

# 降雨-地形関係の時間・空間変動特性を考慮した 山岳域における降雨分布特性の解析

## FLUCTUATION PROPERTIES OF PRECIPITATION-TOPOGRAPHY RELATIONSHIPS IN MOUNTAINOUS REGIONS

鈴木 善晴<sup>1</sup>・鎌田 雅憲<sup>2</sup>・宮田 昇平<sup>3</sup>・中北 英一<sup>4</sup>・長谷部 正彦<sup>5</sup>・池淵 周一<sup>6</sup>

Yoshiharu SUZUKI, Masanori KAMATA, Shohei MIYATA, Eiichi NAKAKITA,  
Masahiko HASEBE and Shuichi IKEBUCHI

<sup>1</sup>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)

<sup>2</sup>学生会員 宇都宮大学大学院 工学研究科エネルギー環境科学専攻 (〒 321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2)

<sup>3</sup>正会員 工修 建設技術研究所 九州支社河川部 (〒 810-0041 福岡市中央区大名 2-4-12)

<sup>4</sup>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)

<sup>5</sup>正会員 工博 宇都宮大学教授 工学部建設学科建設工学講座 (〒 321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2)

<sup>6</sup>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 clarify precipitation-topography relationships (PTRs) in mountainous regions on various spatiotemporal scales and to determine the physical mechanism of them. By running numerical simulations under realistic conditions using mesoscale model MM5, the PTRs in the Kinki region of Japan were investigated. PTRs on a spatial scale of a mountain slope were found to be described with a Gaussian-type function, which is referred to as GRIM (Gaussian-functional Relationship on an Isolated Mountain). And one of the conditions required for the formation of GRIM was determined: GRIM can be formed when regional average rainfall is more than 10 to 20 mm on a mountain slope. The spatiotemporal fluctuations of GRIM were, then, investigated to clarify how GRIM is connected with large-scale PTRs. As a result, large-scale PTRs were found to be formed by the summation of GRIM's. And it was clarified how large-scale PTRs vary according to the fluctuation properties of GRIM.

**Key Words :** *precipitation-topography relationships, orographic precipitation, topographic elevation, mesoscale model, MM5*

### 1. はじめに

近年, 数値計算の技術的進歩等により, メソスケールの降水現象に関する予測計算あるいは再現計算の精度が飛躍的に高まっている. しかしながら, これらを高精度で実行するためには, 時空間的に密な気象観測を行い, 詳細な初期・境界条件を得ることが不可欠であるため, 今なおその適用可能地域はごく限られたものとなっている. このような状況下においては, 例えば山岳域における降雨-地形関係を明らかにすることで普遍性の高い降雨分布特性を明らかにすることができれば, それらの特性に基づいて様々な地域における降雨分布推定が可能になるなど, 水文学的・工学的にその利用価値は非常に高いものになると考えられる.

本研究の対象である山岳域における降雨-地形関係, すなわち地形と積算雨量の空間分布が物理的・統計的にどのような関係にあるのかについては, 世界各地においておよそ一世紀近くにわたって観測・解析が行われてきた (Lee<sup>1</sup>), Burns<sup>2</sup>), Daly *et al.*<sup>3</sup>), Marquinez *et al.*<sup>4</sup>) など多数). それら多くの研究では, 地上雨量計による観測に基づいて, 山岳域における地形標高と積算雨量

の関係がほぼ線形関係にあることや, 様々な地形因子が降雨の分布形状に影響を及ぼすことなどが報告されている. しかしながら, Mink<sup>5</sup>) や Hevesi *et al.*<sup>6</sup>) など一部の研究では, 地形標高と積算雨量の関係は指数関数等で表現され得る非線形的な関係にあるとの報告もあり, 果たして地形標高と積算雨量の関係は真に線形関係と言えるのか, また物理的にどのようなメカニズムでそのような関係が成立するのか, などについてはこれまで十分な議論がなされておらず, 降雨-地形関係に関する研究には今なお重要な課題が残されている.

一方, 著者ら<sup>7),8)</sup> はこれまで, 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, 領域平均的に見た場合には, 地形標高と積算雨量の関係が指数関数的な関係にあることを意味している.

