

論文

1999年6月広島土砂災害時における豪雨の特性とレーダー雨量情報の意義

渡邊明英*・福岡捷二*

Characteristics of the Heavy Rain in Hiroshima Disaster 1999 and the Significance of Information of Radar Rain Gage

Akihide WATANABE* and Shoji FUKUOKA*

Abstract

The main cause of the Hiroshima disaster June 1999 is that the heavy rain due to the cold front continued for 2 or 3 hours at the Masa soil belts. Major disasters occurred at the developed mountain area around Hiroshima city and Kure city. This heavy rain appeared in the band with small width over these areas. A radar rain gage at Mt. Rakan was effective to know the distribution of rainfall and trace the movement of the heavy rain area. In this study, by using the information of this radar rain gage which resolution is higher than one of ground rain gages, it was made clear that the mountainous geographical features and the wind fields affected the deformation of precipitation distribution and the concentration of heavy rain area. The danger of disaster can be predicted by analyzing the amount of the ground water from precipitation distribution measured by radar rain gage and ground rain gages. The effective usage of radar rain gage information was examined for reducing the sudden disasters.

キーワード：広島災害，土石流，豪雨，レーダー雨量計，レーダー情報の活用

Key words：Hiroshima disaster, debris flow, heavy rainfall, radar rain gage and utilization of radar information

1. はじめに

1999年6月29日，発達した低気圧が九州地方

から近畿地方の日本海沿岸部に沿って北東にゆっくり移動し，前線に起因した集中豪雨によって九州北部から中国・関西・中部地方にわたる広範囲

* 広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻
Graduate school of Engineering, Hiroshima University

本論文に対する討論は平成16年2月末日まで受け付ける。

に災害が発生した。広島県では29日午後、全域に大雨がもたらされた。特に、13時から16時にかけて広島県西部の広島市佐伯区から安佐北区へ向かう北東に延びる帯上(図1, L1)と、15時から18時にかけて呉市から東広島市に至る帯上(図1, L2)の狭い範囲に大雨が生じた。これらの場所では、1時間雨量にして40mm~70mmの雨が記録された。先行降雨で緩んだ地盤に対して、帯状の狭い範囲に短時間に大雨が集中したことが、1999年6月広島土砂災害の大きな原因となっており、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突発的かつ同時に多発したところに特徴がある¹⁾²⁾。土石流は、屋代地区、荒谷川流域で15:00から、古野川流域で15:15~15:30から数度にわたり発生していた³⁾⁴⁾。住民が危険性を認識してから避難を開始するまでに十分な時間がなく、同時多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。この人的被害の多くは、豪雨が集中した広島市西北部及び呉市で発生している。広島県砂防課によれば、がけ崩れ186箇所、土石流等139溪流である。県災害対策本部(消防防災課最終発表)によれば、住宅被害は全壊154



図1 広島県の地形及び主要な場所の位置

棟、半壊101棟、一部破損327棟、床上浸水1,363棟、床下浸水2,840棟であり、道路1,251箇所、河川1,864箇所、砂防施設460箇所の被災があった。この他に、多数の山腹崩壊、農地等への土砂災害、流木による被害等があった。

災害の詳細については文献1)2)5)等を、土石流の発生状況や発生時刻の詳細については、文献3)4)等を参照されたい。1999年広島土砂災害時を含む気象特性と土砂災害発生との関係については、久保田⁶⁾が下層ジェットと対流不安定性(湿数)を指標にして土砂災害発生の判定条件を整理している。牛山⁷⁾は、1999年広島豪雨の統計的特徴を整理し、1999年6月豪雨の発生確率は1/30~1/40程度であり、特異なものでなかったとしている。本文では、土砂災害をもたらした豪雨の特性について述べ、レーダー雨量情報の土砂災害対策への活用可能性と、1999年広島土砂災害への対応と災害から得られた課題について述べる。

2. 広島県の地形・地質及び被災区域の特徴

2.1 地形及び地質

広島市は太田川や八幡川などによって形成された狭いデルタ平坦地からすぐに山地や丘陵地の斜面へと続く地形特性を持つ。この地域は広島型花崗岩の分布域となっている。広島市や呉市で斜面災害が生じた斜面の地質は黒雲母型花崗岩に分類されている。これらの花崗岩が風化したまき土が山地岩盤を覆い、その上に薄い表土が乗っている。このために大雨が降ると、このまき土による斜面崩壊、土石流が発生し易いという地域的な特性がある⁸⁾。広島市と呉市は、鹿児島市、長崎市、神戸市等と並ぶ斜面災害の代表的な地域であるが、平地が少ないために山地部まで宅地開発が広がっており、土砂災害に対して危険な住宅区域が多い。このような危険箇所は土石流危険溪流や急傾斜地崩壊危険箇所として指定され、一般に公表されている。広島県におけるこれらの土石流危険溪流や急傾斜地崩壊危険箇所の数はそれぞれ4,390、5,960であり、共に全国一位である。

2.2 被害区域の地理的特徴¹⁾²⁾

広島市西部・北西部に位置する佐伯区や安佐南区などは広島市の住宅地として発達している。佐伯区では八幡川流域の平地から山地斜面まで宅地開発が進んでいる。八幡川西側の東斜面に位置する屋代や観音台等の新興住宅街に土石流が発生し、住宅地区内部を流下した。これらの地域には砂防ダムが設置されていた。屋代では砂防ダムを越えた泥流が住宅街を流下・堆積し、大量の堆積土砂による被害が顕著であった。観音台では砂防ダム下流の土砂貯めにレキや流木が堆積し、これを越えた土石流が住宅地を流下した。斜面最前部の住宅に被害が出たが、観音台では浅い土石流が道路を流下したため被害が大きくなかった。

奥畑川北側斜面に位置する安佐南区伴東でも土砂災害が発生している。安佐南区も太田川右支流奥畑川沿いに開発されてきた住宅地街であり、山地斜面にまで展開している。近年、新交通システムの開通に伴い道路事情も改善され、市街地への利便性も高くなったことにより、斜面における宅地開発が進んでいる。佐伯区の山地斜面に沿って山陽自動車道が、佐伯区から安佐北区に至る谷間には山陽道と中国道を繋ぐ広島自動車道が通っている。広島自動車道西側の山を1つ越えた谷間には、土砂被害が生じた太田川右支流吉山川流域があり、太田川を挟んで北側に左支流鈴張川流域がある。亀山は鈴張川の東側の山を越えた所に位置する。広島西部の強降雨域は、開発された谷間を通り、土砂災害が多発することとなった。特に、八幡川に沿う西側山地の東斜面においては至る所で土石流が発生し、右支流荒谷川流域、左支溪古野川流域では流木・土石流によって大きな人的被害が発生している。同じく左支溪の野登呂川流域においても至る所でがけ崩れや土石流が発生して被害が生じた。

呉市は戦前から発達してきた地域であり、平地部が少なく山地部にまで住宅が展開している。強降雨域は呉市から賀茂郡黒瀬町、東広島市へと、黒瀬川の谷筋に沿って北東へ移動した。呉市では、がけ崩れや土石流によって大きな人的被害が発生した。東広島市内の多くの山地斜面においても土

石流の発生が認められたが、土石流の流下・堆積域に住宅や施設等がなかったため、幸いにも人的被害が出ずに済んだ。このように、宅地開発や土地利用の状況が被害に密接に関係していた。

2.3 土砂流発生場所の地形特性及び崩壊状況

八幡川流域では流下した大きな岩等による被害は少なく、濁流の流勢や流木による被害、土砂堆積による被害等が顕著に見られた。土石流が発生した沢では崩壊土砂が溪流に残って崩壊斜面の周囲に不安定な所がある。ここでは、八幡川左支流である野登呂川支溪中道川を例にとり、土石流の発生、流下、停止に関する実態調査結果を述べる。

八幡川流域西部では、至る所でがけ崩れ・土石流が発生し、崩壊した溪流斜面上の樹木も同時に流木化して被害を大きくした。図2に野登呂川支溪中道川の調査対象範囲と土石流による氾濫・堆積域を示す。中道川は大被害を生じた古野川から山ひとつ隔てた場所に位置しており、沢の出口までの山間部の流域面積 0.015 km²、流路長約 840 m、平均流路勾配 12 度の溪流である。山間部の沢を抜けると民家と農地の間を流下し、野登呂川と

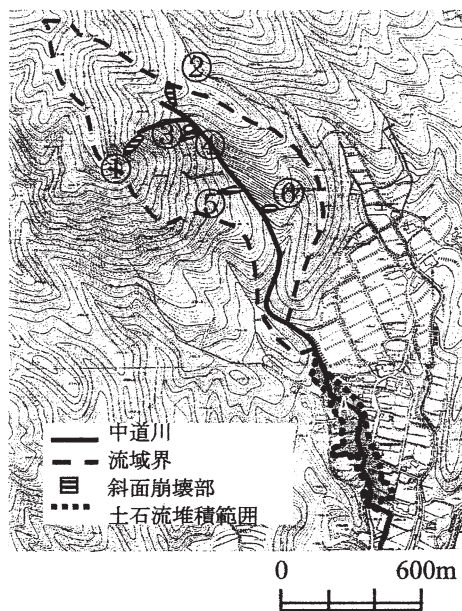


図2 中道川調査区域及び土石流氾濫・堆積範囲

合流する。土石流発生前の中道川は幅 1 m 程度で樹木が生茂った小さな沢だったが、土石流の発生により溪岸が侵食され、立木が流出しその様相を一変させた。土石流により沢出口の工場家屋が破壊され、農地や民家に流木や土砂が堆積した。近隣の住民によれば、土石流は 29 日の 14:30 頃に最大規模である第 1 波が生じ、家屋を破壊したのは流木であった。15:10 頃にも第 2 波の土石流が生じたが、規模が小さかったとの事である。図 2 に示された A 地点では多量の流木が堆積していた。

