

博士論文

地域ごとの降雨特性に着目した
土砂移動現象の発生予測に関する研究

平成21年3月

広島大学大学院総合科学研究科
総合科学専攻

中井 真司

要 旨

本論文は、土砂移動現象の発生予測のための新しい雨量指標を考案し、これを用いて地域ごとの雨の降り方や地域の特性を反映させることにより、地域に応じた土砂災害軽減のための防災情報手段を提案したものである。

第1章では、既往の土砂災害予測手法について整理し、その特徴や課題に言及した。

雨量指標を用いた手法としては、実効雨量をはじめとする複数の指標を用いるものと、都道府県と気象庁の共同による連携案方式によるものが利用されている。連携案方式による手法は、予測降雨により数時間後までの情報が事前にわかるという利点や、RBFN (Radius Basis Function Network) により非発生降雨から CL (Critical Line) を設定できる利点がある。一方で、多くのパラメーターを設定する必要があるため、地域の防災担当者が独自に地域特性を反映した基準を設定することは困難である。実効雨量を用いた X-Y グラフによる手法は、その簡便性と実用性の高さから警戒避難の判断手法としての利用実績も多い。実効雨量は比較的簡便な式で表され係数も少ないため、地域ごとに基準を設定することも容易であり、精度高く予測することが可能である。従来、実効雨量を用いた手法は時の予測に用いられていたが、多くの雨量観測データを用いて降雨の空間的移動を把握することにより、危険な場所を予測する試みがなされている。

本研究では、市町村の防災担当者や地域住民にもわかりやすい、身近な雨量指標の開発を目指しているため、比較的簡便な式を用いる予測手法を開発することを基本とした。

第2章では、新しい雨量指標 R' を提案し、その定義や基本的な考え方をとりまとめた。

R' は、先行降雨（長期実効雨量）と短時間の降雨強度（短期実効雨量）の影響を1つの値の大小で表す指標であるため、直感的に危険を判断しやすい。また、時間ごとに R' 値の等値線図を描くことにより、危険性の空間分布をリアルタイムで追従することができる。

広島周辺の花崗岩分布域では、実効雨量の半減期を72時間と1.5時間とし、 $R_1=600\text{mm}$ 、 $r_1=200\text{mm}$ 、重み係数 $a=3$ を用いれば、土石流は $R'=250\text{mm}$ 、山地崩壊は $R'=175\text{mm}$ 、がけ崩れは $R'=125\text{mm}$ を発生限界降雨量の目安にでき、また、 R' 値の大小により土砂災害の規模を推定できる可能性があることもわかった。

雨量指標 R' は、計算式のわずかな変更により様々な形状の CL を表現することができ、既に用いられている雨量指標を容易に R' に変換することができる。ここでは、事例を示しながら変換手法を提案した。

第3章では、現地モニタリングと室内人工降雨実験の結果を用いて、降雨による土中水分量の変化に着目し、雨量指標 R' の物理的意味づけを試みた。

降雨時の斜面安定問題は、サクシヨンの低下に伴うせん断強度の低下と、地下水による間隙水圧の発生で説明され、どちらの観点でも土中水分の変化による影響が大きい。

現地モニタリングでは、表層（地表～GL-30cm 程度）の湿潤状態は小規模降雨であっても変化し、基底層（概ね GL-60cm 以深）では累積された降雨に伴って変化する傾向が確認された。一方で、中間層（GL-30～60cm 程度）では、平常時の降雨では土中水分はあまり変化せず、先行降雨と雨量強度の両方が重なったときに急激に上昇する傾向が見られた。

人工降雨実験では、長時間にわたり降雨を与えたケースでは全体的に含水比が上昇したが、同じ雨量を短時間強雨として与えたケースでは、表層と基底層の含水比のみが上昇した。しかし、ある程度含水比が高い状態（実験では 15～17%）になるよう先行降雨を与えた後に、短時間強雨を与えると中間層も含めて万遍なく含水比が上昇する結果となった。

現地モニタリングと室内人工降雨実験は、どちらも先行降雨と雨量強度の両方の影響で地盤が不安定化することを示している。 R' を用いると、両者の影響を 1 つの値で表すことができ、この意味では R' は地盤の不安定化条件を適切に表現しうるものといえる。現地モニタリングでの中間層の体積含水率の上昇条件は、半減期 72 時間と 1.5 時間の実効雨量を組み合わせた R' 値によって良好に表すことができ、 R' を斜面が不安定化する降雨条件の指標として使用できることが示された。

第 4 章では、地域特性や降雨特性、災害形態が異なる 8 つの事例を用いて、 R' の適用性を検証した。

広島県や岡山県の花崗岩分布域では、土石流は $R' \geq 250\text{mm}$ の範囲で発生し、がけ崩れは R' 値 = 150～200mm 程度の範囲でも発生しており、第 2 章の検討値とよく合っている。しかし、花崗岩分布域では、他の地質の分布域に比べて土砂移動現象が容易に発生する傾向が見られた。また、同等の降雨でも花崗岩分布域では土石流が多く発生し、粘板岩や硬質流紋岩の分布域では石礫堆を形成する崩壊が多く見られるなど、土砂移動形態も分布地質により異なることがわかった。さらに、土砂移動現象の発生には、過去の台風などによる斜面のダメージや降雨履歴なども関係している可能性が指摘された。

神奈川県の花崗岩地帯の事例では、広島県周辺での既往の土砂災害時の雨量規模を大きく上回る豪雨があったが、係数を変更した雨量指標 R' を用いることにより、危険な領域を矛盾なく表現することができた。

また、短時間の集中豪雨の事例では、流動性の高い土砂移動現象はなく、河川水位の急上昇による浸水被害があった。このことは、先行降雨を伴わない短時間強雨時は、地中にあまり浸透せずに表流水として流出しやすいことを示唆しており、第 3 章のモニタリングおよび人工降雨実験の結果と調和的である。

これらの事例からも、 R' を雨量指標として用いることの有効性が確認されたが、その係数や土砂移動現象発生の限界降雨量は地域により異なることがわかった。

第5章では、予測手法に地域特性を反映するために、土砂移動現象に対する降雨履歴、地質、地形など影響について検討した。

降雨履歴との関係については、統計的手法を用いて、地域の降雨履歴を R' の生起確率により評価する方法を提案した。これにより、広島県では8年確率程度の R' 値を用いて土石流の発生限界降雨量（基準値）を設定できることを示した。

地質との関係については、広島県の主要な土砂災害が花崗岩地帯で発生していることを再確認した。また、地質境界域での豪雨事例により、土石流などの流動性の高い土砂移動現象は特に花崗岩分布域で顕著であることを示した。さらに、玄武岩ドーム分布箇所での地すべり事例をもとに地質構造との関係について検討した。対象地域では、地質構造に起因して非常に長い半減期の実効雨量で表現されるような地下水変動があり、それに伴った変動が発生している。当事例では480時間と72時間の半減期を組み合わせた実効雨量による R' を用いることにより変動時期を適切に表現することができた。

地形との関係については、背後に侵食小起伏面が分布する箇所での発生しやすさを再検証するとともに、上部の地形形状や地質構造によって地下水を集めやすい地域があれば、土砂移動現象が発生しやすいことを示した。

加えて、溪流の出口に形成された扇状地形、古い時代の土石流堆積物の存在、風倒木被害によるダメージ、地震との関係について論じた。

第6章では、新しく監視雨量強度 R_R なる指標を定義し、警戒避難のためのわかりやすい情報手段を提案した。

R_R は「次の1時間に降れば R' の値が基準値を超える雨量」を指し、豪雨に伴う土砂移動現象の危険度の高まりを予測するものである。警戒避難のための方法として用いる際には、1時間雨量の生起確率や短時間降水量予測などを参考に、レベルA～レベルCなどの危険度指標を設け、雨量指標 R' と併せて用いれば、より直感的でわかりやすい警戒避難情報手段となると考えられる。ここでは、第5章の方法で基準値を設定し、東広島市でケーススタディーを行った結果、この方法で R_R を用いることにより適切な危険度評価が可能であることがわかった。

また、東広島市の災害事例を対象に、レーダー・アメダス解析雨量による R' 値を適用すると、地上観測雨量のみでは表現できない強雨域の分布を示すことが可能であり、解析雨量が非常に利用価値の高いものであることが検証された。

第7章では、研究成果の結論をまとめるとともに、今後の展望や実用化に向けた課題についてまとめた。

雨量指標 R' の状況とその移り変わりをリアルタイムで分布図に示すとともに、監視雨量強度 R_R を表示する方法を用いれば、降雨予測情報と併せて適切な警戒避難情報となるものと期待される。地域特性や地質条件の違いによって、それに応じた係数や基準値、管理閾

値を設定すれば、これらの手法は広く適用できるものと考えられる。

本論文では、土砂移動現象に対する降雨履歴、地質、地形など影響について検討し、このうち降雨履歴については、統計的手法を用いて影響程度を評価する手法を提案した。地質や地形については影響要因を絞り込んだが、現段階では広島周辺の花崗岩地帯における係数や基準値を提案に留まっている。今後この手法を他の地域に展開するに当たっては、それぞれの地域の事例を適用して地域に応じた係数を設定することが望まれる。

また、本研究の範囲では R' 分布による方法は地上での実測値をもとにしたものであるが、これにレーダー・アメダス解析雨量による予想降水量の情報を加えて R' 値の予測値を出すことができれば、より精度の高い警戒避難に供することのできる指標となりうるものと期待される。

Study on Debris Movement Forecasting using Rainfall Index that Reflects Certain Regional Characteristics

ABSTRACT

It is necessary to establish a better method for predicting rainfall-induced debris movements based on current rainfall conditions in order to mitigate sediment-related disasters. For this purpose, a scientific and rational rainfall index that considers regional geological and topographical characteristics should be established. In this study, the author has proposed a warning system for preventing sediment-related disasters that considers regional rainfall characteristics.

In the 1st chapter, the author describes several previous and current disaster prediction methods and their advantages and disadvantages. Although it is extremely important to reflect regional characteristics for disaster prediction, many problems continue to exist.

In the 2nd chapter, a new rainfall index, denoted as R' , is proposed for warning against sediment-related disasters. It is possible to express the influences of both previous and current rainfalls using a single value of R' . The risk can be determined easily using the spatial distribution of R' . To calculate R' with the concept of effective rainfall, a combination of two half-value periods (72 h and 1.5 h) is applied. In the decomposed granite area around Hiroshima Prefecture, the critical values of R' for debris flows, hillside landslides, and slope failures were found to be 250 mm, 175 mm, and 125 mm, respectively. The scale of a sediment-related disaster can be indicated by the value of R' .

In the 3rd chapter, the physical characteristics of R' were confirmed by monitoring the relationship between soil water content and rainfall. In general, the slope stabilization problem against rainfall is explained by the occurrence of pore water pressure (due to an increase in underground water levels) and the decrease in shear strength (due to a decrease in suction). During in-situ monitoring, it was observed that the water content of the surface layer increased rapidly even with light rainfall, and that of the basal layer tended to increase with rainfall accumulation. On the other hand, the water content of the intermediate layer increased only when both of the previous rainfall and current rainfall intensity were considerably high. This tendency was also observed in an indoor experiment. In other words, the uptrend of water content differs depending on the rainfall pattern.

In the 4th chapter, the applicability of R' was verified in 8 cases having different characteristics. For example, in Paleozoic rock or rhyolite areas, different coefficients and a larger threshold had to be used for the calculation of R' . Accordingly, the critical value of R' should be varied depending on the local characteristics.

In the 5th chapter, some factors that influenced debris movement were investigated. It was noted that the local characteristics affect the critical value of R' in each region. For example, for evaluating the regional rainfall history, the utilization of the occurrence probability of R' was proposed. As a result, it was shown that the critical value of R' for debris flow occurrence in Hiroshima Prefecture could be fitted with an R' value of 1/8 probability.

In the 6th chapter, the new concept of “remarkable rainfall intensity R_R ” is proposed; this index is used for understanding the disaster risk easily, and its usefulness was demonstrated through some examples. R_R was defined as “hourly rainfall required for the critical value of R' to become dangerous.” For the practical use of R_R in the warning system for disaster prevention, it is necessary for a warning level to be set. R_R can be used in a more intuitive and comprehensible manner in conjunction with the distribution map of R' . The applicability and utility of R_R was confirmed through case studies in Higashi-Hiroshima City.

The 7th chapter presents the conclusion of this study. If the current level of risk and the distribution of R' along with information about the remarkable rainfall intensity R_R can be obtained through an early warning system, lives can be saved through the timely evacuation of people before a disaster actually occurs.

Keywords: Rainfall index R' , remarkable rainfall intensity R_R , sediment-related disaster, warning and evacuation

目 次

序 論	.....	1
研究の背景	.....	1
研究の目的と位置づけ	.....	3
本論文の構成と内容	.....	4
第 1 章 既往の土砂災害予測手法と課題	.....	7
1.1 予測手法の分類と整理	.....	7
1.2 日本における雨量指標の特徴と課題	.....	9
1.2.1 複数の雨量指標を用いる手法	.....	12
1.2.2 連携案方式による土砂災害警戒情報	.....	16
1.2.3 各手法の特徴と課題	.....	19
1.3 諸外国における雨量指標	.....	20
1.3.1 欧米諸国の雨量指標	.....	20
1.3.2 東アジア諸国の雨量指標	.....	23
1.4 本章のまとめ	.....	25
第 2 章 新しい雨量指標 R' の提案	.....	31
2.1 雨量指標 R' の開発	.....	31
2.1.1 雨量指標 R_{fw}	.....	31
2.1.2 雨量指標 R' への変換	.....	32
2.1.3 半減期, 基準点, 係数の検討	.....	33
2.2 雨量指標 R' の検証	.....	34
2.2.1 雨量指標 R_f との比較	.....	34
2.2.2 R' の適合性の検証	.....	36
2.2.3 R' の空間分布と時間変動	.....	41
2.2.4 雨量指標 R' の上昇頻度	.....	43
2.2.5 雨量指標 R' と災害規模	.....	44
2.3 既往雨量指標の工夫による表現方法の改良	.....	47
2.4 本章のまとめ	.....	50

第 3 章 雨量指標 R' の物理的意味	53
3.1 降雨による斜面崩壊の物理的解釈	53
3.2 現地モニタリング結果から見た降雨と土中水分の関係	55
3.2.1 計器設置と観測状況の概要	55
3.2.2 地点ごとの変動傾向	57
3.2.3 降雨量と体積含水率の関係	62
3.2.4 降雨事例ごとの雨量と土中水分の関係	66
3.3 人工降雨実験による降雨と土中水分の関係	73
3.3.1 人工降雨実験の方法	73
3.3.2 実験結果と考察	74
3.4 本章のまとめ	81
第 4 章 災害事例を用いた雨量指標 R' の適用性の検証	85
4.1 検証対象事例の抽出	85
4.2 広島県における R' の事例検証	85
4.2.1 広島県の花崗岩分布域での災害事例	86
4.2.2 広島県その他の地質分布域での災害事例	89
4.3 広島県以外の地域における R' の事例検証	98
4.3.1 岡山県の花崗岩分布域での災害事例 (2004 年台風 23 号)	98
4.3.2 神奈川県の花崗岩分布域での災害事例 (2005 年台風 11 号)	100
4.4 本章のまとめ	103
第 5 章 予測手法への地域特性の反映	107
5.1 降雨履歴と土砂移動現象の関係	107
5.1.1 広島県の降雨履歴と土砂移動現象	107
5.1.2 生起確率を用いた評価	109
5.1.3 土石流発生に対する R' の基準値の検討	111
5.2 地質特性と土砂移動現象の関係	113
5.2.1 広島県の地質特性と土砂移動現象	113
5.2.2 地質構造と土砂移動現象	118

5.3 地形特性と土砂移動現象の関係	.....	121
5.3.1 広島県の地形特性と土砂移動現象	.....	121
5.3.2 侵食小起伏面からの地下水供給の可能性	.....	125
5.3.3 地形情報から抽出しうる災害危険箇所	.....	129
5.4 地震による斜面不安定化の影響	.....	131
5.5 本章のまとめ	.....	134
第6章 警戒避難に向けた表現方法の検討	.....	139
6.1 雨量指標 R' の課題	.....	139
6.2 監視雨量強度 R_R の提案	.....	140
6.3 監視雨量強度 R_R による警戒避難情報の検討	.....	141
6.4 東広島市を対象とした警戒避難情報のケーススタディー	.....	143
6.4.1 東広島市の概要と近年の土砂災害	.....	143
6.4.2 東広島市で災害の誘因となる降雨	.....	146
6.4.3 東広島市の基準値と R_R の管理閾値の設定	.....	147
6.4.4 東広島観測所での警戒避難頻度	.....	152
6.4.5 2005年台風14号でのケーススタディー	.....	156
6.5 レーダー・アメダス解析雨量利用の検討	.....	158
6.6 本章のまとめ	.....	162
第7章 結論および展望	.....	165
7.1 本研究の結論	.....	165
7.2 今後の展望と課題	.....	168
謝 辞	.....	171

序 論

研究の背景

わが国は四方が海に囲まれた島国であり、国土の約70%は山地で、その多くは森林で占められている。大半の地域は温暖湿潤気候に属し、平均的な年間降水量は約1,700mmと比較的降水量の多い地域である。降水の主な要因は前線が停滞して起こる梅雨、夏季から秋季にかけて接近・上陸する台風および日本海側での冬季の降雪である。四季の変化が明瞭で風光明媚な国土を有しているが、平坦地に乏しく、居住地の多くは山から河川によって運搬された土砂が堆積した三角州や扇状地、山麓や山腹の緩斜面などに該当する。人々は自然災害の脅威にさらされており、毎年のように各地で豪雨による洪水や土砂災害で尊い人命や財産が失われている。

このため古くは江戸時代に現代の砂防事業にあたる「砂溜」が福山藩によって造られ¹⁾、現在、堂々川一番砂溜～六番砂溜をはじめいくつかの砂溜が国登録有形文化財に指定されている。明治時代からは、各地で砂防事業が行われるようになり102件が歴史的砂防施設として国登録有形文化財に登録されている (<http://www.mlit.go.jp/river/sabo/bunkazai/>)。土砂災害の危険箇所や前兆現象については、災害を経験した先人たちが子孫の身を案じて言い伝えや地名として後世に伝えられており、1988年に豪雨災害が発生した広島県北西部においても、約200年前の寛政8年(1796年)に発生した大災害が伝えられていたという²⁾。

このように土砂災害の対策は古くからなされてきた。しかし、国土交通省による調査 (<http://www.mlit.go.jp/river/sabo/link20.htm>) では、全国に50万箇所以上もの土砂災害危険箇所が存在することが把握されており、全てを対象としたハード対策事業を行うことは極めて困難である。また、近年は宅地開発による市街地の拡大に伴い、その危険性を認識することなく溪流の出口や斜面付近などに住居が立地していることも多く、これが土砂災害の被害を拡大させる大きな要因となっていることが指摘され³⁾、ソフト対策の必要性が増してきている。

1999年6月29日に広島県西部で発生し、死者24名の大きな被害が生じた豪雨による土砂災害では、山麓に造成された新興住宅地で著しい被害が発生したことが問題となり、河川審議会答申 (http://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/past_shinngikai/shinngikai/shingi) で取り上げられた。これを発端に、警戒避難によるソフト対策の実施がさらに重要視されるようになり、2001年4月1日には「土砂災害警戒区域等における土砂災害防止対策の推進に関する法律」(2000年5月8日法律第57号；以下「土砂災害防止法」) が施行された。土砂災害防止法は、土砂災害から国民の生命を守るため、土砂災害のおそれがある区域を明らかにし、警戒避難体制の整備、住宅等の新規立地抑制、既存住宅移転促進などの対策の推進を図ることを目的としている。この法律により土砂災害の危険がある区域の指定が都道府県に義務付けられ、さらにその区域内での情報伝達および警戒避難体制の整備と警戒避

難に関する事項の住民への周知が、明確に市町村長に義務付けられた³⁾。

これらの背景から、防災に関する関心は高まってきており、行政や地域においても土砂災害軽減にむけての様々な取り組みがなされている。2005年6月には国土交通省河川局砂防部と気象庁予報部が「都道府県と気象庁が共同して土砂災害警戒情報を作成・発表するための手引き」⁴⁾を作成し、この中で提唱された「連携案方式による土砂災害警戒情報」が運用されているところである。また、国土交通省砂防部は2007年4月に、「土砂災害警戒避難ガイドライン」⁵⁾を作成し、特に留意すべき事項として、情報の収集・伝達、避難勧告等の発令、避難所の開設・運営、災害時要援護者への支援、二次災害防止、防災意識の向上等の考え方をとりまとめている。この中で、大雨による土砂災害発生の危険性が高まったときに、市町村長が防災活動や住民等への避難勧告等の対応を適時適切に行えるように支援するとともに、住民自らの避難の判断等にも参考となるよう、都道府県砂防部局と気象庁が共同で土砂災害警戒情報を発表するよう定めている。こうして災害対策基本法に基づき都道府県から市町村等へ通知されていた「予想される土砂災害等の事態とこれに対してとるべき措置」と、気象庁が行っていた大雨警報発表の際の「土砂災害のおそれについての解説」が一本化されることになった。気象庁と都道府県のデータを用いて地域の危険度をリアルタイムに周知するということが、全国レベルで実施されるようになり、これは非常に意義深いことである。

一方で、土砂災害対策懇談会により2008年3月に作成された「中長期的な展望に立った土砂災害対策に関する提言～死者ゼロの実現を目指して～」⁶⁾では、今後研究を進めていくべき課題の一つとして「警戒避難の高度化に向けた技術開発」を取り上げ、現状の土砂災害警戒情報は市町村単位で発表されているため、よりきめ細かな情報提供に向けた技術開発を進める必要があることを指摘している。具体的には、雨量・地形・地質特性を加味した危険度情報、斜面の変状情報等により対象地域を絞ったよりきめ細かな危険度情報の作成技術の開発すること、及び迅速・的確、かつよりわかりやすく住民等に周知・提供できる手法の検討等を推進することの必要性を述べ、さらに土砂災害の発生メカニズムの解明を踏まえ、その発生予測に関して引き続き研究を進めるべきであると結論付けている。

このように、災害の発生条件は地域により異なるため、ソフト対策を実施するにあたっては地域ごとの特性を反映できることが重要である。本研究は、土砂移動現象の発生予測のための新しい雨量指標を考案し、これを用いて雨の降り方などの誘因と斜面の特性から土砂移動現象の発生を予測することにより、土砂災害を軽減するためのソフト対策（警戒避難）の手段を提案するものである。

研究の目的と位置づけ

土砂災害の予知・予測手法は、場所の予測と時の予測に大別される。場所の予測には、発生機構や発生条件等の基礎理論に基づく解析的手法、多数の発生・非発生データから種々の素因を組合せた確率統計論に基づく現象論的手法がある。一方、時の予測には、主に誘因（降雨・流量・地下水等）に着目して多数の発生・非発生データからモデル化を行う現象論的手法、変位・ひずみ・音・間隙水圧・土中水分などの危険因子による計測管理手法がある⁷⁾。

現在、広域的な土砂災害の発生予測に最も一般的に用いられる手法が、降雨量を用いた指標である。これまでの雨量指標に関する研究については第1章で詳述するが、土砂災害の危険度を示す指標のひとつとして、直接的な誘因である降雨を用いる試みは古くから行われている。雨量指標に関する研究は、1970年頃から活発に行われるようになり、現在、全国レベルで「土砂災害警戒情報」が実用されるに至っている。これにより降雨状況から危険を判断し、警戒避難を促すという方法は根付いてきたが、前述の土砂災害対策懇談会による指摘のように、地域住民に、降雨による土砂災害の危険度を的確に周知・提供できるようにするためには、①雨量・地形・地質特性などの地域特性を反映した危険度情報を、②迅速かつ的確に、③わかりやすい形で発する必要がある、さらなる研究が必要である。

本研究では、「雨量指標 R' 」なる手法を提案し、地域ごとの特性を反映する方法について検討した。そして、警戒避難のための手法としてこれを発展させ、「監視雨量強度 R_R 」なる指標を提案し、その有用性を確認した。さらに、広島県および周辺地域を対象としたケーススタディーから、土砂移動現象が発生するための限界降雨が地質・地形・降雨履歴などの地域特性に大きく依存することを再確認し、地域特性を考慮した危険度情報の必要性を指摘した。

雨量指標 R' は、連続して変化する単一指標であるため、蓄積されたデータがあれば、統計処理により地域ごとの特性を容易に評価することができる。この点に着目して、土砂災害発生の限界降雨量を左右する要因の一つとして「地域ごとの降雨履歴」をとりあげ、雨量指標 R' に確率降雨の考え方を取り入れることにより土石流発生基準雨量を地域ごとに設定する方法を提案した。

監視雨量強度 R_R は、次の1時間にどれくらいの降雨があれば R' の値が発生基準雨量を超えるかということを示す指標である。本研究ではこれを用いた警戒避難情報を発する方法を提示し、発生時刻が特定できる土石流災害の事例により、この方法を用いることが、わかりやすい警戒避難情報提供の手段となりうることを示した。

本論文の構成と内容

本論文は、土砂移動現象の発生予測のための新しい雨量指標を考案し、これを用いて雨の降り方などの誘因と斜面の特性から土砂移動現象の発生を予測することにより、土砂災害の軽減を目的とした警戒避難のための防災情報手段を提案するものである。本論文は以下に示す内容で構成されている。

第1章 既往の土砂災害予測手法と課題

第1章では、既往の土砂災害予測手法と課題を整理し、既往の土砂災害予測手法について、その概要をまとめる。本研究で取り扱う雨量指標を用いた土砂災害予測に関する研究は1970年ごろから取り組まれるようになり、様々な雨量指標が開発されてきたが、その適用性や実用性には課題も多い。本章では、これまでに用いられてきた雨量指標を中心とした土砂災害予測手法について整理し、その課題を整理する。

第2章 新しい雨量指標 R' の提案

第2章では、本研究で提案する「新しい雨量指標 R' 」について、その定義や基本的な考え方をとりまとめる。新しい雨量指標 R' は、土砂移動現象の発生に影響を及ぼす先行降雨と短時間の降雨強度の影響を1つの値で表すための指標である。雨量指標 R' により、リアルタイムに近い形で、時間とともに変動する危険度の空間的分布をわかりやすく表現することが可能となった。ここではこの指標を解説するとともに、災害事例をもとに係数などの設定方法について検討し、 R' 値の上昇頻度や災害規模との関係に言及する。

第3章 雨量指標 R' の物理的意味

第3章では、1999年に土石流災害が発生した東広島市助実地区における土中水分の現地モニタリング結果と、室内における人工降雨実験の結果を用いて、降雨による土中水分の変化に着目し、雨量指標 R' の物理的意味を考察する。

第4章 災害事例を用いた雨量指標 R' の適用性の検証

第4章では、広島県の事例6件、他地域の事例2件の合計8事例を用いて、雨量指標 R' の適用性を検証する。これら8件は、災害形態や降雨特性、地域特性などが多種多様であるため、様々な側面から雨量指標 R' と災害特性について検討し、 R' という情報の読み取り方や、その課題点について考察する。

第5章 予測手法への地域特性の反映

第5章では、予測手法への地域特性の反映について検討する。第4章における事例検証から、土砂災害発生降雨の基準値は降雨履歴や地質条件、地形条件などによって異なることがわかった。ここでは、土砂移動現象と降雨履歴、地質、地形などの要因について事例

を用いながら、その影響について検討する。特に降雨履歴と土石流発生限界降雨の関係については、統計的手法を用いてこれを評価する方法を提案し、事例を用いて検証する。

第6章 監視雨量強度 R_R による防災情報手段の提案

第6章では、「監視雨量強度 R_R 」という新しい概念を用いた指標を提案する。監視雨量強度 R_R は「次の1時間に降れば R' の値が基準値を超える雨量」を指すもので、雨量指標 R' に加えてこれを導入することにより、豪雨に伴う土砂移動現象の危険度の高まりを予測することが可能となる。ここでは、これらの指標を用いた警戒避難のためのわかりやすい情報手段を提案し、東広島市を対象としたケーススタディーを行う。

第7章 結論および展望

第7章では、研究成果を総合的に考察し、結論をまとめる。また、今後の展望や実用化に向けた課題についてまとめる。

【引用文献】

- 1) 広島県土木部砂防課(1997): 福山藩の砂溜—その歴史的背景と構造—, 大学印刷株式会社, 289p.
- 2) 木村逸司(1989): 集中豪雨を追う—昭和 63 年 7 月加計, 浜田災害—, 中国新聞社, 溪水社, 108p.
- 3) 国土交通省河川局水政課・砂防部砂防計画課監修(2003): 土砂災害防止法令の解説, (社)全国治水砂防協会, 300p.
- 4) 国土交通省河川局砂防部・気象庁予報部(2005): 都道府県と気象庁が共同して土砂災害警戒情報を作成・発表するための手引き, 18p.
- 5) 国土交通省砂防部(2007): 土砂災害警戒避難ガイドライン, 66p.
- 6) 土砂災害対策懇談会(2008): 中長期的な展望に立った土砂災害対策に関する提言～死者ゼロの実現を目指して～, 23p.
- 7) (社)地盤工学会中国支部(2003): まさ土地帯の風化及び降雨浸透特性と斜面災害に関する研究報告書, 268p.

