

降雨分布の地形依存特性における 時間スケール階層構造

HIERARCHICAL TIME-SCALE STRUCTURE IN DEPENDENCY OF RAINFALL DISTRIBUTION ON TOPOGRAPHY

中北英一¹・鈴木善晴²・池淵周一³

Eiichi NAKAKITA, Yoshiharu SUZUKI and Shuichi Ikebuchi

¹正会員 工博 京都大学助教授 防災研究所 (〒611-0011 宇治市五ヶ所)

²学生員 京都大学大学院修士課程学生 工学研究科 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

³フェロー 工博 京都大学教授 防災研究所 (〒611-0011 宇治市五ヶ所)

Temporal and spatial variability of rainfall distribution over mountainous area is very complicated particularly in Japan. However if hierarchical time-scale structure in dependency of rainfall distribution on topography is taken into the consideration, it is possible that rainfall distribution in time scale greater than a boundary scale is almost uniquely expressed by topographical features. In this study, by analyzing data observed by radars in the southern part of Kyusyu and in Kinki district, it is made clear that the rainfall distribution over mountainous area has a hierarchical time-scale structure, and it is also attempted to explicate the characteristic of hierarchical structure by considering the relation to type of rainfall event.

Key Words : Rainfall Distribution, Topography, Hierarchical Structure, Radar, Land Altitude

1. はじめに

陸域、なかでも我が国の山岳地域のような複雑な地形条件を持つ地域においては、地形の影響を受けて雨域が激しく変動し、その分布特性を把握することは非常に困難である。また、それらの地域では物理的な制約を受けて降雨観測が十分に行われていないことも影響し、これまでの数々の試みにもかかわらず、今なお降雨の分布構造は解明されていない。

降雨分布に関する従来の特徴として、主に一雨雨量程度の時間スケールを対象としていることが挙げられる。例えば、沖ら¹⁾は降雨分布に対する地形効果と時空間スケールとの関係について概念的によく説明しており、地形効果が顕著となるのは個々の気象擾乱に対応する時空間スケールよりも、若干時間スケールが長い場合すなわち一雨雨量～数日雨量においてであると結論している。しかしながら、そのような時間スケールでは地形効果は顕著となるものの、気象擾乱ごとに効果の表れ方が大きく変動するためその特性を捉えることは困難である。一方で中北ら^{2) 3) 4)}によれば、さらに長い時間スケールにおいて地形効果を捉えることにより、気象擾乱ごとの変動を越えた普遍的な降雨-地形関係の存在する

可能性が示唆されている。すなわち、そのような普遍性の抽出のためには複数の気象擾乱にわたるような長い時間スケール(週～月程度)における議論が必要である。

また、従来から地上雨量計等のデータを降雨の真値として用いているが、山岳域における観測密度が十分でない地点観測データに基づいた解析では、研究対象である山岳域の降雨分布の再現性に限界があると考えられる。

そこで、本研究では『レーダーによる降雨観測情報』を解析対象として、『降雨分布の山岳地形依存特性における時間スケール階層構造』^{2) 3) 4)}に着目することにより、降雨分布の地形依存性における普遍的特性を抽出して、降雨分布の構造解明を試みる。

解析に用いたのは、建設省国見山レーダ雨量計(九州南部)および深山レーダ雨量計(近畿地方)により観測されたデータである。定量観測領域の半径は120 km、空間分解能は3 km(80×80メッシュ)、時間分解能は5分間隔となっている。グランドクラッタに関しては、国見山レーダーが減算方式、深山レーダーがMTI方式によって除去されており、当面は解析に支障がないものとする。ただし、定量観測領域のうち、山岳による遮蔽部およびグランドクラッタの影響が明らかに大きい箇所は除き、それ以外の領域を解析対象とする。また、地形

