

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

STUDY ON RELATIONSHIP BETWEEN RAINFALL AND TOPOGRAPHY ON THE BASIS OF NUMERICAL SIMULATIONS USING A MESOSCALE METEOROLOGICAL MODEL

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)

Rainfall-topography relationship was analyzed by running numerical simulations using the MM5, which is the mesoscale model constructed in the Pennsylvania State University and National Center for Atmospheric Research (PSU-NCAR). For a quantitative estimation of topographic effect on rainfall distribution, the Dependence Line on Topographic Elevation (DLTE), one of the models which represent rainfall-topography relationship, were simulated and analyzed in four regions in Japan. The properties of DLTE and the requirements for establishing the relation of DLTE were determined in each region. Next, the influence of the scale of topography on rainfall-topography relationship was investigated by running simulations under the conditions where the resolution of topography has various scales. It was found that the relation between the scale of topography and the degree of topographic effect differs from region to region, and that the degree depends largely on the scale of mountains in a region.

Key Words : rainfall-topography relationship, rainfall distribution, topographic elevation, mesoscale meteorological model, numerical simulation

1. 序論

(1) 研究の背景と目的

我が国の山岳域のような複雑な地形条件を持つ地域においては、地形の影響による非線形効果が増大し、日々の天候を決定づけるメソスケールの大気現象が非常に複雑な挙動を示すため、雨域の短時間予測や降雨の分布特性解明が非常に困難なものとなっている。しがしながら、豪雨災害に対する適切な防災対策や効率的な水資源計画を立てるためには、さまざまな時空間スケールにおける降雨分布の確率構造の解明が必要であり、長年、水文学および気象学上の重要課題の一つとなっている。そこで、本論文では、降雨の物理的・確率的分布構造モデルの構築を目指して、メソ気象モデルMM5を用いた数値シミュレーションに基づいた、山岳域における降雨-地形関係の解明を試みる。

大気現象に影響を与えていると考えられる地形因子としては地形標高や斜面勾配、斜面の向き、谷の開放度、海岸距離など様々なものが考えられる。従来の研究においても、複数の地上雨量計による観測値に基づいて、これらの地形因子を説明変数とした降雨分布と

地形特性との相関分析が行われ、地域によっては雨量の多寡が地形特性によってよく説明されることが明らかとなっている^{1),2),3),4)}。しかしながら、本論文では特に地形標高に着目して解析を行う。なぜなら、本論文が対象とするような時空間スケール(メソ β ~メソ α スケール)においては、降雨分布に対する様々な地形効果のなかでも地形標高による影響が最も卓越していると考えられるためである。

降雨量と地形標高との間に明確な相関関係があることは古くから指摘されている^{5),6),7)}。ただし、山岳域の降雨に対する観測技術の限界やメソ気象現象のもつ複雑な内部構造のため、降雨量と地形標高が厳密にどのような関係にあり、そのメカニズムがどうなっているのか等は未だ明らかとなっていない。一方、降雨レーダーによる観測値に基づいた著者ら^{8),9)}の解析によれば、およそメソ β スケール以上の降雨分布を対象とした場合には、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、すなわち両者は指数関数的な関係にあることが明らかとなった。著者らはこれを「降雨分布の標高依存直線」と呼び、その特性について解析を行っている。同直線は領域

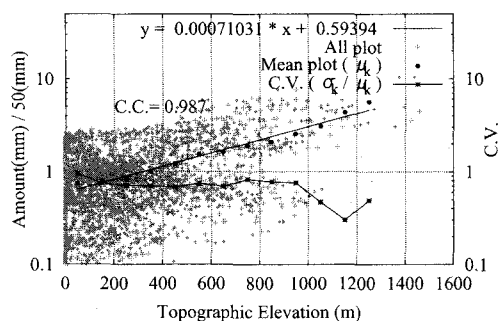


図-1 深山レーダ雨量計による観測値に基づいた積算降雨量(縦軸)と地形標高(横軸)の関係(観測領域: 半径 120km 円内, 領域平均降雨量: 50mm)