さらに著者ら<sup>9)</sup> は, 標高依存直線成立のメカニズム

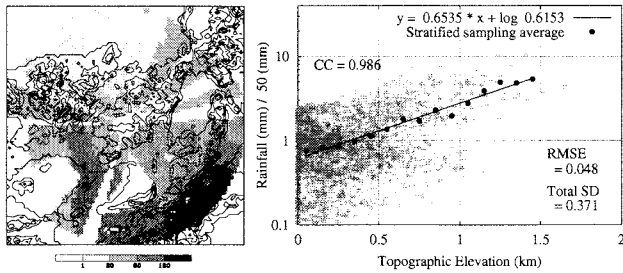


図-1 深山レーダ雨量計による観測値に基づいた地形標高と積算降雨量の関係（積算期間：88年8月10日0:00-23:40，領域平均降雨量：50 mm）

解明を目指して，単峰性の山岳を地形条件として用いた実験的な数値シミュレーションを行ったところ，単峰性山岳では降雨分布の標高依存直線が必ずしも成立せず，その降雨-地形関係は「ガウス関数型の関数関係」にあることが明らかとなった．また，その物理的なメカニズムについて解析を行った結果，それは「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結論づけられた．しかしながら，実地形における降雨分布の標高依存直線と，単峰性山岳におけるガウス関数型の降雨-地形関係がどのように結びつくのかについては十分な検討がなされておらず，現在のところ，その詳細なメカニズムは明らかでない．

そこで，本論文では，メソ気象モデルMM5を用いた降雨の再現シミュレーションを行い，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，様々な時間スケールおよび空間スケールを対象とした降雨分布特性の解析を行う．

## 2. 山岳域における降雨-地形関係

### (1) 降雨分布の標高依存直線

近畿地方を観測対象とする深山レーダ雨量計による観測値をもとに，観測領域内（半径120km円内）の各地点（3kmグリッド）における地形標高と積算降雨量との関係の一例を図-1に示す．縦軸は，領域平均降雨量で正規化した積算降雨量を表す対数軸である．地点雨量のばらつきは非常に大きい，黒丸で示した積算降雨量の層別平均値に着目すると，相関係数0.9以上の明確な直線関係が成立していることが分かる．この直線関係を，著者らは「降雨分布の標高依存直線」または「降雨-地形関係の対数則」と呼んでいる．同直線の傾きの大きさや同直線周りの分散構造には，対象地域の地形特性や対象とする降雨イベントの性質がよく反映されており，同直線はある領域内の平均的な降雨-地形関係を表す普遍性の高い降雨分布特性である．

これまで，複数の地上降雨レーダーおよび人工衛星搭載レーダーTRMM/PRによる観測や，物理モデルを用いた降雨の再現シミュレーションにおいてその成立が確認されている．また，その成立条件の一つとして，数100 km四方程度の領域を対象とした場合に，領域平均の降雨量が50～100 mm程度以上であることが必要とされている<sup>7),8)</sup>．

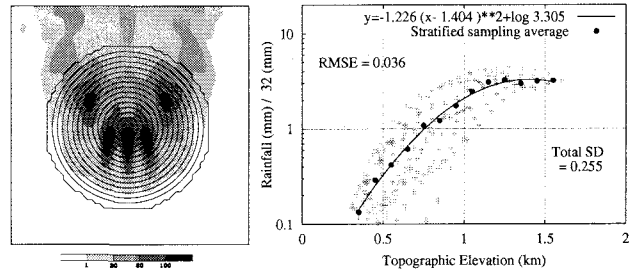


図-2 MM5を用いた実験的シミュレーションによる6時間積算降雨の分布（左図）と風上斜面における地形標高と積算降雨量の関係（右図）（左図の下側が風上）<sup>9)</sup>

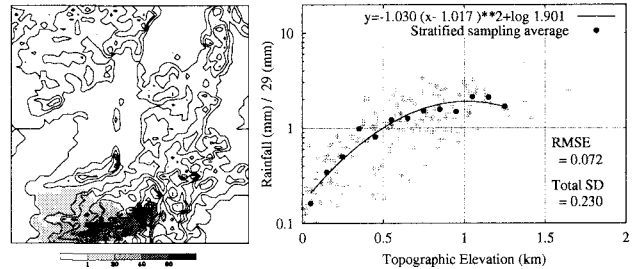


図-3 深山レーダ雨量計による観測値に基づいた一山岳斜面における地形標高と積算降雨量の関係（紀伊山地西側斜面，積算期間：89年6月24日4:00-18:00）

### (2) ガウス関数型の降雨-地形関係

鈴木ら<sup>9)</sup>の行ったMM5を用いた実験的な数値シミュレーションの結果より，単峰性山岳における「ガウス関数型の降雨-地形関係」を表したグラフの一例を図-2に示す．円錐型山岳の山頂を境として風上斜面と風下斜面を区別した上で，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表したものである．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回帰したもので，層別平均値が二次関数でよく近似される様子が見て取れる．風下斜面（図は割愛）においては，層別平均値がいくらか波状に変動するものの，およそ二次の回帰曲線に沿ったカーブを描く結果となった．すなわち，単峰性山岳においては，積算降雨量の層別平均値 $r$ の対数値と，地形標高 $z$ の関係は次式のような二次関数で表すことができる．