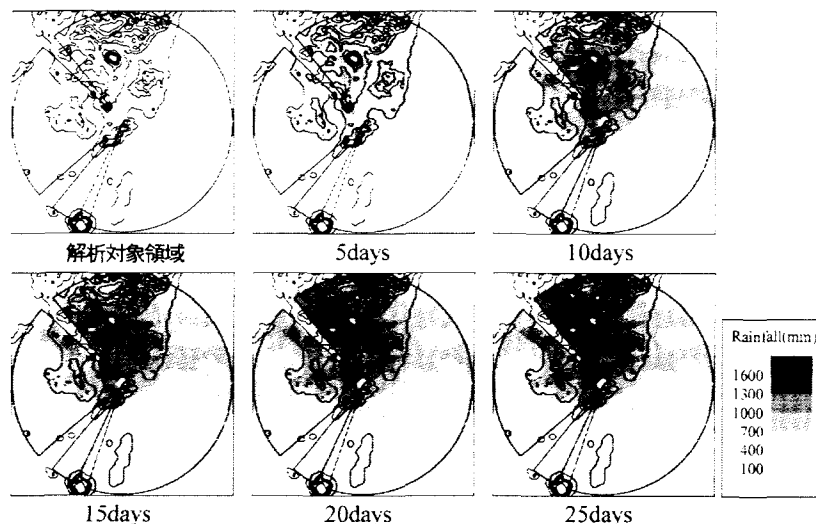


図-1 各積分時間スケールにおける積分降雨量の空間分布（九州南部，1993年8月1日～）

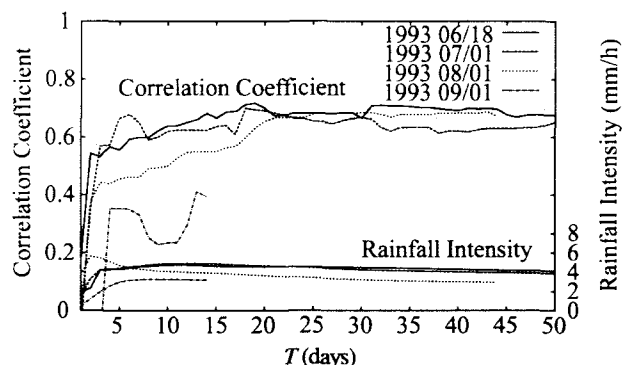


図-2 T 日積分降雨量 $R_T(x,y)$ と地形標高 $h(x,y)$ との相関係数の推移（九州南部，1993年）

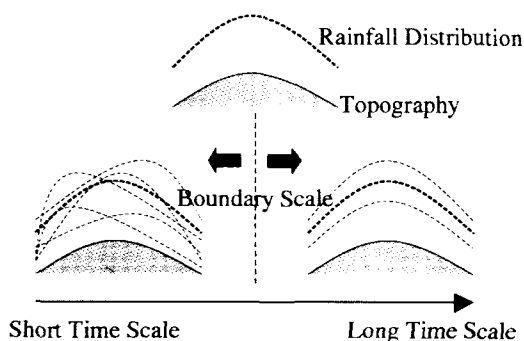


図-3 スケール階層構造の概念図

標高データとしては、分解能約 1 km 四方の国土数値情報をもとにして、3×3 メッシュのデータを単純平均して分解能 3 km のデータを作成した。

2. 降雨分布の時間スケール階層構造

はじめに、一定時間にわたって降雨を積分した場合の降雨分布の様子を図-1に示す。5 日から 25 日の各時間スケールにおける積分降雨量の分布図である。この図から、積分の時間スケールが長くなるとともに、降雨分布と地形標高との対応関係が次第に明瞭となる様子が見て取れる。さらに、20 日程度の時間スケールを境にして、それ以上の長い時間スケールで降雨の積分を行っても、両者の対応関係はあまり変動せず、ある一定の対応関係に収束していくという特徴を確認することができる。

次に、降雨に対する積分時間スケールを刻々変化させて、対象領域内の各々の地点の T 日積分降雨量 $R_T(x,y)$ と地形標高 $h(x,y)$ との相関係数 (C.C.) を計算し、その変化の様子について横軸に積分時間を取って示したグラフが図-2である。この図からも、降雨の積分時間が長くなるとともに両者の相関係数が増加していき、およそ

