

レーダ雨量データを用いた広島県の 豪雨の解析

Analysis of heavy rainfall using radar rain gauge data
in Hiroshima Prefecture

渡邊明英¹・福岡捷二²・青山芳彦³・足立文玄⁴

Akhide WATANABE, Shoji FUKUOKA,
Yosihiko AOYAMA and Fumiharu ADACHI

¹正会員 工博 広島大学大学院助教授 社会環境システム専攻 (〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1)

²フェロー会員 Ph.D 工博 広島大学大学院教授 社会環境システム専攻 (同上)

³正会員 工修 大阪市役所 (〒567-0867 大阪府茨木市大正町9番706号)

⁴学生会員 広島大学大学院 環境工学専攻 博士課程前期 (〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1)

As an ideal soft-countermeasure to reduce the damage caused by debris-flow, a real-time alert system is necessary for rapid evacuation of people. This study evaluates feasibility of using effectively radar-measured rainfall data for the real-time alert system. For this purpose, two cases of debris-flow disaster in Hiroshima prefecture were selected. Data sets of AMeDAS, radar and telemetric ground rain gauge were employed to examine usability of radar data (accuracy), and propagation characteristics of heavy rain in particular their development, decayment and their interaction with topography. The orography effect is evaluated by comparing the forecasted and radar measured rain intensity by using the method of cross-correlation function.

Key Words : radar rainfall measurements, disaster counter-measures, orographic rainfall, cross-correlation functional method

1. 序論

広島県の山地斜面は風化花崗岩に覆われている地盤が多いため、土砂災害の多発する地域である。近年でも、1988年7月の山県郡加計町周辺での豪雨や、1991年9月末台風19号による強風などによって多数の被害が発生している。また1999年6月29日の豪雨災害では、短時間での局所的な降雨によって広島市や呉市で甚大な被害が発生した¹⁾。図1に示すように、県内には214基の地点雨量観測網が整備され土砂災害の発生を監視しているが、設置間隔が10~12kmと粗く、島嶼部では設置箇所が限られるため数が少ない。そのため、幅の狭い雨域や海上を移動する雨域の移動特性や発達・減衰を捉えられず、土砂災害への対応は遅れることとなった。一方、広島県上空のレーダ雨量観測は国土交通省の広島県と山口県の県境にある羅漢山、

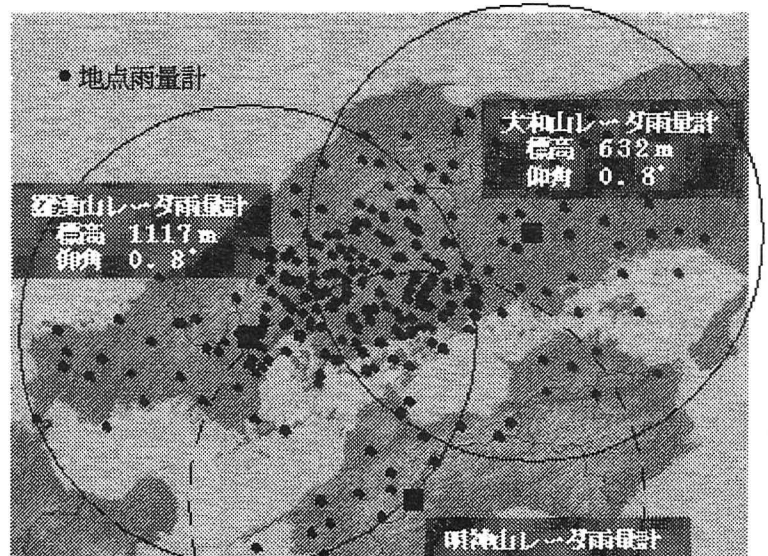


図1 地点雨量計の配置とレーダ雨量計の定量観測範囲

岡山県の大和山, 高知県と愛媛県の県境にある明神山の3基によりカバーされている。1999年の6月の災害において羅漢山にあるレーダ雨量計では, 広島市や呉市に伸びる強雨域が明確に捉えられている。

