

## メソスケール降水系における水蒸気フラックスのマルチフラクタル特性の比較

京都大学大学院工学研究科 学生会員 ○大野 哲之  
 京都大学防災研究所 正会員 山口 弘誠  
 京都大学防災研究所 正会員 中北 英一

## 1. 研究背景

メソスケール(数十～数百 km)程度の空間規模を有する線状対流系やマルチセルは、我が国の流域・河川において甚大な災害を発生させるリスクの高い現象である。こうした現象では、個々の積乱雲の寿命が約1時間であるのに対して、積乱雲の世代交代が創発的に生じることで豪雨の継続時間が長くなる過程、すなわち自己組織化が重要な役割を果たしている。線状対流系やマルチセルの風速場はレーダー・モデルの双方の観点から盛んに解析されており(例えば Parker and Johnson (2000) など [1])、鉛直シアが対流系の形状や持続時間を左右する可能性が示唆されている(Unuma and Takemi (2016) など [2])。先行研究からも降水系の自己組織化において時間的・空間的に特有のパターンが見られることは想像に難くないものの、降水系周辺の水蒸気の流れ(フラックス)におけるマルチフラクタル性については注目されてこなかった。マルチフラクタルを用いることで、スケーリング指数の局所的なゆらぎ度合いを定量的に評価し、対象とする分布のパターンを特徴づけることが可能になる。本研究ではメソスケール降水系の一種である線状対流系とマルチセル双方の事例について再現計算を行い、降水系周辺における水蒸気フラックスのマルチフラクタル性の時間変化について比較検討する。

## 2. 解析手法

マルチフラクタル解析では、解析領域をサイズ  $\varepsilon$  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値  $P_i(\varepsilon)$  を算出する。確率値  $P_i(\varepsilon)$  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  $D_q$  を図1のように定義する。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  $Z_q(\varepsilon)$  に寄与する確率値  $P_i(\varepsilon)$  の部分をチューニングすることが可能である。サイズ  $\varepsilon$  を変えながら分配関数  $Z_q(\varepsilon)$  を評価し、そのスケーリング指数を近似的に算出することで一般化次元  $D_q$  が計算される。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等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、確率値によって空間的な偏り度合いに差が小さい場合、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 [3]。本研究ではマルチフラクタル性の指標として一般化次元  $D_7$  に着目した。線状対流系事例には2012年7月15日に発生した京都亀岡豪雨、マルチセル事例には2014年9月10日に大阪

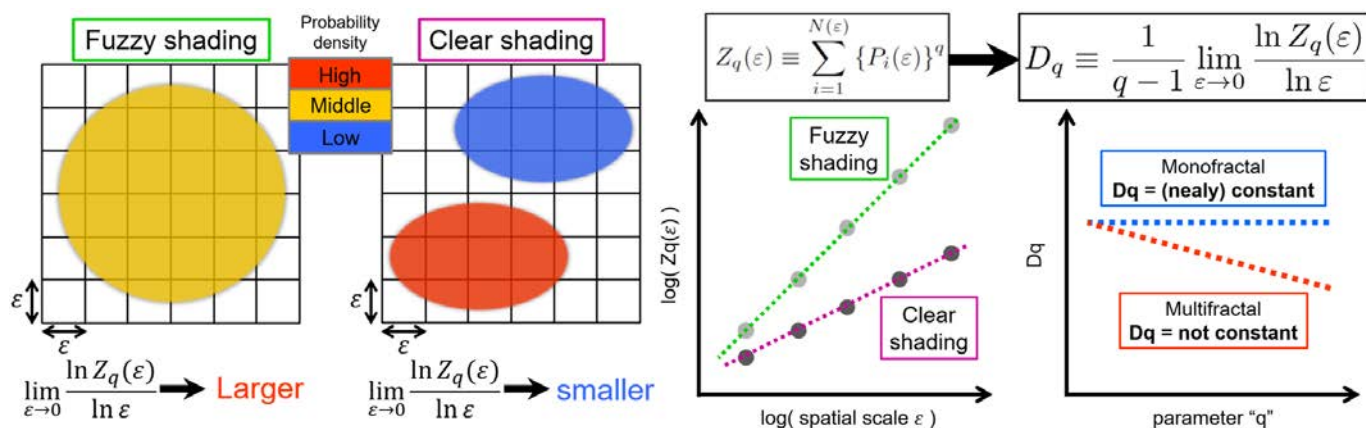


図1: マルチフラクタル解析の概念図。分配関数  $Z_q$  と一般化次元  $D_q$  により解析対象の空間的均質性を定量的に評価する。

キーワード 線状対流系, マルチセル, 自己組織化, マルチフラクタル, 水蒸気フラックス

連絡先 〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄 京都大学防災研究所 E-mail: ono.akiyuki.76n@st.kyoto-u.ac.jp

