

降雨の時空間分布特性の地形依存性

中北 英一・菅原 竜也・岡田 憲夫・池淵 周一

DETERMINATION OF DEPENDENCE ON GEOGRAPHICAL FEATURES FOR TEMPORAL-SPACIAL RAINFALL DISTRIBUTION CHARACTERISTICS

By Eiichi NAKAKITA, Tatsuya SUGAHARA, Norio OKADA and Shuichi IKEBUCHI

Synopsis

Taking distribution of the growthdecay rate of rainfall intensity as a random field, we tried to find and model some relations between parameters of the field and geographical features beneath the field. The purpose of the modeling is to eventually create a new methodology for design rainfall. We used a time series of horizontal radar images which were obtained at 5 minute intervals over Kagoshima Prefecture in Japan. The length of the time series is one day. As a result of this research, temporal correlation of the growth-decay rate, for a scale of moving average which is more than 15km, is higher over land area than over ocean indicating a relationship between land forms and rainfall. Next, in regards to the spatial correlation, encouraging results were obtained for the qualitative relationships between the geographical features and rainfall.

1. 序論

わが国では季節による気候変動が激しく、地形も複雑であり、細かな地域単位での水循環の過程を正しく把握することは非常に難しい。特に、降水過程における雨域の発生・発達・停滞・衰弱などの変動は地形的あるいは地域的な影響を大きく受け、その現象を正しく把握し、予測することを一段と困難にしている。

本研究では、実現現象の構造を知るための指標として、雨域の移動にそった降雨強度の発達・衰弱を表す、発達・衰弱量に注目する。この発達・衰弱量を各メッシュごとの値として導入し、その上で、確率場としての発達・衰弱量について、時空間的持続性、スケール効果を解析することにより、雨域の変動に対する地形的、地域的な特徴を捉えることができると考えられる。さらには、それを地形と関連した確率場として捉え、確率モデルを構築することによって、計画降雨を算定する手法を開発することを目的とする。本研究では、そのステップとして、発達・衰弱量の時間的持続性と地形との関係、またそのスケール効果を定性的に解析する。

尚、本研究では鹿児島豪雨のあった1993年8月6日の国見山レーダー1日分のデータを用いる。

2. 移流モデルを適用した発達・衰弱量の算出

2.1 国見山レーダー雨量計の概要

降雨分布の地形依存特性を解析するにあたり、その分析の対象とするデータは、建設省の国見山レーダー

雨量計のものを用いる。国見山レーダー雨量計は鹿児島県の大隅半島に位置し、レーダーサイトの緯度、経度は、それぞれ31度18分27秒、131度0分56秒、標高は902.5mである。観測は、定量観測域半径120km円内を0.8度の仰角固定観測で行っており、受信電力の5分間の25回転分の平均値を測定している。また、電磁波の周波数は5300MHz、波長は5.66cmのC-Bandを用いている。ここで、レーダーサイト付近の地図と地形図をfig. 1に示す。



fig. 1 Topographical map of domain observed by the Kunimiyama Radar

レーダー反射因子 Z [mm^6 / m^3] と降雨強度 R [mm / hour] との関係はレーダー情報と地上雨量計による降水情報とから統計的に算定され、

$$Z = BR^\beta \quad \dots\dots\dots (1)$$

という関係があることが知られている。

B , β の推定は、現行では層別平均値法¹⁾を用いており、レーダー反射因子 Z から、 $(B, \beta) = (200, 1.6)$ を用いて仮の降雨強度推定値 R を計算し、

$$R \leq 8 \text{ [mm / hour]} \text{ の場合} \quad \dots\dots\dots (B, \beta) = (650, 1.2)$$

$$8 \text{ [mm / hour]} < R \leq 11 \text{ [mm / hour]} \text{ の場合} \quad \dots\dots\dots (B, \beta) = (1572, 0.68)$$

$$11 \text{ [mm / hour]} < R \text{ の場合} \quad \dots\dots\dots (B, \beta) = (125, 1.6)$$

によって、最終推定値を求める。

層別平均値法とは、多数の観測結果をベースに、レーダー反射因子を細かな強度範囲で分割し、その範囲内での反射因子と地上雨量とから各範囲ごとの B , β を同定する方法である。観測されたレーダー反射因子と地上雨量との間にはかなりのばらつきがあり、統計的に得られた降雨データは小さいものが多いが、この

方法によればそのようなデータの偏りの影響の少ない、降雨特性をより正確に反映される変換を行うことができる。

以下本論文ではレーダー反射因子ではなく、上式により推定した降雨強度をベースに解析を行う。

2.2 対象領域の平均強度分布

入手したデータは、国見山レーダー雨量計で観測された、鹿児島豪雨を含む1993年6月2日から9月6日まで約3カ月間のもので、80×80個のメッシュ（一つのメッシュの大きさは3km×3km）ごとのdBZ値の入ったデータである。なお、このデータは雨滴や雲、大気ガスによる減衰を考慮していない。

この約3カ月間データの中で、災害のもっとも大きかった8月5日～7日の豪雨にまず注目し、AVS（Advanced Visual Systems）によって5分を一コマにした動画を作成することにより、地形的、地域的な雨域の発生・衰弱などを視覚的にみることを試みた。動画により視覚的に観察する際には、その動きの速度を調節し、例えば動画の速度が遅いときには小さなスケールの挙動を、速いときは大きなスケールの挙動を見ることができ、また部分的に拡大、縮小することで大規模な雨域の変動から細部の地域的な変動までを捉えることができるように注意した。ここでは、8月6日0:00から8月7日0:00までの1日での雨域の地域的な変動に対して考察したことを述べる。なおこの間の動画のうち9:00～11:00、17:00～19:00における15分間隔の画像に対してはそれぞれfig. 2, fig. 3に示す。

まず、雨域の移動する方向は、この時間帯の前半は全体として南西から北東の方向に移動していたが、徐々に東、南東と向きを変えていった。この時、地形的な影響を考察する立場としては、雨域の移動する方向に依存して雨域変動の様子は変化すると考えられるので、方向ごとに分類してみる必要があると考えられる。よって、移流ベクトルの y 成分が正負が逆転する時点、すなわち北東方向への移動から次第に南東方向への移動に変化する時点である6日正午付近を境に、前半と後半に分けて考察することにする。

(1) 6日0:00～6日12:00

この時間帯は全体的に東方向から北よりに雨域が移動している様子が観察される。また豪雨の強くなる時間にあたるため、雨域の発生、発達が盛んである。地域的にみると薩摩半島の西、能間半島の周辺で多く発生し、甕海峡付近で発生した雨域は出水山地に沿うように北東方向に発達しながら進んでいる。また鹿児島湾付近では霧島山に向かって発達し、桜島付近でも発生している様子が何度か見られる。逆に大隅半島の高隈山地周辺、志布志湾の周辺あるいは観測範囲の北東、宮崎県中央部あたりから太平洋上にかけて減衰傾向にある。また大隅半島の鰐塚山地周辺では雨域が停滞しているように見られる。

(2) 6日12:00～7日0:00

この時間帯は、雨域の移動方向が次第に南向きに変わっていき、降雨は徐々に弱くなっていく。地域的には薩摩半島の西側、甕海峡のあたりで発生した雨域が南東方向へ移動するにつれ発達して鹿児島市の方向へ向かっていく様子が観察される。この日の夕方、鹿児島市は激しい豪雨に襲われ大きな被害を出したが、その様子をうかがい知ることができる。また薩摩半島の南部の内陸部で発生した雨域が鹿児島湾にかけて発達し、大隅半島の先端、佐多岬付近では半島の西岸に沿って発生、成長をしている様子がみられる。逆に大隅半島の鰐塚山地付近から大隅半島の南東岸、都井岬方向には減衰する傾向が観察される。