$$\log \frac{r_k}{R} = -a(z_k - b)^2 + c \quad (1)$$

$$\Leftrightarrow \frac{r_k}{R} = C \exp[-a'(z_k - b)^2]. \quad (2)$$

ここで， $a$ ， $b$ ， $c$ は定数とし， $R$ は領域平均降雨量，添え字の $k$ は各標高区分を表す．また， $a' = \ln 10 \times a$ ， $c' = \ln 10 \times c$ ， $C = \exp[c']$ である．このとき，二次関数を簡単に变形して得られる式(2)は，ガウス関数型の式形となっており，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」にあることを示している．本論文では，式(1)または式(2)で表される曲線関係を，便宜的に『降雨-地形関係のGRIM曲線（Gaussian-functional Relationship on an Isolated Mountain）』と呼ぶこととする．

ここで，GRIM曲線が現実の降雨-地形関係においても成立するかどうかについて，深山レーダ雨量計の観測値を用いて調査したところ，山岳の風上斜面を切り

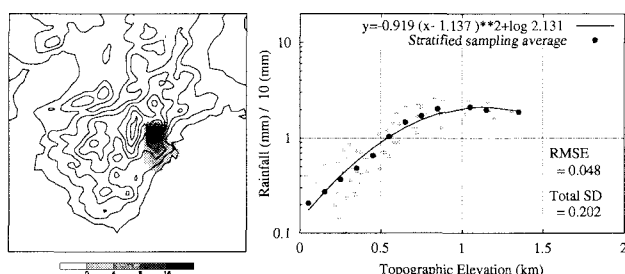


図-4 MM5を用いた再現シミュレーションによる一山岳斜面における地形標高と積算降雨量の関係（大台ヶ原山南側斜面，積算期間：99年9月14日12:50-14:30，領域平均降雨量：10 mm）

出すことによって，確かに GRIM 曲線が成立していると判断される複数の事例の存在が確認された。図-3 にその一例を示す。鈴木ら<sup>9)</sup>によれば，このような特徴的な降雨-地形関係が成立するのは，「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いう解析結果が得られているが，このことから特に山岳の風上斜面において成立する非常に普遍性の高い降雨分布特性ではないかと考えられる。

### 3. 一山岳斜面における降雨-地形関係

本節および次節では，鈴木ら<sup>8)</sup>と同様に 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を行い，その計算結果を用いて降雨-地形関係の解析を行う。計算条件は鈴木らと全く同様に設定し（詳細は文献に譲る），各事例 48 時間の計算を行った。モデルによる降雨分布の再現精度は，事例によっては必ずしも高いものではないが，多雨域の位置など領域全体の傾向は十分再現されていること，また，標高依存直線の傾きの大きさについて，モデル雨量から求めた値とレーダー観測雨量から求めた値が非常によい対応を示すという結果が得られている<sup>8)</sup> ことなどから，本論文の目的に対しては十分な精度を持つと判断した。

対象地域は「近畿南部（紀伊山地）」とし，1998 年，1999 年の 6 月～10 月に発生した降雨イベントの中から，主に「地形をトリガーとして発生した対流性降雨が卓越した事例」を対象に再現シミュレーションを行った。

#### (1) 一山岳斜面における GRIM 曲線

本論文では，ある一つの山岳斜面，すなわち適当なスケールで切り出された山岳の一斜面（例えば山岳の東側斜面や南側斜面など）に着目して降雨-地形関係の解析を行う。特に本論文では，図-4 の左図に示したように，降雨-地形関係が比較的明確な紀伊山地大台ヶ原山の南側斜面（尾鷲市近辺を含む）に着目した。本節および次節では，主に同斜面において解析を行う。

はじめに，同斜面における積算降雨量と地形標高の関係の一例を図-4 の右図に示す。図-3 と同様に，一山岳斜面において GRIM 曲線が成立する様子が見て取れる。ここで，他の事例や他の山岳斜面についても同様に調査したところ，ある程度降雨の積分を行った場合には，非常に多くのケースにおいて GRIM 曲線が成

