

1999年6月広島土砂災害をもたらした豪雨の移動特性と レーダー雨量に基づく短時間降雨予測の適用性

THE MOVEMENT OF HEAVY RAIN IN HIROSHIMA DISASTER ON JUNE 1999 AND
THE FEASIBILITY OF RAINFALL PREDICTION BASED ON THE RADAR RAIN GAUGE

渡邊明英¹・福岡捷二²・萬矢敦啓³・青山芳彦⁴・足立文玄⁴

Shoji FUKUOKA, Akihide WATANABE, Atsuhiko YOROZUYA, Yoshihiko AOYAMA and Fumiharuru ADACHI

¹正会員 工博 広島大学助教授 工学部第四類 (〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1)

²正会員 工博 PH.D 広島大学教授 工学部第四類

³正会員 工修 アイオワ大学水理研究所

⁴学生会員 広島大学大学院工学研究科 環境工学専攻

The main cause of the Hiroshima disaster June 1999 is the heavy rain due to the cold front. This heavy rain appeared in the band with small width. It was considered that this concentration of rainfall was under the influence of the mountainous geographical features and the wind fields. A radar rain gauge was effective to know the distribution and the movement of this heavy rain, if we use the ground rain gauge together. It is considered that the radar rain gauge system is effective for short time prediction of rainfall through the movement of heavy rainfall area. We examine the feasibility of simple prediction of rainfall based on the radar rainfall gauge. As the result, it is necessary to consider the change in rainfall due to the mountainous geographical features.

Key Words : Hiroshima disaster, heavy rain, radar rain gauge, ground rain gauge, cold front

1. はじめに

1999年6月29日発達した低気圧の移動に伴う前線の豪雨が広島県全域に土砂災害をもたらした¹⁾。図-1に建設省羅漢山レーダーによる雨量分布の時間変化を示す。これより、雨域は13時から16時にかけて広島市西北部を北東に延びる帯上に、15時から18時にかけて呉市から東広島市に至る帯上に移動しており、非常に狭い範囲に豪雨が集中していたことが分る。豪雨が来襲した場所では、1時間地上雨量にして40 mm/h ~ 80 mm/hの雨が記録されている。広島県の多くの山地斜面は風化した広島花崗岩である「まさ土」で覆われ、土石流が発生しやすいという特性がある²⁾。6月23日からの先行降雨で緩んでいた地盤に急激に増大した降雨が短い時間に集中したこと、降雨量の急激な増加から2時間ないし3時間後のほぼ同時刻に災害が多発したという所にある。このため、多くの場所で同時、突発的に発生したがけ崩れと土石流等によって31名の死者、1名の行方不明者を出した。

平地が少ない広島県では山地部にまで住宅地が広がっているため、土石流危険渓流や急傾斜地崩壊危険個所の数は全国一である。多くの場所で砂防工事が行われているが、全ての危険個所に工事をするまでに至らない。そのため、避難システムの確立と運用が重要になる。広島県では214基の地上雨量計観測網に基づく土砂災害発生監視システムを導入した。しかしながら、地上雨量計は空間解像度が粗く設置場所が限られるため、強雨域の分布や移動を正確に捕らえることは難しく、図-1で示したように海上から降雨域が近づく場合には対応が遅れることになる。

土石流被害を防ぐためには速やかな避難が重要であることから、雨域の移動を追跡することが可能なレーダー雨量情報を防災・避難システムにとり入れることが肝要である³⁾。しかし、レーダー雨量は、雷雨や豪雨に対する住民の防災・避難システムには積極的に活用されていなかった。この原因として、時間スケールが短い対流性降雨に対して計測から被害予測・避難に至る過程において時間的制約があること、降雨量の誤差があることが挙げられる。