一ヶ月前後の時間スケールを境にして、その後はほぼ一定値に収束するという特徴が見て取れる。

これらの特徴から、短い時間スケール（一雨程度）においては地形に対して一雨ごとに様々な対応を示す降雨分布も、比較的長い時間スケール（週～月程度）における降雨の時間積分値の分布を対象とすれば、より普遍性の高い地形効果が卓越し、地形に対して一定の対応を示すようになることがわかる。その概念図を図-3に示す。

本研究では、降雨分布の持つこの性質を『降雨分布の地形依存特性における時間スケール階層構造』と呼ぶ。そして、この性質に着目することによって、従来の短い時間スケールを対象とした研究では困難であった、降雨分布の地形依存特性の定量化を試みる。すなわち、スケール階層構造を足がかりとして、短い時間スケールも含めたあらゆるスケールの降雨分布構造を解明する方針である。本論文では、現在取り組んでいる、スケール階層構造の解明を目的とした解析について報告する。

3. スケール階層構造の境界スケールに関する検討

(1) 境界スケールと降雨成因との対応関係

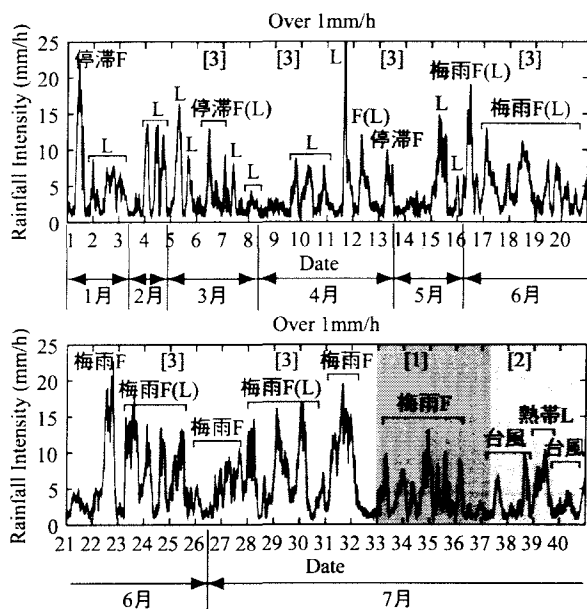


図-4 領域平均降雨強度の仮想時系列（九州南部、1993 年）
（陰影部の番号は 図-5 の番号と対応する）

降雨分布の時間スケール階層構造を解明するにあたって、まずその境界となる時間スケールについて知る必要がある。すなわち、図-2においては境界スケールがおよそ 20 日程度であることが示されたが、その普遍性についてはどうであろうか。そこで、降雨分布と地形標高との相関が高くなるまでに必要となる積分時間の最小スケール T_{min} について調査を行う。ただし、降雨を積分する際に長い無降雨期間（領域平均降雨強度が比較的小さな期間）が存在すると、その影響で最小時間スケール T_{min} も長くなってしまうため、積分の時間スケールについて考察する場合には、この無降雨期間による影響を除く必要がある。そこで、5 分ごとのデータについて領域平均降雨強度が 1 mm/h 以上のデータのみを用いて新たに仮想的な時系列を作成し、この仮想時系列上で、積分開始時刻を刻々変化させて、最小時間スケール T_{min} についての調査を行った。

なお、降雨強度の閾値 1 mm/h については、一雨内の降雨の連続性を損なわない程度に無降雨期間の除去が可能なる値を選択した。また、無降雨期間を除去することによって、無降雨時のグランドクラッタを除去可能であるという利点もある。作成した仮想時系列を図-4に示す。また、仮想時系列上における時間スケール、すなわち領域平均降雨強度が閾値以上である時間の長さを「有効降雨時間」と呼び、 T_e と表すこととする（同時に、仮想時系列上での最小時間スケールを以後 $T_{e_{\min}}$ と表す）。