第1章 既往の土砂災害予測手法と課題

土砂災害を防止するための研究としては、地形・地質学的にその素因に着目した理学的研究、誘因である降雨など気象現象や地下水などに着目した研究、土砂の物理的特性や土砂移動原現象のメカニズム、流動特性などに着目した工学的な研究などが盛んに行われ、多くの知見が得られてきている。また、土砂災害の危険性がある斜面の調査の調査技術の研究や、土砂災害防止や斜面安定化のための対策工の開発のための研究も進められてきている。

しかし日本全国に数多くの危険箇所が存在し、土砂移動現象を直接抑止・抑制するハード対策を完全に行うことは時間的・財源的に困難であることから、近年では警戒避難を含めたソフト対策に対する需要が高くなってきている。このため、精度が高くかつ、より扱いやすい土砂災害の予測手法が求められている。ここでは、既往の土砂災害予測手法について分類・整理し、その課題に言及する。

1.1 予測手法の分類と整理

土砂移動現象は、発生源としての素因をもった斜面に、降雨や地震などの誘因が加わり、安定条件の限界を超えたときに発生する。これが、人の身体や生活、財産に影響を与える場で発生するか、あるいは流動化して到達するものを土砂災害という。

土砂災害に対して適切なソフト対策を行っていくためには、土砂移動現象が発生する「場所の予測」と「時の予測」¹⁾に加え、土砂移動現象が発生した際に、土砂災害としての被害を最小限に軽減できるような取り組みが必要である（図-1.1）。

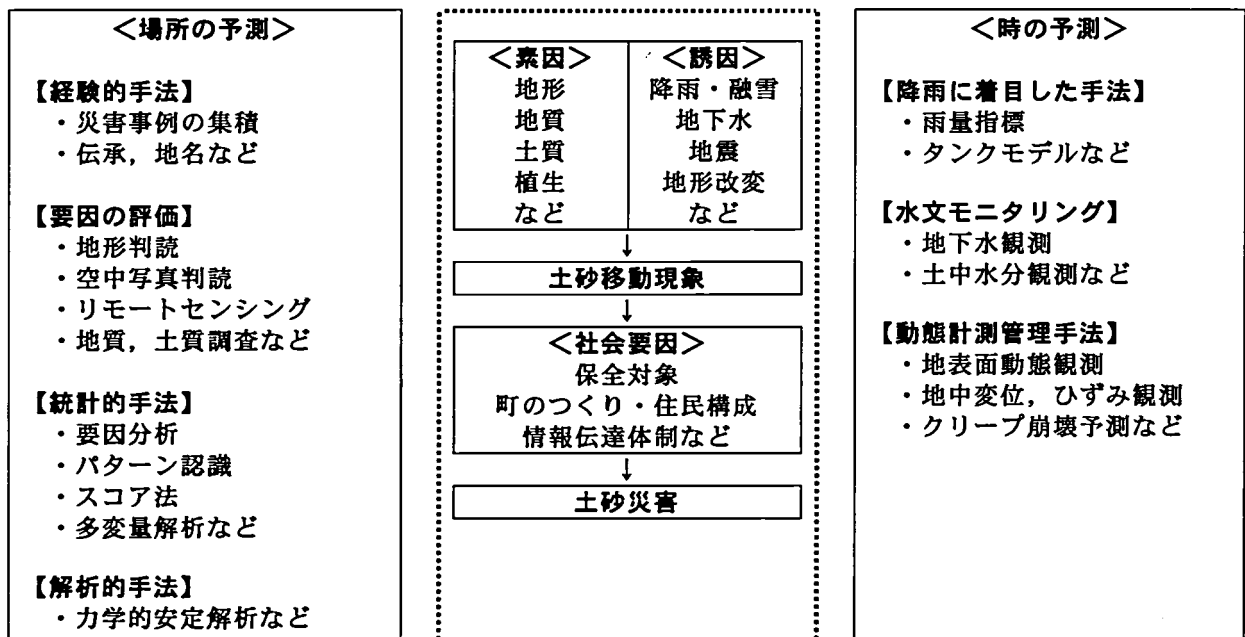


図-1.1 主な予知予測手法の分類図

Fig. 1.1 Classification of forecasting techniques for sediment-related disasters

場所の予測には素因に着目したものが多く、かつて土砂災害が発生した場所の伝承²⁾や地名から予測する経験的な方法^{3),4)}や、地形条件、分布地質、風化状況、地質構造などの調査により斜面の危険性を評価する方法などがある。また、土砂災害が発生しやすい要因を組み合わせ分析し統計的手法を用いて危険箇所を抽出する方法^{5),6)}など、あるいは力学的なモデルを用いた安定解析や検討による方法などがある。一般に、力学的な手法を用いるためには、現地調査により個々の斜面の土質強度を評価する必要があるが、簡易な現地調査により危険度を判定する方法も研究されている^{7)~9)}など。

時の予測は、誘因に着目したものと斜面の変動を直接モニタリングするものに区分され、前者としては降雨に着目したものと地下水・土中水分に着目したもの^{10),11)}など、降雨流出のピークに着目したもの¹²⁾などなどがある。後者としては地表面や地中の動態観測に着目したもの^{13)~15)}などがある。

降雨に着目したものは、雨量指標あるいはタンクモデルなどに置き換えて、統計的な判断から土砂災害の危険性が高まる時期を予測するもので、本研究もこれを主体としたものである。地下水や土中水分のモニタリングによるものは、地中や地表の動態観測と組み合わせ用いられることが多く、地下水の変動に伴って継続的に変動している地すべり地の調査では非常に一般的に用いられており、管理基準値を設けて警戒避難の指標としていることも多い。

動態観測により移動速度の変化から崩壊時期を予測する手法としては、斉藤によるクリープ破壊予測法^{13),14)}、福囿による移動速度の逆数による予測法¹⁵⁾などが提案されている。斉藤^{13),14)}は現場測定と実験によって、斜面の歪速度と崩壊までの時間との関係を得て、二次クリープからの概略の崩壊予測式を導いており、クリープ破壊時間を実際の崩壊までの余裕時間として使用できるとし、三次クリープ領域における予測方法も示している。

また、笹原^{11),12)}は鉛直一次元不飽和浸透解析と二次元斜面変形モデルを組み合わせた降雨による急勾配砂質土斜面のせん断変形の予測モデルを開発し、人工降雨による模型斜面崩壊実験で、このモデルで地表面変位の経時変化を説明できることを示している。

このように、土砂移動現象の予測に関して様々な研究がなされているところであるが、これらの予測手法には、大掛かりな調査や特殊な観測機器を必要とするものも多い。また、個別斜面の調査やモニタリングが必要な手法は、現時点で活動している地すべりや、専門家のスクリーニングなどにより危険であると判断された特定の斜面の崩壊時期予測には有効であるが、広範なソフト対策としては不向きである。

本研究では、豪雨の際に市町村の防災担当者や地域住民が「自分の住んでいる地域の周辺はどの程度危険な状態になっているのか？」という判断をする際の一助となるよう、時間ごとの雨量情報さえ入手できれば容易に算定できる「雨量指標」を用いた予測手法を用いることとする。

1.2 日本における雨量指標の特徴と課題

土砂災害の危険性が高まる時期を予測する手法として最も一般的に用いられる手法が、降雨量を指標とした手法である。

雨量指標を用いた土砂移動予測に関する研究は、表-1.1 に示すように 1970 年頃から活発に行われており、これらは単一指標を用いるもの^{16)~26)}、複数指標を用いるもの^{27)~47)}、雨量を地下水や流量などに置き換えたものや既手法を応用したその他の手法^{21),24),31),48)~60)}に大別することができる。

初期の頃は、雨量強度や積算雨量などの単純な指標を用いるものが主体であったが、次第に先行降雨の影響を考慮した実効雨量、改良実効雨量²⁶⁾、有効雨量と有効雨量強度の組み合わせ²⁸⁾や、長期実効雨量と短期実効雨量の組み合わせ³⁶⁾などの指標やタンクモデル²¹⁾などなどの水文学的手法が研究されるようになり、以降、これら手法の利点を組み合わせた手法が研究されてきている。

1990 年代半ばから、重判別分析を用いて地形要因や降雨パターンを評価し、雨量指標と組み合わせて用いる研究^{40),41)}などや、ニューラルネットワークを用いて地形要因と降雨要因から崩壊発生を予測する研究^{49),50)}などが行われるようになった。また、これと並行して気象庁により、タンクモデルを応用した土壤雨量指数^{51),52)}が運用されるようになった。

現在、都道府県と気象庁が共同して発する「連携案方式による土砂災害警戒情報」が運用されているが⁵⁹⁾、これは土壤雨量指数と時間雨量の係数に RBFN (Radius Basis Function Network) による CL (Critical Line)⁵⁵⁾ を組み合わせた方法である。この方法は、レーダー・アメダスによる数時間先までの予測降雨を用いて数時間後の土砂災害発生危険度を予測して、土砂災害警戒情報を発するものである。この取り組みにより、全国レベルで都道府県と気象庁が共同して地域の危険度をリアルタイムで発するようになったことは非常に大きな成果であるといえる。

一方でこの手法は、地方自治体や民間事業者が独自に扱い難いレーダー・アメダス解析雨量とRBFNを用いるというものであるため、「地域に応じたよりきめ細かな危険度」を知ろうとする際には、その実用性や簡便性からも実効雨量による方法も依然として広く利用されている。JR東日本では2008年6月から旧基準の時間雨量と連続雨量の組み合わせに変えて、実効雨量を運転規制に導入している⁴⁷⁾。

ここでは、現在広く用いられている「複数の雨量指標を用いる手法」と、近年運用が開始された「連携案方式による土砂災害警戒情報」に着目して、その概要と変遷をまとめる。

表-1.1(1) 雨量指標を用いた土砂移動予測に関する研究の変遷 (1970~1993年)
 Table 1.1(1) History of researches on forecasting of debris movements using rainfall index (1970 - 1993)

		単一雨量指標	複数雨量指標		その他の手法	
1970	松本砂防工事事務所 ¹⁶⁾	焼岳 8mm/10分以上				
1971	国鉄(山田ら) ¹⁷⁾	1時間雨量により第1種~第3種の警備				
1972			網干,低引 ²⁷⁾	S42 広島県呉災害 長期間降雨量(2週間雨量)と短時間降雨量(当日雨量)		
1973			瀬尾,船崎 ²⁸⁾	S47.7月災害 熊本等15県178溪流 有効雨量と雨量強度		
1974			池谷 ²⁹⁾	S47.7月災害 降雨強度勾配と変曲点までの雨量(雨量強度比)		
1977	芦田ら ¹⁸⁾	40~50mm/h 総雨量300~350mm				
1978	塩島,磯望,松原,山川,米沢 ¹⁹⁾	岐阜高原川流域 総雨量29~200mmで11%, 200mm以上で100%発生	瀬尾,横部 ³⁰⁾	六甲大戸川,木津川上流 有効雨量と雨量強度	芦田,高橋,沢井 ³¹⁾	木津川上流 土石流発生限界流量
	九州地建 ²⁰⁾	桜島 5以下mm/10分 10mm以上/h	芦田,高橋,沢井 ³¹⁾	木津川上流災害 時間雨量と積算雨量		
1979	鈴木,福高,武居,小橋 ²¹⁾	六甲山系の災害 日雨量190mm以上 総雨量200mm以上			鈴木,福高,武居,小橋 ²¹⁾	六甲山系 タンクモデルの貯留量
	渡辺,徳山,中山,二宮,大八木 ²²⁾	仁淀川災害 計画降雨毎にハイトグラフを用いる,目安とする2hと1h雨量を基準雨量とする				
1980	青木 ²³⁾	総雨量400mm以上				
1981	鈴木,小橋 ²⁴⁾	広島県呉市,広島県と周辺 実効雨量(半減期24h),限界値55mmで96%の的中率			鈴木,小橋 ²⁴⁾	広島県呉市,広島県と周辺 タンクモデル
1983			瀬尾,水山,万膳,塩島 ³²⁾	高知県等8県災害 有効雨量強度-実効雨量		
1984			瀬尾,万膳,塩島 ³³⁾	高知県等8県災害 有効雨量強度-実効雨量		
			総合土石流対策等技術検討会:建設省 ³⁴⁾	1時間雨量と実効雨量(A案)		
1988	田中,藤原 ²⁵⁾	岡山市(S47~60,158件) 実効雨量(半減期12h),限界値45mmでの中率90%				
1990	矢野 ²⁶⁾	実効雨量(前期降雨の改良)	岩元,原田,平野 ³⁵⁾	長崎地区,天草地区,鹿児島市,島根県西部最大累加雨量と経過時間		
1993			建設省 ³⁶⁾	総合土砂災害対策検討会における提言 実効雨量(半減期72h,1.5h)	牧原,平沢 ⁴⁸⁾	四国,熊本県,大分県の1981~1990の斜面崩壊 タンクモデル

表-1.1(2) 雨量指標を用いた土砂移動予測に関する研究の変遷 (1994~2007年)
 Table 1.1(2) History of researches on forecasting of debris movements using rainfall index (1994 - 2007)

	単一雨量指標	複数雨量指標	その他の手法
1994		藤井,久保田,奥村 ³⁷⁾ 長崎県雲仙岳,島根県,小豆島,高知県 雨量強度と累加雨量	
1995			久保田,池谷 ⁴⁹⁾ 雲仙,川本,小豆島,物部 時間雨量と実効雨量を用いたニューラルネットワーク
1996		鉄道防災: 村石,島村 ^{38,39)} 時間雨量と連続雨量	
1997		荒木,古川,松永,小笠原,石川,水山 ⁴⁰⁾ 広島県加計災害 時間雨量,有効雨量,有効時間+地形要因	荒木,古川,松井,大木戸,石川 ⁵⁰⁾ 広島県加計災害実効雨量(半減期24h),降雨重心+地形を要因としたニューラルネットワーク
1998			牧原 ⁵¹⁾ 全国の土砂災害 土壌雨量指数
2000		高橋,松岡,瀬尾,荒木,古川,水山 ⁴¹⁾ 山口県東部,北部 時間雨量,実効雨量(半減期72h)+地形要因	岡田 ⁵²⁾ 全国の土砂災害 土壌雨量指数
		瀬尾,高橋,荒木,古川,水山 ⁴²⁾ 山口県大島郡 時間雨量,実効雨量(半減期72h)によるGISシステム	海堀 ⁵³⁾ 1999年広島災害 1時間前の実効雨量と1時間雨量を同一平面上に描き,危険を示す
2001		瀬尾,原口,菊井,吉田 ⁴³⁾ 熊本,新潟,福島,高知の災害事例 実効雨量(半減期72hと1.5h)	佐々木,森脇,加納,白石 ⁵⁴⁾ 広島県広島災害 Rf(連続雨量と時間雨量から導き出した指標)
			倉本,鉄賀,東,荒川,中山,古川 ⁵⁵⁾ 実効雨量(半減期72h)と時間雨量, RBFNによるCL設定
2002		倉本,守川,鉄賀,荒川,中山,古川 ⁴⁴⁾ 山口県下関市がけ崩れ災害 時間雨量,実効雨量(半減期72h)	倉本,守川,鉄賀,荒川,中山,古川 ⁵⁶⁾ RBFNによるCL設定 斜面要因を考慮
2003		島村 ⁴⁵⁾ (JR東日本) JR東日本域内 実効雨量(半減期1.5h,6h,24hの組合せ)	岡野,牧,湯川,天野,菊井 ⁵⁷⁾ X-Y平面上のCLを $b=ax+y$ と表現し,合成指標 $ax+y$ を用いて危険度を評価する
		岡本 ⁴⁶⁾ データマイニングによる要因抽出と時間雨量,実効雨量(半減期72h)	
2005			野呂,倉本,小山内 ⁵⁸⁾ 土壌雨量指数と時間雨量, RBFNによるCL設定(連携案)
			砂防部,気象庁,国総研 ⁵⁹⁾ 土壌雨量指数と時間雨量, RBFNによるCL設定(連携案)
2006			小山内,野呂 ⁶⁰⁾ 土壌雨量指数と時間雨量, RBFNによるCL設定(連携案)
2007		鈴木,山村,島村 ⁴⁷⁾ (JR東日本) JR東日本域内 実効雨量(半減期1.5h,6h,24hの組合せ)	

1.2.1 複数の雨量指標を用いる手法

一般に土砂災害の発生は、そのとき降っている雨だけではなく、それまでに降った雨の影響も受けており、この影響の度合いは経過時間が大きくなるほど減少する。実効雨量は、半減期という概念を用いて過去に降った雨の影響を次第に低減させ、地山の崩壊しやすさを表現したものである。

(1) 有効雨量と有効雨量強度

網干・低引²⁷⁾は、土砂災害（特に、土石流が発生するような流動性の高い現象による災害）の発生・非発生には、長期間にわたる降雨量（彼らは2週間雨量を採用）と短時間の降雨量（同じく当日の雨量を採用）の組合せが効いていることを示している。また、瀬尾ら^{28),30)}は、累加雨量の変曲点からの有効雨量と有効雨量強度の組合せをX-Yグラフにプロットして警戒避難体制を判断する方法を提案している。

この方法では土砂災害発生降雨をプロットして、これの下限値を近似する線を限界雨量線（以下、CL: Critical Line）としているため、CLは下に凸の曲線となっている。

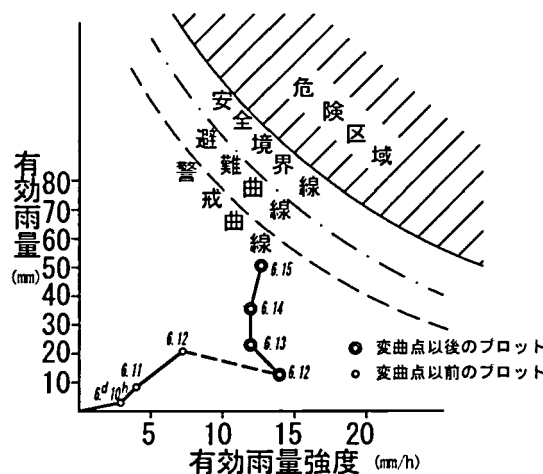


図-1.2 瀬尾ら³⁰⁾による警戒避難体制判定図

Fig. 1.2 Judgment chart of warning and evacuation (by Senoo et al.)

(2) 実効雨量

この考え方を経て、縦軸に雨量強度、横軸に先行降雨の低減を考慮した実効雨量を用いたグラフの関係線（以下、スネークライン）から危険度判定を行う方法（図-1.3）が「土石流災害に関する警報の発令と避難指示のための降雨量設定指針(案)」（1984年,建設省作成,以下「指針案」）によりまとめられた³⁴⁾。

指針案では、実効雨量(R_w)は前期実効雨量(R_{wa})と土石流発生1時間前までの積算雨量(R_r)の和と定義された(式(1.1))。一連続雨量とは24時間以上の無降雨期に挟まれた降雨の量で、前期実効雨量は、一連の降雨の降り始めから起算して1日前(24時間前)~7日前(168時間前)の雨量に $\alpha_t = 0.5^{t/T}$ (T :半減期, t :一連の降雨の降り始めからの前日数) で与えられる減少係数を乗じたものの和である。

$$R_w = R_r + R_{wa} \quad \dots\dots(1.1)$$

- R_w : 土石流発生1時間前までの実効雨量(mm)
- R_r : 土石流発生1時間前までの積算雨量(mm)
- R_{wa} : 前期実効雨量 = $\sum \alpha_t \cdot R_{dt}$
- R_{dt} : t 日以前の前期雨量(mm)
- α_t : t 日以前の減少係数 ($=0.5^{t/T}$)
- T : 半減期(日)

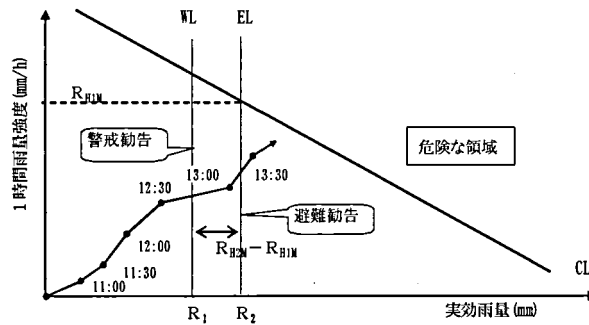


図-1.3 避難指示のためのスネークライン(指針案)³⁴⁾
 Fig. 1.3 Example of snake line for warning and evacuation

この手法により求められた実効雨量は、一連の降雨期間の違いにより、災害発生時刻からさかのぼって同一時間前の雨量の低減程度が個々の対象降雨で異なることや、前期実効雨量を日雨量単位で累計し減少係数を乗じているため、24時間以内の降雨はすべて同等に評価されるなどの問題も指摘された。そこで、矢野²⁶⁾は、土石流発生1時間前までの降雨をすべて前期雨量と考え、減少係数を時間単位で考えることにより時間的経過を考慮し次のような算出式(式(1.2))が提言された(改良実効雨量;本研究では改良実効雨量を用い、以下単に実効雨量と呼ぶ場合には、この式で算出される値を指す)。

$$R_w = \sum \alpha_{i1} \cdot R_{i1} \quad \dots\dots(1.2)$$

- R_w : 実効雨量(mm)
- R_{i1} : i時間前の1時間雨量(mm/h)
- α_{i1} : i時間前の減少係数 ($=0.5^{i/T}$)
- T : 半減期(時間)

「集中的に発生するがけ崩れに対する警戒避難基準雨量の設定方法(案)」(1993年、建設省作成)³⁶⁾の提言(以下、「提言案」)では、「半減期72時間」と「半減期1.5時間」の改良実効雨量を用いて図-1.4のようなX-Yグラフを作成し、集中的に発生するがけ崩れの限界降雨量を設定することが可能であることが確認されている。

なお、これらの方法では、土砂災害発生降雨と非発生降雨の両方をプロットして、その境界に直線状のCLを与えている。

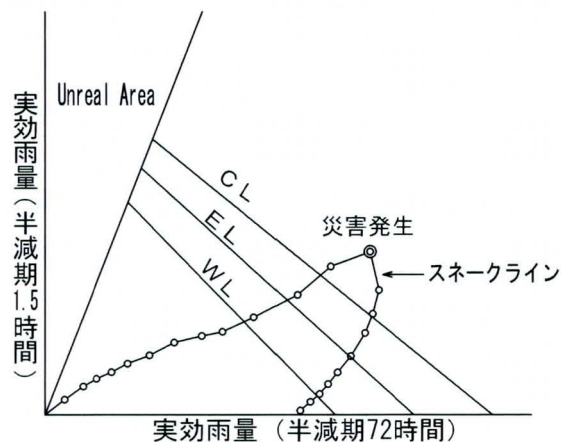


図-1.4 改良実効雨量を用いた判別法 (提言案³⁶⁾をもとに作図)
 Fig. 1.4 Distinction methods using modified effective rainfall

(3) 雨量指標の時間・空間表現への試み

従来の研究では、複数の雨量指標を用いる手法は主に「時」の予測として用いられることが多かった。しかし近年、比較的密に雨量観測が実施されるようになり、インターネットなどを介して観測データがリアルタイムに近い形で公開されるようになってきたことから、多くの雨量データを用いて降雨状況の空間的移動を把握することにより、危険な「場所」を予測する試みがなされている。

海堀ら^{たとえ53),61)}は雨量情報を観測点ごとの判断のみに用いるのではなく、毎時の実効雨量の空間分布を表した地図上に毎時の降雨強度を表す等雨量線を重ねて描くことで、先行降雨の影響の大きな区域の面的な分布と短時間強雨の重なりを時間的な推移を表現する手法を提案した (図-1.5)。

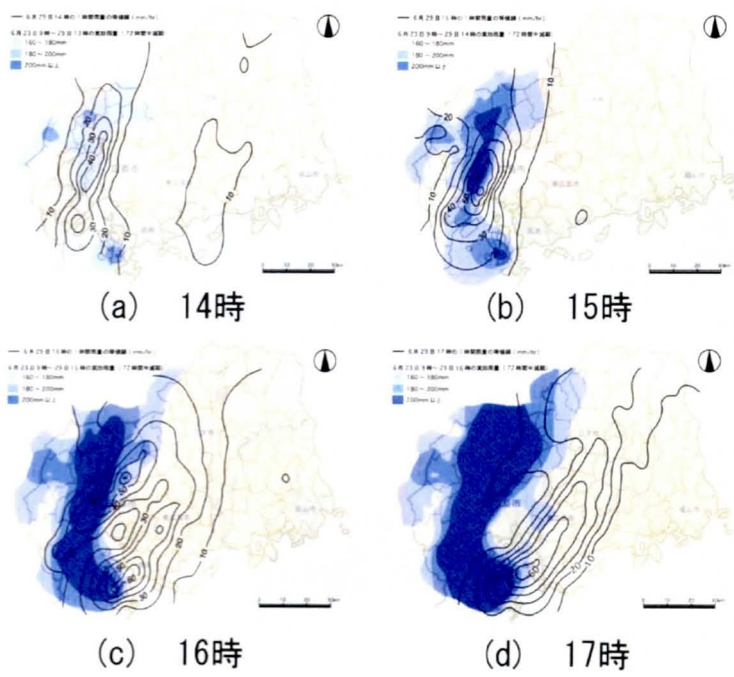


図-1.5 海堀ら^{たとえ53),61)}による実効雨量と降雨強度の空間分布 (1999年6.29災害時)
 Fig. 1.5 Distribution of effective rainfall and rainfall strength on 6.29-disaster (by Kaibori et al.)

また、岡野ら⁵⁷⁾はX軸を長期実効雨量、Y軸を短期実効雨量としたX-Yグラフ上のCLを $b=ax+y$ と表現し、合成指標 $ax+y$ の値による危険度ランクを面的に表示することにより危険領域を示すことを提案した。

佐々木ら⁵⁴⁾は図-1.6のように累積雨量と降雨強度の2つの物理量から式(1.3)によって導き出される雨量指標 R_f を開発し、これを用いた等値線図から空間的な斜面崩壊の危険度を表現することを提案し、近年に発生した災害事例によりその実用性を確認している(図-1.7)。

$$R_f = \sqrt{(R_1 - R)^2 + a^2(r_1 - r)^2} \quad \dots\dots(1.3)$$

R : 1週間前からの累積雨量(mm)

r : 時間雨量(mm/h)

R_1 : 600mm, r_1 : 100mm, a : 5

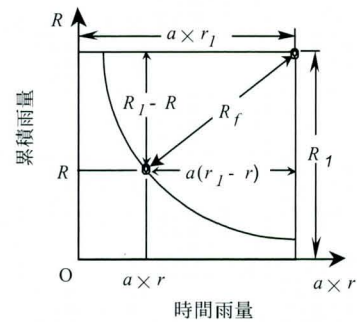


図-1.6 R_f の定義
Fig.1.6 Definition of R_f

しかし、佐々木ら⁵⁴⁾は基本となる雨量指標が累積雨量と時間雨量であるため、先行降雨による影響の時間的減衰(排水効果)が考慮されていないことや、 R_f はその値が小さくなると危険度が増すという指標であるため、雨が降り続けると危険度が増大するという実感に反していることなどを改善すべき点としてあげている。

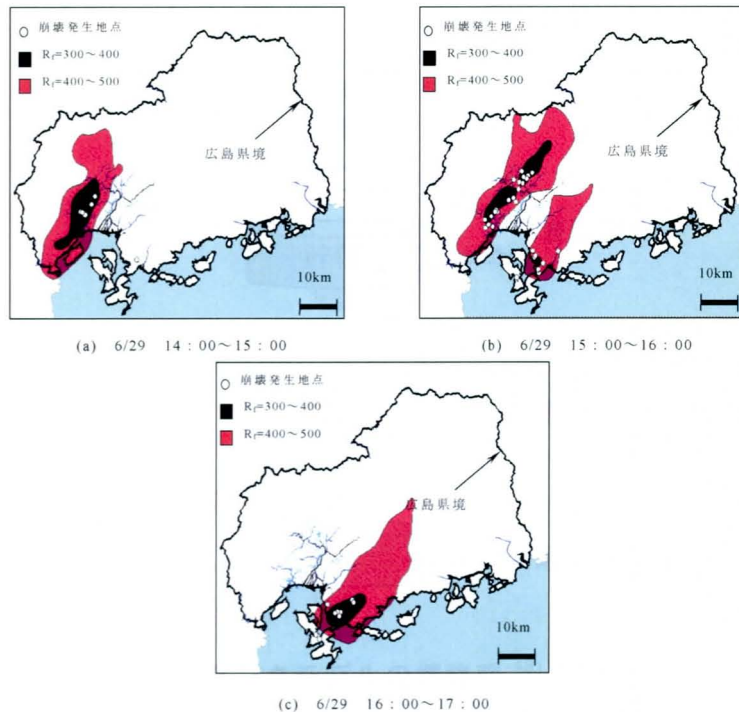


図-1.7 佐々木ら⁵⁴⁾による R_f の等値線図(1999年6.29災害時)
Fig. 1.7 Distribution of rainfall index R_f on 6.29-disaster (by Sasaki et al.)

