

標高依存直線に基づいた 降雨分布の地形依存特性の解明

STUDY ON THE DEPENDENCE PROPERTIES OF RAINFALL DISTRIBUTIONS ON TOPOGRAPHY BASED ON THE ALTITUDE DEPENDENCE LINE

鈴木善晴¹・中北英一²・池淵周一³

Yoshiharu SUZUKI, Eiichi NAKAKITA and Shuichi IKEBUCHI

¹学生員 京都大学大学院博士後期課程学生 工学研究科 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

²正会員 工博 京都大学助教授 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)

For the purpose of making a stochastic model of rainfall distribution, two remarkable features of rainfall distributions were analyzed using data of a precipitation radar. One is "altitude dependence line", which is an index of the dependence of rainfall on topography. The other is "time accumulation process", which represents the distribution properties changing with accumulation of rainfall. As a result, the dependence properties of rainfall on topography was quantified based on the altitude dependence line. The results also indicated that the time accumulation process of rainfall in mountainous regions could be divided into three stages, and its boundary time scales and the properties of each stage were determined. Additionally, the main cause of topographic effect on rainfall distributions was also discovered through the analysis of types of rainfall events.

Key Words : Rainfall Distribution, Topography, Altitude Dependence Line, Time Accumulation Process, Types of rainfall, Precipitation Radar

1. はじめに

水文学上の重要課題の一つとして, 対象流域の地形特性を考慮した降雨の時空間分布特性の解明が強く求められている. 本研究では, 降雨分布の確率構造モデル構築を目指して, 山岳域における降雨分布の地形依存特性および時間積分過程の統計的性質について解明を試みる.

(1) 研究の背景

降雨分布の地形標高依存性の存在は, 従来の研究より明らかである. 例えば, 山田ら¹⁾は, 日本の山岳域に数kmから10km程度の間隔で配置された地上雨量計による観測データを基に, 降雨量分布と地形標高との関係について考察を行い, 総降雨量が大きくなるにしたがって地形標高への依存度が高くなることを示している.

一方, 降雨分布の地形依存特性に関する研究においては, 降雨分布の時空間スケールが重要な意味を持つ. 例えば, 沖ら²⁾は降雨分布に対する地形効果について議論する中で, その時空間スケールとの関係について概念的によく説明付けており, 流域スケール程度の空間スケールを想定した場合, 地形効果が卓越するのは一雨雨量~数日雨量の時間ス

ケールにおいてであると結論している. 同様のことが二宮³⁾によっても指摘されており, 全国の降水強度極値の地理的分布解析の結果, 短時間雨量極値の発現は空間的にhomogeneous (一様, 等質) であるのに対して, 日雨量極値の発現には著しい地形依存性が見られると結論している.

これらに示されるように, 一雨雨量程度の降雨分布には明らかに地形効果の存在が見受けられる. しかしながら, このような時間スケールにおいては, 気象擾乱ごとにその効果の表れ方が大きく変動するため, その特性を把握することは困難であり, 定量的に地形効果を評価するためには, 従来とは異なった観点からの取り組みが必要である.

ここで, 中北ら^{4), 5)}によれば, 一雨雨量よりもさらに長い時間スケール (月雨量程度) において降雨分布に対する地形効果を解析した結果, 気象擾乱ごとの変動を越えた普遍的な降雨-地形関係, すなわち「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」の存在する可能性が示唆されている. このことは, 降雨分布に対する地形効果の普遍性抽出のためには, 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) にまで対象を拡大して解析を行うことが有効な手段であることを意味している.

