

3次元構造および降雨タイプを考慮した 降雨分布の地形依存特性の解析

STUDY ON DEPENDENCE PROPERTIES OF RAINFALL DISTRIBUTIONS ON TOPOGRAPHY CONSIDERING THE THREE DIMENSIONAL STRUCTURE AND TYPES OF RAINFALL

鈴木 善晴¹・諸橋 真琴²・中北 英一³・池淵 周一⁴

Yoshiharu SUZUKI, Makoto MOROHASHI, Eiichi NAKAKITA and Shuichi IKEBUCHI

¹学生員 工修 京都大学大学院 工学研究科環境地球工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

²学生員 京都大学大学院 工学研究科環境地球工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

³正会員 工博 京都大学大学院助教授 工学研究科環境地球工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

⁴フェロー 工博 京都大学教授 防災研究所水資源研究センター (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

The purpose of this study is to analyze the relation between rainfall distribution and topography using three dimensional rainfall information of weather radar. By analyzing the distributions of three indexes of accumulated rainfall amount, accumulated rainfall time and average rainfall intensity, it is made clear how the mechanism of topographic effects on rainfall distributions is different between the types of rainfall, stratiform rainfall and convective rainfall. Additionally the three dimensional properties of topographic effects are quantified using Dependence Line on Topographic Elevations (DLTE), which represents dependence properties of rainfall distribution on topographic elevation.

Key Words : rainfall distribution, weather radar, topographic effect, types of rainfall

1. 序論

(1) 研究の背景と目的

降雨の時間的・空間的な分布特性に関しては、これまで数多くの研究がなされているが、依然として、水文学上の重要課題の一つとして未解決の問題が残されている。特に、降雨に対して地形がどのように作用するかを明らかにすることは、地形条件の複雑な我が国においては特に重要である。本研究では、降雨の統計的・物理的な分布構造モデルの構築を目指して、レーダー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。

地形標高が高い地域ほど降雨量が多くなる傾向にあるという降雨分布の地形標高への依存性の存在は、従来の研究より明かである。多くの研究では、地上雨量計データを元に降雨量と地形標高との相関関係を解析し、両者の関係を表す種々の回帰式を提案している。例えば、山田ら¹⁾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、降雨量と地形標高との関係が線形関係にあることを示すとともに、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明らかにしている。また、Daly ら²⁾は、アメリカ本土における多数の地上雨量計データをもとに、降水量と地形標高との相関関係を利用して、山岳域における年降水量分布を推定するモデル (PRISM) を提案している。同モデルでは、両者の相関関係が明瞭となる領域スケールを地域ごとに調査し、各領域ごとに重み付き線形回帰式を算定して降水量の空間分布を求めている。

一方、著者ら^{3),4)}は、日本の近畿地方に位置する降雨レーダーによって観測された面的な降雨情報をもとに、降雨量と地形標高との関係を解析し、「降雨分布の標高依存直線 (Dependence Line on Topographic Elevations, DLTE)」という降雨分布特性を明らかにした。これは、ある程度以上の空間スケール (一山岳域程度) と積算時間スケール (およそ数日程度) を持つ降雨分布を対象とした場合には、地形標高による層別平均法を適用することにより、地形標高と積算降雨量の対数値との間に明確な直線関係が成立するという普遍性の高い特性である。さらに、著者らは、同直線の変動特性および同直線からの偏差の統計的特性を明らかにすることによって、降雨分布の統計モデルを構築した。

このように、降雨分布の地形標高依存性に関する研



図-1 解析対象領域（近畿地方，濃い灰色部）。

究はこれまで数多く行われているが，一般に，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，その普遍的な特性を把握することは困難である．そのため，降雨量と地形標高との相関関係がより厳密にどのような関係にあり，それは物理的にどのような過程によってもたらされているのかなど，降雨分布に対する地形効果のメカニズムに関しては，未だ明らかにされていない課題が多く残されている．

そこで，本論文では，レーダーによって観測された3次元の降雨情報を解析することにより，降雨タイプに依存した地形効果の特性，およびその発現のメカニズムについて解明を試みる．特に，降雨時間や降雨強度の空間的な分布と地形標高との関係を解析することにより，地形効果発現の主要因を明らかにする．さらに，「降雨分布の標高依存直線」を指標として，降雨の3次元分布構造に対する地形効果の定量化を試みる．