2.3 発達・衰弱量の導出方法

本研究では、雨域の発達・減衰を表現する指標として、移流モデル²⁾の発達・衰弱量を用いる。まず、移流モデルについて概述する。

地点 (x, y) 、時刻 t での降雨強度を $R(x, y, z)$ とすると、移流モデルの基礎方程式は、

$$\frac{\partial R}{\partial t} + u \frac{\partial R}{\partial x} + v \frac{\partial R}{\partial y} = w \quad \dots\dots\dots (2)$$

のようになる。このとき、移流ベクトル (u, v) 、発達・衰弱量 w を、位置座標の一次式、

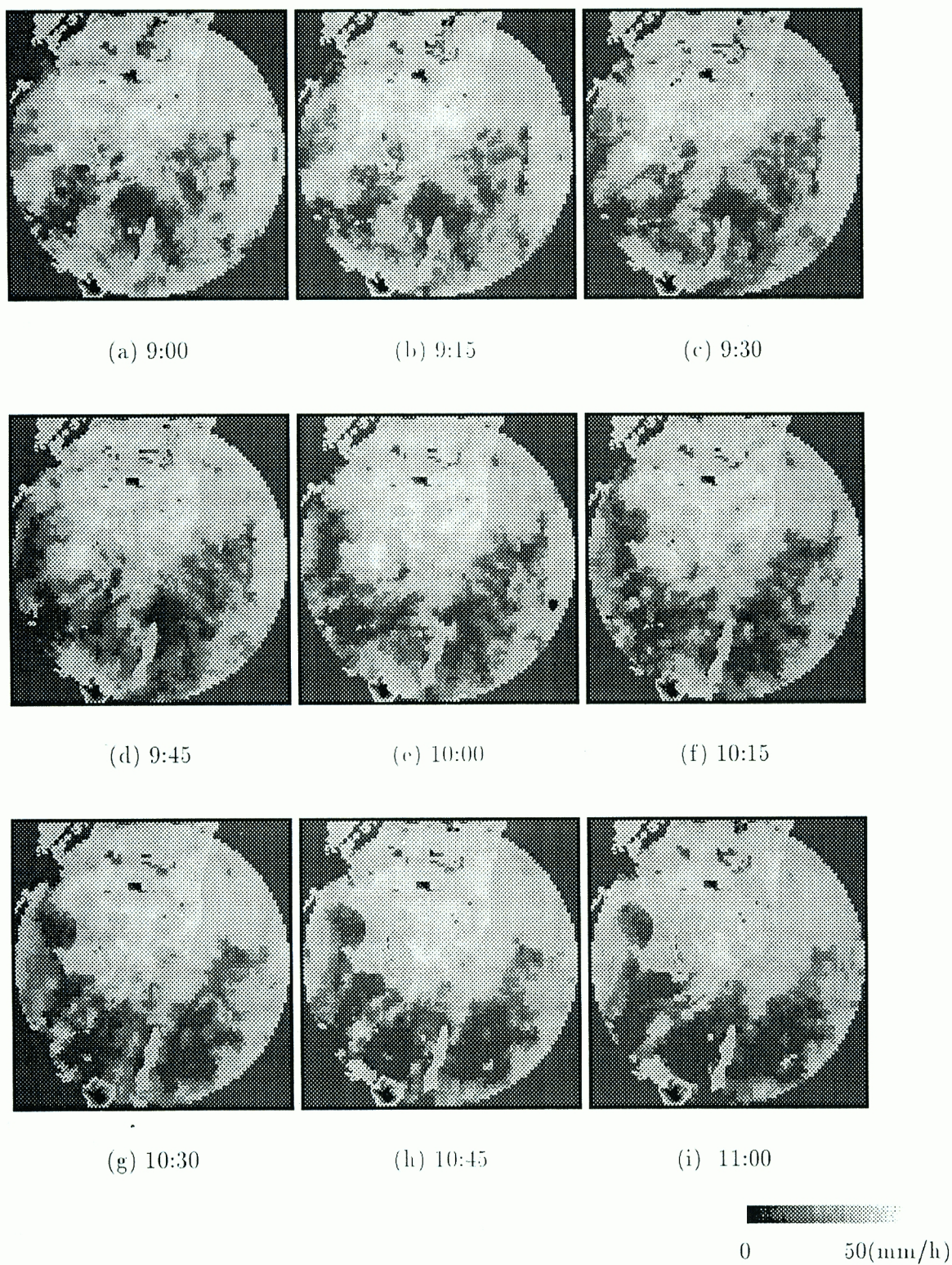


fig 2 Transition of the distribution of rainfall intensity estimated from radar information (09:00~11:00, Aug.6,1993.)

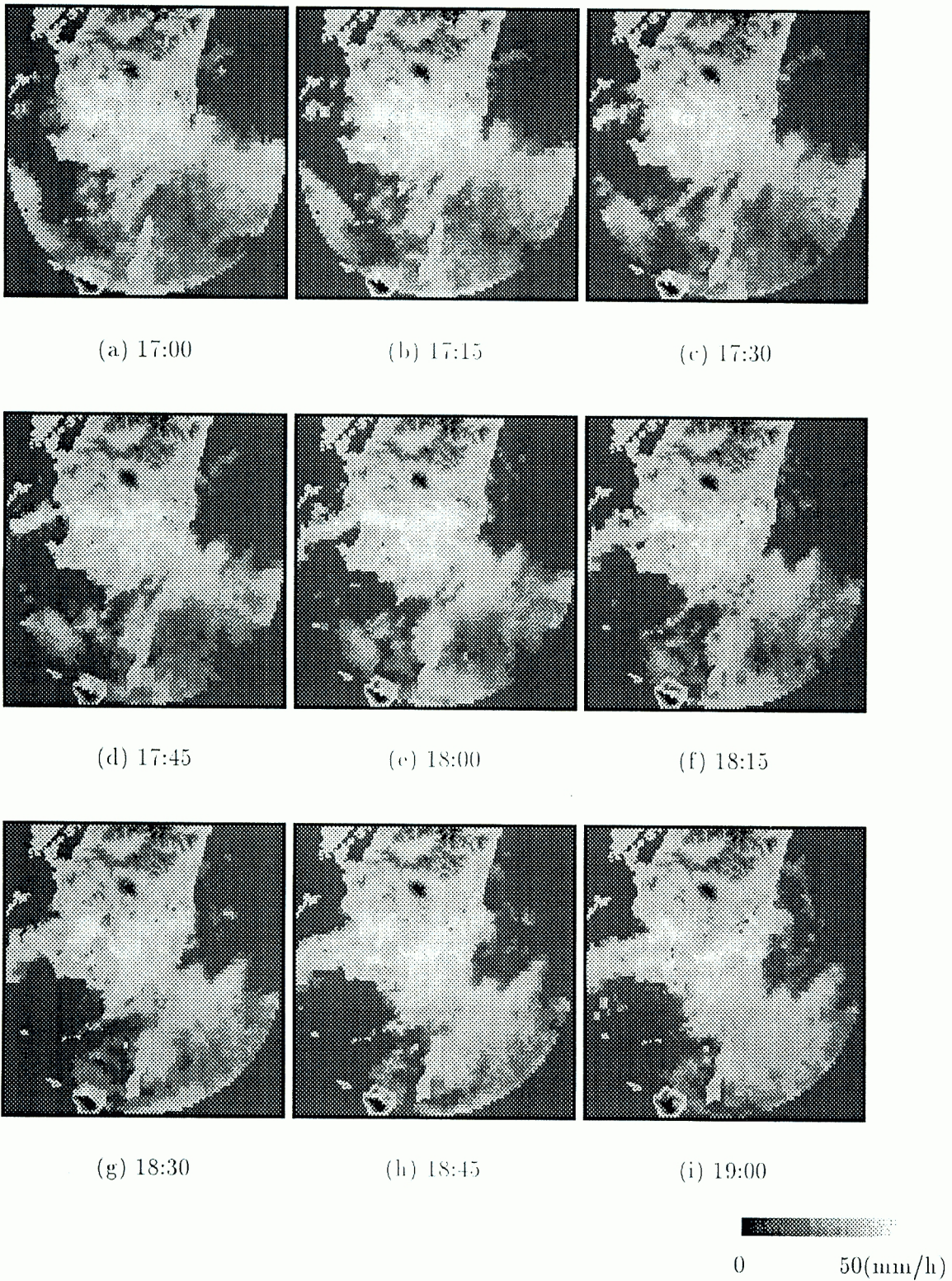


fig 3 Transition of the distribution of rainfall intensity estimated from radar information (17:00~19:00, Aug.6,1993.)