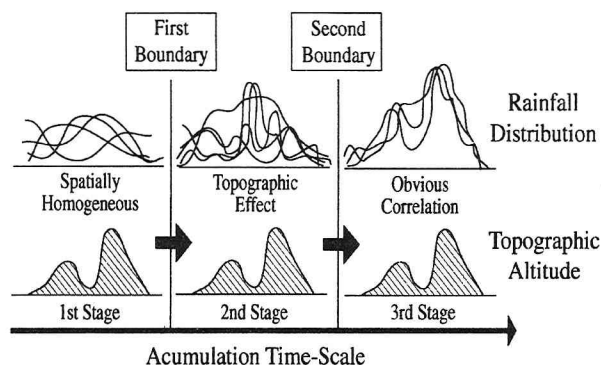


図-1 山岳域における降雨分布の時間積分過程の概念図

(2) 本研究の立場

以上のような観点から、本論文では降雨分布の説明変数となる地形因子として地形標高に着目し、以下の方針に従って解析を行う。

- (1) 筆者らの解析^{5), 6)}によって存在が明らかとなった特徴的な降雨分布特性である「標高依存直線」に着目し、同直線の変動特性をモデル化することによって降雨分布の地形依存特性を解明する。
- (2) 降雨分布の確率構造を解明するための足がかりとして、山岳域における降雨の分布特性が時間積分とともにどのように変化するか、すなわち「降雨分布の時間積分過程」を標高依存直線の解析を通して明らかにする。
- (3) 物理的側面からの考察として、対流性降雨と層状性降雨の二つの降雨タイプによって、降雨分布に対する地形効果がどのように異なり、その要因が何であるかを標高依存直線を基に明らかにする。

ここで、上述の「降雨分布の時間積分過程」について説明を加える。中北ら^{4), 5)}によれば、短い時間スケール（一雨程度）における降雨分布は、地形に対する依存性を保持しつつも一雨ごとに様々な変動を示すが、比較的長い時間スケール（週～月程度）における積分値の分布を対象とすれば、普遍的な降雨-地形関係が成立するようになる。一方、従来の研究によれば、時間雨量スケールの降雨分布は統計的に一様な空間分布特性を持つため、すなわち実際には地形による影響を受けているもののその変動が非常に激しいため、地形効果を見ることはできないが、日雨量スケール程度の降雨分布になると、徐々に地形効果が現れてくる。

このように、降雨の分布特性はある時間スケールを境として異なった特性を示すと理解することができる。ここで本論文では、降雨の分布特性が時間積分とともに変化する過程を「降雨分布の時間積分過程（Time Accumulation Process）」と呼び、あらゆる時間スケールにおける降雨分布特性を考える。このとき、上述の知見より、降雨分布の時間積分過程は三つの段階に分けて考えることができ、それぞれの段階は時間雨量、日雨量、月雨量程度の時間スケールにおよそ対応する。したがって、その境界となる時間スケールを定量化し、各段階における降雨分布特性を解

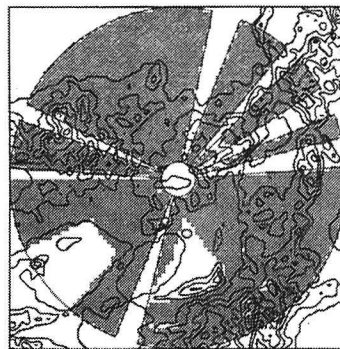


図-2 解析対象領域（近畿地方、灰色部、半径120km円内より多少なりとも精度上の問題が生じる領域を除外した）

明することが、降雨分布の確率構造モデル構築の足がかりとなる。降雨分布の時間積分過程の概念図を図-1に示す。

(3) 解析データ

以上のように、本論文では降雨分布の空間的特性の解明が目的であるため、面的な分布情報が得られるレーダーによる降雨観測データを解析対象とする。使用するデータは、近畿地方に位置する建設省深山レーダー雨量計において観測された1988年～1990年および1998年の4年間、6月～10月（ただし1998年6月は除く、計19ヶ月間）の降雨情報である。レーダーの定量観測領域全体（半径120km円内）を解析対象とし、その空間分解能は3km、時間分解能は5分である。レーダーより得られた放射状データを1グリッド3km四方の格子状データに変換して使用する。ただし、本論文では降雨の時間積分分布が解析対象であるため、グラウンドクラッタやシャドウ等による精度上の問題が多少なりとも生ずる領域は除外する、というかなり安全側の処理を行う。したがって、本研究の解析対象領域は図-2において灰色で示した領域とする。

2. 標高依存直線に基づいた降雨分布の地形依存特性

(1) 降雨分布と標高依存直線

はじめに、1998年9月における近畿地方の降雨を対象として、解析対象領域内の全地点における積分降雨量を、横軸に地形標高、縦軸に積分降雨量を取ってプロットしたグラフを図-3に示す。時間積分後の領域平均降雨量（Regional Average Rainfall, 以後R.A.R.と記す）が50mm, 100mm, 300mmの3ケースについて示した。ただし、縦軸は対数軸とし、R.A.R.によって正規化して表示した。なお本論文では、中北ら⁵⁾による解析と異なり、積分時間スケールを表す基準としてR.A.R.を用いる。