レーダ雨量情報に関する研究はドップラーレーダによる風の場合と降雨の解析²⁾³⁾⁴⁾や大気モデルを組み込んだ予測モデルの開発⁵⁾⁶⁾及びレーダ雨量の精度向上⁷⁾⁸⁾などが主体だった。時空間的に密なデータの得られるレーダ雨量計の特性を生かして, 降雨量, 雨域の移動特性の推算や地域に即した防災システムの確立に対して積極的な活用が望まれている。しかし, レーダ雨量計は時間移流外挿による運動学的雨量予測では降雨の発達・消長に伴う雨量の変化⁹⁾を予測できず, 予測雨量に誤差が生じる。また, 突発的な災害に対しては時間的な制約もありレーダ雨量や予測値は一般的には避難システムに取り入れられていないのが現状である。今後, 3次元ドップラーレーダが主力となれば降雨セルの発達状況を鉛直的に把握することができるが, 広島県上空をカバーする現在のレーダ観測システムでは鉛直的なデータは得られない。しかし, IT技術の発達によってレーダ雨量データをリアルタイムで住民に配信することが可能になってきており, レーダ雨量データの活用は防災上の観点から意義があると考えられる。

本研究では, 広島県の土砂災害を引き起こした豪雨でかつレーダ雨量計により詳細なデータの得られている1999年6月末の豪雨と1993年7月末の台風5号を取り上げ, 現行のレーダシステムでこれらの災害をどの程度予見することができたかを検討する。

2. 雨域の移動及び発達・減衰特性

1) 1999年6月現在の29日停滞前線による豪雨¹⁾¹⁰⁾

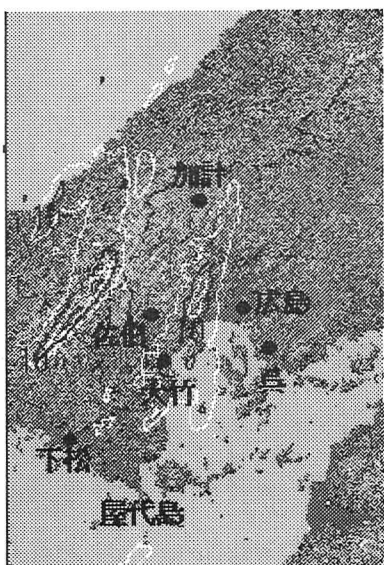


図2 29日14時降雨量分布

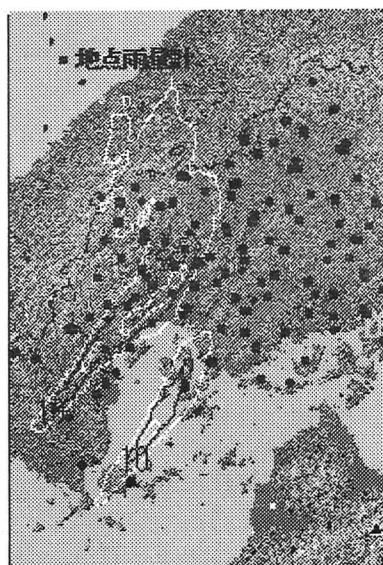


図3 29日15時降雨量分布

閉塞前線を伴った発達した低気圧の通過によって, 広島県には3つの強雨域が見られ, 広島市には2つの雨域が通過している(図2, 3)。佐伯町周辺では13時には5m/sを超える南東の風が吹いており, 地形性収束によって急激な降雨の増大が見られている。また, 15時頃屋代島付近で発生した雨域が北東へ発達しながら移動し, 呉周辺を通過している。これらの雨域は前線が東へ移動することにより新たな降雨セルの発生が終了すると, 急速に北東へ移動している。雨域の通過した地域では幅10数kmの非常に狭い範囲に, 1時間に40~70mmと極めて集中的な雨が観測され, 広島市北西部や呉市で多数の土砂災害が発生した。

(2) 1993年7月27-28日 台風5号に伴う豪雨¹¹⁾

26日3時頃発生した台風5号は北西へ移動し, 27日の11時過ぎには鹿児島県大隈半島に上陸し九州東部を通過した。これに伴い中国地方にあった梅雨前線が活発化し, 27日16時までに降り始めからの累積雨量が県内各地で100mmを超えた。図4-1に示すように台風5号は夕方山口県東部に再上陸し, そして国土交通省レーダのある羅漢山の西側を通過して島根県を抜け北東に進み, 日本海で弱い熱帯低気圧へと変わった。広島では台風5号の接近に伴い西または南西への強い風が吹くようになった。そして東側にある強雨域が北上し山口県南東部付近に達した17時ごろには時間雨量40mmを超え雨量の発達が見られる。(図4-1,2)大竹(4m/s), 広島(7m/s)では強雨域に向かう風が観測されている。これは台風による風が山地に吹き込むことにより強制上昇流が発生したことによると考えられる。山口県下松付近に上陸した別の雨

