

山岳域における降雨-地形関係のメカニズム に関する数値実験的研究

NUMERICAL APPROACH ON THE MECHANISM OF RAINFALL- TOPOGRAPHY RELATIONSHIPS IN MOUNTAINOUS REGIONS

鈴木 善晴¹・宮田 昇平²・中北 英一³・池淵 周一⁴

Yoshiharu SUZUKI, Shohei MIYATA, Eiichi NAKAKITA and Shuichi IKEBUCHI

¹正会員 工修 宇都宮大学助手 工学部建設学科建設工学講座 (〒 321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2))

²学生会員 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 工学研究科都市環境工学専攻 (〒 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 research is to analyze rainfall-topography relationships and determine their physical mechanism by running numerical simulations under ideal conditions using mesoscale model MM5. The model was set up including an isolated mountain with a triangular section as the ideal topography. The relation between topographic elevation and simulated rainfall amount was investigated using the stratified sampling method. As a result, it was found that the rainfall-topography relationships on an isolated mountain can be described with a Gaussian-type function, and their mechanism was clarified by investigating the development process of convective cells. It was also determined how the parameters of the function vary with topographic conditions and horizontal speed of the prevailing wind.

Key Words : *rainfall-topography relationships, rainfall distribution, isolated mountain, ideal simulation, mesoscale model, MM5*

1. 序論

降雨と地形との対応関係については、古くから気象学的・水文学的観点で数多くの研究がなされてきた。それらの多くは、山岳域に設置した地上雨量計のデータをもとに、雨量の多寡やその分布を説明付ける要因を明らかにするため、地形標高や他の地形因子と雨量との相関関係について解析している（古くは Lee¹⁾ から近年では Daly *et al.*²⁾ や山田ら³⁾ など）。このように、およそ一世紀近くにわたって観測および解析が行われてきたにもかかわらず、降雨-地形関係について今なお不明な点が数多く残されているのは、山岳域における降雨現象が非線形性の非常に強い複雑な現象であること、また山岳域では空間的に詳細な観測を行うことが非常に困難であることなどが原因である。

近年になると、レーダーにより観測された空間連続的な降雨データを用いた解析^{4),5)} や、詳細な物理モデルを用いた数値シミュレーションによる研究^{6),7)} が行われ、Seeder-Feeder 現象による降雨強度の強化メカニズムなど、山岳性降雨のメカニズムについて多くのことが明らかとなった。しかしながら、それらの多くは、ある特定の物理過程の解析・モデル化やその統合、また、ある特定地域における事例解析やその再現計算などを目的としており、普遍的な降雨-地形関係およびそ

のメカニズムの解明を目的としたものは非常に少なく、十分な研究がなされていないのが現状である。そのような中で、日比野⁸⁾ は、2次元の仮想的なシミュレーションを行い、降雨強度のピーク位置は一般風の強度によって大きく変化すること、山岳標高が高くなるにつれて降雨域がより風上側にシフトすることなどを明らかにしている。また、大石⁹⁾ は、2次元の雲物理モデルを用いて、一般風の強度や鉛直シアおよび山岳の水平スケールが積雲の発達過程に及ぼす影響について解析を行い、その影響は雲底高度が山岳標高よりも低くなるケースでより甚大なものとなることなどを示している。ただし、これらの研究においても、降雨-地形関係を定量的に評価するまでには至っておらず、その普遍性についても十分な議論は行われていない。

一方、著者ら^{10),11)} は、レーダーにより観測された降雨データの解析や物理モデルを用いた数値シミュレーションによって、メソβスケール以上の時空間スケールを持つ降雨分布を対象とした場合には、「降雨分布の標高依存直線」と呼ばれる明確な降雨-地形関係が成立することを明らかにした。これは、地形標高と積算降雨量の層別平均値の間に片対数グラフ上で明確な直線関係が成立するというもので、対象地域の降雨-地形関係を定量化するための重要な指標となっている。さらに著者ら¹¹⁾ は、日本の山岳域を対象とした再現シミュ