仮想時系列上において、 Te 日平均降雨量 $R_{Te}(x,y)$ と地形標高 $h(x,y)$ との相関係数が 0.73 を越える最小の時間スケール Te_{min} について調査を行い、その結果を図-5 に示す。積分計算を開始した月ごとにプロットのマークを変えて表示している。ただし同解析においては、スケール階層構造をより明確に捉えるため、降雨分布およ

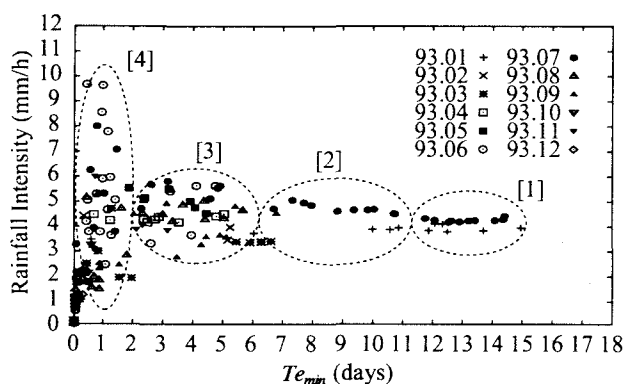


図-5 相関係数が 0.73 を越える最小の時間スケール Te_{min}
とそのときの領域平均降雨強度

び地形標高に対して移動平均（およそ 21 km 四方を平均）による平滑化を行った。そのため、図-2と比較すると両者の相関係数が全体的に 0.1 程度増加している。その中で、境界スケールを表現する値として最適と思われる 0.73 を閾値として選択した。この図から、最小時間スケール Te_{min} の値は 1 日未満から 15 日程度までばらつきのあることがわかる。

次に、図-5に示すようにこれらを時間スケールによって4ケースに分類し、それぞれが仮想時系列上においてどの時期に積分計算を開始した場合に相当しているかを、図-4の仮想時系列上に示した。同時に、大スケールで見た各降雨の成因を天気図より判断して示した。Lは低気圧性、Fは前線性の降雨を示す。またF(L)は前線上を低気圧が通過したことを示す。これらの図より、最も時間スケール Te_{min} の長いケース [1] に対応しているのは、7月の梅雨性の降雨が降っている時期に積分計算を開始した場合であり、また次に時間スケール Te_{min} の長いケース [2] に対応するのは7月末の台風が連続して到来した時期、ケース [3] に対応するのは低気圧性の降雨（特に、低気圧が前線上を通過したケース）が多いことがわかる。すなわち、降雨分布と地形との対応関係は、低気圧性や前線性などの大スケールで見た降雨成因によって大きく特性が異なることが示された。

さらに、層状性や対流性などの小さなスケールで見た降雨成因による、より明確な対応付けについては次節において検討を行う。

(2) 降雨時間の空間分布と境界スケールとの対応関係

降雨成因によって上記のような時間スケール Te_{min} の相違が生じる仕組みについて考察を行うため、領域内の各々の地点について、強度 1 mm/h 以上の降雨発生時間を求めた。計算結果を図-6に示す。それぞれ図-5のケース [1] からケース [4] に対応するある 1 事例を示している。各事例ごとに、最小時間スケール Te_{min} に対する比率によって表示した。

