

3次元構造を考慮した降雨場の地形依存特性の解析

鈴木 善晴*・諸橋 真琴**・中北 英一*・池淵 周一

* 京都大学大学院工学研究科

** 京都大学工学部地球工学科

要 旨

防災および水資源工学的な立場から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。そこで、本研究では、深山レーダ雨量計から得られる3次元降雨情報をもとに、積分降雨量・降雨時間・平均降雨強度の三者の分布を解析することによって、降雨タイプ（層状性および対流性）ごとに地形効果発現のメカニズムがどのように異なるかを明らかにした。さらに、降雨分布の地形依存特性を表す指標である標高依存直線を用いて、降雨の3次元的な分布特性の定量化を試みた結果、降雨の鉛直物理構造の相違が地形効果の現れ方の違いに結びついていることを明らかにすることができた。

キーワード：降雨分布、レーダ雨量計、3次元降雨情報、標高依存直線、降雨タイプ

1. 序論

1.1 本研究の背景と目的

降雨現象を理解する上で、山岳の影響は甚大である。そのため、我が国のような起伏の激しい複雑な地形条件をもつ地域においては、地形の影響によってどのように雨域が変動するかを把握することは極めて困難である。しかしながら、今なお毎年のように発生している豪雨災害に対して適切な水防災計画を立てるために、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。そこで本研究では、詳細な降雨分布モデルの構築を目指して、深山レーダ雨量計から得られる3次元の降雨情報を解析することにより、降雨分布の地形標高に対する依存特性とそのメカニズムの解明を試みる。

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（1995）は、日

本の山岳域に数 km から 10 km 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もとに、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性が高くなることを示している。また、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（1990）は降雨分布に対する地形効果について、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。

このように、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。

Table 1 Target period of the research

Year	Month
1998	July - October
1999	June - October

そこで、中北ら（1997, 1998, 2000a, 2000b）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。

さらに、鈴木（2000）および鈴木ら（2001）の解析によって「降雨分布の標高依存直線」の存在が明らかとなった。これは、ある程度以上の空間および時間スケールを持つ降雨分布を対象とした場合には、地形標高と「地形標高区分内の平均降雨量の対数値」との間に直線的な関係が成立するという極めて特徴的な降雨分布特性である。

以上のような観点から、本研究では、積分降雨量分布を対象とした解析を行う。ただし、積分対象となる降雨イベントにより地形依存特性が異なるため、降雨-地形関係のモデル化を行うためには、降雨タイプによる分布構造の違いを明らかにすることが必要となる。そこで、レーダーによる3次元降雨情報を解析することにより、降雨タイプ別の地形効果およびその発現のメカニズムの解明を試みる。特に、本研究では「積分降雨量」を「降雨時間」と「平均降雨強度」に分割し、三者の分布を解析することによって地形効果発現の主要因を明らかにする。さらに、降雨分布の地形依存特性を定量化するための指標として、「降雨分布の標高依存直線」を用いた解析を行う。

1.2 研究の概要とその特徴

「降雨分布の標高依存直線」に関する鈴木（2000）および鈴木ら（2001）の研究では降雨レーダーの仰角固定観測より得られる2次元の降雨データを解析した結果、降雨分布に対する地形効果発現の要因が、降雨の物理構造と深く関わっていることが明らかとなった。そのため、降雨分布の地形依存特性を

明らかにするためには、降雨タイプに依存した降雨の物理構造について、より詳細に解析する必要があるが、2次元データに基づいた解析のみでは降雨の物理構造について解析を行うことに限界がある。したがって、降雨の3次元構造に関する新たな解析が必要とされる。

そこで、本研究ではレーダーによる3次元降雨情報に基づいた解析に取り組むことにより、降雨タイプごとの物理構造と地形効果発現のメカニズムの解明を試みる。3次元降雨情報を利用することで、高度による特性の違いを含めた鉛直プロファイルとしての降雨分布特性の解析が可能となる。また、3次元構造から降雨タイプを推測することによって、降雨タイプごとに異なる地形効果発現のメカニズムをより明確に説明付けることが可能となる。

このように、鈴木（2000）および鈴木ら（2001）の行ってきた研究の解析結果について、さらに詳細に考察することが本研究の目的であり、最終的な目標である「地形依存特性を考慮した降雨分布構造モデルの構築」へとつながっていくものである。

1.3 本研究の解析データについて

本研究では、近畿地方を観測対象とする深山レーダ雨量計によって観測された降雨情報をもとに解析を行う。初めに、本研究の解析対象期間を **Table 1** に示す。深山レーダ雨量計は1995年にレーダーが更新され、以前よりも空間分解能が高くなり。またビーム仰角が大きくなったため、より詳細な降雨観測が可能となった。本研究ではこの期間のデータを解析対象とする。なお、深山レーダ雨量計は、さらに2001年に再度レーダーの更新が行われ、現在はドップラー観測が行われている。

次に、本研究の解析対象期間である1985年から2000年における、深山レーダ雨量計の諸元を **Table 2** に示す。観測システムとしては、初めに仰角 0.4° および 0.8° の「仰角固定観測」を各1分間、次に仰角 1° から 54° までの24仰角について、仰角を順次変化させつつ観測を行う「仰角可変観測」を3分間で、合計5分を1サイクルとした連続観測を行うものである。なお、各観測仰角のビーム走行線を **Fig. 1** に示す。仰角固定および仰角可変観測とも、角度方向に256分割、距離方向に1.5 km 単位で分割した放射状メッシュデータとしてメッシュ内の平均値データが得られる。鈴木ら（2001）の研究においては仰角固定観測によるデータのみを用いているが、本研究では、3次元構造を解析するため、仰角固定・仰角可変の両データを用いることとする。

Table 2 The factors of Miyama radar rain gauge (from 1995 to 2000)

Latitude	35 ° 2 ' 18 " North
Longitude	135 ° 22 ' 48 " East
Altitude	791 m
Observation range	Inside of the circle with 120 km radius
Horizontal resolution	approximately 1.5 km
Method for removing ground clutter	MTI method
Angle of the beam	Fixed angle observation : 0.4 ° and 0.8 ° Variable angle observation : 1 ° -54 °

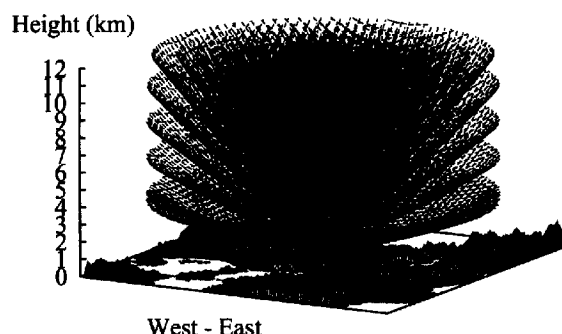


Fig. 1 Radar beam angles of the observations

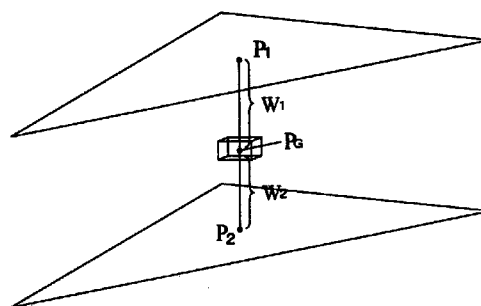


Fig. 2 Schematic of linear interpolation

すでに述べたように、レーダ雨量計から得られる実際のデータは方位方向を 1.5° ごと、ビーム方向に 1.5 km ごとに等分した放射状メッシュ単位で得られる。本研究では、このデータに対して上下層の線形内挿を行った後、さらに、水平方向は $1.5 \text{ km} \times 1.5 \text{ km}$ メッシュ、高度方向は 1 km 間隔の3次元格子データに変換して解析を行う。また、本研究では得られたメッシュデータの1メッシュを1地点と称することがあるのでここに断っておく。

ここで上下層の線形内挿の概要を示す。仰角可変観測は仰角 1° から 54° までの範囲を、24の離散的な仰角で観測するために、空間上に観測されていない領域が存在する。そこで、格子データに変換する際に、観測値を持たないような領域に関しては距離の重み付きの上下層の線形内挿を行う。その概念図を **Fig. 2** に示す。各格子の重心から鉛直方向に直線をのばしてレーダー観測領域との交点までの距離 (W_1, W_2) を上下両方について求め、それぞれの交点を含む領域の受信電力値 (P_1, P_2) を距離の二乗に反比例させることによって電力値 (P_G) を算出するというものである。式で表わすと以下のよ

うになる。

$$P_G = P_1 \times \frac{W_2^2}{W_1^2 + W_2^2} + P_2 \times \frac{W_1^2}{W_1^2 + W_2^2} \quad (1)$$

次に、降雨レーダー情報を定量的に用いる際の大きな問題点であるグラウンドクラッタおよびシャドウについて述べる。

グラウンドクラッタとは、レーダーから発射された電磁波が降水粒子ではなく大地によって反射された反射波のことであり、その存在によってレーダーの受信電力値が実際の降雨強度以上に増幅されるという問題が生じる。また、シャドウとはレーダーサイトから見て山岳の影となる領域のことであり、これらの地域では降雨観測を十分に行うことができないという問題がある。これらは、レーダー本来の設置目的である短時間の降雨量分布の把握という目的においては実用上大きな支障をきたすことはない程度の問題であるが、本研究のように時間積分値の分布を扱う場合にはわずかな誤差でも大きな影響を及ぼすため、この両者の問題には十分な注意を払う必要がある。

現在、レーダ雨量計におけるグラウンドクラッタの除去方法としては、減算方式と MTI (Moving Target

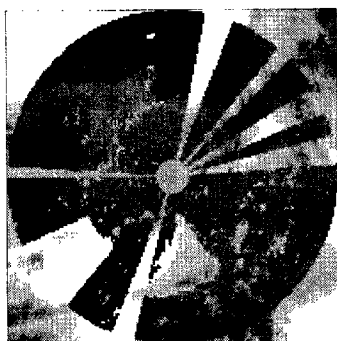


Fig. 3 Target area of the research

Indicator) 方式の2つの手法が用いられている。前者は、晴天時にレーダーによって得られた受信電力の平均値を雨天時の受信電力から差し引くことによってグラウンドクラッタを除去する手法である。また後者は、降雨エコーとグラウンドクラッタの信号特性の違いを検出して降雨エコーのみを特定する手法である。本研究で対象としている深山レーダ雨量計のデータは、MTI方式によって既に除去処理が行われたものである。減算方式と比較するとMTI方式を採用した場合の方が、一般にグラウンドクラッタの除去精度は向上するようであるが、それでもなお、除去しきれていないことが晴天日の降雨分布図から確認されている。