$$u = c_1x + c_2y + c_3, \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$v = c_4x + c_5y + c_6, \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$w = c_7x + c_8y + c_9, \quad \dots\dots\dots(5)$$

と表す。ここで、 $c_1 \sim c_9$ は推定するパラメータである。

高棹³⁾らは、移流ベクトルの各係数 $c_1, \dots, c_6$ は時間的になだらかに推移し、徐々に変動していくのに対し、発達・衰弱量に関する係数 c_7, c_8, c_9 は持続性があまりなく、その各係数は平均値0でほとんどランダムに推移する(白色性)と報告している。そこで本研究では、まず(5)式の各係数を0、すなわち w を0として(3)、(4)式の係数 $c_1 \sim c_6$ を同定し、移流ベクトルを求めた後、再び(2)式にもどって w の空間分布を求める。このように地点ごとに w を求めることにより、局地的な地形の影響、地域的な影響をより反映した形で解析することが可能となるとともに、地域ごとにみた場合は時間変動特性が白色雑音でない可能性が大いにあると考えられる。

ここでスケール効果を見るとは、次のような意味で用いている。すなわち、発達・衰弱量の値は、それぞれのメッシュ間での変動性が大きいいため、小さなスケールでみた場合、地形の影響があったとしても、小スケールの変動におおい隠されて、その影響を見る事が難しい。そこで全領域の降雨強度面を空間的に平滑化し、発達・衰弱量の分布を滑らかにする。すなわち小スケールの変動成分を除去することにより大きなスケールで議論できるようになり、地形との関連性を見いだせる可能性が生じてくる。言い換えれば、どの程度の平滑化を行えば、地形が雨域の変動に及ぼす効果を見出すことができるかを考察することになる。

具体的には、各中心メッシュに対して周辺の9個のメッシュの降雨強度を平均してその中心メッシュの降雨強度とする。すなわち 3×3 個($9 \text{ km} \times 9 \text{ km}$)のメッシュの値を平均したことになる。この場合を $I_{msn} = 2$ とよぶことにする。同様に 5×5 個($15 \text{ km} \times 15 \text{ km}$)のメッシュの値を平均した場合を $I_{msn} = 3$ 、 $(2k-1) \times (2k-1)$ 個($3(2k-1) \text{ km} \times 3(2k-1) \text{ km}$)のメッシュを平均した場合を $I_{msn} = k$ とする。ただし各中心メッシュに対して平均化に関わる周辺のメッシュが1つでもレーダーの観測範囲外にある場合は、その中心メッシュの値は解析には用いないものとする。

3. 時間持続性とスケール効果

本節では、空間スケールに関しメッシュの平均化の度合いとして $I_{msn} = 1 \sim 4, 8$ の場合につき、地形的な雨域の変動の影響をより的確に表現できるスケールについて考察を行うとともに、風速場による影響を考慮しながら雨域の地形的な依存性を特徴づけるための解析を行う。

ここでは空間スケール $I_{msn} = 1, 2, 3, 4, 8$ に対して算定された、 w の空間分布の持続性を調べるとともに、どの程度大きなスケールになると発生・発達・停滞・衰弱などの雨域の変動がよりうまく特徴づけられるかを見積もり、それぞれのスケールに対して、地形のスケールの影響などに関する考察を行う。ここで、まずそれぞれのスケールに関して8月6日0:00～8月7日0:00の5分ごとの発達・衰弱量の分布から各メッシュごとに自己相関係数を計算した。その中の一つとして、桜島付近のメッシュについてのコレログラムをfig. 4に示す。また各メッシュごとに求めた自己相関係数をtime lag 5分ごとに30分まで空間分布で示したものがfig. 5である。この図では自己相関係数が1に近づくほど白色になり、-1に近づくほど黒色になるように色分けしている。これらを用いてスケール効果の検証を行う。

これらの図からいえることは全体的にみると南方よりも北方の方が持続性が高いということである。陸地の多い北方の方が持続性が高いということは、雨域の変動に何らかの地形的な特徴があることを示しており、したがって、動くことのない地形の構造が雨域の変動に対して影響を及ぼしているところが大きいと見ることができる。この場合、上にも述べたが I_{msn} が大きくなるほど一般に持続性が高くなる。ただし、どのスケール以上になれば地域の特性をよく表し、どのスケールより小さい場合ランダムとなって特徴が現れ

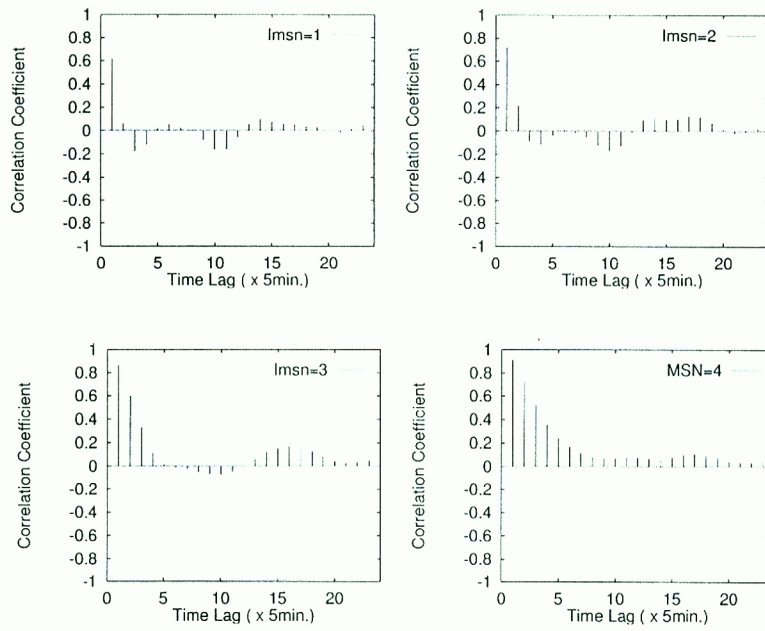


fig 4 Temporal continuity of growth-decay rate (Sakurajima Is.)