1.2.2 連携案方式による土砂災害警戒情報

2005年に国土交通省と気象庁から「国土交通省河川局砂防部と気象庁予報部の連携による土砂災害警戒避難基準雨量の設定手法(案)」⁵⁹⁾が公表され、これにより都道府県と気象庁が共同して発する「連携案方式による土砂災害警戒情報」が運用されている。

連携案方式では、長期降雨指標と短期降雨指標を用いてX-Yグラフ上にスネークラインを描かせるといふところは提言案に準じているが、長期降雨指標には、タンクモデルの考え方を応用した土壤雨量指数が用いられており、CLの設定には、ニューラルネットワークの一種であるRBFN(Radial Basis Function Network, 放射状基底関数ネットワーク)が用いられている。

(1) タンクモデル

タンクモデルは流出解析手法のひとつで、斜面や流域に降った雨が土壤中に浸透し流出していく状況を何段かのタンクを用いて表現したモデルである。側方流出と鉛直浸透をタンクに取り付けたパイプで表現し、高さと流量を調整することで地盤の浸透特性を表現することができる。もともとは河川流出予測のためにつくられたものであるが、雨から流出した水を引けば土壤に残っている水量(=土砂災害の起こりやすさ)となることから、土砂災害予測にも活用され、有効性が確認されている^{21),24),31),48)}。

タンクモデルを土砂災害の予測に用いるにあたっては、3~4段程度のタンクモデルが用いられることが多い(図-1.8)。過去に土砂災害が発生した時点のタンクの貯留高やタンクからの推定流量をもとに発生基準値を設定し、これを上回るかどうかで発生/非発生の判断を行う。発生基準値の設定事例では、1~2段目タンクの貯留高²¹⁾とするものや3段目タンクの全量とするもの⁴⁸⁾などがある。

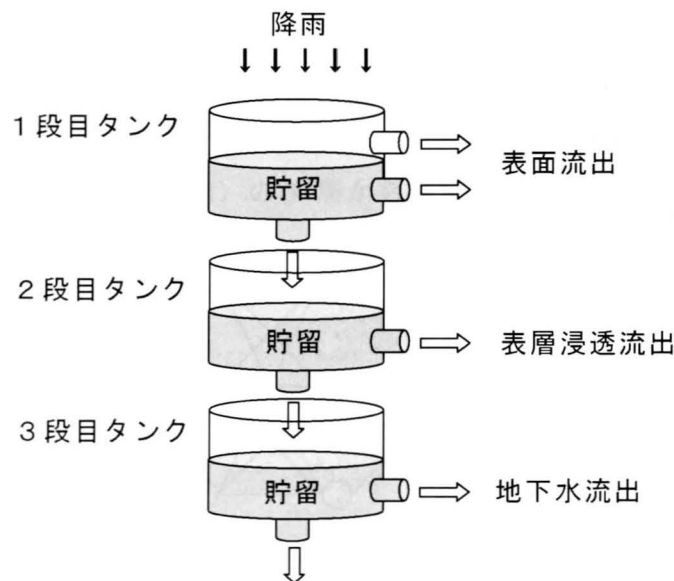


図-1.8 タンクモデルの概略図⁴⁸⁾をもとに作図

Fig. 1.8 Outline of the tank-model method

(2) 土壌雨量指数

土壌雨量指数は気象庁により運用されてきた雨量指標で、図-1.9 に示すように「レーダー・アメダス解析雨量」、「降水短時間予報」の技術により数時間先までの降雨予測を行い、予測雨量を用いてタンクモデルの貯留量の合計値を求めたものである。

従来は、過去の土壌雨量指数と履歴順位を比較することによって土砂災害の危険度を予想し、天気予報などで注意を促してきたが、最近では、連携案の長期降雨指標にも用いられている^{51), 52)}。

土壌雨量指数の算定にあたっては、小葉竹ら⁶²⁾によるモデルを基本とした3段構成のタンクモデルが用いられている。

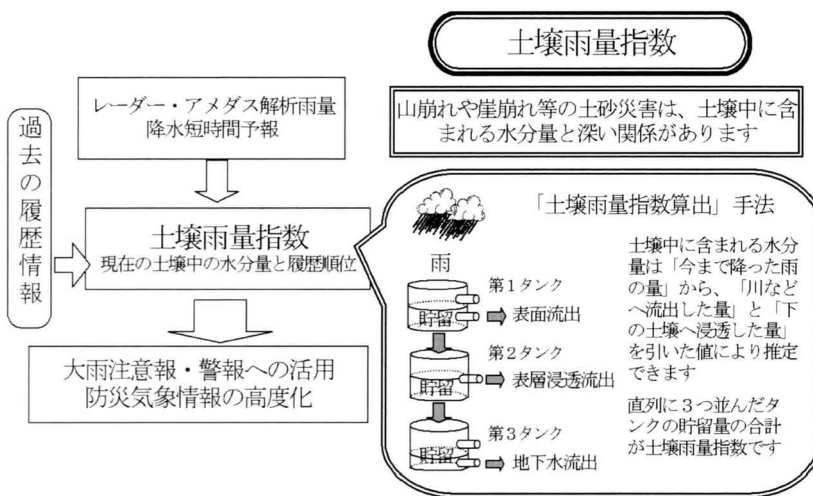


図-1.9 土壌雨量指数概念図⁵²⁾
Fig. 1.9 Outline of the soil water index

(3) RBFN を用いる方法

土砂災害発生／非発生の判別にニューラルネットワークを用いる方法は、1990年代半ばから行われており^{49), 50)}、脳や神経回路網をモデルとした階層構造で判別計算を行うものである。RBFN の計算過程は、図-1.10 に示すように入力層（素子数 n 個）、中間層（素子数 m 個）、出力層（素子数 1 個）の3層から構成されている。

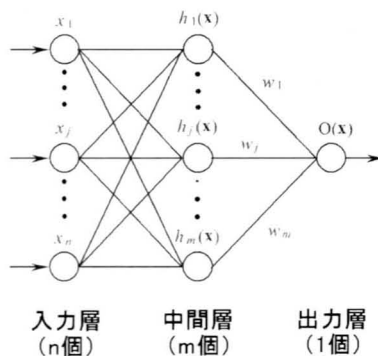


図-1.10 RBFN の概念図⁶⁰⁾
Fig. 1.10 Outline of RBFN

この方法は、すでに経験した降雨から安全領域の外縁を設定するものであるため、これまでの方法と異なり、非発生降雨のみから CL を設定することができ、その地域の災害発生の有無に関わらず設定することが可能である。非発生降雨の入力値を 1 として学習させ、X-Y グラフ上において、任意の点の降雨量がどの程度の確率で発現するかを表す値を表現した曲面を設定する（図-1.11；下の図は 2 次元で表現したもの）。

出力値が高い部分ほど非発生降雨の発現確率が高く、土砂災害がほとんど発生していない降雨が多く観測された領域（安全領域）であり、逆に出力値が低い部分は土砂災害が発生する確率が高い領域である。

なお、この方法では、CL は (0,0) を中心とした非発生降雨の分布の臨界を示すものとなっているため、概ね上に凸の曲線となる。

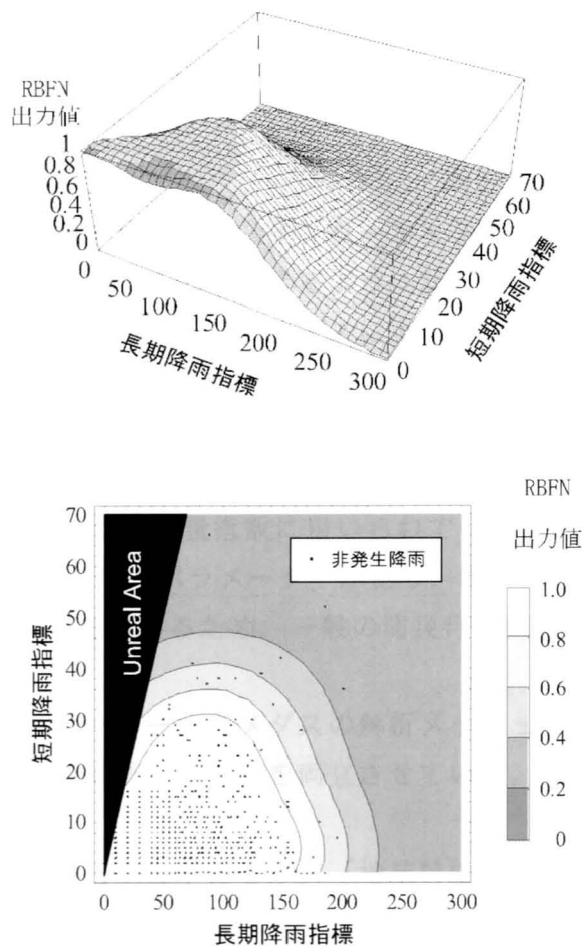


図-1.11 RBFN による CL の設定例⁶⁰⁾
 Fig. 1.11 An example of critical line using RBFN

1.2.3 各手法の特徴と課題

(1) 複数指標による手法の特徴と課題

複数の雨量指標を用いる手法は、土砂災害の誘因になる先行降雨とそのとき降っている雨の両方の影響を評価できる手法であり、これまでも多くの研究がなされている。

特に、改良型実効雨量は、半減期という概念を用いて時間の経過とともに先行降雨の影響を低減させながら評価することができる手法で、その簡便性と実用性の高さから警戒避難の判断手法として利用されてきた実績も多い。

実効雨量算定式の係数は半減期のみであるので、X-Y グラフを用いた方法では2つの半減期を決定し、災害事例を用いて災害発生と非発生の境界を引けばよい。このため、その地域に災害事例があれば、地域ごとの特性を反映させることは容易である。

従来のX-Y グラフを用いる方法は、雨量観測所が設置された場所周辺で、土砂災害が発生する「時」を予測するには適しているが、基本的には危険な「場所」の分布を予測するには不向きである。しかし、近年は2つの指標をそれぞれ重ね合わせることや、2つの指標を単一指標化して等値線図を描くことにより空間的な斜面崩壊の危険度を表現することにより「場所」の予測を可能にすることが試みられている。

(2) 連携案方式の特徴と課題

連携案方式による土砂災害警戒情報で、インターネットなどを介して、全国レベルで地域の危険度をリアルタイムで知ることができるようになったことは大変意義深い。

この方式の長所としては、レーダー・アメダスによる数時間先までの予測降雨を用いて土砂災害発生危険度を予測していることが挙げられる。このため、現況のみならず数時間後の危険予報を事前に知ることができるようになった。また、RBFNを用いることにより、災害発生事例がない地域においても非発生降雨でCLを設定することが可能になっている。

一方で、この手法における土壌雨量指数に用いられているタンクモデルには、4つの流出高さと7つの流出・浸透量というパラメーターがあり、さらに、レーダー・アメダスの解析降雨やRBFNによる解析値を用いるため、一般の防災行政担当者にとっては扱いが容易ではない。

なお、連携案方式では、レーダー・アメダスの解析メッシュごとに危険度を表示することにより、危険な「時」と「場所」の予測を両立させている。

各手法にはそれぞれの特徴と課題があるが、「地域特性を考慮して細かな危険度を評価すること」や「それをわかりやすい情報にして住民に伝えること」を目的とした場合は、地域に応じて柔軟な対応が可能な前者を基本とすることが望ましいと思われる。したがって、ここでは時間ごとの雨量情報さえ入手できれば容易に算定できる従来型の雨量指標を基本とした予測手法を研究対象とする。

1.3 諸外国における雨量指標

ここまでに、日本における雨量指標の変遷、現在用いられている雨量指標の特徴と課題について述べてきたが、ここでは、文献調査により得られた諸外国における雨量指標について触れておく。国により気候、風土などの地域特性が大きく異なることや、土砂災害の分類そのものが異なることなどもあり、単純に比較することは困難であるが、以下に風土の大きく異なる欧米諸国と、比較的日本の状況に近い東アジア諸国に分けて記載する。

1.3.1 欧米諸国の雨量指標

イタリアの研究機関 IRPI (Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica) の Fausto Guzzetti ら⁶³⁾によると南ヨーロッパでは、降雨強度と継続時間の関係(Intensity-Duration (ID) conditions) が最も一般的に用いられているようである。彼らは、世界各国から表層崩壊と土石流のあった 2,626 の降雨事例の文献を収集し、土砂移動のための降雨指標として、降雨継続時間、降り始めからの総雨量、一連の降雨量、ピーク時の雨量強度、平均雨量強度など 21 例を紹介している⁶⁴⁾。この中で、ID に着目してグローバルな雨量指標を作ろうと試みている。そして、降雨強度と継続時間の関係を両対数グラフ上にプロットして、統計的手法 (Bayesian statistical approach) を用いることにより、土砂災害発生のための境界線を求めている。なお、彼らは土砂災害が発生するには、48 時間を超える降雨が条件であると述べている。

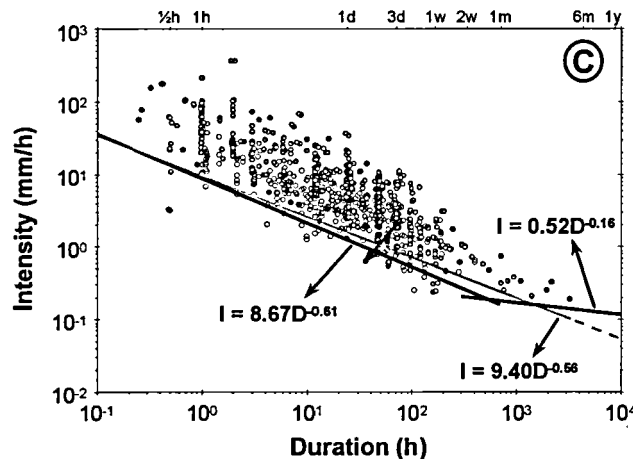


図-1.12 南ヨーロッパにおける降雨強度と継続時間の関係 (ID) の例⁶³⁾

Fig. 1.12 Relationship between rainfall intensity and duration (a case in southern Europe)

一方、アメリカ合衆国の地質調査所 (United States Geological Survey, 以下 USGS) では、シアトルとワシントン地域を対象として、地すべり (Landslides) の予測のために、2つの指標を設けている⁶⁵⁾。1つは、累積降雨の影響に対するもので、直前3日間の累積雨量を縦軸に、それ以前の15日間の雨量を横軸にとり、これに対する基準線 (Cumulative Precipitation Threshold, 以下 CT) を超えることで、先行降雨により地盤が湿潤状態になっていることを評価している。もう一つは、一連の雨の平均強度を縦軸に、継続時間を横軸

にとった指標にも基準線（Rainfall Intensity/Duration Threshold, 以下 ID）設けて、現在進行中の雨の影響を評価し、この2つの影響の両方で地すべりの発生の危険を予知している。

USGS では、ID と同様に先行降雨の状態を示す Antecedent Water Index (AWI) という指標も用いられており、ウェブサイト (<http://landslides.usgs.gov/monitoring/seattle/rtd/plot.php>) で併せて公表されている。

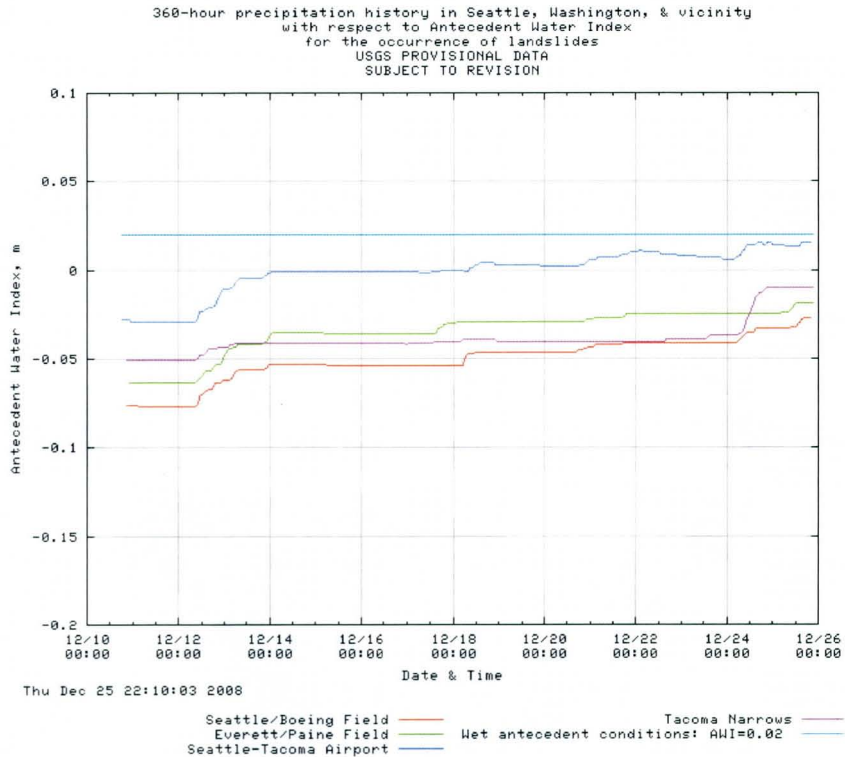


図-1.13 USGS による Antecedent Water Index (AWI)
Fig. 1.13 Antecedent Water Index (AWI) by USGS
(<http://landslides.usgs.gov/monitoring/seattle/rtd/plot.php>)

また、USGS では、これまでの地すべり頻度に基づいて、メッシュごとの地すべり危険度マップを作成しており、地域の地すべりに対する危険度について公表している⁶⁶⁾。

欧米諸国では、降雨強度や継続時間、継続雨量などの指標の組み合わせを用いることが多く、USGS の Wiczorek, G.F.らによる 1999 年のベネズエラの土石流に関する報告⁶⁷⁾でも降雨強度と継続時間の関係 (ID) を用い、この中で、ハワイ、サンフランシスコ、ブルーリッジ、およびプエルトリコで同様の指標を用いた事例を参照している。カリフォルニア大学の Emmanuel J. Gabet らは、ネパールのヒマラヤにおける地すべりに対する研究⁶⁸⁾で、累積雨量と日雨量の関係を用いた降雨指標から、地すべり発生を予測することを提案している。

栗原ら⁶⁹⁾によると、日本で用いられている「鉄砲水」という用語には、一般的に土石流は含まれていないが、欧米でこれを示す Flash Flood という用語には、いわゆる土石流が含まれるようである。Flash Flood は豪雨により短時間に急激に引き起こされる洪水のことであるが、海外においても定義が統一されているわけではなく、国や地域によっては、本研究で対象としている土石流と同様の現象を指すこともある。

Flash Flood については、World Meteorological Organization と Global Water Partnership の主導により、日本政府の支援でヨーロッパを中心とした”The Associated Programme on Flood Management”というプログラムが実施されている。ここで作成された”Guidance on Flash Flood Management”というレポートには、地域の特性を考慮した対応の重要性が述べられている⁷⁰⁾。

アメリカ合衆国の National Weather Service (NWS)では、Flash Flood Guidance (FFG)という洪水予測手法が開発されており、ウェブサイト (<http://www.srh.noaa.gov/rfcshare/ffg.php>) においてリアルタイムで公表されている。FFG は、降雨から流域界ごとの Average Basin Rainfall (ABR)を求め、これから地中への浸透、蒸発、植生による吸収、地中への浸透などの影響を差し引いたものが、表面流出するという水文学的な考え方から算出されるもので、ある領域で1時間後、3時間後、6時間後に FFG に相当する降雨があった時に Flash Flood の危険性が高まることを警告するものである^{71),72)}。

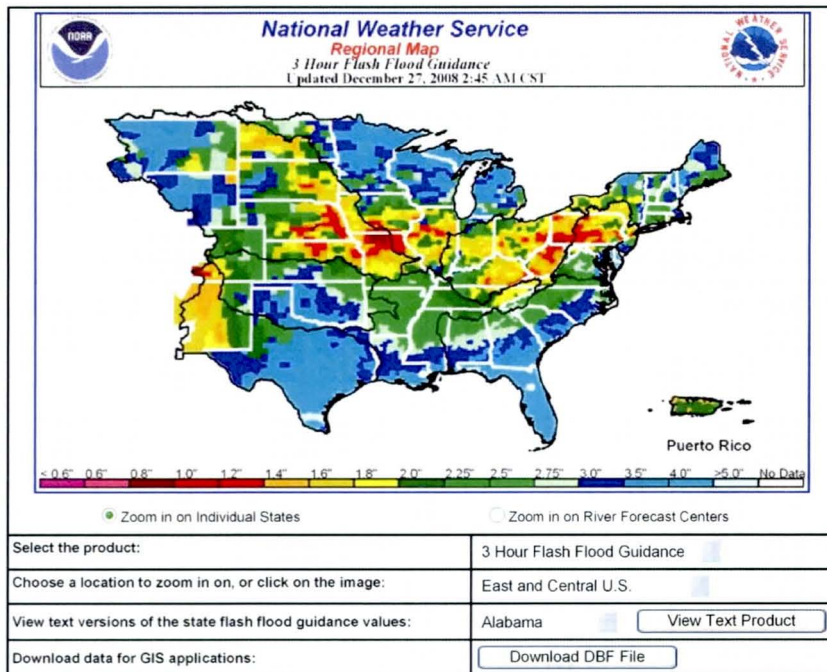


図-1.14 Flash Flood Guidance (FFG)の一例 (NWS のウェブサイト)

Fig. 1.14 An example of Flash Flood Guidance (FFG)

(<http://www.srh.noaa.gov/rfcshare/ffg.php>)

このように、Debris-flow (土石流) や Landslide (地すべり)、Flash Flood (鉄砲水) などの用語の定義は地域により様々であり、同じ用語を用いても日本でイメージする現象と異なっている場合も多い。加えて欧米諸国では、日本で問題となっているような溪流より桁違いに大きな面積を持つ流域を対象としていることも多い。このため、一般的には ID など長期間にわたっての降雨を前提とした指標が用いられることが多い。しかしながら、AWI など先行降雨の影響を評価した手法も用いられていることがわかった。特に、今後の降雨による危険度の上昇を警告する FFG は、本論文の第 6 章で提案する監視雨量強度 R_R と通じる考え方であると考えられる。

1.3.2 東アジア諸国の雨量指標

東アジア諸国では、台風による豪雨が土砂災害の原因となることも多く、日本と土砂災害の原因となる降雨のパターンが共通していることも多い。加えて、香港、台湾などは、山地が多く地形的にも日本と類似している。

香港では、土木工務處（Geotechnical Engineering Office, 以下 GEO）と香港天文台（Hong Kong Observatory, 以下 HKO）が協働して Landslip Warning System により地すべり（Landslip と表記）の警報を出す仕組みを作っている（<http://hkss.cedd.gov.hk/hkss/eng/safemeasure/>）。

ここでは、GEO の有する 86 の雨量観測データと、HKO が新設した 24 の雨量観測データに加えて、HKO のレーダー予測を組み合わせた雨量データをもとにしている。これらのデータをもとに GEO がこれまでの事例から設けた基準により、豪雨域の大きさ、降雨強度、域内の危険斜面の数などをもとに危険を判断し、HKO から警報が発令される。なお、警報はテレビやラジオなどのメディアを通じて広報されている。なお、危険判断にあたっては 24 時間降雨量を用いている。

また、香港では Landslide Potential Index (LPI) という指標が用いられている⁷³⁾。これは、降雨強度と継続時間を用いた指標で、地すべりが発生する豪雨の再現期間を考慮したものである。ただし、現段階では、LPI は予報としてではなく、発生した地すべりの分析に対して用いられている。

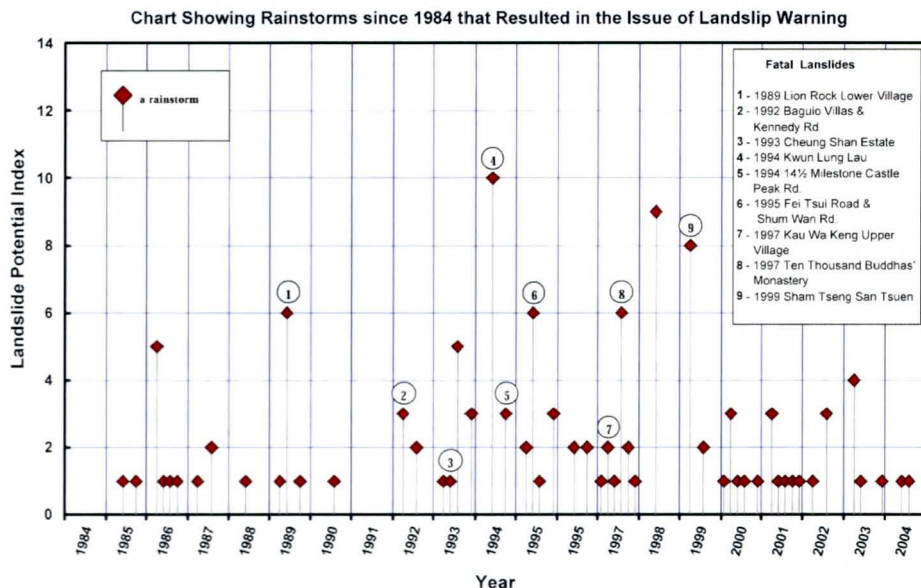


図-1.15 香港における Landslide Potential Index (LPI)⁷³⁾
Fig. 1.15 Landslide Potential Index (LPI) in Hong Kong

台湾では、政府の行政院農業委員会水土保持局が、累積雨量による土石流警戒基準値を設定し、これをウェブサイト（<http://fema2.swcb.gov.tw/default-2.asp>）で公開している。基準値は区域ごとにきめ細やかに設定されており、このサイトおよびモバイルで、地区ごとの現況の 10 分間雨量、1～24 時間雨量、累積雨量などを公開し警戒を呼びかけている。このサイトの中で 24 時間以内の降雨はそのまま累積し、24～48 時間前の雨には 0.8 を乗じ

て累積し、48～72 時間前の降雨は $0.8 \times 0.8 = 0.64$ を乗じて累積するという、日本の実効雨量に似た考えの有効累積雨量という指標も採用している。

台湾の研究事例には、日本の研究を参考に挙げているものもの多く^{74),75)}、この考え方も日本のものを参考にしたものと考えられる。瀬尾⁷⁶⁾によると、台湾では、かつては大学が行政のフォローを行っていたが、最近では行政が主体的に関与しているとのことである。

近年、台湾では1時間雨量と有効累積雨量から算出した Rainfall Triggering Index (RTI) という雨量指標を導入している (<http://www.sabo-int.org/projects/taiwan.html>)。Ming-Hsi Lee⁷⁷⁾は1時間雨量強度 I と有効累積降雨 R_{te} を用い、 $RTI = I \times R_{te}$ として RTI を算定している。

ここで $R_{te} = \sum_{i=0}^7 \alpha^i R_i$ 、このとき $\alpha^i = 0.8$ 、 R_i : i 日前の雨量としていることから、この R_{te} は、政府で採用されている有効累積雨量と同等のものであると考えられる。

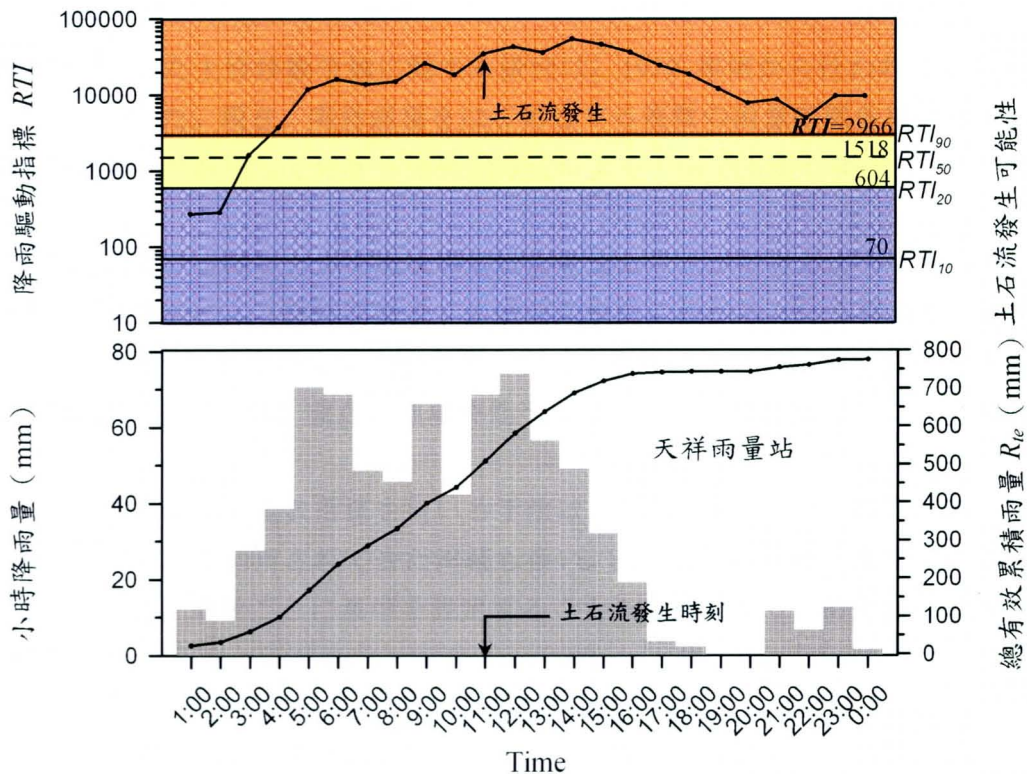


図-1.16 台湾における Rainfall Triggering Index (RTI)⁷⁸⁾
 Fig. 1.16 Rainfall Triggering Index (RTI) in Taiwang

また、香港や台湾においては、土砂災害に関する情報公開や防災教育が積極的になされている。香港政府が運営するウェブサイト「Hong Kong Slope Safety (香港斜坡安定)」 (<http://hkss.cedd.gov.hk/hkss/eng/whatsnew/index.htm>) や台湾行政院農業委員會水土保持局のウェブサイト「土石流防災資訊網」 (<http://fema2.swcb.gov.tw/default-1.asp>) は、危険箇所情報、リアルタイムの防災情報のほか、一般住民や子供に向けたわかりやすい防災教育資料が公開された非常に充実したものであり、見習うべきところは多い。