の平均的な降雨-地形関係を表し, その傾きが大きいほど降雨分布への地形効果が大きいと理解されるが, 現在のところその詳細なメカニズムは明らかでない。

また近年は, 数値気象モデルを用いて降雨-地形関係のメカニズムを明らかにする試みも多く行われている(10), (11), (12), (13)。主に単一の山岳が降雨分布に与える影響について解析するため, 2次元のメソ気象モデルや雲微物理モデルを用いて, 山岳の標高や斜面勾配, 一般風の強度などの様々な設定条件下で数値シミュレーションを行い, 雨量の多寡やその分布を決定づける要因やそのメカニズムなどを明らかにしている。しかしながら, 従来の研究においては, 現実の降雨-地形関係が持つ物理的・確率的特性について, その普遍性や特異性を考慮した包括的な議論を行うまでには至っていない。

(2) 研究の意義と特徴

ここで, 降雨分布の標高依存直線を表したグラフを図-1に示す。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, 観測領域内の全地点(各地点 3km グリッド)における積算降雨量と地形標高との関係を片対数グラフ上で表したものである。ここで, 地形標高を適当な間隔で層別化し, 各標高区分内における層別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 以上の明確な直線関係が成立する。この直線関係が降雨分布の標高依存直線である。

同直線の傾きの大きさには, 対象地域の地形特性や対象とする降雨の性質がよく反映されており, 同直線は降雨-地形関係の最も基本的・本質的な特性を表している。前述したように, メソスケール(特にメソスケール)の降雨-地形関係は非常に複雑な挙動を示すことから, その普遍的特性を明らかにするためには, 標高依存直線のようなよりマクロな視点から降雨-地形関係を明らかにすることが必要である。また一方で, ミクロなスケールの地形効果は同直線からの雨量偏差として現れており, 同直線周りの分散構造を解析することによってその特性を明らかにすることが可能となる。

以上の背景のもと, 本論文では, メソ気象モデル MM5 を用いた数値シミュレーションを行うことによって, 降雨分布の標高依存直線をベースとした降雨-地形関係の解析を行う。

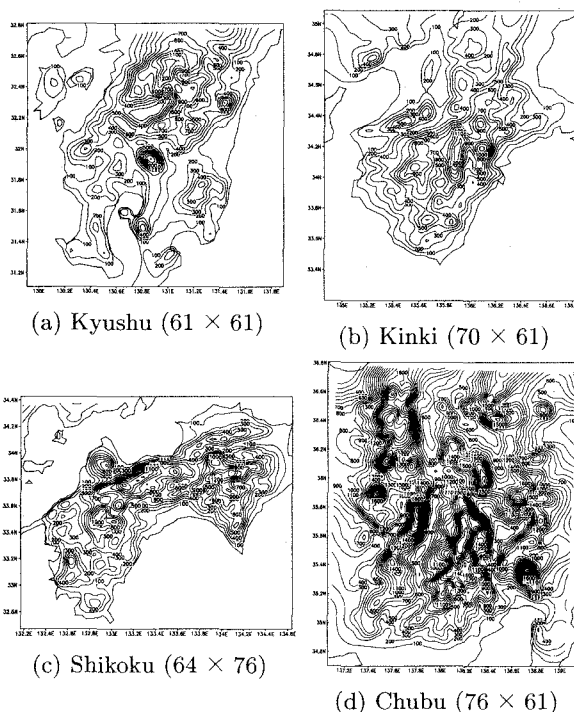


図-2 本論文の解析対象領域(コンターは地形標高, 数字は各領域のグリッド数(3km グリッド))

2. 計算条件の設定と再現精度の検証

本論文では, NCAR (National Center for Atmospheric Research) とペンシルバニア州立大学とで共同開発されたメソ気象モデル The Fifth-Generation NCAR / Penn State Mesoscale Model (通称 MM5) を用いてシミュレーションを行う。MM5 では, Two-way ネスティングを用いたシミュレーションを行うことができる。ネスティングとは, 解析対象領域である fine domain (F.D.) を含むより大きなスケールの coarse domain (C.D.) で先に計算を行い, 次にその計算結果を境界条件として F.D. の計算を行うというものである。本論文では特に, C.D. と F.D. の計算を同時に行い, 全ての時間ステップで相互に計算結果を受け渡す Two-way ネスティングを採用した。また, グリッドスケール 27km, 9km, 3km の 3つの domain (順に Domain1, Domain2, Domain3) を設定して 3 段階のネスティングを行うこととした。

