

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

大野 哲之¹・山口 弘誠²・中北 英一³

¹学生会員 京都大学大学院工学研究科 (〒 612-8106 京都市西京区京都大学桂)
E-mail: ono.akiyuki.76n@st.kyoto-u.ac.jp (Corresponding Author)

²正会員 京都大学准教授 防災研究所 (〒 611-0011 宇治市五ヶ庄)
E-mail: yamaguchi.kosei.5r@kyoto-u.ac.jp

³正会員 京都大学教授 防災研究所 (〒 611-0011 宇治市五ヶ庄)
E-mail: nakakita@hmd.dpri.kyoto-u.ac.jp

マルチフラクタルは定量的なパターン解析手法として降水現象を始め様々な分野で応用されている。本研究では線状対流系の3次元的自己組織化パターンを特徴づけるべく、水蒸気フラックスや降水粒子分布のマルチフラクタル解析を行った。2012年7月15日に発生した亀岡豪雨を対象とした再現実験を用いて対流系近傍の水蒸気フラックスを解析した。その結果、豪雨開始直前は対流不安定度の増加と対応してモノフラクタルに近づく傾向を見せたのに対し、対流系の形成とともにマルチフラクタル性が強まる傾向を見せた。またXバンド偏波レーダによる立体観測に基づき、氷相降水粒子の混合比を推定・解析した。帯状の強雨域が拡大し始め、地上降水強度の増加速度が増す時間帯と、霰・雪片混合比のマルチフラクタル性が大きく変化する時間帯が一致した。

Key Words: line-shaped rain band, water vapor flux, ice-phase precipitation particles, multifractal

1. 研究の背景

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、及び総観規模の流れに伴う水蒸気流入¹⁾、高い海面水温²⁾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ける、地形に伴う下層の湿潤空気輸送に関する研究もされている³⁾。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評価に有効であることが指摘されている⁴⁾。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縮小するためである。

水蒸気に着目した議論と同様に、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氣プールは、バックビルディングタイプ⁵⁾の線状対流系の発達に寄与する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)⁵⁾。山口ら(2017)はXバンド偏波レーダから推定した氷相降水粒子混合比のデータ同化を行い、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が望めると指摘した⁶⁾。このように水物質の潜熱移動を始めとした雲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線

状対流系の組織化の側面の一つと考えられる。

本研究では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水蒸気フラックス場から、外的な介入がなくとも自らの内的要因により対流が生じ、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ル指数(べき乗則)を推定し、分布全体でのスケール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る性質である(Olsson and Niemczynowicz (1996)など)⁷⁾。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数値実験のものと比較し、高度別に観測・モデルの雨量分布の類似性を議論した⁸⁾。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研究されていない。さらには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次元空間中で時間発展する現象であるた

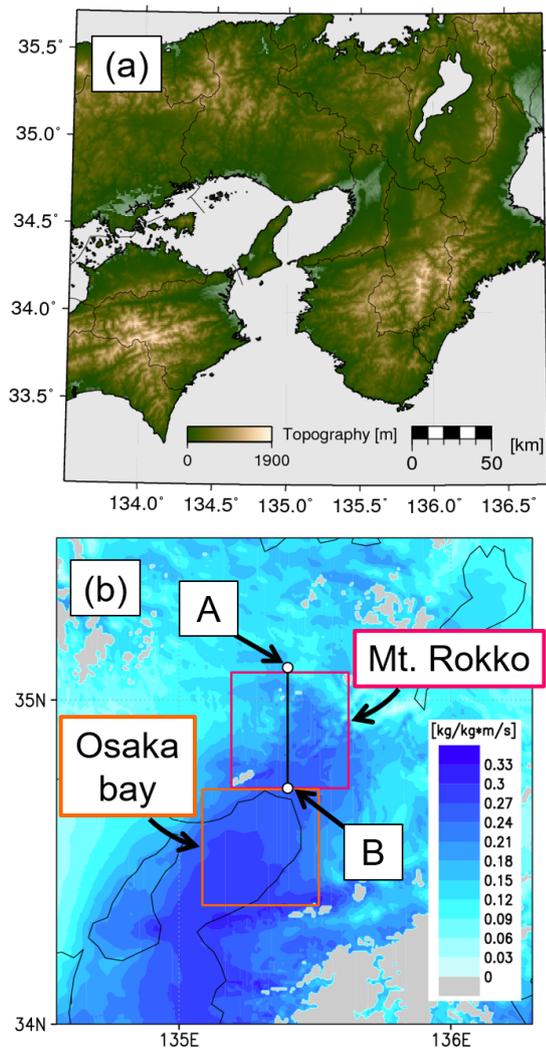


図-1 (a) 亀岡豪雨の再現実験における計算領域, (b) 計算結果を鉛直補間して得た 15 日 0100JST, 高度 250 m における QVF の分布, および各解析領域の位置.