1.4 本章のまとめ

本章では、土砂災害予測手法について海外事例も含めて整理し、その特徴や課題に言及した。予測手法には「場所の予測」と「時の予測」の観点のものがああり、様々な角度から研究されていることが再確認された。以下に、本章で確認された事項を列記する。

- ① 土砂災害の発生場所の予測には、経験的手法、要因の評価、統計的手法、解析的手法などがあり、素因に着目したものが多い。時の予測は、誘因に着目したものと斜面の変動を直接モニタリングするものに区分される。
- ② 土砂災害予測手法には、大掛かりな調査や特殊な観測機器を必要とするものも多い。また、斜面の調査やモニタリングによる手法は、特定の斜面の崩壊時期の予測には有効であるが、広範なソフト対策としては不向きである。
- ③ 雨量指標を用いた土砂移動予測に関する研究は、1970年頃から行われており、次第に複雑化していった。現在、実効雨量をはじめとする複数の雨量指標を用いる手法と、都道府県と気象庁が共同して発する連携案方式による手法が主体となっている。
- ④ 連携案方式により全国レベルで地域の危険度を知ることができるようになった。この手法には、予測降雨により数時間後までの情報が事前にわかるという利点や、RBFNにより非発生降雨からCLを設定できるという利点がある。一方で、多くのパラメーターを設定する必要があるため、独自に地域特性を反映した基準を設定することは困難である。
- ⑤ 実効雨量を主体とした複数指標を用いる手法は、その簡便性と実用性の高さから警戒避難の判断手法として利用されてきた実績も多い。実効雨量は比較的簡便な式で表され係数も少ないため、地域ごとに基準を設定することも容易であり、精度高く予測することが可能である。
- ⑥ 従来の複数指標を用いる方法は、X-Yグラフを用いて雨量観測所ごとの「時」の予測に用いられることが多かったが、多くの雨量観測データを用いて降雨状況の空間的移動を把握することにより、危険な「場所」を予測する試みがなされている。
- ⑦ 本研究では、市町村の防災担当者や地域住民にもわかりやすい、身近な雨量指標の開発を目指しているため、時間ごとの雨量情報さえ入手できれば容易に算定できる従来型の雨量指標を基本とした予測手法を研究対象とする。
- ⑧ 海外では気候や風土、土砂災害の分類などが異なり、雨量指標の考え方も様々である。日本と土砂災害要因が共通する東アジア諸国では、雨量指標の研究・運用が積極的に行われており、台湾では日本の雨量指標を参考にした研究事例も多い。

【引用文献】

- 1) 高橋博, 大八木規夫, 大滝俊夫, 安江朝光(1986): 斜面災害の予知と防災, 白亜書房, 526p.
- 2) 中国新聞社編(1989): 集中豪雨を追う—昭和 63 年 7 月加計, 浜田災害一, 溪水社, 108p.
- 3) 小川豊(1986): 災害と地名—語りつがれる危険予知, 山海堂, 129p.
- 4) 小川豊(1995): 崩壊地名—自分で学べる防災の知恵, 山海堂, 279p.
- 5) 西邦正, 古川浩平, 中川浩二(1992): ファジー理論を用いたのり面の崩壊要因および崩壊可能性の評価について, 土木学会論文集, No.445/Ⅲ-18, 土木学会, pp.190-118.
- 6) 広兼道幸, 古田均, 中井真司, 三雲是宏(1997): 斜面の崩壊危険度診断事例からのラフ集合を用いたルール型知識の抽出方法, 土木学会論文集, No.582/Ⅲ-41, 土木学会, pp.285-294.
- 7) 小山内信智, 内田太郎, 曾我部匡敏, 寺田秀樹, 近藤浩一(2005): 簡易貫入試験を用いた崩壊の恐れのある層厚推定に関する研究, 国土技術政策総合研究所資料, No.261, 46p.
- 8) 土井豆聡之, 土田孝, 加納誠二, 中井真司, 竹内次郎(2007): 簡易動的コーン貫入試験と軽量動的コーン貫入試験によるまさ土斜面の地盤調査, 地盤と建設, Vol.25, No.1, 地盤工学会中国支部, pp.17-24.
- 9) A.M.R.G. ATHAPATHTHU, Takashi TSUCHIDA, Kazuaki SUGA, Shinji NAKAI and Jiro TAKEUCHI (2007): Evaluation of In-situ Strength Variability of Masado Slopes, Doboku Gakkai Ronbunshyu, Vol.63, No.3, pp.818-861.
- 10) 笹原克夫(1999): 降雨浸透に伴う急勾配砂質土斜面のせん断変形の解析, 地すべり, Vol.36, No.1, pp.12-19.
- 11) 笹原克夫, 海老原和重, 門間敬一(2000): 降雨による急勾配砂質土斜面崩壊予測のためのパラメーターに関する検討, 砂防学会誌, Vol.53, No.3, pp.11-19.
- 12) 恩田裕一, 小松陽介, 辻村真貴, 藤原淳一(1999): 降雨流出ピークの遅れ時間の違いからみた崩壊発生時刻予知の可能性, 砂防学会誌, Vol.51, No.5, pp.48-52.
- 13) 斉藤迪孝(1984): 第 3 次クリープによる斜面崩壊時期の予知, 地すべり, Vol.4, No.3, pp.1-8.
- 14) 斉藤迪孝(1987): 斜面崩壊時刻予測のためのクリープ曲線の適用について, 地すべり, Vol.24, No.1, pp.30-38.
- 15) 福園輝旗(1985): 表面移動速度の逆数を用いた降雨による斜面崩壊発生時刻の予測法, 地すべり, Vol.22, No.2, pp.8-3.
- 16) 建設省松本砂防工事事務所(1977): 焼岳・浦川における土石流調査関係資料集Ⅱ, 技術資料, No.7, 20 p.
- 17) 山田剛二, 渡正亮, 小橋澄治(1971): 地すべり・斜面崩壊の実態と対策, 山海堂, 433 p.
- 18) 芦田和男, 高橋保, 沢田豊明, 江頭進治, 澤井健二(1977): 小豆島の土砂災害について, 昭和 51 年 9 月台風 17 号による災害の調査・研究総合報告, 京都大学, pp.109-115.

- 19) 塩島由道,磯望,松原敏子,山川克己,米沢宏(1978):岐阜県高原川流域における土砂災害と降雨特性,昭和53年度日本地理学会予稿集, pp.80-81.
- 20) 建設省九州地方建設局大隈工事事務所(1978):土砂生産解析業務報告書, pp.4-5.
- 21) 鈴木雅一,福嶋義宏,武居有恒,小橋澄治(1979):土石流災害発生の危険雨量,砂防学会誌(新砂防), Vol.31, No.3, pp.1-7.
- 22) 渡辺廠,徳山久仁夫,中山政一,二宮寿男,大八木俊治(1979):土石流警戒避難基準雨量設定の一手法,砂防学会誌(新砂防), Vol.31, No.3, pp.22-30.
- 23) 青木祐久(1980):過去に土石流等の災害をもたらした降雨の特徴,土木技術資料, Vol.22, No.2, pp.15-20.
- 24) 鈴木雅一,小橋澄治(1981):がけ崩れ発生と降雨の関係について,砂防学会誌(新砂防), Vol.34, No.2, pp.16-26.
- 25) 田中元,藤原英俊(1988):実効雨量法によるがけ崩れ発生の予知について,斜面崩壊および地すべりの予知と対策に関するシンポジウム発表論文集, pp.27-35.
- 26) 矢野勝太郎(1990):前期降雨の改良による土石流の警戒・避難基準雨量設定手法の研究,砂防学会誌(新砂防), Vol.43, No.4, pp.3-13.
- 27) 網干寿夫・低引洋隆(1972):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.
- 28) 瀬尾克美,船崎昌継(1973):土砂災害(主に土石流的被害)と降雨量について,砂防学会誌(新砂防), Vol.26, No.2, pp.22-28.
- 29) 池谷浩(1974):降雨量強度比による土砂害からの避難基準に関する一私案,砂防学会誌(新砂防), Vol.27, No.3, pp.7-11.
- 30) 瀬尾克美,横部幸裕(1978):土砂災害(主に土石流的被害)と降雨量について(第二報),砂防学会誌(新砂防), Vol.31, No.1, pp.14-18.
- 31) 芦田和男,高橋保,沢井健二(1978):木津川上流域における土石流危険度評価に関する研究,(財)防災研究協会委託, pp.12-17, pp.26-29.
- 32) 瀬尾克美,水山高久,万膳英彦,塩島由道(1983):土石流警戒・避難基準雨量設定手法について,砂防学会概要集, pp.44-45.
- 33) 瀬尾克美,万膳英彦,塩島由道(1984):土石流に関する警戒・避難基準雨量の設定手法について,砂防学会概要集, pp.150-151.
- 34) 建設省砂防課(1984):土石流災害に関する警報の発令と避難の指示のための降雨量設定指針(案).
- 35) 岩元賢,原田民司郎,平野宗夫(1990):土砂災害に対する警戒・避難基準雨量の設定について,砂防学会誌(新砂防), Vol.43, No.3, pp.3-8.
- 36) 建設者河川局砂防部(1993):総合土砂災害対策検討会における提言および検討結果.
- 37) 藤井恒一郎,久保田哲也,奥村武信(1994):土石流発生警報の発令及び避難指示の的確性向上に関する研究,砂防学会誌(新砂防), Vol.47, No.2, pp.35-42.
- 38) 村石尚(1996):鉄道沿線の斜面災害の危険度評価,砂防学会誌, Vol.49, No.1, pp.3-8.
- 39) 島村誠(1996):列車運転規制のための合理的な雨量指標について,砂防学会誌, Vol.49,

- No.1, pp.9-11.
- 40) 荒木義則, 古川浩平, 松永悟, 小笠原貴人, 石川芳治, 水山高久(1997): 土石流危険溪流における地形特性を考慮した土砂崩壊の発生限界線の設定に関する研究, 土木学会論文集, No.504/VI-36, pp.33-47.
 - 41) 高橋透, 松岡充宏, 瀬尾克美, 荒木義則, 古川浩平, 水山高久(2000): 地形特性を考慮した土石流警戒避難基準雨量の設定, 砂防学会誌, Vol.53, No.1, pp.35-46.
 - 42) 瀬尾克美, 高橋透, 荒木義則, 古川浩平, 水山高久(2000): GISを用いた土石流警戒避難支援システムの構築—山口県大島郡におけるモデルの開発—, 砂防学会誌, Vol.53, No.4, pp.30-37.
 - 43) 瀬尾克美, 原口勝則, 菊井稔宏, 吉田真也(2001), 土砂災害警戒避難基準雨量の課題と改良について, 砂防学会誌, Vol.53, No.6, pp.37-44.
 - 44) 倉本和正, 守川倫, 鉄賀博己, 荒川雅生, 中山弘隆, 古川浩平(2002): 斜面要因を考慮した斜面毎の非線形がけ崩れ発生限界雨量線の設定手法とその崩壊予測精度, 土木学会論文集, No.707/VI-55, pp.67-81.
 - 45) 島村誠(2003): 実効雨量を用いた降雨警報の有効性の検証, JR East Technical Review, No.3, pp.45-48.
 - 46) 岡本正男(2003): 土石流発生危険度の判定に関する研究, 京都大学博士論文, 130p.
 - 47) 鈴木修, 山村啓一, 島村誠(2007): 実効雨量指標を用いた降雨時運転規制に関する研究, JR East Technical Review, No.21, pp.42-49.
 - 48) 牧原康隆, 平沢正信(1993): 斜面崩壊危険度予測におけるタンクモデルの精度, 気象庁研究時報, 45-2, pp.35-70.
 - 49) 久保田哲也, 池谷浩(1995): 土石流発生基準雨量に対する Neural Network の応用について, 砂防学会誌(新砂防), Vol.47, No.6, pp.8-14.
 - 50) 荒木義則, 古川浩平, 松井範明, 大木戸孝也, 石川芳治, 水山高久(1997): ニューラルネットワークを用いた土石流危険溪流における土砂崩壊のリアルタイム発生予測に関する研究, 土木学会論文集, No.581/VI-37, pp.107-121.
 - 51) 牧原康隆(1998): 災害と気象の関係, 第30回砂防学会シンポジウム講演集, pp.35-42.
 - 52) 岡田憲治(2000): 土砂災害の軽減に向けた「土壌雨量指数」の開発, 消防科学と情報, No.60, pp.22-28.
 - 53) 海堀正博(2000): 平成11年広島土砂災害とその対策, 「斜面都市における防災を考える」, 第32回(社)砂防学会シンポジウム講演集, JSECE Publication No.32, pp.27-38.
 - 54) 佐々木康, 森脇武夫, 加納誠二, 白石芳樹(2001): 1999年の広島県斜面災害をもたらした降雨特性と警戒・避難のための雨量指標, 土と基礎, 49(7), pp.16-18.
 - 55) 倉本和正, 鉄賀博己, 東寛和, 荒川雅生, 中山弘隆, 古川浩平(2001): RBFネットワークを用いた非線形がけ崩れ発生限界雨量線の設定に関する研究, 土木学会論文集, No.672/VI-50, pp.117-132.
 - 56) 倉本和正, 守川倫, 鉄賀博己, 荒川雅生, 中山弘隆, 古川浩平(2002): 斜面要因を考慮した斜面毎の非線形がけ崩れ発生限界雨量線の設定方法とその崩壊予測精度, 土木学

- 会論文集, No.707/VI-55, pp.67-81.
- 57) 岡野和行, 牧澄枝, 湯川典子, 天野篤, 菊井稔宏(2003): 時系列表現によるわかりやすい土砂災害予警報情報表示, 日本災害情報学会第5回研究発表大会予稿集, 日本災害情報学会, pp.227-234.
- 58) 野呂智之, 倉本和正, 小山内信智(2005): 土砂災害発生危険基準線に対する客観的な設定手法の有効性, 土木技術資料, Vol.47, No.4, pp.26-31.
- 59) 国土交通省河川局砂防部, 気象庁予報部, 国土交通省国土技術総合研究所(2005): 国土交通省河川局砂防部と気象庁予報部の連携による土砂災害警戒避難基準雨量の設定手法(案).
- 60) 小山内信智, 野呂智之(2006): 土砂災害からの事前避難をサポート～降雨指標を用いた土砂災害の発生危険予測～, 国総研アニュアルレポート 2006, 国土交通省国土技術総合研究所, pp.16-19.
- 61) 海堀正博, 西村賢, 井上新平(2004): 自主的な警戒に使うための降雨データの表現例について, 第2回土砂災害に関するシンポジウム論文集, 土木学会西部支部, pp.69-74.
- 62) 小葉竹重機, 石原安雄(1983): タンクモデルおよび集中面積図を利用した洪水流出モデルの総合化, 土木学会論文集, Vol.337, pp.129-135.
- 63) F. Guzzetti, S. Peruccacci, M. Rossi and C. P. Stark (2007): Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe, *Meteorology and Atmospheric Physics*, Vol.98, No.3-4, pp.239-267.
- 64) Fausto Guzzetti, Silvia Peruccacci, Mauro Rossi, Colin P. Stark (2008): The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows: an update, *Landslides*, Vol.5 of 2008, pp.3-17.
- 65) Alan F. Chleborad, Rex L. Baum, and Jonathan W. Godt (2006): Rainfall Thresholds for Forecasting Landslides in the Seattle, Washington, Area—Exceedance and Probability, U.S. Geological Survey Open-File Report 2006-1064, 31p.
- 66) Rex Baum, Ed Harp, and Lynn Highland (2007): Landslide Hazards in the Seattle, Washington, Area, Fact Sheet 2007-3005, USGS, 4p.
- 67) Wiczorek, G.F., Larsen, M.C., Eaton, L.S., Morgan, B.A. and Blair, J. L. (2001): Debris-flow and flooding hazards associated with the December 1999 storm in coastal Venezuela and strategies for mitigation, U.S. Geological Survey, Open File Report 01-0144.
- 68) Emmanuel J. Gabet, Douglas W. Burbank, Jaakko K. Putkonen, Beth A. Pratt-Sitaula, Tank Ojha (2004): Rainfall thresholds for landsliding in the Himalayas of Nepal, *Geomorphology* 63, pp.131-143.
- 69) 栗原淳一, 武澤永純, 山越隆雄, 田方智, 小田晃, 長谷川祐治(2007): 2006年等に発生した鉄砲水に関する流出特性について, *自然災害科学*, Vol.26, No.2, pp.149-162.
- 70) The Associated Programme on Flood Management (2007): Guidance on Flash Flood Management, Recent Experiences from Central and Eastern Europe, The Associated Programme on Flood Management (APFM) is a joint initiative of the World Meteorological

Organization and the Global Water Partnership, 61p.

- 71) Robert S Davis (2004): Locally modifying Flash Flood Guidance to improve the detection capability of the Flash Flood Monitoring and Prediction Program 18th Conference on Hydrology, Extended Abstract of the Symposium on Planning, Nowcasting, and Forecasting in the Urban Zone, 16p.
- 72) Andrea Melvin (2006): Flash Flood Guidance, Interpretation article of the "OKLAHOMA CLIMATE FALL 2006", pp.21-24.
- 73) Hong Kong Government (2005): Landslide Potential Index, Information Note 3/2005 of the Geotechnical Engineering Office of the Civil Engineering and Development Department, 4p.
- 74) 林李耀, 陳建元, 陳天健, 王安翔, 李清勝, 張保亮 (2004) : 氣象雨量資料在土石流預警之應用, 中華民國地球科學學會 (中文) , 6p.
- 75) Jen-Chen Fan (2002): A study on the warning model of debris flow occurrence by using the rainfall and the electrical conductivity of groundwater (1) ,2002 Annual Hazard Mitigation, CD, 17p.
- 76) 瀬尾克美(2007): 技術を伝える～警戒避難基準雨量の創設, 技術ノート, SABO, Vol.90, pp.26-31.
- 77) Ming-Hsi Lee (2006): A Rainfall-Based Debris-Flow Warning Analysis and Its Application, Doctoral Dissertation of National Cheng Kung University, 229p.

第2章 新しい雨量指標 R'の提案

佐々木ら¹⁾により指摘された R_f の課題に対処するため、実効雨量の概念を取り入れた雨量指標 R_{fw} を考案し、さらに危険度とともに増大する新たな雨量指標 R' への変換を行うことを検討した。

2.1 雨量指標 R'の開発

2.1.1 雨量指標 R_{fw}

R_{fw} は、佐々木ら¹⁾による雨量指標 R_f に建設省提言案²⁾で用いられている改良実効雨量³⁾を用いた手法（長期実効雨量と短期実効雨量の組み合わせ）の利点を取り入れたものである。すなわち、 R_f に用いる R （1週間前からの累積雨量）に代わる長期雨量指標として長期実効雨量 R_w を、 r （1時間ごとの時間雨量）に代わる短期雨量指標として短期実効雨量 r_w を用いて、式(2.1)により算定する。

$$R_{fw} = \sqrt{(R_1 - R_w)^2 + a^2(r_1 - r_w)^2} \quad \dots\dots\dots(2.1)$$

- R_w : 長期実効雨量 (mm)
- r_w : 短期実効雨量 (mm)
- R_1 : 座標上の横軸基準点
- r_1 : 座標上の縦軸基準点
- a : 重み係数

R_{fw} は R_f と同様の考え方で、図-2.1 に示すように横軸 R_w 、縦軸 ar_w の座標系において、任意の降雨状況を示す点 A (R_w, ar_w) と基準点 B (R_1, ar_1) との距離 (mm) を表したもので、同一の R_{fw} 値を持つ降雨状況は基準点 B (R_1, ar_1) を中心とした半径 R_{fw} の円弧で示される。これを横軸 R_w 、縦軸 r_w とした座標系に表示すると、同一の R_{fw} 値を持つ降雨状況は基準点 C (R_1, r_1) を中心とした長軸半径 R_{fw} 、短軸半径 R_{fw}/a の楕円弧で示される。

R_w 、 r_w はいずれも、区間を定義することなく連続的に計算できる指標であるため、この指標から計算できる R_{fw} についてもまた、連続的に計算できる雨量指標である。このため、時々刻々変化する降雨による土砂災害危険性をリアルタイムで追従するには好都合である。

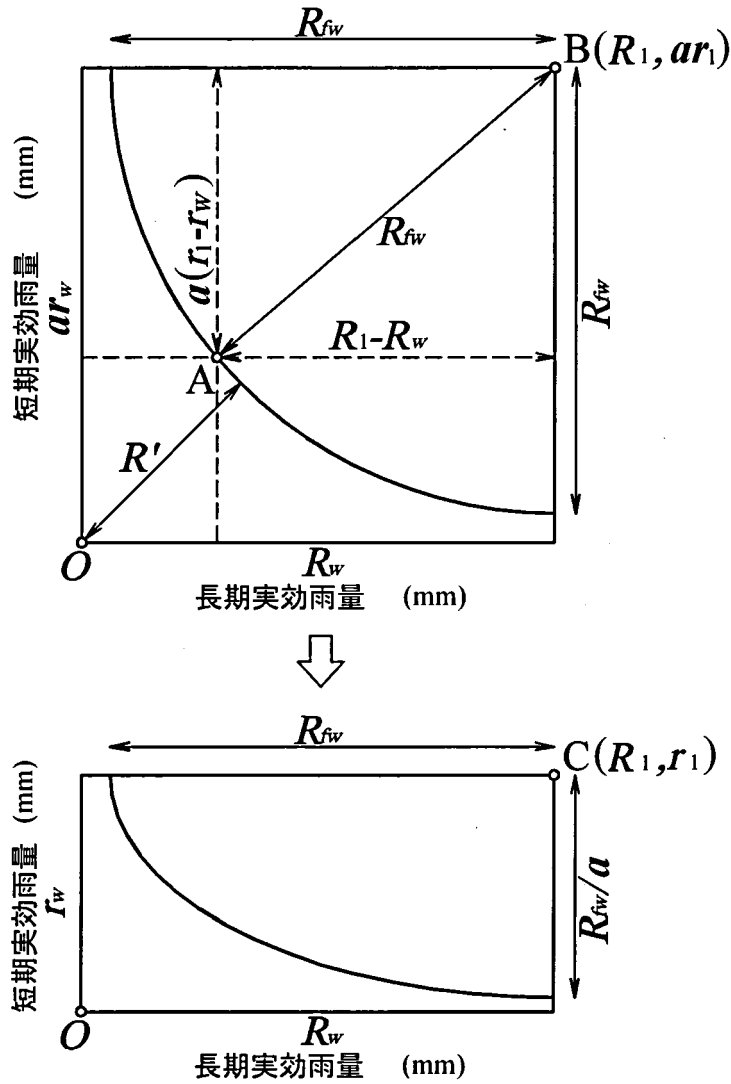


図-2.1 雨量指標 R_{fw} 及び R' の定義
 Fig. 2.1 Definition of the rainfall index R_{fw} and R'

2.1.2 雨量指標 R' への変換

先行降雨の時間的低減を考慮した雨量指標 R_{fw} をもとに式(2.2)により変換することにより、危険度とともに上昇する雨量指標 R' が得られる。

$$R' = R_{fw0} - R_{fw} \quad \dots\dots(2.2)$$

R_{fw0} : 原点 0 と基準点 B (R_1, ar_1) の距離

すなわち、短期、長期実効雨量がともに 0mm のときの R_{fw} 値 (R_{fw0}) から、任意の点の R_{fw} の値を引くことによって、危険度が增大すれば大きくなる指標へ変換できる。

2.1.3 半減期，基準点，係数の検討

長期および短期の雨量指標に実効雨量を用いるにあたっては，それぞれの半減期を設定する必要がある。高橋ら⁴⁾は山口県の花崗岩地帯での災害事例を対象とした研究において，長期指標に半減期 72 時間の実効雨量を用いた場合に最適な判別結果が得られたことを報告している。寺田ら⁵⁾は，短期実効雨量の半減期に 1.5 時間を用いることについて，著しい地域差は考えにくいとしている。

本研究では，広島県での運用実績がある雨量指標⁶⁾を参考に長期実効雨量 R_w には半減期 72 時間，短期実効雨量 r_w には半減期 1.5 時間を用いた。なお，高橋らの研究では，短期雨量指標に 1 時間雨量を用いているが，雨量指標を警戒避難に用いる際に，降雨期間中に一時的に雨が弱くなったときに急激に危険指標値が低下し，危険度が低下したような感覚を与えることを抑制するために，本研究では半減期 1.5 時間の実効雨量を採用する。

R_{fw} を算定するためには，基準点 (R_1, r_1) および重み係数 a を決定する必要がある。ここで，基準点 (R_1, r_1) は，対象とする地域でこれまでに経験したことの無い雨量に相当する値を採用する必要がある。

表-2.1 にこれまで広島県で発生した主な災害として，1967 年 7 月 9 日に呉市周辺で発生した豪雨災害（以下，42 災），1988 年 7 月 21 日に県北西部で発生した豪雨災害（以下，63 災），および 1999 年 6 月 29 日に県西部で発生した豪雨災害（以下，6.29 災）を例にとり，そのときの実効雨量を示す。なお，42 災については，7 月 6 日以前の時間雨量データを入手できなかったため，これ以前の先行雨量は日雨量を用いて算定している。この結果，大災害時にも経験していない雨量に相当する値として (R_1, r_1) = (600mm, 200mm) を採用することにした。

表-2.1 既往災害時の最大実効雨量
Table 2.1 The maximum effective rainfalls during previous disasters

	R_w (半減期 72 時間)	r_w (半減期 1.5 時間)
1967 年 7 月 9 日 (42 災) 呉観測所 (気象台)	312.1mm (19:00)	100.0mm (18:00)
1988 年 7 月 21 日 (63 災) 可部観測所 (気象台)	271.3mm (6:00)	117.6mm (4:00)
1999 年 6 月 29 日 (6.29 災) 戸山観測所 (広島県)	327.2mm (17:00)	114.5mm (15:00)
1999 年 6 月 29 日 (6.29 災) 呉観測所 (気象台)	265.5mm (18:00)	115.6mm (17:00)

重み係数は，呉市の災害事例を例に取り検討した。

図-2.2 に近年に呉市で起こった災害 (1976~2003 年の災害および 42 災)^{7),8),9)} の長期実効雨量 R_w と短期実効雨量 r_w の関係図を示す。

呉市で発生した災害事例において，個々の災害規模や被害実態については不明な点もあるが，ここでは，激甚な人的被害を出した災害 (42 災，6.29 災) を大規模災害，100 件以上の土砂移動現象の記録 (消防署への通報記録，地域防災計画等) が残っている災害を中規模災害，それ以外の小規模な崩壊等があった災害 (主として消防署への通報記録に基づ

く) を小規模災害と区分した。なお、図示した災害発生降雨は R' がピークになる時間帯のものである。

この図から当地域では、重み係数 $a=3$ とした場合に、 R' 値を示す楕円弧が最もよく災害の発生限界降雨 (CL) を表現できることが分かる。

この事例では、 $R' > 125\text{mm}$ で小規模災害の発生が見られ、 R' 値が大きくなるに従い災害規模の大きなものが発生していることが分かる。

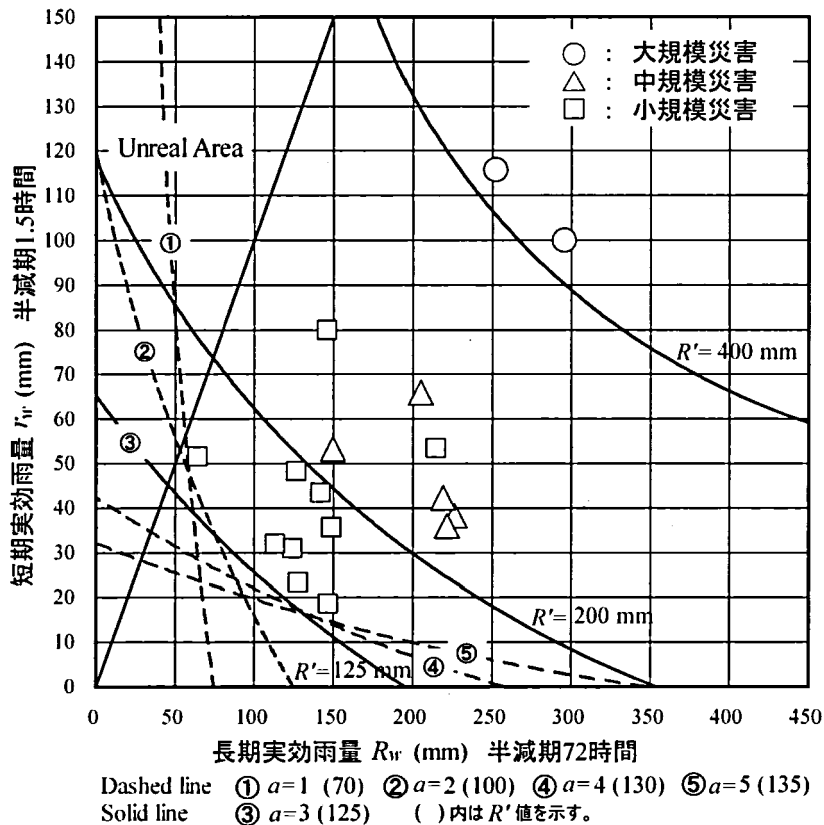


図-2.2 呉市における災害の $R_w - r_w$ 関係図
Fig. 2.2 Relationship between R_w and r_w (in Kure city)