本論文では, 初期条件および境界条件として, GPV (Grid Point Value) データの一つである RSM 航空データを用いた。RSM 航空データからは, 日本時間の毎日 9 時, 21 時を初期時刻として 24 時間後までの 3 時間ごとの予報値として, 80km 間隔の格子状データを地上から対流圏界面の高さまで得ることができる。本論文では, ジオポテンシャル高度, 気温, 風速, 湿度の GPV データよりモデルの初期値となる内挿データを作成した。また, 側面境界条件としては, 6 時間おきの GPV データを用いて線形的に空間・時間内挿したものをモデルに与えることとした。また, 地形標高データとしては, USGS (U.S. Geological Survey) 提供の緯度・経度 30 秒(約 0.925km) および 2 分(約 3.70km) の解像

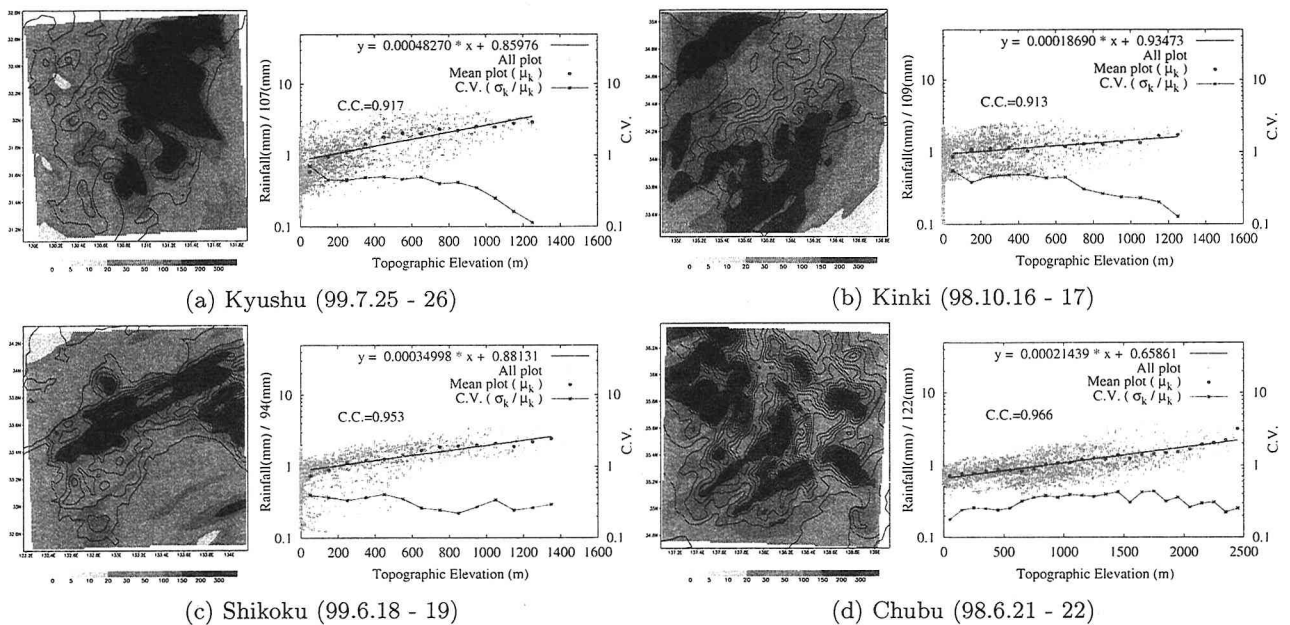


図-3 シミュレーションによる2日積算降雨量の分布（左図，単位はmm），およびその地形標高との関係（右図）

度を持つデータを用いた。Domain3は前者，Domain1およびDomain2には後者のデータを適用した。

本論文では，複数の地域において行ったシミュレーション結果を比較検討することにより，地形特性の違いによる降雨-地形関係への影響の解明を試みる。今回は，我が国の山岳域の中で，九州南部，近畿南部，四国，中部の4地域に着目してシミュレーションを行うこととする。図-2に各地域におけるDomain3（解析領域）の設定範囲を地形標高の様子とともに示す。

