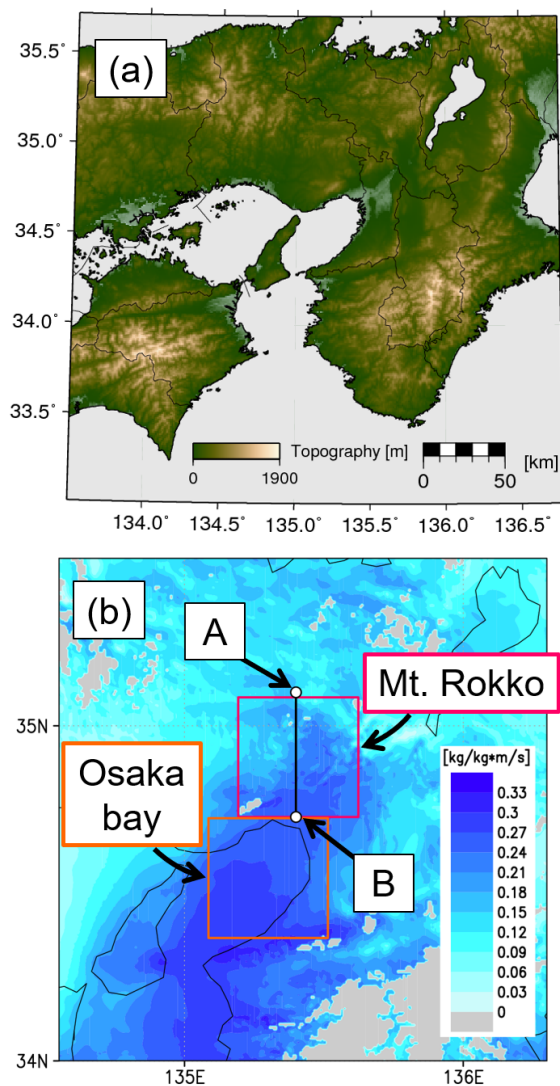


Fig. 2 (a) The computation region for heavy rainfall event at Kameoka City, Kyoto prefecture on 15 July 2012. (b) Horizontal distribution of QVF (color) at 250 m height on 0100JST, 15 July 2012. Orange and Red boxes indicates the analysis region for the multi-fractality of QVF .

$$QVF = q_v \times \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \quad (2)$$

また再現実験内における雨水に関する物理量として、予報変数の一つである雨水混合比 [kg kg^{-1}] を使用した。マルチフラクタル解析では等方的なピクセルを仮定しているため、地表から高度約12 kmまでを対象に計算結果(毎5分出力)を鉛直方向500 mに補間したデータを用いた。Fig. 2(b)のように再現実験では紀伊水道から大阪湾にかけて顕著な下層ジェットがみられ、豪雨が発生した六甲山より北側にまで達していた。以上の特徴から、 QVF に関する

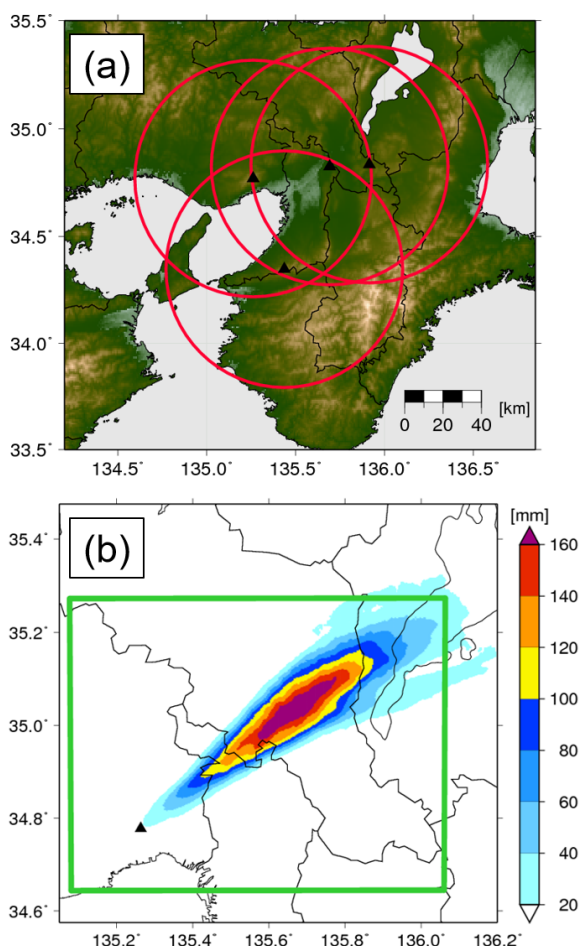


Fig. 3 (a) The positions of X-band MP radars managed by Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT) located in Kinki region (black triangles), and its maximum observation range (red circles). (b) Accumulated rainfall amount obtained by XRAIN observation during 00JST to 06JST, 15 July 2012.