2.2 雨量指標 R' の検証

2.2.1 雨量指標 R_f との比較

ここでは R_f と新しく提案した R_{fw} , R' を比較し、改善点を吟味する。

比較事例としては、1999年に6.29災と台風16号(9月15日未明)の2度にわたり土石流災害が発生した東広島市を取り上げる。

図-2.3に1999年6月~9月の気象台東広島観測所における雨量データを用いて求めた雨量指標 R_f , R_{fw} , R' と時間雨量を示す。この図から、 R' (および R_{fw}) は降雨ピーク後に漸減的に危険度が低下していく傾向が見られ、 R_f では段階的に低下する傾向が見られる。

これは、 R' (R_{fw}) では先行降雨の時間的低減が加味されているのに対し、1週間雨量を長期雨量指標とする R_f では、過去に降った強い雨がある時点で一気に影響しなくなるためである。6.29災の時においてもピーク降雨のあった1週間後に突然 R_f が上昇している。

6.29 災および台風 16 号時の降雨指標を表-2.2 に示す。雨量指標 R_f のピーク値は 6.29 災時には 386.5mm まで低下しているが、台風 16 号時には 546.3mm を示し、両者には 159.8mm の差がある。一方、 $R'(R_{fw})$ は、6.29 災時には 325.2 (311.2) mm, 台風 16 号時には 270.3 (366.1) mm を示し、両者の開きは 54.9mm である。初期値と観測期間内ピーク値の変動幅は、 R_f では 394.5mm, $R'(R_{fw})$ では 325.2mm と同程度であることから 159.8mm と 54.9mm の違いは変動幅によるものではないといえる。

R_f で評価すると 2 度の土石流発生時の降雨は著しく異なり、危険度の目安として用いられる $R_f=450\text{mm}^1$ で台風 16 号の土石流発生を表現できていない。これを $R'(R_{fw})$ で評価すると台風 16 号時も同様の危険度を有していたことが表現され、 $R'=250\text{mm}$ 程度の同じ指標を用いて土石流の発生を説明できる。実際に当地区周辺では 2 度の災害規模が同程度であったことから、この例では $R'(R_{fw})$ の評価が適切であるといえる。

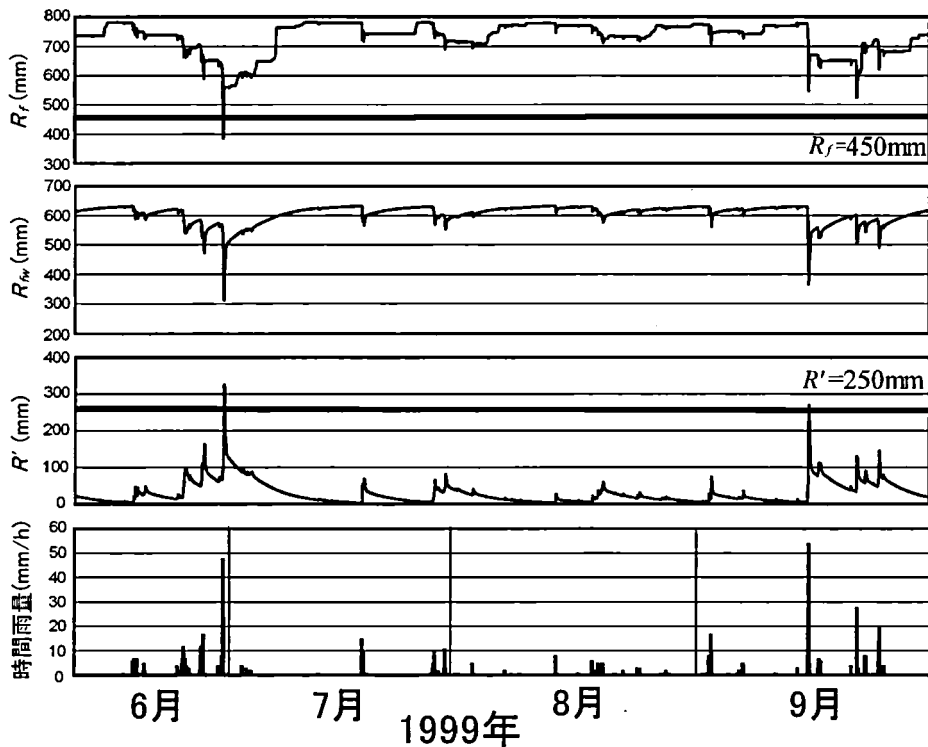


図-2.3 雨量指標 R_f , R_{fw} , R' の比較

(1999年6月～9月, 気象台東広島観測所)

Fig. 2.3 Comparison of rainfall indices (R_f , R_{fw} , and R')
(June to September, 1999, Higashi-Hiroshima Observatory)

この違いは、 R_f では長期雨量指標に 1 週間雨量を用いているためであり、6.29 災のように災害発生前の先行降雨が大きい場合は、指標が過大になりやすい。一方で、台風 16 号のように先行降雨が少ない場合は過少に評価されやすいともいえる。また、9月21日の降雨においては、 R_f は災害の発生した台風 16 号時の降雨よりも小さな値を示し、より危険な状態と評価されている。これは、台風 16 号時の降雨が低減することなく、全て先行降雨として加えられたことによるものと考えられる。

表-2.2 雨量指標 R_f , R_{fw} , R' の比較
 (6.29 災, 台風 16 号, 気象台東広島観測所)
 Table 2.2 Comparison of rainfall indices (R_f , R_{fw} , and R')
 (June 29th and Sep. 15th, 1999, Higashi-Hiroshima Observatory)

	1999.6.29		1999.9.15	変動幅
	17:00	18:00	4:00	
R_f	386.5mm	461.6mm	546.3mm	394.5mm
R_{fw}	313.5mm	311.2mm	366.1mm	325.2mm
R'	322.9mm	325.2mm	270.3mm	325.2mm

表-2.2 をみると 6.29 災の時には R_f はピークの次の時間帯には $R_f=450\text{mm}$ を上回る 461.6mm まで上昇していることが分かる。実際には 17~18 時の時間帯は 24mm/h という強い雨が降っていたことを考えると、16~17 時と 17~18 時を同程度の危険度に評価した R' (R_{fw}) の方が危険度指標として安全側であるといえる。

2.2.2 R' の適合性の検証

R' の適合性について、6.29 災を例にとり検証する。ここで、6.29 災の被災箇所データおよび雨量データは、地盤工学会 1999 年広島県豪雨災害緊急調査団の調査¹⁰⁾および広島県から公表された資料¹¹⁾を基にしている。

対象とした土砂移動現象は、土石流災害 118 渓流（うち発生時刻が特定できるもの 25 渓流）、がけ崩れ災害 191 箇所（うち発生時刻が特定できるもの 35 箇所）、航空写真により判読された山地崩壊 1616 箇所である（図-2.4）。

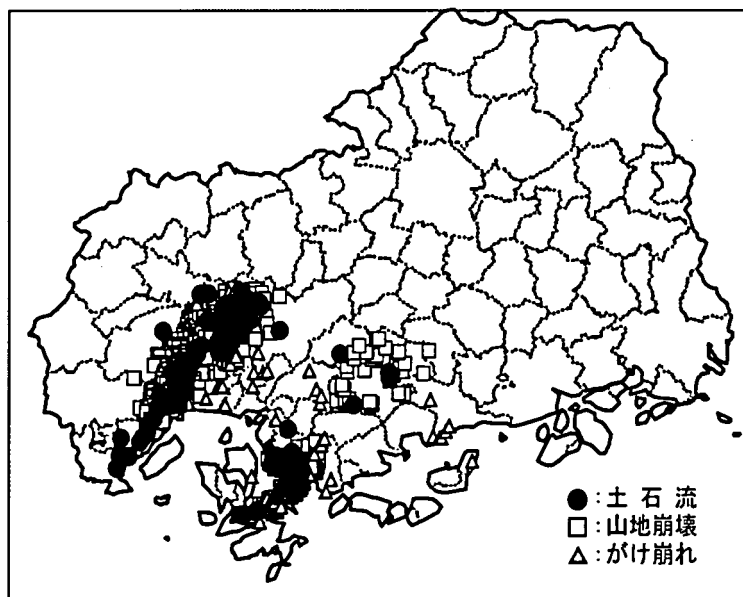


図-2.4 1999 年 6 月 29 日の災害発生箇所
 Fig. 2.4 Location of sediment-related disasters (June 29th, 1999)

土砂移動発生箇所直近で雨量観測が行われているわけではないため、検討には最寄りの観測地点のデータを用いる必要がある。発生箇所の最寄りの観測地点を選択すると、その離隔距離は表-2.3 のようになった。発生箇所から最寄りの観測地点までの距離が離れている場合は、その観測データを「災害発生降雨」とすることは望ましくないため、ここでは離隔距離の平均値を考慮して、発生地点から 2.5km 以内の降雨データを「災害発生降雨」として取り扱う。

表-2.3 発生箇所と雨量観測地点の離隔距離
Table 2.3 Distance from disaster point to observatory

	土石流	がけ崩れ	山地崩壊
平均	2.25km	2.92km	2.61km
最大	7.62km	8.37km	8.05km
最小	0.12km	0.17km	0.10km

災害発生時刻の雨の降り方を検討するために、発生時間の特定できる土石流災害を対象に、2.5km 以内で発生時間が特定できる災害が発生した雨量観測所における R' の変動と発生時間の関係を検討した。ここで、発生時間が特定できる土石流が 2.5km 以内にある観測所は 11 地点で、発生時間のわかる土石流 25 溪流の中 18 溪流がこの中に含まれる。

図-2.5 は、1999 年 6 月 29 日の R' の変化を示すグラフに、災害発生時刻をプロットしたものである。本検討では時間雨量データをもとに R' を求めているため、図-2.5 には短期間（たとえば 10 分単位）の降雨強度の変化については表現されていない。現在 10 分間雨量などの短期雨量情報が公開されてきているが、6.29 災当時のものは入手できなかった。このため、ここでは発生時刻の R' 値を定刻ごとに算定した R' 値を結んだ直線上にプロットしている。

なお、土石流は 1 つの溪流で何回かにわたって発生したものもあり、この場合は最初の土石流が発生した時間と最後の土石流が終了した時間の両方をプロットしている。

この図から、どの観測所でも R' が最大値（以下 R'_{max} ）になる時間帯の前後に集中していることがわかる。このことから、 R'_{max} の時に土砂災害危険度が最も高いということがいえそうである。このため、以下で行う発生時間がわかっていない災害の検討において R'_{max} の値を用いる。

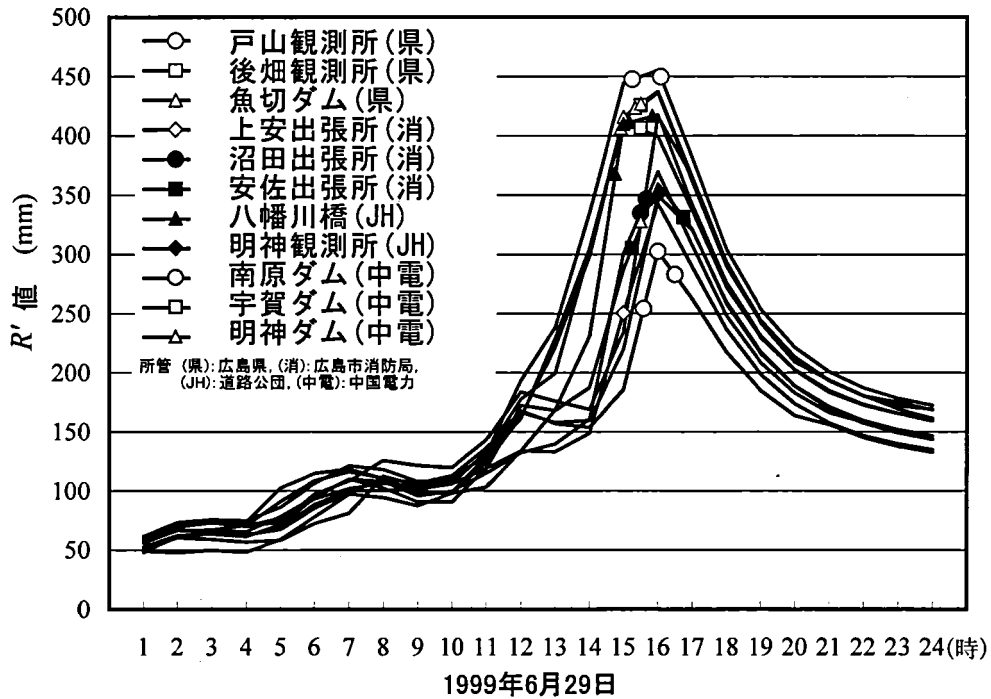


図-2.5 土石流発生時刻の R' 値 (1999年6月29日)

Fig. 2.5 R' -value for debris flow occurrence
(Several observatories in June 29th, 1999)

図-2.6 は 6.29 災の時の土石流，山地崩壊，がけ崩れの災害発生降雨と非発生降雨について， R' の値を 25mm 毎に階級分けし，それぞれ該当する観測所の数とその累積百分率を示したものである。これによるとそれぞれの発生下限値は， $R'=250\sim 275\text{mm}$ ， $175\sim 200\text{mm}$ ， $125\sim 150\text{mm}$ の階級に入る。

また，図-2.7(1)～(3)は，土石流，山地崩壊，がけ崩れが発生した観測所で R'_{max} を記録した時間帯の長期実効雨量 R_w と短期実効雨量 r_w の関係をプロットし，災害形態別の限界降雨量線を示したものである。

なお，土石流，山地崩壊，がけ崩れ災害の発生下限値は，それぞれ $R'=274.1\text{mm}$ (道路公団八本松観測所)， $R'=184.7\text{mm}$ (広島市消防局祇園出張所)， $R'=147.7\text{mm}$ (広島市消防局温品出張所) である。

これらの図から，土砂移動現象はがけ崩れ，山地崩壊，土石流の順に小さな R' 値で発生しているといえる。また， $R'=350\text{mm}$ を超える全てにおいて，土砂災害が発生していることが分かる。

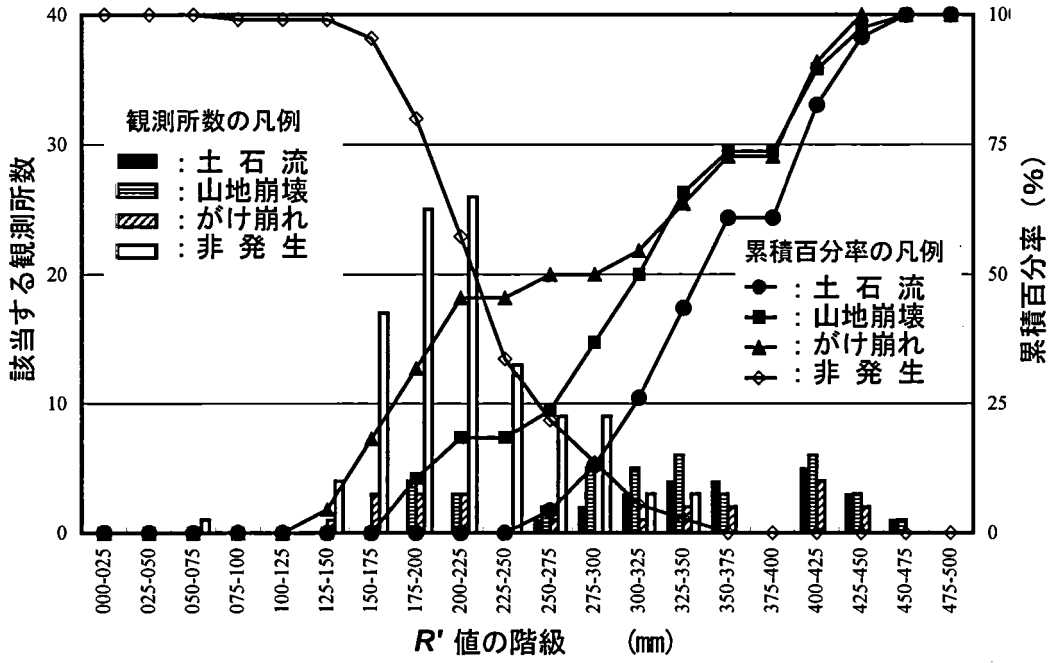


図-2.6 R' 値の階級別の災害発生・非発生降雨の観測地点数 (1999.6.29)
 Fig. 2.6 Distribution of rainfall index R' (June 29th, 1999)

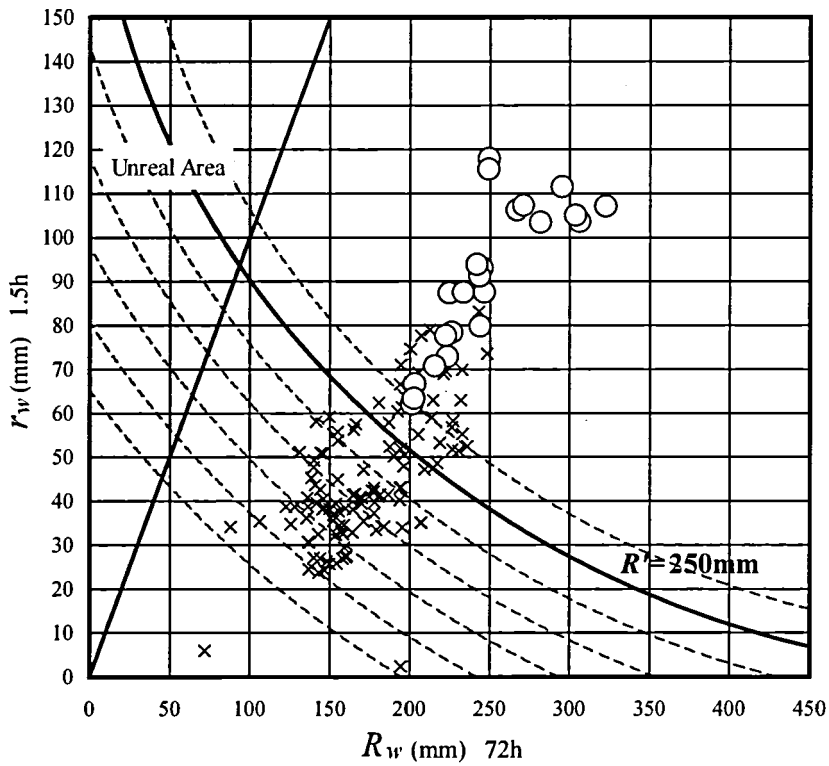


図-2.7(1) $R_w - r_w$ 関係図における土石流発生降雨と限界降雨量線 (6.29 災)
 Fig. 2.7(1) Critical R' -value for debris flow occurrence (during 6.29-disaster)

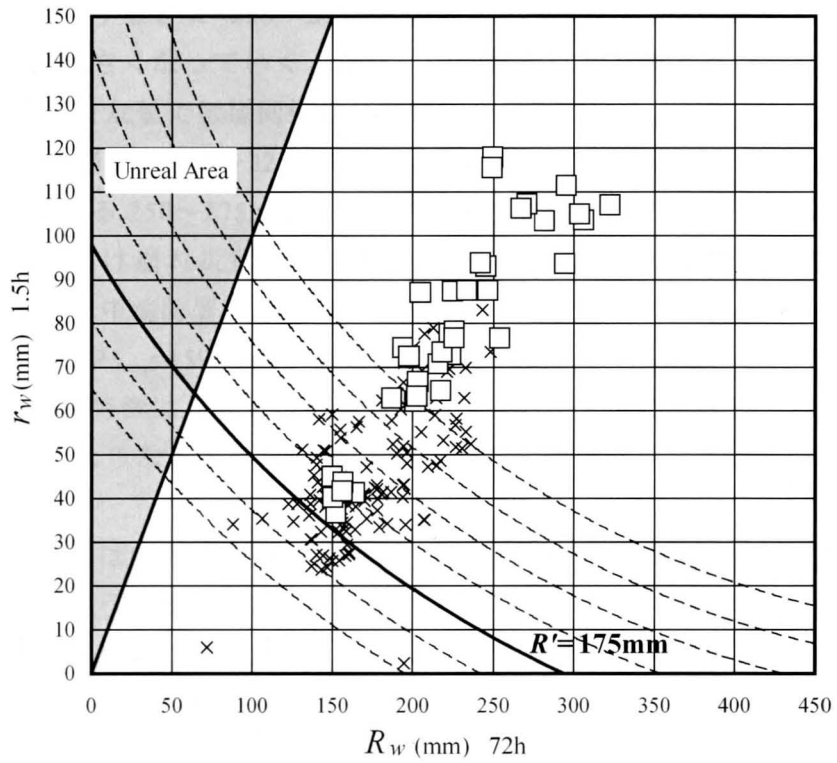


図-2.7(2) $R_w - r_w$ 関係図における山地崩壊発生降雨と限界降雨量線 (6.29 災害)
 Fig. 2.7(2) Critical R' -value for hillside landslide occurrence (during 6.29-disaster)

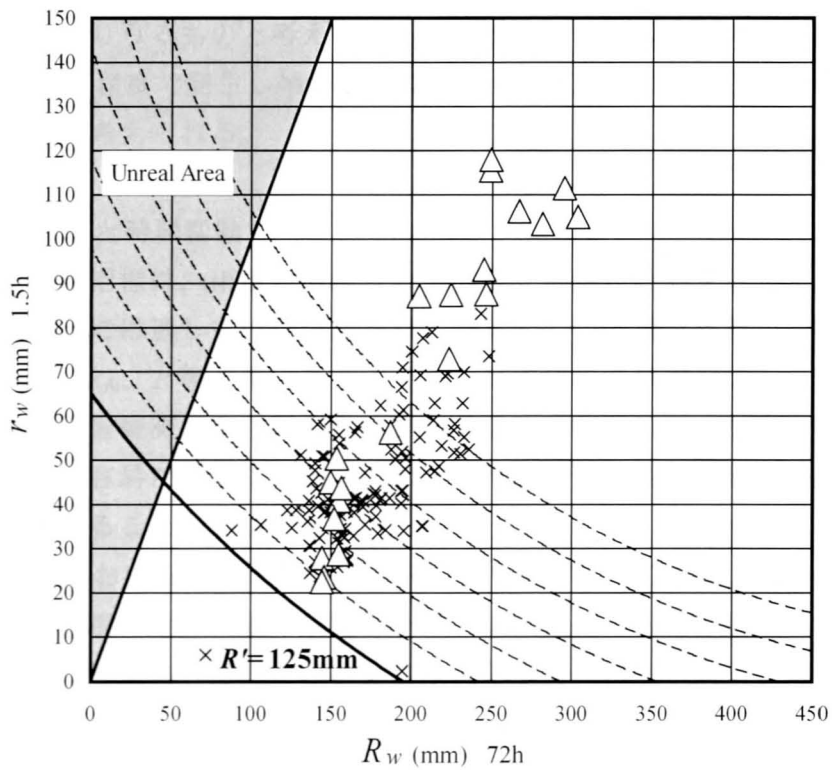


図-2.7(3) $R_w - r_w$ 関係図におけるがけ崩れ発生降雨と限界降雨量線 (6.29 災)
 Fig. 2.7(3) Critical R' -value for slope failure occurrence (during 6.29-disaster)

土石流発生に着目すると $R'=250\sim 275\text{mm}$ の階級から発生し始め、 R' が大きくなるにしたがって発生頻度が大きくなっていく。また、山地崩壊は土石流より 1~2 階級 (R' にして $25\sim 50\text{mm}$) 程度小さな値でほぼ同様の分布傾向を示している。

これに対し、がけ崩れは $125\sim 225\text{mm}$ 付近と比較的小さな R' のところでも発生しており、土石流が発生し始める $250\sim 275\text{mm}$ 付近での累積度数は、既に 50% に達している。

R' が小さな値でがけ崩れ災害が発生した観測地点には、広島市消防局の温品出張所 ($R'_{max}=147.7\text{mm}$)、中消防署 ($R'_{max}=151.1\text{mm}$)、戸坂出張所 ($R'_{max}=168.7\text{mm}$) および広島県の広島観測所 ($R'_{max}=159.9\text{mm}$) が挙げられる。

これらに共通する特徴は、広島市街地および周辺の住宅地に位置していることである。がけ崩れは、以下のような理由から、比較的小さな R' の値で発生しうるものと考えられる。

- a) がけ崩れ発生箇所は山裾部にあたるため、平地部にある最寄りの観測箇所と発生箇所での雨の降り方が違う可能性がある。
- b) 山裾部では、平坦地側に降った雨より、山側に降った雨の影響が大きい。
- c) 背後山地や流域に降った雨が地表水や地下水として広範囲から集められ、その地点に降った雨量以上の影響を受けている。
- d) 市街地や住宅地では、道路や水路等の影響で局部的に表流水を集中させる可能性がある。

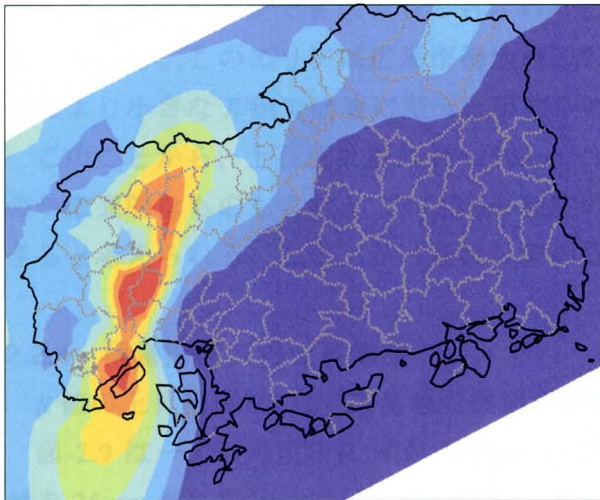
これらのことから、住宅地等でのがけ崩れは、様々な要因が重なれば $R'=125\text{mm}$ 程度の小さな降雨でも起こりうるものと考えられる。土石流の発生源とも考えられる山地崩壊については $R'=175\text{mm}$ 程度で発生し始め、 $R'=250\text{mm}$ 程度以上になるとこれが流動化し、土石流に発展するとも考えられる。

2.2.3 R' の空間分布と時間変動

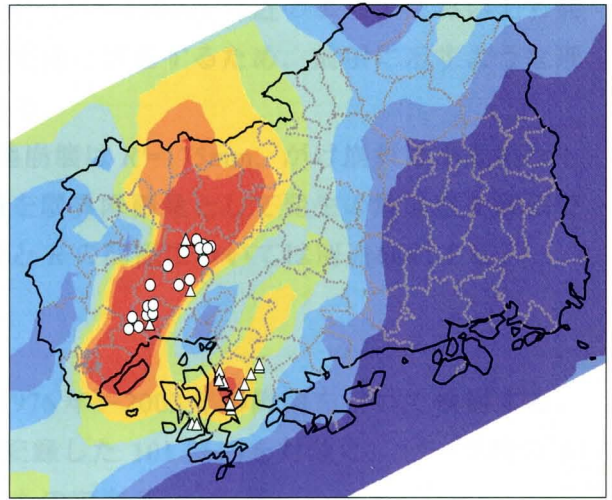
従来型の複数雨量指標は、雨量観測地点の危険度を個別に評価することはできるが、危険度の空間分布表示には適していない。これに対し、2 つの雨量指標から導かれる単独雨量指標である R_f や R_{fw} 、 R' 等を用いると、それぞれの値の等値線 (コンター) 図を地図上に描くことにより雨量観測所から離れた地点の危険度評価も可能になるとともに、危険域の時間的移動経過も容易に図示できる。この図を用いて危険度を事前に評価し、避難の必要性和時期を判断することが可能である。

図-2.8 に 6.29 災における雨量指標 R' コンター図を示す。ここでは、前項の解析に用いた雨量観測データに県境付近の気象台観測データ (山口県、島根県、鳥取県、岡山県、愛媛県、香川県の一部) を追加した。これにより県境付近での精度が向上することを確認している¹¹⁾。

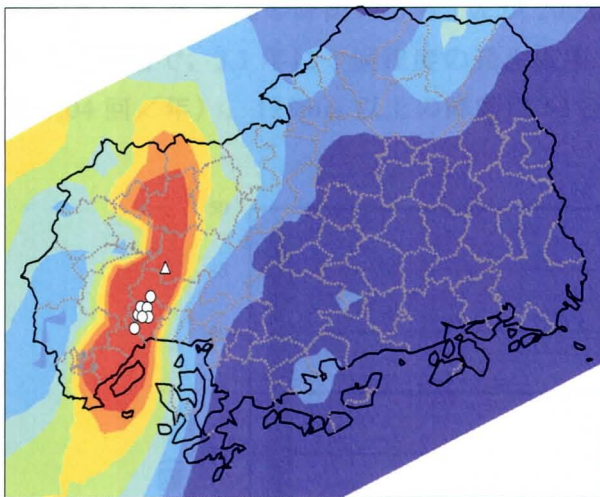
1999.6.29 14:00



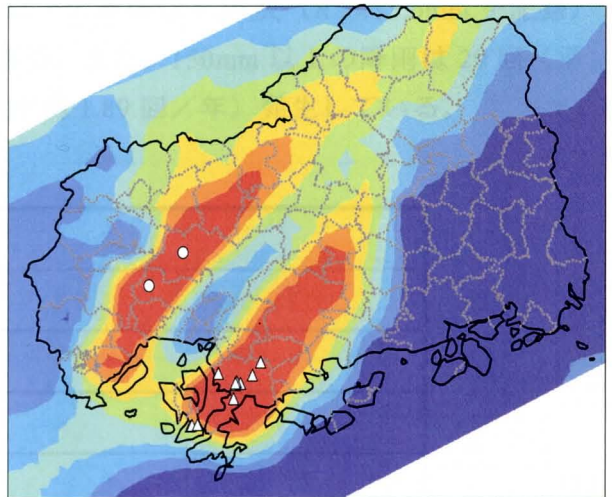
1999.6.29 16:00



1999.6.29 15:00



1999.6.29 17:00



○：図示した時間内に発生した土石流
△：図示した時間内に発生したがけ崩れ

図-2.8 降雨指標 R' の分布と時間的変遷 (1999年6月29日)
Fig. 2.8 R' -distribution map (during 6.29-disaster, Hiroshima Prefecture)