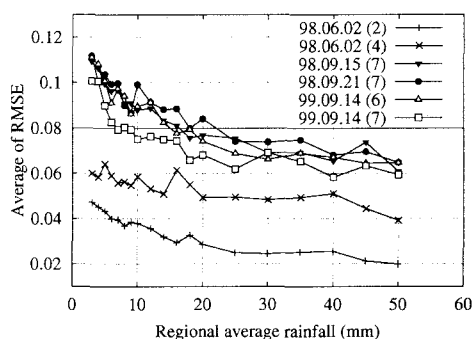


図-5 GRIM 曲線と層別平均値との偏差の大きさを表す RMSE（GRIM 曲線の RMSE）のサンプル平均と領域平均降雨量との関係（括弧内の数字は山岳斜面番号）

立することが分かった。中には層別平均値が直線的になるケースや，降雨-地形関係があまり明確でないケースも見られたが，今回のように，単峰性山岳の風上斜面に相当すると考えられる一山岳斜面を適切に切り出した場合には，現実の降雨-地形関係においても一般的に GRIM 曲線が成立すると考えられる。

#### (2) GRIM 曲線の成立条件

ここで，GRIM 曲線が成立するためには，どの程度の降雨積分を行えばよいかについて解析を行った。各事例ごとに，（降雨の積算期間を変化させて）対象領域内の平均雨量がほぼ等しい値を持つ降雨分布サンプルを複数作成した上で，それらに対して図-4 と同様に GRIM 曲線を求めた。さらに GRIM 曲線の成立度合を評価するため，GRIM 曲線と層別平均値との偏差の大きさを表す RMSE（以下，GRIM 曲線の RMSE）のサンプル平均と領域平均降雨量との関係について調査を行った。結果を図-5 に示す。なお，鈴木ら<sup>8)</sup>は，「RMSE < 0.1」を標高依存直線成立の判断基準として用いている。

同図より，領域平均降雨量が 10～20 mm 程度以上であれば，RMSE の値が 0.08～0.1 以下の値を取ることが分かる。層状性降雨が卓越した事例を含めて約 10 事例について検討した結果，RMSE の値が 0.08 以下の時には十分 GRIM 曲線が成立しており，また 0.08～0.1 の値を取る場合でも，目視により，全体的な傾向は GRIM 曲線によってよく近似されていると判断された。すなわち，GRIM 曲線は「領域平均降雨量が 10～20 mm 程度以上」の場合に成立する特性であると考えられる。

鈴木ら<sup>7),8)</sup>の「降雨分布の時間積分過程」に関する解析によれば，数 100 km 四方程度の領域を想定した場合，領域平均降雨量 50～100 mm 程度以上において標高依存直線が成立し，同 50～100 mm 程度以下においては明確な降雨-地形関係を見ることはできないとされている。それに対して，上記の解析からは，数 10 km 四方程度の一山岳斜面を対象とした場合には，およそ領域平均降雨量 10～20 mm 以上において，GRIM 曲線という明確な降雨-地形関係が成立することが明らかとなった。山岳域の降雨-地形関係を明らかにするためには，このように異なった時空間スケールにおいて成立する GRIM 曲線と標高依存直線がどのように結びついているのかを明らかにすることが必要である。

#### 4. 降雨-地形関係の時間・空間変動特性

鈴木ら<sup>9)</sup>がすでに指摘しているように、「山岳域の降雨-地形関係においてなぜ標高依存直線が成立するのか」について考えたとき、その要因の一つとして「GRIM 曲線などの降雨-地形関係の重ね合わせ」による影響が考えられる。すなわち、既に述べたように、標高依存直線は時間的・空間的に比較的大きなスケールで成立する特性であるが、それは GRIM 曲線などの時間的・空間的に変動の激しいより小さなスケールにおける降雨-地形関係が重ね合わされることによって成立しているのではないかと考えることができる。

そこで本節では、98 年 9 月 21 日～22 日（以下、Case 1）および 99 年 9 月 14 日～15 日（以下、Case 2）の 2 事例を対象として、実際にモデル雨量より GRIM 曲線等を求め、降雨-地形関係の変動特性やその重ね合わせによる影響について解析を行う。どちらの事例も、台風が近畿地方に接近したために比較的広い領域において非常に多くの地形性降雨が発生した事例である。