ここで、筆者らの解析により存在が明らかとなった「降雨分布の標高依存直線」について述べる。図-3において、プロット全体からは降雨量分布が大きくばらついていることが見て取れるが、地形標高を100m間隔で層別化し、各標高区分内における積分降雨量の空間平均値をプロットすると、図中の黒丸で示すように相関係数0.9以上の明確な直線

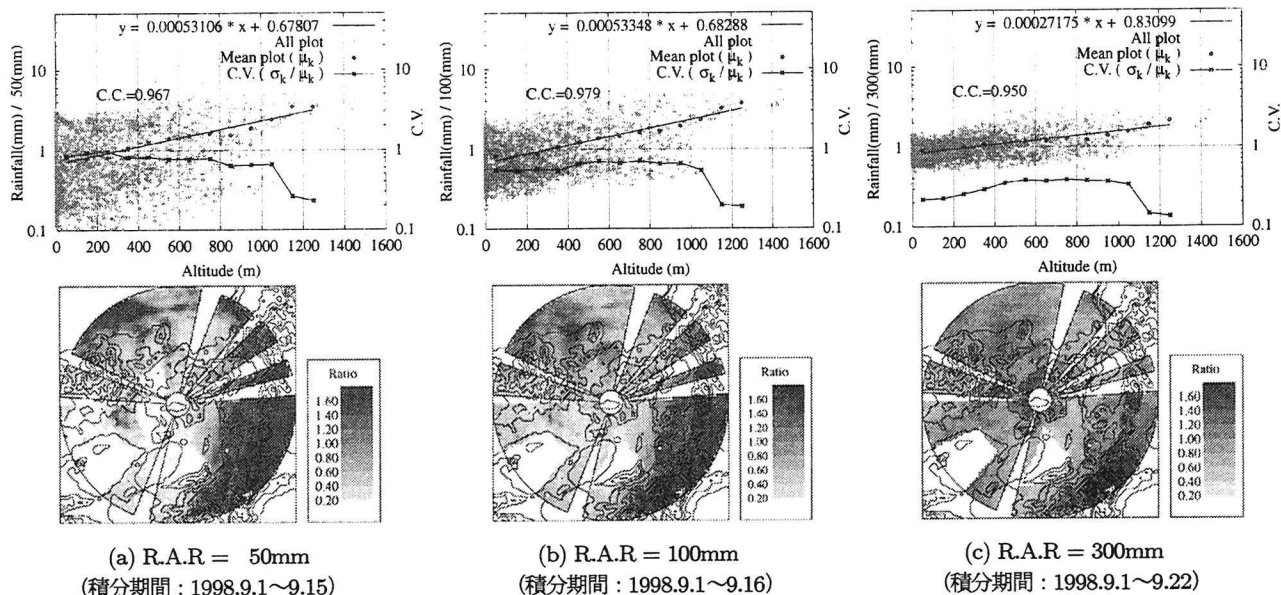


図-3 各領域平均降雨量 (R.A.R.) における積分降雨量と地形標高の関係 (上) およびその時の降雨量分布の様子 (下) (上図の横軸は地形標高 (m), 縦軸 (対数軸) はR.A.R.により正規化した積分降雨量)