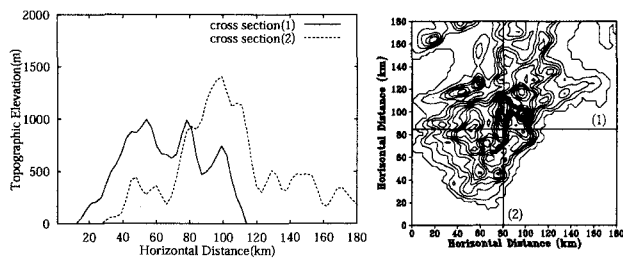


図-1 近畿南部における山岳形状の一例。山岳の鉛直断面（左図）および断面位置を示す地形図（右図）。

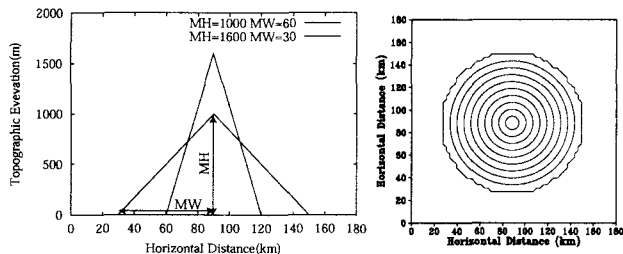


図-2 シミュレーションに用いた三角形山岳の鉛直断面（左図）および平面図（右図，MH: 1000m, MW: 60km）。

レーションを行い，同直線に基づいた解析を行った結果，山岳スケールや水平風速が降雨-地形関係に及ぼす影響を明らかにしている．しかしながら，現在のところ同直線の詳細なメカニズムは明らかでなく，また，地形特性や気象条件から降雨分布を推定することができるような降雨-地形関係の定式化には至っていない．

以上の背景のもと，本論文では，山岳域における降雨-地形関係およびそのメカニズムの解明を目的として，メソ気象モデル MM5 を用いた実験的な 3 次元数値シミュレーションを行う．すなわち，仮想的な単峰性の山岳を用いたシミュレーションを行うことにより，雨量と地形標高が定量的にどのような関係にあるのかを明らかにするとともに，降雨-地形関係の定式化を行うための第一段階として，山岳の山頂標高や水平スケールおよび一般風の強度の違いが，降雨-地形関係にどのような影響を及ぼすのかについて考察を行う．

2. メソ気象モデル MM5 とその計算条件

(1) モデルの特徴とオプションの設定

本論文では，NCAR（National Center for Atmospheric Research）と The Pennsylvania State University により共同開発されたメソ気象モデル The Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model（通称 MM5）を用いてシミュレーションを行う．MM5 は完全圧縮，非膨張系の 3 次元非静力学モデルであり，積雲パラメータや大気境界層スキーム等，様々な物理過程の設定オプションを有している．本論文では，仮想的な条件下におけるメソ β スケール程度の降雨-地形関係の解析を目的とするため，雲物理過程として，過冷却水などを考慮した Mixed-Phase¹²⁾ を選択した以外は他の物理過程オプション（大気放射および地表面過程を含む）を使用しないこととした．また，マップファクターおよびコリオリ力についても除外するよう設定した．

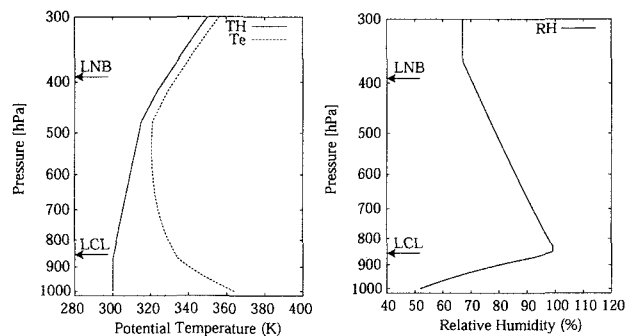


図-3 初期条件に用いた大気鉛直プロファイル．温位（左図，実線），相当温位（左図，点線），相対湿度（右図）。

(2) 計算領域および初期・境界条件の設定

計算領域は 120×120 グリッド（グリッド間隔 $3\text{km} \times 3\text{km}$ ）とし，境界条件は初期値のまま一定として各ケース 6 時間（計算時間ステップ 9 秒）のシミュレーションを行い，主に「6 時間積算の降雨分布」に対して解析を行うものとした．ただし，境界固定の影響を極力回避するため，計算領域中央の 60×60 グリッド（ $180\text{km} \times 180\text{km}$ ）を解析対象領域とした．

