

メソ対流系の組織化における水蒸気輸送・乱流・降水粒子分布のマルチフラクタル特性 Multifractal Properties of Water Vapor Flux, Turbulence, and Precipitation Particles Distribution in Organizing Process of Mesoscale Convective Systems

○大野哲之・山口弘誠・中北英一

○ Akiyuki ONO, Kosei YAMAGUCHI, Eiichi NAKAKITA

Self-organization process of convective clouds plays an essential role to maintain mesoscale convective systems which caused water-related disasters. Multifractal analyses of three-dimensional water vapor flux, turbulence kinetic energy (TKE), and graupel were conducted to describe the characteristics on the organizing process of convection systems. 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. The analysis of TKE revealed that almost constant signatures were shown in time when the line-shaped rain band was forming and maintained. Graupel mixing ratio obtained by the volume scans of X-band radars showed discontinuous change on the multifractality when the rainfall began to increase, suggesting that massive graupel was widely formed by the transport of water vapor and supercooling cloud particles (135 words).

1. はじめに

メソスケール(数十～数百 km)程度の空間規模を有するメソ対流系は、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。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。先行研究において、メソ対流系の一種である線状対流系が発生しやすい環境場の特徴に鉛直シアや下層の湿潤空気の流入といった特徴が指摘されている(Unuma and Takemi 2016 [1]など)。しかし、対流系が組織化される大気場の時間的・空間的なパターンをマルチフラクタルで特徴づける研究はほとんどない。マルチフラクタル解析では、対象とする物理量の濃淡を定量的に評価することで、場が均一なスケール指数で表現されるモノフラクタルか、あるいは多様な指数で構成されるマルチフラクタルであるかを判定する。後述の通りマルチフラクタルの状態は対流系内の物理的な状態と対応することが期待される。本研究では線状対流系を中心に、再現実験における水蒸気フラックス・乱流運動エネルギー(TKE)、およびレーダー立体観測から推定された固相降水粒子分布のマルチフラクタル性の解析を目的とする。

2. 解析手法

マルチフラクタル解析には大野ら(2022)の手法を用いた[2]。解析する線状対流系事例は2012年7月15日に発生した京都亀岡豪雨とした。雲解像モデルCRESSによる再現実験では水平/鉛直格子解像度を500 m/(平均)250 mに、計算領域は近畿地方を中心に600×600×61層に設定した(図1)。初期値境界値は気象庁メソ客観解析値を、海面水温は気象庁NEAR-GOOSを、渦粘性モデルにはTKEを用いた1.5次のクロージャを使用した。また国土交通省が管轄する近畿地方の4基のXバンド偏波レーダーによる5分毎の立体観測データを

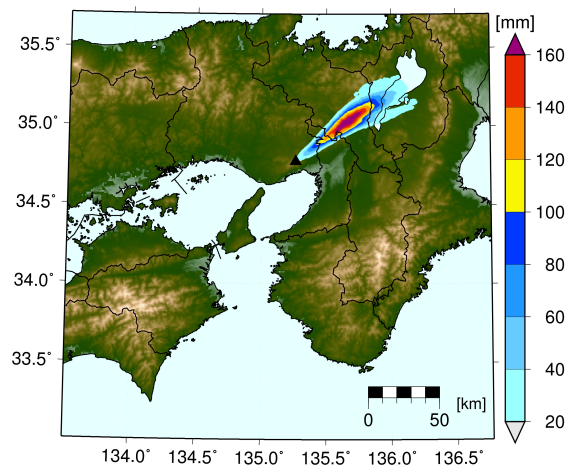


図1: 計算領域及びXRAINに基づく6時間積算降水量.