このように、グラウンドクラッタを精度よく除去することは容易なことではない。そこで、本研究では山岳部における降雨の増幅がグラウンドクラッタの影響によるものではないという前提条件を確保するため

- 地点降雨強度（実際には3次元格子状メッシュの平均強度）が1 mm/h以下の場合は無降雨とみなす。
- 解析対象期間内の月積算降雨分布において、各地点ごとの降雨時間（積分期間内において降雨強度が1 mm/h以上であった時間）が空間平均値の4倍以上であった地点をグラウンドクラッタ発生地点とみなす。

という基本方針のもとに解析を進めていくこととする。グラウンドクラッタが発生する地点では、降雨時間の値が他の地点と比較して非常に大きな値を示すことを利用して、グラウンドクラッタ有無の調査を行った。なお、降雨時間に関しては次章で詳しく述べる。

また、シャドウに関しても、本研究では、

- 若干なりともシャドウとなっていると思われる

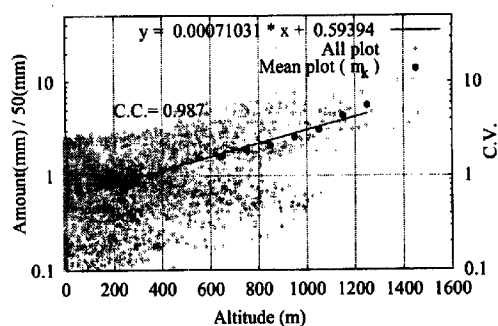


Fig. 4 Altitude Dependence Line on a rainfall amount distribution (R.A.R : 50 mm)

領域を基本的に解析対象から除く。

こととする。さらに、近畿地方において、海上からの反射波（シークラッタ）が強く観測される播磨灘についても、基本的に解析対象領域から除くこととする。

以上より、グラウンドクラッタおよびシャドウの影響を受ける地点を除いた後の本研究の主な解析対象となる領域は、Fig. 3に示すとおりである。ただし、同図の結果は、本研究が積分値分布を解析対象とすることを考慮して、あくまでも安全側の処置を施した結果であることを強調しておく。

2. 標高依存直線に基づいた降雨分布の地形依存特性

本章では、降雨分布の地形依存特性の特徴的な性質である「降雨分布の標高依存直線」の概要を述べるとともに、降雨の分布特性を理解する上で欠かすことのできない「降雨分布の時間積分過程」について、鈴木ら（2001）の解析をもとに説明する。これらの概念は、本研究の解析を行う上でベースとなる重要な概念である。さらに、標高依存直線に関する鈴木ら（2001）の解析の結果から得られた「降雨タイプによる地形依存特性の変化」について、地形効果発現の要因を中心に概説するとともに、その結果生じた3次元降雨情報の必要性について述べる。

なお、鈴木ら（2001）の研究および本研究では、「降雨分布に対する地形効果」や「降雨分布の地形依存性」と言うとき、基本的には、「降雨分布の地形標高に対する依存性」を意味する場合が多い。これは、本章で述べるように、ある程度の時間積分分布を考えた時には、他の地形因子と比べて地形標高の降雨分布に対する影響が卓越しているためである。

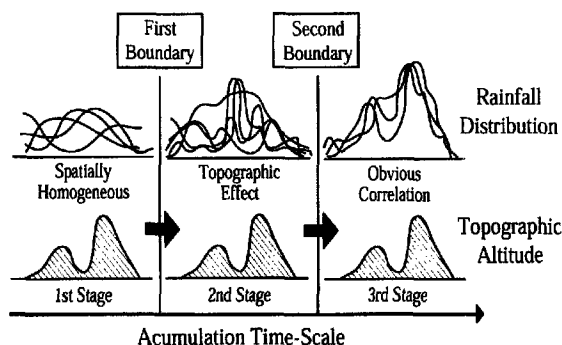


Fig. 5 Time Accumulation Process of rainfall distributions

2.1 降雨分布の標高依存直線について

はじめに、積分降雨量の空間分布と地形標高との関係について、鈴木ら（2001）を参考にその一例を示したものが Fig. 4 である。横軸に地形標高、縦軸に積分降雨量を取り、対象領域内の全地点における積分降雨量をプロットしたグラフである。ただし、縦軸は対数軸とし、領域平均降雨量（R.A.R. : Regional Average Rainfall）によって正規化した値を表示している。同図からは、降雨量分布が空間的に大きくばらついていることが見てとれるが、地形標高を 100 m 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な分布になり、さらに、それらのプロットに対して回帰直線を求めると相関係数が 0.9 以上の明確な直線関係が成立する。このような直線関係を鈴木ら（2001）は「降雨分布の標高依存直線（Altitude Dependence Line）」と呼んでいる。これ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り、本研究においても地形依存特性を定量化するための指標として同直線を用いる。なお、地形標高区分の 100 m という間隔については一つの試みとして設定されたものであるが、本研究においても同じ値を用いるものとする。なお、同様な関係が九州南部の降雨分布においても成立しており、近畿地方固有の特性でないことが確認されている。

2.2 降雨分布の時間積分過程について

前章において述べたように、従来の降雨分布の時間スケールに関する研究から、積分降雨量分布を対象とした場合、短い時間スケール（一雨雨量程度）における降雨分布には地形依存性が存在するものの一雨ごとに様々な変動を示すのに対し、比較的長い時間スケール（週～月雨量程度）になるとより普遍的

Table 3 Sample average of slopes of Altitude Dependence Line on rainfall distributions

	Types of Rainfall	
	Convective	Stratiform
Rainfall Time	0.0004359	0.0000603
Rainfall Intensity	0.0001063	0.0002049
Rainfall Amount	0.0005354	0.0002585

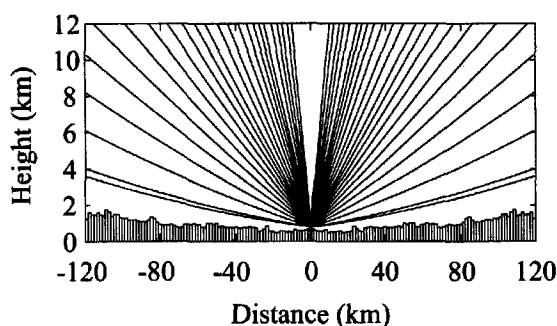


Fig. 6 Height of the radar beams

の高い降雨－地形関係が成立するようになることが明らかになった。すなわち、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いうことである。このように降雨の分布特性が時間積分とともに変化する過程を鈴木ら（2001）は「降雨分布の時間積分過程（Time Accumulation Process）」と呼んでいる。降雨分布の時間積分過程の概念図を Fig. 5 に示す。

降雨分布の時間積分過程について、標高依存直線に基づいて解析した結果、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、それぞれの段階は数時間～6 時間程度の時間雨量スケール、数日程度の日雨量スケール、数週間～一月程度の月雨量スケールの各時間スケールにおよそ対応することが明らかとなった。気象擾乱の時間スケールと空間スケールはほぼ一対一で対応していることを考えると、これらはそれぞれメソ γ スケール、メソ β スケール、メソ α スケールと言い換えることができる。さらに、これまでの研究によって、第一境界スケールは R.A.R. が 50 mm～100 mm、第二境界スケールは R.A.R. が 200 mm～250 mm となることが示されており、各段階の降雨分布特性としては、以下のように説明されている。

1. 第一段階（時間雨量スケール、メソ γ スケール）では、個々の降雨分布に対する地形効果は

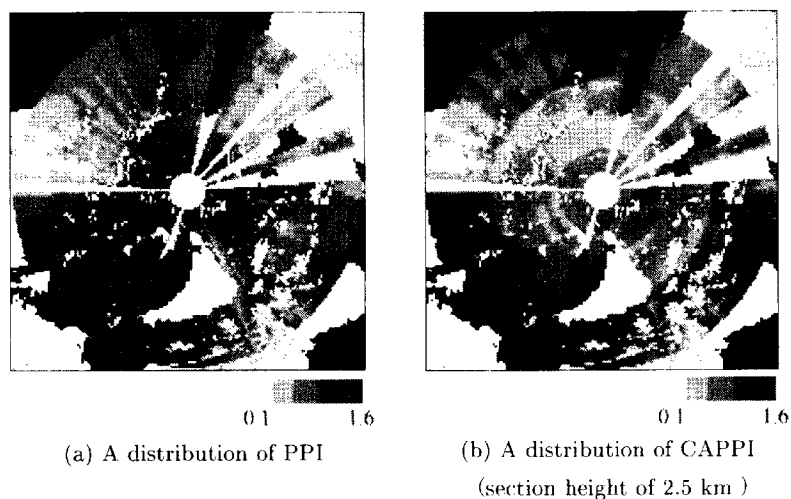


Fig. 7 Two dimensional distributions of rainfall amount

存在するものの、降雨-地形関係の変動が激しいために標高依存直線が成立せず、降雨分布に対する普遍的な地形効果を見いだすことはできない。

2. 第二段階（日雨量スケール，メソβスケール）になると、依然として降雨分布としての変動は大きいものの、ある一定の降雨-地形関係が生じてくるために標高依存直線が成立するようになる。すなわち、降雨分布に対する地形効果が発現する。
3. 第三段階（月雨量スケール，メソαスケール）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、降雨分布に対する明確な地形効果を見いだすことが可能となる。

この結果は、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すとともに、標高依存直線が第二段階（日雨量程度）以上で成立することを示している。

2.3 降雨タイプによる地形依存特性の変化

前節で示したように、降雨分布の標高依存直線は時間スケールが日雨量程度以上、すなわち R.A.R. が 50 mm～100 mm 以上において成立する。しかし、対流性降雨や層状性降雨などの降雨タイプによって降雨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り地形依存特性が大きく異なってしまうことがわかっている。そのため、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構造との関係を明らかにすることが不可欠となる。鈴木ら（2001）は、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、降雨タイプを対流性降雨・層状性降雨の2タイプに分類し、「積分降雨量」を「降雨時間」と「平均降雨強度」とに分け三者の相互比較による解析をすることで、地形効果発現の主要因を明らかにしている。ただし、降雨時間とは積分期間内において降雨強度が 1 mm/h 以上であった時間を各地点ごとに求めたものであり、三者の関係は以下になる。

$$\text{積分降雨量} = \text{降雨時間} \times \text{平均降雨強度} \cdots (2)$$

鈴木ら（2001）の解析において、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のサンプル平均を求めたものが、Table 3 である。降雨量分布・降雨時間分布・降雨強度分布の3つの分布について、標高依存直線の傾きを求めている。対流性降雨の方が層状性降雨より積分降雨量分布の標高依存直線の傾きが大きい値を示していることがわかる。また、対流性降雨では降雨時間分布の方が降雨強度分布よりも標高依存直線の傾きが大きな値を示しているのに対して、層状性降雨では逆に、降雨強度分布の方が降雨時間分布よりも標高依存直線の傾きが大きな値を示していることがわかる。このことから、対流性降雨では降雨時間分布のもつ地形依存性が地形効果発現の主要因であり、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となっていると言える。