また，2日間の計算を1事例として，各地域15事例ずつシミュレーションを行い，主に数日程度の時間スケール（メソβスケール）において降雨-地形関係の解析を行うこととする。1998年および1999年を対象として，各地域ごとに比較的降雨量が多い期間をAMeDAS観測雨量に基づいて選択した。なお，計算の時間ステップについては，Domain1は81秒，Domain2は27秒，Domain3は9秒と設定した。

以上の計算条件のもとで行う降雨分布のシミュレーションがどの程度の再現精度を持っているのか，AMeDAS観測雨量との比較により検証を行ったところ，地点雨量など細かな視点でみると再現精度が高いとはいえないが，多雨域の位置など領域全体の傾向としては比較的高い精度を示していたことから，本論文の目的に対しては十分な精度を持つものと判断した。

3. 降雨分布の標高依存直線と時間積分過程

著者ら^{8),9)}の解析では，降雨レーダーによる観測雨量をもとに，近畿地方および九州南部において降雨分布の標高依存直線の成立が確認されている。しかしながら，同直線が，レーダーの観測誤差（グラウンドクラッタなど）に起因したものではないか，また，あらゆる地域で成立する普遍的な関係かどうかなど，確認すべき課題が残されている。そこで本節では，同直線がモデ

ルによって再現されうるかどうかについて検証を行う。

(1) モデルによる降雨分布の標高依存直線

はじめに，2日単位で行った各地域のシミュレーション結果より，地形標高と2日積算降雨量との関係を示したグラフおよび分布図を図-3に示す。ただし，各地域とも解析対象をグリッド数60×60の領域に限定した。同図より，どの事例においても地形標高および積算降雨量の層別平均値（図中の黒丸）に明確な直線関係が成立していることがわかる。すなわち，モデルによって標高依存直線が再現されることが明らかとなった。また，複数の地域で成立する普遍性の高い特性であることも示された。このように物理モデルによって再現されるということは，標高依存直線が降雨分布のもつ単なる統計的な特性ではなく，何らかの物理的メカニズムに基づいた特性であると考えられる。

さらに，標高依存直線の傾きについて，近畿地方に位置する深山レーダ雨量計の観測雨量から求めた値との比較を行った結果が図-4である。同直線の傾きは降雨分布に対する地形効果の大きさを表すと理解されるが，同図より，いくつかの事例を除けばシミュレーションと観測の両者が非常によい対応を示していることが分かる。このことは，モデルによる降雨域・降雨量の再現精度がそれほど高くなくとも，標高依存直線というマクロな降雨-地形関係は，モデルによって十分よい精度で再現されることを意味している。

著者ら^{8),9)}によれば，標高依存直線の成立条件の一つは，対象領域内の領域平均降雨量が50mm～100mm以上となることである。そこで，モデルで再現された標高依存直線に対しても同様のことが言えるかどうか調査を行う。ただし，ここでは（標高依存直線に対する）積算降雨量の層別平均値（図中の黒丸）のRMSE（平均二乗誤差平方根）をその判断基準として用いる。様々なケースに対してRMSEを計算した結果から「RMSE

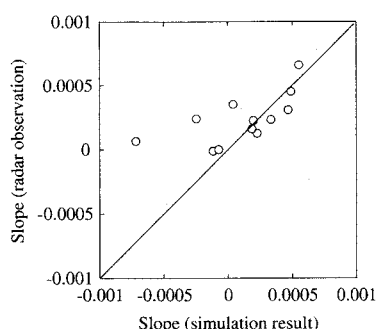


図-4 シミュレーションおよび深山レーダ雨量計の観測雨量に基づいた標高依存直線の傾き（近畿地方）

の値が0.1以下のとき標高依存直線が成立しているとみなすことができる」と判断した。

各地域15事例の降雨分布を対象としてRMSEの値を計算し、その値が成立条件を満たす割合を領域平均降雨量に対して求めた結果が図-5である。同図を見ると、標高依存直線の成立割合が8割から9割程度に達する領域平均降雨量には地域差が生じており、同直線の成立条件が地域によって異なることが分かる。ただし、領域平均降雨量が100mm以上であれば、どの地域においてもほとんどのケースで同直線が成立しており、従来の解析とほぼ一致する結果となった。