(2) 研究の意義と特徴

「降雨分布の標高依存直線」に関する著者ら^{3),4)}の研究では，レーダーの仰角固定観測（PPI）より得られる2次元的な降雨分布を解析した結果，降雨分布に対する地形効果発現のメカニズムが，明らかに降雨の物理構造に依存していることが確かめられた．そこで，本論文ではさらに，レーダーによる3次元降雨情報に基づいた降雨-地形関係の解析を行うことで，降雨タイプにより異なる降雨の物理構造を明らかにするとともに，より物理的な側面から地形効果発現のメカニズムの解明を試みるものである．

3次元降雨情報を解析することで，降雨現象の一断面だけを見るのではなく，実際の降雨のもつ3次元的な物理構造と地形との相関関係について解析を行うことが可能となる．特に，降雨の3次元構造から降雨タイプを判別することによって，降雨タイプごとに異なる地形効果発現のメカニズムに対する説明づけの根拠をより明確にすることができる．すなわち，これまでに著者らの研究において得られた降雨の地形依存特性に関する解析結果について，さらに詳細な考察を行うことが本論文の目的であり，降雨分布構造モデル構築の基礎となるものである．

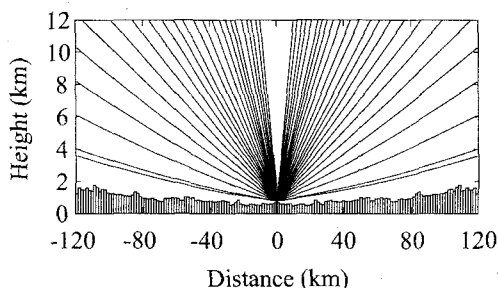


図-2 深山レーダ雨量計の各観測仰角（全24仰角）におけるビーム走行線の高度．横軸はレーダーサイトからの距離，グラフ下方の棒グラフは当該距離における地形標高の最高値を示す．

(3) 解析データ

本論文では，図-1に示した日本の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．なかでも，3次元的な降雨情報の得られる仰角可変観測が行われた1998年および1999年のデータを解析対象とする．

観測システムとしては，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．図-2に各観測仰角におけるビーム走行線の高度を示す．両観測システムとも，角度方向に256分割，距離方向に1.5 km単位で分割された放射状メッシュデータとして各メッシュ内における降雨強度の平均値が得られる．本論文では，同観測データに対して距離の重みつき線形内挿を上下の観測仰角間において行った後，さらに，水平方向は $1.5 \text{ km} \times 1.5 \text{ km}$ ，高度方向は1 km間隔の3次元格子データに変換した．なお，以後，本論文では3次元格子データの1グリッドを1地点と称することがある．

ただし，本論文では降雨の積分値分布を解析対象としていることを考慮して，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置を行うものとする．その結果，本論文の解析対象領域は，図-1に示すとおりである．

2. 降雨の3次元分布構造と地形依存特性

(1) 月積算降雨分布における3次元分布構造

はじめに，本論文の解析対象期間中において，特に層状性降雨が卓越していると考えられる月と対流性降雨が卓越していると考えられる月について，天気図を用いた調査・判別を行った．本論文では，その中で，層状性降雨が卓越した月として1998年10月，対流性降雨が卓越した月として1999年9月を取り上げる．そして，著者ら^{3),4),5)}の解析と同様に，

- (1) A.R.A. (Accumulated Rainfall Amount) (mm)
- (2) A.R.T. (Accumulated Rainfall Time) (hour)

