

線状対流系の組織化指標に対するマルチフラクタルの状態変化の先行性
Precedent Multifractal Variation against Organizing Index of Linear-shaped Convective Systems

○大野哲之・山口弘誠・中北英一

○ Akiyuki ONO, Kosei YAMAGUCHI, Eiichi NAKAKITA

Early warnings of LCSs considering the meteorological aspects of observation and numerical simulation data are essential in ensuring lead time for flooding controls and evacuation. The current study examines the diagnostic approach of multifractal analysis for LCSs using a cloud-resolving model with 500-m horizontal resolution. We defined multifractal as power laws of 3D spatial scale for water vapor flux (QVF) and turbulence kinetic energy (TKE). To define the period of the organization of LCS, we estimate the temporal variation of convective mass flux (CMF) which is the total volume of upward moisture flux and fractal dimension of updraft (FDU). When the isolated convective clouds initiated FDU showed a gradual increasing tendency. CMF and FDU increase as merging convective clouds and forming LCS and we defined this period as the organization of LCS. Our analyses revealed multifractal signals on QVF and TKE that appeared about 1-h before LCS organization (148 words).

1. はじめに

局所的な小スケールの要因で発生する線状対流系の発生予測は未だ挑戦的な課題である。線状対流系の発生前から積乱雲群の組織化までの大気場パターンを定量的に評価し、発生 of 早期探知をリアルタイムで捉える枠組みは、治水管理や避難のリードタイムを大きくする意味で重要な課題である。数多くの先行研究がメソ対流系の組織化過程について議論している（例えば Kato (2020) など）。一方で線状対流系の3次元的なメカニズムに根差して組織化を定量的に規定した研究はない。

そこで本研究ではまず、雲解像モデル実験における3次元的な上昇流域の時間変化から線状対流

系の組織化を定量的に診断する手法を検討する。そして大野ら (2022) が示した線状対流系周辺のマルチフラクタル的変動が組織化に先行して生じることを示し、マルチフラクタルの豪雨早期探知手法への応用可能性を検討する。

2. 解析手法

雲解像モデルには CReSS を使用した。近畿地方全域に渡る水平解像度 500 m の計算領域を設定し、2012 年 7 月 15 日に発生した京都亀岡豪雨を対象に再現実験を行った。初期値・境界値には気象庁 MSM 解析値を使用し、モデルに与えた地形は解像度約 30 m の SRTMGL1 を用いて作成した。

マルチフラクタル解析の手法は大野ら (2022) を用いた。CReSS の予報変数である水蒸気混合比・3次元風速場を用いた水蒸気フラックス (QVF)、および乱流運動エネルギー (TKE) について解析した。マルチフラクタル性の強さを表す指標として一般化次元の差分 $\Delta D_q \equiv D_1 - D_7$ を用いた。

ここで対流系周辺の3次元空間内の上昇流域に着目した組織化指標として以下の2つを定義した: (i) 上昇流域のフラクタル次元 (D_0), (ii) 対流性質質量フラックス (Convective Mass Flux; CMF)。ただし上昇流域は $w \geq 1 \text{ m s}^{-1}$ を満たす格子の集合とした。前者は上昇流域の3次元的な広がり度合いの指標、後者は上昇流によって上向きに輸送される湿潤空気の総量と解釈することができる。