これらの結果から推測されることとしては、対流性降雨では、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、そのために、降雨イベントとしての継続期間が長くなり、地形効果が現われてくると考えられる。また、降雨

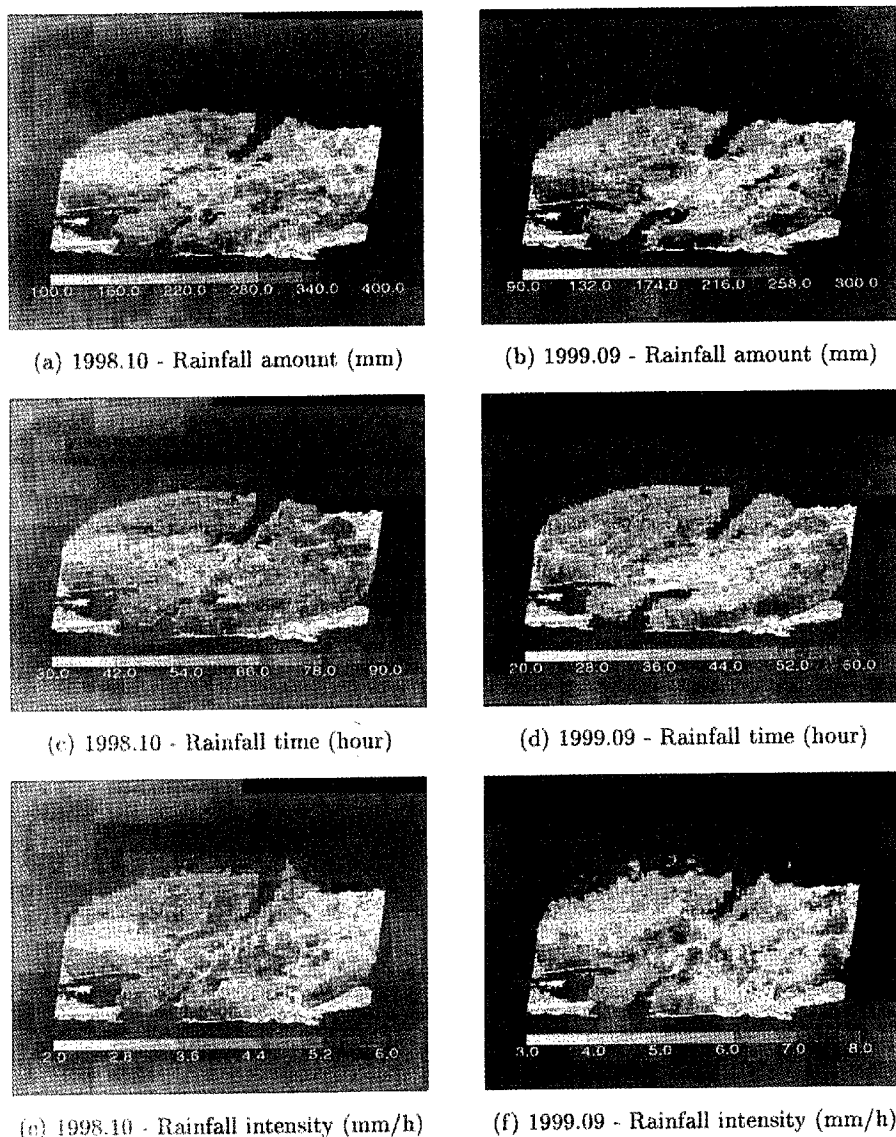


Fig. 8 Three types of rainfall distributions in 1998.10 (stratiform) and 1999.09 (convective)

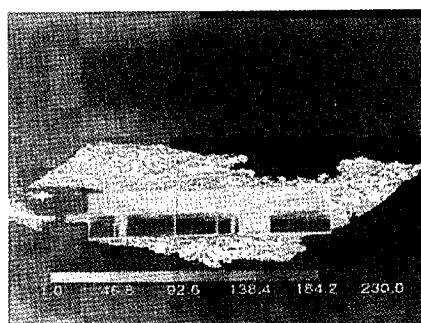
強度については、環境としての大気場および対流発生後の自己組織化のメカニズムに強く依存しており、地形の影響をあまり受けていないと考えることができる。一方、層状性降雨では、広範囲にわたって降雨が発生する傾向が強く、したがって、山岳域で降雨が発生している時には平野部においても降雨が発生している可能性が高いため、降雨時間分布における地形依存性が小さくなっていると考えられる。降雨強度に関しても、地形の影響はそれほど大きくないが、風や水蒸気の収発散などの大気環境場の地形依存性によって、地形効果が現われていると考えることができる。

このように、降雨分布の地形依存特性を明らかにするためには、降雨タイプによる物理構造の違いに

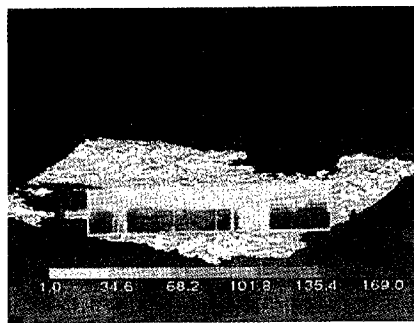
ついて、より詳細に解析する必要がある。しかし、2次元データに基づいた解析のみでは降雨の物理構造について解析を行うことに限界があり、降雨の3次元構造に関する新たな解析が必要とされる。そこで、本研究ではレーダーによる3次元降雨情報に基づいた解析に取り組むことにより、降雨タイプごとの物理構造と地形効果発現のメカニズムの解明を試みる。

3. 降雨の時間積分による3次元分布構造

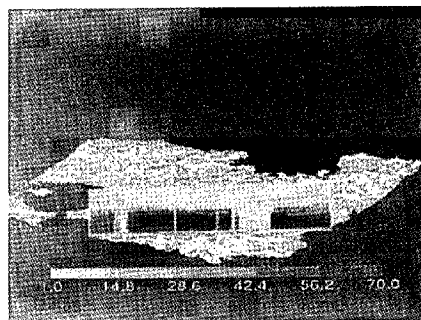
本章では、レーダーによる3次元降雨情報に基づいて、降雨の3次元的な分布特性の解析を行う。はじめに解析の前段階として、鈴木ら(2001)が解析



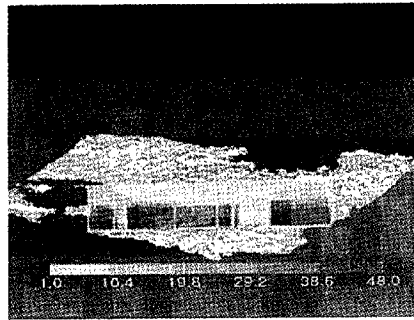
(a) 1998.10 - Rainfall amount (mm)



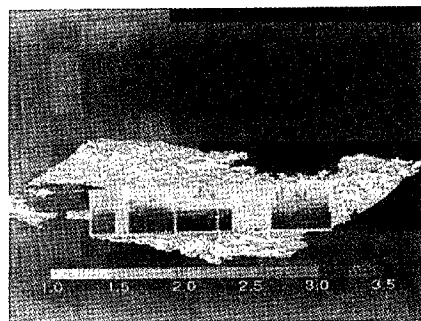
(b) 1999.09 - Rainfall amount (mm)



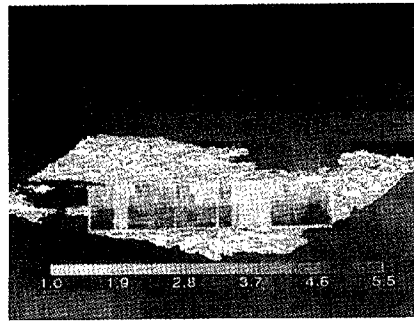
(c) 1998.10 - Rainfall time (hour)



(d) 1999.09 - Rainfall time (hour)



(e) 1998.10 - Rainfall intensity (mm/h)



(f) 1999.09 - Rainfall intensity (mm/h)

Fig. 9 Vertical sections of the three types of rainfall distributions (1)

対象としていた仰角固定観測による2次元降雨情報および本研究の解析対象である仰角可変観測による3次元降雨情報との比較検証を行い、両データの特性を把握する。その上で、まず月積算降雨分布における3次元構造について考察を行う。次に、月積算分布より得られた分布特性と降雨の物理特性との関連性を明らかにするために、3次元構造を考慮した降雨タイプの判別を行うとともに、降雨タイプごとに異なる地形効果発現のメカニズムを明らかにする。このように3次元的な観点からメカニズムの説明付けを行うことによって、鈴木ら(2001)の2次元解析の結果についてより詳細な考察を試みる。

3.1 仰角固定観測と仰角可変観測との比較

前章において述べたように、本研究で解析対象としている深山レーダ雨量計は仰角固定および仰角可変の2つの観測システムより成り立っており、鈴木ら(2001)の研究では仰角固定観測(PPI)による2次元データ、本研究では仰角可変観測(CAPPI)による3次元データを解析対象としている。前者は1 rpm (1回転/分) による1分間観測の受信電力値が、後者は10 rpm の高速観測による瞬時の受信電力値がデータとして得られるという違いがある。そこで、本節ではこの2種類のデータが持つ特性について比較を行う。なお、仰角固定観測は仰角を 0.4° および 0.8° に固定した2仰角によって行われているが、鈴木ら(2001)の研究および本研究のどちら