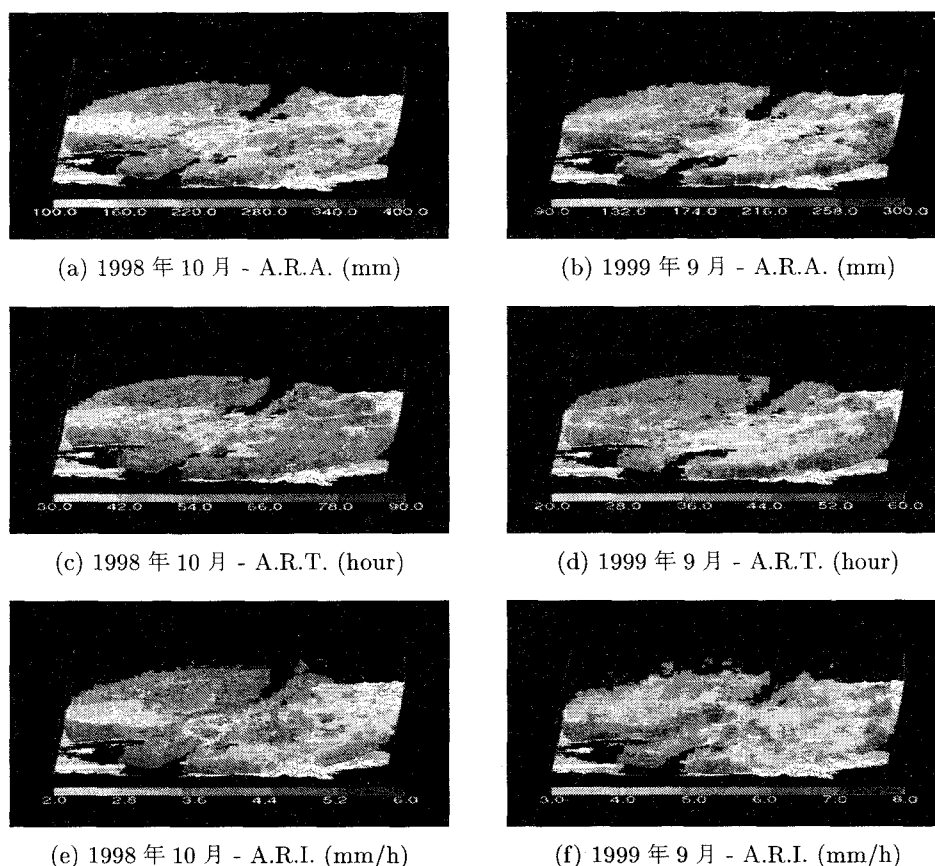


図-3 1998 年 10 月（層状性）および 1999 年 9 月（対流性）の月積算降雨分布における 3 指標（A.R.A., A.R.T., A.R.I.）の 3 次元分布。

(3) A.R.I. (Average Rainfall Intensity) (mm/h)

の 3 つの値を降雨の性質を特徴づける指標と考え、月積算降雨分布における各指標の 3 次元分布を作成した上で、各分布の特徴について比較するとともに、それらの地形依存特性について考察を行う。ここで、A.R.A. は積算降雨量、A.R.T. は、降雨強度が 1 mm/h 以上であった時間を地点ごとに合計した値、A.R.I. は、その A.R.T. における平均の降雨強度 ($=A.R.A./A.R.T.$) とする。このとき「 $A.R.A. = A.R.T. \times A.R.I.$ 」であることから、A.R.A. のもつ地形依存性は A.R.T. および A.R.I. のもつ地形依存性を足し合わせることで成り立っていると解釈することができる。

図-3 に各月、各指標の 3 次元分布を示す。同図 (a), (b) に示した各月の A.R.A. の 3 次元分布を見ると、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、前者（層状性）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おり、雨域の高度が低いことがわかる。それに対して、後者（対流性）の分布では紀伊山地（図右下）の一部や丹波山地周辺部（図左上）において局所的で背の高い強雨域（色の濃い領域）の存在を見て取ることができる。これらの特徴は、比較的大きなスケールで降雨現象を見たときに、一般に言われている層状性・対流性降雨の特徴と一致しており、確かにそれぞれの月が層状性・対流性降雨の卓越した

月であることを確認することができる。

次に、同図 (c), (d) に示した各月の A.R.T. の分布を見ると、前者（層状性）の分布では平野部においても比較的大きな値を示しており、空間的一様性の高い分布を示しているのに対して、後者（対流性）の分布では丹波山地の上空において局所的な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、同図 (e), (f) に示した各月の A.R.I. の分布は、他の 2 つの指標と比べて、紀伊山地上空に強い値を示す領域が少ないことがわかる。

(2) 降雨の 3 次元分布における地形効果

より詳細に分布の特徴を比較するため、各分布をレーダーサイトを含む東西断面で切った鉛直断面図を 図-4 に示す。同図下方には地形標高を 2 倍したものを棒グラフで表示した。なお、他の鉛直断面についても以下と同様の考察が成り立つことを確認している⁵⁾。

層状性降雨が卓越していた 1998 年 10 月の分布について見ると、同図 (c) に示した A.R.T. の分布では、およそ高度 4 km までは空間的に一様な分布をしており、地形標高との対応が明確ではないのに対して、高度 4 km 以上になると、地形標高の高い地域（水平 190~220km 領域又は 40~100km 領域）の上空に比較的大きな値（色の濃い領域）が局所的に分布しており、地形標高への