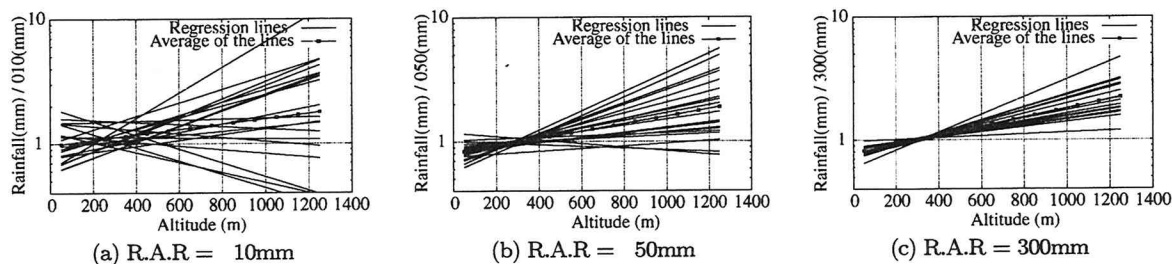


図-4 各領域平均降雨量 (R.A.R.) における標高依存直線の変動の様子

関係が成立する。このように地形標高と「積分降雨量の標高区分内平均値」の対数値との間に成立する直線関係を、筆者らは降雨分布の標高依存直線 (Altitude Dependence Line) と呼んでいる。このような関係が成立することは降雨分布の地形依存特性を特徴付けるものとして注目すべき特性である。また、同様な関係が九州南部の降雨分布においても成立し、近畿地方固有の特性でないことを確認した。

さらに同図を見ると、降雨の時間積分とともに、すなわちR.A.R.の増加とともにプロット全体のばらつきが減少し、標高依存直線の周りに分布が集中してくる様子が見て取れる。このように、降雨分布の地形依存特性は、

- (1) 標高依存直線によって示される平均的分布特性
 - (2) 標高依存直線周りの分散特性 (ばらつき度合い)
- の二つの特性に分けて表現することが可能である。そして、これら両者の分布特性が降雨の時間積分とともに変化する過程が降雨分布の時間積分過程である。

そこで、次節においては標高依存直線そのものの変動特性を明らかにし、さらに第3章では同直線周りの分散特性について、降雨分布の時間積分過程と合わせて考察を行う。

(2) 標高依存直線の変動特性

降雨分布の標高依存直線の定式化を行うと以下のように

なる。まず標高依存直線は次式によって表される。

$$\ln \left\{ \frac{\mu_k(T)}{\mu(T)} \right\} = a \cdot Z_k + b. \quad (1)$$

ここに、 $\mu(T)$ は積分時間スケール T におけるR.A.R. (mm), $\mu_k(T)$ は標高区分 k 内における空間平均降雨量 (mm), Z_k は標高区分 k における平均標高, a, b はパラメータである。ここで、標高区分内平均降雨量の対数値と地形標高が完全に直線関係にあると仮定する、すなわち標高依存直線の相関係数が1であるとき、同直線から推定されるR.A.R.と実際のR.A.R.が等しいことから、

$$\mu(T) = \left\{ \sum_k \mu_k(T) \cdot V_k \right\} / \sum_k V_k \quad (2)$$

が成り立つ。ここに、 V_k は標高区分 k の面積を表す。式 (1), (2)より標高依存直線は以下のように定式化される⁶⁾。

$$\ln \left\{ \frac{\mu_k(T)}{\mu(T)} \right\} = a \cdot Z_k + \ln \left\{ \frac{\sum_k V_k}{\sum_k \exp(a \cdot Z_k) \cdot V_k} \right\}. \quad (3)$$

次に、標高依存直線の変動特性を調べるため、R.A.R.の各ケースに対して積分期間が異なる複数の降雨分布サンプル (15~19サンプル) を作成した。そして、R.A.R. = 10mm, 50mm, 300mmの3ケースについて、サンプルより得られたすべての標高依存直線を図示したものが図-4で