ここで，シミュレーションで用いる仮想山岳の形状およびスケールを決めるため，現実の山岳について簡単な調査を行った．本論文では，著者ら^{10),11)}と同様に，まずは日本の山岳と同程度の山岳スケールを想定した降雨-地形関係の解析を行うため，国内複数地域の山岳について調査を行った．近畿南部の山岳形状（鉛直断面）の一例を図-1 に示す（解像度 3km で図示）．同図からは，山岳地形が，三角形の山岳の重ね合わせによっておよそモデル化可能であることが確認される．そこで，本論文では，地形条件として，大石⁹⁾などが用いているようなベル型の山岳ではなく，図-2 に示した円錐状の三角形山岳を用いるものとする．山岳の山頂標高を表す MH および水平スケールを表す MW の 2 つのパラメータによって山岳形状が決定される．

大気の初期条件については，山岳をトリガーとした対流生降雨が発生しやすい状況を想定し，雲底高度（LCL）が 1400m （約 850hPa ），雲頂高度（LNB）が 7400m （約 390hPa ）となるような条件付き不安定の大気場を水平一様として与えた．大気鉛直プロファイルを図-3 に示す．ここでは実際の雲が生成する状況に即して，水蒸気混合比が高度 1.4km まで一定値でその後高度とともに減少するように設定した⁹⁾．また，一般風の風向・風速に関しても，初めに全領域一様として与え，その後も境界条件の値は固定したままで計算を行った．

3. 単峰性山岳における降雨-地形関係

著者ら¹¹⁾の解析によれば，降雨分布の標高依存直線は，MM5 を用いた日本の山岳域における再現シミュレーションによっても成立することが示されている．ここで，近畿南部におけるシミュレーション結果の一例を図-4 に示す．このように，同直線が物理モデルによって再現されうるということは，同直線が単なる統計的

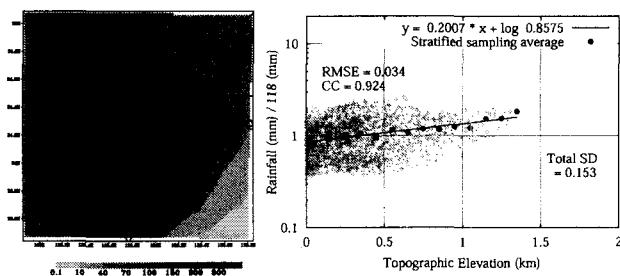


図-4 MM5を用いた再現シミュレーションによる地形標高と2日間積算降雨量の関係（近畿南部の180km×180km領域，98年10月16日～17日）。

な特性ではなく，何らかの物理的メカニズムに基づいた特性であることを意味している．本論文では，同直線のメカニズム解明を目指して，最も単純化された単峰性の山岳を用いた仮想シミュレーションを行った．

(1) 単峰性山岳における降雨分布の標高依存直線

はじめに，山岳の山頂標高（1600m）および水平スケール（60km）は同一条件で，一般風の水平風速が8m/s（Case1），10m/s（Case2）と異なる2ケースについて，6時間積算降雨量の分布，および地形標高と積算降雨量の関係を図-5に示す．同図より，Case1では標高依存直線が成立せず，層別平均値が放物線を描くように湾曲していることが分かる．また，Case2では層別平均値の直線関係は成立しているものの，標高依存直線まわりのばらつきが大きく，降雨-地形関係の空間変動が大きい．これらのことから，単峰性山岳を用いた仮想シミュレーションでは，必ずしも降雨分布の標高依存直線は成立しないことが分かる．

次に，Case2において，山頂を境として風上斜面と風下斜面を区別した上で，それぞれの地形標高と積算降雨量の関係を表したものが図-6である．同図中に示した曲線は，積算降雨量の層別平均値を地形標高の二次式で近似したものである．ただし，層別平均値が領域平均降雨量の10分の1以下の層は無降雨とみなした．同図からは，風上斜面において，層別平均値が二次関数でよく近似できていることが分かる．また，風下斜面においては，層別平均値がいくらか波状をなしているものの，およそ二次の回帰曲線に沿ったカーブを描いていることが分かる．図には示していないが，Case1や他のケースについても同様の関係が見られたことから，同関係は単峰性山岳において成立する特徴的な降雨-地形関係であると考えられる．特に，風上斜面においては，層別平均値と地形標高の関係が非常に明確となることが分かった．