解析では豪雨が発生した六甲山領域 (Fig. 2(b) 赤線), およびその上流側である大阪湾領域 (Fig. 2(b) 橙線) に分けて解析を行った。

2.3 XRAIN 立体観測による降水粒子分布の推定

同事例における XRAIN 立体観測に基づき, 空間解像度 250 m, 5 分毎の 3 次元直交座標系データを作製した。Fig. 3(a) に, データ作製に使用した 4 つの X バンド偏波レーダの位置 (鷲峰山, 葛城, 六甲, 田口) と観測範囲を示す。主に融解層以下の雨滴分布の解析にはプロダクトの一つである降水強度 RRR0 [mm h^{-1}] を使用した。また融解層より上空の氷相降水粒子の分布は, 各偏波パラメータと山口ら (2013) の手法を用いて雪片・霰・氷晶の混合比を推定し解析に使用した。解析時刻は 15 日 00~05JST とし, 解析領域は Fig. 3(b) の緑線で囲まれた領域に設定した。

3. 解析結果と考察

3.1 水蒸気フラックス (QVF) のマルチフラクタル特性

Fig. 4(a) は六甲山領域, 大阪湾領域における QVF の一般化次元 D_7 の時間変化を示した図である。2 つの領域を比較すると, 大阪湾領域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る。これは下層ジェットの影響により QVF の分布の濃淡がより明瞭であったことが要因である。六甲山領域では, 豪雨開始前に QVF がモノフラクタルに近づき, その後豪雨開始と共にマルチフラクタルへ傾いた。一方で大阪湾領域では豪雨開始前後でのマルチフラクタル性の変化は比較的小さかった。

豪雨開始前後の時間帯における QVF のマルチフラクタル性の違いは, 分布の特徴と対応して考えることができる。Fig. 4(b), (c) に豪雨開始前における地上降水強度と QVF の 3 次元的なイメージを示す。特徴的な対流が見られない豪雨開始前では, QVF 等値面は凹凸が少ない分布をしていた。一方で Fig. 4(d), (e) のように地上で帯状の降水域が生じる時間帯では, 複数の QVF の極大域が鉛直方向に伸びた分布がみられた。これは QVF に鉛直風成分が含まれ, 上昇流が強化されたことと関連すると考えられる。加えて, Fig. 4(e) では豪雨開始前に比べて QVF の極大域の上流側の気象下層においても値が増加していることが見て取れる。これは対流が活発化したことで下層の QVF の水平収束が強まることと対応していることが示唆される。

Fig. 5(a), (b) に経度 135.4 度線に沿った南北-鉛直断面における豪雨前の QVF 分布を示す。比較的大きい QVF で特徴づけられる下層ジェットが大阪湾から北へ伸びる様子がわかる。一方で, 六甲山領域の高度 1.0 km~3.5 km では, 40 分の間に QVF が $0.12 [\text{kg kg}^{-1}\text{ms}^{-1}]$ 以上の領域が拡大していた。また高度 5 km 付近の QVF の値も小さくなっていった。六甲山領域の相当温位の平均的な鉛直プロファイルの時間変化を示した Fig. 5(c) では, 同時時間帯に下層がより湿潤で, 600 hPa 付近が乾燥したため, 対流不安定度が増加していた。実際, 同時時間帯における六甲山領域の地上降水強度では 1 mm h^{-1} 程度の弱雨が確認され, 降水粒子が落下する際に蒸発したことが下層の湿潤化に寄与したことが示唆された。

マルチフラクタル性の強さが意味するところは, 局所的な分布のスケーリング性を表現するのに多くの指数を必要とすること, すなわち分布の性質の多様性である (Ivanov et al. 1999)。Fig. 4 の大阪