図 3 に最深河床高及び痕跡水位の縦断変化を示す。崩壊斜面の形状緒元を表 1 に示す。中道川における崩壊箇所は源頭部 1 の他に 5 箇所あり、源頭部を含めた崩壊土砂量は約 1,800 m³ に達する。溪流にまで達していない土石流跡が溪流の左右に 1 か所づつ確認された。源頭部は沢の出口から奥行き約 840 m、高さ 130 m の所に位置している。表 1 に示されるように源頭部勾配は 34 度であるが、上流側の河床勾配は 22 度、下流側で 8 度であり、典型的な土石流地形を示している⁹⁾。それ以外の溪流斜面の崩壊は 40 度～50 度の急斜面で生じている。崩壊の幅は 5 m～13 m、深さは 0.8 m～1.8 m 程度である。崩壊土量は源頭部を除く

と規模の大きい崩壊斜面 4 と崩壊斜面 6 において大きい。流下した土石流の多くは細かいレキによる泥流が主体であったと考えられる。侵食と堆積は交互に発生し、天然ダムが形成された箇所が 2 箇所存在していた。川幅は沢の山間部からの出口から約 80 m の地点を基点とし、出口から奥行き 600 m まで 10 m～20 m である。それより上流では、川幅は 10 m 程度と狭くなっている。幅の広い区間は以前に水田として利用されていた場所であるが、これらの場所は水田としては利用されなくなり、杉等が植林されていた。しかし、土石流によって植林されていた樹木のほとんどが倒木、流出していた。

表 1 崩壊斜面の形状

崩壊斜面 No.	崩壊土量 (m ³)	勾配 (度)	崩壊厚 (m)	斜面長 (m)	幅 (m)
1	426	34	1.2	53	7.7
2	201	43	0.8	29.3	10.4
3	25	51	1.2	6.8	4.9
4	562	48	1.5	62.1	7.9
5	82	48	0.8	18.4	7.1
6	479	42	1.8	27.2	13.4

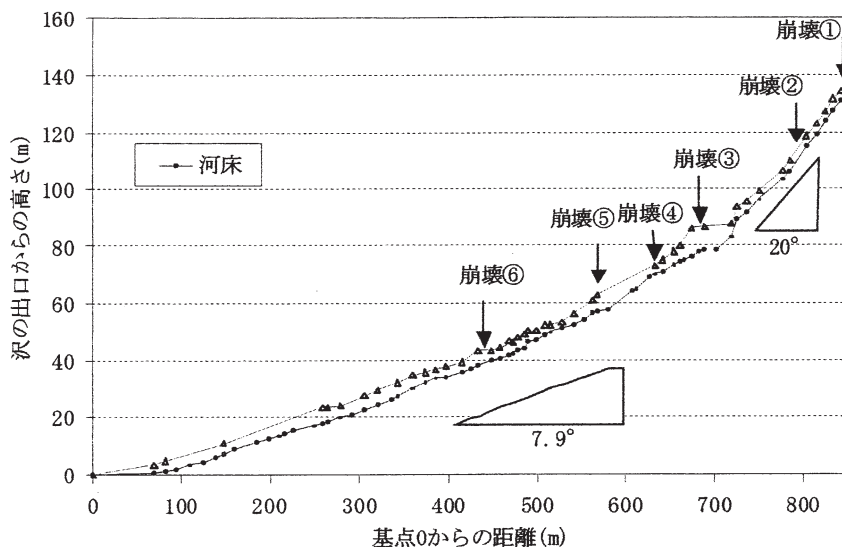


図 3 河床高及び痕跡水位の縦断変化

図3に示した痕跡水位から、距離650m~700mの位置にかけて痕跡水位が大きく堰き上がっており、その背部で急勾配になっていることが分る。距離560m付近においても周りと比べて水深が大きくなっている。これらの個所は崩壊斜面の上流に位置しており、崩壊土砂による影響を大きく受けたと思われる。520m~340mまではほぼ一定の水面勾配となっている。沢の出口に位置する場所では水深約3mとなっている。

現地では流木や土砂が一体となって堆積し、天然ダム状になって堆積し、その下流で侵食された個所が数カ所見られた。先に述べた様に、現地では少なくとも2回の流木・土石流が確認されており、少なくとも2回以上の天然ダム崩壊があったと考えられる。

3. 平成11年6月29日の豪雨特性

3.1 気象状況

図4に、29日9時における気象庁GPVデータによる地上海面気圧の等値線とひまわり画像（東京大学生産研究所アーカイブデータ）を重ねたものを示す。図5にひまわり画像から推定された低気圧（動画の回転中心）及び前線位置を示す。これらの図によれば、9時に低気圧は九州の西の海上にあり、日本海海上をゆっくりと北東に移動し

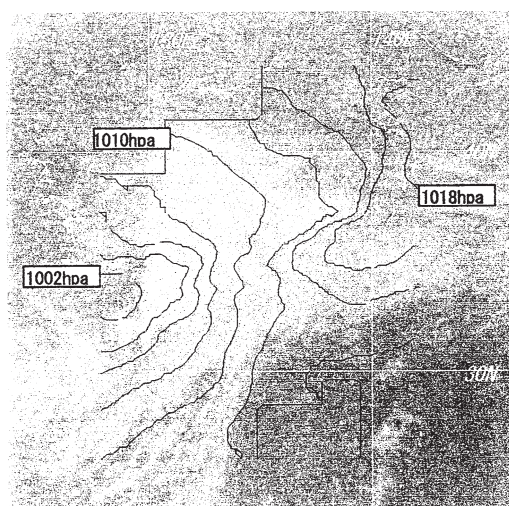


図4 ひまわり画像と地上気圧

ていった。低気圧につながる閉塞前線は、29日午後には島根県北の海上に位置していたと推測される。これらの気圧配置の時間的、場所的關係から広島県下に大雨をもたらした原因は、非常に発達した低気圧に伴う寒冷前線であったと推定される。

3.2 広島県における降水量分布

図6は、広島県、旧建設省、気象庁アメダスの地上雨量データを用いて作成した降り始めの6月23日から6月29日までの広島県における総降雨

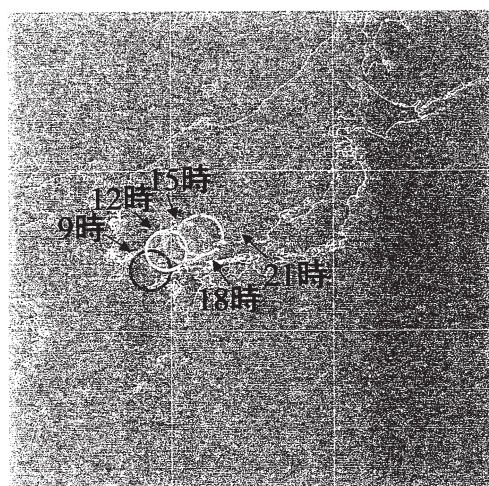


図5 ひまわり画像から推定された低気圧の位置

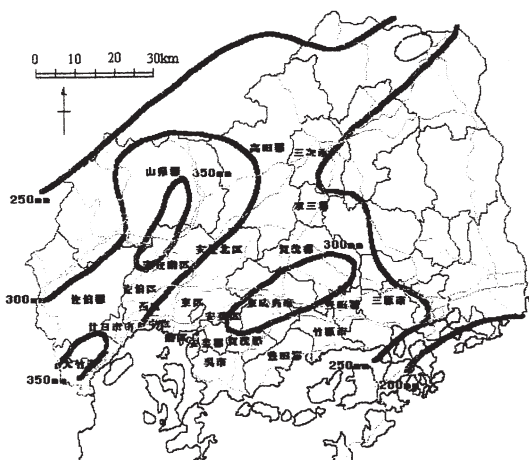


図6 6月23日~29日までの総降雨量（広島県、建設省、気象庁地上雨量計）

量の分布を示す。広島県における累積雨量は 250 mm~300 mm 以上であった。累積雨量は気象庁 AMeDAS では東広島市 343 mm, 旧建設省データでは広島市安佐南区沼田町戸山雨量観測所 442 mm が最大であった。

図 7 は雨量強度が大きかった呉土木事務所雨量観測所(県)における地上時間雨量を建設省羅漢山レーダー雨量と共に示したものである。29日における1時間最大地上雨量は道路公団八幡川橋地点 81 mm/h, 次いで呉土木事務所 69.5 mm/h である。図 7 に示される降雨量は時間に対して急激な右上がりの形を示しており、豪雨が来襲して2時間ではほとんどの雨が降ったことになる。レーダー雨量データは広島県西部に位置する羅漢山レーダーによるものであり、これは径方向 1.5 km×回転角 1.4°メッシュの解像度を持っている。1時間雨量で見るとピーク時においてレーダー雨量計が1~2割程度小さい値を示すが、時間雨量全体的に見れば地上雨量を良く表している。これは、強雨域が 30 km~60 km とレーダーの位置に近いこと、豪雨域を遮る強い雨域がないこと等、レーダーによる計測条件に恵まれた可能性がある。