(2) 風向・風速の変動が降雨-地形関係に及ぼす影響

このように，風上側と風下側で斜面を区分することで，降雨-地形関係がより明確になることが示されたが，図-6を見ると，依然，回帰曲線周りの降雨分布のばらつき，すなわち降雨-地形関係の空間変動の大きさを表す標準偏差SDの値（ここでは各標高区分ごとに求めた値を平均した）が比較的大きいことが分かる．単純

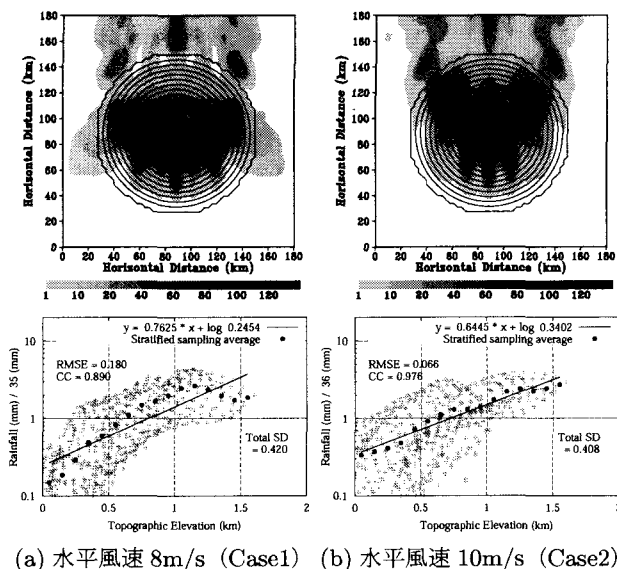


図-5 各水平風速における計算結果（MH: 1600m, MW: 60km）．6時間積算降雨量の分布（上図，単位はmm）および地形標高と積算降雨量の関係（下図）。

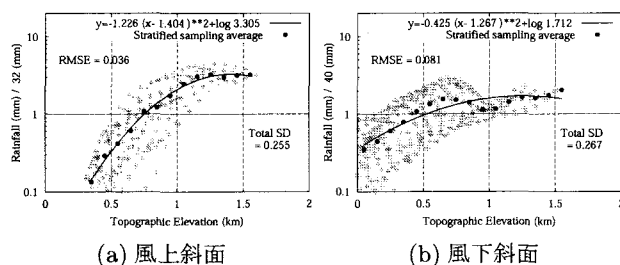


図-6 Case2の風上斜面および風下斜面における地形標高と6時間積算降雨量の関係（山頂を境とする）。

に比較はできないが，図-4の再現計算における値よりも，風上・風下斜面とも大きな値を示している．このように，より単純な地形条件を用いた仮想シミュレーションにおいて空間変動が比較的大きくなった原因として，境界条件における一般風の風向や風速の値を常に固定して計算している点が考えられる．図-4に示した事例は2日間の再現計算を行ったものであるが，全領域平均の風向・風速（800hPa面上）について解析したところ，降雨期間中に風向はおよそ45°前後の変動幅，水平風速はおよそ5～6m/s程度の変動を示していた．

そこで，仮想シミュレーションにおいても一般風の風向・風速の変動による影響を考慮するため，異なる風向・風速に対するシミュレーション結果を平均するという操作を行う．ここでは，風向が22.5°ずつ異なる3ケースとそれぞれ風速が基準風速±2m/sの3ケースで，計9ケースの計算結果を平均することとし，Case2（基準風速10m/s）に対して適用した結果を図-7に示す．それぞれ，平均操作後の6時間積算降雨量の分布，風上および風下斜面における地形標高と積算降雨量の関係を示している．同図からは，図-5(b)や図-6と比較して，降雨の分布がより地形標高と対応した分布になると同時に，回帰曲線周りのばらつき（すなわちSDの値）が非常に小さくなっていることが分かる．特に，

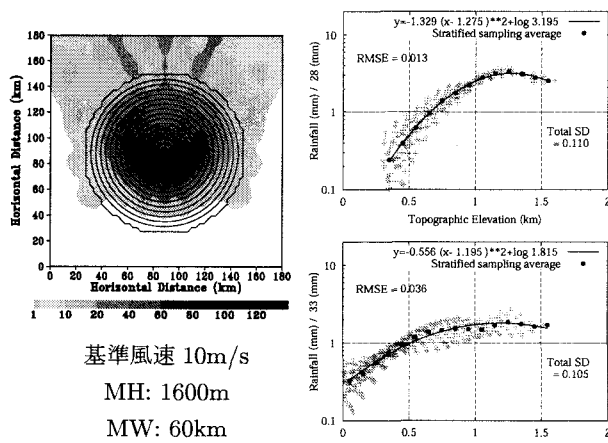


図-7 風向・風速の変動を考慮した6時間積算降雨量の分布 (左図, 単位は mm) および地形標高と積算降雨量の関係 (右上図: 風上斜面, 右下図: 風下斜面)。