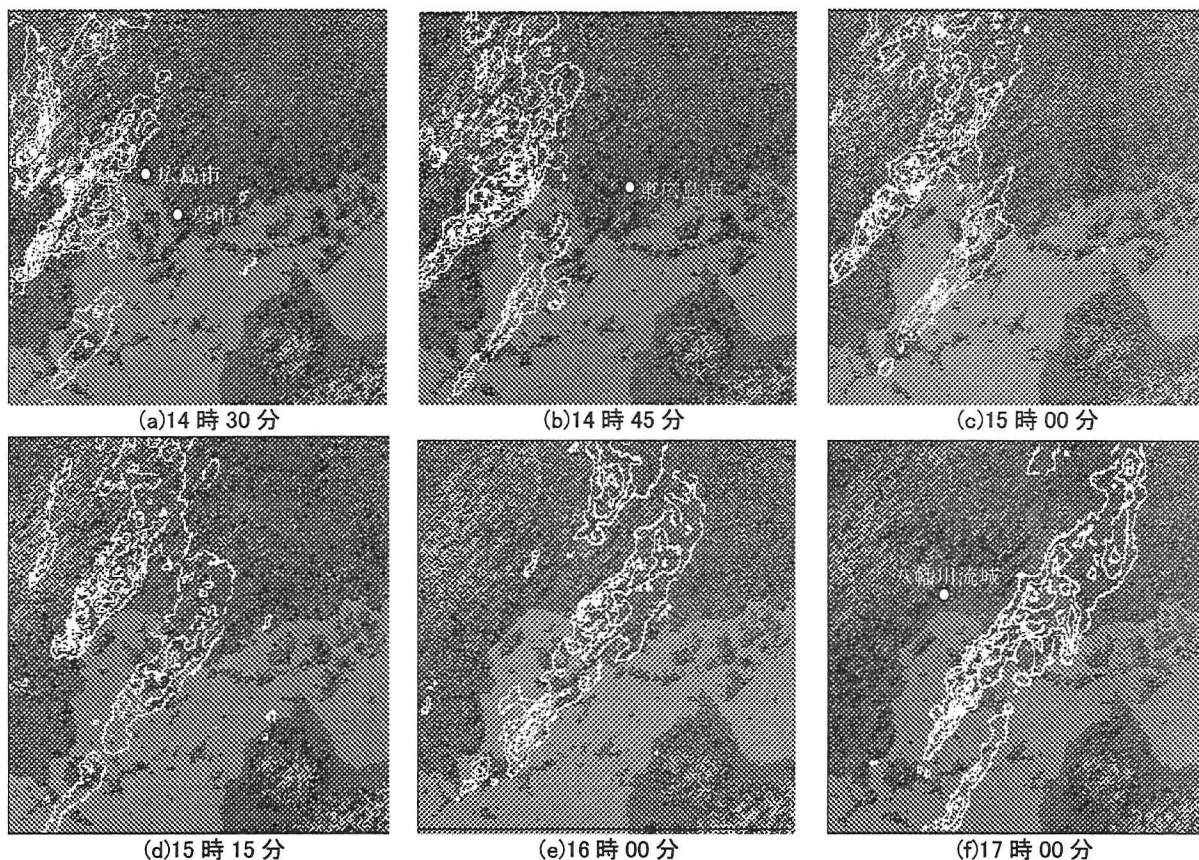


図-1 広島県付近の羅漢山レーダー雨量分布

今回の広島土砂災害ピーク時における1時間雨量の強降雨域の大きさをレーダー雨量で見ると、八幡川流域で幅2~4km、長さ約12km、呉市で幅約4km、長さ約20kmであった。この強雨域の幅が非常に狭いということが今回の大きな特徴であり、この狭い強雨域をいかに評価するか、降雨分布の空間解像度をどこまで向上できるかが、土砂災害に対する降雨情報提供に関する今後の課題と言える。

現在の降雨予測としてGPVデータがあるが、解像度が約20km程度であるため豪雨の発生を予見できても、土砂災害の発生判断には一つの山地斜面単位における降雨予測が必要でネスティング等⁶⁾⁷⁾を必要とする。ネスティングに対する地形は十分な解像度で与えられるが、初期条件及び境界条件は平滑化されたものであるため、降雨予測の際に、豪雨の時間・場所・雨量に対して課題が残ると考えられる。