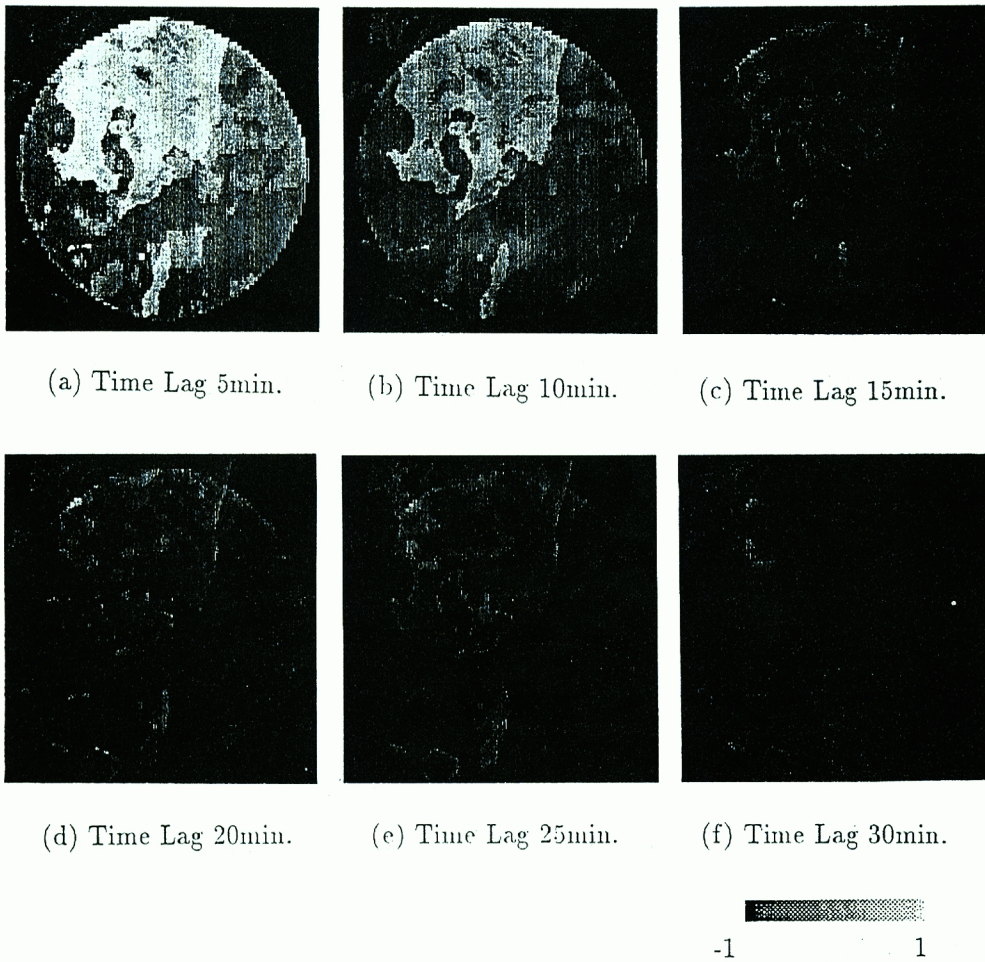


fig 5 Distribution of autocorrelation coefficient ($l_{msn} = 3$)

なくなるのかなどは、これらの図のみでは定量的に示すことはできない。しかしスケールごとにみたとき各 time lag での相関係数の分布は、 $I_{msn} = 1, 2$ では近隣のメッシュ間ではそれほどまとまりがないのに対し、 $I_{msn} = 3$ あたりになるとかなりまとまり（空間的な相関性）がでてくるために地形との関係付けができる可能性が高くなると考えられる。またコレログラムをみると、上の考察と同様に $I_{msn} = 1, 2$ ではかなり白色性が強くなるが、 $I_{msn} = 3, 4$ では自己相関係数の持続性が高くなる。よってこれらの図からは発達・衰弱量の持続性を考慮すると、少なくとも $I_{msn} = 3$ すなわち $15 \text{ km} \times 15 \text{ km}$ 程度の平均化を行うと、地形との対応を議論できるようになると考えられる。

コレログラムから他に考察できることは、このコレログラム自体に周期性があるということである。この周期により、雨域が到来していると考えられる。本論では確率的なモデル化を行う際に、time lag の増加にともない、自己相関係数は単調に減少し、0 に収束するという形で議論している。しかし、このコレログラムにみられる周期性から、今後三角関数の導入などを考慮して解析していくことにより、メソ β スケール ($200 \text{ km} \sim 2000 \text{ km}$) 内でのメソ β 擾乱 ($20 \text{ km} \sim 200 \text{ km}$) の雨域の分布特性を議論していける可能性があると言える。

4. 発達・衰弱量の地域的傾向

これまでは移流モデルにより求められた発達・衰弱量の時間的な持続性について、いわば縦の関係のみに対して検証を行ってきた。しかし、この発達・衰弱量に関する確率モデルを構築していく上で本研究でめざすものは、時間的關係、空間的關係の両者を備えた、実現象を忠実に表すものである。したがってそれらの空間的な関係、さらにはそれらの地形との関係を把握しておくことが必要となる。

まず、求められた 1 日分の発達・衰弱量の分布のデータからそれぞれのメッシュごとにその平均値をとることにより、各メッシュの発達・減衰傾向、メッシュ間相互の関係や地形との対応性を捉えることができる。そのスケールごとの結果を **fig. 6** に示す。この図からまず観察できることは、レーダーサイトから放射状に延びた筋状の強発達・衰弱量域の正負のペアが存在することである。これは、本論の目的からすればむしろノイズに相当するものであるが、特徴がはっきりと現れているので若干の考察を加えておく。これはレーダーの特性上、やむを得ないことであり、山などの障害物によってレーダーの電波が遮断された後方では、実際の雨量強度よりも小さな値で観測されることによる（シャドウ）。そのためこのようなレーダー雨量計のデータを用いた解析を行う際にはこの影響を取り除く補正を行う必要がある。このデータは既にある程度グラウンドクラッタの補正がなされたものであるにもかかわらず、まだ完全に除去されていないことを示している。なおこれらの放射状の線のうち特に顕著な、レーダーサイトから北西に向かうものは高隈山によるもの、南南西に向かうものはレーダーサイト近辺の山地による影響と考えられる。一方、霧島山付近、あるいはその北部の山岳地帯でも所々に筋上ではないが、大きな発達・衰弱量の正負のペアがそれぞれ存在する。これはシャドウの影響ではなく、減算方式によってグラウンドクラッタを除去する際に、減算し過ぎたためにデータ値の空洞化が生じたためである。**fig. 6** においても、それらによる影響が空間的に平均化を行っていない $I_{msn} = 1$ の図に特に現れている。

これらの影響を定量的に除去することは難しいが、見た目では、既に表示した **fig. 5** にも影響がでている部分がどこであると特定することができる。したがって考察においては、定性的にはあるとしても、そういう領域を対象外にすることによって、誤って地域的な特徴付けをしてしまうことを避けることができる。

これまでに示した図により、考察の対象外とすべきであると考えられる地域は、霧島山周辺と高隈山地周辺である。また、鰐塚山地周辺でも正負のペアが存在しているが、しかし発達・衰弱量の平均値分布以外ではそれほど特異な結果を示さなかったことから、動画より考察された、停滞するという特徴によるものであるとみなす。これらの地域以外でみられることは全体的に鹿児島県西部、あるいは山岳地帯の西側で発達し、逆に鹿児島県東部、あるいは山岳地帯の東部で減衰する傾向がみられる。