▲▲ 土砂による被災箇所

- 洪水氾濫及び冠水・護岸崩壊などによる被災箇所
- 用水路への転落により水死
- ▲ 流木の流出 (宮島水道及び広島港)

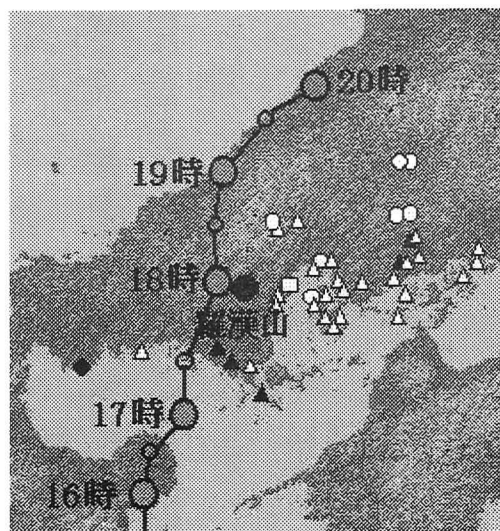


図4-1 台風5号経路図

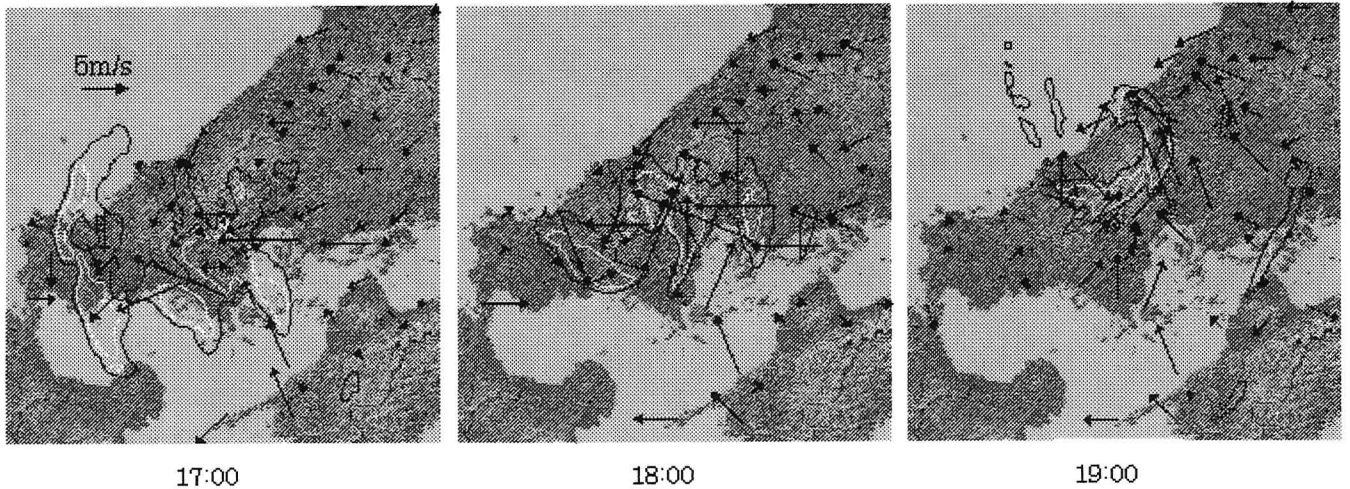


図 4-2 台風時の雨量と風向風速ベクトル

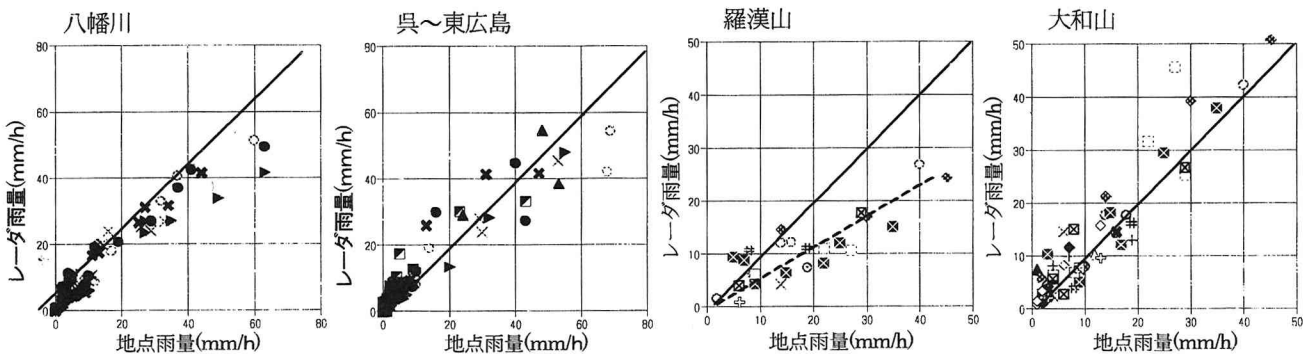


図 5 1999年6月末の災害時におけるレーダ雨量と地点雨量の関係

図 6 1993年7月28日の災害時におけるレーダ雨量と地点雨量の関係(湿舌による降雨)

域は発達しながら内陸部に向かい、17時45分には羅漢山付近で時間雨量75mm程度にも達していた。山口県下松では18時に南南西14m/s、大竹では南南東11m/sの風が観測されている。このとき30mm/h以上の雨域は東西方向に最大30km、南北方向に最大40kmに達している。

そしてさらに半時計回りに回転しつつ進行、加計町や佐伯町付近では連続的に雨域が通過することとなった。19時に30mm(加計アメダス)、31mm(佐伯アメダス)、19時までの2時間雨量で50mm(加計アメダス)、63mm(佐伯アメダス)が観測され、広島では南南西14m/sの風が観測されている。レーダ雨量の降雨分布から読み取った50mm/h以上の強雨域の速度は(17時15分から18時まで)時速60kmに達していた。翌28日にはこの熱帯低気圧に向けて湿った空気が入り込み広島県東部に大雨をもたらした。多くの土砂による被害は急傾斜地の多い島嶼部、呉市を中心とする地域で発生している。これらの土砂災害は27日中の降雨により地盤が緩んだ上に台風5号や28日の降雨によりもたらされたと考えられる。