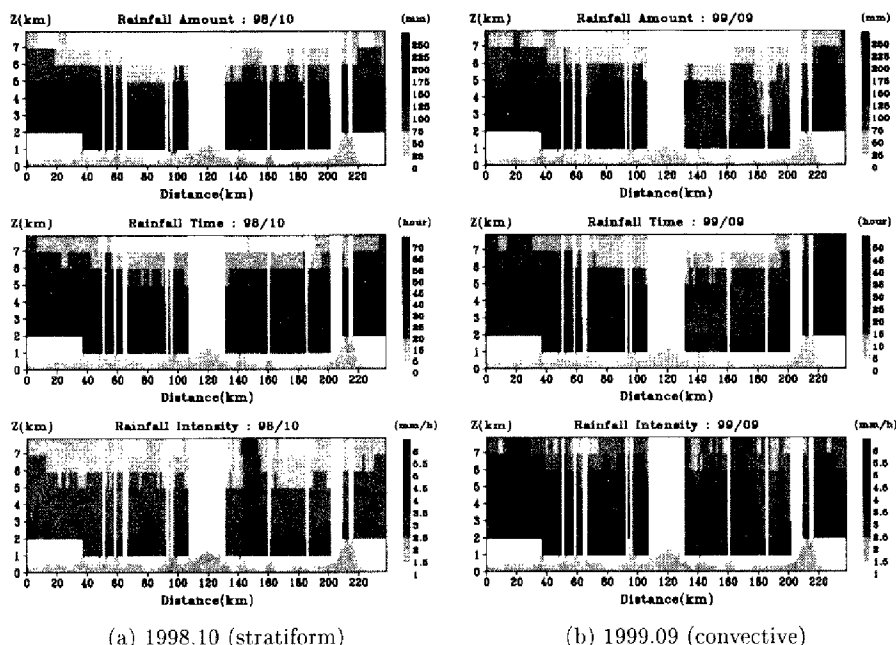


Fig. 10 Vertical sections of the three types of rainfall distributions (2)

においても、仰角 0.8° のデータのみを用いている。

まず、鉛直断面における観測仰角のビーム走行線を Fig. 6 に示す。同図における最低仰角は 0.8° である。仰角固定観測のレーダービーム高度は、地球の曲率を考慮すると、同図に示したようにレーダーサイトから 120 km 地点において標高約 3.5 km となっている（レーダーサイトの標高は 791 m）。仰角可変観測より得られる 3 次元降雨情報からは高度 2.5 km 断面の分布を切り出し、仰角固定観測による 2 次元分布との比較を行うこととする。ここでは 98 年 10 月の降雨を対象として月積算降雨量分布を作成し、分布の比較に用いることとする。

次に、仰角固定観測（PPI）による積算降雨量の 2 次元分布図を Fig. 7 (a)、仰角可変観測（CAPPI）による 3 次元の積算降雨量分布における 2.5 km 断面図を Fig. 7 (b) に示す。ただし、両図はそれぞれの分布における領域平均降雨量の比を取ることで正規化して表示している。領域平均降雨量は 2 次元分布図（仰角固定観測）が 241 mm、2.5 km 断面図が 196 mm となっており、2 次元分布図の方が相当大きな値を示している。これは、仰角固定観測のレーダービーム高度が約 0.7 km から約 3.5 km の高度までを走査していることが原因であると考えられる。すなわち、降雨量分布が高度が低いところほど多くなっているため、高度 2.5 km 断面と比較した場合には仰角固定観測によって観測される降雨量が多くなると理解することができる。確かに、両

図を比較すると、2 次元分布図の方が 2.5 km 断面図と比較してレーダーサイト周辺部の半径約 20 km 円内への降雨量の偏りが大きくなっており、観測高度が低い領域ほど降雨量が多くなっていることを確認することができる。

このように、仰角固定観測による 2 次元降雨量分布図と仰角可変観測データより得られた 2.5 km 断面図とは明らかな分布の違いが見られるが、本研究では、このことを十分に理解した上で解析を行っていく。

3.2 月積算降雨分布における 3 次元分布構造

本節では、Table 1 で示した本研究の解析対象期間中で、特に層状性降雨が卓越していると考えられる 98 年 10 月と、対流性降雨が卓越していると考えられる 99 年 9 月の 2 ヶ月間の降雨を対象として月積算の 3 次元降雨分布を作成し、その特徴について考察を行う。特にここでは、すでに説明した 3 種類の降雨分布（積算降雨量分布、降雨時間分布、平均降雨強度分布）を作成した上で、それぞれの分布の特徴について相互比較を行う。

初めに、98 年 10 月および 99 年 9 月における月積算降雨量の 3 次元分布図を Fig. 8 (a)(b) に示す。同図からは両者にそれほど大きな特徴の違いを見ることはできないが、98 年 10 月の分布においては全体的に地上に張り付くような分布をしていることがわかる。それに対して、99 年 9 月の分布では紀伊

Table 4 The type and period of rainfall during the observation period

Type of rainfall	Case No.	Period
Stratiform	1	1998.07.15 20:00 - 07.17 04:25
	2	1998.10.07 00:00 - 10.08 20:55
	3	1999.06.18 00:00 - 06.19 23:55
	4	1999.10.27 00:00 - 10.28 23:55
Convective	5	1998.08.06 12:00 - 08.10 23:55
	6	1999.07.02 00:00 - 07.03 23:55
	7	1999.07.26 12:00 - 07.29 23:55
	8	1999.09.06 00:00 - 09.08 16:55

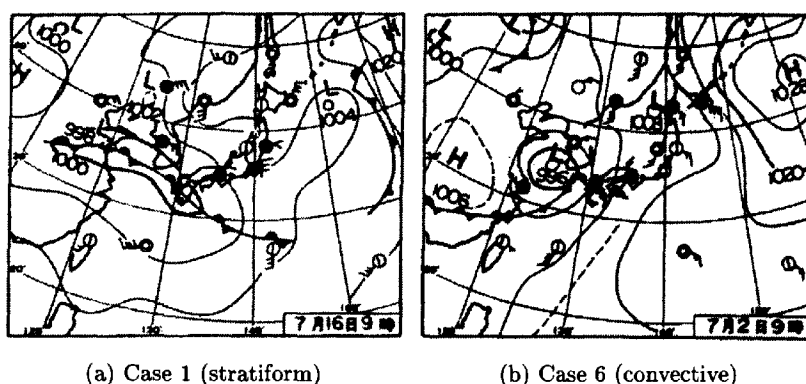


Fig. 11 Weather map in 1998.07.16 (Case 1) and 1999.07.02 (Case 6)

山地の一部や丹波山地周辺部において局所的で背の高い強雨域の存在を見て取ることができる。次に、Fig. 8 (c)(d) に示した各月の降雨時間分布を見ると 98 年 10 月の分布は空間的一様性の高い分布を示しているのに対して、99 年 9 月の分布では丹波山地上において局所的に非常に強い値を示す領域があり、両者の間に明らかな違いを見ることができる。さらに、Fig. 8 (e)(f) に示した各月の降雨強度分布は他の 2 つの分布と比べて、紀伊山地に強い値を示す領域が少ないことがわかる。

次に、各月の月積算降雨量分布の鉛直断面図を Fig. 9 (a)(b) に示す。同図からは、98 年 10 月のケースでは水平方向への一様な分布の広がり特徴的であるのに対して、99 年 9 月のケースでは、山岳域上における鉛直方向への降雨分布の発達が平野部よりも顕著であることが見て取れる。この特徴は Fig. 9 (c)(d) および Fig. 9 (e)(f) に示した降雨時間分布、平均降雨強度分布についても同様である。

さらに、より詳細に分布を比較するため、別の断面で切った鉛直断面図を Fig. 10 に示した。ただし、同図では地形標高を 2 倍して表示している。層状性

降雨が卓越していると考えられる 98 年 10 月の降雨時間分布では、高度 5 km までは空間的に一様な分布をしており、地形依存性がそれほど大きくないことがわかる。また、高度 5 km 以上になると、地形標高の高い地域上空に分布の高い値のものが局所的に集まりだし、分布の地形依存性がみられる。降雨強度分布については、低い高度において地形依存性を見ることができる。一方で、対流性降雨が卓越していたと考えられる 99 年 9 月の分布においては、降雨時間分布の山岳域での依存性が高く、地形と同じような形で分布していることが見て取れる。このことは、水平方向において地形標高の高い地域上空に、より強い値が分布することと、鉛直方向において地形標高が高い地域上空ほど、より高い高度にまで強い値が分布しているということを意味している。

以上の考察から、98 年 10 月の降雨分布は、確かに層状性の降雨の特徴を示しており、同月における降雨イベントとして層状性の降雨が卓越していたことが確認された。一方、99 年 9 月の降雨分布は対流性降雨の影響を強く受けたものであることが確認

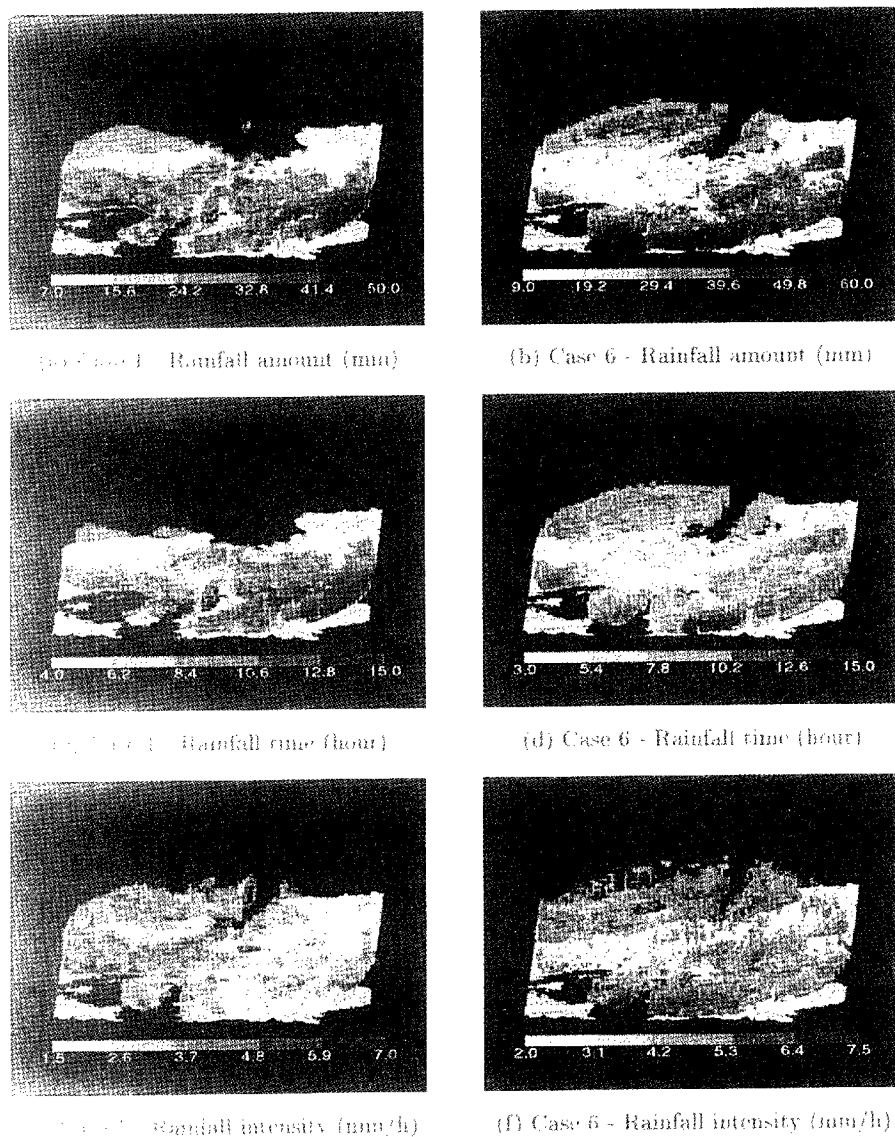


Fig. 12 Three types of rainfall distributions of Case 1 (stratiform) and Case 6 (convective)