(2) モデルによる降雨分布の時間積分過程

著者ら^{8),9)}によれば、降雨の分布特性はその積分時間スケールに依存しており、降雨-地形関係を明らかにするためには「降雨分布の時間積分過程」に着目することが必要である。同過程は、図-6の概念図に示すように、積分時間スケールを3つのステージに分けて説明することができる。

第1ステージ（メソ γ スケール程度）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、降雨分布に対する普遍的な地形効果を見いだすことはできないが、第2ステージ（メソ β スケール程度）になると、依然として降雨分布の変動は大きいものの標高依存直線が成立し、降雨分布に対する地形効果が発現する。さらに、第3ステージ（メソ α スケール程度）では、標高依存直線周りの降雨分布のばらつきが小さくなりほぼ一定値に収束することによって、明確な地形効果が発現するようになる。このとき、領域平均降雨量の値が積分時間スケールをおよそ代表していると考え、第1の境界となる積分スケールは、標高依存直線の成立条件に着目することにより領域平均降雨量50mm～100mm程度（既述）、また第2境界スケールは、標高依存直線周りの変動係数に着目することにより同200mm～250mm程度となることが分かっている。このように、降雨の分布特性は積分スケールによって異なった特性を示すと考えることができる。

ここで、第2境界スケールについて、シミュレーション結果に基づいた解析を行うため、モデルによる降雨分布に対して標高依存直線まわりの変動係数を求め、その領域平均降雨量に対する推移の様子を示したものが

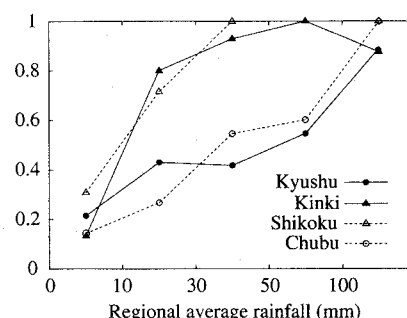


図-5 標高依存直線に対するRMSEが0.1以下になる割合と領域平均降雨量の関係

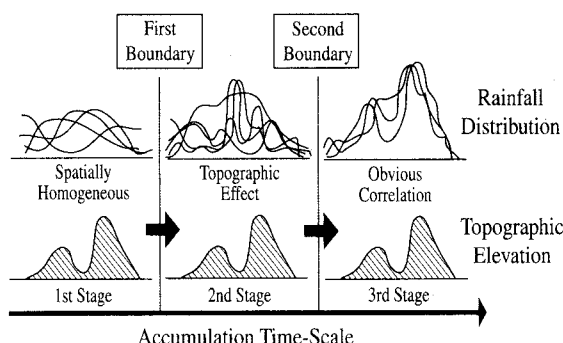


図-6 降雨分布の時間積分過程の概念図

図-7である。同図より、どの事例においても次第に変動係数の値が減少し、やがてほぼ一定値に収束する様子が見て取れる。収束時の積分スケール（第2境界スケール）や、収束後の変動の大きさなどが地域によってまた事例によって異なるものの、時間積分過程としては上記と同様な傾向を示すことが見て取れる。すなわち、モデルによる降雨分布においても、時間積分過程の概念が成立することを確認することができた。

4. 地形の空間スケールと降雨-地形関係

本節では、時間積分過程の第3ステージにおける降雨-地形関係に着目して解析を行う。同ステージにおいては、降雨-地形関係からメソ γ スケールの変動要素が十分排除され、その結果、メソ β スケール程度のマクロな降雨-地形関係の特徴が最もよく表れていると考えられる。一方、降雨-地形関係の解析では、このような時間スケールだけでなく、さまざまな空間スケールもまた重要な意味を持つ。そこで本節では、特に「地形の空間スケール」に着目して、その降雨-地形関係に与える影響について考察する。