一方、レーダー雨量情報に関する研究は、ドップラーレーダーの開発により、風の場合と降雨の解析⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾及び大気モデルを組み込んだ予測モデルの開発⁶⁾¹¹⁾やレーダー雨量の精度向上¹²⁾¹³⁾が主体であった。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¹⁴⁾を予測できず、予測雨量に誤差が生じる。そのため、レーダー雨量による予測やレーダー雨量値などは避難システムに取り入

れられておらず、多くの自治体では地上雨量の実績に基づいて危険性が判断されている。今後、3次元ドップラーレーダーが主力になれば降雨セルの発達状況を知ることは可能になるが、現行のレーダーシステムではこれらの情報は得られない。デジタル通信技術の発達により、レーダー雨量情報をリアルタイムで住民に伝達することは可能であり、防災上の観点からもレーダー雨量情報を配信することに意義があると考えられる。地上雨量計の設置は、気象庁や建設省などだけでなく、各地方自治体等でも進められており、実際にある地上雨量計密度も近年向上している。情報公開により、これらの地上雨量情報の多くをより有効に利用できるようなれば、レーダー雨量を高解像度で正確に補間修正することが可能になると考えられ、雨量分布の精度と密度についてはさらに向上が図られるであろう。

本文では1999年6月29日広島集中豪雨に関して、レーダー雨量計に示された雨域伝播状況及び集中豪雨の原因を示す。地上雨量とレーダー雨量の関係を示し、レーダー雨量に基づいて運動学的に外挿した雨量と実測雨量の差について検討し、現行レーダー雨量情報を用いることによって、今回の土砂災害の発生を予見することができたかどうかという観点からレーダー雨量の有効性について議論する。

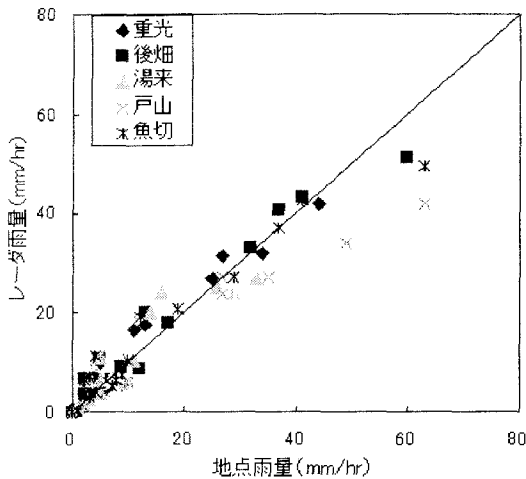


図-2 (a) 1時間レーダー雨量と1時間地上雨量の関係 (広島市西部八幡川流域付近)

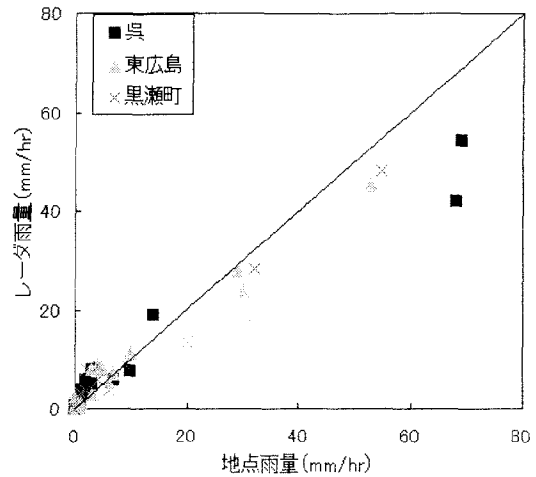


図-2 (b) 1時間レーダー雨量と1時間地上雨量の関係 (呉市～広島島市)