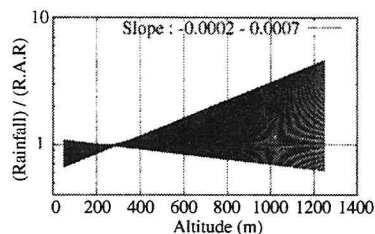


図-5 標高依存直線の感度分析（傾き：-0.0002～0.0007，縦軸（対数軸）はR.A.R.により正規化した積分降水量）

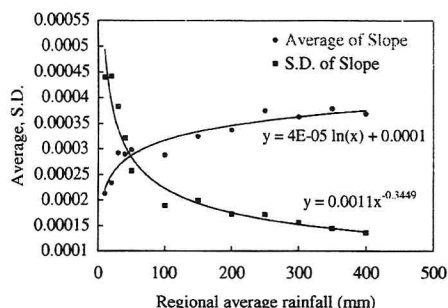


図-6 領域平均降雨量（R.A.R.）に対する標高依存直線の傾きの平均値および標準偏差

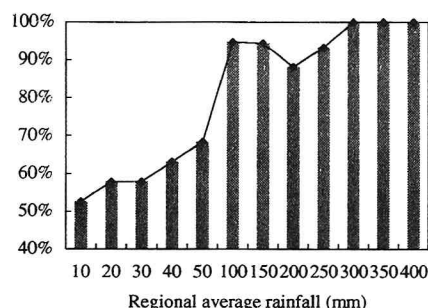
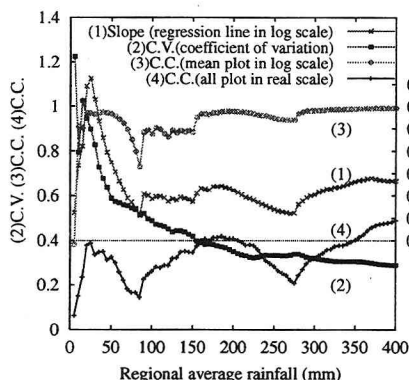
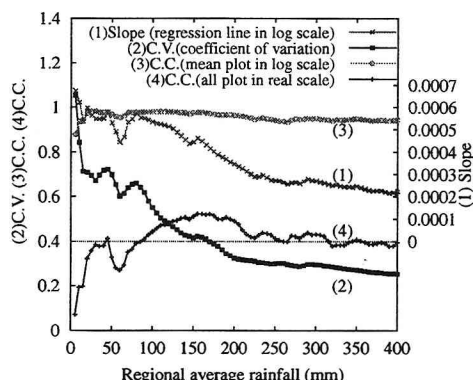


図-7 領域平均降雨量（R.A.R.）に対して標高依存直線の相関係数が0.8を超える割合



(a) Accumulation from 1990.9.1



(b) Accumulation from 1998.9.1

図-8 領域平均積分降雨量（R.A.R.）に対する分布特性の変化（(1)標高依存直線の傾き，(2)標高区分別に求めた変動係数の全区分平均値，(3)標高依存直線の相関係数，(4)降雨量分布と地形標高の相関係数）

ある。また，式(3)の面積 V_k に実際の面積を与え，傾きを表すパラメータ a を変化させて同直線の感度分析を行い，図-4と同様に図化したところ，図-5に示す結果となった。図-4より見て取れる特徴として，二つの特徴が挙げられる。一つは降雨の時間積分とともに直線の傾きの変動が小さくなっていくという点，一つはすべての直線が標高300m付近でほぼ同一点を通過する傾向にある点である。後者に関しては，同様な特徴が図-5においても見られることから，標高依存直線が成立している場合の特徴であることが分かるが，標高300mという値は対象領域内の標高分布 V_k に依存しており，領域ごとに異なる値である。

前者についてさらに詳しく見るため，標高依存直線の傾きの平均値および標準偏差をR.A.R.に対して求めたところ，図-6に示す結果となった。同図から標高依存直線の傾きの変動は，降雨の時間積分とともに次第に減少していき， $R.A.R. = 200\text{mm} \sim 250\text{mm}$ でほぼ収束していることが見て取れる。また同時に， $R.A.R. < 50\text{mm}$ では極端に変動が大きくなっている。このことは，図-4においても確認できる。

さらに，標高依存直線の相関係数をR.A.R.ごとに計算し，その値が0.8を超える割合を示したものが図-7である。同図から， $R.A.R. < 100\text{mm}$ ではほぼ90%以上のサンプルにおいて相関係数が0.8以上の値を示しているが， $R.A.R. < 50\text{mm}$ では相関係数の値が比較的小さいサンプルが多い。したがって， $R.A.R. > 50\text{mm} \sim 100\text{mm}$ であるとき標高依存直線が成立すると言える。図-4(a)において同直線の傾き

の変動が極端に大きくなったのは，同直線による直線関係が実際には成立していなかったためである。

3. 標高依存直線に基づいた降雨分布の時間積分過程

(1) 標高依存直線周りの分散特性

前章において考察を行った標高依存直線を指標として，降雨分布の時間積分過程の考察を行う。あらためて図-3に示した積分降雨量と地形標高との関係を見ると，前述したように，降雨の時間積分とともにプロット全体の分散（ばらつき）が減少し，標高依存直線の周りに分布が集中してくる様子が見て取れる。ただし，同図ではR.A.R.との比をプロットしており，領域平均値に対する相対的なばらつきの減少を意味している。また同図には，分散の程度を表す指標として，標高区分別に求めた降雨量分布の変動係数（C.V.）を折れ線で示している。やはりどの標高区分においても，降雨の時間積分とともに変動係数が徐々に小さくなる傾向を見て取れる。ただし，この変動係数は降雨量の対数値に対して求めた値ではない。