この図を見ると、時間スケール Te_{min} の値が最も大きく前線性の降雨に対応するケース [1] では、他と比較し

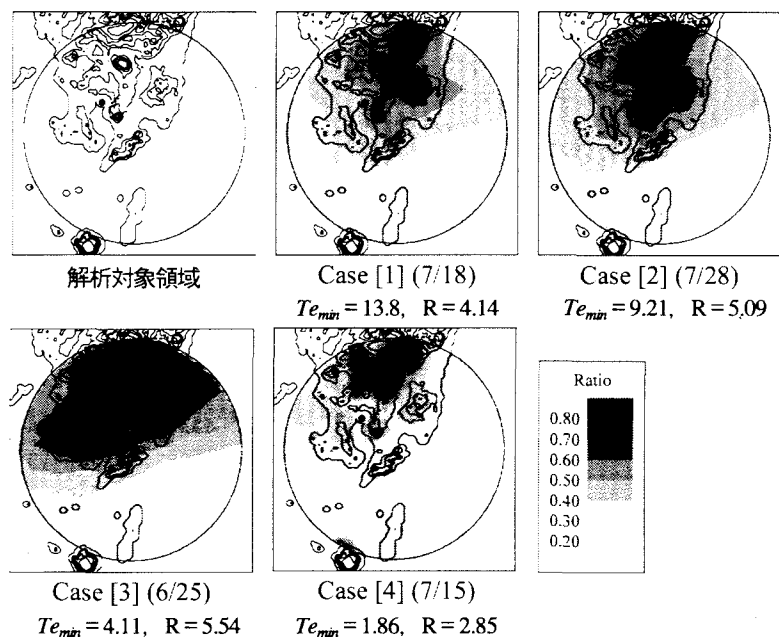


図-6 各々の地点における降雨強度 1mm/h 以上の降雨時間 (Te_{min} (日)) に対する比率で表示, R: 平均降雨強度 (mm/h)

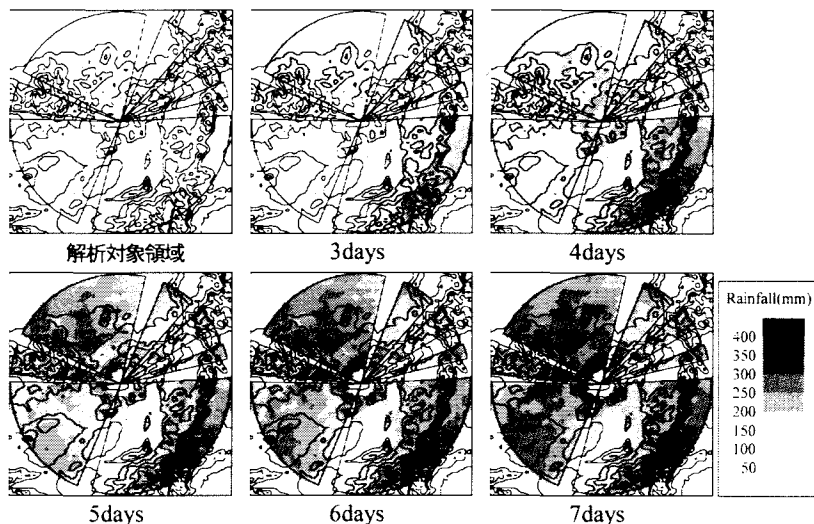


図-7 各積分時間スケール Te における積分降雨量の空間分布 (近畿地方, 1998年9月1日～)

て全体的に値が小さく、また空間的偏りも小さい。すなわち同ケースでは、標高に対する依存性の小さい降雨が多かったため、地形依存性が明確となるまでにより多くの降雨を積分する必要があると考えられる。一方、小スケールで見た降雨成因として層状性降雨を考えたとき、標高への依存性はあるもののその程度は小さいという特徴を持っている。したがって同ケースでは、強度の小さい層状性降雨が卓越していたと推測される。

次に、台風性降雨に対応したケース [2]、低気圧性降雨に対応したケース [3] へと、時間スケール Te_{min} の値が小さなケースになるにしたがって、山岳域への偏りが大きくなる様子が見て取れる。すなわち、これらのケースでは、標高に対する依存性が比較的大きい降雨が多く、より短い積分期間で地形依存性が明確になったと考えられる。一方、この特徴は対流性降雨の特徴と類似してい

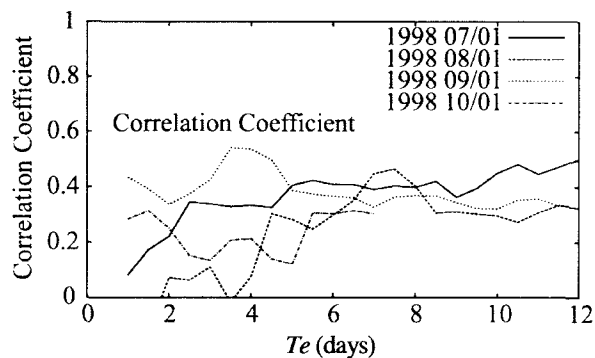


図-8 Te 日積分降雨量 $R_{Te}(x,y)$ と地形標高 $h(x,y)$ との相関係数の推移 (近畿地方, 1998年)