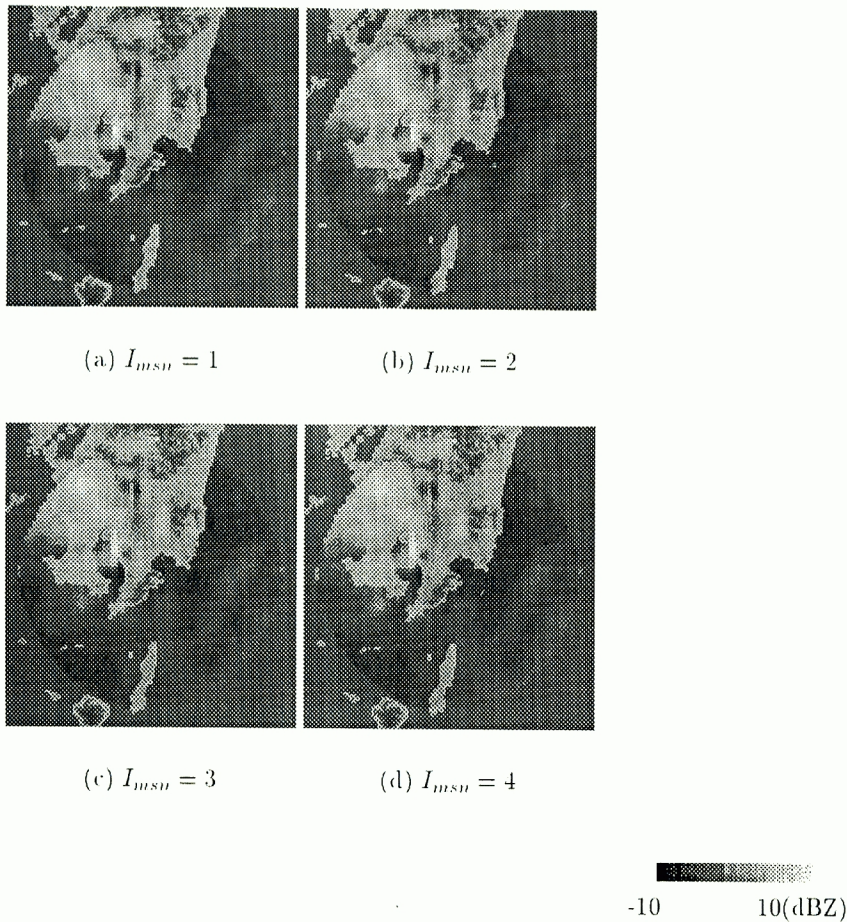


fig 6 Temporal average of growth-decay rate

5. 発達・衰弱量の時空間特性のモデル化

5.1 発達・衰弱量の時間相関特性のモデル化

fig. 4 のコレログラムを見ると、既に若干言及した周期性を除けば、各メッシュごとにつぎのような式をあてはめることができることが分かる。すなわち、確率過程 $w(t)$ に対し、time lag τ の時の自己相関係数を $\rho(\tau)$ として、

$$\rho(\tau) = e^{-\beta\tau}, \quad \tau \geq 0 \quad \dots\dots\dots (6)$$

があてはめられる。この式は $\tau = 0$ のとき $\rho(\tau) = 1$ をとり、 τ が増加するに従い減少して、0 に漸近する関数である。 β が小さいほど $\rho(\tau)$ の減少する速度が遅くなるため、発達・衰弱量の持続性が高いことを表現することができる。以下、この β を持続性の指標として議論する。

8月6日0:00～8月7日0:00の5分ごとのデータをサンプルとして、式(6)を用いて求められた β の分布を示すものが fig. 7 である。 β の値が小さいほど、すなわち持続性が高いほど黒色になり、持続性が低いほど白色になっている。まずこの β の分布をスケールごとにみると $I_{msn} = 1, 2$ ではかなりばらつきがあるように見えるが、 $I_{msn} = 3$ になるとかなり分布の形が滑らかになる。ここでは $I_{msn} = 3$ の場合に注目して地形との関連性を述べる。

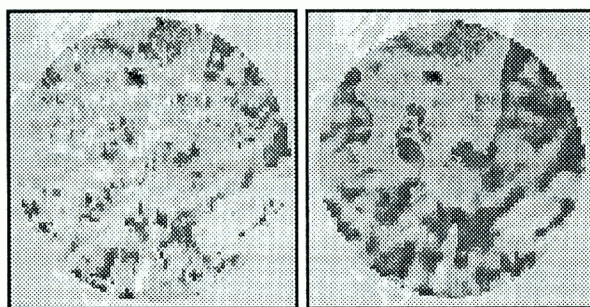
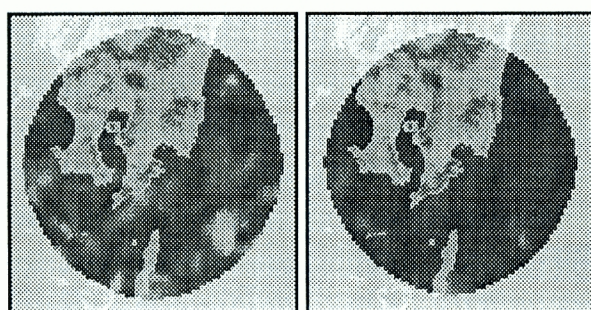
(a) $I_{msn} = 1$ (b) $I_{msn} = 2$ (c) $I_{msn} = 3$ (d) $I_{msn} = 4$ 

fig. 7 Distribution of temporal continuity of growth-decay rate

図の中心からやや左方の黒く見える2つの箇所のうち、左の方は高隈山地にあたり、その左上が桜島、さらにその左上が瀬戸内海から鹿児島市にかけての一带に対応する。また中央部から上方にひろがる黒い箇所は霧島山にあたり、中央から左下の箇所は大隅半島の南端佐多岬に対応する。降雨強度が常に0あるいは小さいときでなければ、「持続性がある」ということは発生・発達・停滞・衰弱などの何らかの性質を持続的にその地域は有していると考えることができる。そのような観点からすると、この図は降雨強度のデータから動画を作製することにより定性的に観察したときにみられた、雨域の変動の特徴と関連があるはずである。ここでは、前節の結果により、霧島山と高隈山地は考察の対象からはずすこととしたため、それ以外の地域により考察を行う。

β の値が小さく、図では黒く見える地域に対して、動画により観察された雨域の変動の特徴とを比較してみると、桜島や佐多岬では雨域が発生、鹿児島市の北西部では発達する様子が繰り返して観察されたことから雨域の発達・衰弱の持続性をよく表していることが分かる。またスケールごとにみていくと $I_{msn} = 1, 2$ で観察される濃い色の部分は霧島山や高隈山地付近のもので、 $I_{msn} = 3, 4$ になると色が薄くなり、またその範囲もせまくなっている。これらの地域は4において述べた、グランドクラッタを除去する際に減算化しすぎたことによって生じた空洞部分であるため、 I_{msn} が小さいときには時間的な持続性が高く、 I_{msn} が大きくなる程その影響が消されているものと考えられる。一方、 $I_{msn} = 1, 2$ ではそれほど濃い色の目立つことのない鹿児島市北西部に注目してみると、 $I_{msn} = 3, 4$ とスケールが大きくなるにつれて、色が濃く、広くなっている。これは、7日夕方に鹿児島市を襲った豪雨の際、この周辺で雨域が次々と発達しながら通過したことによるものであると考えられる。

このように β の分布には、動画により観察したときにみられた雨域の変動の特徴がよく現れており、 $I_{msn} = 3$ のときが特に顕著に表現されていると考えられる。したがって、 $I_{msn} = 3$ すなわち $15 \text{ km} \times 15 \text{ km}$ 程度での平均化を行うと発達・衰弱量は雨域の変動の特徴によく対応することになり、 β に関してはこのスケールで地形との関連性を見いだしていくことがふさわしいと思われる。