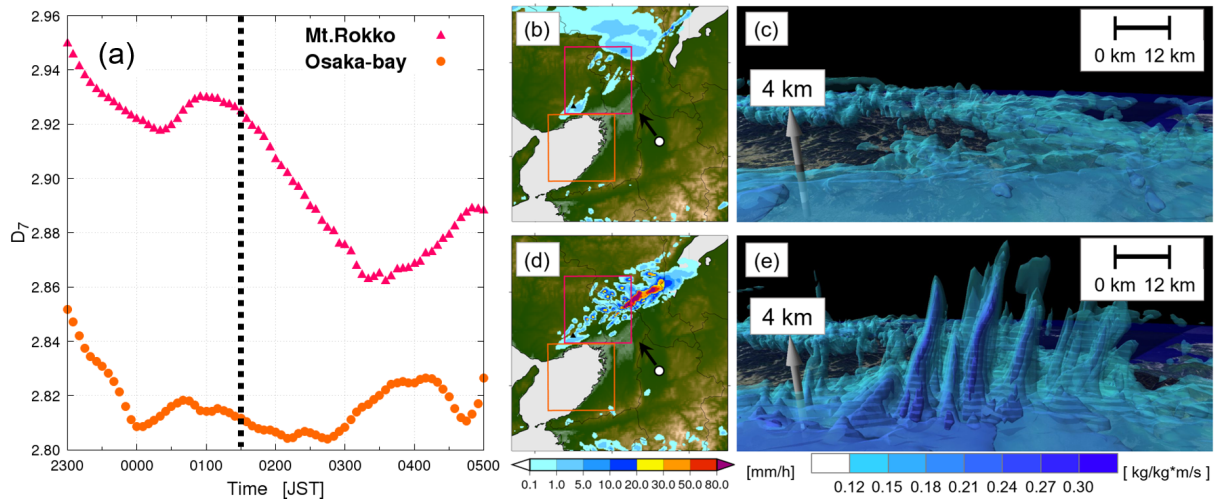


Fig. 4 (a) Temporal change of generalized dimension D_7 for QVF . Black dot line indicates the time when the rainfall intensity over 50 mm h^{-1} was confirmed on the ground. (b) The rainfall intensity distribution at 0100JST in the CReSS simulation, and (c) the three-dimensional image of QVF at the same time. Red and orange boxes indicate each analysis region, and the point of view and direction are shown as white circle and black vectors in (b), respectively. (d), and (e) are also the same but at 0230JST. QVF in (c) and (e) is illustrated with stretching four times of the actual aspect ratio in the vertical direction.

湾領域における QVF ，そして豪雨時の六甲山領域での QVF が強いマルチフラクタル性を示すことは，下層ジェットや対流など水蒸気フラックスの大きい領域とそれ以外の領域では分布の性質が異なる (多様性を持つ) と解釈できる．これに対して豪雨前の六甲山領域において QVF がモノフラクタルに近づいたことは，水蒸気フラックスの性質がより一様に近づいたものと解釈できる．同時に，下層の湿潤化と中層の乾燥化に伴い対流不安定が増した状況 (Fig. 5) がみられた．以上より，水蒸気フラックスにおける自己組織化パターンとは，流れの性質が一様に近づき，やがて対流の強化と共に多様性を増す傾向と捉えられる．

3.2 降水粒子分布のマルチフラクタル特性

(1) 観測-モデル間の雨水に関するマルチフラクタル特性の比較

次に，XRAIN 立体観測により推定された 3 次元降水強度分布 [mm h^{-1}]，および CReSS の予報変数である雨水混合比 q_r [kg kg^{-1}] のマルチフラクタル性を比較する．Fig. 6 に CReSS を用いた再現実験における 6 時間積算降水量の分布を示す．再現実験における降水分布は，Fig. 3(b) の XRAIN 観測に比べて降水分布の長軸が時計回りの方向にやや傾いているものの，降水量の最大値は XRAIN 観測のそれとほぼ同じ値を取っていた．以上より，雨水混合比に対