ることから、これらのケースでは、比較的大きな強度の対流性降雨が卓越しており、その傾向はケース [2] (低

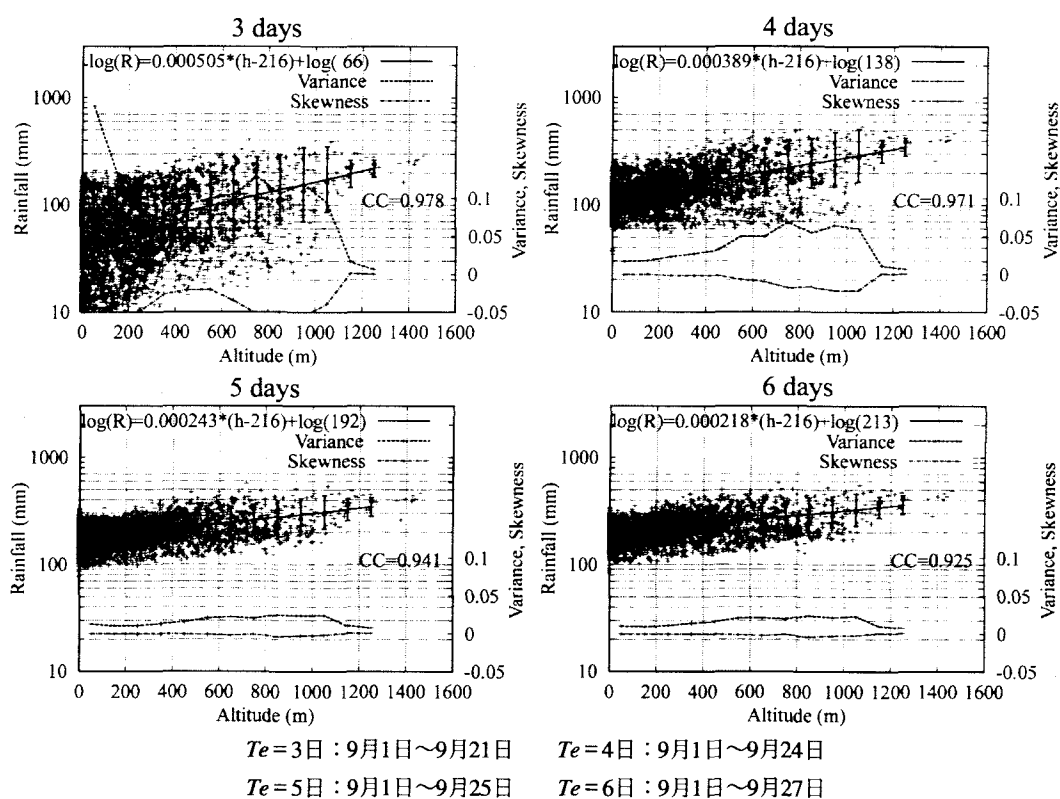


図-9 各積分時間 T_e における積分降雨量の地形標高に対する分布 (近畿地方, 1998年9月1日~)

気圧性降雨)の方がより強かったと推測される。

時間スケール $T_{e_{min}}$ の最も小さいケース [4] に関しては大スケールで見た降雨成因との対応関係が明確でないが、最も山岳部への偏りが大きいことから、地形依存性の極めて強い対流性の降雨が卓越していたと推測され、そのため非常に短い積分時間で降雨分布と地形標高との相関が大きくなったと考えられる。

以上のことから、今後、降雨分布のスケール階層構造についてより詳細な解析を行う際には、降雨成因を十分に考慮する必要があると考えられるため、今後は、降雨レーダーの3次元情報を用いた降雨成因の判別を行い、解析に組み込んでいく予定である。