(1) 地形解像スケールが降雨-地形関係に与える影響

はじめに、解像スケールが異なる複数の地形条件を導入したシミュレーションを行い、「地形解像スケール」が降雨-地形関係に与える影響について解析を行う。解像スケール3kmの地形の他に、解像スケール9kmおよび27kmの地形を用いて、各事例それぞれ3ケースのシミュレーションを行った（以下、各ケースをTopo3、

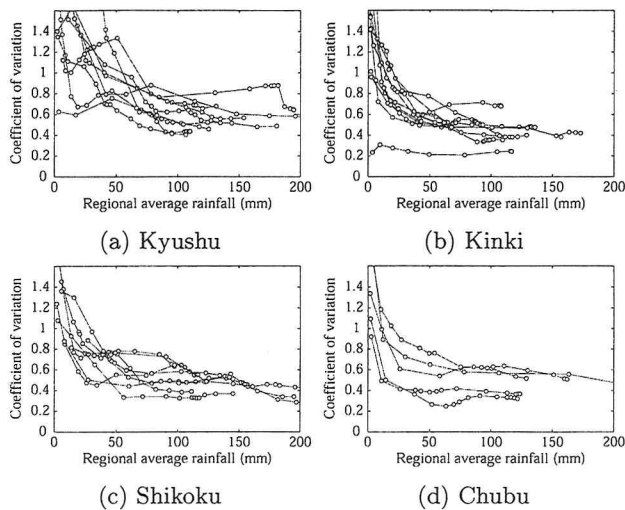


図-7 標高依存直線まわりの変動係数の推移（各地域 15 事例のうち 2 日積算後の領域平均降雨量が 100mm 以上の事例のみ）

Topo9 などと記す）。なお、モデルの計算グリッドスケール（Domain3 は 3km）など、地形標高データ以外の設定については前節までと全く同様である。

シミュレーションによる 2 日積算降雨量の分布、およびその地形標高との関係を 図-8 に示す。ここでは一例として近畿南部のケースを示した。同左図からは、地形解像スケールが大きくなるとともに、次第に地形標高が平滑化されていく様子が見て取れる。またそれに伴って、降雨分布における細かな空間変動が少なくなり、全体的に滑らかな分布を示すようになる。ただし、雨域の位置や降雨強度などの傾向には大きな変化は見られない。一方、同右図に示した標高依存直線に着目すると、その傾きに大きな変化はないものの、同直線周りのばらつきについては若干の変化が見て取れる。

ここで、図-7 と同様に変動係数の推移を調査したところ 図-9 に示す結果となった。同図を見ると、変動係数が収束する積分スケールには地形解像スケールによる影響はあまりないが、収束後の変動の大きさにはどの地域でも変化が生じている。九州南部および近畿南部では Topo27 で最も変動が大きいのにに対し、四国および中部では逆に最も小さくなっている。ただし、変動の大きさ自体は全体的に前者の方が大きい。ここでさらに、解像スケール 56km の地形（Topo56）を用いて同様にシミュレーションを行ったところ、どの地域においても Topo27 より変動が大きくなった。すなわち、降雨-地形関係の空間変動の大きさは、地形解像スケールによって 図-10 のような変化を示すことが分かる。

(2) 山岳スケールが降雨-地形関係に与える影響

次に、このような地域差が生じる原因について考察する。九州南部および近畿南部では、図-8 からわかるように（ただし図は後者のみ）、Topo27 の地形標高が全体的に小さくなり、最高標高が 1000m 程度である。これは、これらの地域における「山岳のスケール」が小さいために、Topo27 では多くの山岳が平滑化されたこ