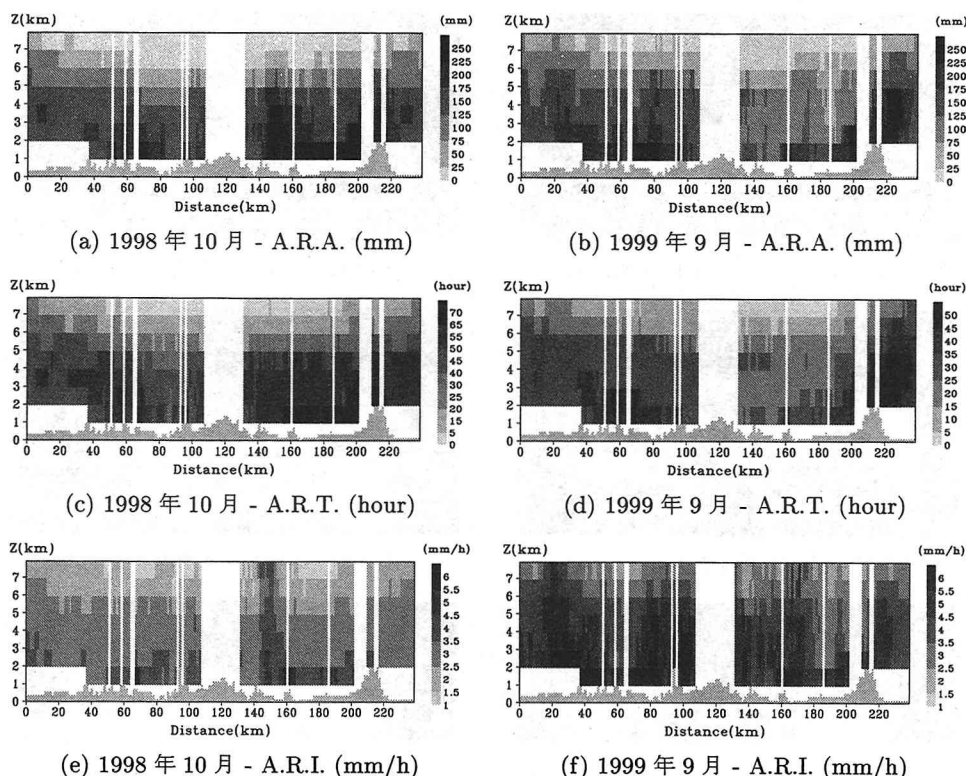


図-4 1998年10月（層状性）および1999年9月（対流性）の月積算降雨分布における3指標（A.R.A., A.R.T., A.R.I.）の鉛直断面分布（レーダーサイトを含む東西断面）。

依存性が現れている。これは、一般に、層状性の降雨においては、空間的一様性の強い広域の層状性降雨域に伴って、地形の影響を強く受けた狭域の対流性降雨域が存在するケースが多いことや、層状性降雨の特徴であるブライトバンドの高度が4 km 前後であることを考えると、妥当な結果と言える。また、同図(e)に示したA.R.I.の分布の場合も同様に、地形標高の低い平野部（水平140～190km 領域）上空の低高度域に大きな値が見られ、地形依存性を見ることはできない。

これらの結果として、同図(a)に示したA.R.A.の分布においても、地形による降雨量の増幅という地形効果を明確には確認することができない。むしろ、地形標高の低い領域にこそ若干大きな値が分布していると見ることもできる。

一方で、対流性降雨が卓越していた1999年9月の分布においては、同図(d)に示したA.R.T.の分布を見ると、非常に大きな値を示す領域が山岳域上空（水平190～220km 領域）に集中し、比較的背の高い直立型の分布を示しており、明らかに地形標高との対応が見て取れる。すなわち、山岳域においては、降雨の発生時間が平野部に対して相対的に長かったことを示している。一般に、山岳域においては、対流セルの発生頻度が相対的に大きく、さらに複数の対流セルが自己組織化されて比較的スケールの大きな対流システムを構成する傾向が強いため、降雨イベントとしての継続時間が長くなり、結果的にこのような強い地形依存性を示したものと

と理解される。これに対して、同図(f)に示したA.R.I.の分布においては、低高度域から高々度域に至るまで一様性の高い分布をしており、明確な地形による影響は見られない。このことは、発生した対流セルの降雨強度は、周囲の大気環境によって決定され、地形の影響によって増強されるという効果が非常に小さいためと理解される。