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, 前者には数値実験を, 後者には 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・混合比分布を用いた.

2. 解析手法

(1) マルチフラクタル解析

解析領域をサイズ ε のピクセルに分割し, ゼロでない値の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 $Z_q(\varepsilon)$, 及び一般化次元 D_q を式 (1) のように定義する.

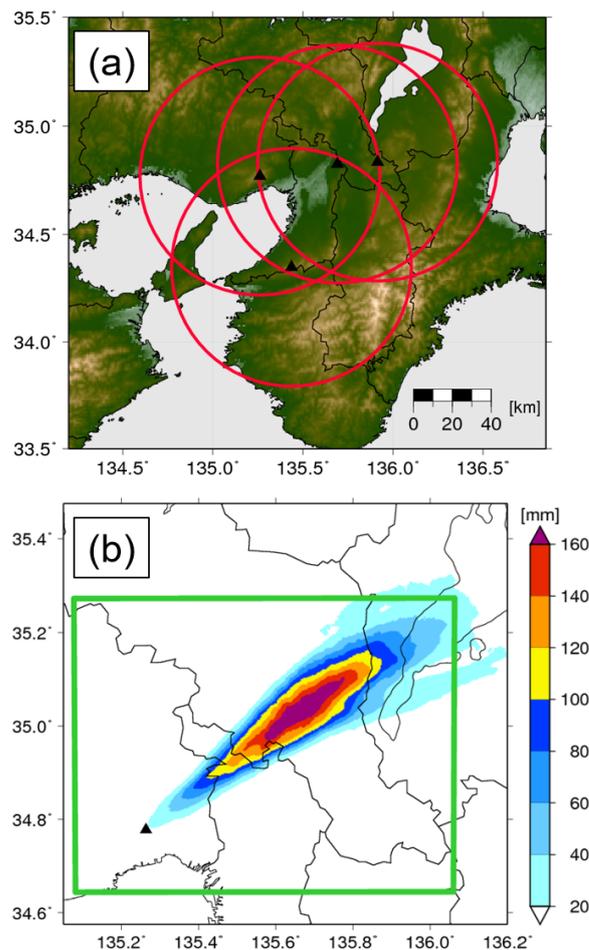


図-2 (a) 近畿地方における国土交通省管轄の X バンド偏波レーダの位置 (黒三角), 最大観測範囲 (赤丸), (b) XRAIN 観測に基づく 15 日 00~06JST の積算降水量, および降水粒子分布の解析領域 (緑線).

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

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

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, 分配関数 $Z_q(\varepsilon)$ に寄与する確率測度 $P_i(\varepsilon)$ の部分のチューニングが可能である. また一般化次元の定義から, D_0 は有効な値が広がる領域全体のフラクタル次元である. サイズ ε を変えて分配関数 $Z_q(\varepsilon)$ を算出し, 分配関数 $Z_q(\varepsilon)$ をサイズ ε のべき乗則に近似することで, 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. 解析する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⁹⁾. 以上の性