2. 1999年6月29日の広島豪雨の移動特性

レーダー雨量分布の経時変化から雨域の発生と移動の特性について検討する。図-1(a)(b)(c)(d)のようにレーダー雨量分布を15分毎に追って見ると次のことがわかる。北東に延びる帯状の強降雨域が図の南東に位置する山地または島から次々と発生し、それらが時間と共に順次北東へ移動している。このために、強降雨域が常に帯状に停滞しているように見える。天気図及びひまわり等から寒冷前線は29日の午後広島を東に通過していることが分っている。図-1(e)(f)を見ると、西側の降雨域の発生がなくなり、新しい雨域は消えたラインの東側で生じており、雨域の発生がなくなるとそのラインの雨域は移動と共に消えていく。これは降雨の原因となった寒冷前線の位置がこれらの降雨域のラインとともに東へ移動したことを示していると考えられる。呉市における豪雨を地点雨量のみで見ると急激に降ったことになるが、レーダー雨量で見れば強降雨域が時間と共に海上から近づいて来たことが分り、レーダー情報の重要性が再認識できる。

3. 短時間降雨予測

レーダー雨量情報を用いることにより、大雨の発生を予測できた可能性が高い。後畑(八幡川流域)と呉市について、30分前のレーダー雨量分布(レーダー雨量は40分前、35分前、30分前の平均値)を用いて、雨量分布を雨域の移動速度で移動させて、短時間雨量予測を行い、その特性について検討する。

(1) レーダー雨量の補正と雨域の移動方向

レーダー雨量の特性と補正方法について述べる。図

2は、地上で観測された各強雨域における1時間地上雨量と1時間レーダー雨量の関係を示したものである。これらより、地上降雨量が30 mm/h～40 mm/hを越えると、レーダー雨量と地上雨量に差が生じ、その差は最大で20 mm/h程度であること、この差は1つの流域内もしくは降雨セル群では同様な傾向を示すことが分る。(a)の八幡川流域付近には場所が近い重光・後畑・魚切の群とこれと少し北に離れた所に位置する戸山・湯来があり、それぞれの群でほぼ同一のずれ方をしている。(b)は1つの降雨セル群が呉市・黒瀬町・東広島市と移動したものであり、ずれ方も同様である。すなわち、移動する雷雨セル群毎に地上雨量とレーダー雨量の関係を追跡すれば、レーダー雨量の更正が可能であることを示す。これは、時間的、空間的に近い1つの降雨セル群では、誤差要因が大きく変化しないためと考えられる。

ただし、後述するレーダー雨量による予測雨量には八幡川流域の関係をを用いて補正した。これは、呉を襲来する雨域については修正に用いる地上雨量を事前に得ていないためである。

雨域の移動については、図-1に示したような15分平均値の雨量コンターから移動方向と移動速度を読み取った。八幡川流域では14:00までが北北東のライン上を時速約6 km/hで移動し、14:00から北東に移動方向が変わり、時速約25 km/hで移動している。呉市では北東ライン上を時速約20 km/hで進んでいた。図-3(a)(b)に6月29日の広島と屋代島における地上風向・風速を示す。広島では13時頃から16時頃までの間、東南東または南の強い風が吹いており、16時以降は南西の風が吹いていた。風速は8 m/s～10 m/sであり、雨域は主に風による移流で移動したと考えられる。

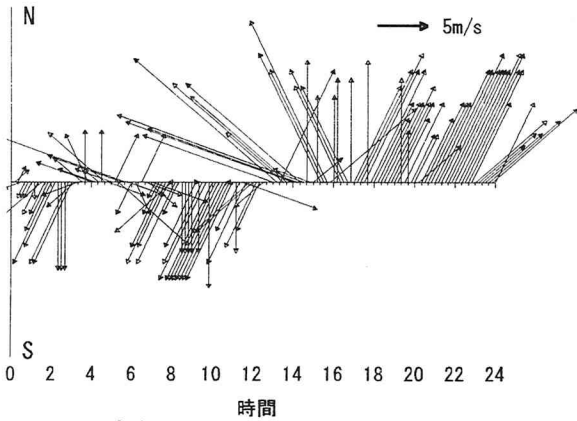


図-3(a) 広島における地上風向・風速の時間変化

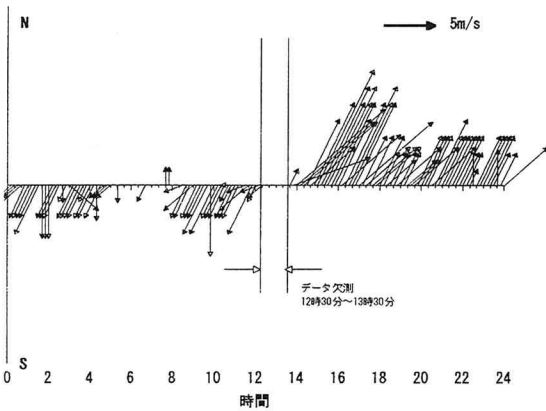


図-3(b) 屋代島安下庄における地上風向・風速の時間変化 (気象庁アメダスデータ)