5.2 発達・衰弱量の空間的相関特性

次に、発達・衰弱量の空間的な相関特性を検証するため、まず、ある一つのメッシュ $w(x, y)$ の時系列と、メッシュ $w(x + \delta x, y + \delta y)$ 、 $-5 \leq \delta x, \delta y \leq 5$ の時系列との相関係数を、8月6日0:00から8月7日0:00までのデータをサンプルとして求める。その注目するメッシュに対して求められた、24個の自己相関係数について5.1の時と同様に、

$$\rho(x, y; \delta x; \delta y) = e^{-\alpha \sqrt{\delta x^2 + \delta y^2}} \dots\dots\dots (7)$$

とおき、 α の値を求め、それを全領域に適用した。ただし、地点 $(x + \delta x, y + \delta y)$ が一箇所でもレーダー観測範囲外にある時は、地点 (x, y) についての α の値は算定していない。スケールごとに $\alpha(x, y)$ の分布を表したものがfig. 8である。この図では、黒色が0、白色が0.4となるようにとり、 $\alpha(x, y)$ の値が小さくなるほど（黒色に近づくほど）、降雨強度分布の空間相関が高いということがいえる。

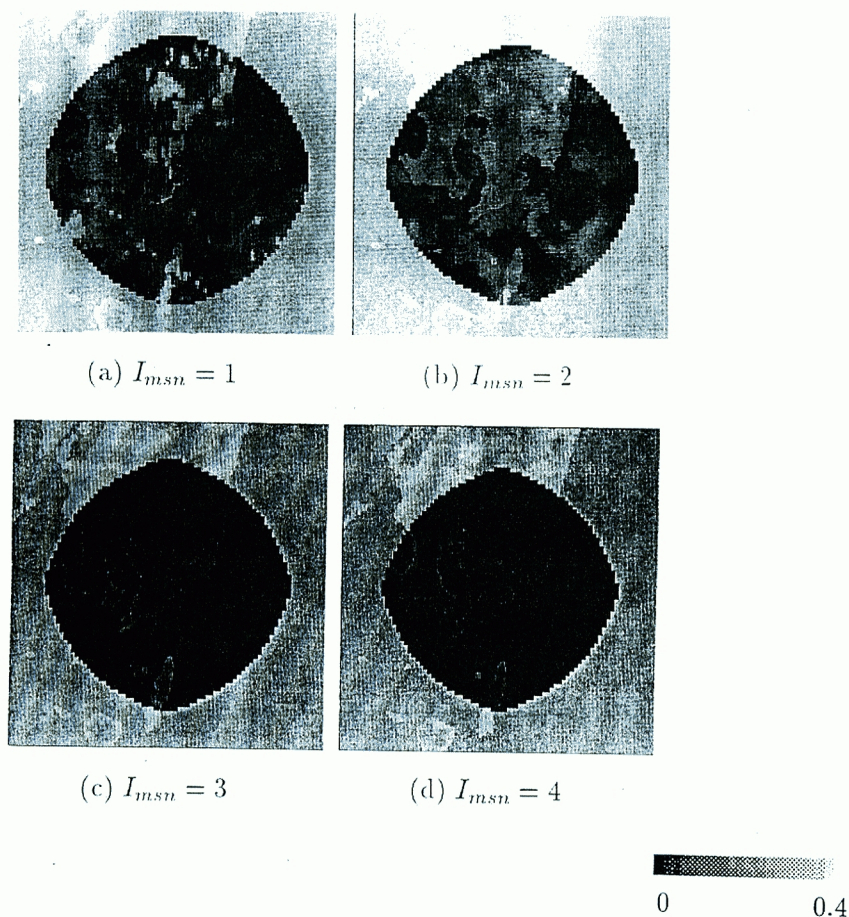


fig. 8 Distribution of spatial continuity of growth-decay rate

この図より全体的にみると、陸地の部分ほど空間相関関係が低いということが出来る。逆の場合である空間的に相関関係が高いときは、雨域は空間的に持続性を保ちながら移動しているということが出来る。すな

わち、それだけ雨域の変動に対して、複雑な地形などの影響を受けることが少ないと考えられる。その点を考慮すると、陸地の部分はその逆の性質を示し、特に山岳地帯周辺では、空間相関関係が低い地域が目立って存在する。このような地域では、周辺地域とは発達・衰弱量の変動特性が異なっていると考えることができる。しかし、鹿児島市北西部ではかなり相関関係が高くなっている。これは鹿児島市に対して集中豪雨をもたらした雨域が、この地域一帯で広がりを持って発達したために、空間的に相関が高くなったものと考えられる。また、この辺りにはそれほど高い山がなく、比較的平らな地形であることにも影響しているものと思われる。

ただし、この α は、雨域の変動に特徴があるということとは、必ずしも一致しない。雨域の変動に特徴のある地点に対し、その特徴が空間的に広い範囲にわたるものであるならば、空間的には相関が高くなり、局地的なものであるならば、相関は低くなることが考えられる。そして、それに対応した空間変動特性のスケールを地形分布が有していたなら、地形の及ぼす影響が大きい可能性が大である。逆に、地形分布の空間的変動スケールに対して雨域の空間的相関性が強い場合、すなわち地形形態の変動のスケールより雨域の変動のスケールの方がかなり大きい場合などでは、発達・衰弱量の時間的持続性が高かったとしてもその持続性は地形以外の要因が含まれている可能性があると考えなければならない。

またスケールの $I_{msn} = 2$ の場合が最もよく地形との関連性を示していると考えられる。5.1では $I_{msn} = 3$ の場合の β が雨域の変動を最もよく表していると述べたが、 α は空間相関を調べるために用いたものであるため、空間的な平均化を施しすぎたものは、あまり好ましくないと考えることができる。

5.3 発達・衰弱量と地形標高情報における空間相関の関係

前節までに得られた発達・衰弱量に関する平均値 w 、空間的持続性の指標 α 、時間的持続性の指標 β などの分布から、いずれの指標も対象領域における地形の存在、あるいは地形形状と関連させて、定性的にはなんらかの特徴を見いだすことができた。

その中で、 α の分布に関しては、いくつかの顕著な山岳及びその流れ下流方向に大きな α 域が存在することを示した。 α が大きいことは、これらの領域における w の分布が空間的に特異であることを示しており、地形の影響である可能性がかなり高い。さらに得られた特徴は、定性的には、地形分布の空間的規模に大きく左右された形、すなわち地形の複雑さに密接に関連した形で表現されている点である。そこでこの対応関係を定量的に調べるために、地形標高分布の定量的指標として、その形式上の空間相関関数と α との関係を調査する。その際の標高データの空間相関関数の指標 α_h の計算方法は、 α と同様にして行うものとする。前節の結果から空間的な変動特性を最もよく表現していると考えられるスケール($I_{msn} = 2$)に対して求めたものをfig. 9に示す。

この図においては、 α 及びの α_h 値が小さい(色が濃い)領域ほど、発達・衰弱量は空間的持続性が高く、地形的には平坦であるかあるいは滑らかであるということが出来る。九州本島及びその周辺部に関しては、比較的標高データの空間相関関係の低い(地形が複雑な)桜島北西部、霧島山北部などでは発達・衰弱量は空間的に持続性が高く、逆に標高データの空間相関関係の高い霧島山南部、鰐塚山地周辺部などでは、発達・衰弱量は空間的に持続性が低いことがわかる。よって両者には逆の相関関係、すなわち標高データの空間相関が低い(地形が複雑な)ところほど、発達・衰弱量の空間相関が高いという結果が得られている。

以上の結果によって、発達・衰弱量と地域特性を定量的に結び付けられる可能性を示すことができた。したがって本節での解析は、本研究で目指す地形を考慮した確率モデルの構築を行う上での、空間的持続性というアプローチからの手掛りになるものであると考えることができる。