するマルチフラクタル解析の対象領域を Fig. 6 の緑線で囲まれた領域に設定した．

Fig. 7 は (a) XRAIN 立体観測，(b) CReSS における雨水混合比 q_r の一般化次元 D_7 の時間変化を示している．Fig. 7(a) の赤色で示した通り， 50 mm h^{-1} 以上の地上降水強度が 15 日 0016JST に初めて観測された．15 日 00JST 以前において一般化次元 D_7 は約 2.2~2.5 で経過していた一方で，それ以降の時間帯では増加に転じた．15 日 0041JST 以降，地上降水強度の最大値は断続的に 50 mm h^{-1} を超えるようになり， D_7 も約 2.8 程度と比較的高い値を取り続けた．一方で Fig. 7(b) に示した CReSS における雨水混合比 q_r の方では， 50 mm h^{-1} 以上の最大地上降水強度が 15 日 0130JST 以降の時間帯で継続して見られた． D_7 は強雨開始直後から増加し，約 2.7 程度の値で経過した．両者の D_7 における時間変化の傾向は概ね一致していた一方で，CReSS の雨水混合比の方はやや小さな D_7 を取っていたことがわかった．

以上の結果から雨水の観点から見た線状対流系のマルチフラクタル特性は以下のように考えられる．まず最初の雨雲が発生する前後の時間帯ではマルチフラクタル性が強い分布がみられる．そして対流系へ発達する時間帯において雨水の分布はマルチフラクタルからモノフラクタルに変化し，準停滞的な降水が見られる時間帯ではモノフラクタルに近い分布が見られる．

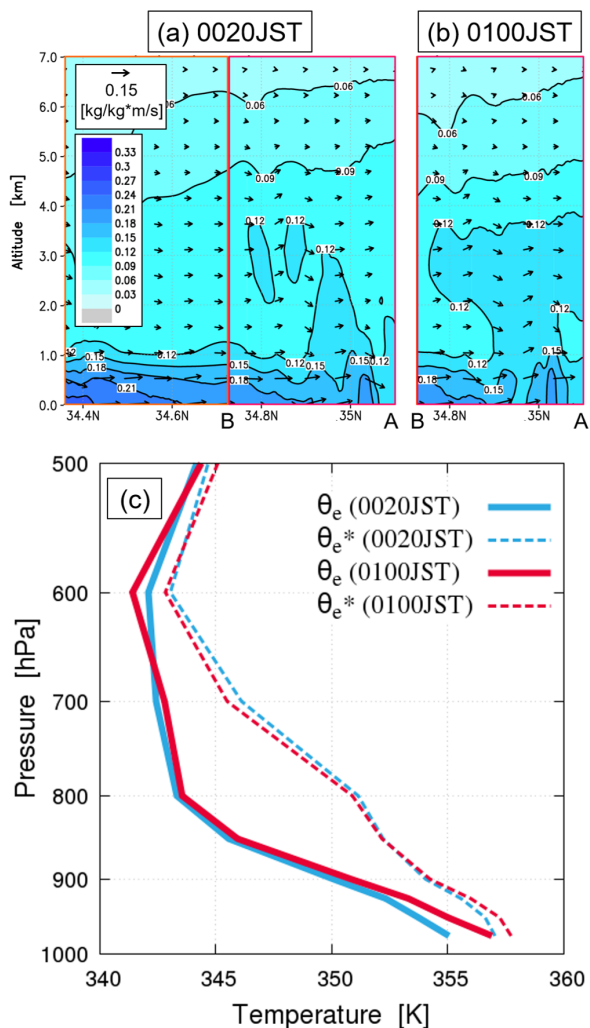


Fig. 5 (a) QVF (color and contours) in the north-south-vertical section along longitude 135.4° at 150020JST. Vectors indicate the north-south-vertical component of the QVF . (b) indicates same as (a) but in Mt. Rokko region at 150100JST. (c) Vertical profiles of the average equivalent potential temperature θ_e (solid line) and saturated equivalent potential temperature θ_e^* (dashed line) in Mt. Rokko region.