図中には発生時間帯が分かる土石流やがけ崩れ災害箇所を時間帯別に記載しているが、時間帯により危険度の高い (R' が大きい) エリアが推移する様子がよく分かる。このエリアと災害発生地点はよく一致していることから、 R' 指標で良好に危険度を評価することが可能であるといえる。

発生時間が特定できたものに関しては、土石流災害は全て $R'=250\text{mm}$ 以上のところで発生しており、がけ崩れ災害は $R'=200\text{mm}$ 以上のところで発生している。

また、図-2.4 (前出) の全ての土砂災害発生箇所と対比しても、発生危険域を的確に示していることが分かる。土砂移動形態別にみると、118 の土石流発生溪流の分布域が

$R'=250\text{mm}$ 以上の分布域とよく一致しており、1616 の山地崩壊箇所はそれより一回り広く分布し、土石流の指標に至らなかった領域でも発生していることが分かる。がけ崩れについては、時間が特定できないものも含めると、 $R'=125\sim 150\text{mm}$ 付近のエリアにおいても発生している。このエリアは広島市街地周辺の住宅地に該当するため、前項に示すような理由により小さな R' 値で崩壊に至った可能性もある。

このことから、土石流災害は $R'=250\text{mm}$ 、山地崩壊は $R'=175\text{mm}$ 、がけ崩れは小規模なものや散発的なものも含むと $R'=125\text{mm}$ 程度の値を限界降雨量として発生の危険性を評価できると考えられる。なお、がけ崩れ災害の規模と R' の関係については別途検討する。

2.2.4 雨量指標 R' の上昇頻度

R' 値の上昇頻度について、気象台呉観測所の 1976 年～2003 年の降雨を用いて検討する。

図-2.9 は一連の降雨中に R' が 100mm 以上を記録した 101 降雨を対象に、ピーク時の R' 値を 25mm 毎に階級分けし、その度数を示したものである。

この図から雨量指標 R' の値が大きくなるほど、その頻度が小さくなる様子がよく分かる。対象とした 28 年間の降雨のうち、 R' が 200mm 以上の降雨は 6.29 災 ($R'=415.6\text{mm}$ を記録) を含め 9 回で、3.1 年に 1 回程度の発生確率である。また、 150mm 以上の降雨は 29 回 (平均 1.04 回/年)、 125mm 以上の降雨は 53 回 (平均 1.89 回/年) 発生している。

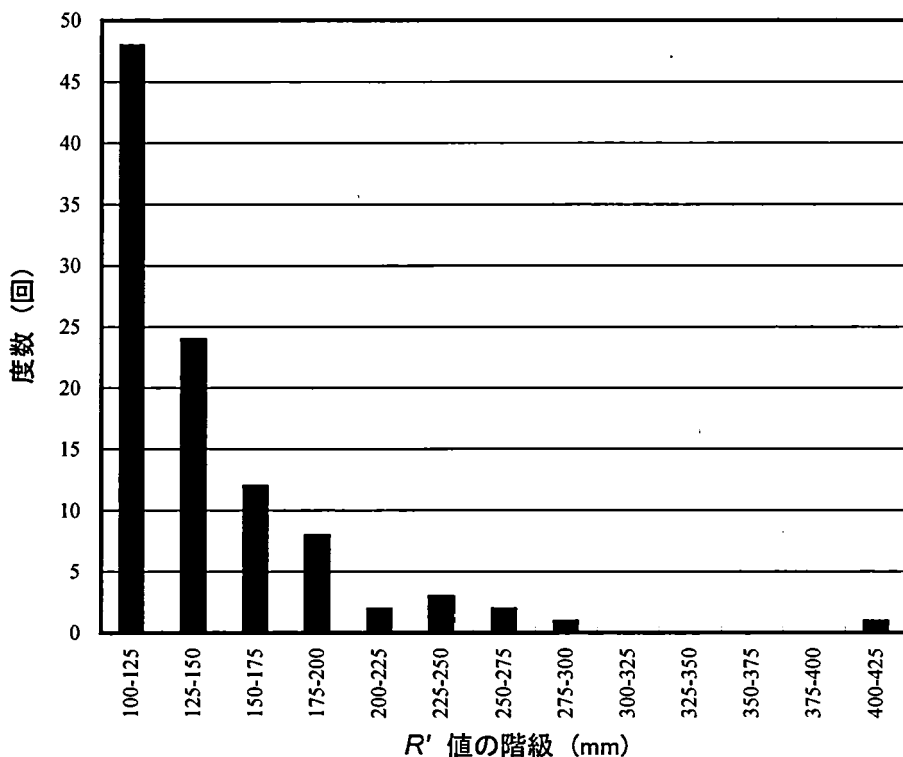


図-2.9 気象台呉観測所の雨量指標 R' の上昇度数 (1976 年～2003 年)
Fig. 2.9 Distribution of rainfall index R' (1976 - 2003, Kure Observatory)

2.2.5 雨量指標 R' と災害規模

雨量指標 R' と災害規模の関係を検討するために、気象台呉観測所の1976年～2003年の全降雨を対象に長期実効雨量 R_w と短期実効雨量 r_w の関係線（スネークライン）を連続的に図化した（図-2.10）。この図には、参考として呉市周辺で土石流等の大規模な土砂災害が発生したS42災のデータも記載している。

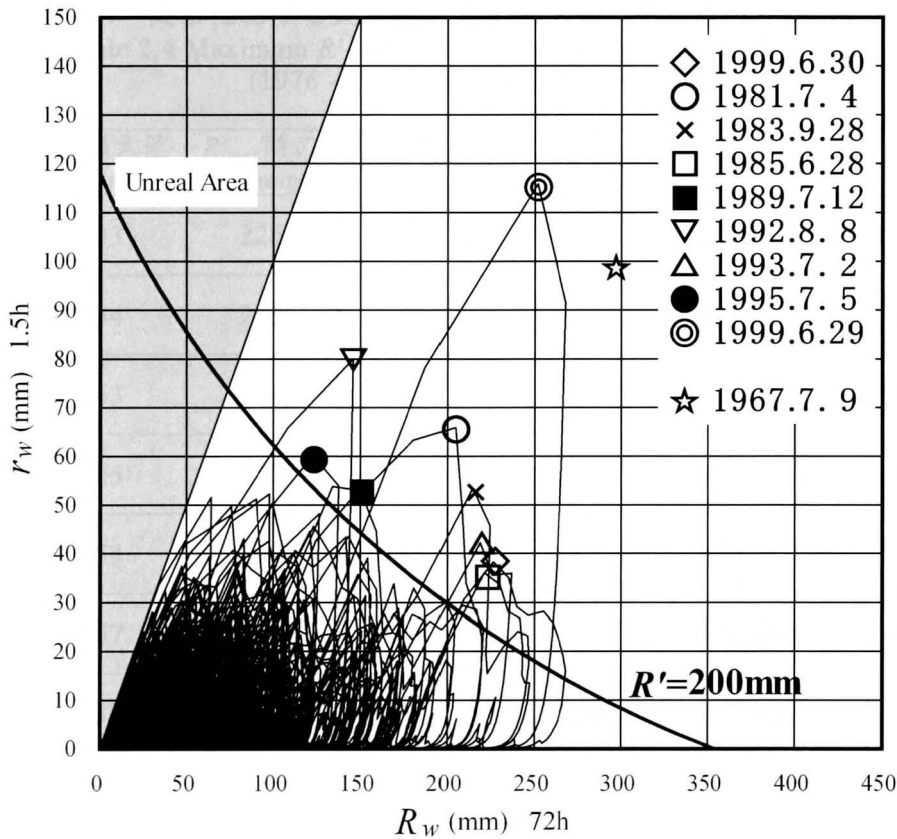


図-2.10 気象台呉観測所の雨量指標 R' (1976年～2003年)
 Fig. 2.10 R' path as snake line (1976 - 2003, Kure Observatory)

近年に呉市で起こった災害の資料^{7),8),9)}から、これらの降雨と土砂災害の関係を調査すると、 R' が200mm以上の9降雨のうち、8降雨で土砂災害が起こっていることが分かった（表-2.4）。1991年～2003年の間に発生した土砂災害⁹⁾について、雨量指標 R' と土砂災害の有無の関係を整理すると表-2.5 のようになる。この表においても、前出の図-2.2 と同様に、災害を発生件数から大規模災害、中規模災害、小規模災害と区分している。

この表から、呉地域では1991年～2003年の13年間に、 R' が125mm未満の降雨では土砂災害は発生していないことが分かる。125mm ≤ R' < 200mm の範囲では R' が大きくなるに従って土砂災害発生率は高くなり、 R' が200mm以上となる全ての降雨で災害が発生していることが分かる。

呉地域は斜面地に多くの住宅が立地しているため、がけ崩れを中心とした土砂災害に対する潜在的な危険度の高い地域である。

ある大きさの R' となる降雨のうち、災害に至った降雨数の占める率を求めれば、この R' に対する災害発生確率が計算できる。呉地域で小規模災害が小さい確率（災害発生率 25% 以下）で発生する降雨は $R'=125\sim 175\text{mm}$ 程度、小規模災害が大きい確率で発生する（災害発生率 75% 以上）降雨は $R'=175\sim 200\text{mm}$ 以上であった。また、中規模以上の（集中して発生する）災害が発生する降雨は $R'=200\text{mm}$ 以上であった。

表-2.4 呉市における災害時の R' の最大値(1976年～2003年)
Table 2.4 Maximum R' -values at each sediment-related disaster
(1976 - 2003, Kure Observatory)

災害発生日	R' の最大値 $R'_{max}(\text{mm})$	R'_{max} 時の $R'_W(\text{mm})$	R'_{max} 時の $r_W(\text{mm})$	R'_{max} を記録 した時刻	災害規模	備考(★印は $R'_{max} \geq 200\text{mm}$)
1979/06/30	233	226	38	4:00	中規模災害	★
1981/07/04	284	205	66	1:00	中規模災害	★
1983/09/28	263	214	53	8:00	小規模災害	★
1985/06/28	225	221	36	1:00	中規模災害	★
1991/07/04	153	124	31	15:00	小規模災害	
1992/08/08	267	146	80	16:00	小規模災害	★
1993/07/02	139	147	19	20:00	小規模災害	
1993/07/28	239	219	42	13:00	中規模災害	★
1995/07/03	219	150	53	8:00	中規模災害	★
1996/06/28	148	113	32	12:00	小規模災害	
1997/07/08	191	126	48	23:00	小規模災害	
1998/10/17	192	142	43	22:00	小規模災害	
1999/06/27	180	149	36	3:00	小規模災害	
1999/06/29	416	252	116	17:00	大規模災害	★6.29 災
2001/06/20	138	128	23	1:00	小規模災害	
2002/08/11	151	64	52	1:00	小規模災害	

表-2.5 呉市における雨量指標 R' と土砂災害発生率(1991年～2003年)
 Table 2.5 Occurrence probability of sediment-related disaster in each R' -value class
 (1991 - 2003, Kure Observatory)

	降雨数	災害降雨度数			災害発生率(%)		
		大	中	小	大	中	小
100-125mm	21	0	0	0	0	0	0
125-150mm	13	0	0	3	0	0	23
150-175mm	8	0	0	2	0	0	25
175-200mm	4	0	0	3	0	0	75
200-225mm	1	0	1	0	0	100	0
225-250mm	1	0	1	0	0	100	0
250-275mm	1	0	0	1	0	0	100
275-300mm	0	0	0	0	-	-	-
300-325mm	0	0	0	0	-	-	-
325-350mm	0	0	0	0	-	-	-
350-375mm	0	0	0	0	-	-	-
375-400mm	0	0	0	0	-	-	-
400-425mm	1	1	0	0	100	0	0

※大中小はそれぞれ災害規模を示す。

ここでは、個々の災害規模や被害程度を考慮せず計上した箇所数で災害規模を評価しているため、箇所数の中には庭先で発生した非常に規模の小さなものも含まれているものと考えられる。既往災害に関する複数の資料の中には、それぞれ異なる箇所数が示されている場合もあり、災害規模を考慮した上で小規模災害を含め詳細に災害発生確率を評価するためには、既往資料を再吟味する必要があるという課題を残している。しかし今回中規模災害として取り扱った程度（100箇所以上の記録が残っている）の災害については、複数の資料で確認できるものが多く、ほぼ信頼できる資料であると判断できる。

したがって、1991年～2003年間の呉市のデータを基に、散発的ながけ崩れなどが発生危険性を評価する目安は $R'=125\text{mm}$ 、集中した土砂災害が発生する危険性を評価する目安は $R'=200\text{mm}$ であると考えられる。

なお、 $R'=200\text{mm}$ という値は、6.29 災で発生時間が特定できたがけ崩れ災害が分布する範囲に相当し、このことから、集中して発生する土砂災害を表す指標としての妥当性が認められる。

$R'=200\text{mm}$ 以上の降雨は、呉市では1976年～2003年の間に9回、1991年～2003年の間に3回発生している。この全てで重大な災害が発生している訳ではないが、呉市においては3～4年に1回程度は危険な状況をもたらす可能性のある雨が降っていると考えられる。

2.3 既往雨量指標の工夫による表現方法の改良

地域で用いられている CL は直線で表されたものが多く、また都道府県と気象庁が共同して発する連携案方式による土砂災害警戒情報¹³⁾で用いられている RBFN を用いた手法¹⁴⁾では、上に凸の CL が与えられる。しかしながら、これらの CL も R' に置き換えることにより、より運用しやすい指標に改良することが可能である。ここでは、 R' に置き換えた指標を換算 R' と呼ぶ。

R' を決定するための R_{fw} は、任意の時間に X-Y 平面上にプロットされる点 A (R_w, r_w) を、点 C (R_1, r_1) を中心とした楕円弧の長径で表したものである。このため、図-2.14 のように中心点 C (R_1, r_1) を取り扱う R_w や r_w から十分離れた位置におくと、CL を示す楕円弧は運用上、ほぼ直線とみなすことができる。また、図-2.15 のように中心点 C (R_1, r_1) を点 O (0, 0) の付近、またはマイナス領域に置き、変換に式(2.3)を用いることで上に凸の楕円状の CL も表現することができる。

$$R' = R_{fw} - R_{fw0} \quad \dots\dots\dots(2.3)$$

広島県での提言案の運用においては、X 軸に半減期 72 時間の実効雨量、Y 軸に半減期 1.5 時間の実効雨量を用いた雨量指標が採用されており、たとえば広島地域の CL は $y = -0.309x + 108$ で表されていた（※現在広島県の土砂災害危険度情報は連携案による方式が用いられているが、この基準については、広島県ウェブサイト「土砂災害防止のために」(<http://www.pref.hiroshima.lg.jp/page/1171625896397/index.html>) で紹介されており、広島県防災 Web (<http://www.bousai.pref.hiroshima.jp/>) では、半減期 72 時間および 1.5 時間の実効雨量をほぼリアルタイムで閲覧することができる）。

図-2.16 に広島県での提言案による警戒避難のための雨量指標を換算 R' に置き換えた事例を示す。

ここでは、スネークラインの変動範囲の R_w, r_w 値として $R_1 = 4,500\text{mm}$, $r_1 = 1,500\text{mm}$ を採用すると、 R' により表現された CL は、実用上ほぼ直線とみなすことが可能となる。

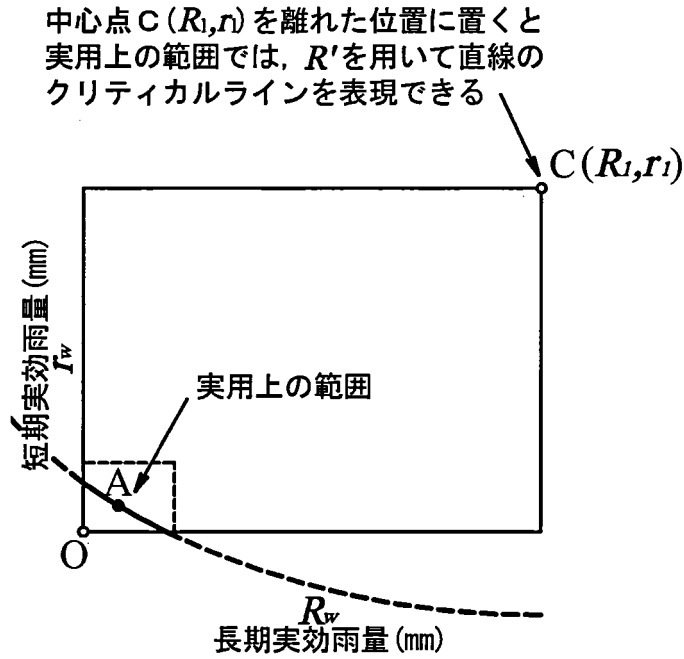


図-2.14 R' を用いた直線の CL の表現方法
 Fig. 2.14 Expressing method of a straight critical-line using R'

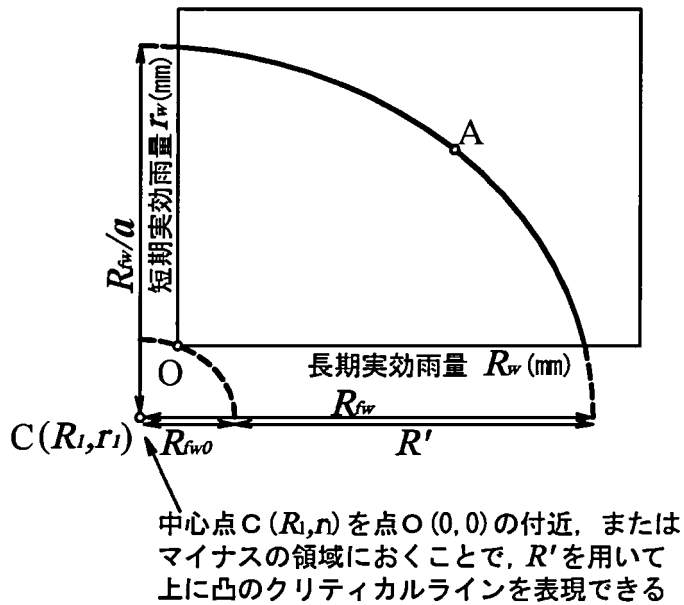
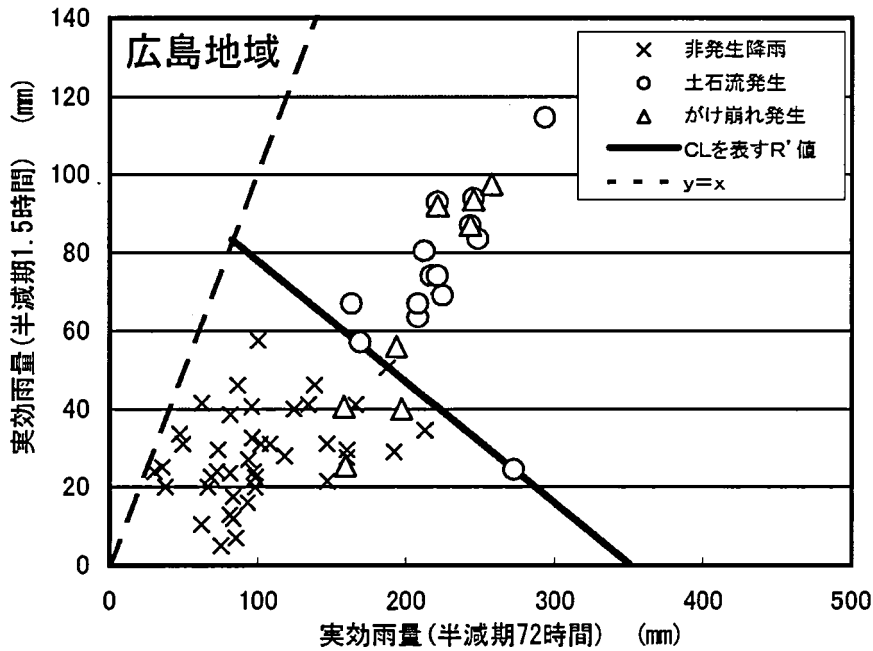


図-2.15 R' を用いた上に凸の CL の表現方法
 Fig. 2.15 Expressing method of a convex critical-line using R'



$R_l=4,500\text{mm}$, $r_l=1,500\text{mm}$, $a=3.10$, $R'_c=242\text{mm}$
 を用いて $y=-0.309x+108$ を表現したもの

図-2.16 広島県で用いられていた雨量指標の R' 化
 Fig. 2.16 Example of the conventional rainfall indices into R'

ここで、重み係数を $a=3.10$ 、CLを示す R' 値を $R'_c=242$ とすれば、広島県で運用されている雨量指標を換算 R' に置き換えることができる。

この手法を用いると、X-Y軸を用いて既に運用されている雨量指標があれば、CLを示す様々な線を換算 R' で表すことができる。

この方法により、既往の雨量指標を単一指標化し、換算 R' を用いて等値線図を描くことにより、容易に空間的分布を地図上に表現することが可能となる。また、単一指標であれば、その値が基準値を超えるか否かで、速やかに危険な状態を把握することができる。

2.4 本章のまとめ

本章では、新しい雨量指標 R' を提案し、その定義や基本的な考え方をとりまとめた。新しい雨量指標 R' は、土砂移動現象の発生に影響を及ぼす先行降雨と短時間の降雨強度の影響を1つの値で表すことができる指標である。雨量指標 R' により、リアルタイムに近い形で時間とともに変動する危険度の空間的分布をわかりやすく表現することが可能となった。本章で得られた成果を以下に列記する。

- ① 雨量指標 R_f の課題に対処するため、実効雨量の概念を取り入れた雨量指標 R_{fw} を考案し、さらに危険度とともに増大する新しい雨量指標 R' を提案した。 R_{fw} は横軸 R_w 、縦軸 ar_w の座標系において、任意の降雨状況を示す点 A (R_w, ar_w) と基準点 B (R_1, ar_1) との距離(mm)を表したもので、 R' は、短期、長期実効雨量がともに 0mm のときの R_{fw} 値 (R_{fw0}) から、任意の点の R_{fw} の値を引くことによって求められる。
- ② 長期実効雨量の半減期を 72 時間、短期実効雨量の半減期を 1.5 時間とすると、広島県の既往災害による検討では、 $R_1=600\text{mm}$ 、 $r_1=200\text{mm}$ 、 $a=3$ を用いた場合に、 R' 値を示す楕円弧が最もよく災害の発生限界降雨 (CL) を表現できる結果となった。
- ③ 東広島地域での 1999 年の 6 月と 9 月の災害事例による検討の結果、 R_f を用いるよりも、先行降雨の低減効果が評価できる R' を用いたほうが適切に土砂災害の危険度を示せることが確認された。
- ④ 実効雨量 R_w 、 r_w は連続的に計算できる指標であるため、これを用いて計算できる R' についてもまた、連続的に計算できる雨量指標であり、公表されている時間雨量データを用いて、時々刻々変化する降雨による土砂災害危険性をリアルタイムで追従するには好都合である。
- ⑤ 先行降雨と現況降雨強度の2つの影響から評価される危険度を1つの値の大小で表現することができるため、直感的に危険を判断することができる。加えて、観測地点ごとの R' 値を用いてコンターマップを描くことにより、時間とともに変動する危険度の空間的分布を視覚的に表現することができる。
- ⑥ 広島周辺の花崗岩分布域では、実効雨量の半減期を 72 時間と 1.5 時間とし、定数 $R_1=600\text{mm}$ 、 $r_1=200\text{mm}$ 、重み係数 $a=3$ を用いれば、土石流は $R'=250\text{mm}$ 、山地崩壊は $R'=175\text{mm}$ 、がけ崩れは $R'=125\text{mm}$ 程度を発生限界降雨量の目安とすることができる。
- ⑦ 呉地域の災害事例から、雨量指標 R' 値が大きくなるほど土砂災害発生確率が高くなり、規模の大きな災害が発生していることがわかる。

- ⑧ 以上のことから、雨量指標 R' を用いれば値の大小とその分布により、土砂移動現象が発生する時期や範囲が予測可能であることがわかった。さらに、発生する土砂移動現象の種類や、土砂災害の規模を推定することができる可能性があることもわかった。

- ⑨ 直線や上に凸の曲線のクリティカルライン (CL) をもつ雨量指標であっても、わずかな変更により R' に変換することができるため、既に用いられている様々な雨量指標を R' に変換して単一指標化し、等値線図を描くことにより、容易に空間的分布を地図上に表現することが可能となる。

【引用文献】

- 1) 佐々木康, 森脇武夫, 加納誠二, 白石芳樹(2001): 1999年の広島県斜面災害をもたらした降雨特性と警戒・避難のための雨量指標, 土と基礎, 49(7), pp.16-18.
- 2) 建設者河川局砂防部(1993): 総合土砂災害対策検討会における提言および検討結果.
- 3) 矢野勝太郎(1990): 前期降雨の改良による土石流の警戒・避難基準雨量設定手法の研究, 砂防学会誌(新砂防), Vol.43, No.4, pp.3-1.
- 4) 高橋透, 松岡充宏, 瀬尾克美, 荒木義則, 古川浩平, 水山高久(2000): 地形特性を考慮した土石流警戒避難基準雨量の設定, 砂防学会誌, Vol.53, No.1, pp.35-46.
- 5) 寺田秀樹, 中谷洋明(2001): 土砂災害警戒避難基準雨量の設定方法, 国土技術施策政策総合研究所資料, No.5, 58p.
- 6) 本家正博, 石山英治(2003): 住民へ向けた土砂災害情報の提供について, 砂防学会誌, Vol.54, No.4, pp.46-54.
- 7) 広島県(1999): 第2回 6.29 広島県土砂災害対策検討委員会検討資料.
- 8) 広島県防災議会(2003): 広島県地域防災計画.
- 9) 森脇武夫(2004): 呉市における土砂災害の特徴, 平成15年度広島大学地域貢献特別支援事業, 地域防災ネットワーク構築事業成果報告書, pp.201-209.
- 10) 平成11年広島県豪雨災害緊急調査委員会(2000): 平成11年の広島県豪雨災害調査報告書, (社)地盤工学会, pp.66-68.
- 11) 広島県(1999): 平成11年6月末梅雨前線豪雨災害6.29土砂災害(速報版), 66p.
- 12) 海堀正博, 中井真司, 佐々木康(2004): 警戒・避難のための雨量指標の改良, 平成15年度広島大学地域貢献特別支援事業, 地域防災ネットワーク構築事業成果報告書, pp.118-200.
- 13) 国土交通省河川局砂防部, 気象庁予報部, 国土交通省国土技術総合研究所(2005): 国土交通省河川局砂防部と気象庁予報部の連携による土砂災害警戒避難基準雨量の設定手法(案).
- 14) 倉本和正, 鉄賀博己, 東 寛和, 荒川雅生, 中山弘隆, 古川浩平(2001): RBF ネットワークを用いた非線形がけ崩れ発生限界雨量線の設定に関する研究, 土木学会論文集, No.672/VI-50, pp.117-132.