平均操作前は降雨分布と地形標高との対応が明確でなかった風下斜面においても, 平均操作を行うことで二次曲線の成立度合いが大きく改善されている。これらのことは, 風向・風速の変動を考慮することによって, 風上斜面・風下斜面にかかわらず, 降雨-地形関係の空間変動が大幅に減少することを意味している。

著者ら^{10),11)}は, 降雨の積分時間スケールによって降雨-地形関係がどのように変化するかという「降雨分布の時間積分過程」について解析を行い, 積分時間スケールが大きくなるに従って, 降雨-地形関係の空間変動は次第に小さくなることを明らかにしている。このとき, 現実の降雨現象においては, 積分時間スケールが大きくなれば, 期間中の風向・風速の変動もある程度比例して大きくなると考えられることから, 風向・風速の変動が降雨-地形関係の空間変動を減少させるという上記の作用が, 現実の降雨-地形関係においても働いているために, 降雨分布の時間積分過程がそのような変化を示すのではないかと考えられる。

以上のことから, 仮想的な数値シミュレーションによる降雨-地形関係について解析するためには, 一般風の風向・風速の変動を考慮すべきであると考え, 以下では断りのない限り, 上記と同様な平均操作を行った結果に対して解析を行うものとする。

4. 降雨-地形関係のメカニズム

前節において, 単峰性の山岳を用いた仮想シミュレーションでは, 積算降雨量の層別平均値の対数値は地形標高の二次関数で表現され得ることが明らかとなった。特に, 風上斜面において, 降雨-地形関係が非常に明確となることが分かった。そこで, 以下では, 解析の第一段階として主に風上斜面に着目して考察を行う。

(1) 単峰性山岳における降雨-地形関係の定式化

前節の解析結果から, 単峰性山岳における積算降雨量の層別平均値 r (mm) と地形標高 z (km) の間には,

次式で表される関数関係が成り立つと考えられる。

$$\log r = -a(z - b)^2 + c. \quad (1)$$

ここで, a , b , c は定数とし, $\log$ は常用対数を表す。変形すると次式が得られる。

$$r = \exp[-a'(z - b)^2 + c'] \\ = C \exp[-a'(z - b)^2]. \quad (2)$$

ここで, $a' = \ln 10 \times a$, $c' = \ln 10 \times c$, $C = \exp[c']$ である ($\ln 10 \approx 2.303$)。このとき, 式 2 はガウス関数型の式形となっていることが分かる。すなわち, 式 2 は, 単峰性山岳における降雨-地形関係が「ガウス関数型の関数関係」にあることを意味している。

ここで, 降雨-地形関係の回帰曲線である式 1 は, 3 つのパラメータ (a , b , c) によって決定されるが, それぞれのパラメータの持つ意味は次のように理解することができる。パラメータ a は地形標高の増加に伴う降雨量の増加率を表しており, 基本的には a の値が大きいほど降雨分布に対する地形効果が大きいと解釈される。また, パラメータ b は降雨量のピーク位置を表し, パラメータ c は領域平均降雨量に対するピーク雨量の相対的な大きさ (ピーク雨量の大小) を表している。降雨-地形関係は主にパラメータ a , b によって決まり, パラメータ c は領域全体の雨量を決定する。

(2) ガウス関数型の降雨-地形関係とメカニズム

次に, 単峰性山岳における降雨-地形関係がなぜガウス関数で表されるのか, そのメカニズムについて考察を行う。ここでは, 図-5 に示した Case2 の事例 (平均操作は無し) を対象として, 積雲がどのように発生・発達していくのかについて解析を行った。