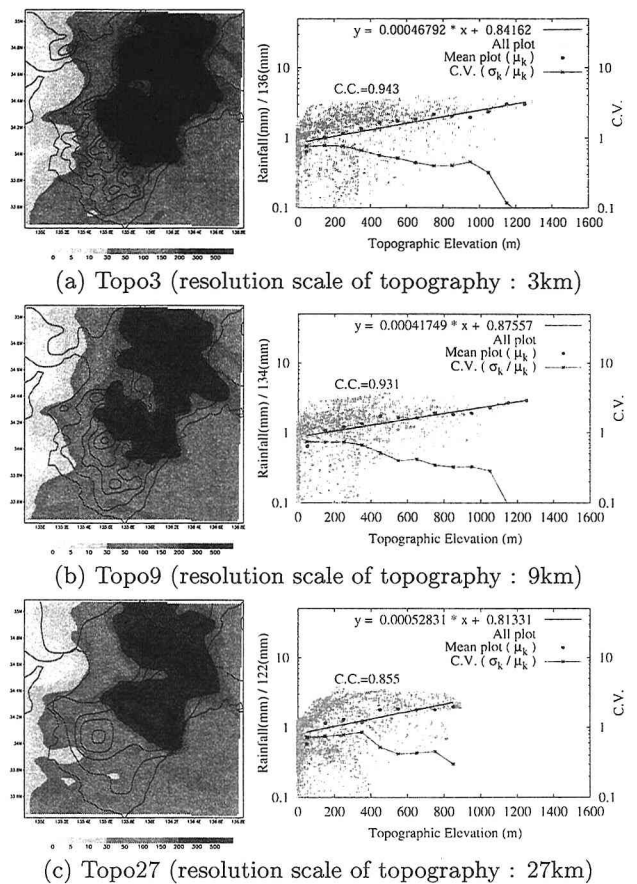


図-8 解像スケールの異なる地形を用いたシミュレーションによる 2 日積算降雨量の分布（左図）およびその地形標高との関係（右図）（近畿南部，98.9.15～16）

とを意味している。ただし、ここで述べる「山岳のスケール」とは単に標高の高低だけではなく、単峰性や連峰性などの空間的広がりをもつスケールを考えている。すなわち、これらの地域における地形効果は、スケールの比較的小さな山岳に起因するものであったが、Topo27 では領域内の山岳の多くが平滑化されたため降雨分布に対する地形効果が小さくなり、その結果、降雨-地形関係の空間変動が大きくなったと考えられる。言い換えると、同地域では解像スケール 3km またはそれ以下で表現されるスケールの小さい地形による影響が卓越しており、降雨-地形関係の空間変動の大きさは、図-10 の概念図にも示したように、その程度の地形解像スケールにおいて最も小さくなると思われる。

一方、四国および中部の Topo27 では、平滑化によって標高はある程度小さくなったものの、九州南部・近畿南部ほどは平滑化されていない（図は省略）。このことは、これらの地域における山岳スケールが比較的大きいことを意味している。したがって、同地域の地形効果には、大小様々なスケールの地形による影響が含まれていると考えることができる。ここで、図-10 に示したように、起伏の激しい小さなスケールの地形を含む Topo3 や Topo9 のケースよりも、それらが除去された Topo27 のケースの方がより変動が小さくなったことに着目すると、同地域では、比較的スケールの大き

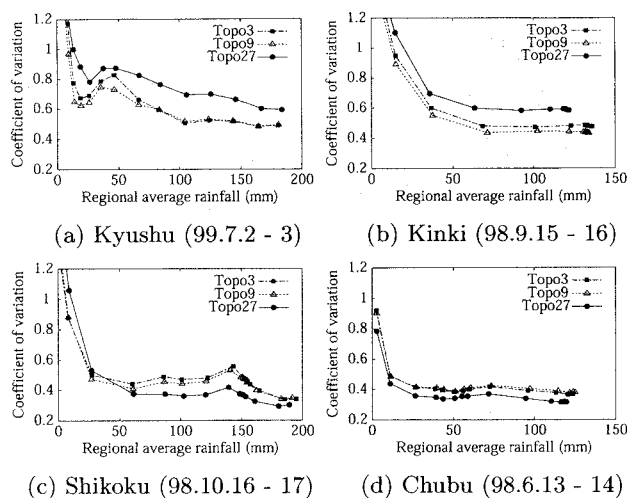


図-9 解像スケールの異なる地形を用いたシミュレーションによる標高依存直線まわりの変動係数の推移

な山岳による地形効果が卓越しており、スケールの小さな地形は主に変動を増大させるノイズとして働いていると思われる。また、Topo56 のケースでは、さらにスケールの大きな山岳までが平滑化の影響を受けるため降雨分布に対する地形効果が小さくなり、一転して変動が大きくなったと考えられる。