できた。このように、降雨の3次元分布構造は、積算期間内の降雨イベントのタイプやその期間の長さに深く関わっており、より詳細に降雨分布構造を解析するためには、降雨タイプごとに3次元構造の特徴を把握することが必要である。そこで、次節においては、層状性および対流性の降雨タイプ別に分布特性の解析を行う。

3.3 降雨タイプ別の降雨の3次元分布構造

(1) 降雨タイプの分類について

降雨タイプ別の3次元分布構造の特徴を把握するために、本節では一雨程度の降雨イベントを対象として、降雨タイプの分類を行った上でタイプ別の考察を行う。ただし、一雨程度の降雨イベントとは、

降雨強度の空間平均値が1 mm/h以上である降雨が連続して観測された期間であり、その前後6時間にわたって1 mm/h以上の降雨が観測されていない場合として判断した。鈴木ら(2001)の研究においては降雨タイプの分類に天気図を用いていたが、本研究においては、天気図による判断に加え、3次元データより得られた積分降雨量分布図、水平断面図、鉛直断面図の3者の降雨分布特性について総合的に判断し、対流性および層状性の2種類の降雨タイプに分類した。本研究で解析の対象とする降雨イベントのタイプと期間をTable 4に示す。

本節においては、それぞれの降雨タイプの特徴的なケースとしてケース1と、ケース6を取りあげて考察を行う。ここで、両ケースの期間内における

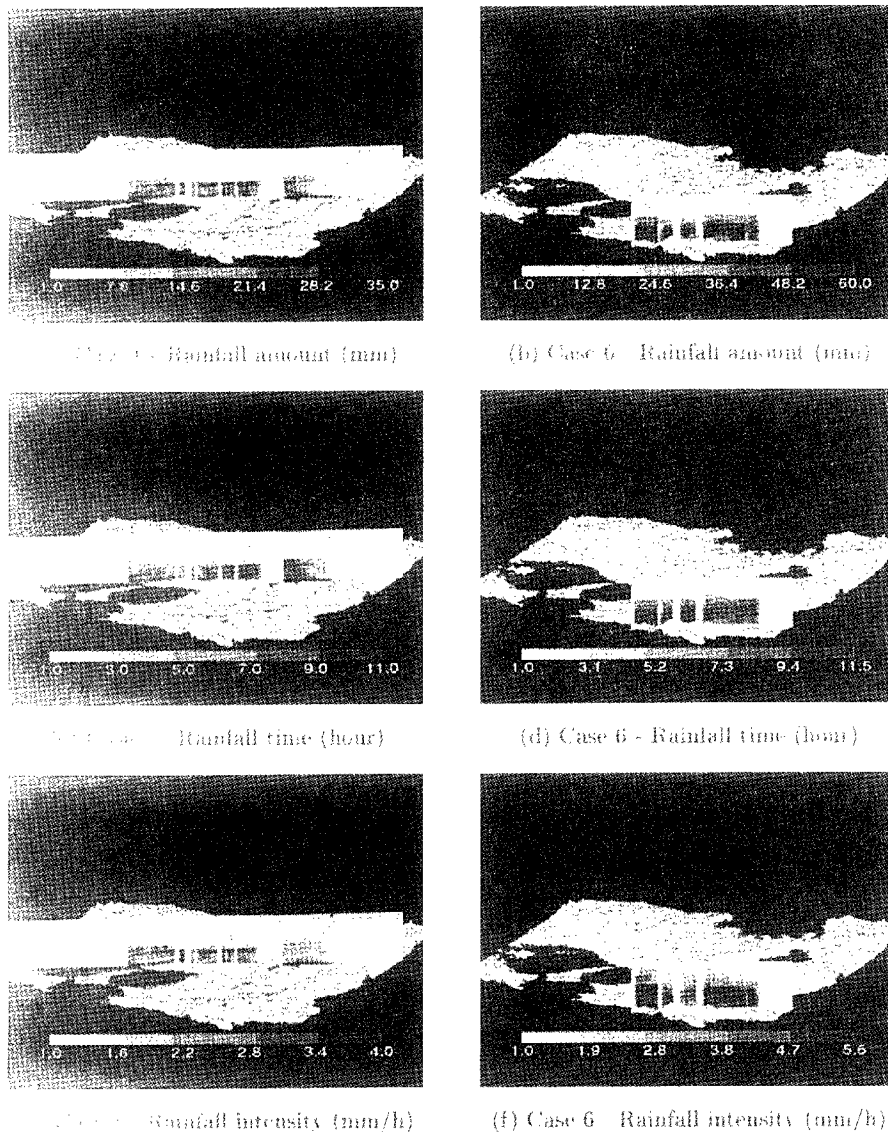


Fig. 13 Vertical sections of the three types of rainfall distributions (1) of Case 1 (stratiform) and Case 6 (convective)

天気図を **Fig. 11** に示す。同図より、ケース 1 は梅雨前線が停滞した影響による層状性降雨の卓越したケースであり、一方、ケース 6 は梅雨前線上を低気圧が通過した影響による対流性の強い豪雨であると判断できる。

(2) 降雨タイプ別の分布特性と降雨の物理構造

はじめに、各ケースの積分降雨量の 3 次元分布図を **Fig. 12 (a)** に示す。ケース 1 においては、播磨平野から若狭湾にかけた地域に、高度の低い、層状性の降雨分布が見られる。一方、ケース 6 には紀伊山地から鈴鹿山脈にかけて、鉛直方向に発達した対流性の降雨分布が地形標高の高い地域に局所的に分布しているのが見られる。また、各ケースにおけ

る平均降雨強度の 3 次元分布図を **Fig. 12 (c)** に示す。ケース 1 においては、同程度の平均降雨強度の値が水平方向に分布しているのが見てとれるのに対して、ケース 6 では、平均降雨強度分布が比較的ばらついているのが見てとれる。このことは、相対的に見て、平均降雨強度の高い値が局所的に分布していることから、対流性降雨の特徴を示していると言える。

次に、各ケースの積分降雨量分布における鉛直断面図を **Fig. 13 (a)(b)** に示す。ケース 1 においては、層状性の雲の特徴といえるブライトバンド (bright band) が確認でき、層状性降雨の特徴が顕著に表れている。一方、ケース 6 においては、対流性の降

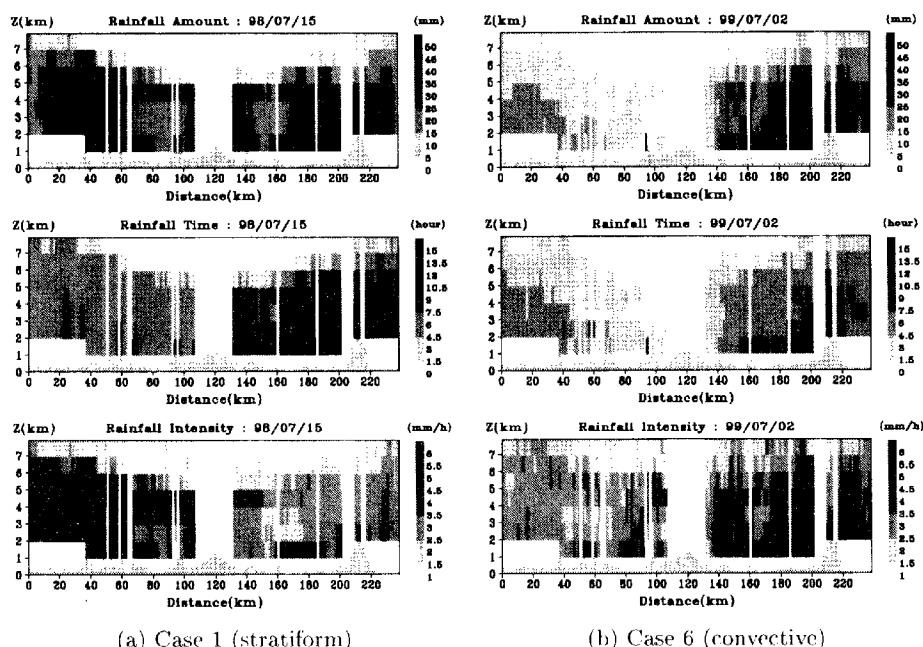


Fig. 14 Vertical sections of the three types of rainfall distributions (2) of Case 1 (stratiform) and Case 6 (convective)

雨の特徴である鉛直方向への分布の広がりが見られる。また、Fig. 13 (c)～(f)の降雨時間分布および平均降雨強度分布においても、ブライツバンドが確認できる。

さらに、より詳細に分布を比較するため、Fig. 13とは異なる断面で切った鉛直断面図をFig. 14に示した。ただし、同図では地形標高を2倍して表示している。同図より、層状性の降雨（ケース1）では、降雨時間分布は、一定のエリア内においては、ほぼ同一の鉛直プロファイルを持ち、層を成して水平方向にはば一様に分布していることが見て取れる。このように、局地的に背の高い分布域が存在せず層状型の分布を成しているということは、この降雨イベントが層状性降雨の卓越したケースであることに他ならない。なぜなら、層状性降雨が大気の環境場に依存して、比較的広範囲にわたって一斉に（一様に）発生する傾向が強いからである。