図 8 に各強雨域における1時間レーダー雨量と1時間地上雨量の関係を示す。これより、豪雨が生じた呉以外の場所についても地上時間雨量が

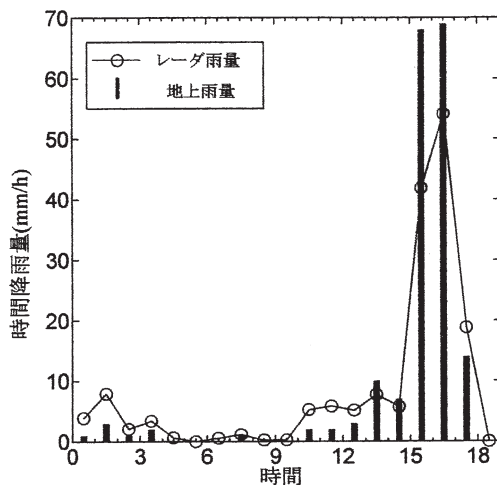


図 7 降雨量の時間変化—呉—(広島県土木事務所及び建設省レーダー)

40 mm を越えるとレーダー雨量と地上雨量の値に差が生じているが、一つの降雨群ごとでは同一の傾向を持つことが示されている。八幡川流域では、重光、後畑、魚切、八幡の1群とこれから離れた戸山、湯来の1群においてそれぞれ同様な差異を示している。このような傾向は、呉、黒瀬町、東広島市の1群でも示していた。図 9 は最大2時間地上雨量の分布に災害発生位置を重ねたものである。●印の場所は人的被害が発生した位置、×印

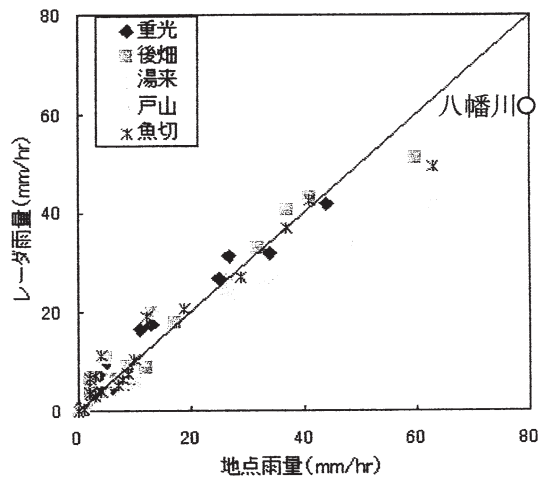


図 8 1時間レーダー雨量と1時間地上雨量の関係(広島県西部八幡川流域付近)

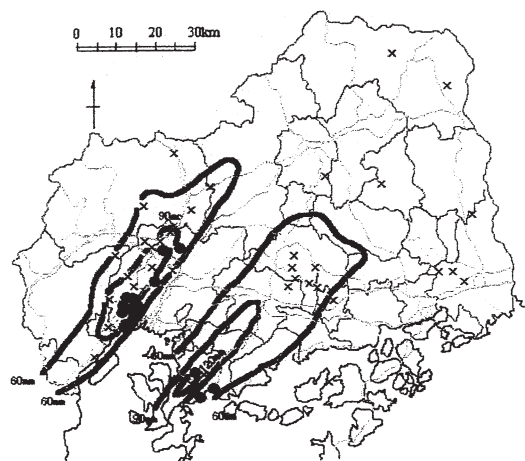


図 9 最大2時間羽陽と災害発生位置(1999年6月29日広島県, 建設省, 気象庁地上雨量計)

の場所は道路の通行止め箇所を示している。ただし、被害のなかったがけ崩れや土石流が、他に数多くの場所で生じている。図 10 はレーダー雨量データによる最大 2 時間雨量分布である。これらの図から、2 時間の間に強い降雨が集中したのは、広島市の佐伯区から安佐北区へ向かう幅 6～8 km 程度の帯状の谷間 (13 時～15 時)、屋代島から江田島を抜けて呉市・東広島市へ向かう幅 6～8 km 程度の帯状の谷間 (15 時～17 時) においてである。これら 2 つの帯の間に位置する広島市街地及び海上で降雨が弱かったことが分る。広島市の降雨集中域には、八幡川及びその支流、太田川支流奥畑川、吉山川及び鈴張川が、呉市及び東広島市の集中域には黒瀬川が流下している。これらの強雨域では最大 2 時間雨量にして 90 mm 以上の降雨が生じており、最大 1 時間降雨量は 50 mm～70 mm にまで達した。これらの図から 2 時間の間に大雨が集中した区域で大きな災害が多発している。災害は最大 2 時間地上雨量にして 60 mm 以上の範囲で多く発生している。人的被害が発生した所は、最大 2 時間雨量で 90 mm 近い降雨が観測された場所がほとんどである。以上のことから、災害の要因はこの 2 時間の間に発生した集中豪雨であると言える。現在の地上雨量計は観測網が粗いこと、計測されたレーダー雨量はピーク時の値が地上雨量と異なっていること等の問題があるが、両者を同時に見れば強雨域で災害

が多発したことは明らかである。

3.3 強降雨域におけるレーダー雨量特性

気象庁 AMeDAS によると、6 月 29 日の早朝から山口県東部、広島南西部の地上及び海上では瀬内海から南東もしくは南南東の風が岩国・広島に向かって吹いていた。13 時に降雨が集中した山口県北部、広島県北西部であり、降雨域は帯状に形成されている。広島県北西部の降雨が集中していた谷間では北東に向かって風が吹いていた。

図 11 に AMeDAS 広島市における地上の風向、

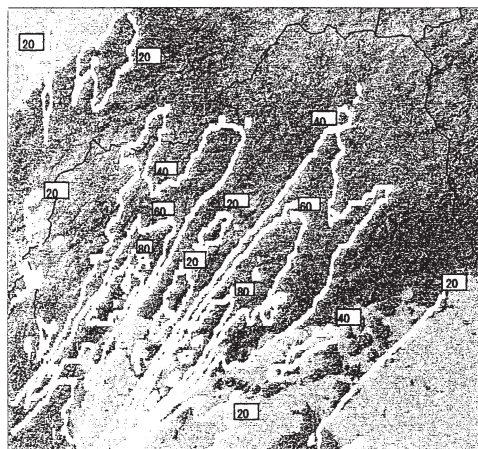


図 10 最大 2 時間雨量 (1999 年 6 月 29 日建設省羅漢山レーダー雨量計)

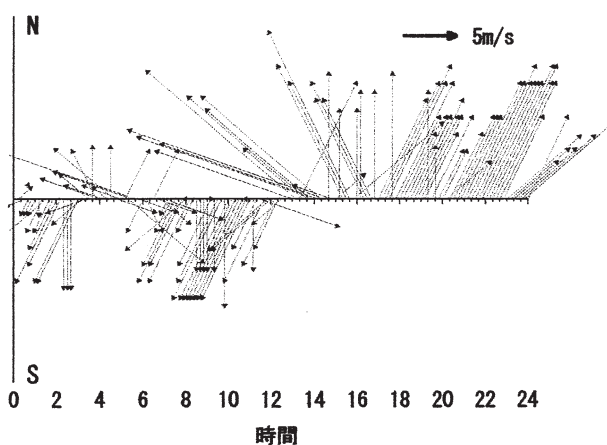


図 11 広島における地上風向・風速の時間変化 (気象庁アメダスデータ広島市)

風速を示す。広島市街地付近では午前中に北東の風が卓越していたが、13 時頃から 16 時頃までの間、八幡川流域に向かう東南東の強い風が吹いていたこと、16 時以降は北東に向かう風が吹いていたことが分る。

図 12 (八幡川流域拡大)、図 13 (呉市付近拡大) にレーダー雨量計による強降雨域の場所を拡大して示す。先に述べた様に八幡川中流域における降雨ピーク時である 14 時～15 時におけるレーダー雨量は地点雨量に比べて小さい。魚切ダムでは、地上雨量 63 mm/hr に対しレーダー雨量 47 mm/hr である。また、荒谷川下流に位置する八幡川橋 (道路公団) で計測された地上雨量最大値 81 mm/hr に対してレーダー雨量は 59 mm/hr である。この地上雨量とレーダー雨量の差異の関係が八幡川中流域における降雨域に対して成立するとすると、特に被害が大きかった荒谷川流域や古野川・野登呂川流域では、スポット的に値が小さかった魚切ダム地上雨量計で代表された降雨量よりも多くの雨が降ったことが推測される。この様に山地流域では小さな流域内でも降雨量分布が大きく変化しているため地上雨量計の密な配備が望まれる。

図 12 及び図 13 より、降雨量の多い部分が山地の稜線に沿っていること、降雨域が一つの谷間に集中していることは明らかである。これらのことから、地上風が山地や島等の地形の影響で収束し、寒冷前線へ吹きこむ風が山地の影響を受け、この