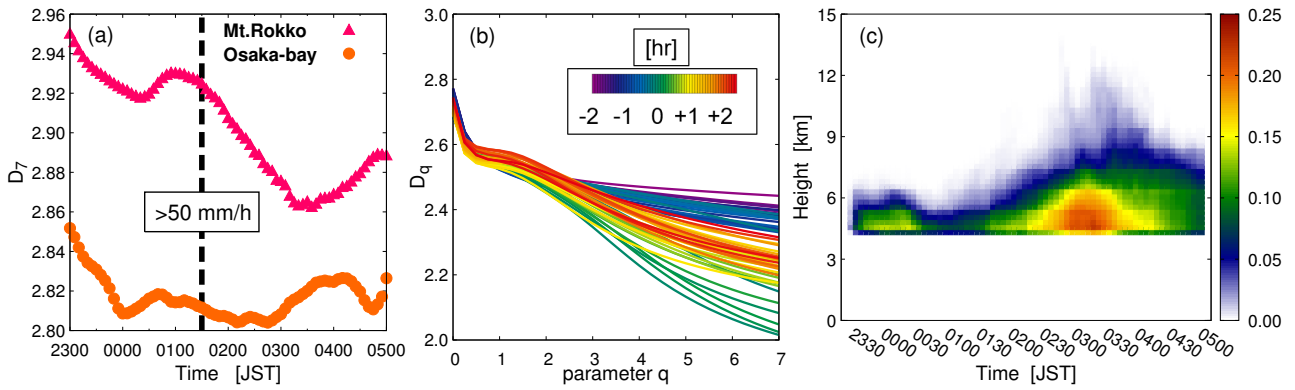


図 2: (a) 水蒸気フラックス, (b) 乱流運動エネルギーのマルチフラクタル性. (c) は高度毎の霰存在比の時間変化.

用いて解像度 250 m の直交座標系データを作製した. 融解層より上空の偏波パラメータを用いて霰の混合比を推定し解析を行った.

3. 解析結果と考察

図 2(a), (b) に再現計算における水蒸気フラックス, TKE のマルチフラクタル解析の結果を示している. 双方とも対流が活発に発生した六甲山付近水平 60 km, 高度 15 km の 3 次元分布を対象とした解析であることに留意されたい. 地表面で 50 mm h^{-1} 以上の降水強度が確認される 30 分ほど前より, 水蒸気フラックスのマルチフラクタル性を表す一般化次元 D_7 が減少していた. D_7 が 3 に近いほど対象がモノフラクタルに近いことを示すため, 対流系発生前の下層が湿潤な水蒸気フラックス場はモノフラクタルに近いことがわかる. 一方で対流が発生し上昇流に伴う水蒸気フラックスの極値が鉛直方向に拡大することでマルチフラクタル性が強まった. また, TKE の一般化次元スペクトルを, 地表面で 50 mm h^{-1} 以上の降水が開始した時刻を基準に色別でプロットした. 寒色系で示す豪雨開始前ではスペクトルはほぼ一定であり, モノフラクタルに近い分布であることを示している. 一方で豪雨開始前後では強いマルチフラクタル性を示し, 暖色系で示す対流系発生時には D_q がやや増加しスペクトルが一定の形状を保つ振舞いが見られた. こうした TKE の振舞いは帯状の降水域が形成される約 20 分ほど前から見られたため, 対流系として組織化する際に見られるシグナルの一つであることが示唆される. マルチセル事例でも同様の解析を行ったところ, 線状対流系のマルチフラクタル性の時間変化とは異なる傾向を示していた. 図 2(c) は霰が存在するグリッドの比率を高度毎にプロットした図である. 霰領

域は日付を越える前後で一つ目のピークを迎え, 帯状の降水域が形成されながら拡大する 2 つ目のピークを迎えた. また後者において 0130JST 以降に霰領域の拡大が認められていた. 推定された霰混合比についてマルチフラクタル解析を行った結果, 0130JST を境にマルチフラクタルが強い状態からモノフラクタルに近い状態へ変化の様子がみられた (図示なし). 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. 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.

4. まとめ

本研究では線状対流系を中心に水蒸気フラックス, TKE, 霰のマルチフラクタル性の時間変化を解析した. 解析事例数を増やすこと, 各変数のマルチフラクタル性を総合的に捉え, 雨量との関係性を説明する枠組みの考案が今後の課題である.

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.

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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. 土木学会論文集 B1(水工学), 78, 2, 319-324.