（ 続紙 １ ）

京都大学	博士（工学）	氏名	大野　哲之
論文題目	マルチフラクタルに着目した線状対流系豪雨の組織化過程解析 及び発生検知手法への応用		

（論文内容の要旨）

線状対流系豪雨は我が国の暖候期に発生し、数十から数百 km 程度の領域に数時間以上豪雨をもたらし河川の氾濫や土砂災害を引き起こす恐れのある気象現象である。その中には総観規模（大スケール）の気象場に拘束されるというよりは、局所的（小スケール）の要因で発生し、自律的に組織構造を形成する事例も存在し、その予測は未だ挑戦的な課題である。こうした豪雨の発生から組織化までの 3 次元大気場を定量的に評価し、発生の早期探知や兆候をリアルタイムに捉える枠組みは防災上、極めて重要な課題である。一方で、自己相似性の分布構造であるフラクタル概念を応用し、時間的・空間的分布をべき乗則の集合として捉えることで対象とする分布の局所的特異性を定量的に評価するマルチフラクタルという概念がある。マルチフラクタル自体は様々な分野で応用されてきた概念である一方で、線状対流系の 3 次元的な物理過程に着目した解析に応用された研究は未だなかったといえる。

本論文は上記の背景の下、マルチフラクタルを用いて線状対流系の発生・組織化過程における 3 次元的な大気場を解析し、発生検知手法への応用可能性を議論することを目指している。本論文の独創的な点は以下の 2 点である。(i)線状対流系豪雨の発生における物理的なメカニズムと対応させつつ 3 次元大気場のマルチフラクタル構造を解析した点、(ii)対流系の組織化を評価する新たな指標を提案することで、対流系の組織化に先行して大気場のマルチフラクタル的変化が現れることを示し、マルチフラクタル構造が線状対流系豪雨の発生・組織化を規定するという新たな概念を発見した点である。本論文は全 7 章から構成されており、それらの要旨を以下に示す。

第 1 章は序論である。まず本論文で解析対象とした豪雨事例を中心にその災害の特徴を記述している。また近年観測や気候モデル出力等のデータセットが高解像度化し、気候変動に伴う災害外力の激甚化が危惧される中で、線状対流系豪雨の物理的メカニズムに裏打ちされたリアルタイム検知手法の防災上の意義が述べられている。

第 2 章では線状対流系の組織化に関する先行研究およびマルチフラクタルの水文気象学的応用例について詳述されている。その上で線状対流系豪雨に関わるマルチフラクタル的変動を理解することで早期探知手法への応用を図るという、本論文の位置づけと独自性が改めて記されている。

第 3 章ではマルチフラクタル解析の数学的枠組みについて詳述されている。解析対象とする 3 次元気象場データを相対値に変換し、相対値の大きさごとに空間のべき乗則を推定する。本論文におけるマルチフラクタルとはこのべき乗則が相対値の大きさに応じて異なり、分布が多様なべき乗則を包含する状態であることが示されている。

第 4 章では線状対流系豪雨の再現計算、およびレーダーの 3 次元観測を対象としたマルチフラクタル解析の結果とその物理的解釈について議論されている。再現計算において線状対流系が発生した領域付近におけるマルチフラクタル性の時間変化を適用した結果、地上で豪雨が開始する約 20 分前から初期の浅い対流の発生に伴いマル

京都大学	博士（工学）	氏名	大野　哲之

チフラクタル性が強まる傾向が示された。さらに線状対流系豪雨が形成された時間帯にも継続し、豪雨の衰弱と共にマルチフラクタル性が弱まる傾向へと転じた。この原因として、対流の発達に伴い鉛直風が強化され、水蒸気フラックスが相対的に大きい領域が鉛直方向に拡大していたためと議論している。同様に乱流運動エネルギーについても解析したところ、豪雨開始時にマルチフラクタル性が急激に強まり、その後時間的な変動が縮小するという性質が見出された。このことは線状対流系豪雨の組織化が生じたことを示すシグナルになりうると言及されている。加えて、レーダーの 3 次元観測情報を用いて固体降水のマルチフラクタル性についても解析を行い、対流の発達に伴い質量の大きい降水粒子が増加することがマルチフラクタル的変化と対応することを示している。これらの結果は線状対流系豪雨の組織化を判定する上でマルチフラクタル性が重要な指標になることを示唆している。

第 5 章では線状対流系豪雨 3 事例を対象に異なる解像度の地形データを用いた感度実験を行った。実験結果の比較から、モデル内の地形表現がより詳細になることで地形強制力が増し、強い上昇流が生じること，さらに上昇流の上流側地表面付近での吸い込み効果が増大することで積算降水量が増加したことが示された。このとき、高解像度地形データを適用した実験では、豪雨形成時の水蒸気フラックスのマルチフラクタル性がより強まることも示された。

さらに第 6 章では 3 次元的な上昇流域の時間変化に着目した線状対流系の組織化を定量的に診断する手法を検討し、以上のマルチフラクタル的変動が組織化に対して時間的に先行して発生することを検証した。まず、再現計算内の解析領域全体の上昇流の和である対流性質量フラックスと上昇流域全体のフラクタル次元の時間変動の解析が行われた。その結果豪雨開始前はどちらの指標も時間変化が小さい一方で、豪雨開始後にフラクタル次元が増大傾向を示すことが明らかになった。このことは当初は孤立していた上昇流域同士が徐々に拡大し、数十分程度で帯状の分布へ変化する様子に対応することが示唆される。その後対流性質量フラックスも顕著な増大を見せ、両者が顕著な増大傾向に移行した時間帯を組織化に至った時間帯として定義した。この定義に従うならば、組織化の 1 時間～1.5 時間前に水蒸気フラックス・乱流運動エネルギーのマルチフラクタル性が強まりを見せたことを示しており、防災利用の観点から価値があることを提示している。そして摂動を与えた初期値に対して以上の性質がロバストに検出されるかを検証するため、線状対流系のアンサンブル予報実験を用いた解析を行った。レーダー観測に類似した帯状の降水域が出現していた 10 メンバーに対する時系列解析の結果、8 メンバーで組織化の時間帯に先行して水蒸気フラックスのマルチフラクタル的変動が検出された。以上を受けて、本論文で提案された手法が線状対流系豪雨発生の早期探知を可能にすると結論付けている。

第 7 章は結論であり、本論文で得られた成果について要約するとともに、今後の研究の展望について論じている。