はじめに, 山頂を通る主流方向の中心線上において, 降雨強度 (1 分間平均) の時間変化の様子を図-8 に示す。同図からは, 次々に積雲が発生・発達する様子が見て取れる。また, 積雲により発生位置やピーク雨量に若干差はあるものの, 積雲の移流や雨量の変化の様子はほぼ同様であることが分かる。ここで, 降雨-地形関係を決定づけていると考えられる主要要素としては, (a) 積雲の移流速度, (b) 積雲の発達速度, (c) (積雲の移流に伴う, 積雲直下の) 地形標高の増加率, の3要素が挙げられる。そこで, 同図の黒丸で囲んだ積雲に着目してこれら3要素の解析を行う。ただし, 積雲の位置は雨量のピーク位置によって, また積雲の発達の程度はピーク雨量の大きさによって表されると仮定した。

まず, (a) 積雲の移流速度の変化を明らかにするため, 上記の積雲について, 雨量のピーク位置が1グリッド (3km) を移動する際に要する時間について調査した。結果を図-9 に示す。同図から, 積雲の移流速度は, 積雲発生後ほぼ一定値をとることが分かる。すなわち, 地形をトリガーとして発生した積雲は, その後, 地形の影響等で変化することなくほぼ一定の速度で移流することが示された。ただし, 移流速度そのものは山岳形状等によって異なった値をとると考えられる。

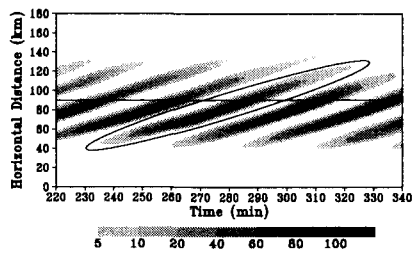


図-8 山頂を通る主流方向の中心線上における降雨強度（1分間平均）の時間変化（単位は mm/h，計算開始後 220 分～340 分）。図中央の線が山頂で，線より下側が風上。

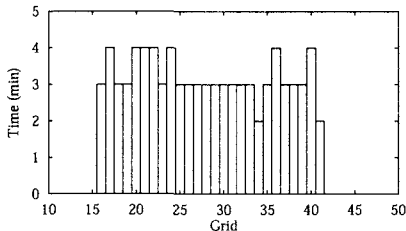


図-9 積雲内の雨量のピーク位置が 1 グリッド（3km）を移動する際に要する時間（グリッド番号 30 が山頂）。

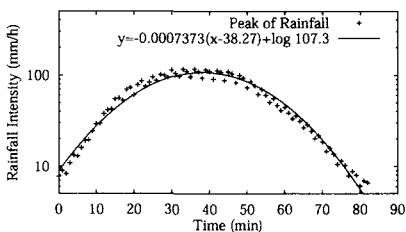
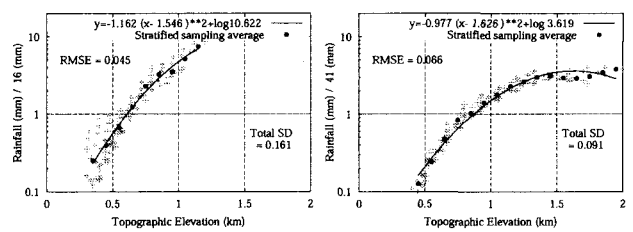


図-10 積雲内のピーク雨量の時間変化（縦軸は対数軸）。

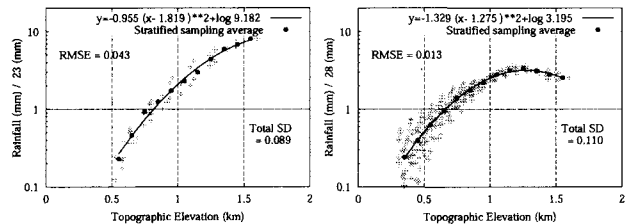
次に，(b) 積雲の発達速度の変化を明らかにするため，ピーク雨量の値の変化について調査を行った。結果を図-10 に示す。同図からは，ピーク雨量の値が，時間と共に二次関数的に変化していることが分かる。対象とする積雲によっては，成長期と減衰期で発達速度が異なるケースも見られたが，特に成長期の変化については二次関数的であった。すなわち，同図が片対数グラフであることを考慮すれば，積雲の発達度合いはおおよそガウス関数的に変化することが示された。ここで，近畿地方に位置する降雨レーダーによる観測値を用いて，同様な調査を行ったところ，図には示していないが，成長期に関してはほぼ同様な結果が得られた。最後に，(c)（積雲直下の）地形標高の増加率に関しては，三角形型の山岳を用いているため常に一定である。他の山岳形状についても解析を行ったが，山岳形状が降雨-地形関係の関数形に及ぼす影響は十分小さいことを確認した。