一方、対流性降雨（ケース6）の場合は、山岳地域上空において高度3 kmから6 km付近にわたって、相対的に降雨量分布の大きい領域が確認できる。すなわち、対流性降雨の大きな特徴として降雨分布の地形依存性が大きいことが言える。また、降雨時間分布図を見ると、降雨量分布と同様に相対的な値の大きい領域が山岳域上空に集中し、比較的背の高い直立型の分布を示していることがわかる。このような分布型になるということは、山岳域において対

流が発生する頻度が高いことをまさに示していると言える。降雨現象として考えた場合、山岳域上空において複数の対流セルが自己組織化することによって、降雨イベントとしての降雨時間が長くなる傾向にあるといえる。

ここで、前章で述べたように、積分降雨量は降雨時間と平均降雨強度の積で表すことができることを考えると、対流性降雨の降雨量分布において、上記のような地形効果が見られる要因は降雨時間の分布が地形に強く依存していることにあると考えることができる。すなわち、対流性降雨における地形効果発現の主要因は「降雨時間の地形依存性」にあると言える。鈴木ら（2001）は（仰角固定観測より得られた）2次元降雨分布を解析することによって、このような仮説が成り立つことを示しているが、本研究での3次元降雨情報を用いた解析からも、確かに同様な説明付けが可能であると結論付けることができる。

また、3.2節で述べた月積算降雨分布と本節におけるイベント積算降雨分布との比較を行った。層状性降雨に関しては、月積算降雨分布である98年10月の分布の方が、イベント積算降雨分布のケース1の分布と比べて、空間的な一様性が顕著に見られ、より層状性降雨の特徴がはっきりと表われていた。一方、対流性降雨に関しては、イベント積算降雨分布であるケース6の分布の方が、月積算降雨分布の

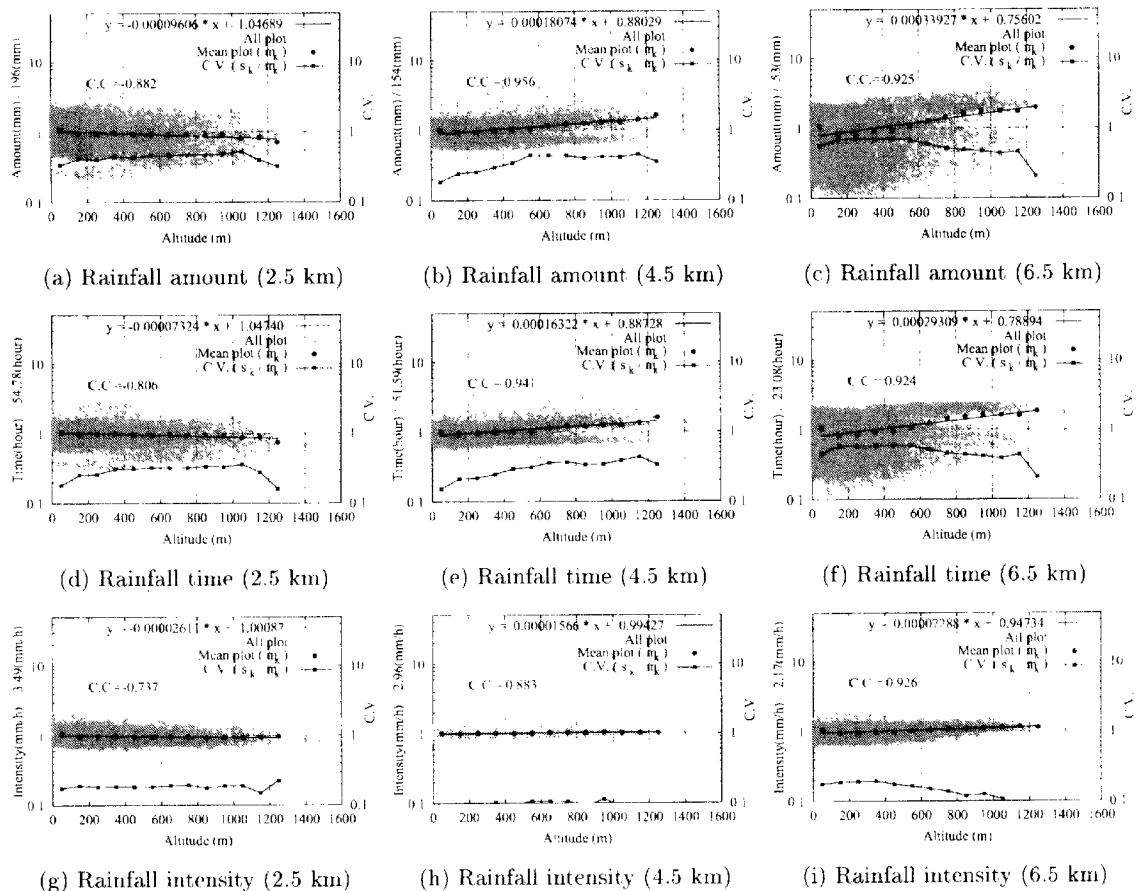


Fig. 15 Altitude Dependence Lines on the three types of rainfall distributions at various heights of the section in 1998.10 (stratiform)

99 年 9 月の分布よりも、山岳域上空において降雨現象としての対流セルの様子が顕著に見られ、より対流性降雨の特徴がはっきりと表われていた。ただし、99 年 9 月の方がケース 6 の分布よりも、地形標高と降雨分布との対応関係はより明確に現れている。前者の原因としては、一雨程度の降雨イベントで層状性降雨の分布を見た場合は、広域の層状性降雨域に伴って狭域の対流性降雨域が存在するケースが多く、対象領域内においても地域によって降雨分布の特徴が異なるためと考えられる。また、後者については、月積算の対流性降雨の分布を見た場合、発生場所が異なる複数の対流性降雨を積分することになり、結果として山岳域上空に強度の大きい分布領域が集中するが、逆に一つ一つの対流セルの特徴は積分によって均されてしまうため、その存在を明確に捉えることができなくなると考えられる。

以上より、鈴木ら（2001）の 2 次元降雨分布の解析から得られた「降雨の物理構造と地形効果発現のメカニズムとの関連性」に対して、3 次元降雨情報に基づいた本研究の解析によって、あらためて明確

にその妥当性を示すことができた。

4. 標高依存直線に基づいた降雨分布の地形依存特性

本章では、月積算降雨分布およびイベント積算降雨分布を対象として、前章と同様に 3 種の分布（積算降雨量分布・降雨時間分布・平均降雨強度分布）における地形依存特性について、「標高依存直線」を指標として考察することにより、降雨分布の地形依存特性の定量化を試みる。ここでは、同直線の傾きが大きいほど、降雨分布の地形標高に対する依存性が高いと評価される。その上で、鈴木ら（2001）による 2 次元分布の解析結果との比較検証を行う。

4.1 月積算降雨分布における地形依存特性

はじめに、本節では、98 年 10 月と 99 年 9 月の月積算降雨分布における標高依存直線とその傾きについて解析を行い、降雨分布の地形依存特性の解明を試みる。

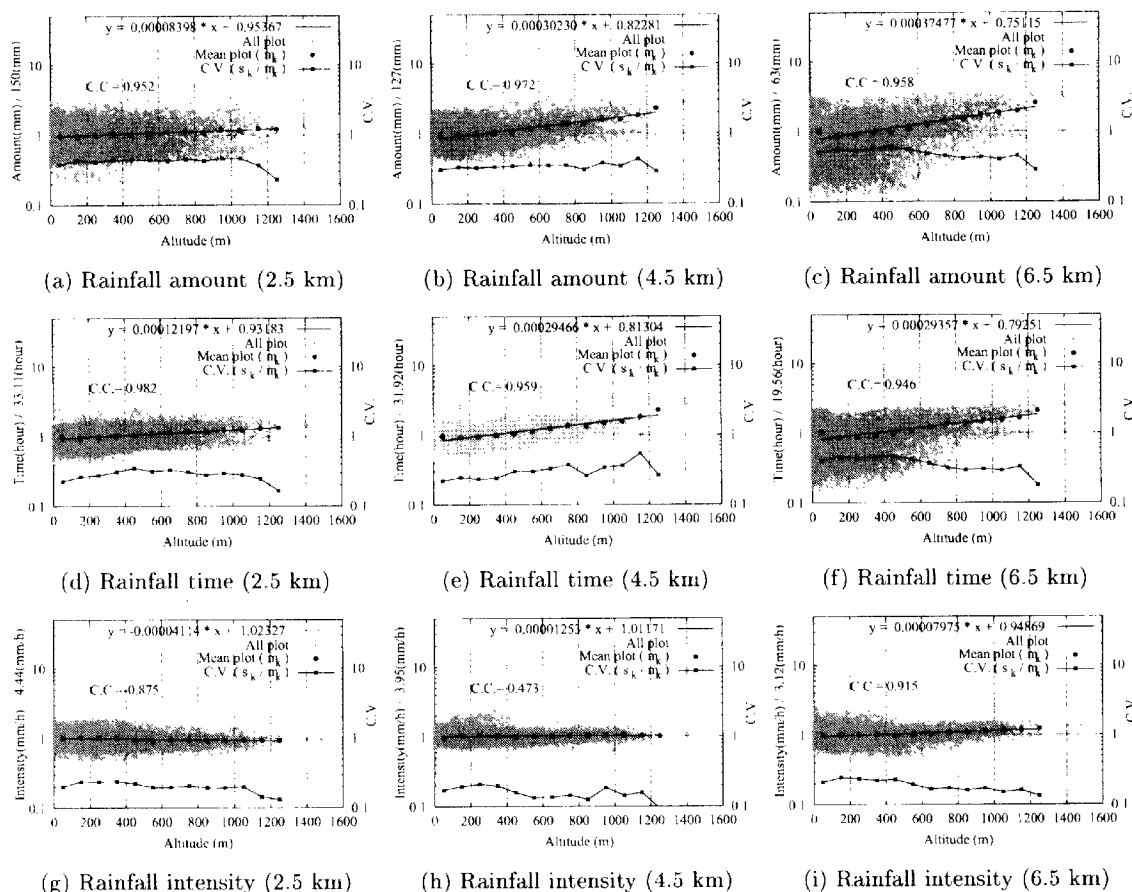


Fig. 16 Altitude Dependence Lines on the three types of rainfall distributions at various heights of the section in 1999.09 (convective)

98 年 10 月における積算降雨量・積算降雨時間・平均降雨強度の 3 分布と、各分布における標高依存直線を Fig. 15 に示した。同様にして、99 年 9 月における各分布と標高依存直線を Fig. 16 に示した。ただし、同図には、それぞれ高度 2.5 km, 4.5 km, 6.5 km の水平断面における分布を表示している。また、標高依存直線の傾きに注目し、その高度変化の特徴を捉えるため、3 分布の各高度における標高依存直線の傾きの値を、横軸に 1.5km~6.5km の断面高度をとってグラフ化したものが Fig. 17 である。