(2) 氷相降水粒子分布のマルチフラクタル特性

次に、融解層より上空の氷相降水粒子混合比、および雨滴を主に反映した3次元降水強度の分布についてマルチフラクタル解析を行った。Fig. 8(a), (b)に示した雪片、霰の解析結果において、15日0130JST以前では分散 σ^2 の時間的な変動が大きく、分布自身のフラクタル次元 D_0 も急速に増加した。このことは同時間帯の各粒子分布のマルチフラクタル性が強く、積乱雲の発達に伴い粒子分布が空間的に拡大したことに対応する。一方で0130JST以降の時間帯では、一部の例外を除き分散 σ^2 が小さいモノフラクタル

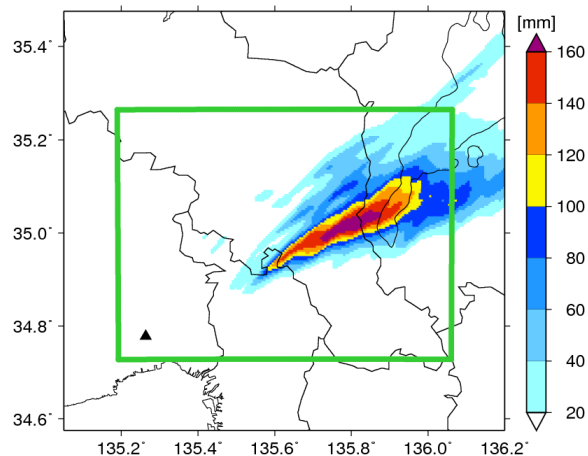


Fig. 6 The accumulated rainfall during 00 to 06 JST 15 July, 2012 in the numerical simulation. Green box indicates the analysis region of multifractal analysis of rainwater mixing ratio [kgkg^{-1}].

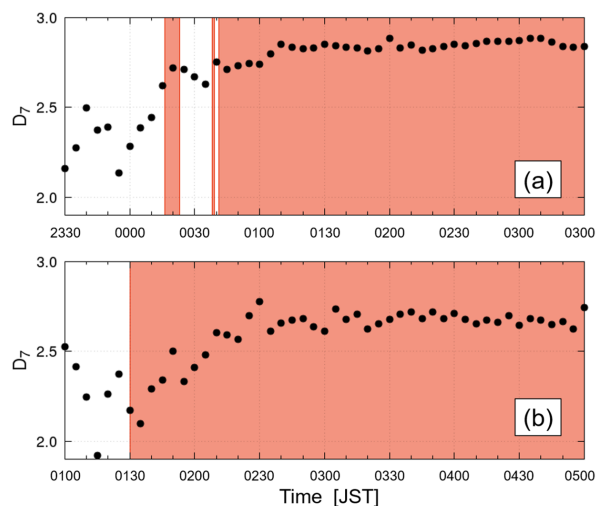


Fig. 7 (a) The temporal change of generalized dimension D_7 which indicates the multifractality of the rainfall intensity [mm h^{-1}] obtained by XRAIN volume scans, and (b) rainwater mixing ratio [kgkg^{-1}] based on the CReSS simulation, respectively (black dots). Red shaded zones in both figures indicate the period the maximum rainfall intensity on the ground more than 50 mm h^{-1} were recorded.

ルに近づく挙動をみせ、 D_0 も緩やかな増加あるいはほぼ一定で経過していた。Fig. 8(c)に示した氷晶混合比は他の2つの氷相降水粒子に比べてマルチフラクタル性がやや強く、時間的な変動も大きい。一方で0130JST以前で変動が大きくなりそれ以降ではモノフラクタルに近づく傾向は霰、雪片と一致してい