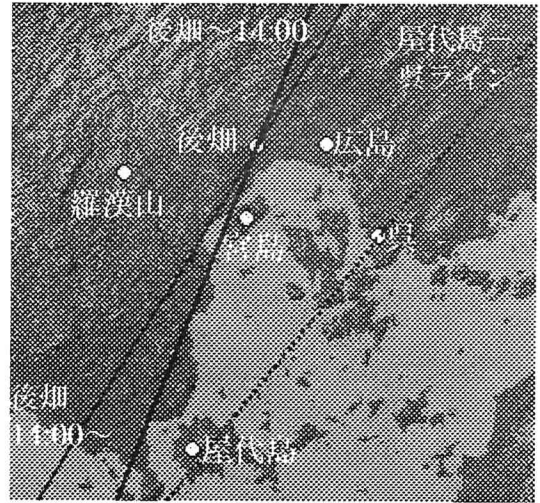


図-4 雨域の移動方向ライン

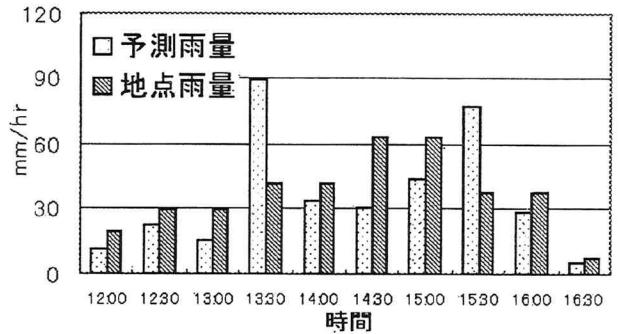


図-5(a) 後畑におけるレーダー予測雨量と地点雨量の比較

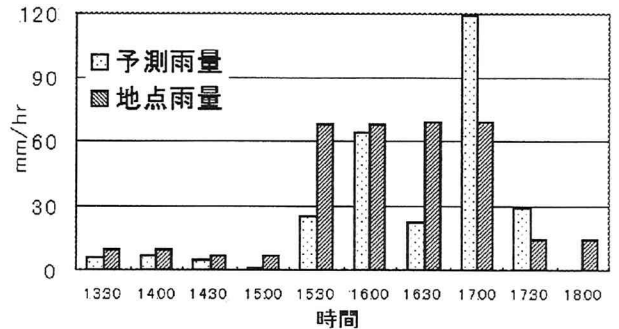


図-5(b) 呉におけるレーダー予測雨量と地点雨量の比較

予測雨量は、図-4 に示すライン上で雨量分布を求め、その分布形がライン上を平均的な移動速度で動くものとして、30 分間移動させて後畑及び呉市の位置で降雨量を積分して求めた。検証に用いる地上雨量データは 1 時間雨量を平均化して 30 分雨量として表した。