以上から，(a) 積雲の移流速度は一定で，かつ (b) 積雲の発達過程はガウス関数的な変化を示すこと，また (c) 地形標高の増加率は基本的に一定と考えてよいことが示された。これらのことを総合すると，「単峰性山岳における降雨-地形関係がガウス関数型の関数関係にあるのは，積雲の発達過程がガウス関数的な変化を示すことに起因している」と考えることができる。

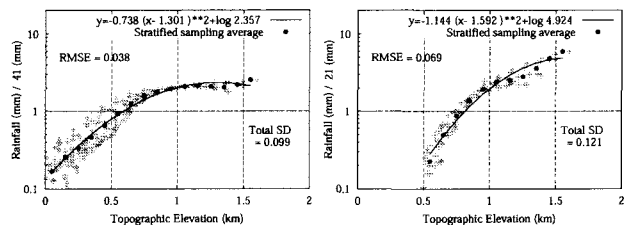
ところで，実地形における降雨分布の標高依存直線と，本論文で明らかとなった単峰性山岳の降雨-地形関係がどのように結びつくのかについては，現在解析中



(a) MH: 1200m (左図) および MH: 2000m (右図)



(b) MW: 30km (左図) および MW: 60km (右図)



(c) 水平風速 6m/s (左図) および水平風速 14m/s (右図)

図-11 風上斜面における地形標高と 6 時間積算降雨量の関係。

(a) MW: 45km，水平風速 10m/s，(b) MH: 1600m，水平風速 10m/s，(c) MH: 1600m，MW: 45km。

であり明らかとなっていない。しかしながら，降雨レーダーによる観測データを解析したところ（詳細は割愛），本論文と同様なガウス関数型の降雨-地形関係の成立がいくつかのケースにおいて確認されたことから，実地形において標高依存直線が成立するのは，連峰性山岳における山岳間の相互作用や，複数の降雨-地形関係の重ね合わせ等が影響しているものと考えられる。

(3) 地形条件や風速に対するパラメータの変動特性

上記の解析によって，単峰性山岳における降雨-地形関係がおおよそ明らかとなったが，回帰曲線（式 1）のパラメータは，地形条件や一般風の風速等によって変化すると考えられる。そこで，以下では，同パラメータに着目した解析を行う。

はじめに，計算条件の違いによって降雨-地形関係がどのように変化するか，その一例を図-11 に示す。それぞれ風上斜面における地形標高と 6 時間積算降雨量の関係を示している。同図からは，地形や風速の違いによって，回帰曲線の頂点や曲率が異なることがわかる。ここで，地形や風速による変化が比較的明確なパラメータ b について，その変化の様子を図-12 に示す。ただし，山岳全体に対する相対的なピーク位置を議論するため，地形標高を山頂標高で正規化した。このとき，正規化された b を b' とする。同図からは，山岳の山頂標高および水平スケールが大きくなると共に， b' の値が小さくなっている（ピーク位置がより風上側に位置すること，また，水平風速が大きくなるとともに，

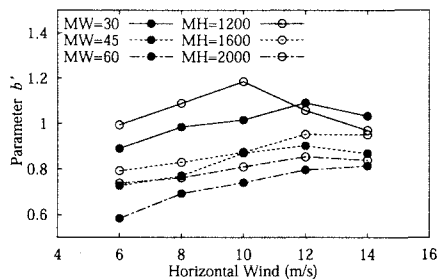


図-12 地形条件や水平風速の違いによるパラメータ b' の変化。黒丸が MW の違い (MH は 1800m で一定), 白丸が MH の違い (MW は 45km で一定) を表す。

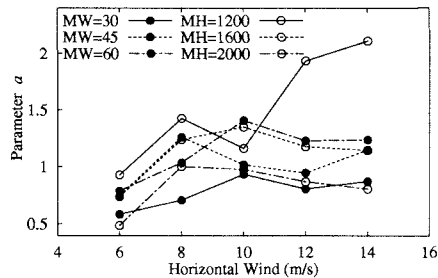


図-13 地形条件や水平風速の違いによるパラメータ a の変化 (凡例については図-12 と同様)。

b' が大きくなっていることが見て取れる。

これらの原因は次のように考えることができる。山頂標高が大きいほど、同じ水平スケールの山岳であれば、斜面勾配は大きくなる。その結果、より強い鉛直上昇流が発生し、積雲が急速に成長することで、ピーク位置はより風上側にシフトすると考えられる。一方、水平スケールが大きいほど、斜面勾配が小さく、積雲の成長は緩やかなものとなるが、積雲が発生してから山頂到達までの距離が長いために、ピーク位置はより風上側となる。また、積雲の移流速度は水平風速に依存するため、水平風速が大きいほど、降雨のピーク位置はより風下側にシフトすると考えられる。