このように、降雨-地形関係においては、領域の山岳スケールがどの程度のスケールであるかが非常に重要な要素であり、そのスケールの大小によっては、同じスケールの地形であっても降雨分布に対して異なった影響を及ぼすことが明らかとなった。ただし、本論文では主にメソβスケールの降雨-地形関係を対象としたが、他の時空間スケールを対象とした場合には、地域によって上記とはまた異なったスケールの地形が卓越した影響力を持つと考えられる。したがって、普遍的な降雨-地形関係を明らかにするためには、このような降雨分布の時空間スケールや地形の空間スケールを考慮することにより、地域特性によって変化する降雨-地形関係の本質をまず見極めることが重要であろう。

5. 結論

以上、本論文では、降雨の物理的・確率的分布構造モデルの構築を目指して、数値シミュレーションに基づいた山岳域における降雨-地形関係の解析を行った。本論文で得られた成果は以下の通りである。

はじめに、モデルによって再現された日本の複数地域の降雨分布において、標高依存直線および時間積分過程の概念が成立することを確認するとともに、降雨-地形関係が地域によってどのように異なるかを明らかにした。また、対象地域における山岳スケールの大小によって、同じ解像スケールの地形であっても降雨分布に対して異なった影響を及ぼすことを明らかにし、地形の空間スケールが降雨-地形関係における重要な要素の一つであることを示すことができた。

今後は、さらに多くの事例に対してシミュレーション

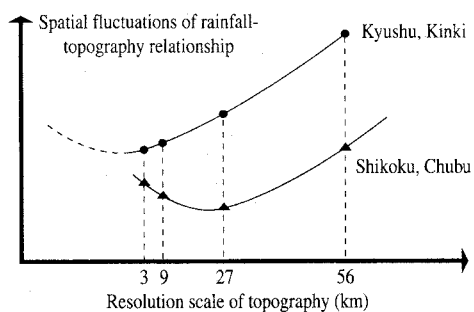


図-10 降雨-地形関係の空間変動量と地形解像スケールとの関係を表した概念図

を行い、統計的な観点から降雨-地形関係を明らかにするとともに、仮想条件を用いたシミュレーションによる同関係のメカニズム解明に取り組む予定である。

参考文献

- 1) Spreen, W. C.: A determination of the effect of topography upon precipitation, *Trans. Am. Geophys. Union*, Vol.28, pp.285-290, 1947.
- 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) Linsley, R. K.: Correlation of rainfall intensity and topography in northern California, *Trans. Am. Geophys. Union*, Vol.39, pp.15-18, 1958.
- 4) Williams, P. and Peck, E. L.: Terrain influences on precipitation in the intermountain west as related to synoptic situations, *J. Appl. Meteor.*, Vol.1, pp.343-347, 1962.
- 5) Lee, C. H.: Precipitation and altitude in the Sierra, *Mon. Wea. Rev.*, Vol.39, pp.1092-1099, 1911.
- 6) Alter, J. C.: Normal precipitation in Utah, *Mon. Wea. Rev.*, Vol.47, pp.633-636, 1919.
- 7) Henry, A. J.: Increase of precipitation with altitude, *Mon. Wea. Rev.*, Vol.47, pp.33-41, 1919.
- 8) 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.
- 9) 鈴木善晴・諸橋真琴・中北英一・池淵周一：3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，*水工学論文集*，第46巻，pp.13-18，2002.
- 10) Colton, D. E.: Numerical simulation of the orographically induced precipitation distribution for use in hydrologic analysis, *J. Appl. Meteor.*, Vol.15, pp.1241-1251, 1976.
- 11) Alpert, P.: Mesoscale indexing of the distribution of orographic precipitation over high mountains, *J. Clim. Appl. Meteor.*, Vol.25, pp.532-545, 1986.
- 12) Barros, A. P. and Lettenmaier, D. P.: Dynamic modeling of orographically induced precipitation, *Rev. Geophys.*, Vol.32, pp.265-284, 1994.
- 13) 大石哲・木谷有吾・中北英一・池淵周一：豪雨の生起・発達に地形が及ぼす影響に関する数値実験的研究，*京都大学防災研究所年報*，第39号/B-2，pp.1-20，1996.

(2002. 9. 30受付)