ような地形によって固定された場所で次々と上昇気流が発生し、強い雷雨性の豪雨を発生、維持させたと考えることができる。図 14 に図 12 に示した A-B ライン上の標高と降雨量の関係を示す。図 14 に示されるように 13 時から 16 時にかけて豪雨が降っていた場所は、八幡川流域西側山地部の東南斜面であることが分る。図 11 に示したように、この時間帯では東南東の風が斜面に向かって吹いていたこと、12 時以前及び 16 時以後ではこの方向に風が吹いておらず、大雨が生じていないことから、この豪雨の集中は地形による風の収束に伴うものであったことが確認できる。AMeDAS (屋代島) の風向風速データでは、午前中は北から北北東の風が卓越し、14 時頃からは南西から南南西 5 m/s 以上の風が、17 時以降は 5 m/s 以下

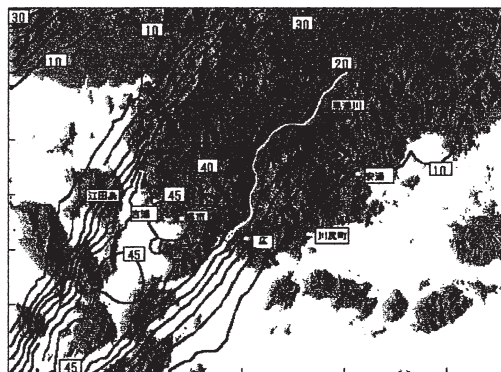


図 13 呉市付近 15 時～16 時のレーダー 1 時間雨量

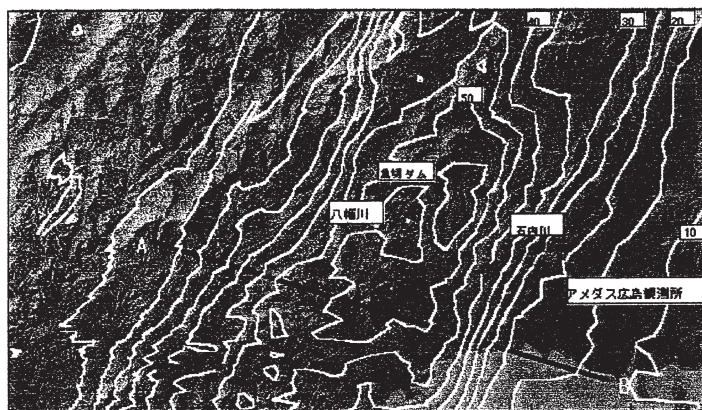


図 12 八幡川流域 14 時～15 時のレーダー 1 時間雨量

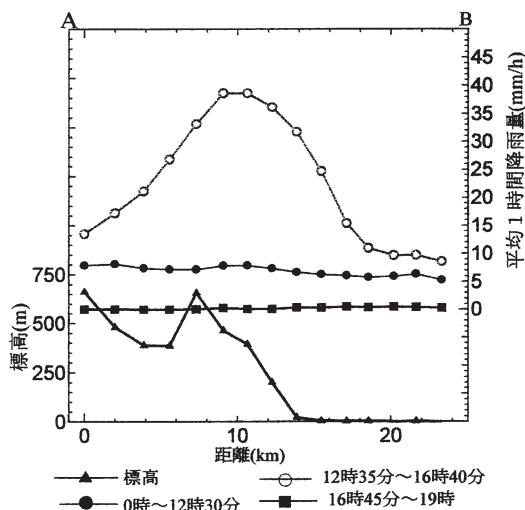


図 14 標高とレーダー雨量の関係 (八幡川流域)

の風が同様に南西から南南西の風が吹いていた。16時から17時にかけて海上では呉方向に向かう南西の風が卓越していたことから、呉における豪雨も八幡川の場合と同様に地形による風の収束を伴うものであったと考えられる。

4. 豪雨域の発生・移動追跡と変形^{10) 11)}

レーダー雨量分布の経時変化から警戒・避難に対するレーダー雨量情報の活用可能性を検討する。図 15 は 15 分平均された各時刻における羅漢山レーダー雨量強度分布を示す。レーダー雨量を時間追跡すると、北東に延びる帯状の強降雨域が次々と発生してそれらが順次北東へ移動しており、このため強降雨域が帯状に停滞しているように見える。14時～17時にかけて寒冷前線が広島県上空を通過したことは明らかであり、図 15 (d) - (f) を見ると強雨域の発生位置が前線の東への移動と共に

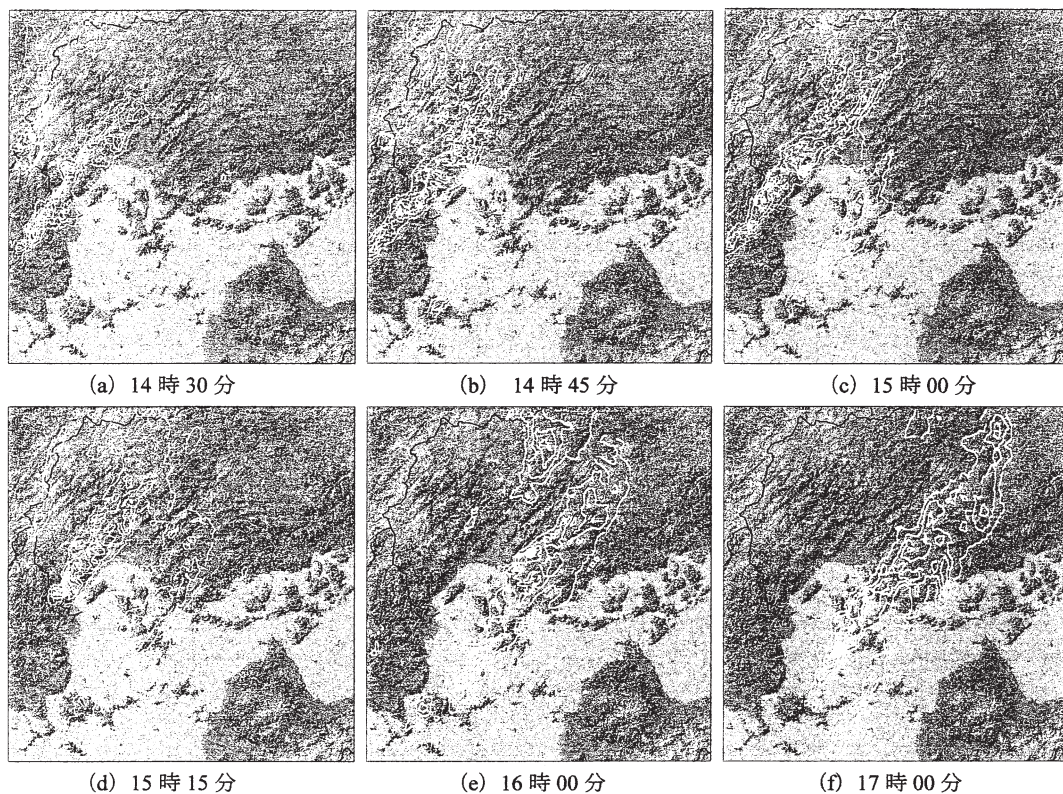


図 15 羅漢山レーダー雨量分布の経時変化 (a) 14時30分 (b) 14時45分 (c) 15時00分 (d) 15時15分 (e) 16時00分 (f) 17時00分

移動しているように見える。呉を襲った強雨域は八幡川流域の豪雨とは別に新たに東側に発生したものである。これらの豪雨域の発生場所はほぼ決まっており、山地や島などの斜面に沿っている。呉市における豪雨を地点雨量で見ると急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る。

図 16 は強雨域の進路を示す。八幡川流域では 14:00 まで北北東に延びるライン上を時速約 6 km/h で移動し、14:00 から北東に時速 25 km/h で移動している。呉市では北東に延びるライン上を時速約 20 km/h で進んでいた。図 17 は図 16 で示した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速度で移動するとして 30 分間移動させ、後畑及び呉土木事務所の地上雨量観測値と 30 分前レーダー雨量 (15 分平均値) と比較して示したものである。図 18、図 19

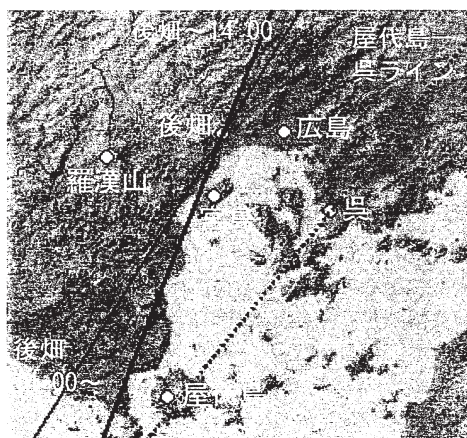


図 16 雨域の移動方向ライン

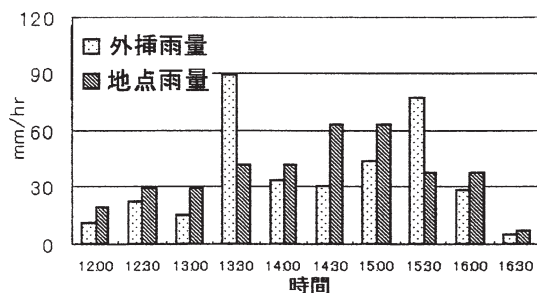
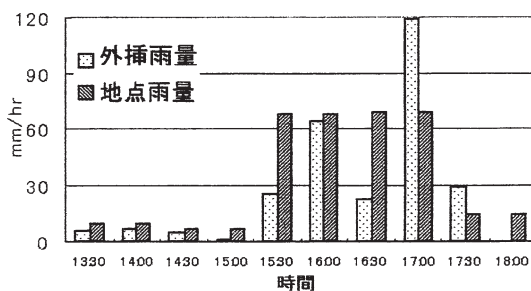