次に，このような分布特性の変化の様子を横軸にR.A.R.を取って示したグラフが図-8である。1990年および1998年の9月1日に降雨の時間積分を開始した2例について，分布特性を表す4つの指標のグラフを示した。ここで，(2)標高区分別に求めた変動係数の全区分平均値に着目すると，前述と同様に降雨の時間積分とともに変動係数の値が次第

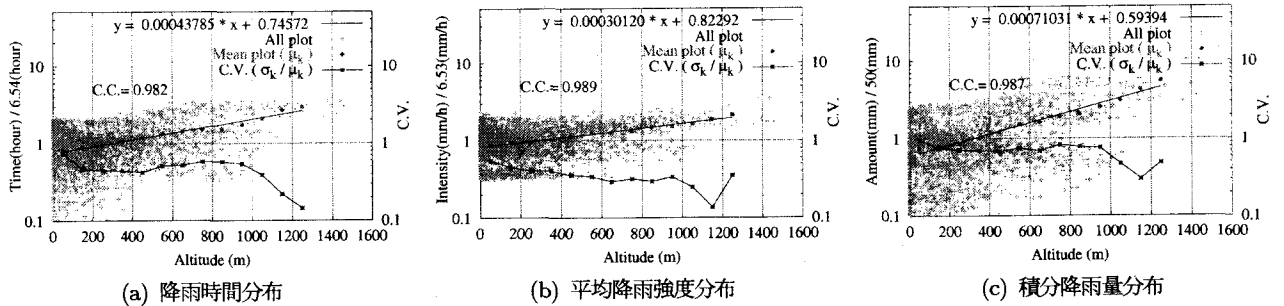


図-9 対流性降雨における降雨時間、平均降雨強度および積分降雨量の空間分布 (R.A.R.= 50mm, 積分期間: 1988.8.10~8.10, 縦軸は各領域平均値により正規化して表示)

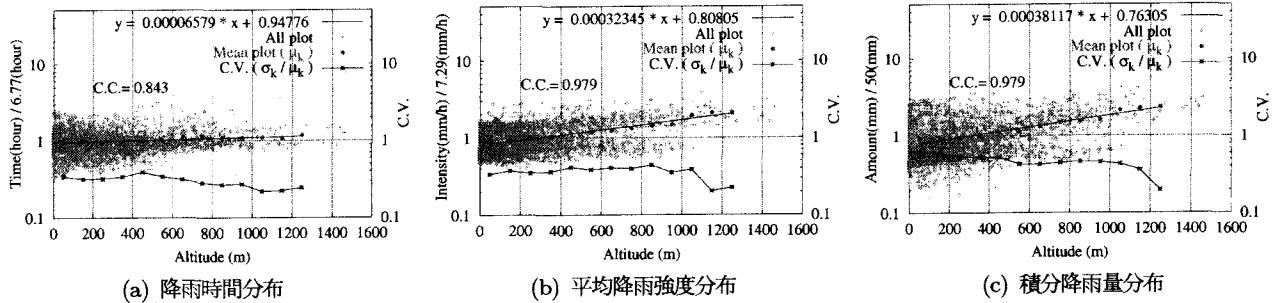


図-10 層状性降雨における降雨時間、平均降雨強度および積分降雨量の空間分布 (R.A.R.= 50mm, 積分期間: 1989.9.13~9.13, 縦軸は各領域平均値により正規化して表示)

に減少していく傾向が確認される。そしてさらに着目すべきは、R.A.R.=200mm~250mmを境にして変動係数がほぼ一定値に収束している点である。このことは、R.A.R.=200mm~250mmという境界時間スケール以上では、降雨の分布特性の変動が非常に小さいため、明確な地形依存性の把握が可能であることを意味している。ここで、R.A.R.=200mm~250mmという時間スケールは実時間になおすと20日~30日程度となるケースが多く、九州南部の降雨分布を対象とした、時間スケール階層構造に関する中北ら⁴⁾⁵⁾の研究において導かれた20日程度という境界時間スケールとほぼ一致する。