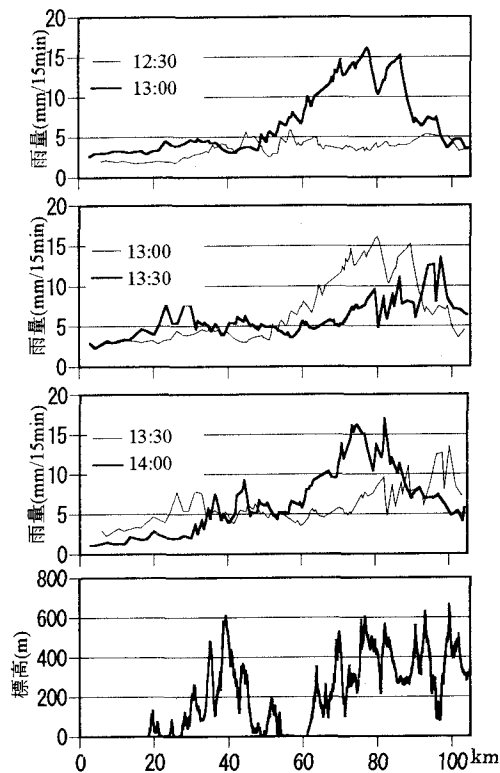
(2)レーダー雨量による予測と地上観測雨量の比較

図-5(a)(b)は、八幡川流域後畑及び呉市呉土木の地上雨量観測値と 30 分前レーダー雨量予測値を比較して示したものである。図-6、図-7 は予測に用いたレーダー雨量分布と実測のレーダー分布と地上標高の分布を示している。後畑は図-6(a)の約 80 km、(b)の約 86km の標高 200m 所に位置し、呉は図-7 の約 70km の急斜面前面に位置している。

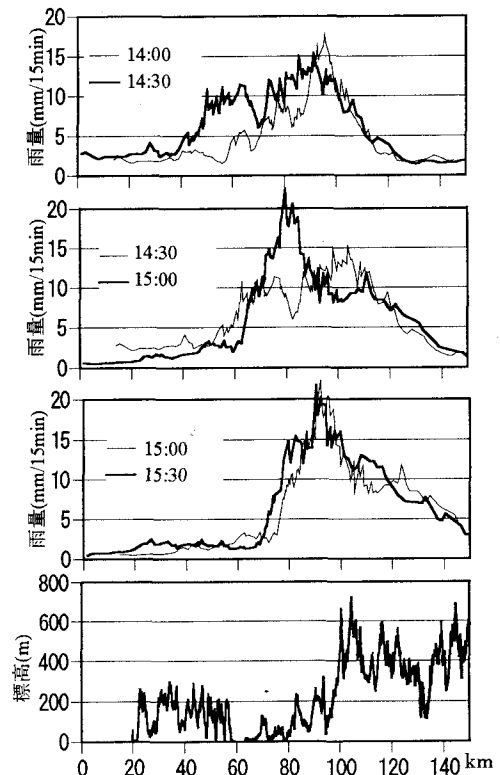
図-5(a)の後畑では 13:30 と 15:30 に大きな予測値を出している。それ以外の時間では予測値が観測値よりもやや小さな値となっている。予測雨量が観測雨量と比べて小さい理由は、風上側にある山地によって地形性収束が生じ、上昇気流が強められて対流セルが発達したためであると考えられる。13:30 の予測値が大きいのはこの時期に雨域の移動方向や風向に変化が生じており、それらの影響を十分にとり入れてないため、大きな値をそのまま用いてしまったと考えられる。

図-6(a)に示されるラインでは、13:00 から 14:00 にかけてこの降雨が減少している。15:30 には図-1(c)に見られるように発達する降雨域のラインは呉のラインに移動しており、寒冷前線が既に後畑のライン上を東に通り過ぎていたために降雨を維持できなくなったために急速に降雨が終了したためであると考えられる。

呉市では、15:30~16:00 の間と 16:30~17:00 の間に豪雨の発生を予測しているが、時間、場所と降雨量の関係は地上観測値と一致していない。また、15 時前後の降り初めについてもレーダー雨量では強い雨域を捉えていないようである。降り初めが捉えられていない理由は、屋代島の背後で移動しながら発達している雨量を予測できていないためである。すなわち、15 分前には発達した対流セルが見られるが、



(a) 後畑 13:00-14:00 の実測値、外挿値及び地形



(b) 後畑 14:30-15:30 の実測値、外挿値及び地形

図-6 予測及び実測のレーダー雨量(八幡川流域後畑)

30分前にはそれが捉えられておらず、移動速度が早いためにその雨域が到達した。16:30の予測値が小さいのは図-7から分るように発達した波形の谷間をとってしまったことによる。これとは逆に、17:00の予測値が非常に大きいのは呉の風上に位置する東能美島の影響を受けた降雨量をそのまま予測に用いたた