図 17 (a) レーダー外挿雨量と地点雨量の比較 (後畑)

は、先と同様に波形を保持させて 30 分間移流外挿したレーダー雨量分布と実測のレーダー分布を比較して、地上標高分布と共に示す。これらの波形の差が移流に伴う雨量の発達・減衰を示すことになる。後畑は図 18 (a) の約 80 km, (b) の約 86 km の標高 200 m 所に位置し、呉は図 19 の約 70 km の急斜面前面に位置している。

図 17 (a) の後畑では 13:30 と 15:30 の外挿値が大きくなっている。それ以外の時間では外挿値が観測値よりもやや小さい。移流外挿した雨量が観測雨量と比べて小さい理由は、山地による地形性収束のためであると考えられる。13:30 の予測値が大きいの、この時刻における雨域の移動方向や風向に変化が生じている影響を十分にとり入れてないためである。

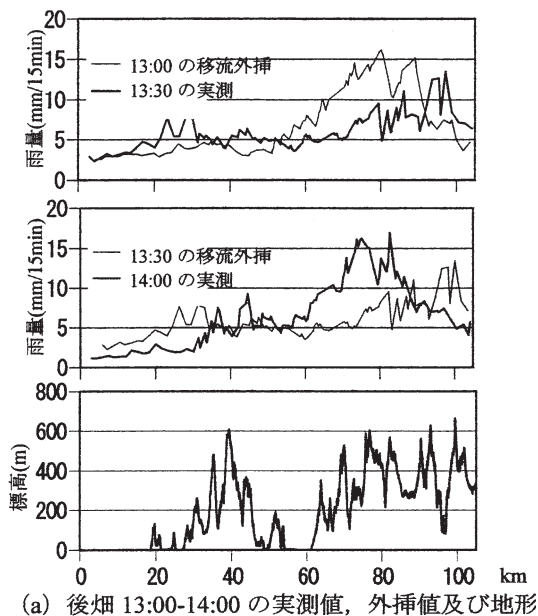
図 18 (a) に示されるラインでは 13:00~14:00 にかけて降雨が一時減少し、移動方向が変化した。図 18 (b) の 14:30~15:30 では斜面前面部で発達が見られるが、これ以後、雨量は減少していく。15:30 には図 15 に示された様に発達する降雨域のラインは呉のラインに移動しており、寒冷前線は既に後畑のライン上を東に通り過ぎたと考えられる。図 17 (b) の呉市では、15:30~16:00 の間と 16:30~17:00 の間にレーダー雨量の外挿値が大きくなっているが、地上観測値と一致してない。15時前後の降り初めについてもレーダー雨量では強い雨域を捉えていないようである。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状況を予見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、30分前にはそれが捉えられて



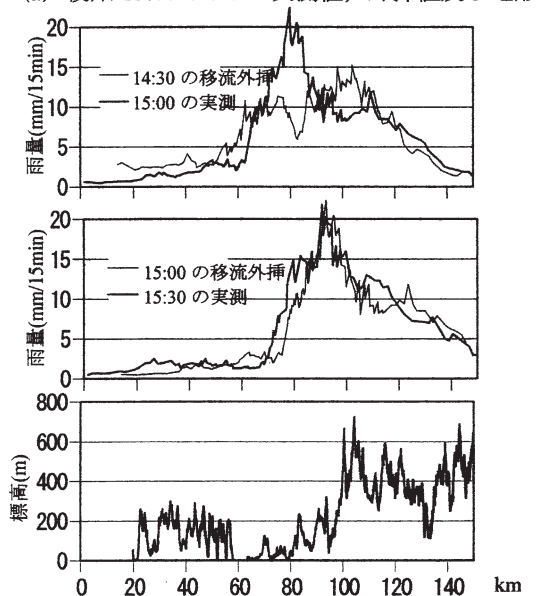
(b) レーダー外挿雨量と地点雨量の比較 (呉)

おらず、この15分前に発達した雨域が急速に到達した。16:30の外挿値が小さいのは図19から分か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めと、図15(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、後畑同様に前線が通り過ぎて降雨を維持できず、降雨量が減少したためと考えられる。図18, 19より地形標高の変化が激しい区間では雨量の変化が大きく、標高



(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18 外挿及び実測レーダー雨量(八幡川流域後畑)

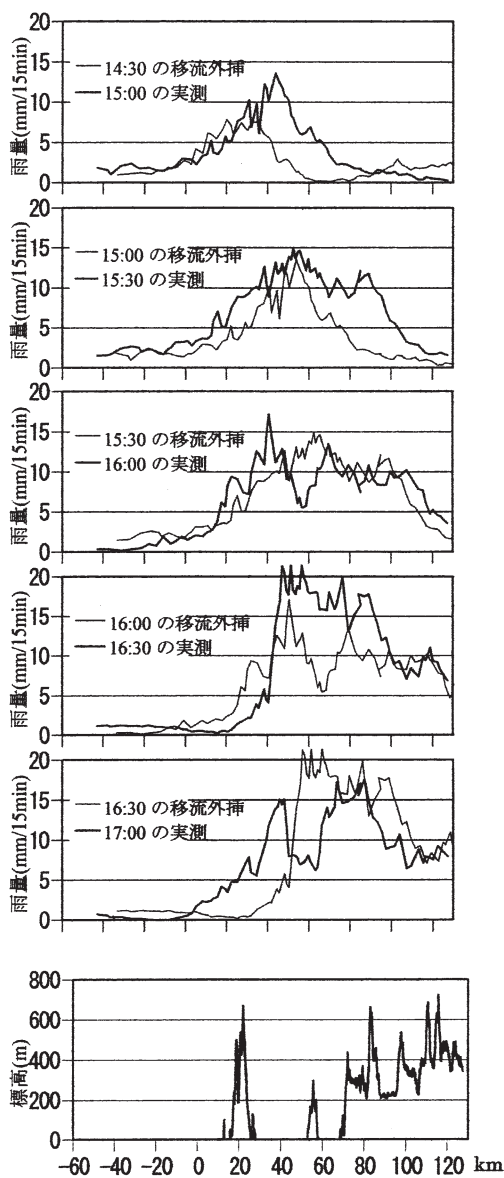


図19 外挿及び実測レーダー雨量及び地形(屋代島-呉-東広島のライン)

の差が少なくなってくると比較的变化が少ないことから、これらの降雨量の変化に対して地形が大きく影響していることが確認できる。

以上のことから、レーダー雨量情報から強降雨域が近づいて来ることや到達時刻などを予測できたとしても、実際に当該地点に雨域が到達した時に豪雨をもたらすかどうかを知ることは難しい。これは、雷雨は局所的な現象であり、降雨ピークの位置と強さが短時間に変動するためである。特に広島災害の場合における降雨は山地地形の影響を受け、変化は大きい。事実、距離が近い位置の地上雨量同士でも雨量は大きく異なっていた。

現在の降雨予測として GPV データがあり、解像度約 20 km 程度であるため、豪雨の発生は予測可能ではある。しかし、土砂災害の発生判断には山地斜面単位における降雨予測が必要であり、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、現実の強雨域の特定には空間解像度の高いレーダー雨量情報の活用が不可欠であろう。

レーダー雨量情報を監視することにより、対象とする範囲のどこかで豪雨が発生する可能性を事前に知ることは可能であり、早期警戒のための指標に利用することはできるであろう。1つの対流セルの寿命から、レーダー雨量情報を用いても豪雨域の発生や移動を1時間前に予測することは難しい。これらについては3次元ドップラーレーダーの配備が必要である。今回の事例では、30分前のレーダー雨量情報は豪雨発生の予測には有益であったと考えられる。ただし、予測の精度は、雨域の大きさやその移動速度に依存する。情報伝達後の避難に要する時間など検討が必要であるが、このような情報を住民の避難に速やかに生かすことができる警戒・避難システムの確立が望まれる。

5. 土砂災害発生の予測

土砂災害の発生は、主に地形、地質、地盤・地質等の特性と土壌内水分量で決まると考えられる。したがって、地形・地質の条件が似た場所では、土壌内水分量に対して災害発生限界を求めれば良いことになる。網干・低引¹²⁾は2週間雨量と当

日雨量を用いて、瀬尾・船崎¹³⁾は有効雨量と有効雨量強度を用いて災害発生条件を整理し、森脇¹⁴⁾は土壌内水分量と地下水位を求め、斜面安定解析から限界条件を検討し、網干・低引に理論曲線を与えている。道上・檜谷¹⁵⁾¹⁶⁾は、タンクモデルによる貯留量を用いた発生限界について議論し、福岡・渡邊ら¹⁾は、この関係が広島北西部のまさ土斜面に適用できることを確認している。

ここでは、レーダー雨量情報による災害危険度の判定と八幡川中流域における災害発生予測について検討した結果を述べる。

5.1 レーダー雨量による災害危険度判定

1999年広島土砂災害は短時間に豪雨が集中したことが主な原因とされているが、個々の災害発生地点における雨量について十分には検討されていない。これは地上雨量計が災害発生地点近傍に設置されていなかったためである。しかしながら、これまで示して来たように災害発生場所において精度の良いレーダー雨量分布が旧建設省羅漢山レーダーで観測されていた。ここでは、事前積算レーダー雨量、当日積算レーダー雨量と土砂災害発生位置の関係について述べる。