3. レーダ雨量と地点雨量の関係

この2つの豪雨についてレーダ雨量の地点雨量に対するズレを検討する。レーダ雨量計により雨域の通過した地点雨量計を選択し、地点雨量とその直上レーダ雨量との時間雨量の比較を行う。レーダ雨量の値は中国地建の変換値を用いている。1999年の豪雨は羅漢山レーダデータのみを用い、1993年の降雨は羅漢山と大和山の2つのレーダデータを用いて検討した。

(1) 1999年6月末 広島市、呉市を通過した雨域¹⁰
 図5より地点雨量が30~40mm/hを超えるまで、レーダ雨量は地点雨量によく対応していることがわかる。これは、時間的・空間的に近い1つの降雨セル群では誤差の要因が大きくは変化しないためだと考えられる。

(2) 1993年7月末 梅雨前線と湿舌による降雨
 図6に示すように大和山レーダ雨量では地点雨量をよく表しているが、羅漢山レーダでは全体的に地点雨量に対しレーダ雨量が小さく観測されている。これは雨域がレーダサイト真近を通過したため、途中降雨減衰の影響が強かったことやレーダビームの捉えている高度が異なることなどが考えられる。同様な傾向が湿舌時の他の雨域、梅雨前線による降雨時でも観測された。

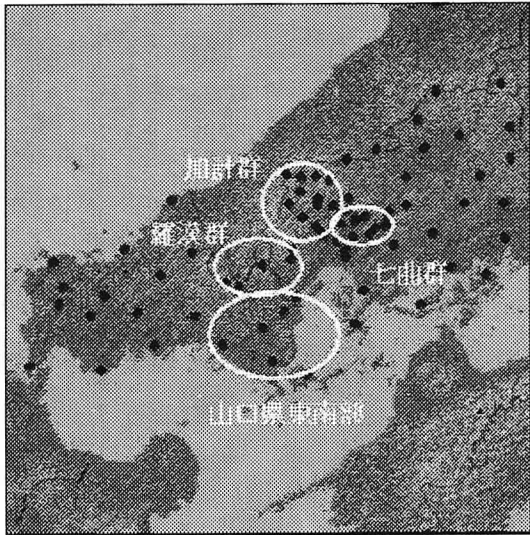


図7 地域群区分図

(3) 台風5号

台風による雨域は短時間に、そして連続的に地点雨量計の上空を通過する。よって図7のように地域ごとに地点雨量計を区分した。そして台風が通過する期間(27日16時~21時)を通して地点雨量とレーダ雨量との比較を行った(図8)。(1)や(2)と比べると対応は良くないが、これは台風が羅漢山上空を通過しているためであると思われる。