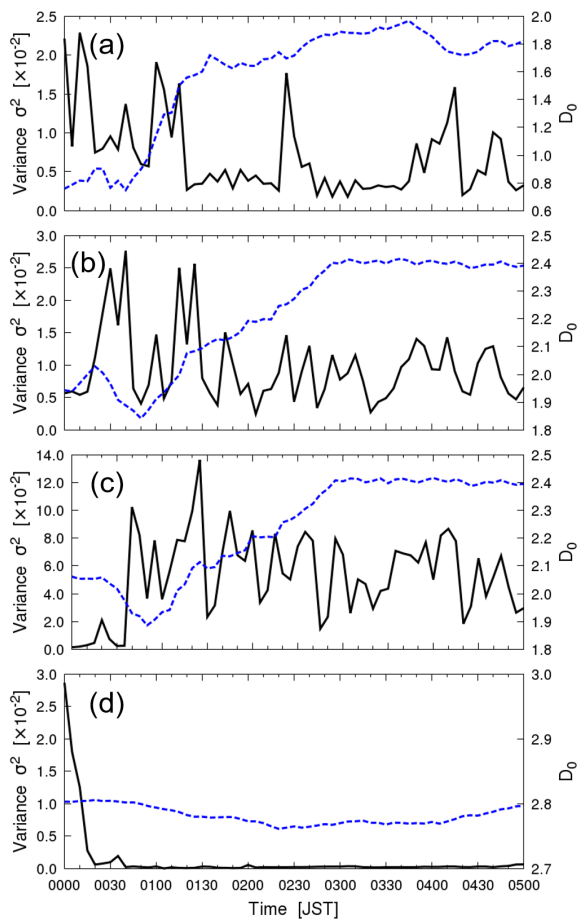


Fig. 8 (a) Black bold line indicates the temporal change of the variance of generalized dimension σ^2 of snow flakes mixing ratio [kg kg^{-1}], and blue dashed line shows the fractal dimension of non-zero value distribution. (b)~(d) indicate the same but for graupel mixing ratio [kg kg^{-1}], ice-crystal mixing ratio [kg kg^{-1}], and three-dimensional rainfall intensity [mm h^{-1}], respectively.

た。また、Fig. 8(d) に示した 3 次元降水強度では、降水が開始した 15 日 00JST 以降急速に分散 σ^2 が減少し、ゼロに近い状態で経過した。これは 3 次元降水強度分布の性質がどの場所でも類似なモノフラクタルに近い状態であることを示唆している。

霰混合比のマルチフラクタル性と、領域平均した地上降水強度の双方の時間変化の比較を Fig. 9(a) に示す。霰混合比分布のマルチフラクタル性に大きな変化が見られた 0100~0130JST では、地上降水強度が急速に増していた。またその水平分布においても同時間帯以降に南西から北東に走向を持つ帯状の強雨域が拡大する様子が確認された。Fig. 9(b) に 10 dBZ 以上のレーダー反射強度領域の、解析領域全体に対する被覆率を示す (Franklin et al. 2016)。15 日

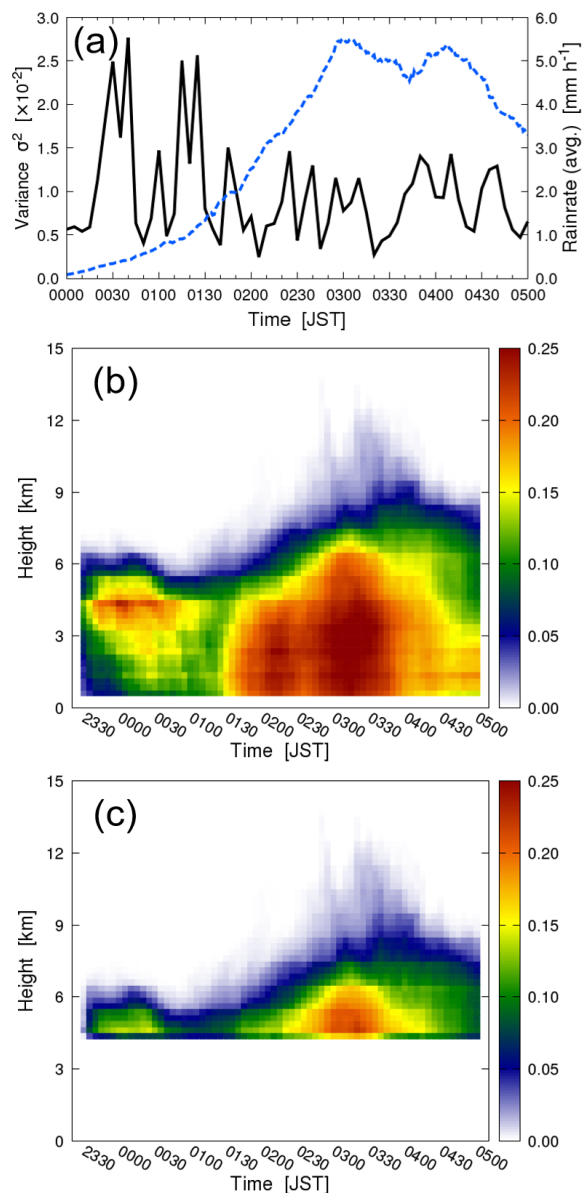


Fig. 9 (a) Black bold line indicates the temporal change of the variance of generalized dimension σ^2 of graupel mixing ratio (same as Fig. 8(b)), and blue dashed line shows the regional averaged rainfall intensity on the ground [mm h^{-1}]. (b) and (c) indicate the fraction of radar-detected area covered by reflectivity greater than 10 dBZ, and the fraction of the grids which exist graupel, respectively.