地盤工学の分野で土砂災害発生予測に用いる事前積算雨量や当日雨量は、土壌内水分量を簡便に指標化したものである。降雨特性や流出などによって土壌内水分量は変化し、厳密には事前から飽和・不飽和浸透流解析やその他の流出モデルによって土壌内水分量、地下水位などを求めることが必要である。流域が小さく流出が線形系と見なせるならば、流出量を考慮した降雨量の重み付き積分の形で土壌内水分量を推定可能であると考えられる。行政機関で土砂災害予測モデルに用いられている半減期を用いた実効雨量はこれに相当するが、半減期には流出特性が考慮される必要があろう。単純な積算雨量を求めることは流出を考慮していないことを意味し、危険度判定に単純積算雨量を用いると危険度を過大評価する可能性が指摘されている。

ここでは事前雨量として、1週間積算雨量(降雨23日～27日)、2週間積算雨量(降雨17日～

19日, 23日~27日)の2通りを選び, 事前降雨量と当日雨量の関係を網干・低引の土砂災害発生限界区分¹²⁾で危険度の検討を行った。降り始めは23日であるが, 森脇の飽和・不飽和浸透流解析¹⁴⁾によると, 広島県まさ土の斜面及び土壌の条件では降雨期間として10日間とれば土壌内水分量は変化しないことが報告されている。今回20日-22日に降雨がないので危険度の評価には1週間積算雨量を選んだ。

図20は各時刻までの当日積算雨量と1週間積算雨量を用いて, 網干・低引の土砂災害発生限界領域区分図により, 土砂災害発生危険度を分けて示したものである。網干・低引は危険度を無災害, 災害発生, 大災害の3段階に分けているが, 図20では無災害, 災害発生, 大災害災害, 大災害発生領域を降雨が50mm上回る領域の4つに区分した。中小災害発生領域の範囲は狭く, 災害発生領域はほぼ大災害発生領域である。地上雨量とレーダー雨量の間の誤差は, 事前雨量, 当日1日積算雨量に関して10%程度である。12時の段階で先行降雨の影響により危険な区域が現れ初め, 15時に広島県北西部の山地が危険領域になっていること, 18時にはその危険領域が北東に拡大し, 呉市, 黒瀬町, 東広島市などが危険区域に入っていく。これを事前2週間積算雨量で行うと, 広島県内の事前雨量が250mm~300mmとなっているために, 広島県のほぼ全域が災害危険区域と判定され,

危険度を過大評価する結果となっていた。

事前雨量に1週間積算雨量を用いた場合でも実際に災害が生じた地域は, 図9の災害発生位置と比較すると大災害発生+50mm雨量の領域である。厳密にはこれらの雨量情報だけでなく, 流出量や地形・地質等を考慮した解析と危険度予測が必要であるが, この豪雨が土砂災害に対して広範囲で非常に危険なものであったことはこれからも明らかである。

5.2 タンクモデルによる災害発生の予測¹⁾

流出を考慮した災害発生予測について検討する。ここでは, 土壌内水分量の時間変化がタンクモデルから求められ, 3段タンクの各貯留高の和が流域平均の土壌内水分量を表わす。

流出解析は, 図21に示す土石流が多発した八幡川流域とそれに隣接する災害が生じなかった水内川上流域で行った。タンクモデルの各係数は, 平成10年度台風10号(10月17日~18日)を対象に, 八幡川流域では魚切ダム地点雨量と中地地点水位・流量データを, 水内川上流域では湯来地点雨量と管沢観測所水位・流量データを用いて, 計算流量が観測水位による換算流量と一致するように決めた。八幡川流域の地質は黒雲母型風化花崗岩であり, 水内川上流域は黒色千枚岩, 砂岩及び泥岩に覆われており, 地質が異なっている。図22に同定された八幡川流域と水内川上流域にお

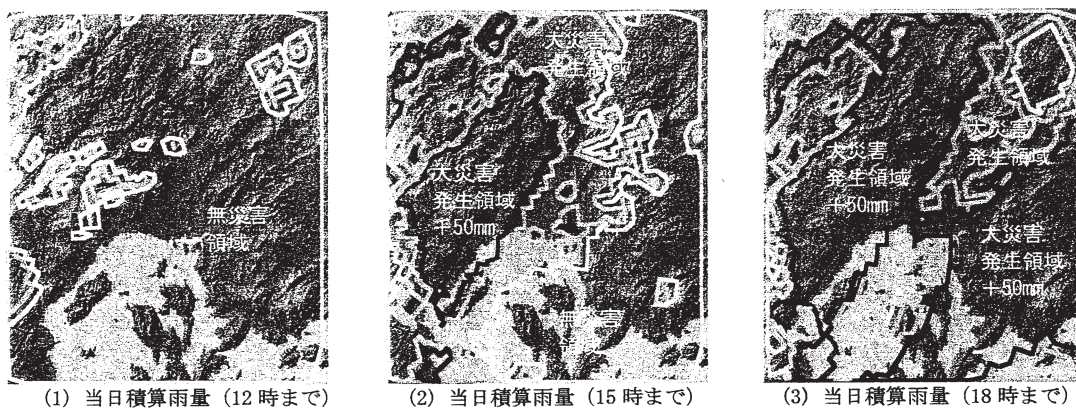


図20 レーダー雨量による事前積算雨量と各時刻までの当日積算雨量分布による土砂災害危険度評価

けるタンクモデルの各定数を示す。八幡川流域におけるタンクモデル係数は、風化花崗岩流域に対して得られている値¹⁵⁾とほぼ同値である。水内川流域のモデル係数は第1及び第3タンクの浸透係数が八幡川流域の値と比べて大きく、第2タンクの流出係数が小さく、中間流出が出にくい。これらの値の違いは、流域の地質や特性の違いを表す。水内川流域では地中水分量の急激な立ち上がりはなく、流出高も小さかった。以下では、地中水分量に大きな変化と多くの災害が生じた八幡川流域について述べる。

図23は八幡川流域における降雨ハイトグラフ(魚切ダム地点)と流量ハイドログラフ(中地地点)を示す。計算流出量は、中地のH-Q換算流

量を説明している。なお、6月30日以降の中地流量が計算流量よりも高いのは、流木等が障害となって中地観測点の水位を高めたことによる。図24は各タンクの貯留高と第1タンクからの流出高を示している。第1タンクと第2タンクの貯留高が当日の雨量を、第3タンクの貯留高が先行降雨の積算量に対応している。図24から、先行降雨によって土壌内の水分量が増大し、6月29日豪雨により急激に土壌水分量が増大していることが分かる。特に表層流及び中間流に関係すると考えられる第1、第2タンクの貯留高が大きくなっている。道上らは¹⁵⁾¹⁶⁾、呉では全タンクの貯留高が70mmを越えたらげ崩れの危険性が生じること、小豆島では第1タンクで80mm、(第1+

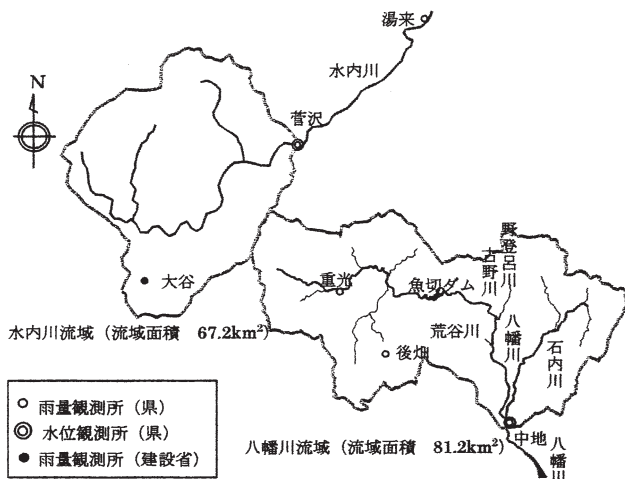


図21 八幡川流域及び水内川上流域

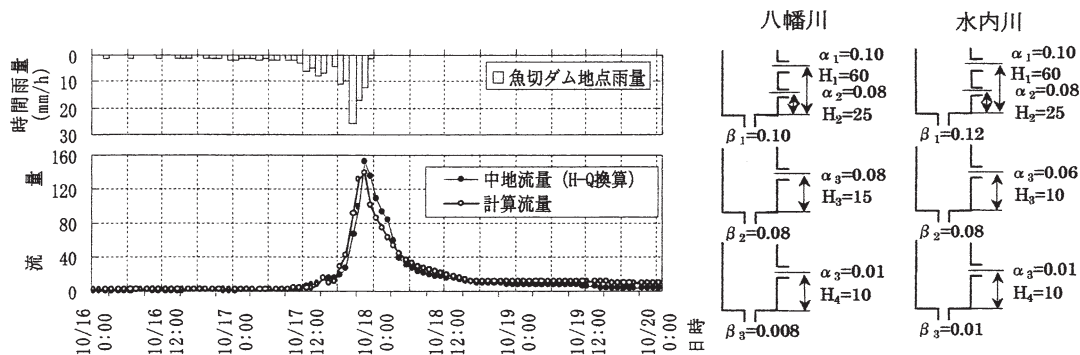


図22 同定に用いた降雨・流量データとタンクモデルの係数

第2) タンクで 150 mm を越え、第1 タンクからの流出高が 20 mm/hr を越えると土石流が発生する危険性が高いことを報告している。

この報告を参考にすると、八幡川流域では6月29日午後の集中豪雨により第1, 第2 タンクの貯留高が急増している。第1 タンクからの流出高もピーク時にはほぼ 20 mm/hr となり、土石流発生の可能性が高い状況にあったと推定される。八幡川流域では東南斜面に非常に多くの土石流やげ崩れが14時~16時に集中して生じていたと報告されており、これらの時刻は解析による危険時間帯とほぼ一致している。八幡川流域において図24の土石流発生時刻である15時を見ると第1及び第2 タンクの貯留高が合計で 150 mm~160 mm 前後となっており、土石流発生危険性が高い土壌内水分量に対応している。第1及び第2 タンクの合計が 150 mm に達している時間は3時