したがって、同図(b)に示したA.R.A.の分布においても、A.R.T.の分布と同様に、明確な地形依存性を見て取ることができるのは、A.R.T.の分布がこのような強い地形依存性を持つためと考えられる。すなわち、対流性降雨における地形効果発現の主要因は「A.R.T.の分布が持つ強い地形依存性」にあると言える。

著者ら^{3),4)}は2次元の降雨分布を解析することによって、同様な結論を得ているが、3次元降雨情報を用いた以上の解析により、その裏付けを行うとともに、物理的なメカニズムを明らかにすることができた。

3. 降雨の3次元分布構造と標高依存直線

前章と同様に、1998年10月（層状性）および1999年9月（対流性）の月積算降雨分布における3指標（A.R.A., A.R.T., A.R.I.）の3次元分布を対象として、それらの分布に対する地形効果を「標高依存直線」を用いて定量化し、前章の考察結果の比較検証を行う。標高依存直線の詳細は著者ら^{3),4)}に譲るが、著者らの解析

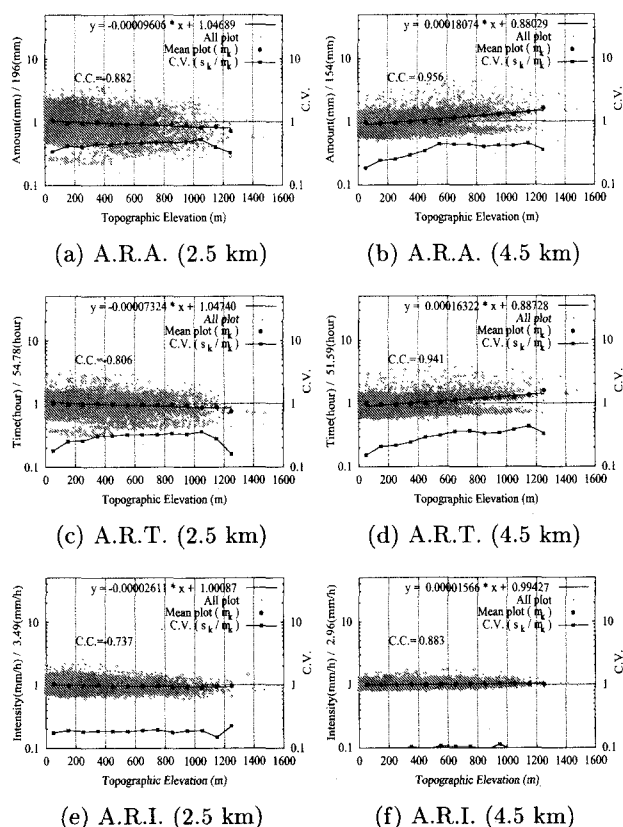


図-5 1998 年 10 月（層状性）の月積算降雨分布における 3 指標（A.R.A., A.R.T., A.R.I.）の水平断面分布と地形標高との関係（断面高度：2.5 km および 4.5 km）.

によれば、標高依存直線は「領域内の降雨分布がもつ地形標高への依存性の平均的傾向」を表すことから、同直線の傾きが大きいほど、降雨分布の地形標高依存性が大きい、すなわち降雨分布に対する地形効果が大きいと判断することができる。以後、同直線（Dependence Line on Topographic Elevations）の傾きを S_{DLTE} と表す。

1998 年 10 月（層状性）および 1999 年 9 月（対流性）における 3 指標の 3 次元分布を、いくつかの高度における水平断面で切り、各指標の水平断面上での分布と地形標高との関係を、標高依存直線とともに表したグラフが 図-5 および 図-6 である。各指標の水平断面高度 2.5 km および 4.5 km における分布を示している。同図からは、どの指標においても、またどの高度においても標高依存直線の直線関係が成立していることを確認することができる。また、地形効果の程度を表す標高依存直線の傾き S_{DLTE} に着目し、その高度変化の特徴を捉えるため、各指標の各水平断面高度における S_{DLTE} の値を、横軸に 1.5 km~6.5 km の断面高度をとって示したものが 図-7 である。

はじめに、図-5 および 図-6 の各月・各指標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ほど S_{DLTE} が大きくなる傾向にある。この傾向は、図-7 においてさらに明確に確認することができるが、