レーダ雨量計には途中降雨減衰やビームの捉える高度と雨雲の位置の関係、降雨成因による雨滴分布の違いなどの様々な理由によって、地点雨量に対して誤差を生じている。しかし、地点雨量を真値として逐次レーダ雨量を補正することによってそれらの誤差を小さくすることによって、雨域の強度についてもレーダ雨量情報を有効に利用することができると考えられる。

4. 1999年6月の豪雨における山地斜面と雨域の発達減衰の評価について

特に地形性収束による降雨の発達が顕著であった1999年6月末の災害について¹⁾、山地の勾配と降雨量との関係について検討を行う。各時間のレーダ雨量計による降雨分布を30分間平行移動させることにより推定雨量とし、実際に観測された雨量との比較を行うことにより検討する。推定雨量は相互相関法⁹⁾¹²⁾¹³⁾により検討している。

(1) 相互相関法

時刻の異なった雨域分布の相関を求めるには、時刻 t の雨域 A を含む領域を設定する。次に Δt 後の降雨分布において、領域を $(\Delta x, \Delta y)$ 平行移動させ、以下の式で求められる相互相関係数 $\rho(x + \Delta x, y + \Delta y)$ の分布図を描く。 $\Delta x, \Delta y$ はそれぞれ 1km ずつ変化させた。また

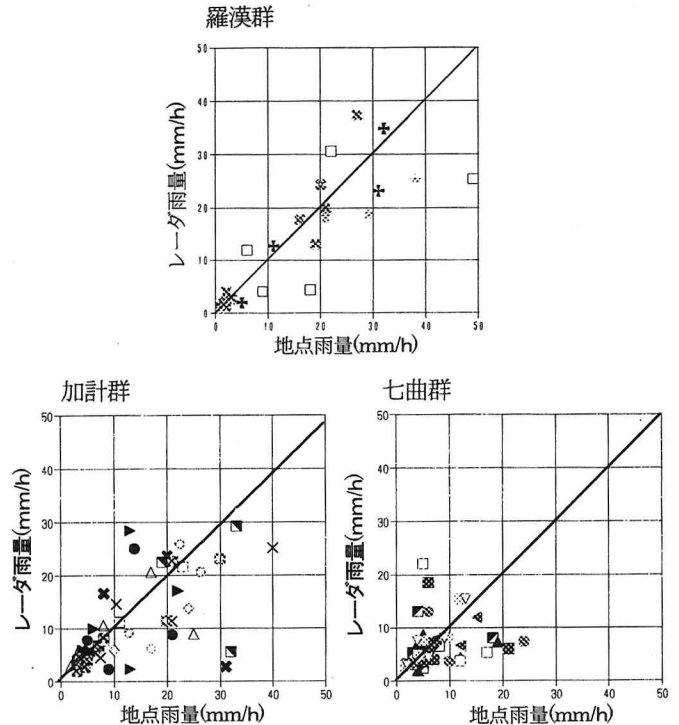


図8 1999年7月27日台風通過時の地点雨量とレーダ雨量の関係

雨量には15分間積算を用いる。これは対象とする雨域は強雨域であり降雨セルではないことと、微小時間の雨域の変動を極力なくすことを目的としている。

$$\rho(x + \Delta x, y + \Delta y) = \frac{1}{n\sigma_A\sigma_B} \sum_{i=1}^n (A_{(x,y)} - \bar{A})(B_{(x+\Delta x, y+\Delta y)} - \bar{B})$$