間~4時間であった。このように、降雨量と流出量の関係を捉えて土壌内水分量や流出量を推定し、これらの値が土石流発生危険性が高い土壌水分量にどの程度近づいたかを知ることは可能であることから、土石流やげ崩れ発生危険度判定の手段にタンクモデル等の方法を用いることを検討すべきであろう。また、雨量については地上雨量で修正されたレーダー雨量分布を用いることで面的な情報を得ることが可能になっている。

ここで示したような危険度判定を各小流域毎に行うことにより、少なくとも小流域単位での危険度予測は可能であると考えられる。ただし、そのためには各小流域におけるパラメータを同定するために流出量データが必要であり、土砂災害予測に関して小流域における水位・流量の調査・観測が重要となろう。

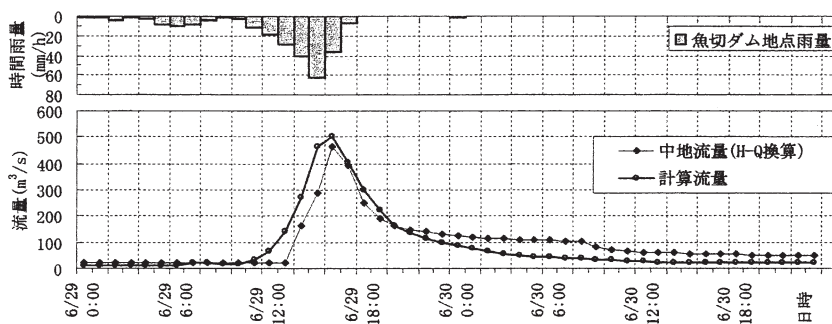


図 23 魚切ダム降雨量と中地流量の時間変化 (6月29日)

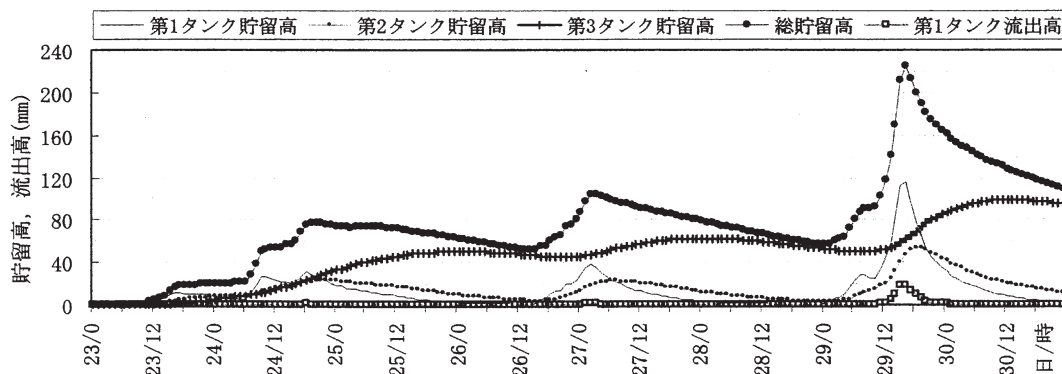


図 24 各タンクの貯留高の時間変化と第1タンクからの流出高 (6月23日~6月29日)

6. 警報システムへのレーダー雨量情報の活用

これまで示してきた様に雨量情報から、かけ崩れや土石流の発生を予見することは概ね可能である。したがって、土砂災害の被害軽減のためには、災害発生の監視と共に早期警戒のために降雨量の把握と危険度予測が重要である。

現在、広島県では土砂災害発生監視システムを整備し、警戒避難体制の強化を図っている。この防災システムでは県全域に設置された地上雨量情報に基づいて危険性を判断することになっている。広島県はこの防災情報システムを公開しており、インターネットで気象・雨量情報、土砂災害発生監視情報を、これに加えて携帯電話、電話回線（音声）、役場等で各地区の雨量情報を知ることが可能になっている。

しかし、今回示したように小流域内でも降雨量が場所的に大きく変化したり、海上から豪雨域が近づいてくる場合がある。このような場合には、雷雨の様な狭い強雨域とその移動を捉えられるレーダー雨量情報をリアルタイムで活用すること、これと同時に当該地区での雨量精度を上げるための地上雨量計の綿密な配置が望まれる。

レーダー雨量情報の活用のためには、図 25 に示すように、地上雨量データとレーダー雨量データを用いて相互に特性を補間しつつ、雨量と雨域を正確に捉え、豪雨及び土砂災害の発生を予測していくことが望ましい。本文で示したように、レーダー雨量分布の時間変化を追跡することで、強雨域の発生や移動を捉えることが可能であるが、数 km の地区範囲に対して雨量を正確に予測することは難しい。特に広島土砂災害では、山地地形の影響が大きく、降雨量の場所的な変化が著しい。15 分前平均雨量強度は有意な情報であるが、これは情報の整理と伝達にかかる時間を考えれば、ほぼリアルタイム情報である。一度発達した豪雨は直ぐに消えないので、このリアルタイム情報を追跡することで、危険な雨域の移動が時間と空間のある範囲内に移動することまでは予測することは可能であろうから、各時点で危険な降雨域がどの地域にあるかは判断可能であると思われる。

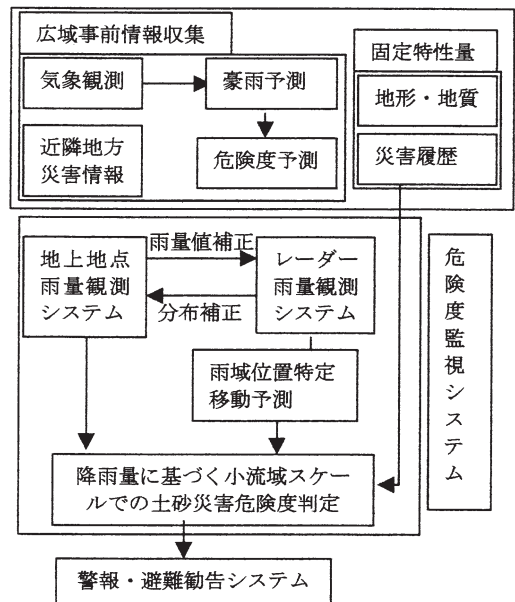


図 25 雨量観測に基づく土砂災害危険度判定チャート

したがって、豪雨による土砂災害をでき得る限り早期に警戒するためには、(1) 大規模な気象場から得られるGPV等の気象予測による当該地方大雨発生可能性の検討、(2) 移動している雨域がある近隣行政域における降雨履歴、災害情報の把握を行った後に、(3) レーダー雨量情報を用いた強雨域の追跡と雨量の把握による強雨域の特定化を行うことが重要になる。これを行った上で(4) 地上雨量計によるレーダー強雨域における雨量の確認、(5) 強雨域レーダー雨量情報のリアルタイム公開を行うことが望ましい。これと同時に、(6) 事前降雨や流出を考慮したモデルに基づく土砂災害危険性の高さを、小流域程度の単位で面的な情報として視覚的に表わすことが望ましい。これらの情報を速やかに当該地域における住民に伝達すると共に、(7) 起こるかも知れない災害に対して被害を軽減する対策を講じることが重要である。

7. 広島土砂災害の教訓と今後の課題

7.1 1999年災害の対応と広島県防災情報システム

広島土砂災害の主な原因は、降雨に弱いまさ土斜面に不連続の降雨が続き、災害当日に前線の短時間豪雨が狭い範囲に集中したことにある。災害の発生には、地質・地形の他に、前線の位置と風向き、斜面位置などが大きく影響したと考えられる。広島県は人口が多い割には平地が少なく山地部にも住まざるを得ない状況にあり、土石流危険渓流や急傾斜地崩壊危険箇所が多く、未だに多くの家屋が土砂災害発生時に被害が及ぶ恐れのある範囲に入っている。これに対して、平成11年11月には広島県より、土砂災害危険区域図が公表され、新規砂防施設などの計画・施工が進められているところである。しかし、広島県には土砂災害の危険箇所数が著しく多く、全ての危険箇所に十分な整備が早急に行き届くのは難しく、当面はソフトウェア対策が必要となろう。