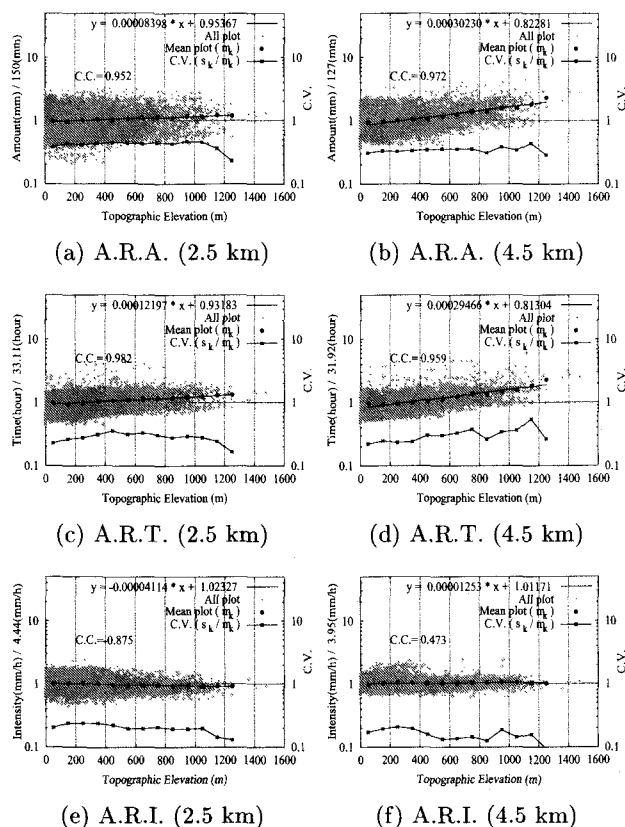


図-6 1999 年 9 月（対流性）の月積算降雨分布における 3 指標（A.R.A., A.R.T., A.R.I.）の水平断面分布と地形標高との関係（断面高度：2.5 km および 4.5 km）.

これは断面高度が高くなるとともに各指標の分布する領域が次第に地形標高の高い地域に集中することを意味している。すなわち、降雨の水平分布としての地形標高への依存性は、断面高度が高くなるとともに大きくなっている。

上記の傾向は、低高度断面では傾きの小さい 1998 年 10 月（層状性）の分布においても見ることができ、図-5 に示すように、特に A.R.A.（同図 (a),(b)）および A.R.T.（同図 (c),(d)）の分布において顕著である。層状性が卓越していた同ケースでこのような結果となるのは、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、層状性の雨域にとまって、背の高い対流性の雨域が地形標高の高い地域において発生する場合があるためと考えられる。したがって、同図の各グラフにおいて低高度断面の S_{DLTE} が非常に小さい値を示していることこそが、層状性降雨の特性をよく表していると言える。すなわち、どの指標の分布も非常に地形標高への依存性が小さく、空間的な一様性が比較的高い分布をしており、その傾向は特に A.R.I.（同図 (e),(f)）の分布において顕著である（図-7 (a),(c),(e) 参照）。これは、前章の 1998 年 10 月（層状性）の分布に関する考察結果と一致している。なお、低高度の水平断面において S_{DLTE} が負の値を示していることは興味深い点であるが、その理由は現在