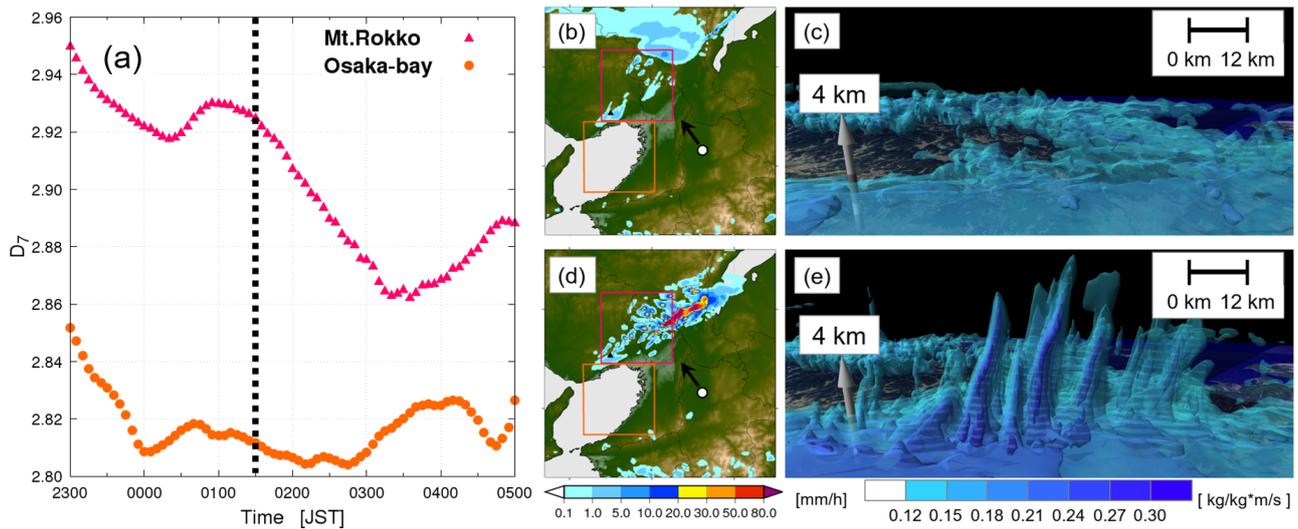


図-3 (a) 各解析領域における QVF の一般化次元 D_7 の時系列. 黒破線は 50 mm h^{-1} 以上の地上降水強度が初めて見られた時刻. (b) 再現実験における 15 日 0100JST の地上降水強度, および (c) 同時刻の QVF 分布を六甲山領域の南東側から俯瞰した図. (d), (e) は豪雨時, 15 日 0230JST における同様の図. ((b), (d) 中の白丸は俯瞰の視点位置を示す.)

質より, 本研究ではマルチフラクタル性の度合いを示す指標として, 水蒸気フラックスには一般化次元 D_7 を, 3次元降水強度・降水粒子混合比分布には $0 \leq q \leq 7$ における一般化次元 D_q の分散 σ^2 をそれぞれ採用した. 前者はモデルの性質上 D_0 が時間によらず一定であり, D_q スペクトルの差異が 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. また後者は降水エコーの形状が時刻で変化するため D_0 も変化する. このため前者のように D_7 の単純な比較ではマルチフラクタル性の評価が難しい. また比較的値の大きい領域に焦点を当てた解析を行うためにも分散 σ^2 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.

(2) 再現実験の設定と解析変数

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 CReSS¹⁰⁾ を用いた再現実験の計算領域を図-1 (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. 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¹¹⁾. CReSS の予報変数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.

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

ま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. 図-1 (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 に関する解析では豪雨が発生した六甲山領域 (図-1 (b) 赤線), およびその上流側である大阪湾領域 (図-1 (b) 橙線) に分けて解析を行った.

(3) XRAIN 立体観測に基づく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成した. 図-2 (a) に, データ作成に使用した 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については, 各偏波パラメータ, および山口ら (2013) の手法¹²⁾ 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, 解析領域は図-2 (b) の緑線で囲まれた領域に設定した.

3. 解析結果と考察

(1) 水蒸気フラックス (QVF) のマルチフラクタル特性

図-3 (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た。これは下層ジェットの影響により QVF 分布の濃淡がより明瞭だ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。図-3 (b), (c) に豪雨開始前の地上降水強度と QVF 等値面を示す。特徴的な対流がない豪雨開始前では、QVF 等値面の凹凸は少なかった。一方で図-3 (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 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、図-3 (e) では豪雨開始前に比べて QVF 極大域の上流側の気層下層においても値が増加していることが見て取れる。このことは対流が活発化したことで、下層の QVF の水平収束が強まったことと対応することを示唆している。

図-4 (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 $0.12 \text{ [kg kg}^{-1} \text{ m s}^{-1}]$ 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図-4 (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より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¹³⁾。図-3 の大阪湾領域における 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(図-4)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。