6. 平均降雨強度分布の地域的傾向と本研究の今後の発展性

前章までは、降雨レーダーのデータより移流モデルを介した発達・衰弱量の導出の方法を示した後、時空

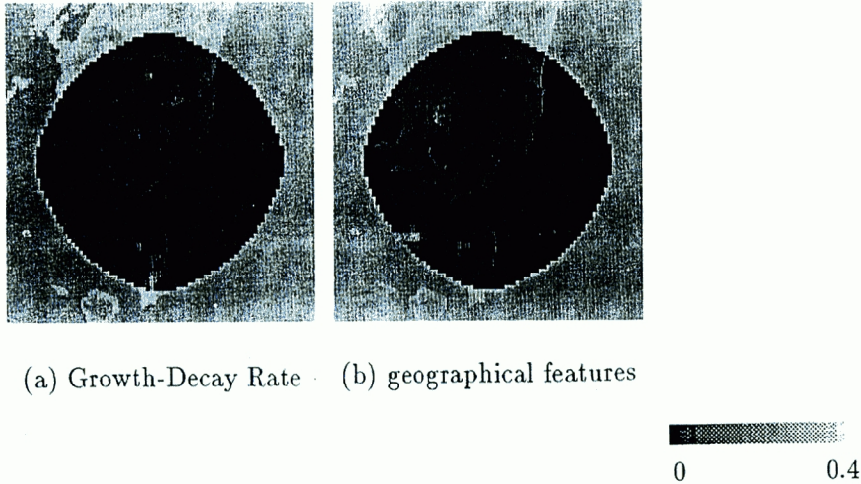


fig 9 Spacial correlation distribution of growth-decay rate and spacial correlation distribution of geographical features

間的な持続性やスケール効果の解析を行い、今後の確率モデルの構築に際して重要なパラメータになると考えられる諸量についての考察を行った。

本章では、これまでの発達・衰弱量のための解析ではなく、もう一度原点に戻り、降雨強度分布そのものを用いた解析を行う。まずその第一ステップとして、降雨強度分布の時間平均値を計算する。それにより、瞬時の降雨分布ではわからないような雨域の地域的変動特性を見出すことができるものと考えられる。また、発達・衰弱量は降雨強度の微分形であり、互いに対応関係にあると考えられるので、発達・衰弱量で把握しきれないような地形的・地域的変動特性を新たに見出せる可能性もあると考えられる。同時に、上で述べたような発達・衰弱量と降雨強度の対応関係から、移流モデルを通して得られた発達・衰弱量が実現象を適正に表現しているかの検証にもなると考えることができる。

まず、8月6日0:00から8月7日0:00までの1日間を対象として、レーダーデータより得られた降雨

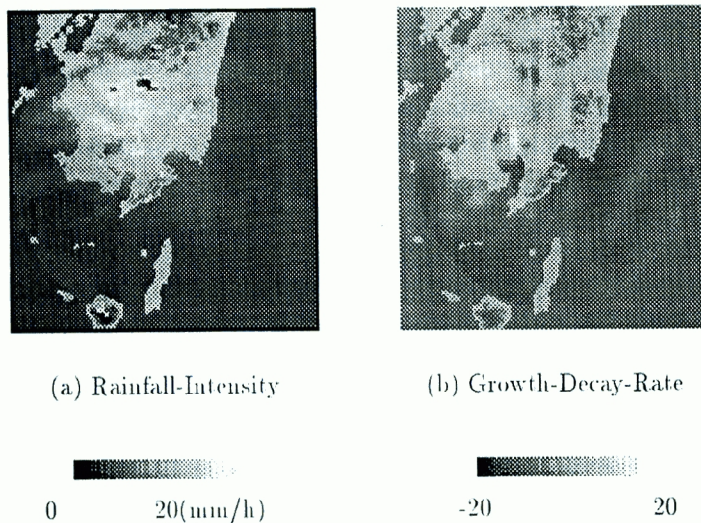


fig 10 Temporal mean distribution of rainfall intensity and temporal mean distribution of growth-decay rate ($l_{msn} = 2$) (00:00, Aug.6~00:00, Aug.7,1993.)

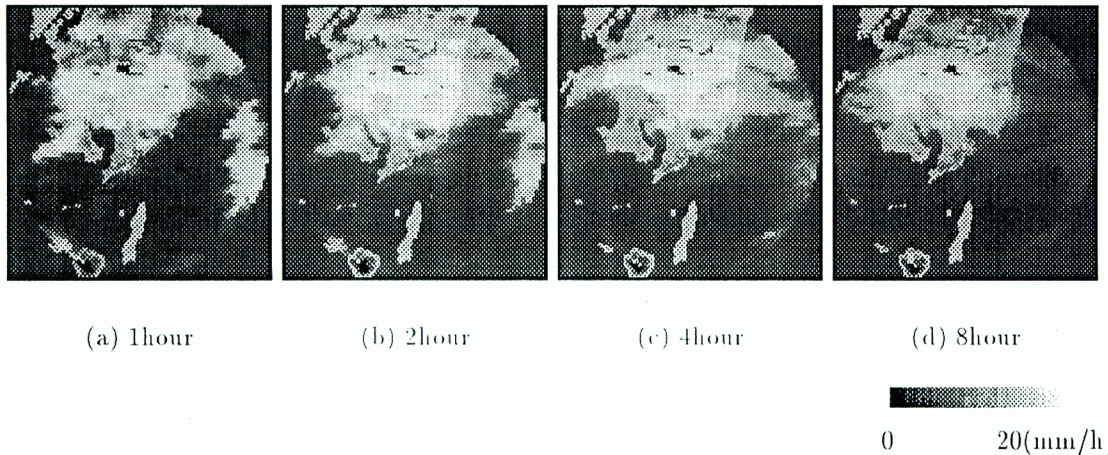
強度の各メッシュごとの平均値と、求められた発達・衰弱量の 1 日分の平均値を **fig. 10** に示す。

この図から特筆すべき点が、平均降雨強度分布図に表れている。すなわち常に発生・発達していると思われる角状（クリーク状）の降雨域が存在する。具体的にいうと、図では左上方に見える出水山地から甕島付近にかけての地域から東側に向かって強降雨域となっている地域である。この辺りから発生した雨域が、南東、東、北東方面に繰り返し発生・発達して移流した結果、このような分布が形成されたと考えることができる。

また、降雨強度の分布が徐々に大きく（図では白く表示）なる地域、例えば九州本島の西側海上から九州本島にかけて徐々に白く表示されているところなどでは、それとともに発達・衰弱量が正（発達・図では白く表示）になっており、日単位の平均値としてみたときに、降雨強度の分布と発達・衰弱量の分布が正しく対応していることがわかる。ただし、降雨強度が徐々に大きくなるとみるのは南西～北西方向から、すなわち雨域の移流方向の上流側からみたときであり、平均降雨強度分布と平均発達・衰弱量分布の両者が対応するとすれば、卓越する雨域の移流方向に依存する関係になると考えられる。

次に、8 月 6 日 9:00 からの各 1 時間、2 時間、4 時間、8 時間の平均降雨強度分布と発達・衰弱量の平均値の分布を **fig. 11** は示す。