先に述べたように早期警戒体制を取るために、広島県は、平成11年度に214基の地上雨量計テレメータのネットワーク化と地上雨量による土石流発生監視システムを整備した。これは広島県下に配置された地上雨量計テレメータ情報を基に監視局において警戒基準を越えた場合に雨量情報と警戒・避難情報を市町村へ自動的に配信するものである。平成14年現在、広島県の防災情報システムが一般に公開されており、ここで、気象庁(日本気象協会提供)による気象情報と広島県による地上雨量情報(249箇所)、気象庁アメダス雨量(32箇所)と別途、国土交通省地上雨量(広島県内64箇所)の雨量を住民がインターネットや携帯電話経由で知ることが可能になっている。さらに、各地区における降雨量、累加雨量等は、各事務所等での掲示、電話による音声応答等でも知ることが可能になっている。

一方、土砂災害危険度については、砂防雨量計(124基/281基)において、流出を考慮したことに相当する実効積算雨量と1時間雨量によるスネーク曲線を用いて、過去の災害履歴に基づいて危険性が表示される。治山雨量計(71基/281基)で

は、実効積算雨量による警戒・避難基準が設けられている。しかしながら、本文で示されたように、降雨強度は地形の影響を受けて、狭い範囲で变形したり集中したりするため、これらの地上雨量計の設置場所や配置密度については検討の余地が残されている。これらの雨量情報の空間解像度が粗いことや砂防雨量計の数が少ないために、近隣地区における危険性を知るためには十分であるとは言いがたい。このような観点からも、先に述べたようにレーダー雨量情報の活用を促進していく必要性があろう。

地形による雨量変化が大きい静岡県では、土砂災害予測のために解像度250m~1kmの大峠局地レーダー雨量計が導入されている¹⁷⁾。土砂災害に対する危険度判定条件は過去の実績等から定められているが、地形や地質が土砂災害や流出(降雨量半減期)に与える影響などが考慮されていない。水山らは、広島市西部域の地形特性を指標化し、これと雨量(時間、実効)が土砂災害発生に与える影響を重判別モデルで解析を行って災害発生限界を評価している¹⁸⁾。

7.2 居住地域の災害危険性と対策

広島県下においては約10年に1度の割合で豪雨土砂災害とそれによる人的被害が生じている。しかし、災害場所が自分の居住区域と離れていたり、時間が経過したために防災意識が薄れ、住民側も過去の災害の教訓を十分に生かしきれていない。危険な場所で生活しながら突発的に生じる災害に対応するためには、行政による警戒・避難勧告や防災施設の整備だけに頼るのではなく、危険性の指標となる地形や地質、災害の発生条件や危険性について正しく理解し、住民自らが災害危険度を認知できるようになることが特に重要となる。先に述べたように現在では土砂災害危険区域図が公表されている。ここでは、単に土石流危険渓流や急傾斜地崩壊危険箇所が示されているだけでなく、これらによって被害が及ぶ恐れのある範囲までが明示されるようになっており、各住居が危険な場所にあるかどうかは識別可能になっている。ただし、これは地形・勾配、堆積実績等から求め

らたものであり、その危険性の高さまでは示されていないという問題点を残す。このように住民に対して災害の危険性を啓蒙し、防災意識の向上を図ると共に、住民が自主的に避難する安全な場所と経路を用意し、危険性や避難に関する情報を素早く伝達する仕組み等を住民と行政とが一体となって確立して行くことが必要である。

平成 11 年 6 月 29 日広島土砂災害を一つの契機として「土砂災害警戒区域における土砂災害防止策の推進に関する法律（土砂災害防止法）」が平成 12 年 5 月 8 日に公布され、平成 13 年 4 月 1 日より施行された。この法律では、崩壊・流出土砂の到達・氾濫範囲から定まる土砂災害警戒区域と崩壊・流出土砂が建築物を直撃する可能性が高い土砂災害特別警戒区域を指定し、範囲を明示して個別箇所の災害特性に応じた警戒避難体制の整備を図ることになっている。すなわち、土砂災害警戒区域を指定することによって土地利用や開発行為に規制をかけ、土砂災害特別警戒区域を指定することによって建築物の構造に基準を設け、構造が不適格な場合には移転勧告を行えるようになった。

しかしながら、既存の住宅区域が広く、住宅を移動させることが難しい場合には砂防施設の設置は不可欠である。今回の災害では、人的被害に対して砂防施設の有無が明暗を分けた事例が見られており、砂防施設の有効性が示されている。実際には危険範囲と被害を十分予測した上で、土地利用の方法、建築物の構造や住まい方、避難方法、移転・建築物移設も含めて効率的な土砂災害対策方法とその効果を考えて対処していく必要がある。

7.3 今後の課題

現在の土砂災害に対する危険区域図は地形等から求めたものであり、潜在的な危険性を示す 1 つの指標ではあるが、相対的な危険性や安全性の高さまで評価したものではない。かけ崩れや土石流等の土砂災害が生じた場合に被害が及ぶ恐れのある範囲や規模を、土石流解析モデルから得られる水位・流速や氾濫区域から予測することは十分可

能になってきている。さらに、それらの災害に対する砂防施設によるハードウェア対策の効果も併せて検討することができる。したがって、危険区域内に住宅がある場所に関しては、土砂災害に対する潜在的な危険性を示すハザードマップまたはリスクマップを公表して、住民に衆知、徹底して危険性に対する十分な理解を促すだけでなく、構造物による対策を行うと共にその対策効果を加えて示し、どの程度の降雨に対してどの程度安全もしくは危険であるかを示すことが必要であろう。

しかしながら、大雨がいつ、どこに集中して、どの程度の強さで発生するかを十分な確度をもって予測できない現状では、土砂災害の発生場所と発生時刻を事前に予測することは困難である。したがって、ハザードマップ上で危険であるとされた場所においては、ハードウェア対策に加えて、危険度に応じた避難システムのあり方について早急に検討し具体化していく必要がある。

その他、1999 年広島土砂災害では、巨石の流下による破壊等よりも、流下した泥流や流木による家屋破壊や堆積による住宅被害が顕著であり、被害が広範囲に及んだ。現行の砂防施設では、これらは流出してしまう可能性があるために、何らかの対策方法を検討する必要がある。今後も、かなりの量の土砂等が流出することが予想されるため、流木止めや貯砂地などの構造・容量・設置場所についても検討が必要であろう。

謝 辞

本研究で使用した地上雨量には建設省中国地方建設局（現国土交通省中国地方整備局）、広島県、アメダス（気象庁）の雨量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（現国土交通省中国地方整備局）河川計画課から提供を受けた。また、風速・風向等の各種気象データにはアメダスや GPV 等の気象庁資料を用いている。本研究は、平成 11 年度科学研究費補助金（特別研究促進費（1）課題番号 11800010）「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」（研究代表者広島大学福岡捷二）の補助を受けた。併せて、ここに感謝

します。

参 考 文 献

- 1) 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.
- 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) 金子正則・南 哲行・緒統英幸：1999年6月29日広島市における土砂災害時の住民の行動実態（速報），新砂防第52巻第4号（通巻225号），pp.33-38, 1999.
- 4) 荒木義則・増田榮三郎・水山高久：6.29広島土石流災害での目撃者証言による土石流の挙動，新砂防第54巻第1号（通巻234号），pp.72-76, 2001.
- 5) 海堀正博・石川芳治・牛山素行・久保田哲也・平松晋也・藤田正治・三好岩生・山下祐一：1999年6月29日広島土砂災害に関する緊急調査報告（速報），新砂防第52巻第3号（通巻224号），pp.34-43, 1999.
- 6) 久保田哲也：総観規模～メソスケール気象条件を用いた土砂災害の広域的予測，新砂防第55巻第1号（通巻240号），pp.4-14, 2002.
- 7) 牛山素行：1901年以降の降水量記録から見た1999年6月29日広島豪雨の特徴，自然災害科学20，pp.59-74, 2001
- 8) 網干寿夫・小堀慈久：マサ土斜面崩壊のケースレコード，（1）広島市内の例（2）呉市内の例，マサ土地帯における土砂災害の予測と防止に関する研究，pp.9-13, 1986.
- 9) Takahisa Mizuyama：Some Research Topics on Debris Flow and Shallow Landslide, 2nd IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, pp.21-33, 2001.
- 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ー雨量の活用，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ー雨量に基づく短時間雨量予測の適用性，水工学論文集第45巻，pp.307-312, 2001.
- 12) 網干寿夫・低引洋隆：真砂土自然斜面の崩壊について，第7回土質工学研究発表会講演概要集，pp.507-510, 1972.
- 13) 瀬尾克美・船崎昌雄：土砂害（主に土石流的被害）と降雨量について新砂防 Vol.26, No.2，pp.22-28, 1973.
- 14) 森脇武夫：1999年広島県土砂災害における斜面崩壊および限界降雨量に関する地盤工学的考察，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.47-60, 2000.
- 15) 道上正規・楡谷 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.
- 16) 道上正規・小島英司：集中豪雨による崖崩れの発生予測に関する研究，鳥取大学工学部研究報告第12巻，pp.167-177, 1981.
- 17) 武田晴夫・本橋和志・加納章・望月嘉徳・松村昌広：静岡県土砂災害雨量情報システム，新砂防第54号第5号（通巻238号），81-85, 2001.
- 18) 岡本正男・仲野公章・秦 耕二・荒木義則・古川浩平・水山高久：局地的な集中豪雨に対する土石流警戒避難基準雨量の設定に関する研究～1999.6.29広島災害における事例～，新砂防第55号第1号（通巻240号）pp.15-25, 2002.

（投稿受理：平成14年10月29日
訂正稿受理：平成15年4月3日）