##### (1) GRIM 曲線の重ね合わせ

前節で得られた知見に基づいて、領域平均降雨量が約 10 mm となるように時間を追って順に降雨を積算し、複数の降雨分布サンプルを作成した。また、得られた降雨分布（Case 1 では 20 サンプル、Case 2 では 26 サンプル）に対してそれぞれ GRIM 曲線を求めた。各 GRIM 曲線の RMSE の値を見ると、値が非常に大きく明らかに GRIM 曲線が成立していないケースがいくつか見られるものの、半数以上（Case 1 は 50 %、Case 2 は 65 %）のサンプルで RMSE の値が 0.08 以下となり、明確な GRIM 曲線の成立が確認された。

次に、これら GRIM 曲線の「重ね合わせ」を行った。結果を図-6 および 図-7 に示す。複数の破線が各 GRIM 曲線を、実線が全 GRIM 曲線を足し合わせて得られた層別平均値（黒丸）を回帰した結果を示している。ただし、ここでの足し合わせは、対数値ではなく実雨量の足し合わせであることに注意されたい。同図より、GRIM 曲線を足し合わせた結果が、やはり二次曲線により非常に精度良く表現されることが分かる。さらに、各ケースにおける全期間トータルの積算雨量分布より直接求めた層別平均値（白丸で示した、従来の標高依存直線に相当する）と黒丸とが非常によく一致しており、GRIM 曲線の重ね合わせにより、ある期間内（今回のケースでは約 1 日）の平均的な降雨-地形関係が精度良く再現されることが分かった。このことは、短い時間スケール（数時間程度）の降雨-地形関係が GRIM 曲線によって十分表現されていることを意味している。

本論文では、このように GRIM 曲線の重ね合わせにより得られた二次の曲線関係を、便宜的に『降雨分布の標高依存曲線』と呼ぶこととする。

##### (2) GRIM 曲線の時間変動特性

ここで、図-6 および 図-7 において Case 1 と Case 2 の比較を行うと、両者に特徴的な違いが見て取れる。Case 1 では、片対数グラフ上において、重ね合わせ後

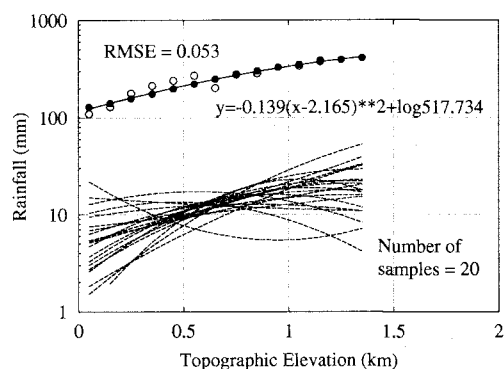


図-6 Case 1 における 10 mm 積算雨量分布に対して求めた GRIM 曲線（破線）とその重ね合わせにより得られた標高依存曲線（黒丸および実線）

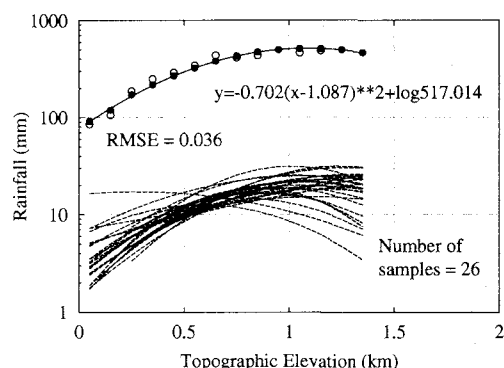


図-7 Case 2 における 10 mm 積算雨量分布に対して求めた GRIM 曲線（破線）とその重ね合わせにより得られた標高依存曲線（黒丸および実線）

の標高依存曲線の曲率が小さく、比較的直線的であるのに対して、Case 2 では非常に曲率が大きくなっている。このことは、GRIM 曲線の重ね合わせにより表現される降雨-地形関係が、その重ね合わせの状況により、直線的にも曲線的にもなり得るということを示している。実際、Case 1 と Case 2 における GRIM 曲線の重ね合わせの様子を比べてみると、両者が明らかに異なった様子を示しており、Case 1 における GRIM 曲線の形状が全体的により大きな変化を示していることが見て取れる。すなわち、ある期間内の平均的な降雨-地形関係は、その間に GRIM 曲線がどのような変動を示すかに依存して決まり、その変動が十分大きい場合には、降雨-地形関係（標高依存曲線）が（片対数グラフ上で）より直線的なものとなるのではないかと考えられる。