まず、98 年 10 月および 99 年 9 月の全ての分布に共通して見られる特徴として、断面の高度が高くなるに従って、標高依存直線の傾きも次第に大きくなっていく傾向にある。これは、断面高度が高くなるとともに降雨量・降雨時間・降雨強度の分布する領域が次第に地形標高の高い地域に集中し、局所的になっていくことを意味している。すなわち、降雨の分布としての地形依存性は、断面高度が高くなるとともに大きくなっている。

次に、Fig. 15 の層状性降雨が卓越していたと考えられる 98 年 10 月の分布について見てみると、高度の低い 2.5 km 断面（同図 (a)(d)(g)）において、標高依存直線の傾きが負の値を示していることは興味深い点である。他の層状性降雨についての積分分布においても同様な特徴を見ることができたが、これは、層状性降雨では雨域の高度が低い場合が多く、標高の高い領域にはほとんど降雨が発生していないようなケースも存在するためであると考えられる。

一方、Fig. 16 の対流性降雨が卓越していたと考えられる 99 年 9 月の分布に見られる特徴としては、積分降雨量分布（同図 (a)(b)(c)）および降雨時間分布（同図 (d)(e)(f)）の標高依存直線の傾きは高度 2.5 km 断面においては比較的小きな値を示しているが、d 断面高度が上昇するに従って、傾きが次第に大きくなることがわかる。一方で、平均降雨強度分布（同図 (g)(h)(i)）においては、どの高度に関しても傾きはほぼゼロとなっており、地形依存性を見取することはできない。すなわち、99 年 9 月（対流性）の降雨分布においては、降雨時間分布が地形が

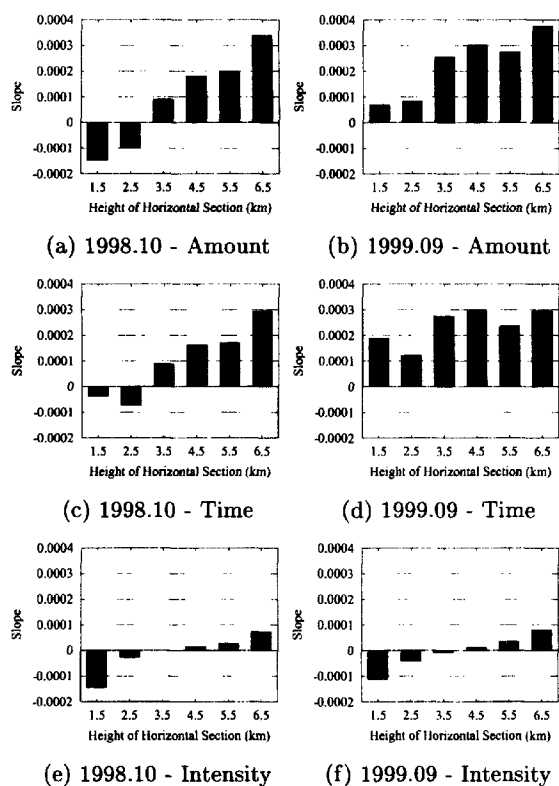


Fig. 17 The slopes of Altitude Dependence Line at various heights of the section in 1998.10 (stratiform) and 1999.09 (convective)

ら強い影響を受けることによって、降雨量分布の地形依存性が生じていると説明付けることができる。言い換えると、降雨時間分布のもつ地形依存性が地形効果発現の主要因となっている。これは前章での考察および鈴木ら（2001）の解析結果と一致する。ただし、その依存性の程度は断面高度に依存しており、低い断面高度で見た場合にはそれほど大きな依存性を示してはいない。対流性降雨が卓越した期間における積分降雨分布の標高依存直線の傾きについて、同図から得られた結果は、鈴木ら（2001）の解析から得られた値よりも小さな値を示しているが、このような違いが生じる主な原因は、期間内の降雨において対流性降雨の占める割合が異なっていることにあると考えられる。

次に、**Fig. 17** より、98 年 10 月および 99 年 9 月の標高依存直線の傾きとその高度変化について比較を行う。まず、平均降雨強度分布（同図 (e)(f)）に関しては、降雨タイプによらずほぼ同様な高度変化傾向を示しており、全体的に値が小さいものの、断面高度が高くなるとともに若干値が大きくなっている。

一方、降雨時間分布について見てみると、99 年 9 月（対流性）の分布（同図 (d)）では、どの断面高

度においても、標高依存直線の傾きが正の比較的大きな値を示しているのに対して、98 年 10 月（層状性）の分布（同図 (c)）では、低高度断面における傾きが負の小さな値を示しており、平均降雨強度分布（同図 (e)）における傾きと同程度の値となっている。すなわち、99 年 9 月の降雨分布では、断面高度によらず、降雨時間分布の地形依存性が降雨強度分布のそれよりも大きいことが分かる。したがって、対流性降雨においては、降雨時間分布のもつ地形依存性が地形効果発現の主要因となっていると言える。これは前章の考察結果と一致する。

以上より、降雨分布の鉛直構造と地形標高との対応関係は、降雨タイプによって異なることが分かった。しかしながら、さらに降雨の物理構造と地形効果発現との関連性について考察するためには、鈴木ら（2001）の解析と同様に、降雨タイプ別のイベント積算降雨分布の特性を解析する必要がある。そこで、次節においては、標高依存直線を指標とした同特性の考察を行う。

4.2 降雨タイプ別の降雨の地形依存特性

前章と同様に、層状性・対流性の降雨タイプの特徴的なケースとして、それぞれ **Table 4** のケース 1 およびケース 6 を考察対象とする。

前節と同様に、ケース 1 およびケース 6 における積分降雨量・降雨時間・平均降雨強度の 3 分布と各分布における標高依存直線を、それぞれ **Fig. 18** および **Fig. 19** に示す。また、3 分布の各高度における標高依存直線の傾きの値をグラフ化し、**Fig. 20** に示した。

はじめに、**Fig. 18** の層状性降雨のケース 1 について見ると、断面高度が高くなるとともに、積算降雨量分布（同図 (a)(b)(c)）における標高依存直線の傾きが徐々に大きくなっていくことが見て取れる。また、平均降雨強度分布（同図 (g)(h)(i)）における標高依存直線の傾きが非常に小さいことから、降雨強度の地形標高への依存性が小さいことが分かる。鈴木ら（2001）の解析結果によれば、層状性降雨においては、降雨時間分布より降雨強度分布における標高依存直線の傾きの方が若干大きくなることが示されており、同図の結果はそれとは異なったものとなったが、3 分布における標高依存直線の傾きが比較的小さな値を示す点は一致しており、同図は、空間的な一様性が強い（すなわち標高依存直線の傾きが小さい）という層状性降雨の特徴をよく表していると言える。

一方、**Fig. 19** のケース 6（対流性降雨）については、積算降雨量分布（同図 (a)(b)(c)）における

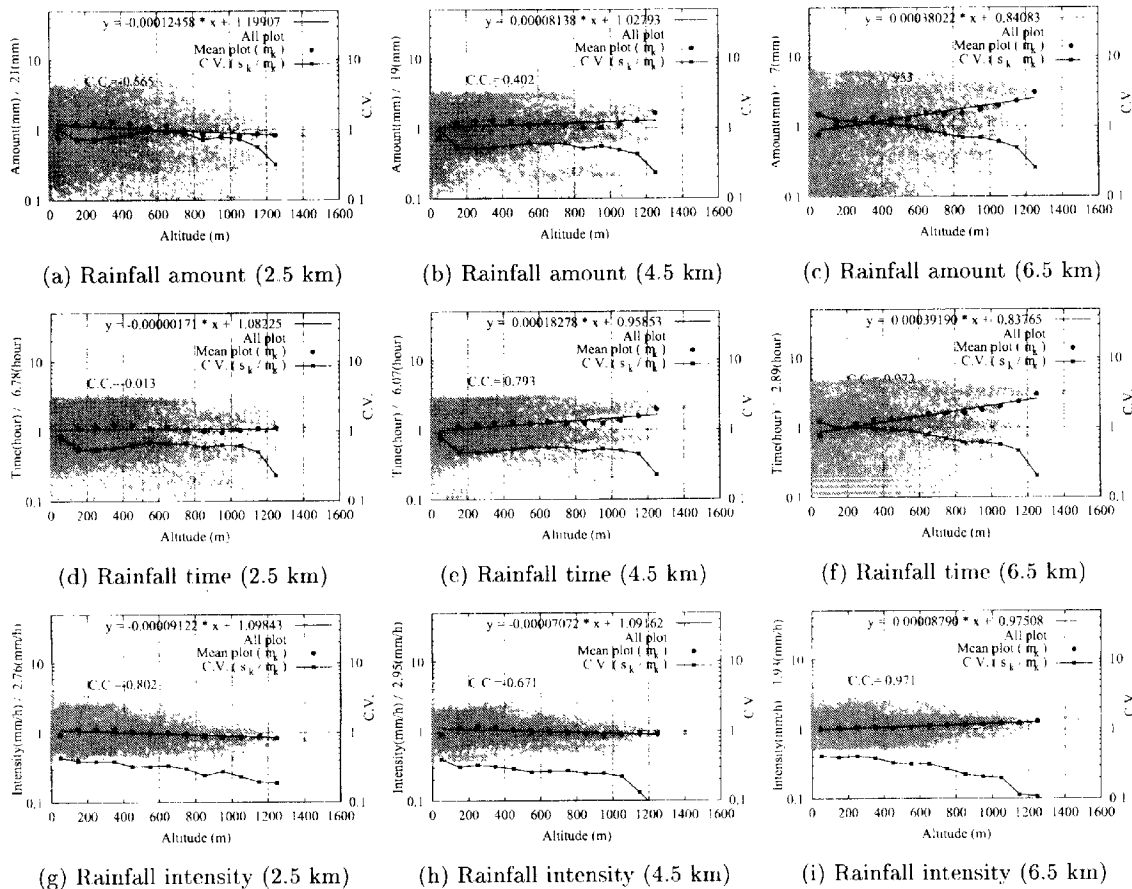


Fig. 18 Altitude Dependence Lines on the three types of rainfall distributions at various heights of the section in Case 1 (stratiform)