メッシュの間隔を 1km と固定しているためこの方法では、雨域の広がりや移動方向を考慮できないが、本方法を用いた目的が雨域の移動方向とその速度を求めることであるので、得られた結果が実際の降雨分布の推移と大きな差異がなければ差し支えないと考える。対象とする雨域の雨量強度は $5\text{mm}/15\text{min}$ 以上の雨域とした。以上の方法を用いて $\Delta x, \Delta y$ を変化させ最も相関係数の高い地点へ雨域が移動したと考える。移動ベクトルの始点は雨域の中心として検討を行う。

(2) 実測雨量と推定雨量との比較

降雨分布を30分間平行移動させ推定雨量として実測雨量との比較を行う。図9は呉において半径 5km 内平均雨量について、実測雨量と推定雨量との比較を示す。相互相関関数法では雨域全体の移動を追跡したのであり、雨域全体の速度とは異なる速度を持つ降雨セルが影響するとも考えられる。そこで呉観測所周辺で降った平均的な雨量及び最大雨量で実測及び推定雨量の比較を行う。平均的な降雨量で考えることは局所的な降雨の予測を行えないこととなるが、羅漢山レーダ雨量計の解像度がおおよそ $3 \times 3\text{km}$ であると考えたとその10倍程度(およそ 78.5km^2)は妥当であると考えられる。

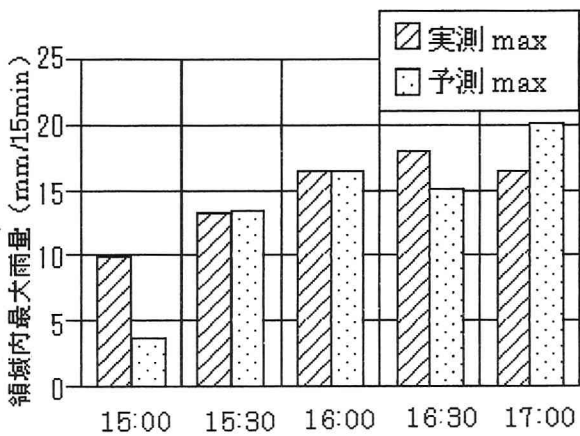
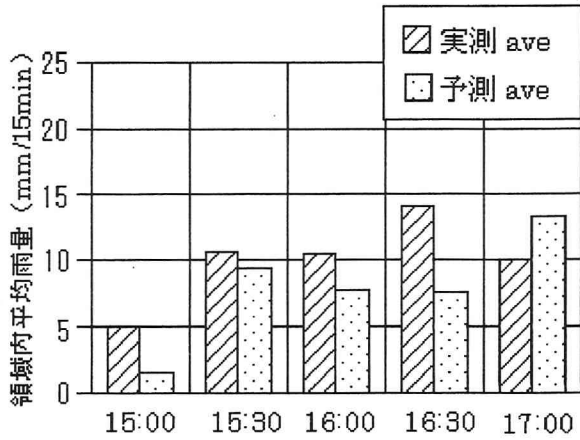
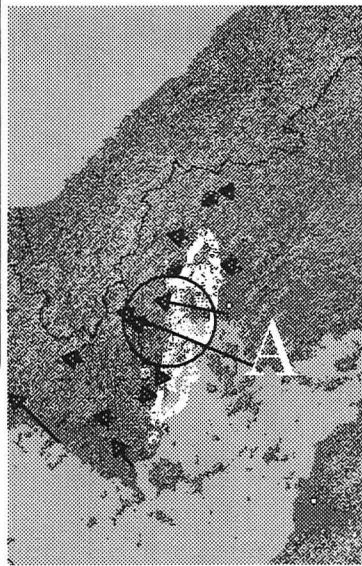
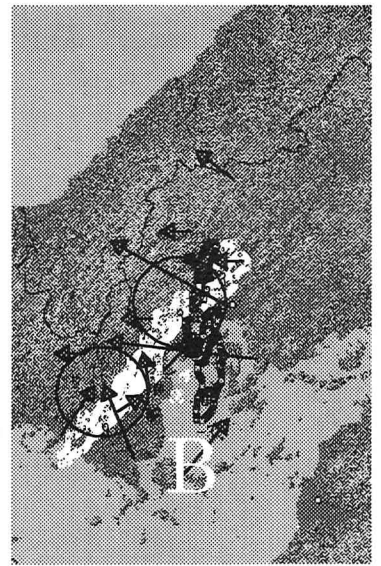