(A) Average of Rainfall-Intensity



(B) Average of Growth-Decay-Rate

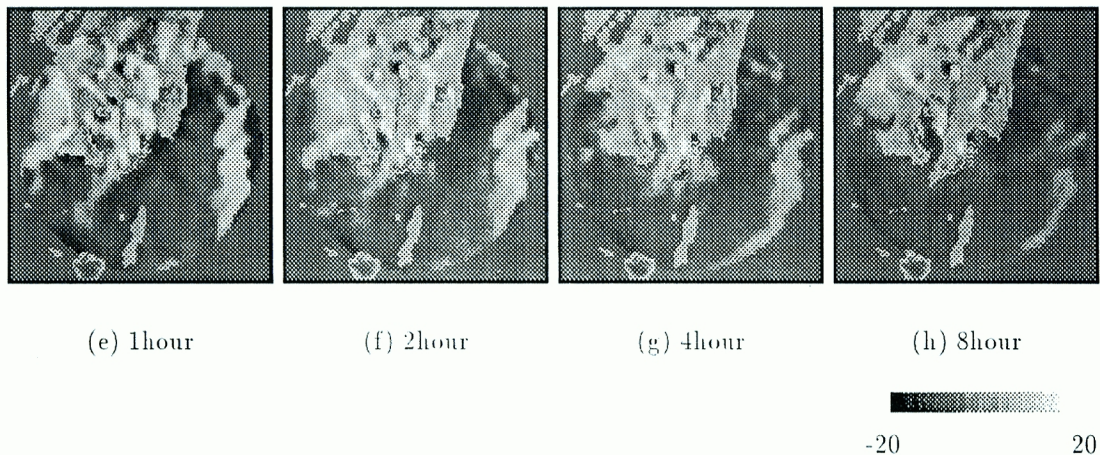


fig. 11 The 1-, 2-, 4-, 8-hour mean distribution of rainfall intensity and the 1-, 2-, 4-, 8-hour mean distribution of growth-decay rate ($I_{msn} = 2$)

この図を1, 2, 4, 8時間というように時間を追って見ると、1時間平均降雨強度分布図の右方の海上に見える強降雨域が、時間が経つにつれて消えていく一方、陸上の降雨域は平均をとる時間を増大させてもなお存在していることがわかる。これは海上の降雨域はある時間固有の降雨現象を示すもの、すなわちサンプルとした1時間において偶然その地域を雨域が通り過ぎるといったような状態であるのに対し、長時間定常的に降り続けている、すなわち平均時間を増大させてもあまり白い色が消えていかないような地域は、地形を有する陸上の部分、及び地形の影響を受けていると考えられる陸地の周辺部分にほぼ限定されてくることができるといえる。また同様のことが、発達・衰弱量に関してもいえる。したがって、雨域の変動に対して地形の影響があるというのは明らかである。

上で述べたクリーク状になっている地域と、鹿児島県東部から東方の海上に抜ける地域は、九州本島のそれぞれ雨域の移流の上流側、下流側にあたり、かなり強い降雨域が存在している。したがって、雨域の発達・衰弱が必ずしも直下の地形の標高や勾配などに直接対応しているというものではない。地形が雨域の変動に寄与するきっかけ（トリガー）の役割を果たしていたり、ある地形形状が下流側の雨域に影響をもたらしているといった考え方や、例えば九州本島全体で1つの山を形成しているというような、より大きなスケールで雨域を見るなどといった捉え方も必要である。また、地形の勾配を考えるにしてもそのスケール効果の重要性を再認識することができる。よって、今後は雨域とその真下の地形といった対応関係にとらわれることなく、雨域の移流方向の下流側に地形をずらした場合、あるいはその広がりを変現する（例えば、トポロジーとしての相似性等）ことができるような指標を考えていくことが必要である。

以上のような分布特性から見て、本研究で対象領域としている国見山レーダー観測域は、1) 複雑な地形が存在すること、2) 雨域の移流方向の上流側に大規模な地形が存在しないこと、3) 大きな地形形状の存在しない海上部との対比が可能であること、などから本研究の目的に適した地理的条件をもっているといえることができる。また、本章でとりあげた降雨強度の時間平均値分布と発達・衰弱量の平均値分布は互いに対応関係にあり、類似の意味を持つと考えられることから、互いに他方の分布からは得られないような特徴を見いだせる可能性があり、異なる2つの面、すなわち積分値と微分値という2つの面から考察することが可能となる。よって、この両者の対比も行いながら、地形条件と結び付けるためにさらに深い解析を降雨強度分布と、発達・衰弱量分布の両面から行っていくという方向が今後の本研究の進むべき方向であると考えられる。

7. 結論

本論文では、移流モデルより導出された確率場 $w(x, y)$ について、定性的に性格付けを行うという姿勢に終始し、1日分の降雨分布情報をベースにその時間的、空間的持続性とスケール効果の解析を行った。以下、得られた結果について記述する。

まず、海上より地上の方が、発達量、衰弱量ともに大きいことを示した。さらに、各メッシュにおける時間的持続性の指標である β は海上に比べて陸上の方が小さく、陸上の方が発達・衰弱量の持続性が高かった。したがって、雨域の変動には、地形に依存しているところが大きいと結論づけることができる。

一方、空間的持続性を示す指標である α は、雨域の変動特性の周囲の地点との関連性を表す。そのため、地形による影響を受け、地形分布の空間的規模に大きく左右された形で表現されていた。また、この α に対しては、地形の標高データの空間相関関係の指標 α_h を対応させ、標高データの空間相関が低い（地形が複雑な）ところほど、発達・衰弱量の空間相関が高いといった逆の相関関係があるという結果が得られた。

さらに、発達・衰弱量の空間的スケールに対しては、平均化を行わない場合、発達・衰弱量の変動性の大きさから地域的な特徴を見ることは難しいことが分かった。本論文で解析した結果から、時間的な持続性などを見る場合には少なくとも $15 \text{ km} \times 15 \text{ km}$ 、空間的な持続性を見る場合には $9 \text{ km} \times 9 \text{ km}$ 程度の平均化を行えば、特徴を見いだすことが可能となると考えられる。

最後に、これまでの発達・衰弱量のみの解析ではなく、もう一度原点に戻り、降雨強度分布そのものを用いた解析を行った。それにより、雨域の変動に対して地形の影響があるというのは明らかであることを、別の観点から示した。

以上のような分布特性から見て、本研究で対象領域としている国見山レーダー観測域は、1) 複雑な地形が存在すること、2) 雨域の移流方向の上流側に大規模な地形が存在しないこと、3) 大きな地形形状の存在しない海上部との対比が可能であること、などから本研究の目的に適した地理的条件をもっているといえることができる。また、本章でとりあげた降雨強度の時間平均値分布と発達・衰弱量の平均値分布は互いに対応関係にあり、類似の意味を持つと考えられることから、互いに他方の分布からは得られないような特徴を見いだせる可能性があり、異なる2つの面、すなわち積分値と微分値という2つの面から考察することが可能となる。よって、この両者の対比も行いながら、地形条件と結び付けるためにさらに深い解析を降雨強度分布と、発達・衰弱量分布の両面から行っていくという方向が今後の本研究の進むべき方向であると考えられる。

参考文献

- 1) 北川明・小野寺直・杉浦幸彦・桑田荘平・竹森史朗・森下和志・幸弘美・永山正典 (1994)：レーダー雨量計の雨量観測手法の統一による精度向上，河川情報研究第2号，pp.65-79.
- 2) 椎葉充晴・高棹琢馬・中北英一 (1984)：移流モデルによる短時間降雨予測手法の検討，第28回水理講演会論文集，pp.423-428.
- 3) 高棹琢馬・椎葉充晴・宝 馨・中北英一 (1984)：移流モデルによる豪雨予測手法の改良とその適用，第21回自然災害科学総合シンポジウム講演要旨集，pp.267-270.
- 4) 菅原竜也・中北英一・岡田憲夫・池淵周一 (1995)：降雨分布の地形依存特性に関するスケール効果の解析，土木学会関西支部年次学術講演会概要集
- 5) 中北英一・菅原竜也・岡田憲夫・池淵周一 (1995)：降雨の時空間分布特性の地形依存性，土木学会第50回年次学術講演会概要集