そこで、GRIM 曲線の時間的な変動特性を定量的に評価するため、GRIM 曲線のパラメータ（式(1)参照）の時間変動について解析を行った。なお、以降の考察では、特に断りが無い場合には片対数グラフ上において降雨-地形関係の形状や曲率等の議論を行う。

はじめに、パラメータ  $a$ ,  $b'$  の値を時系列的に並べた図を図-8 および 図-9 に示す。なお、雨量のピーク位置を表すパラメータ  $b$  については、山岳斜面内の最高標高（1307 m）で正規化した値  $b'$  を用いた。両図からは、GRIM 曲線が時間とともに様々に変動する様子が見て取れる。図-8 からは、いくつかのケースにおいて、パラメータ  $a$  が負の値を示す（GRIM 曲線が下に凸と

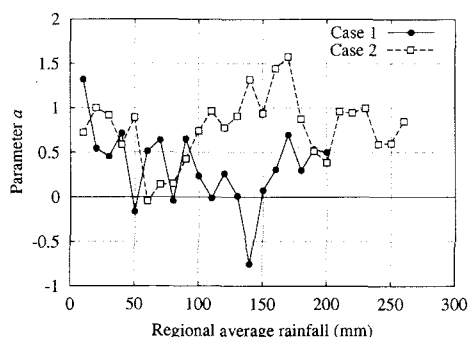


図-8 10 mm 積算雨量分布に対して求めた GRIM 曲線のパラメータ  $a$  の時系列変動（横軸は初期時刻から積算した領域平均の降雨量を表す）

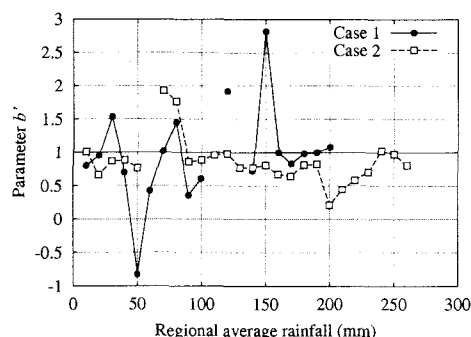


図-9 10 mm 積算雨量分布に対して求めた GRIM 曲線のパラメータ  $b'$  の時系列変動（便宜的に  $|b'| > 3$  となる絶対値の大きなケースは除外した）

なる）ことや、絶対値が 0 に近い値を示す（GRIM 曲線が直線的になる）ことが分かる。また、図-9 からは、Case 2 のピーク位置がほぼ山頂（最高標高点、 $b' = 1$ ）付近に位置するのに対して、Case 1 では大きな変動を示していることが分かる。

ここで、各パラメータの統計量を表-1 に示す。ただし、GRIM 曲線の直線性を議論するためには、パラメータ  $a$  のみでは必ずしも十分ではないため、GRIM 曲線の「最大曲率」を計算し、その統計量を同表に示した。パラメータ  $a$  および最大曲率の平均値を見ると、Case 1 の方がより小さな値を示しており、同ケースでは直線的な GRIM 曲線の割合が高いことが分かる。一方、パラメータ  $a$  および最大曲率の変動係数（C.V.）について見ると、Case 1 においてより大きな値を示しており、GRIM 曲線が Case 2 よりも相対的により大きな変動を示すことが分かる。GRIM 曲線の重ね合わせにより得られた標高依存曲線のパラメータ（ $a$ ,  $b'$  に対応して  $A$ ,  $B'$  とする）を見てみると、Case 1 においてパラメータ  $A$  の値が小さく、また最大曲率も非常に小さな値を示していることから、確かに、GRIM 曲線の変動が大きい Case 1 において、降雨-地形関係（標高依存曲線）が非常に直線的なものとなることが示された。

現在のところ、Case 1 と Case 2 の間で降雨-地形関係がなぜこのような異なった特徴を示すのか、その詳細なメカニズムは明らかでないが、両ケースの風速場（図は割愛）を見ると、明らかに Case 1 における風向の変動が大きく、鈴木ら<sup>9)</sup> が指摘するように、風向や風速の変動が重要な役割を果たしていると考えられる。