標高依存直線の傾きが比較的大きいことから、積算降雨量の地形依存性が高いことが分かる。また、断面高度 2.5 km 以上においては、明らかに平均降雨強度分布（同図 (g)(h)(i)）より降雨時間分布（同図 (d)(e)(f)）の方が標高依存直線の傾きが大きく、対流性降雨においては降雨時間分布のもつ地形依存性が地形効果発現の主要因となっているという前章および鈴木ら（2001）の解析結果とよく一致している。

さらに、**Fig. 20** よりケース 1 およびケース 6 の標高依存直線の傾きとその高度変化について比較を行うと、前述の特徴をあらためて確認することができる。ケース 1（層状性）の積算降雨量分布（同図 (a)）および降雨時間分布（同図 (b)）における標高依存直線の傾きは、前述したように、断面高度が高くなるとともに徐々に大きくなっているが、高度 6.5 km においては傾きが比較的大きな値を示している。これは、領域全体としてみた場合には降雨タイプが層状性と判別されるケースにおいても、地形標高の高い地域において背の高い対流性の雨域が発生する場合があるためと考えられる。

また同図は、前節で考察を行った **Fig. 17** の結果と比較しても、ほぼ同様な結果が得られている。両図の結果が異なっている点としては、対流性降雨である 1999 年 9 月およびケース 6 の降雨量分布と降雨時間分布における傾きについて、1999 年 9 月の分布（**Fig. 17** (b)(d)）ではどの断面高度についても傾きが正の値を示しているのに対して、ケース 6 の分布（**Fig. 20** (b)(d)）では高度 1.5 km 断面における傾きのみが負の比較的大きな値を示している点が特徴的である。同様な特徴が対流性の他のケースにも見られたが、対流性降雨の特徴と言えるかどうかを判断するにはさらに詳細な解析が必要である。

以上の解析結果より、降雨の物理構造と地形効果発現のメカニズムとの対応関係を解明するためには、水平断面上で見た地形依存性だけではなく、降雨分布の鉛直構造が、地形との対応においてどのような特性を持っているかを明らかにすることが重要な意味を持つと思われる。したがって、今後の課題はこれらの点を解析することによって、降雨タイプ別の分布構造をモデル化していくことである。

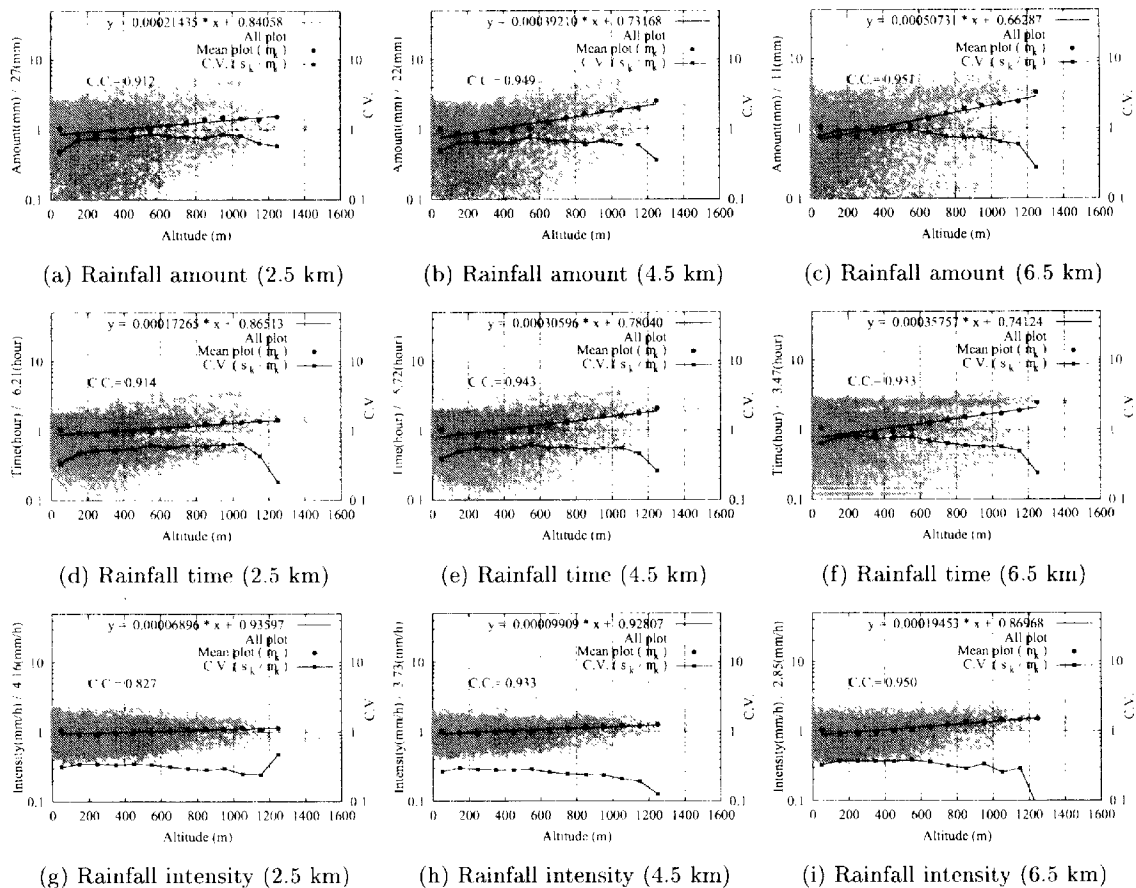


Fig. 19 Altitude Dependence Lines on the three types of rainfall distributions at various heights of the section in Case 6 (convective)

5. 結論

本研究では、最終的な目標となる「地形依存特性を考慮した降雨分布構造モデル」の構築を目指し、3次元構造を考慮した降雨の地形依存特性の解明を試みた。特に、降雨タイプごとの物理構造と地形効果発現のメカニズムとの関連性について解析を行った。また、鈴木ら（2001）の解析から明らかとなった「降雨タイプごとに地形効果発現のメカニズムが異なる」という知見に対して、本研究の解析結果との比較検証を行った。これらの解析の結果、本研究で得られた成果を以下に述べる。

- 降雨の3次元的な分布構造として、山岳域ほど降雨量が多いという地形依存性を確認することができた。
- 降雨の3次元的な分布構造は、対象とするイベントの降雨タイプ（層状性降雨および対流性降雨）によって、明らかに異なった特徴を示すことが示された。

- 降雨量分布を降雨時間分布と平均強度分布に分けて考えたとき、地形効果発現に対する両分布の寄与の度合いが、降雨タイプによって異なることが確認され、鈴木ら（2001）による解析結果の妥当性を示すことができた。

特に、本研究は、2次元分布のみから降雨の分布特性の解明を試みている従来の研究とは異なり、3次元的な物理構造によって成り立っている降雨現象を、3次元レーダー情報を用いることによってより実現象に近い立場から解析を行っており、この点が本研究の特徴的な点と言える。またその結果、鈴木ら（2001）の示した知見の妥当性を、より物理的な立場から検証することができたことは本研究の大きな成果である。今後様々な観点からさらに詳細な解析を行い、降雨分布構造モデルの構築へと結びつけて行きたいと考えている。

最後に、本研究で用いた旧建設省深山レーダー雨量計のデータは、淀川ダム統合管理事務所ならびに日本気象協会より提供して頂きました。ここに深く

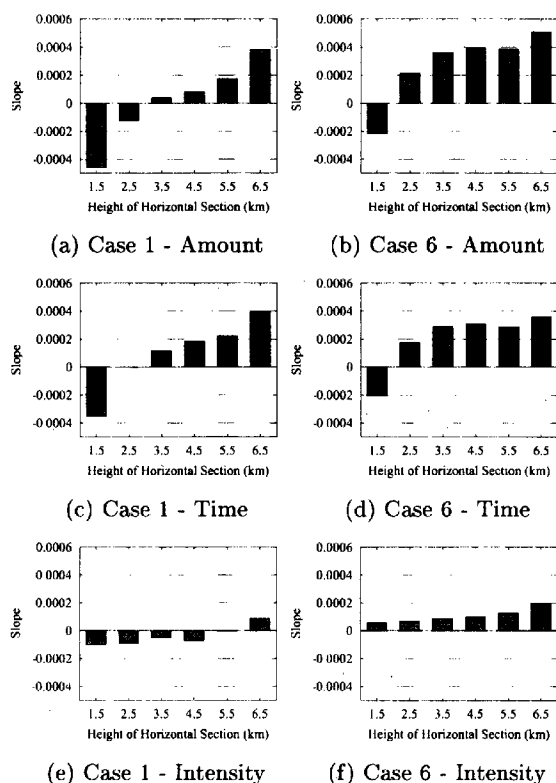


Fig. 20 The slopes of Altitude Dependence Line at various heights of the section in Case 1 (stratiform) and Case 6 (convective)

感謝の意を表します。

参考文献

- 沖大幹・虫明功臣・小池俊雄 (1990) : 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/-13.
- 鈴木善晴 (2000) : 地形依存特性を考慮した降雨分布の時間積分過程の解析とモデル化, 京都大学大学院修士論文.
- 鈴木善晴・中北英一・池淵周一 (2001) : 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, 水工学論文集, 第 45 巻.
- 中北英一・菅原竜也・岡田憲夫・池淵周一 (1997) : 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.
- 中北英一・鈴木善晴・池淵周一 (1998) : 降雨分布の地形依存特性のスケール階層構造, 第 53 回土木学会年次学術講演会.
- 中北英一・鈴木善晴・池淵周一 (2000a) : 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.
- 中北英一・鈴木善晴・池淵周一 (2000b) : 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.
- 山田正・日比野忠史・荒木隆・中津川誠 (1995) : 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/-33.

Study on the dependence features on topography of rainfall distributions considering their three dimensional structure

Yoshiharu SUZUKI*, Makoto MOROHASHI**, Eiichi NAKAKITA* and Shuichi IKEBUCHI

* Graduate School of Engineering, Kyoto University

** Faculty of Engineering, Kyoto University

Synopsis

The purpose of this study is to analyze the features of rainfall distribution using three dimensional rainfall information of weather radar. By analyzing three kinds of distributions of rainfall amount, rainfall time and rainfall intensity, it is made clear how the mechanism of topographic effect on rainfall distribution is different between the types of rainfall, stratiform rainfall and convective rainfall. Additionally the three dimensional features of rainfall is quantified using altitude dependence line, which is an index of the dependence features on topography of rainfall distribution.

Keywords : rainfall distribution, weather radar, three dimensional rainfall information, altitude dependence line, types of rainfall