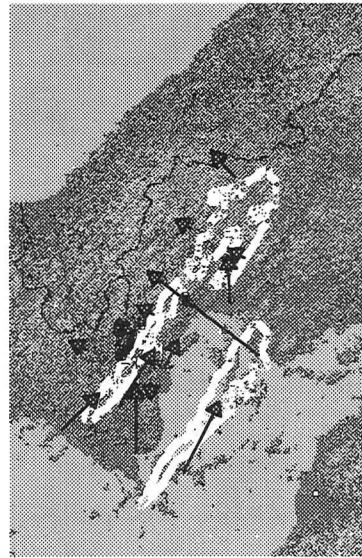
図9 呉のレーダ雨量実測値及び外挿値



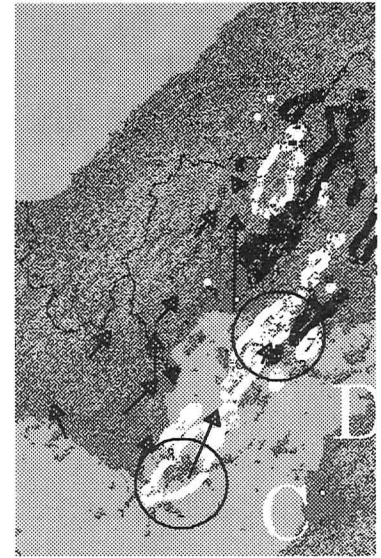
13:00



14:30



15:00



16:00

図10 実測雨量と推定雨量の差

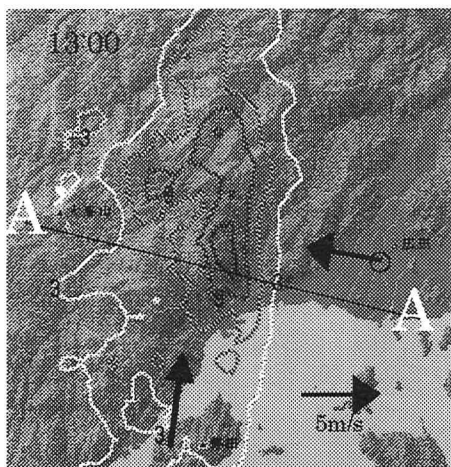


図11 ラインの選定

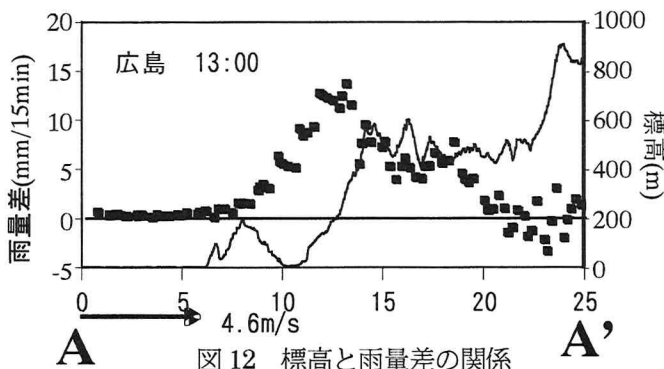


図12 標高と雨量差の関係

実測データと比較すると降り始めの時間が若干小さくなる。これは未発達降雨を用いて推定しているためであると考えられる。しかし、発達が終わる、減少に転じている時間帯の雨量は、ほぼ良好に予測できていることがわかる。

相互相関係数により雨域の移動ベクトルを求めている予測時間30分間の場合における実測雨量と推定雨量との差の空間分布を図10に示す。コンター線の白は実測値が大、つまり降雨が発達していることを示す。黒色は実測値が小を示す。合わせて予測時間30分間にアメダスで観測された風の平均ベクトルを示す。この図より山地の風上側(図中A、B、C、D点)で降雨の発達が顕著であることがわかる。予測時間15分の結果についても、発達位置は変化していなかった。よって図

中の各点で地形性収束による降雨量の増大が生じていることが考えられる。雨量の発達量は時間雨量換算にして36mm/h以上、14:30のB付近では60mm/h以上となっている。

(3) 斜面勾配と雨域の発達・減衰との関係

前述した方法の結果から、風向を考慮した検討を行う。各アメダス観測所での平均風ベクトルと平行なラインを定め(図11)、標高値と計算雨量とレーダ実測雨量の差の関係を図12に示す。この図から山地の風上斜面より手前から雨量差が増大していることがわかる。海上から一度山地斜面による影響を受けた風下側の平地や海上では雨量差が少ないことから、山地部での顕著な雨量差は地形性収束による降雨量の増大によるものと考えられる。