00JST 前後に高度 4~5 km を中心に雨雲が拡大したものの一度領域が縮小し、その後 0130JST 以降に雨雲が再拡大し対流系へと発達していたことが示唆される。また霰混合比が存在すると判定された格子の被覆率を示した Fig. 9(c) においても、ほぼ同じ時間帯に霰の領域が 3 次元的に拡大していったことがわかる。

霰を始めとした氷相降水粒子分布のマルチフラク

タル性が大きく変化することは、局所的に異なる(多様性のある)性質を持つ分布から様な性質に近い分布に変化することと解釈できる。この要因の一つとして、対流に伴い下層の湿潤空気や過冷却雲粒が上層に輸送され、質量の大きい霰等が生成される領域が広がることが挙げられる。特に0100~0130JST前後での霰混合比分布は、層状かつ斑状の分布から山形かつ団塊状の分布へと変化していた。水蒸気フラックスの観点からは、対流の発達に伴いQVFの大きい領域が鉛直方向に拡大しマルチフラクタル性が強まる時間帯と対応する。複数の物理量のマルチフラクタル性の関連性が示唆されるものの、その詳細な解析は今後の課題とする。

降水粒子が持ちうる質量にはある程度上限があるため、対流系が発達した後の氷相降水粒子分布では粒径分布が概ね一定に保たれることでスケール性に差異が少ない、比較的モノフラクタルに近い状態を保つと考えられる。雨粒も同様に、空気抵抗等の影響で取りうる粒径にも一定の上限があるため、3次元降水強度分布は降水系が形成され始めてすぐにモノフラクタルへ変化したと考えられる。

氷相降水粒子混合比の推定手法については、実際の線状対流系事例においてビデオゾンデ等の観測機器による粒子濃度測定を用いて精度検証を行う必要があること、そして対流性雲において雪片の存在を示す判別結果が過剰に推定されていたことが指摘されている(山口ら, 2013)。しかし、本研究は氷相降水粒子混合比の絶対値ではなく相対値(濃淡)に着目しているため、必ずしも精度の高い混合比推定ではなくても対象分布のマルチフラクタル性について議論は可能であると考えられる。

一方で、Fig. 8(a)~(c)に見られるように、0100~0130JST以外の時間帯にもマルチフラクタル性が変動する。線状対流系が発達するに従い対流雲だけでなく層状性雲も生じるため、解析対象とした時間のうち後半部分については層状性雲における氷相降水粒子の混在状態も考慮に入れて考察する必要がある。また、氷相降水粒子が生成や合体、他の種類の降水粒子への変換、落下といった雲微物理過程により分布が時々刻々と変化していることが予想される。そして氷相降水粒子を生成させる要因(凝結、昇華、合体など)と消滅させる要因(変換、昇華、落下など)がせめぎ合う描像を取り入れたモデルを用いてマルチフラクタル性の変動性を説明できると考えられる。同様の構造を持つモデルは湿潤空気を含む大気場にも適用され得る。こうした議論を通じて、Bak et al. (1988)で提案された自己組織化臨界のように、複数の要因(水蒸気場、風速場など)がせめぎ合うことで

臨界状態が生じ、僅かな変化(地形効果、水平収束など)によりそれまでとは大いに異なるメソスケール規模の状態、すなわち線状対流系を創発させるという新しい視座もたらしることが期待される。

4. 結論

本研究ではマルチフラクタルの観点から線状対流系の自己組織化におけるパターンの事例解析を行った。亀岡豪雨の再現実験に基づいて対流系が発生した領域とその上流側に分けて水蒸気フラックスを解析したところ、前者では対流系の発生前後で特徴的なマルチフラクタル性の変動を示すことを明らかにした。またXRAINの立体観測を用いて降水粒子分布のマルチフラクタル性を解析した。観測とモデルにおける雨水に関する物理量のマルチフラクタル特性を比較したところ、対流系が発達するにしたがってマルチフラクタルからモノフラクタルへ変化するという共通の性質が見られることが明らかになった。さらに雪片・霰・氷晶の混合比分布ではマルチフラクタル性の強さはそれぞれ異なるものの、これらの粒子がモノフラクタルに近づいた時間帯と帯状の強雨域が拡大し始める時間帯がほぼ一致していたことが明らかになった。今後更なる豪雨事例の検討や降水過程の各要素とマルチフラクタル性の関連性の解析を通じて、気象学的な根拠を持つ線状対流系発生の早期探知手法が可能になることが期待される。そして一連の結果はレーダによる立体観測が降水予測において重要な役割を果たすことを示し、さらには線状対流系の発生・発達は自己組織化臨界として解釈されるのかという新たな課題を提起した。