4. スケール階層構造を表現する指標の検討

(1) 近畿地方における降雨の分布特性

次に、近畿地方における降雨の分布特性について調査を行う。図-1と同様に、一定期間にわたって降雨を積分した場合の積分降雨量の空間分布を図-7に示す。ただし同図においては、時間軸として有効降雨時間 T_e を用いている。すなわち、領域平均降雨強度がある閾値以上の降雨のみを積分の対象とした。同図では 0.3 mm/h を閾値として選択した。この図から、積分時間の増加とともに降雨分布と地形標高との対応関係が次第に明瞭になるという、九州南部の分布図(図-1)と同様な傾向が見て取れる。特に、その傾向は紀伊山地周辺部において顕著である。しかし、日本海側のように降雨の地形依存性が

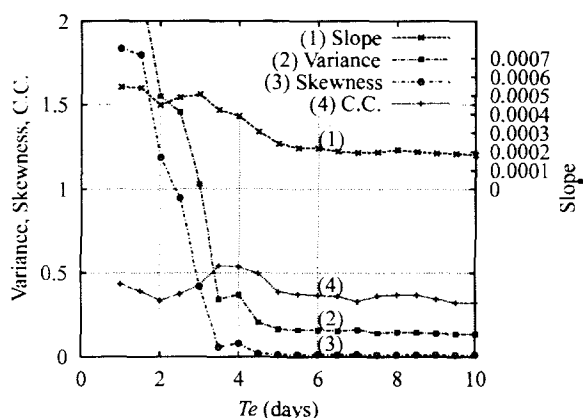
明確でない地域が存在することも確認でき、この点では九州南部と異なった特徴を示している。

次に、図-2と同様に、 T_e 日積分降雨量と地形標高との相関係数 (C.C.) を計算し、積分時間 T_e に対する推移の様子を示したものが図-8である。九州南部の場合(図-2)と比較すると、明らかにグラフの特徴が異なり、降雨の積分に対しても相関係数があまり増加せず、またある一定値に収束するような傾向も見られない。

したがって、近畿地方における降雨分布のスケール階層構造を把握するためには、相関係数以外の別の指標を用いる必要があり、次節において新たな指標を導入する。

(2) 層別化によるスケール階層構造の把握

降雨分布と地形標高との詳細な対応関係を調査するため、横軸に地形標高、縦軸に T_e 日積分降雨量を取り、解析対象の全地点をプロットしたグラフが図-9である。それぞれ積分時間 T_e が3日から6日のケースを示している。どのケースにおいても、プロット全体から降雨量が地形標高とともに増加する傾向を見て取れる。定性的にこのような傾向が見られることは、地上雨量計データを用いた従来の研究においてすでに報告されているが、その定量化が課題となっている。そこで、地形標高を 100 m 間隔で層別化し、各区内間での降雨量の平均値に対して回帰直線を表示した。すると、降雨量の標高別平均値と地形標高との相関係数は 0.9 以上という非常に高い値を示し、降雨分布の地形標高依存性を明確に捉えることができた。さらに、同図に示したように回帰直線



(1) 回帰直線の傾き (2) 回帰直線周りの分散 (3) 歪み度
(4) T_e 日積分降雨量と地形標高との相関係数

図-10 積分時間 T_e に対する分布特性の変化
(1998年9月1日～)

からの降雨量 (対数表示) $\log(R)$ の標高別分散や歪み度を見ると、降雨の積分時間が増加するに従って、降雨量 $\log(R)$ の分散が次第に小さくなるとともに、一定の標高依存性に収束していく様子が見て取れる。すなわち、スケール階層構造の特徴を示している。

さらにこれらの分布特性について、横軸に積分時間 T_e を取って示したグラフが図-10である。回帰直線の傾きや回帰直線周りの分散 (回帰直線からの二乗誤差の平均値) などを示している。この図から、積分時間 T_e の増加とともに次第に分散が減少し、 T_e が 5 日を越えたあたりでほぼ一定値に収束していることが見て取れる。これらの特徴は明らかにスケール階層構造の存在を示しており $T_e = 5$ (日) 前後がその境界スケールとなっている。さらに、回帰直線の傾きも同様に、 $T_e = 5$ (日) 前後でほぼ一定値に収束している。標高に対する降雨量の期待値である回帰直線の傾きがほぼ一定値に収束し、かつその直線まわりの分散も一定値に収束していることから、ある程度の時間積分を行った降雨分布を対象とすれば、これらの分布特性を指標として、降雨の地形依存特性を定量的に表現できる可能性が示された。