5. 結論と今後の課題

災害を起こした2つの豪雨を取り上げ、レーダ雨量計と地点雨量計の関係について検討した。そして雨域の移動や発達・減衰特性について検討を行った。

(1) 地点雨量とレーダ雨量の関係

レーダ雨量計には途中降雨減衰やビームの捉える高度と雨雲の位置の関係、雨滴粒形の分布等により、地点雨量に対して誤差を生じる。しかし、1つの雨域に対して地点雨量とレーダ雨量の差には一定の傾向がみられる事から、雨域を追跡し、地点雨量を真値としてレーダ雨量を逐次補正することにより、レーダ雨量情報を有効に活用できると考えられる。

(2) 山地の斜面と降雨量の増大との関係

相互相関法により求めた推定雨量と実測雨量を比較検討した。風向や、平地と山地付近における雨量差の比較から、今回の豪雨は地形性収束による降雨の増大が卓越していることが明らかとなった。地形性収束による降雨の増大には風速や斜面勾配、気温分布、水蒸気量等と関係があると考えられるので、相互相関法で求められた降雨量と、実測雨量の差の関係について気象学的な点から検討を行うことが必要である。

参考文献

- 1) 福岡捷二・渡邊明英：1999年6月29日広島土砂災害をもたらした集中豪雨の特性と土石流の発生・流動 1999年6月西日本の梅雨前線豪雨による災害に関する調査研究, pp.1-22, 2000
- 2) 中北英一・田中実・椎葉充晴・池淵周一・高棹琢馬：3次元レーダによるエコー強度情報を用いた水蒸気相変化量と大気3次元風速の同時推定手法, 水工学論文集第36巻, pp. 483-488, 1993

- 3) 中津川誠・山田正：ドップラーレーダによる風の場の観測と解析, 水工学論文集第37巻, pp. 1-8, 1993
- 4) 池永均・久米仁志・森田寛・山田正：ドップラーレーダを用いたメソβスケールの降雨特性の解析, 水工学論文集第41巻, pp. 147-154, 1997
- 5) 中北英一・杉本総一郎・池淵周一・中村徹立・奥田昌弘・山地昭彦・高棹琢馬：3次元レーダ及びGPVデータを用いた短時間予測手法の構築, 水工学論文集第40巻, pp. 303-308, 1996
- 6) 橋本識秀・宮下孝治・中津川誠：3次元ドップラーレーダを用いた短時間降雨予測モデル, 水工学論文集第38巻, pp. 753-758, 1994
- 7) 中川勝広・中北英一・佐藤亨・池淵周一：雨滴粒径分布の鉛直構造解析とレーダ雨量推定手法の構築, 水工学論文集第42巻, pp. 7-12, 1998
- 8) 中川勝広・中北英一・佐藤亨・池淵周一・B.E.VIEUX・高棹琢馬：降雨の3次元構造を考慮したレーダ雨量推定手法の構築, 水工学論文集第43巻, pp.297-302, 1999
- 9) 谷岡康・福岡捷二・伊藤繁之・小池幸也・傅雲飛：都市中小河川流域規模を対象とした短時間雨量の特性, 土木学会論文集No. 579/II-41, pp.29-45, 1997
- 10) 福岡捷二・渡邊明英・萬矢敦啓・足立文玄：1999年6月広島土砂災害時における豪雨域伝播とレーダ雨量の活用, 河川に関する技術論文集第6巻, pp.267-272, 2000
- 11) 渡邊明英・福岡捷二・萬矢敦啓・青山芳彦・足立文玄：1999年6月広島土砂災害をもたらした豪雨の移動特性とレーダ雨量に基づく短時間降雨予測, 水工学論文集第45巻, pp.307-312, 2001
- 12) 大倉博・石崎勝義・中尾宏臣・森本陸世：移流モデルによる短時間降雨予測, 第27回水理講演会論文集, pp349-354, 1983
- 13) 椎葉充晴・高棹琢馬・中北英一：レーダ雨量計による短時間降雨予測の検討, 京大防災研年報, 第26号B-2, pp165~180, 1983
- 14) 広島県砂防災害史 広島県

(2001. 10. 1受付)