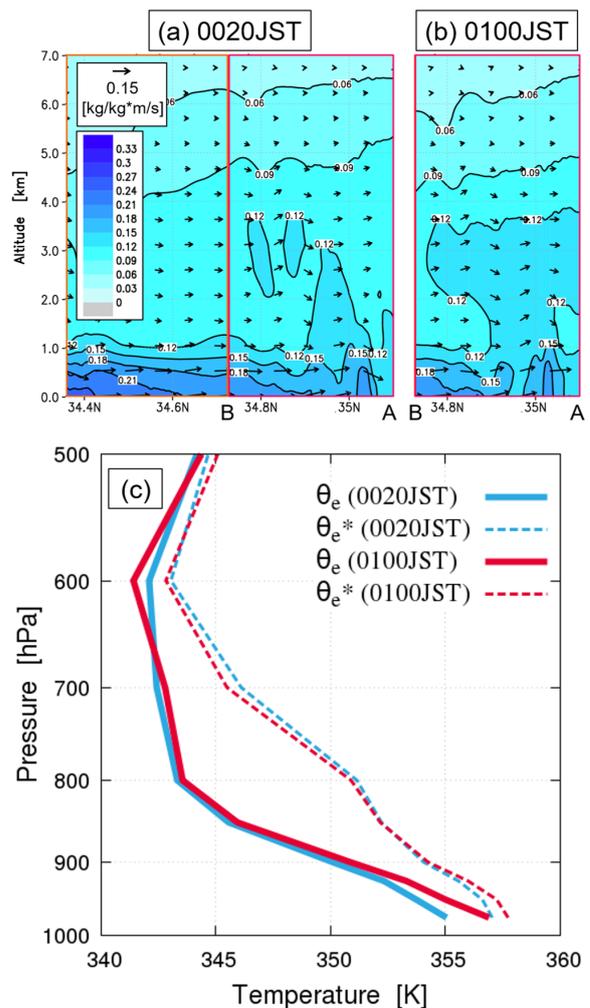


図-4 (a)15日0020JST、経度135.4度線に沿った南北-鉛直断面におけるQVF(色・等値線)、ベクトルはQVFの南北-鉛直成分を、A、Bは図-1(b)中の位置を示す。(b)15日0100JSTにおける六甲山領域の水蒸気フラックスQVF。(c)六甲山領域の平均的な相当温位 θ_e (実線)、飽和相当温位 θ_e^* (破線)の鉛直プロファイル。

(2) 降水粒子分布のマルチフラクタル特性

次に、融解層より上空の水相降水粒子混合比、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。図-5 (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た。図-5 (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

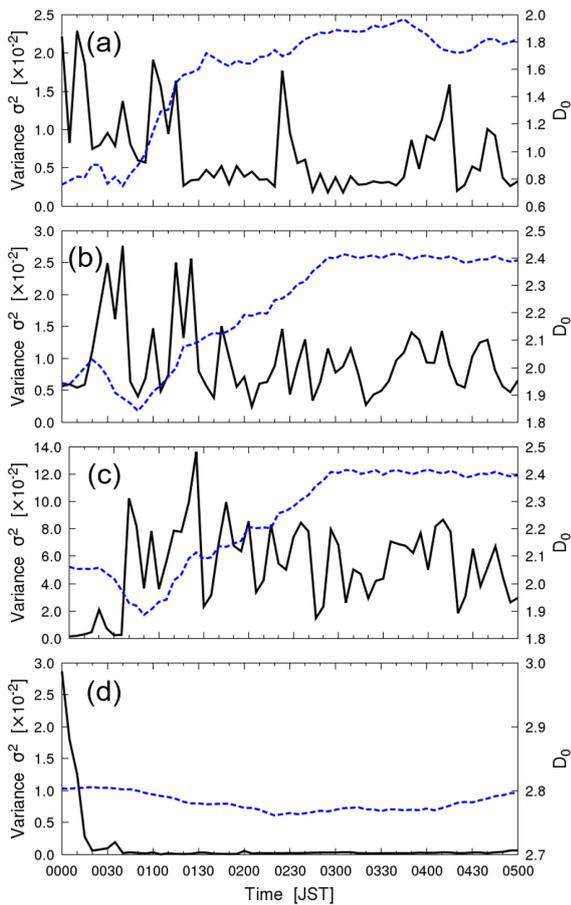


図-5 (a) 雪片混合比の一般化次元の分散 σ^2 (黒実線), および D_0 (青破線) の時系列. (b)~(d) はそれぞれ霰混合比, 氷晶混合比, 降水強度の解析結果を示している.

片と一致していた. また, 図-5 (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図-6 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. またその水平分布で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していた (図示なし). 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一様な性質に近い分布に変化することと解釈できる. この要因の一つに, 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 (図示なし). 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

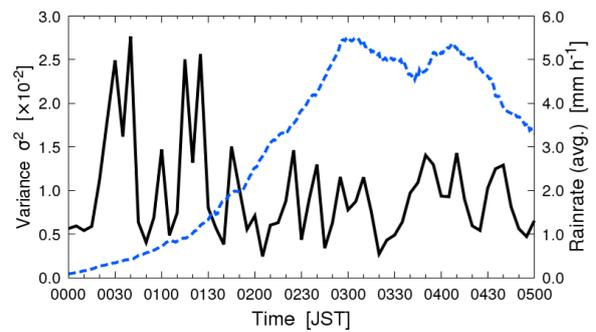


図-6 霰混合比の一般化次元の分散 σ^2 (黒実線, 図-5 (b) の再掲), および領域平均地上降水強度 (青破線) の時系列.