謝辞

本研究はJSPS 科研費22J13778、JST 次世代研究者挑戦的研究プログラムJPMJSP2110の助成を受けました。また一連のXRAIN観測データは国土交通省より提供を受けたものです。

参考文献

- 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. https://doi.org/10.2208/jscejhe.77.2_I_1255
松下貢(2004): フラクタルの物理(II)-応用編-, 裳華房。

- 山口弘誠・古田康平・中北英一 (2013): 偏波レーダーから推定した定性的降水粒子情報の雲アンサンブル同化, 京都大学防災研究所年報, **B 2013**, **56(B)**, pp.369-377. <http://hdl.handle.net/2433/181529>
- 山口弘誠・古田康平・中北英一 (2017): XRAINを用いたアンサンブル同化による線状降水帯の維持と発生の予測, 土木学会論文集 B1(水工学), **73**, 4, pp.211-216. https://doi.org/10.2208/jscejhe.73.I_211
- Bak, P., Tang, C, and Wisenfield, K (1988): Self-organized criticality, *Phys. Rev. A*, **38**, 1, pp.364-374. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.38.364>
- Chang. L. T.-C., Chen. G. T.-J., and 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**, pp.43–63. <https://doi.org/10.1007/s00703-008-0286-7>
- Franklin, C. N., Protat, A., Leroy, D., and Fontaine, E. (2016): Controls on phase composition and ice water content in a convection-permitting model simulation of a tropical mesoscale convective system, *Atmos. Chem. Phys.*, **16**, pp.8767–8789, <https://doi.org/10.5194/acp-16-8767-2016>.
- Ivanov, P., Amaral, L., Goldberger, A. *et al.* (1999): Multifractality in human heartbeat dynamics, *Nature*, **399**, pp.461-465.
- Jeong. J., Lee. D., and Wang. C. (2016): Impact of the Cold Pool on Mesoscale Convective System-Produced Extreme Rainfall over Southeastern South Korea: 7 July 2009, *Mon. Wea. Rev.*, **144**, pp.3985-4006. <https://doi.org/10.1038/20924>
- Lee. J., Paz. I., Schertzer. D., Lee. D. I., and Tchiguirinskaia, I. (2020): Multifractal Analysis of Rainfall-Rate Datasets Obtained by Radar and Numerical Model: The Case Study of Typhoon Bolaven (2012). *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, **59**, pp.819-840. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-18-0209.1>
- Manda. A., Nakamura, H., Asano, N. *et al.* (2014): Impacts of a warming marginal sea on torrential rainfall organized under the Asian summer monsoon, *Sci. Rep.* **4**, 5741pp. <https://doi.org/10.1038/srep05741>
- Olsson. J., and Niemczynowicz. J. (1996): Multifractal analysis of daily spatial rainfall distributions. *J. Hydrol.*, **187**, pp.29-43. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(96\)03085-5](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(96)03085-5)
- Takemi. T., and Unuma. T. (2019): Diagnosing Environmental Properties of the July 2018 Heavy Rainfall Event in Japan, *SOLA*, **15A**, pp.60-65. <https://doi.org/10.2151/sola.15A-011>
- Tsuboki. K., and Sakakibara. A. (2002): Large-scale parallel computing of cloud resolving storm simulator, *High Performance Computing*, Springer, pp.243-259. https://doi.org/10.1007/3-540-47847-7_21
- Zhao. N. *et al.* (2021): A Lagrangian View of Moisture Transport Related to the Heavy Rainfall of July 2020 in Japan: Importance of the Moistening Over the Subtropical Regions, *Geophys. Res. Lett.*, **48**, e2020GL091441. <https://doi.org/10.1029/2020GL091441>

(論文受理日 : 2022 年 8 月 31 日)