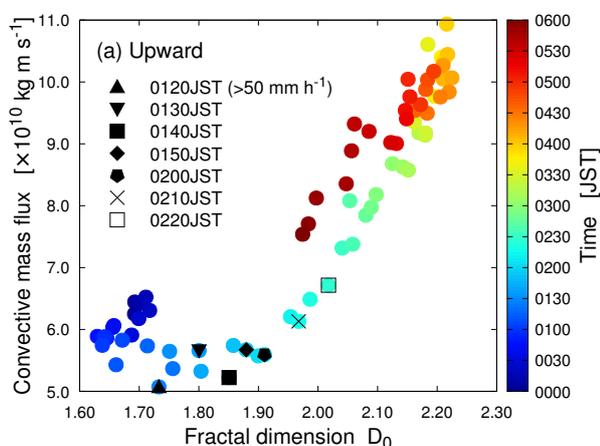


図 1: 組織化指標の毎 5 分の時系列。横軸を上昇流域のフラクタル次元 D_0 に、縦軸を CMF に設定した。

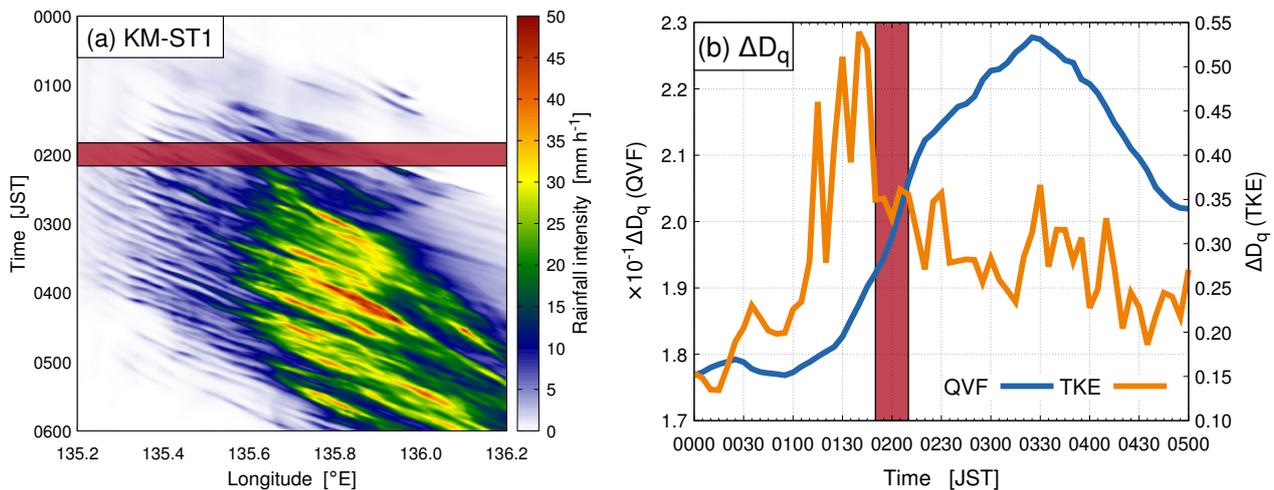


図 2: (a) 線状対流系の再現計算における (南北平均した) 地上降水強度のホフメラー図. (b) 対流系近傍領域のマルチフラクタル指標の時系列. 赤色は図 1 の変曲点に基づいて組織化の時間帯と判定した時間帯を表す.

3. 解析結果

図 1 に組織化指標 D_0 , CMF を 5 分毎に色で塗り分けたプロットを, 図 2(a) に再現計算における地上降水強度の時空間特性を示す. 線状対流系に直接関連した降水強度 50 mm h^{-1} 以上の地点が始めて確認された豪雨開始時刻 (0120 JST) を示す上三角の時刻よりも前から, D_0 が増加していた. この間 CMF はほぼ横ばいであった. 最初の降水域は北東方向へ移動し, その上流側である 135.6° E 付近で新たな降水域が継続的に発生した (図 2(a)).

一方で 0150 JST 以降 (図 1 の菱形) ではプロットが右上への上昇傾向に転じ, D_0 と CMF の両方が増加している様子が見られた. プロットの移動傾向が右から右上へ変化するこの点を変曲点と呼ぶことにする. 高度約 1.5 km における上昇流域は, 変曲点以前では団塊状であるのに対して, 0220 JST 以降では大阪北部から京都府南部にかけて帯状の上昇流域が形成されるようになった. 降水強度も 30 mm h^{-1} 以上の強雨域 (図 2(a) 黄色) が断続的に出現し, バックビルディング型の線状対流系として成熟段階にあったと考えられる. その後図 1 では同様の増大傾向が継続し, 対流系が衰退に向かう 0430 JST 以降では D_0 , CMF の両方が減少に転じた. これは, 線状対流系が衰退期を迎える兆候を捉えるという点においても D_0 が有効であることを示唆する結果である.

以上の結果を踏まえると, 組織化指標のプロット図 1 で変曲点を迎えた時刻は上昇流域が帯状のまとまりを有するようになる時間帯と重なる. 従って変曲点の時間帯を線状対流系の組織化の

時間帯と定義する. 今回の再現実験の場合では 0150-0210 JST が組織化の時間帯と考えられる.

組織化の時間帯を踏まえた上でマルチフラクタル指標 ΔD_q の時系列との比較する (図 2(b)). QVF, TKE のどちらの ΔD_q も組織化の時間帯の約 1 時間前 (豪雨開始の約 20 分前) に増加傾向に転じていたことが明らかになった. 2つの ΔD_q が増大する原因は線状対流系初期の浅い対流が周囲とは異なるべき乗則に従っていると判定されるためである. QVF は対流の発達とともに比較的大きい値が対流コア・上流側の下層ジェットに集中し, さらにマルチフラクタル性が強まった. 一方で TKE は対流系の初期段階において最も ΔD_q が増大するものの, 組織化の時間帯以降は減少に転じ一定範囲内で推移した. これは下層ジェットに伴う水蒸気の潜熱放出が継続することで乱流生成が保たれたことと関係すると考えられる.

4. まとめ

本研究では 3 次元的な上昇流域に着目した線状対流系の組織化指標を定義し, マルチフラクタル的変動の組織化指標に対する先行性を示した.

参考文献

- Kato, T.: Quasi-stationary band-shaped precipitation systems, named “Senjo-kousuitai”, causing localized heavy rainfall in Japan. *J. Meteor. Soc. Japan*, **98**, 485–509, 2020.
- 大野哲之・山口弘誠・中北英一: 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. 土木学会論文集 B1(水工学), **78**, 319–324, 2022.