第3章 雨量指標 R' の物理的意味

小橋¹⁾は、崩壊、土石流などの土砂移動現象は土塊の物理的移動現象であり、力学的理解によって説明されるべきであり、「外力としての降雨→地表・地下水の変化→土のせん断抵抗の変化→安定条件→流出土の性質、流出土量」の一貫した説明によって明確な予測が可能であるとしている。しかし一方で、このどの過程をみても自然条件のバラツキや複雑さが山積し、一義的な決定は困難であると述べ、発生確率的な取り扱いで十分であるとしている。

筆者の研究は、雨量指標を用いて土砂移動現象の発生を予測するもので、土中水分の状態、土のせん断抵抗の変化などの過程を飛ばして、直接外力としての降雨から安定条件の逸脱を発生確率的に予測しようとするものである。このためには、用いる手法が中間過程である物理的現象としての理解と矛盾しないものでなければならない。

ここでは、現地モニタリングと室内人工降雨実験の結果を用いて、降雨による土の土中水分量の変化に着目し、雨量指標 R' の物理的意味づけを試みる。

3.1 降雨による斜面崩壊の物理的解釈

降雨による斜面安定の問題は、雨水の浸透問題とそれに伴う力学量の変化の結果としての斜面安定性の問題である²⁾。降雨浸透に伴う力学的な変化のうちで斜面崩壊に大きく影響するのは、せん断強度の低下^{たとえば^{3)~6)}}、間隙水圧の発生^{たとえば^{7)~14)}}、自重の変化であるが、自重の増加はすべり力とともにせん断抵抗も増加させるため、土の内部摩擦角より緩い斜面においては安全側に働くこともある。ゆえに、特に不飽和土がサクシヨンの低下により強度を失うことと、地下水の形成により間隙水圧が発生するということによる影響が大きいといえる。

一般に斜面の安定は、斜面のせん断抵抗力 τ_f と斜面に係るせん断応力 T の平衡状態で説明される。すなわち、前者が大きい状態では斜面は安定しており、後者が上回ると斜面は不安定化するもので、両者の比を安全率 ($F_s = \tau_f / T$) と呼び、これが 1 より大きければ安定、小さければ不安定と評価される。

斜面の安定解析には、極限平衡法がよく用いられる。極限平衡法は、力の釣合いおよび土の Mohr-Coulomb の破壊規準に基づいて条件を仮定し安全率を求めるものである。飽和土において、Mohr-Coulomb の破壊規準は式(3.1)で表される。

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_w) \tan \phi' \quad \dots\dots(3.1)$$

ここに、
 τ_f : 破壊面上のせん断抵抗力
 c' : 土の有効粘着力
 σ : 破壊面上の全応力表示の垂直応力
 u_w : 間隙水圧
 ϕ' : 土の有効内部摩擦角

ここで求められるせん断抵抗力 τ_f は安定計算式の分子になり、分母は土塊重量の切線方向成分 (sin 成分) であるせん断応力 τ となる。

図-3.1 のような勾配 α の無限長の斜面を想定すると、せん断応力は $T = \sigma \sin \alpha$ で表され、安定解析式は式(5.2)のとおりなる。

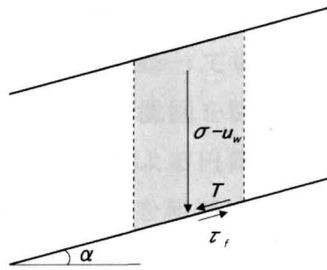


図-3.1 無限長斜面の応力のつりあい
Fig. 3.1 Equilibrium of stresses in an infinite slope

$$F_s = \frac{c' + (\sigma - u_w) \cos \alpha \cdot \tan \phi'}{\sigma \sin \alpha} \quad \dots\dots(3.2)$$

したがって、降雨浸透により間隙水圧 (あるいは地下水位) が発生すると、せん断抵抗力 τ_f が低下し斜面は安定を損なう。不飽和土の有効応力は式(3.3)に示す Bishop の有効応力式で表すことができる¹⁵⁾。

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + x (u_a - u_w) \quad \dots\dots(3.3)$$

ここで、 σ は全応力、 σ' は有効応力、 u_w は間隙水圧、 u_a は間隙空気圧である。なお、 x は u_w と u_a の有効応力への寄与率を表す係数で、飽和土では $x = 1$ 、乾燥土では $x = 0$ 、不飽和度では $0 < x < 1$ となる。また、不飽和土のせん断強度を示す Fredlund らの式¹⁵⁾を用いると、Mohr - Coulomb の破壊規準は式(3.4)で表される。

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad \dots\dots(3.4)$$

ここに、 $u_a - u_w$: サクシヨン
 ϕ^b : サクシヨンの変化に伴うせん断抵抗力の変化を表すパラメータ

式(3.4)では、見掛けの粘着力成分 c は式(3.5)で示され、サクシヨンに依存するものであることがわかる。

$$c = c' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad \dots\dots(3.5)$$

これらの観点から、降雨により土中水分が増加すれば斜面の安定が低下することを説明することができる。

3.2 現地モニタリング結果から見た降雨と土中水分の関係

3.2.1 設置機器と観測状況の概要

まさ土斜面の表層における降雨と土中水分の関係を継続的に観測するために、広島大学大学院総合科学研究科砂防学研究室（海堀研究室）では、東広島市助実地区の龍王山において1999年の土石流災害発生後の手動観測¹⁶⁾に加えて、2004年度から土壌水分計、テンシオメーター、雨量計を設置し自動観測を行っている¹⁷⁾。設置機器の仕様を表-3.1に、現地の設置状況写真を写真-3.1、3.2、設置位置図を図-3.2に示す。

土壌水分計は、誘電率を用いた方法¹⁵⁾による円筒リング型の静電容量センサーを用いた土壌水分プロファイルセンサーCST-EasyAGを使用している。これは、あらかじめ埋設された多点のアクセスチューブに、センサー部をスライドして差し込むタイプのものであるため、掘削による土壌構造の破壊の影響を最小限に抑えることができる。土壌水分計の計測値は体積含水率（％）で取得できる。

テンシオメーターは、あらかじめ脱気して水で満たされたセラミック製のポーラスカップを土中に埋設し、チューブを介して圧力計につないだ構造のものである¹⁵⁾。不飽和土にテンシオメーターを挿入すると、ポーラスカップ内の水圧と土中水の水圧の水頭差により土中水のサクションを計測するものである。なお、SI単位系では土中水のポテンシャルの単位には [Pa] を用いることとなっているが、サクションは慣行的には水頭で [cmH₂O] と表記されることが多い。また、サクションの値は数オーダーにわたって変化するため、[cmH₂O] で水頭表示した値の常用対数である pF 値で示されることも多い。ここで用いた圧力式テンシオメーターCHR-TMでは、土壌水分計の計測値は pF 値で取得される。

表-3.1 設置機器の仕様

Table 3.1 Specification of the measuring equipment

 <p>土壌水分計</p>	機 器 名 称	土壌水分プロファイルセンサーCST-EasyAG
	測 定 範 囲	乾燥～飽和
	測 定 精 度	±0.06%
	測 定 時 間	1.1 秒/センサー
	セ ン サ ー 深 度	4 深度 (10cm/30cm/50cm/80cm)
	セ ン サ ー 影 響 範 囲	センサー周囲 10cm(99%), 15cm(100%)
	セ ン サ ー 寸 法	パイプ外径 32mm (センサー直径 26.5mm)
 <p>テンシオメーター</p>	機 器 名 称	圧力式テンシオメーターCHR-TM
	測 定 範 囲	0～3 (pF)
	出 力	1-5VDC, 1-2VDC 4-20mA/0-1000kP
	寸 法	テンシオ部直径 18mm



写真-3.1 No.1 地点の設置状況

Photo 3.1 Situation of No.1 site

アルミホイルと塩ビ製のパイプで地上部を保護したテンシオメータとその横に土壤水分プロファイル計が設置されている。



写真-3.2 No.2地点の設置状況

Photo 3.2 Situation of No.2 site

アルミホイルで地上部を保護したテンシオメータとその横に土壤水分プロファイル計が設置されている。細い塩ビ製のパイプは目印。

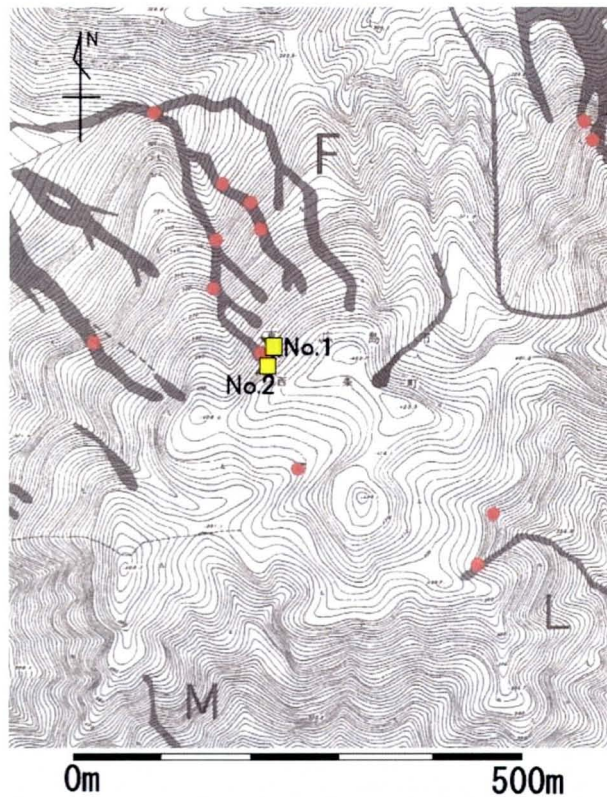


図-3.2 土中水分観測位置（東広島市助実地区龍王山，梅木による図¹⁷⁾に加筆）

Fig. 3.2 Positions of field moisture observation
(Mt. Ryuoh in Sukezane region of Higashi-Hiroshima City)

■：観測地点 ●：湧水地点

No.1：土壤水分計（GL-10cm,30cm,50cm,80cm）テンシオメータ（GL-30cm,50cm）

No.2：土壤水分計（GL-10cm,30cm,50cm,80cm）テンシオメータ（GL-30cm,90cm）

助実地区の龍王山は、1999年9月15日の台風16号に伴う豪雨によって土石流が集中的に発生した場所である。龍王山は標高423.7mの比較的平坦な山頂を有する山であるが、標高405~420m付近に明瞭な遷急線を持ち、山腹部はいくつもの山ひだが刻まれた急峻な斜面となっている。当地区の分布地質は花崗岩であり、表層付近はまさ土状に強風化している。なお、この山の比較的標高が高い部分において、かなりの数の湧水箇所が存在し、中には枯れることなく常時湧水しているものも確認された。

計器を設置しているのは、土石流が発生した溪流の源頭部の崩壊地周辺である。崩壊は標高約415m付近に上限境界をもつ小流域の約405m付近を頭部としており、崩壊発生箇所の地表の集水域は僅かなものである。しかし、崩壊地内の標高約395m付近からは常時湧水が見られることから、地下水が集まりやすい地下構造を有しているものと考えられる。

図-3.3に2004年3月3日から2006年8月11日までの観測データを1年ごとにまとめて図示する。なお、2006年8月11日の15時30分頃に東広島市を中心に強い夕立があり、このときの落雷で助実地区龍王山に設置していた全ての機器が観測不能となった。以降、幾度かの修理作業を経て現在は以前と同じ観測を続けているが、再設置した計器の特性や設置条件の違いからデータの連続性が確保できていないため、本検討では2006年8月11日までのデータを用いる。また、この期間内にもデータの欠測や計器の異常などもあり修理・調整を行っているが、この間の明らかに異常なデータは除外している。以下に地点ごとの特徴をまとめ、続いていくつかの期間や降雨イベントを対象に降雨と土中水分の関係を検討する。

3.2.2 地点ごとの変動傾向

(1) No.1 地点

No.1地点は、崩壊地に向かって左側斜面にあたる林内で、崩壊地内の湧水地点と近い標高のところに位置する。付近の崩壊深さが1m弱のものが多いことから、当地点には4深度の土壌水分計(GL-10cm, 30cm, 50cm, 80cm)および2深度にテンシオメーター(GL-30cm, 50cm)を設置している。なお、当地点は比較的土中水分が高い傾向にあり、テンシオメーターを設置するときに60cm以深がすでに飽和度の高い状態であったため、当初GL-90cmに設置する計画であったテンシオメーターをGL-50cmでの観測に変更している。ここでは、各土壌水分計をSWC1-10~SWC1-80、各テンシオメーターをpF1-30、pF1-50と表記する。

図-3.3を見ると、当地点の体積含水率はGL-30cm以深のものはもともと比較的高い体積含水率を示し、降雨による変化が少ない傾向にある。一方でSWC1-10は、降雨による変動が大きい傾向がある。テンシオメーターによるpF値の変動をみると、後述するNo.2地点に比べると変動量は少ないことがわかるが、降雨に伴う変化が見られ、特に2004年7月末から8月にかけての降雨を初めいくつかの降雨の際に大きくpF値が低下していることがわかる。

なお、当地点ではGL-60cm以深では、恒常的に高い含水状態にあるため、付近を試掘してみたところ、GL-100~140cm付近の30cm径程度の礫の間に空洞があり、ここがミズミチとなっていることが確認された(写真-3.3)。また、その上位にはやや細粒分の多い層

が分布していることが確認された。このことは、No.1 地点の深層が常時体積含水率が高い状態であること、表層部の体積含水率の変化と GL-30cm 以深の体積含水率の変化の傾向が異なることと調和的であり、深部では地下水の影響を受けて常時含水率が高い状態にあるが、その上位に透水性の低い層が存在するため、直接的に降雨の影響を受けにくいものと推察される。



写真-3.3 No.1 付近の試掘結果

Photo 3.3 Stratum composition around a test pit near the No.1 site
(GL-100~140cm 付近にミズミチがあり、上位に細粒分の多い層が分布する)

(2) No.2 観測点

No.2 地点は崩壊頭部の直上部に位置しており、この崩壊が発生した際に上方から水の供給があったとすれば、当地点での観測により崩壊の要因となった土中水分の変化を捉えることができる可能性がある地点である。No.1 地点と比べると通常は比較的乾燥しており、表土の中には岩片や礫が多く含まれている。当地点には、4 深度の土壌水分計 (GL-10cm, 30cm, 50cm, 80cm) および 2 深度にテンシオメーター (GL-30cm, 90cm) を設置している。ここでは、各土壌水分計を SWC2-10~SWC2-80, 各テンシオメーターを pF2-30, pF2-90 と表記する。

図-3.3を見ると、当地点の体積含水率は平常時においてはNo.1 地点よりも低く、SWC2-10 および SWC2-30 では 5~10% 程度、SWC2-50 および SWC2-80 では 15~20% 程度の値を示している。しかし、降雨時の体積含水率の上昇程度は大きく、SWC2-10 と-30 については比較的規模の小さな降雨にも反応し SWC1-10 と類似した傾向を示す。より深い位置に設置している SWC2-50 と SWC2-80 については比較的規模の大きな降雨のときに上昇が見られる。テンシオメーターによる pF 値の変動においても No.1 地点に比べると変動量が大きく、しばしば pF 値が測定可能範囲外である 0 以下に至る高い含水状態を示している。

当地点は、No.1 地点のような特異な地下構造は確認されていないことから、当地点のほうが典型的なまさ土斜面に近い変動を示しているとも考えられる。

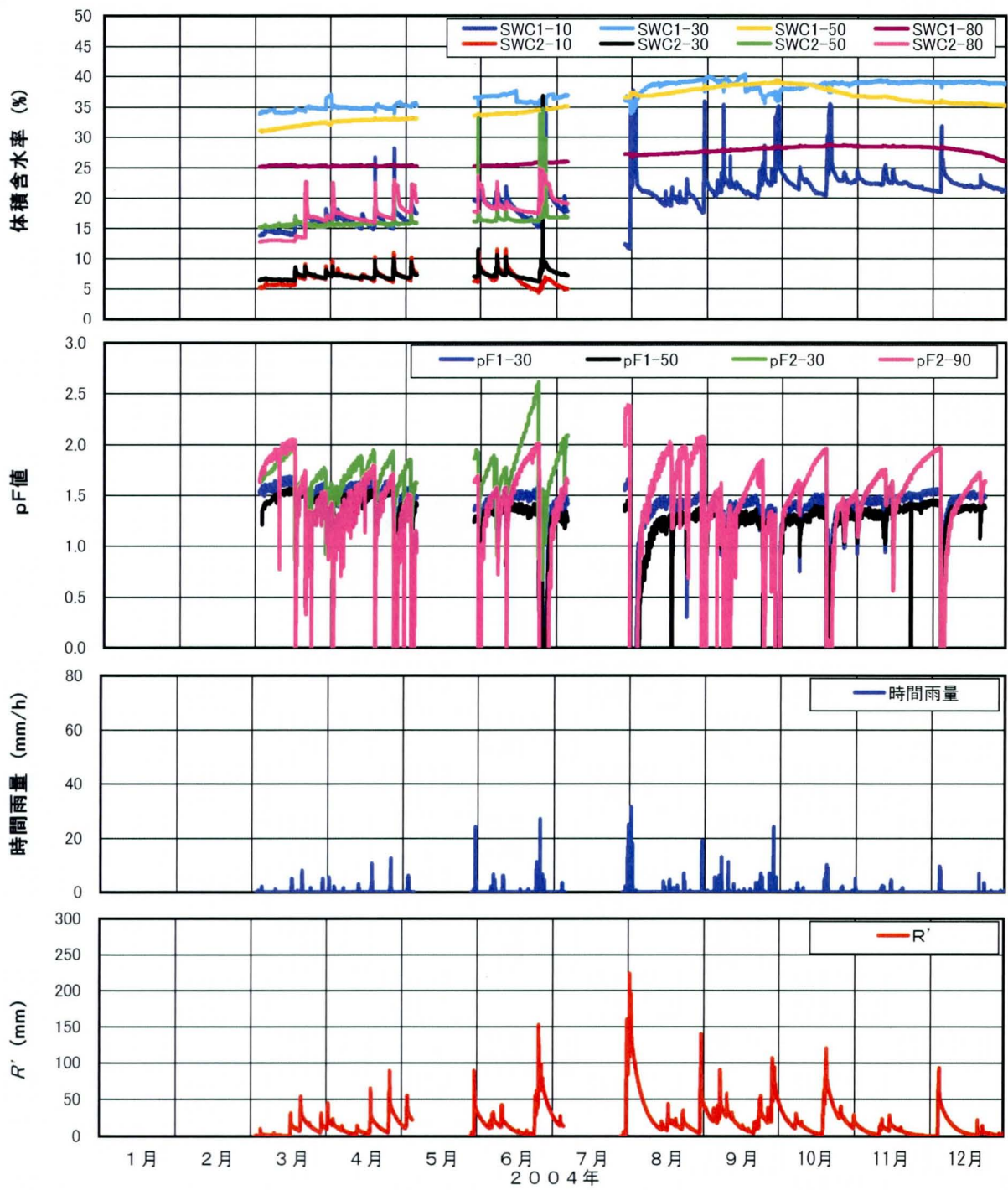


図-3.3(1) 2004年3月3日から2004年12月31日までの観測結果
 Fig. 3.3(1) Observation data from March 3rd to December 31st, 2004

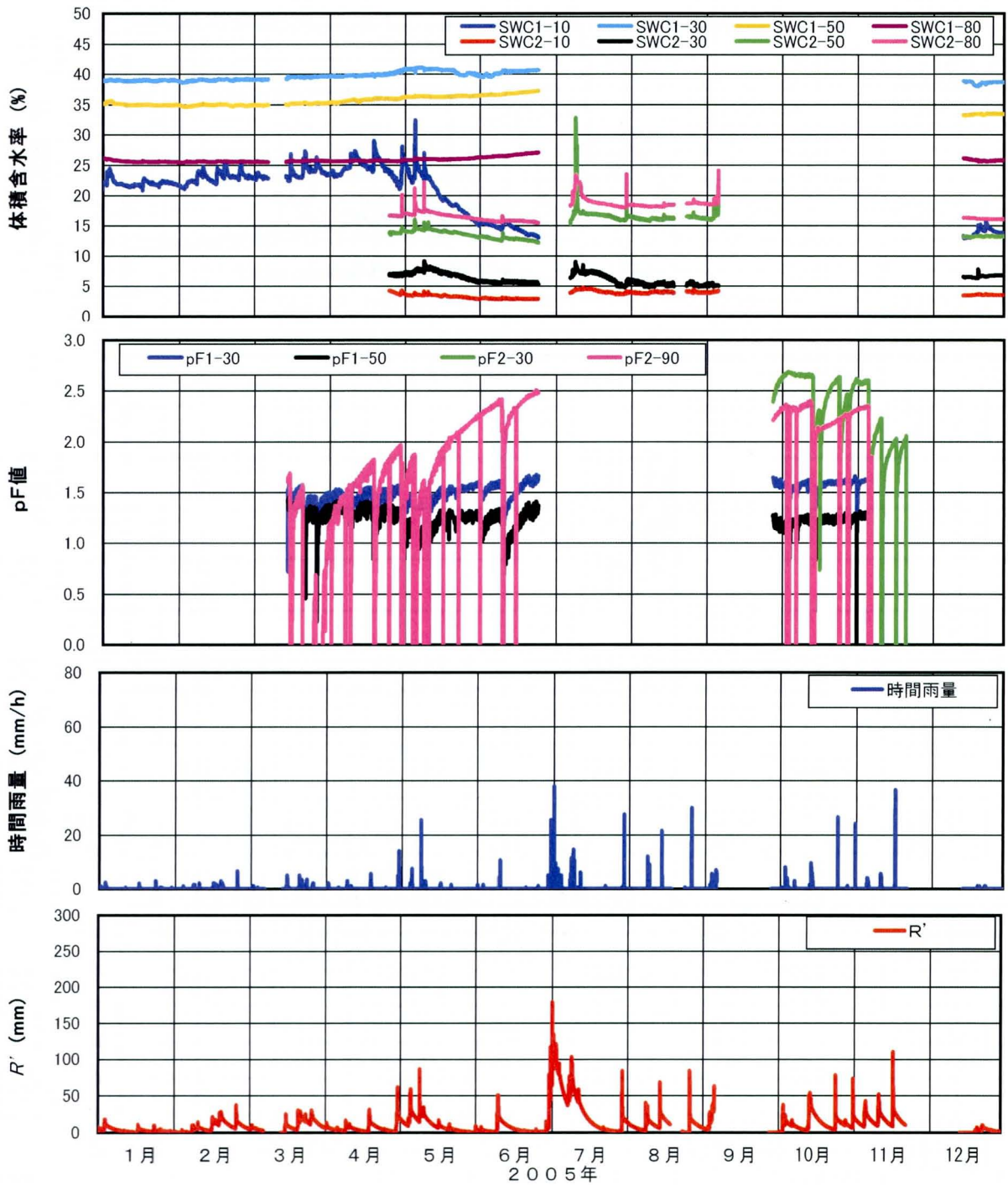


図-3.3(2) 2005年1月1日から2005年12月31日までの観測結果
 Fig. 3.3(2) Observation data from January 1st to December 31st, 2005

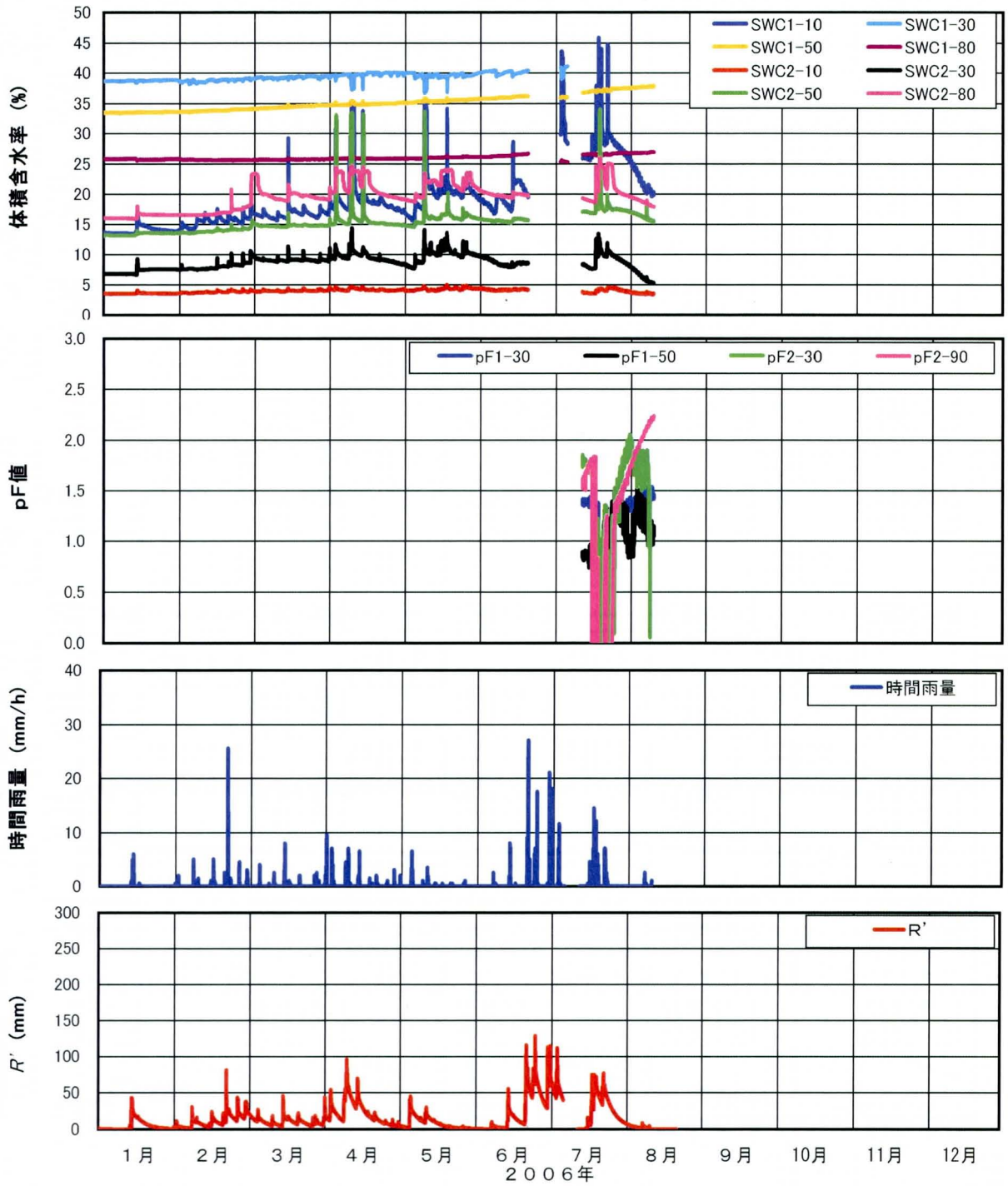


図-3.3(3) 2006年1月1日から2006年8月11日までの観測結果
 Fig. 3.3(3) Observation data from January 1st to August 11th, 2006

3.2.3 降雨量と体積含水率の関係

(1) 雨量の少ない時期（平常時）の降雨と体積含水率

平常時における体積含水率の変化と降雨の関係を確認するために、降雨に伴う変動が確認された土壌水分計 SWC1-10, SWC2-10, SWC2-30, SWC2-50, SWC2-80 の観測値と 1 時間雨量, 半減期 1.5~120 時間の実効雨量, 半減期 12~120 時間と 1.5~6.0 時間の実効雨量の組み合わせによる雨量指標 R' の関係について検討した。ここでは、期間内に最大時間雨量 10~15mm 程度の小~中降雨が数回降っており（半減期を 72 時間と 1.5 時間としたときの最大 R' 値は 89mm）、なおかつ 5 基の土壌水分計のデータが途切れることなく取得できている 2004 年 4 月 1 日~4 月 30 日の 1 ヶ月間を検討対象とした（図-3.4）。

表-3.2 に各雨量指標と体積含水率の相関係数をまとめた。表の値は、図-3.5 に示すように雨量指標値を横軸に、体積含水率を縦軸にとり直線で近似したものである。表では、計器ごとに相関係数が最大となるものを強調文字で示し、相関係数が 0.8 未満のものについてはハッチングしている。

なお、付近の崩壊深さは 1m 弱のものが多いことから、設置時に確認された地層状況や土中水分の変動傾向の特徴を考慮して、以下においては、概ね地表~GL-30cm 付近の区間を「表層」、GL-30~60cm 程度の区間を「中間層」、GL-60cm 以深の区間を「基底層」と呼ぶこととする。

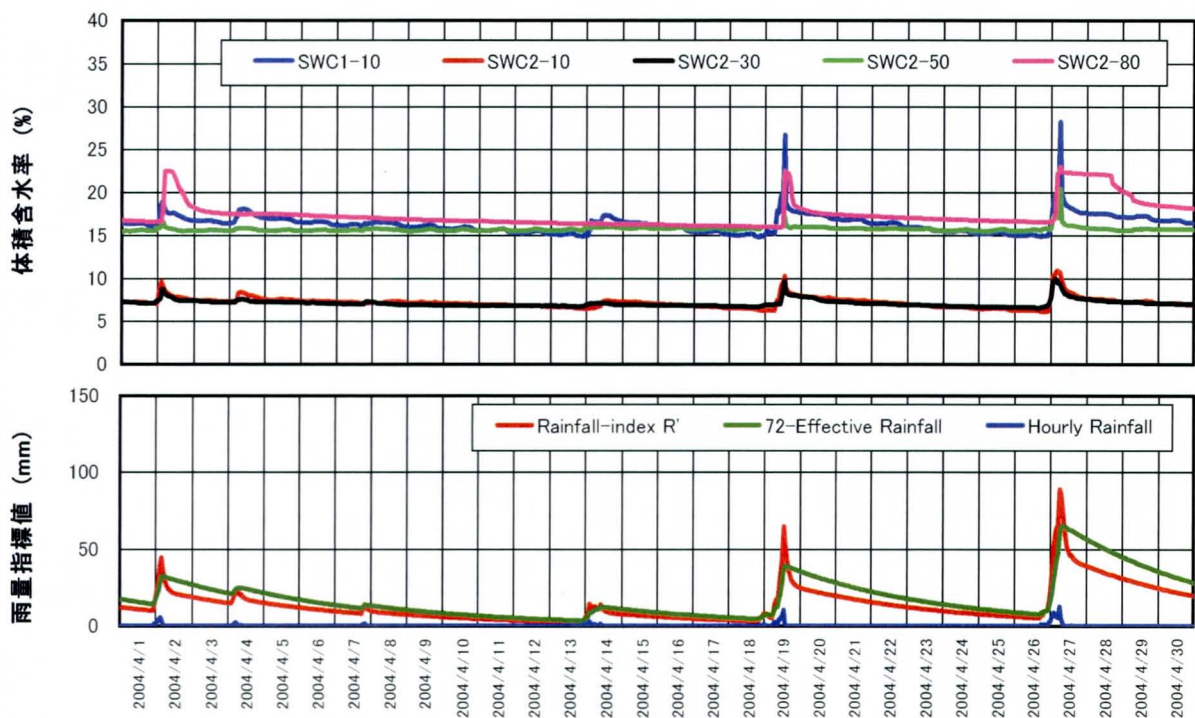


図-3.4 検討対象期間の降雨状況と体積含水率（2004年4月1日~4月30日）

Fig. 3.4 Rainfall situation and volumetric soil-water content (Apr. 1st to 30th, 2004)

