

論文の内容の要旨

論文題目 **FRACTAL MODELING OF RAINFALL : DOWNSCALING IN TIME AND SPACE FOR HYDROLOGICAL APPLICATIONS**

雨のフラクタルモデリング： 水文学的応用に向けた時空間ダウンスケーリング

氏名 パティラナ アセラ

より小さな時空間スケールでの水文応答現象に注目するために、高解像度の気象情報が是非とも必要である。とくに、都市化に関連した問題のために、この必要性は増している。実際に高解像度のデータを得るには多くの時間と労力が必要であるから、小さな時空間スケールの降水量を推定する手法の開発は有用である。時空間ダウンスケーリング手法は、あまり解像度の高くない広範な過去の記録を利用できるから、実用的な水文学の諸問題の解決に多いに役立つであろう。例えば、低解像度の観測をもとにした高解像度の擬似データの作成、例えば低密度の雨量計観測網からの空間内挿、雨量計と気象衛星データのように異なる解像度・信頼性を持つデータの結合、領域気候モデル・大気大循環モデルによる計算値のダウンスケーリングなどである。

本論文では、フラクタルスケーリング理論を用いた、雨の時空間におけるダウンスケーリングを行った。最初に、フラクタルスケーリングについての最新の研究と雨のモデリングへの応用について包括的なレビューを行った。この20年の間にフラクタルおよびマルチフラクタルの理論が登場し、マルチスケーリングについての数学的モデルを含む数多くの理論的研究が進められてきた。

フラクタル理論を雨に応用した多くの研究（そのほとんどはヨーロッパ・北米・オセアニアなどの様々な場所での降雨データを利用している）では、雨はフラクタルスケーリングの特徴を持つと結論している。この種の解析をアジア域で行うには十分な理由がある。アジア域は、モンスーンや台風の影響により、すでにマルチフラクタルを用いた研究が報告されている地域とは、雨の性質がはっきりと異なっていること、さらに、目を見張るような都市化の進展によって、この地域の洪水に対する危険性が増加していることである。ヨーロッパ、北米、オセアニアなどと比べると、アジアの各国では高時空間解像度での良質の降雨量データの量は非常に制限されている。日本はアジアでは特別なケースであり、広範な高解像度の雨量データベースが利用可能である。日本の降雨を調べることは、アジアの降雨のフラクタル特性について見通しを得るための格好の手段である。

本研究の主な目的は、雨のマルチスケーリングに関する既存の知識を適用して、オペレーショナルな水文学における雨の問題を解く手法を作成することである。しかしながら、スケーリングを的確にモデル化するためには、次の問題を考える必要がある。降水は本当

にマルチフラクタルなのか？マルチフラクタル理論は降水の時空間変動をとらえるのに十分なものなのか？という問題である。可能な限り、マルチフラクタルによるスケージングの限界についても調べた。本論文の解析とモデル検証のほとんどは日本の降水量データを利用して行った。

雨が持ちうるフラクタルスケージングの存在と性質を調べるために、多くの研究を行った。これらは、日本の雨についてのマルチフラクタルについて報告された最初の研究である。まず、日本全国の雨量計による時系列データを利用して、時間スケージングについて調べた。使用したデータのスケージングは時間スケールから日スケールまでにわたり、2日付近でスケージングが成り立たなくなることが分かった。この2日という値は、既往の研究で示されたものより短い。スペクトルの傾きは、ほとんど1に近く、既往の研究よりいくらか大きい。

次に、解析結果をもとにして、日単位で行われた観測データから時間単位の時系列を求めることにした。慣習的なモデリング手法は少なくとも数個の異なるスケールにまたがる連続的なスケージングを必要とするが、この場合スケージング則が2日以上では成り立たなくなるために慣習的な手法の適用は困難である。この点を解決するために、マルチフラクタルスケージング関数の幾何的特徴に基づく新しい手法を提案した。この手法は、1日単位、2日単位と利用可能な解像度の幅が狭い場合にも十分適用できる。この手法により作成された時間単位の降雨量データを、時間単位での観測データと統計的に比較することにより検証した。作成されたデータは、観測データに非常によく似ている。