ところで、上述の積分時間 $T_e = 5$ (日) という時間スケールは、実時間になおすとおよそ 25 日であり、九州南部で行った解析から見いだされた 20 日程度という境界スケールとほぼ一致する。また、98 年の 9 月は秋雨前線が停滞することの多かった時期であることを考えると、図-5において $2(\text{日}) < T_{e_{\text{min}}} < 6(\text{日})$ のケース [3] に相当すると考えられるが、積分時間 $T_e = 5$ (日) という時間スケールはこの点とも矛盾していない。

(3) 地域限定によるスケール階層構造の把握

前述したように、相関係数の値が降雨の積分に対してあまり上昇しないという九州南部と異なる特徴に関しては、近畿地方全体として単一の気候区分に属していないことがその理由の一つと考えられる。そこで、解析対

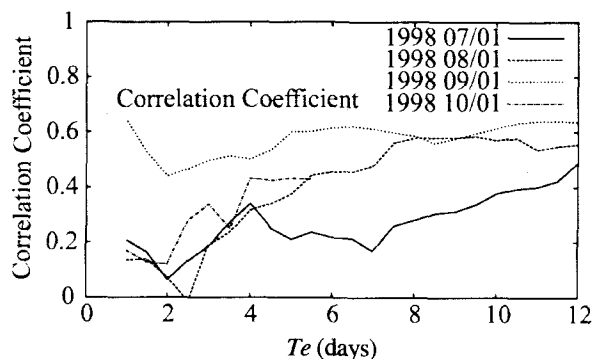


図-11 T_e 日積分降雨量 $R_{Te}(x,y)$ と地形標高 $h(x,y)$ との相関係数の推移 (紀伊山地周辺部限定, 1998年)

象を紀伊山地周辺部に限定し、図-8と同様に相関係数を計算した。結果を図-11に示す。すると、全体的に 0.2 程度値が増加し、スケール階層構造の特徴が明確に現れている。すなわち、このように単一の気候区分に属する地域に限定すれば、近畿地方においても、降雨分布と地形標高との相関係数という指標によってスケール階層構造を捉えることが可能であることがわかった。

5. 結論

本論文では、降雨の分布特性解明の足がかりとなる『降雨分布の地形依存特性における時間スケール階層構造』について解析を行い、次のような成果を得た。

- (1) スケール階層構造の存在を提示した。
- (2) スケール階層構造を把握するための二つの指標を提示した。すなわち、降雨分布と地形標高との相関係数、および回帰直線周りの分散等の分布特性である。
- (3) スケール階層構造は、積分する降雨の成因によって特性が異なることがわかった。
- (4) 地形標高を層別化し、各区分内の平均降雨量と地形標高との対応関係を考えることによって、降雨分布が明確に地形標高依存性を示すことがわかった。

参考文献

- 1) 沖大幹, 虫明功臣, 小池俊雄: 地形と風向による豪雨時の降水分布の推定, 土木学会論文集, 第417号II-13, 平成2年5月
- 2) 中北英一, 菅原竜也, 岡田憲夫, 池淵周一: 時間スケールに依存した地形-降雨分布特性, 京都大学防災研究所年報, 第40号B-2, 平成9年4月
- 3) 中北英一, 岡田憲夫, 池淵周一, 菅原竜也: 降雨分布-地形関係の時間スケールへの依存性, 水文・水資源学会 1997 年研究発表会要旨集, 平成9年8月
- 4) 中北英一, 鈴木善晴, 池淵周一: 降雨分布の地形依存性のスケール階層構造, 第53回土木学会年次学術講演会, 平成10年10月

(1999. 9. 30受付)