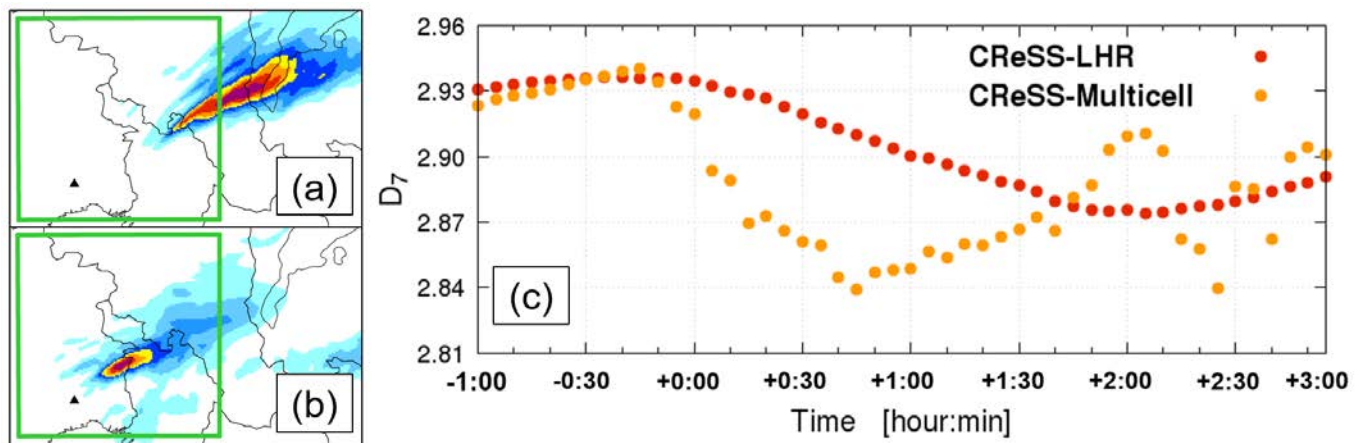


図2: 再現計算の6時間積算降水量((a)線状対流系, (b)マルチセル), および水蒸気フラックスの一般化次元  $D_7$  の時間変化.

府を中心に発生した集中豪雨を対象とした。2つの事例とも雲解像モデル CReSS の水平解像度は 500m に設定し、気象庁 MSM を初期値・境界値に使用して近畿地方全体を計算領域とした再現計算を行った。

### 3. 解析結果

図 2(a), (b) はそれぞれ線状対流系, およびマルチセルの再現実験における 6 時間積算降水量である。観測値との比較より降水量の分布は概ね再現されていることが確認された。また計算領域の中でも主要な対流発生域はどちらの計算においても京都府南部から六甲山付近の領域であった。そこで図 2(a), (b) の緑線で示した水平方向  $60 \times 60\text{km}$ , 鉛直方向約  $12\text{km}$  の領域を対象として水蒸気フラックスのマルチフラクタル解析を行った。ここで言う水蒸気フラックスとは、水蒸気混合比および 3 次元風速場のノルムの積であることに留意されたい。図 2(c) は  $D_7$  の時間変化 (線状対流系は赤点, マルチセルは橙点) を示している。ただし、地表面の格子で  $50\text{mm/h}$  以上の雨が初めて発生した時間を基準に表示している。 $D_7$  の値が 3 に近づくほどモノフラクタル, 減少するほどマルチフラクタルの度合いが強いることを意味している。そのため、どちらの事例も強い降水強度が発生する前の水蒸気フラックスはモノフラクタルに近く、降水強度が増加するとマルチフラクタル性が強まることを示唆される。ただし、線状降水帯では降雨開始後に  $D_7$  が約 2 時間に亘り比較的緩やかに減少したのに対して、マルチセルでは  $D_7$  の減少幅が大きく、1 時間程度で増加に転じた。地表面付近で強い降水が発生し始める時間帯において  $D_7$  の値が減少することは次のような意味を持つと考えられる。すなわち、対流に伴い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拡大し、組織化される過程は、不均質性が顕著なマルチフラクタルにより特徴づけられることを意味する。線状対流系では鉛直シアが比較的大きい環境場がみられる時に発生するため、上空の風向に対して風上側で発生する発達期の積乱雲が風下側に移動する。一方でマルチセルでは発達段階の異なる積乱雲が比較的近い領域に混在することが多い。以上を鑑みると、解析領域内において線状対流系の方が発達期の積乱雲が多く存在していたことが予想され、ひいては水蒸気フラックスのマルチフラクタル度合いが、マルチセルの場合とは異なることと対応関係があることが示唆される。

### 4. まとめと今後の展望

再現実験に基づき線状対流系とマルチセルに伴う水蒸気フラックスのマルチフラクタル性の時間変化を比較した。双方の事例の共通点として、豪雨が発生する前の水蒸気フラックスはモノフラクタルに近いのに対して、豪雨開始後になるとマルチフラクタルの度合いが強まることが挙げられる。一方で、上昇流と主要な降水域との距離が離れている線状対流系の方が水蒸気フラックスのマルチフラクタル化がより長時間持続した。今後は対流不安定度などの熱力学的な観点からの解析を併せて行うことで、メソスケール降水系の自己組織化を引き起こす要因とその予測可能性、および予測限界について議論することが課題である。

#### 参考文献

- [1] M. D. Parker., R. H. Johnson (2000). Organizational Modes of Midlatitude Mesoscale Convective Systems. *Monthly Weather Review*, 128, 10, 3413-3436.
- [2] Unuma. T., and Takemi. T. (2016). A role of environmental shear on the organization mode of quasi-stationary convective clusters during the warm season in Japan. *SOLA*, 12, 111-115.
- [3] 松下貢, フラクタルの物理 (II) -応用編-, 裳華房, 2004.