時間単位以下の雨のスケージングについての研究は、一般に利用可能な降雨量データの解像度と精度の限界から、広域で行うことができなかった。時間単位以下のスケージングの存在と性質を調べるために、千葉県前原川流域の複数の地点で雨量観測を行い、高時間解像度の雨量データを取得した。

1年分のデータを解析した結果、スケージングは時間単位以下でも成り立ち、少なくとも5分単位までは適用できる。このことから、少なくとも理論的には、5分単位という小さいスケールと日単位の雨量観測を関連づけることが可能であることが示された。

日本の雨量の空間スケージングについて、雨量計データを内挿した雨量分布図を用いて調べた。あらかじめ、雨量計分布が空間的に均一であるかということと、解像度の限界についての評価を行った。これは、内挿によってデータが見かけ上なめらかになることで、スケージング則に与える影響を、最小限に押さえるためである。0.1度から0.8度までのスケージングについて解析することにした。使用するデータの時間解像度は1時間である。予想通り、日単位のデータを利用して報告された既往の研究よりもこの解析では、雨の空間分布は高い変動性と断続性を示した。また、日単位データを利用してマルチフラクタルのパラメータを求めたところでは、過去の研究と似た結果が得られた。

雨量の空間分布についてのマルチフラクタルのパラメータは、マルチフラクタル以外のパラメータといくつか関連がみられた。マルチフラクタルのパラメータは、大規模場、す

なわちグリッド平均雨量に強く依存する。マルチフラクタルのパラメータは、8月に特異な値をとるなど、強い季節変化を示す。この季節変化は、雨のタイプ別出現頻度の変化として説明できる。

レーダを利用した雨量観測は、雨量計と比べて、空間分布の観測に有効である。さらに、レーダではより高い空間解像度で雨を調べることが可能である。問題は、雨量を直接に観測する手法ではないということである。そのために、レーダの推定雨量は、雨量計のものと、定量的な精度を比較することはできないだろう。マルチフラクタルモデルを利用して、2つの観測による雨の空間分布を比較した。2つの観測はよく似た結果を示したが、極限值の違いによるスケージングのずれが見られた。

広域での降雨分布は、地形や斜面などの多くの要因の影響で決まる空間不均一性を持つのが普通である。時間解像度が小さい場合には、この不均一性は高い変動性やランダム性に隠れてしまう。時間解像度を長くするに従いランダムな値の影響は小さくなるので、雨量分布に、明らかな空間不均一性が見られるようになる。マルチフラクタルは統計的な意味で空間的均一な場に見られる現象であるから、雨量の本質的な特徴である空間不均一性をマルチフラクタルだけで説明することはできない。そこで、長期間データに表れる空間不均一性を考慮した、マルチフラクタルによる空間ダウンスケージングのモデルを提案した。このモデルは2つの要素、長期の値に見られる空間不均一性を示す決定論的な要素と短期のデータで支配的なランダム性を表現する要素からなる。雨量をこの2つの要素にわけるとは陸上の降雨量についての経験的な知識によるものである。2つの要素をもつことで、短期的な変動と長期的な空間分布の2つの特徴を持った雨量場を生成できる。本モデルは、空間不均一性とランダム変動を独立に考慮しているので、後者のモデリングに任意のマルチフラクタルモデルを利用することができるという利点がある。この点を、2つのマルチフラクタルモデルを使って示した。

このモデルを日本中央部のレーダアメダス雨量計に適用したところ有望な結果が得られた。

グリッド平均雨量をダウンスケージングし、長期的にみられる空間不均一性を再現できた。雨量の少ない、普通、多いの3地点で雨量の分布を比較した。モデルは、春・夏・秋にはうまく働くものの、冬にはうまく働かなかった。その理由を説明した。

広範な解析により、日本の雨はマルチスケージングの特徴を持つことを示した。日単位のデータを時間単位にダウンスケージングするための手法を具体的に提案して、手法の検証を行った。長期にみられる空間不均一性を保持したまま、雨量をダウンスケージングする新しい手法を提案した。この手法により、分布特性が観測値と良く似た日雨量を再現できた。結論として、雨の時間および空間ダウンスケージングという実用的な水文学の問題の解決に、マルチフラクタルによるスケージングの利用が有効であることを本研究により示すことができた。