表-1 10 mm 積算雨量分布に対して求めた GRIM 曲線およびその重ね合わせによって得られた標高依存曲線のパラメータや最大曲率（M-Curvature）の比較（ $b'$  については、便宜的に  $|b'| > 3$  となる値を除外した）

|                |          | Case 1 | Case 2 |
|----------------|----------|--------|--------|
| Parameter $a$  | Average  | 0.340  | 0.777  |
|                | Variance | 0.174  | 0.138  |
|                | C.V.     | 1.226  | 0.479  |
| Parameter $b'$ | Average  | 0.966  | 0.866  |
|                | Variance | 0.136  | 0.115  |
|                | C.V.     | 0.381  | 0.392  |
| M-Curvature    | Average  | 0.841  | 1.557  |
|                | Variance | 0.416  | 0.543  |
|                | C.V.     | 0.767  | 0.473  |
| Parameter $A$  |          | 0.139  | 0.702  |
| Parameter $B'$ |          | 1.656  | 0.831  |
| M-Curvature    |          | 0.258  | 1.404  |

### (3) 降雨-地形関係の空間変動特性

上記の解析により、時間的に大きな変動を示す GRIM 曲線を複数重ね合わせることで、標高依存曲線がより直線的なものとなることが分かった。したがって、積分期間を長く取り、様々な GRIM 曲線を数多く足し合わせることで、標高依存曲線はさらに直線に近づくと考えられる。すなわち、「標高依存直線」という降雨-地形関係は、実際には「標高依存曲線」の収束形として成立する特性ではないかと考えられる。しかしながら、上記の解析では、降雨-地形関係の時間的な重ね合わせによって標高依存直線が成立することを示すまでには至っていない。そこで、以降の解析では領域を拡大し、時間的な重ね合わせに加えてさらに「空間的な重ね合わせ」を行うことによって、標高依存曲線の形状がどのように変化するか検討を行った。

はじめに、一つの山岳全体を含む一山岳領域において降雨-地形関係の調査を行った。その一例を図-10 に示す。右図に大台ヶ原山周辺領域における地形標高と積算降雨量の関係、左図にその対象領域を矢印で示した。同図より、一山岳領域においても降雨-地形関係が二次関数によってよく近似され、標高依存曲線が成立していることが見て取れる。風上斜面以外では、必ずしも GRIM 曲線は明確には成立しないものの、降雨-地形関係のおよその傾向は十分表現されるため、時間的な重ね合わせの場合と同様に、複数の GRIM 曲線の空間的な重ね合わせにより標高依存曲線が成立すると考えられる。

次に、Case 1 および Case 2 を対象として、図-10 の左図に示した山岳分割図に従って各山岳領域における標高依存曲線を求め、それらの重ね合わせを行った。結果を図-11 および図-12 に示す。両図からは、標高依存曲線（破線）が、山岳領域によって変動し、様々な形状を示すことが見て取れる。さらに、それらを足し合わせた結果（黒丸）が、二次曲線により精度よく近似されるとともに、全領域の積算雨量分布（山岳分割なし）から直接求めた層別平均値（白丸）をよく再現していることが分かる。両ケースを比較すると、Case 1 において、重ね合わせにより得られた標高依存曲線が

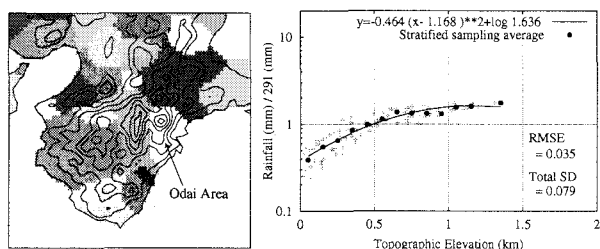


図-10 解析に用いた山岳分割（左図）と一山岳領域における地形標高と積算降雨量の関係（右図，大台ヶ原山周辺領域，積算期間：99年9月14日8:00 - 15日10:00）

極めて直線的（最大曲率 0.067）になっており，同ケースでは「標高依存直線」が成立していることが確認された。Case 2においては，重ね合わせ後の降雨-地形関係がなおも曲線（最大曲率 0.862）を描いているが，これは，Case 2における各標高依存曲線の曲率が全体的に大きいことや，その変動が比較的小さいことなどが影響していると考えられる。

以上より，降雨-地形関係の空間的重ね合わせによって必ずしも標高依存直線が成立するわけではないが，標高依存直線は GRIM 曲線や標高依存曲線が時間的・空間的に重ね合わされることによって成立するというその成立のメカニズムを明らかにすることができた。