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.

降水粒子の質量には一定程度の上限があるため, 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の少ない, モノフラクタルに近い状態に保たれたことが示唆される. 同様に雨粒も取りうる粒径に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は, 実際の線状対流系事例で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点や, 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る点が指摘されている¹²⁾. 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) に着目するため, 必ずしも精度の高い混合比推定ではなくても解析対象のマルチフラクタル性について議論は可能と考えられる.

図-5 (a)~(c) の分散 σ^2 (黒破線) のように, 0100~0130JST 以外の時間帯にもマルチフラクタル性が変動する. 降水粒子分布の拡大に対応して青破線のフラクタル次元 D_0 が比較的滑らかに増加する. 一方で 3 次元分布を考慮した分散 σ^2 の時間的な変動には水蒸気フラックスを含む雲物理過程が反映されていることが示唆される. 加えて, 氷相降水粒子の生成や合体, 他の種類の降水粒子への変換, 落下といった雲物理過程により分布が時間変化することが予想される. 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によりマルチフラクタル性の時間変動が説明されると考えられる. 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うる. 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すことが期待される¹⁴⁾.

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について事例解析を行った。2012年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。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 of 早期探知手法が可能になることが期待される。そして本研究の一連の結果は、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JSPS22J13778, 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。XRAINデータは国土交通省より提供されたものです。

参考文献

- 1) N, Zhao et al. : 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, 2021.
- 2) A, Manda et al. : Impacts of a warming marginal

- sea on torrential rainfall organized under the Asian summer monsoon, *Sci. Rep.*, **4**, 2014.
- 3) Chang, L.C., Chen, G.J. & Cheung, K : Mesoscale simulation and moisture budget analyses of a heavy rain event over southern Taiwan in the Meiyu season. *Meteorol. Atmos. Phys.*, **101**, 43–63, 2008.
- 4) T. Takemi, and T. Unuma, Diagnosing Environmental Properties of the July 2018 Heavy Rainfall Event in Japan, *SOLA*, **15A**, 60-65, 2019.
- 5) Jeong, J., Lee, D., and Wang, C. : Impact of the Cold Pool on Mesoscale Convective System-Produced Extreme Rainfall over Southeastern South Korea: 7 July 2009, *Mon. Wea. Rev.*, **144**, 3985-4006, 2016.
- 6) 山口弘誠, 古田康平, 中北英一 : 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, 211-216, 2017.
- 7) Olsson, J., and Niemczynowicz, J. : Multifractal analysis of daily spatial rainfall distributions. *J. Hydrol.*, **187**, 29-43, 1996.
- 8) Lee, J., Paz, I., Schertzer, D., Lee, D. I., and Tchiguirinskaia, I. : Multifractal Analysis of Rainfall-Rate Datasets Obtained by Radar and Numerical Model: The Case Study of Typhoon Bolaven (2012). *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, **59**, 819-840, 2020.
- 9) 松下貢 : フラクタルの物理 (II) -応用編-, 裳華房, 2004.
- 10) Tsuboki, K., and A. Sakakibara: Large-scale parallel computing of cloud resolving storm simulator, *High Performance Computing*, Springer, 243-259, 2002.
- 11) 小坂田ゆかり, 中北英一 : 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, 1255-1260, 2021.
- 12) 山口弘誠, 古田康平, 中北英一 : 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)**, 369-377, 2013.
- 13) Ivanov, P., Amaral, L., Goldberger, A. et al. : Multifractality in human heartbeat dynamics, *Nature*, **399**, 461-465, 1999.
- 14) Bak, P., Tang, C, and Wisenfeld, K : Self-organized criticality, *Phys. Rev. A*, **38**, 1, 364-374, 1988.

(Received May 31, 2022)

(Accepted September 1, 2022)

MULTIFRACTAL PROPERTIES OF WATER VAPOR FLUX AND PRECIPITATION PARTICLES IN LINE-SHAPED RAIN BAND

Akiyuki ONO, Kosei YAMAGUCHI, and Eiichi NAKAKITA

Multifractal has been widely applied as the tool of quantitative pattern analysis. In this study, multifractal properties of water vapor flux and precipitation particles distribution associated with line-shaped rain bands were analyzed 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.