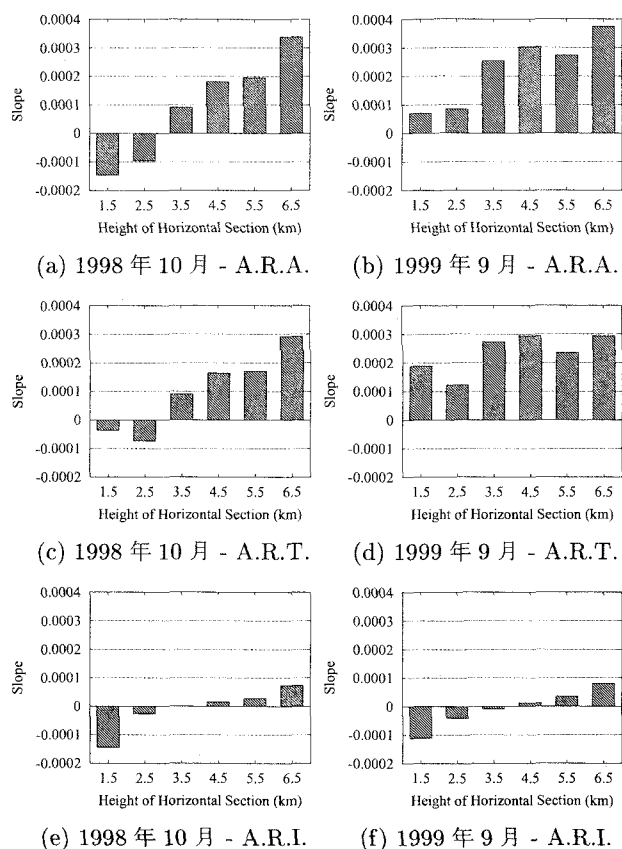


図-7 1998年10月（層状性）および1999年9月（対流性）の月積算降雨分布における3指標（A.R.A., A.R.T., A.R.I.）の水平断面分布に対して求めた標高依存直線の傾き。

明らかでない。

一方、図-6に示した1999年9月（対流性）の分布に見られる特徴として、A.R.A.（同図(a),(b)）およびA.R.T.（同図(c),(d)）の分布における S_{DLTE} が、図-5のそれと比較して、特に低高度断面において相対的に大きな値を示していることがわかる。さらに、これらの値はA.R.I.（同図(e),(f)）の分布との比較でも明らかに大きな値を示している。このような傾向は図-7(b),(d),(f)においてもより顕著に見て取ることができる。すなわち、対流性降雨においては、

- (1) A.R.A. および A.R.T. の分布のもつ地形依存性が層状性降雨のそれと比較して非常に大きい
 - (2) A.R.T. の分布と A.R.I. の分布との比較では、両者のもつの地形依存性に明確な差が見られる
- の2点が非常に特徴的な点である。前章において、「対流性降雨のA.R.A.の分布に明確な地形依存性を見取ることができるのは、A.R.T.の分布が特に強い地形依存性をもっているからである」と述べたが、同図からは、確かにそのような結果となっていることを確認することができる。

また、図-6および図-7(b),(d),(f)からは、対流性降雨のA.R.T.の分布における S_{DLTE} が、断面高度に関わらず比較的大きな値を示しているのに対して、A.R.I.

の分布における S_{DLTE} が、層状性降雨（図-5および図-7(a),(c),(e)）におけるそれと同様に、どの断面高度においても非常に小さな値を示していることを見て取れるが、これらは前章の考察結果とよく対応している。すなわち、対流性降雨におけるA.R.T.の3次元分布では、非常に大きな値を示す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や、これに対してA.R.I.の分布においては、低高度域から高々度域に至るまで一様性の高い分布をしており、明確な地形による影響は見られないことなどをよく反映した結果となっている。

以上より、降雨の3次元分布における地形効果を定量的に評価し、前章での考察および著者ら^{3),4)}の解析結果と一致することを示すことができた。

4. 結論

本論文では、レーダーによって観測された3次元の降雨情報を解析することにより、降雨分布に対する地形効果発現のメカニズムの解明を試みた。さらに、著者ら^{3),4)}の2次元降雨分布を対象にした解析結果との比較検証を行った。本研究で得られた成果を以下に示す。

- (1) 積算降雨量の3次元的な分布構造が、降雨タイプ（層状性降雨および対流性降雨）によってどのように異なるかを示すことができた。
- (2) 降雨タイプによって異なる地形の影響が、どのようなメカニズムにより現れるのかを示すとともに、著者ら^{3),4)}の解析結果の妥当性を示すことができた。
- (3) 標高依存直線の傾きを指標として、3次元的な降雨分布のもつ地形依存性の定量化を行い、高度によって依存性がどの程度異なるかを明らかにした。

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) Daly, C., R. P. Neilson, and D. L. Phillips: A statistical-topographic model for mapping climatological precipitation over mountainous terrain, *Journal of Applied Meteorology*, Vol.33, 140-158, 1994。
- 3) 鈴木善晴・中北英一・池淵周一：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，pp.301-306，2001。
- 4) Suzuki, Y., E. Nakakita, and S. Ikebuchi: Study on the dependence properties of rainfall distributions on topographic elevations, *Journal of Hydroscience and Hydraulic Engineering*. (投稿中)
- 5) 鈴木善晴・中北英一・池淵周一：3次元構造を考慮した降雨場の地形依存特性の解析，京都大学防災研究所年報，第44号/B-2，pp.375-393，2001。

(2001. 10. 1受付)