## 5. まとめ

以上，本論文では，降雨-地形関係のメカニズム解明を目指し，様々な時空間スケールで降雨-地形関係の解析を行った結果，以下の成果を得ることができた。

一山岳斜面程度の空間スケールに着目した場合には，現実の降雨-地形関係においても，一般的にガウス関数型の降雨-地形関係（GRIM 曲線）が成立することを示すとともに，GRIM 曲線の成立条件の一つとして，領域平均降雨量 10～20 mm 程度以上が必要であることを明らかにした。さらに，ある期間内の平均的な降雨-地形関係は，時間的に変動する複数の GRIM 曲線の重ね合わせによって表現され得ることを明らかにし，その重ね合わせの結果が，GRIM 曲線と同様に，（片対数グラフ上で）二次関数によってよく近似されることを示した（標高依存曲線の成立）。

また，GRIM 曲線の時間的・空間的な変動特性に関する解析を行った結果，平均的な降雨-地形関係は，重ね合わせの対象となる GRIM 曲線がどのような変動を示すかに依存して決まり，その変動が十分大きい場合には，降雨-地形関係（標高依存曲線）がより直線的なものとなることが明らかとなった。このことから，「降雨分布の標高依存直線」という降雨-地形関係は，「標高依存曲線」の収束形として成立する特性であり，「GRIM 曲線や標高依存曲線の時間的・空間的な重ね合わせ」によって成立していることが分かった。

今後は，本論文で得られた知見の検証・精緻化を行うとともに，地形条件や気象条件を考慮した降雨-地形関係の定式化や，降雨-地形関係をベースとしたグローバルな降雨分布推定モデルの構築に取り組む予定である。

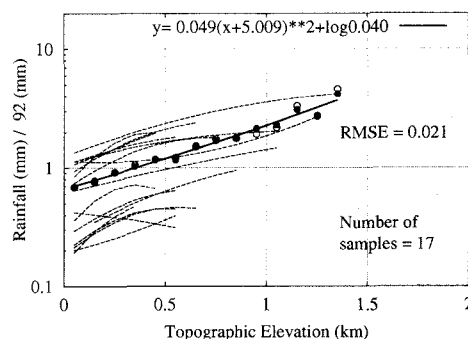


図-11 Case 1 における各山岳領域に対して求めた標高依存曲線（破線）とその重ね合わせにより得られた標高依存曲線（黒丸および実線）（積算期間：98年9月21日7:00 - 22日8:00）

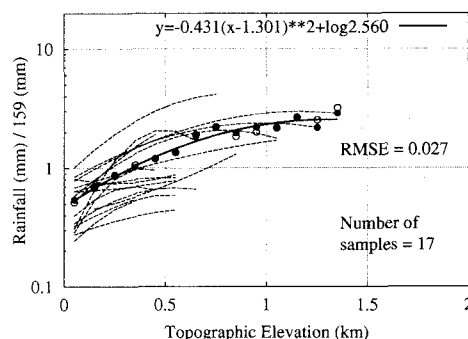


図-12 Case 2 における各山岳領域に対して求めた標高依存曲線（破線）とその重ね合わせにより得られた標高依存曲線（黒丸および実線）（積算期間：99年9月14日8:00 - 15日10:00）

## 参考文献

- 1) Lee, C. H.: Precipitation and altitude in the Sierra, *Mon. Wea. Rev.*, Vol.39, pp.1092-1099, 1911.
- 2) Burns, J. I.: Small-scale topographic effects on precipitation distribution in San Dimas Experimental Forest, *Trans. Am. Geophys. Union*, Vol.34, pp.761-768, 1953.
- 3) 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.
- 4) Marquinez, J., Lastra, J. and Garcia, P.: Estimation models for precipitation in mountainous regions: the use of GIS and multivariate analysis, *J. Hydrol.*, Vol.270(1-2), pp.1-11, 2003.
- 5) Mink J. F.: Distribution pattern of precipitation in the leeward Koolau Mountains, Oahu, Hawaii, *J. Geophys. Res.*, Vol.65(9), pp.2869-2876, 1960.
- 6) Hevesi J. A., Istok J. D. and Flint A. L.: Precipitation estimation in mountainous terrain using multivariate geostatistics. Part I: Structural analysis, *J. Appl. Meteor.*, Vol.31, pp.661-676, 1992.
- 7) 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。
- 8) 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。
- 9) 鈴木善晴・宮田昇平・中北英一・池淵周一：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，水工学論文集，第 48 巻，pp.289-294，2004。

(2004. 9. 30 受付)