(2) 降雨分布の時間積分過程

前節で述べたように、降雨分布の標高依存直線周りの分散特性は、R.A.R.=200mm~250mmを境にして異なった特性を示すと考えることができる。また、前章においては、標高依存直線の成立条件はR.A.R.>50mm~100mmであること、また同直線の傾きの変動がR.A.R.=200mm~250mmを境にして一定値に収束する傾向にあることを述べた。同直線が成立することは降雨分布に対する地形効果の発現を意味することから、それらの時間スケールを境として降雨の分布特性が異なった性質を持つと考えられる。

したがって、山岳域における降雨分布の時間積分過程は、図-1の概念図に示すように三つの段階に分けてモデル化することができる。このとき、第一境界スケールはR.A.R.=50mm~100mm、第二境界スケールはR.A.R.=200mm~250mmとなる。

(1) 第一段階 (時間雨量程度) では、降雨分布の変動が激

しいために標高依存直線が成立せず、降雨分布に対する地形効果を見ることはできない。

(2) 第二段階 (日雨量程度) になると、依然として変動は大きいものの、標高依存直線が成立することによって地形効果が発現する。

(3) 第三段階 (月雨量程度) では、標高依存直線周りの降雨分布の分散 (ばらつき) が小さくなり、ほぼ定常状態に収束することから、明確な地形効果が確認される。

以上のように、降雨分布の標高依存直線の解析を通して、山岳域における降雨分布の時間積分過程の特性が明らかとなった。次章においては、降雨分布の地形依存特性について、さらに物理的な観点から考察を行う。

4. 降雨タイプによる地形依存特性の変化

第2章において、降雨分布の標高依存直線はR.A.R.>50mm~100mmにおいて成立することを示した。しかしながら、対流性や層状性などの降雨タイプによって降雨の分布特性が異なるため、積分対象となる降雨イベントによって標高依存直線の傾きや同直線周りの分散特性は大きく異なってくる。したがって、同直線に基づいて降雨分布の確率構造モデルを構築するためには、降雨の分布特性と物理特性との関係を明らかにすることが不可欠である。

そこで、降雨タイプが明確に判別可能な一雨程度の降雨イベントを対象として、R.A.R.=50mmの降雨分布を作成し、その地形依存特性について解析を行う。ただし、降雨タイプは天気図より判断して分類を行った。はじめに、中

傾き	対流性降雨	層状性降雨	対流性 / 層状性
S_a (降雨時間)	0.0004359	0.0000603	7.232
S_b (降雨強度)	0.0001063	0.0002049	0.518
S_c (積分降雨量)	0.0005354	0.0002585	2.071
S_a/S_c	0.8393	0.1843	
S_b/S_c	0.1683	0.8414	

表-1 降雨タイプ別に求めた標高依存直線の傾きのサンプル平均

変動係数	対流性降雨	層状性降雨	対流性 / 層状性
V_a (降雨時間)	0.4521	0.2813	1.607
V_b (降雨強度)	0.3349	0.3340	1.003
V_c (積分降雨量)	0.5868	0.4692	1.251
V_a/V_b	1.350	0.842	

表-2 降雨タイプ別に求めた標高区分別変動係数の全区分平均値のサンプル平均

北ら⁵⁾の解析と同様に、積分期間内で降雨強度が1mm/h以上であった時間（以後「降雨時間」と呼ぶ）を地点ごとに求め、また同じくその「降雨時間」内における降雨強度の平均値および積分降雨量の空間分布を計算し、三者の相互比較を行う。図-9は1988年8月10日、図-10は1989年9月13日の降雨を対象として、各分布量と地形標高との関係を標高依存直線と共に示したグラフである（ただし、縦軸は各領域平均値により正規化して表示）。前者は、低気圧が主な要因となって発生した対流性の豪雨であり、後者は、秋雨前線による層状性降雨の卓越したケースである。