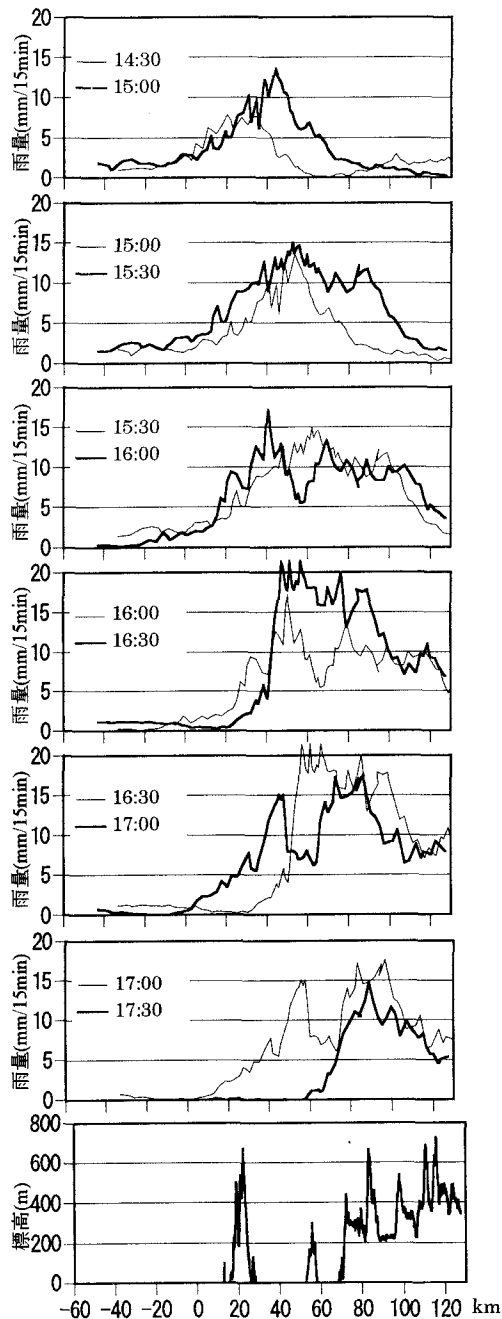


図-7 予測及び実測のレーダー雨量(屋代島-呉-東広島のリーン)

めと、図-1(f)に見られるように、17時には新しい降雨域のラインが東に出現しており、後畑同様に前線の位置が通り過ぎて降雨を維持できず、急速に降雨量が減少したためと考えられる。

以上のことから、地形の影響をうけて発達する前の雨量を時間外挿すると雨量を低く見積もり、地形の影響を受けた発達した雨量を用いると高めに見積もってしまうことが分る。図-6,7より地形標高の変化が激しい区間(図-6: 60km-80km, 図-7: 10km-100km)では誤差が大きく、標高の差が少なくなってくると比較的一致していることから地形が降雨量の変化に大きく影響していることが分る。

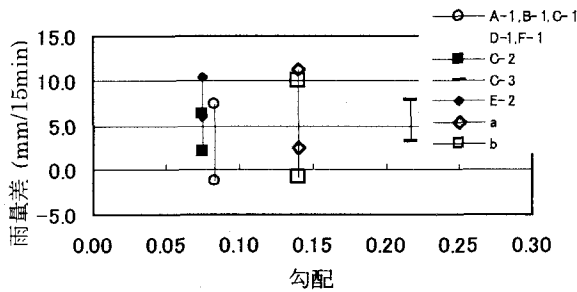


図-8 10km-20km 風上の斜面勾配と降雨量の誤差の関係

図-8 に風上側斜面の勾配と降雨量の誤差の関係を示す。図は順勾配のものとの関係のみを示している。実際には風速等が影響すると考えられるが、図-8 より地形勾配が大きいと降雨量の見積りが小さくなること、その差は20mm/h~40mm/h程度にもなることを示している。