次に、パラメータ a の変化の様子を図-13 に示す。同図を見ると、山頂標高が大きくなると共に、また水平スケールが小さくなると共に、 a の値 (すなわち地形標高の増加に伴う降雨量の増加率) が小さくなっている。山頂標高が大きいほど、斜面勾配が大きいために積雲が急速に発達し、積雲の移流に伴う降雨量の増加率も大きなものとなるが、その増加率は、地形標高の増加率 (斜面勾配に比例) ほどは大きく変化しないため、両増加率の比 (すなわち a) が斜面勾配の増加と共に小さくなったと考えられる。このことは、水平スケールによる a の値の変化に関しても同様である。

一方、同図を見ると、 a の値は、水平風速に比例して風速 8~10m/s 程度までは増加傾向にあるが、その後の変化はケースごとに異なっている。パラメータ a は、降雨の発現位置とピーク位置との距離、およびピーク雨量の大小の影響を受けるパラメータであるが、水平風速によってそれら全てが変化するため、 a の変化は複雑なものとなっている。今後、パラメータ a に影響を及ぼす因子についてさらに解析を行い、その変動特性を解明することが必要である。

5. 結論

以上、本論文では、単峰性山岳を用いた仮想的な数値シミュレーションに基づいて降雨-地形関係の解析を行った。得られた成果は以下の通りである。

- (1) 単峰性山岳においては降雨分布の標高依存直線は必ずしも成立しないものの、一般風の風向・風速を考慮することによって、降雨-地形関係が非常に明確な関係となることを示した。
- (2) 単峰性山岳における降雨-地形関係が、ガウス関数型の関数関係にあることを示すとともに、地形条件や一般風の風速によって、回帰曲線のパラメータがどのように変化するかを明らかにした。

今後は、さらに詳細な解析を行うことによって降雨-地形関係の定式化を目指すとともに、風下斜面の降雨分布や山岳の連峰性などを考慮した現実の降雨-地形関係に関する包括的な議論を行っていきたい。

参考文献

- 1) Lee, C. H.: Precipitation and altitude in the Sierra, *Mon. Wea. Rev.*, Vol.39, pp.1092-1099, 1911.
- 2) Daly, C., Neilson, R. P. and Phillips, D. L.: A statistical-topographic model for mapping climatological precipitation over mountainous terrain, *J. Appl. Meteor.*, Vol.33, pp.140-158, 1994.
- 3) 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.
- 4) Hill, F. F., Browning, K. A. and Bader, M. J.: Radar and raingauge observations of orographic rain over south Wales, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, Vol.107, pp.643-670, 1981.
- 5) Alpert, P. and Shafir, H.: Mesoscale distribution of orographic precipitation: Numerical study and comparison with precipitation derived from radar measurements, *J. Appl. Meteor.*, Vol.28 (10), pp.1105-1117, 1989.
- 6) Oki, T., Mushiake, K. and Koike, T.: Spatial rainfall distribution at a storm event in mountainous regions, estimated by orography and wind direction, *Water Resour. Res.*, Vol.27 (3), pp.359-369, 1991.
- 7) Barros, A. P. and Lettenmaier, D. P.: Dynamic modeling of orographically induced precipitation, *Rev. Geophys.*, Vol.32, pp.265-284, 1994.
- 8) 日比野忠史: 山地流域における降雨の特性に関する研究, 広島大学学位論文, 1995.
- 9) 大石哲: 積雲の物理的構造解析を基礎にした洪水制御支援環境の開発に関する研究, 京都大学学位論文, 1997.
- 10) 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.
- 11) 鈴木善晴・宮田昇平・中北英一・池淵周一: メソ気象モデルによる数値シミュレーションに基づいた降雨-地形関係の解析, 水工学論文集, 第 47 巻, pp.73-78, 2003.
- 12) Grell, G. A., Dudhia, J. and Stauffer, D. R.: A Description of the Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5), *NCAR Technical Note*, No.398, 1995.

(2003. 9. 30 受付)