まず図-9および図-10の(c)図を比較すると、対流性降雨の方が層状性降雨よりも積分降雨量分布における標高依存直線の傾き(S_c)が大きく地形依存性が高い。また同直線周りの分散も相対的に大きくなっている。次に、(a)図および(b)図を比較すると、対流性降雨では降雨時間分布における標高依存直線の傾き(S_a)が非常に大きく、降雨強度分布における標高依存直線の傾き(S_b)よりも大きな値を示しているのに対して、層状性降雨では逆に S_a が非常に小さく、むしろ S_b よりも小さな値となっている。このとき S_b の値は対流性の方が若干小さいものの層状性とほとんど差はない。

ここで、降雨タイプ別に分類された降雨分布の複数のサンプルから標高依存直線の傾き(S_a , S_b , S_c)のサンプル平均を求めたものが表-1である。また同様に、分布のばらつき度合いの指標として、標高区分別変動係数の全区分平均値のサンプル平均を求めたものが表-2である。対流性降雨6サンプル、層状性降雨7サンプルより求めた。表-1より上述と同様の特徴が確認できる。また表-2からは、降雨時間分布における分布のばらつき度合いは降雨タイプにより大きく異なる（対流性降雨が1.6倍）が、降雨強度分布においてはほとんど差がないことが分かる。

ここで、積分降雨量(R)=降雨時間(T)×降雨強度(I)と考えたとき $\ln R = \ln T + \ln I$ が成り立つため、標高依存直線の傾きについて「 $S_c = S_a + S_b$ 」という関係がおよそ成立する。このとき、降雨時間分布および降雨強度分布が地形効果の発現に寄与する度合いを示す指標として、

それぞれ S_a/S_c および S_b/S_c を考えることができる。そこで、降雨タイプ別に両者のサンプル平均を求めると、表-1に示すように、対流性降雨では降雨時間分布が約8割の寄与率であるのに対して、層状性降雨では逆に降雨強度分布が約8割の寄与率となっている。

以上から、(1) 対流性降雨では標高が高い地域ほど降雨時間が長く、そのために降雨分布の地形依存性が生じていること、また降雨分布の分散（ばらつき）についても同様に降雨時間分布に起因する割合が高いことが分かった。これらは、標高が高い地域ほど組織化された複数の対流セルが継続的に発生する傾向が強く、その結果、降雨イベントとしての継続時間が長くなるためではないかと考えられる。(2) 一方、層状性降雨では平均降雨強度分布のもつ地形依存性が地形効果発現の主要因であることが示された。

ところで、中北ら⁵⁾の解析結果からも、対流性降雨では降雨時間分布の地形依存性が非常に大きいことが指摘されており、本論文の解析結果と一致している。

5. まとめ

本論文では、降雨分布の地形依存特性の解明を目的として解析を行った。本論文の成果をまとめ、以下に列挙する。

- (1) 降雨分布の地形依存特性を特徴づける標高依存直線の成立条件を明らかにするとともに、同直線の統計的特性の解明およびモデル化を行った。
- (2) 標高依存直線を指標として山岳域における降雨分布の時間積分過程が三段階構造としてモデル化可能であることを示し、その境界となる時間スケールおよび各段階における降雨分布の特性を明らかにした。
- (3) 降雨タイプによって標高依存直線の変動特性および同直線周りの分散特性が異なることを示し、また降雨分布を降雨時間分布と降雨強度分布に分離することにより、地形効果発現の主要因を明らかにした。

参考文献

- 1) 山田正・日比野忠史・荒木隆・中津川誠：山地流域での降雨特性に関する統計的解析，土木学会論文集，No.527/Ⅱ-33，pp.1-13，1995。
- 2) 沖大幹・虫明功臣・小池俊雄：地形と風向による豪雨時の降雨分布の推定，土木学会論文集，No.417/Ⅱ-13，pp.199-207，1990。
- 3) 二宮洗三：豪雨の時間スケールから見た降水強度極値の地理的分布，天気，24，1，pp.63-70，1977。
- 4) 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-2，1997。
- 5) 中北英一・鈴木善晴・池淵周一：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，水工学論文集，第44巻，pp.91-96，2000。
- 6) 中北英一・鈴木善晴・池淵周一：降雨場の地形依存特性に関する基礎的研究，京都大学防災研究所年報，第43号/B-2，2000。

(2000.10.2 受付)