また、寒冷前線の位置が全体として東へ移動することに伴い、ライン上の雨域の発生が終了すると共に、そのライン上における降雨も急速に減少して降雨が終了していた。

4. おわりに

レーダー雨量分布の時間変化から強降雨域の接近や到達時刻などを概ね予測することができる。しかし、実際に当該地点に雨域が到達した時の降雨量を知ることは難しい。特に今回の事例では降雨量が地形の影響を受けるため、降雨量の場所的な変化が大きく位置に近い地上雨量でさえ大きく異なっている。対流セルの発達・消長には、寒冷前線や風の影響も受けるために、予測には総合的な判断も必要となる。降雨強度の発達速度と移動速度の関係もあり、今回のように雨域の移動速度が速い場合には予測に使うデータの選び方が難しい。対流セルの寿命は約30分から1時間程度であるため、外挿法による1時間前予測は困難であり、今回行った30分前データの外挿では発達・消長による誤差が大きかった。ただし、15分前データのリアルタイム情報では変化が少ないために実測レーダー雨量分布をよく現していた。このような問題を解決するために、これまで様々な手法が開発・検討されてきた。しかし、図-6,7 から分るように一度発達した降雨強度ピークの大きさは時間とともに急速には変化しない。すなわち、危険な強降雨域の位置とその移動を時間と空間に対してピンポイントで予測することまでは難しくとも、危険箇所が時間と空間のある範囲内のどこかに移動す

ることは確かである。その範囲の幅をどのように絞り込むかについては課題が残されるが、危険性が高い降雨が生じるかどうかは判断できた可能性は高かったと思われる。したがって、土砂災害をできるだけ軽減するために、避難・防災システムにレーダー雨量情報を積極的に活用すること、リアルタイム雨量情報を住民に公開することが、第一に望まれる。

謝辞: 地上雨量には建設省中国地方建設局、広島県、気象庁(アメダス)の観測データを用いた。羅漢山レーダー雨量については建設省中国地方建設局河川計画課から提供を受けた。ここに記して感謝します。

参考文献

- 1) 福岡捷二・渡邊明英：6月29日集中豪雨による広島県土砂災害，土木学会誌 第84巻第10号災害報告，pp. 54-58, 1999.
- 2) 福岡捷二・渡邊明英・萬矢敦啓：1999年6月29日豪雨による広島県土砂災害とその教訓，平成12年度河川災害シンポジウム，p.1-13, 2000.
- 3) 道上正規・檜谷治：タンクモデル法を用いた豪雨による斜面崩壊時刻の予測，豪雨による土砂崩壊の予測に関する研究(中間報告)，pp. 70-74, 1989.
- 4) 福岡捷二・渡邊明英：1999年6月29日広島県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，科学研究費成果報告書「1999年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.
- 5) 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ー雨量の活用，河川に関する技術論文集第6巻，pp.267-272, 2000.
- 6) 中北英一・杉本聡一郎・池淵周一・中村徹立・奥田昌弘・山路昭彦・高棹琢馬：3次元レーダーおよび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.
- 7) 中北英一・池淵周一・矢神卓也：東北豪雨の生起・伝播特性，1998年南東北・北関東の集中豪雨災害に関する調査研究，pp. 11-26, 1999.
- 8) 中北英一・田中実・椎葉充晴・池淵周一・高棹琢馬：3次元レーダー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.
- 9) 中津川誠・山田正：ドップラーレーダー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
- 10) 池永均・久米仁志・森田寛・山田正：ドップラーレーダーを用いたメソβスケールの降雨特性の解析，水工学論文集第41巻，147-154, 1997.
- 11) 橋本識秀・宮下孝治・中津川誠：3次元ドップラーレーダーを用いた短時間降雨予測モデル，水工学論文集第38巻，1994.
- 12) 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ー雨量推定手法の構築：水工学論文集第42巻，pp. 7-12, 1998
- 13) 中川勝広・中北英一・池淵周一・佐藤亨・B.E.VIEUX・高棹琢馬：降雨の3次元構造を考慮したレーダー雨量推定手法の構築，水工学論文集，pp. 297-302, 1999.
- 14) 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.

(2000. 10. 2受付)