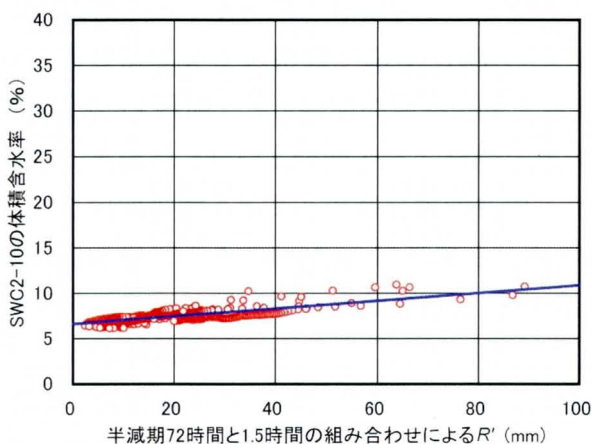


図-3.5 雨量指標 R' と体積含水率(SWC2-10)の関係

Fig. 3.5 Relationship between R' and volumetric soil-water content in SWC2-10

表-3.2 各雨量指標と体積含水率の相関係数

Table 3.2 Correlation coefficients between each rainfall index and volumetric soil-water content

雨量指標	半減期(時間)	SWC1-10	SWC2-10	SWC2-30	SWC2-50	SWC2-80	
1 時間雨量	—	0.607	0.598	0.625	0.763	0.142	
実効雨量	1.5	0.647	0.687	0.728	0.766	0.313	
	3.0	0.672	0.718	0.769	0.749	0.442	
	6.0	0.700	0.737	0.803	0.706	0.592	
	12	0.733	0.744	0.819	0.631	0.745	
	24	0.761	0.731	0.801	0.528	0.858	
	48	0.750	0.684	0.740	0.407	0.897	
	72	0.728	0.650	0.698	0.337	0.897	
	96	0.711	0.629	0.670	0.294	0.892	
	120	0.699	0.614	0.651	0.265	0.887	
雨量指標 R'	12	1.5	0.758	0.786	0.849	0.764	0.587
		3.0	0.732	0.765	0.829	0.734	0.595
		6.0	0.719	0.749	0.818	0.689	0.650
	24	1.5	0.823	0.822	0.888	0.722	0.728
		3.0	0.791	0.802	0.868	0.710	0.711
		6.0	0.760	0.772	0.843	0.668	0.731
	48	1.5	0.852	0.819	0.879	0.640	0.819
		3.0	0.831	0.814	0.877	0.655	0.800
		6.0	0.797	0.788	0.856	0.631	0.803
	72	1.5	0.847	0.801	0.856	0.581	0.846
		3.0	0.837	0.808	0.867	0.612	0.832
		6.0	0.807	0.789	0.854	0.602	0.834
	96	1.5	0.840	0.788	0.838	0.542	0.856
		3.0	0.836	0.802	0.857	0.582	0.846
		6.0	0.811	0.788	0.850	0.581	0.849
	120	1.5	0.833	0.779	0.825	0.516	0.860
		3.0	0.834	0.797	0.849	0.562	0.853
		6.0	0.812	0.787	0.846	0.566	0.857

※相関係数が最大となるものを強調文字で示し、相関係数が0.8未満のものはハッチングした。

GL-10~30cm の表層部に設置された SWC1-10, SWC2-10, SWC2-30 については 1 時間雨量や単独の実効雨量よりも雨量指標 R' との相関が高く, SWC1-10 では 48 時間と 1.5 時間, SWC2-10, SWC2-30 では半減期 24 時間と 1.5 時間の実効雨量を組み合わせたときに最大の相関係数を得ている。また, 半減期 24~72 時間と 1.5 時間の実効雨量を組み合わせた R' では, これらの全てにおいて相関係数 0.8 以上の高い相関を得ている。

付近の崩壊規模では基底層に相当する GL-80cm に設置された SWC2-80 では, 短時間の降雨強度に相当する 1 時間降雨や半減期の短い実効雨量との相関はほとんどなく, 半減期 48~72 時間の実効雨量と良好な相関が見られた。

一方, GL-50cm の中間層に設置された SWC2-50 では, 検討対象のどの雨量指標とも平常時の降雨と体積含水率の相関はあまりよくない。このことは, この深度の土中水分量は平常時の降雨ではあまり変動しないことを示している。

(2) 雨量の多い時期の降雨と体積含水率

図-3.3 および図-3.4 においても, SWC2-50 は単発の降雨に対してはあまり反応していないが, まとまった量の一連の降雨の際には, 強度の大きな雨があると一気に体積含水率が上昇している。このことは, 中間層の土中水分量を上昇させるには, 単発の降雨のみではなく, 先行してある程度以上の雨が降っていることが必要条件であることを意味している。

これを確認するために, 先行降雨と短時間強雨の両方を評価できるよう半減期 72 時間と 1.5 時間の実効雨量を組み合わせた R' を用いて, 比較的大きな降雨があった 2004 年 6 月 1 日~6 月 30 日の 1 ヶ月間を対象に, R' 値と SWC2-50 の体積含水率の関係を図-3.6 に示す。また, 期間内の半減期 72 時間と 1.5 時間の実効雨量の組み合わせによるスネークライン上に体積含水率が上昇した時の降雨状況をプロットしたものを図-3.7 に示す。

なお, SWC2-50 の体積含水率は, 観測期間内を通しての最大値が 35% 弱であることや, 降雨継続中に 34% 程度に達するとこれより上昇せず一定値を示すことから, SWC2-50 の体積含水率が 34~35% に達した時には, 付近は概ね飽和状態に至っているものと考えられる。

図-3.6 から, R' 値が 50mm を下回る降雨では体積含水率は 16~17% の値でありあまり変化していないことがわかる。 $R'=50\sim70\text{mm}$ の間では, 対象期間内に 1 度だけ体積含水率が 34% 程度に上昇している。 R' が 70 以上になると体積含水率は急に上昇をはじめ, R' が 90mm を超えるほとんどの場合で体積含水率が大きく上昇している。ここで図-3.7 をみると, $R'=50\sim70\text{mm}$ の間における体積含水率の上昇は一時的で, 短時間で低下していることがわかる。一方で R' が 90mm を超えた場合には比較的長時間にわたって体積含水率が高い状態が続いている。

SWC2-50 が設置された中間層においては, R' 値が 50mm を下回るような比較的弱い降雨や単発の降雨では, その土中水分量が大きく変化することが無く, 平常時の降雨とは相関が低いものである。しかし, 先行降雨と雨量強度の両方の影響が重なった場合は, 土中水分量が急激に上昇することがわかった。

この傾向は, 半減期 72 時間と 1.5 時間の実効雨量を組み合わせた R' を用いることによって, 良好に表現することができることが確認された。

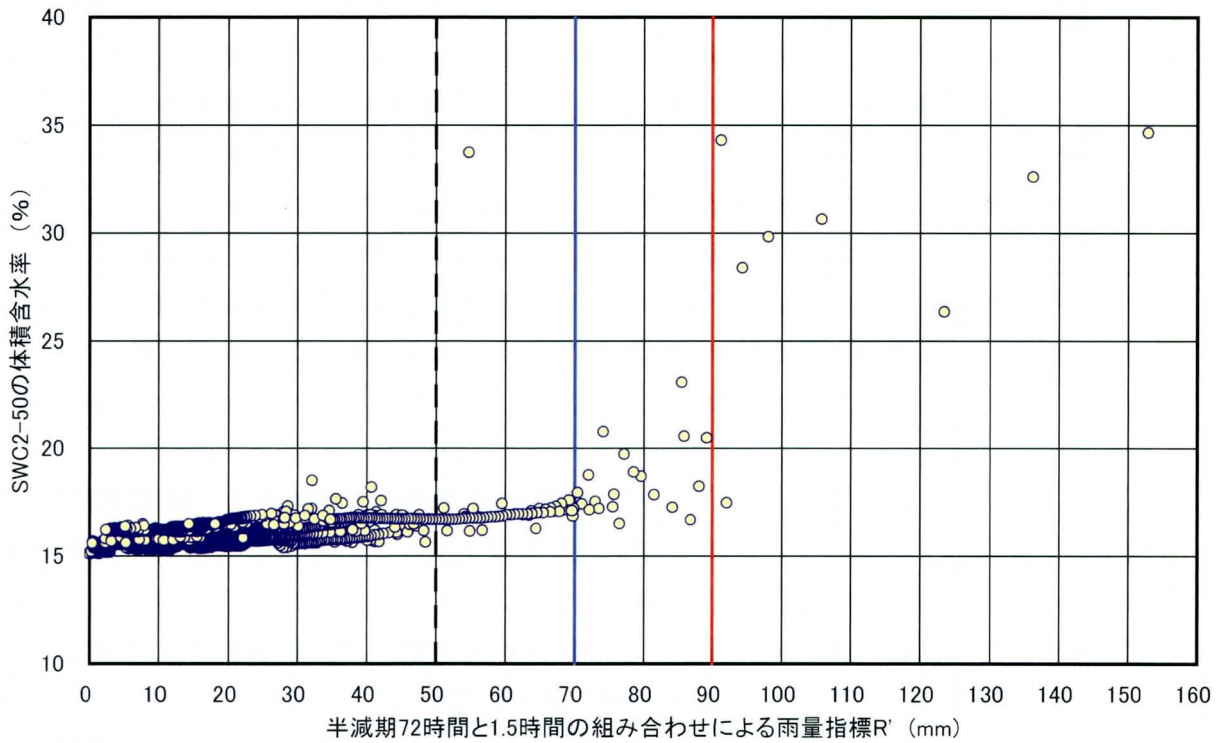


図-3.6 R' 値と SWC2-50 の体積含水率の関係 (2004 年 6 月 1 日～6 月 30 日)
 Fig. 3.6 Relationship between R' and volumetric soil-water content of SWC2-50 (June 1st to 30th, 2004)

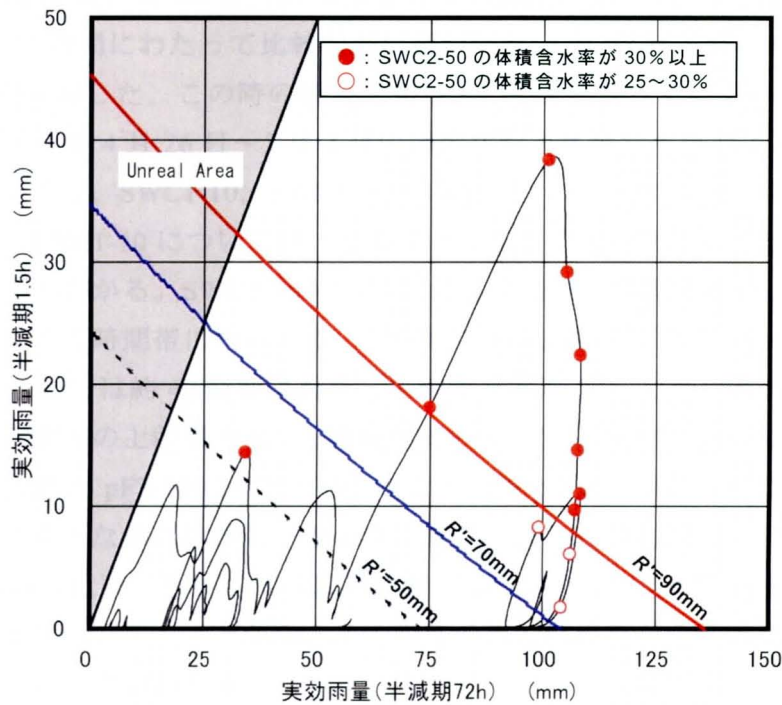


図-3.7 2004 年 6 月 1 日～6 月 30 日のスネークライン
 における体積含水率の上昇時の降雨状況
 Fig. 3.7 Rainfall situations in a manner of effective rainfalls during a rise
 in a volumetric soil-water content (June 1st to 30th, 2004)

以上のことから、次のことが明らかになった。

- a) まさ土斜面の表層 10～30cm 付近では、比較的小規模な降雨であっても体積含水率が上昇し、その変動傾向は半減期 24～72 時間と 1.5 時間の実効雨量を組み合わせた雨量指標 R' と高い相関にある。
- b) 周辺崩壊の基底層に相当する GL-80cm 付近の体積含水率は短時間の降雨強度とは相関が低く、半減期 48～72 時間の実効雨量と良好な相関が見られた。
- c) 中間層の GL-50cm 付近の体積含水率は、先行降雨と雨量強度の両方の影響が重なったときに急激に上昇することがわかった。この傾向は半減期 72 時間と 1.5 時間の実効雨量を組み合わせた R' を用いることによって、良好に表現することができる。

3.2.4 降雨事例ごとの雨量と土中水分の関係

観測期間中には、東広島市周辺に土砂災害は発生しておらず、原因となるような豪雨も記録されていない。したがって、ここでは中規模降雨として、2004 年 4 月 26 日～27 日にかけての降雨（検討降雨-1）、2004 年 6 月 24 日～28 日にかけての降雨（検討降雨-2）、2004 年 7 月 31 日～8 月 3 日にかけての降雨（検討降雨-3）、2005 年 7 月 9 日～13 日にかけての降雨（検討降雨-4）、2006 年 4 月 10 日～4 月 16 日にかけての降雨（検討降雨-5）を対象に、降雨状況と体積含水率および pF 値の変化について検討する。なお、検討降雨-3～5 においては、測定機器の不具合により一部のデータが欠落している。

【検討降雨-1】2004 年 4 月 26 日～27 日にかけての降雨 [図-3.8(1)]

この期間には 21 時間にわたって比較的弱い雨が降り、4 月 27 日 5 時～6 時の間に最大時間雨量 10.5mm を記録した。この時の最大 R' 値は 89.1mm となっている。

図-3.8(1)に、2004 年 4 月 26 日～5 月 2 日の降雨状況と体積含水率および pF 値の関係を示す。この図を見ると、SWC1-10、SWC2-10、SWC2-30 の体積含水率は R' 値とよく似た変動傾向を示すが、SWC1-10 については、この傾向に加えて短時間降雨のピーク時に急激に上昇していることがわかる。SWC2-50 については、降雨がある程度継続した後に、 R' の値が概ね 70mm を超えた時間帯に対応して、一時的に体積含水率が 20% 程度まで上昇している。SWC2-80 については約 40 時間にわたって体積含水率 22～23% の高い状態（SWC2-80 については観測期間内の上限相当値）を継続している。この期間内は SWC2-80 の近接地の GL-90cm に設置された pF2-90 においても、0 を下回る pF 値が観測されており、付近が非常に含水の高い状態となっていたことを示す。また、pF1-30 および pF1-50 についても、10 時間前後の間 0 に近い、もしくは 0 以下の値を示している。しかし、pF2-30 では pF 値の低下は比較的小さい。このことから、この程度の雨では地盤が全体的に高含水状態になるには至っていないことがわかる。

なお、No.2 地点の深層部に位置する SWC2-80 および pF2-90 において高含水状態を示している期間は、概ね半減期 72 時間の実効雨量が 50mm 以上となる期間と一致している。また、pF1-30 と pF1-50 が高含水状態を示している期間は概ね R' が 50～70mm 以上となる期間と一致している。

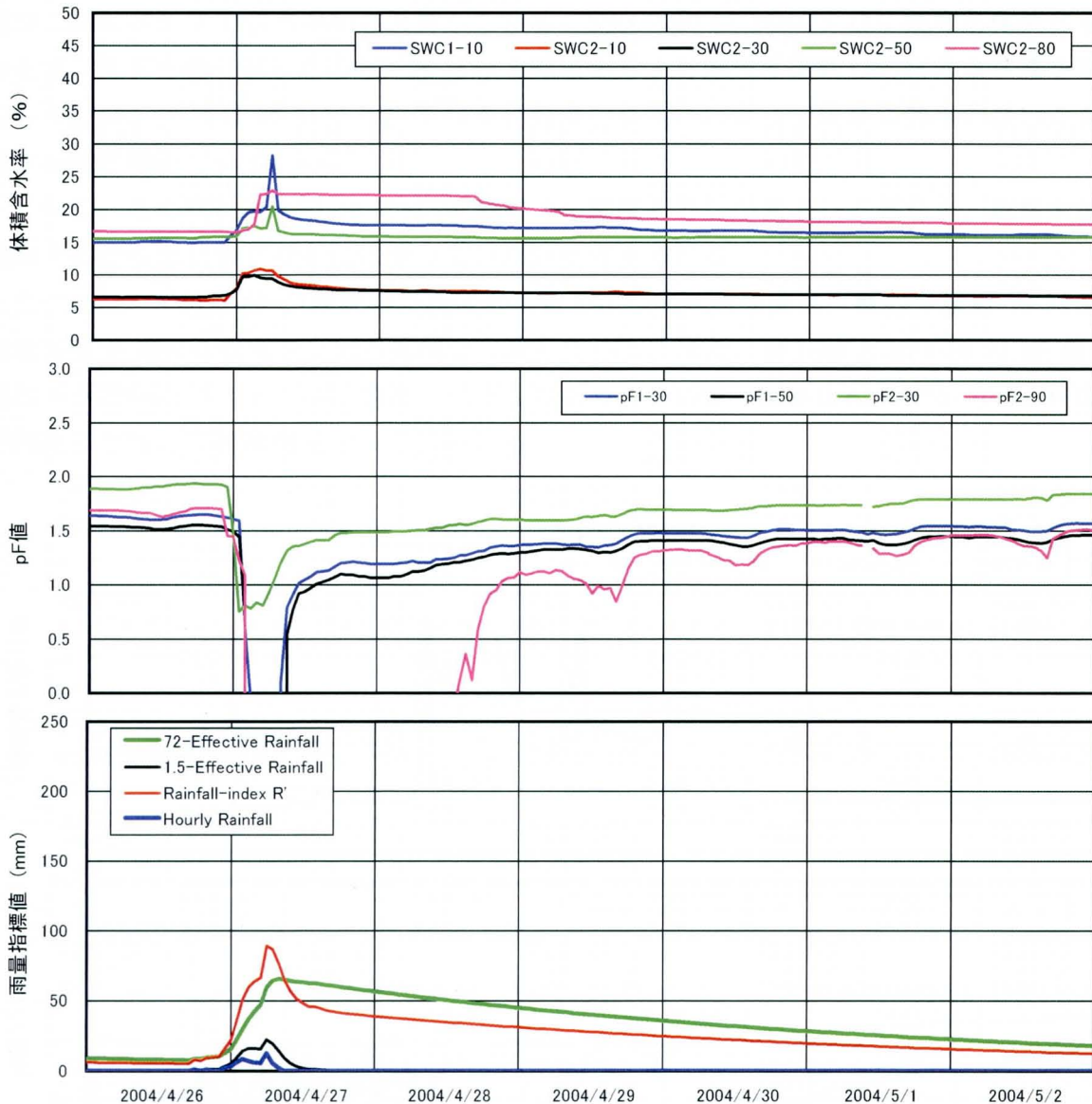


図-3.8(1) 2004年4月26日～5月2日の降雨状況と体積含水率，pF値
 Fig 3.8(1) Relationship among rainfall situation, volumetric soil-water content and pF-value
 (April 26th to May 2nd, 2004)

【検討降雨-2】 2004年6月24日～28日にかけての降雨 [図-3.8(2)]

この期間には4日間にわたって継続的にやや強い雨が降り、6月26日7時～8時の間に最大時間雨量27.0mmを記録した。この時の最大R'値は152.9mmとなっている。

図-3.8(2)に、2004年6月24日～30日の降雨状況と体積含水率およびpF値の関係を示す。

この時もSWC1-10，SWC2-30の体積含水率はR'値とよく似た変動傾向を示すが、SWC2-10についてはあまり大きく変化していない。SWC2-50の体積含水率は6月25日0時のR'=55mm程度の時点で上昇したが、これは一時的なもので、その後の降雨ではR'値が概ね70mmを超えた時間帯に対応して上昇している。

SWC1-10については最も雨の強かった26日の8時頃から15時間程度の間、体積含水率35%程度の高い状態を継続し、その後27日に降った時間雨量5～6.5mmの降雨においても

再びこのレベルまで含水率が急上昇している。SWC2-80 は 24~25 日に幾度か体積含水率の上昇、低下を繰り返したのち、26 日の 8 時頃から 3 日間程度継続して高含水状態を示している。pF2-90 では 25 日の 0 時から 4 日程度の長期にわたって非常に含水の高いことを示す状態が続いている。

しかし、この時にも pF2-30 では pF 値は 0.6 程度までしか低下しておらず、地盤全体が飽和するような状態になるには至っていないと考えられる。

ここでは、SWC2-80 が継続的に高含水状態を示している期間は、概ね半減期 72 時間の実効雨量が 70mm 程度を上回る期間と一致している。また、pF1-30 と pF1-50 の pF 値は、概ね R が 50mm 以上となると急激に低下しており、その後、雨が止んで R が 70mm 程度まで回復した時に上昇傾向を示している。

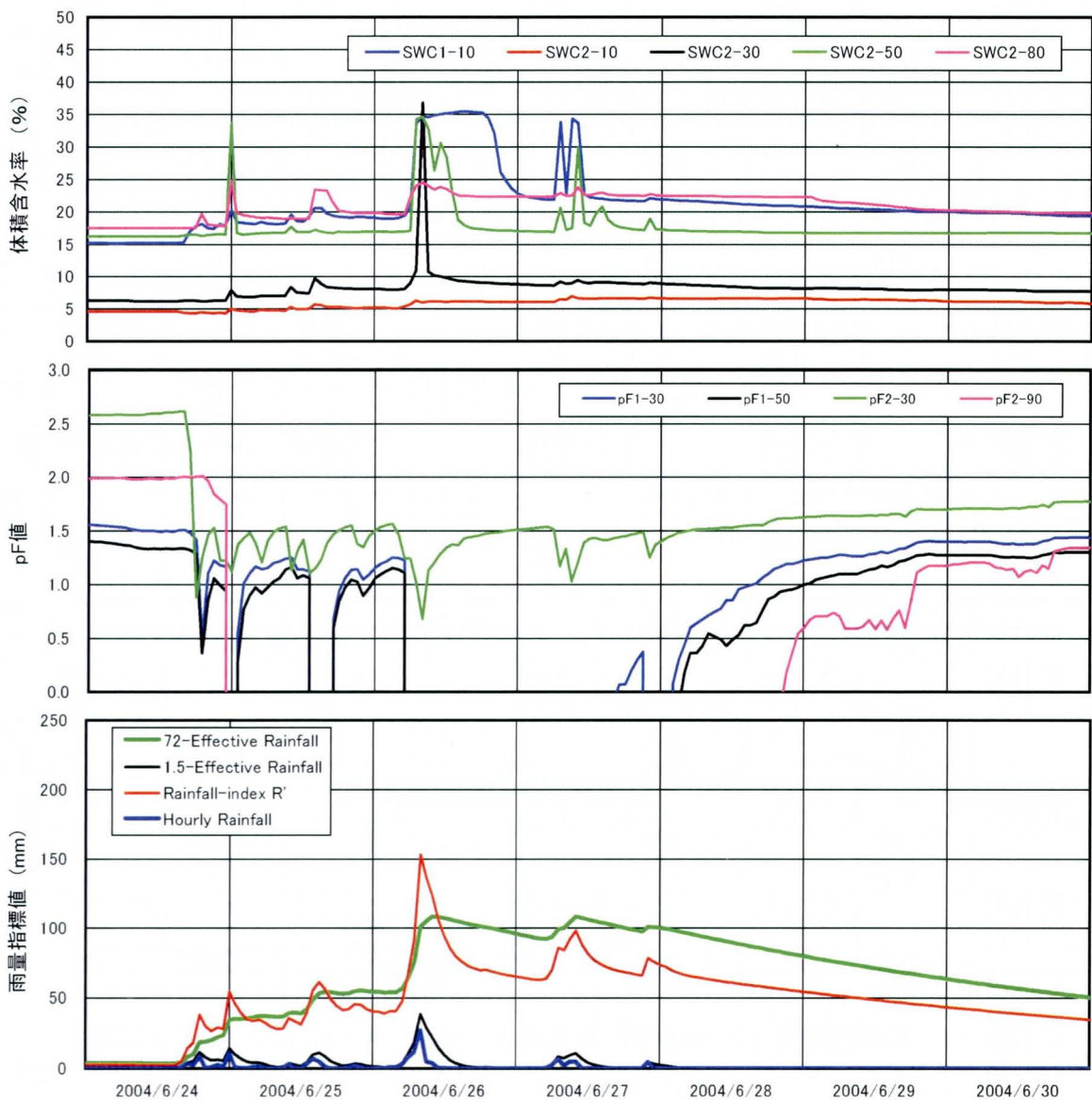


図-3.8(2) 2004年6月24日~6月30日の降雨状況と体積含水率、pF値
 Fig 3.8(2) Relationship among rainfall situation, volumetric soil-water content and pF-value
 (June 24th to 30th, 2004)

【検討降雨-3】 2004年7月31日～8月3日にかけての降雨 [図-3.8(3)]

この期間には約2日間にわたって比較的強い降雨があり、7月31日の7時から8月2日の19時の間に連続雨量275.5mmの雨が降った。降雨のピークは3回に分けて訪れ、このうち2回目のピークである8月2日0時～1時の間に最大時間雨量31.5mmを記録した。この時の最大 R' 値は229.2mmとなっている。

図-3.8(3)に、2004年7月30日～8月5日の降雨状況と体積含水率および pF 値の関係を示す。なお、この時には土壤水分計の SWC2-10, SWC2-30, SWC2-80 およびテンシオメータの $pF2-30$ が欠測となっている。

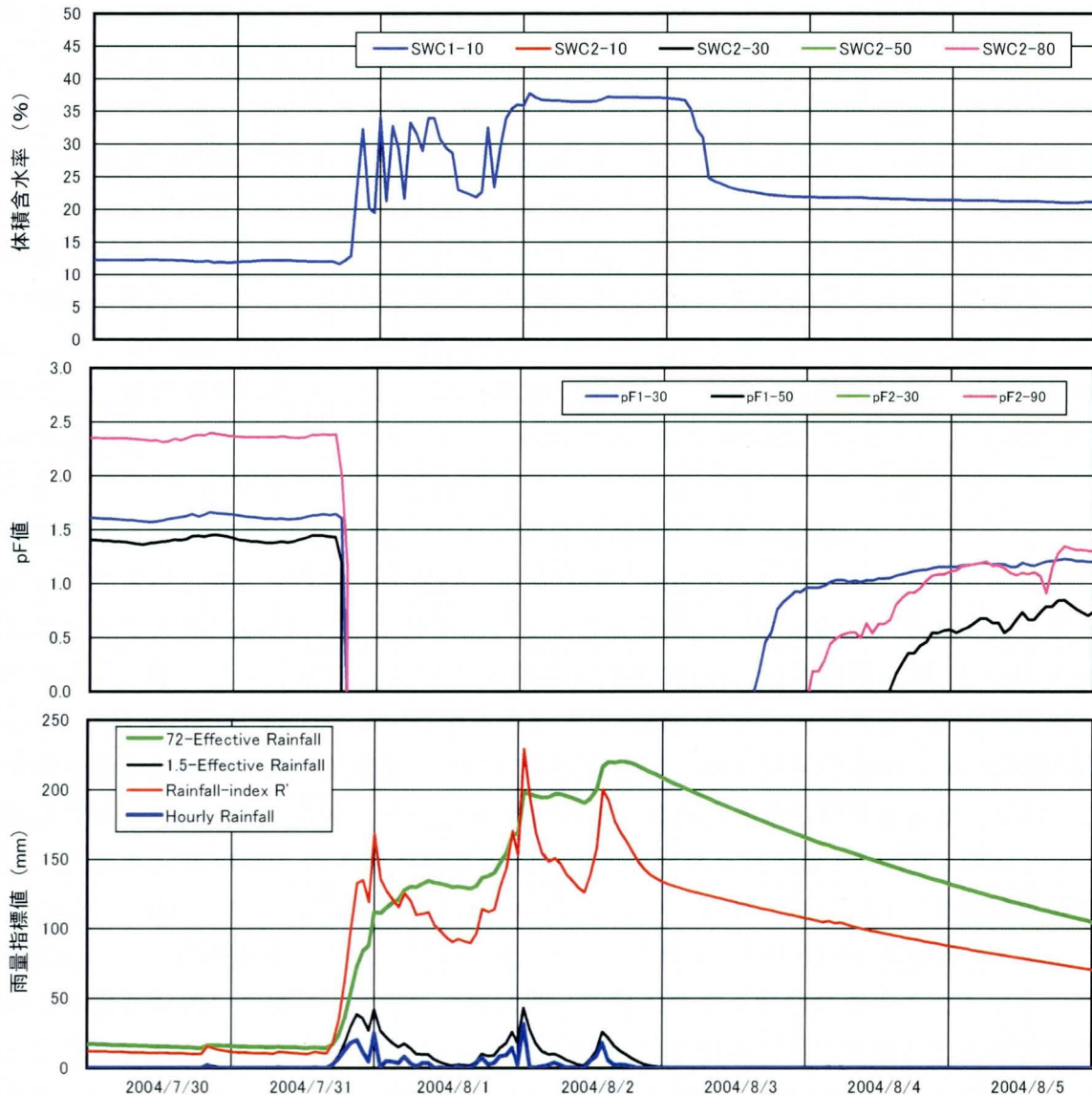


図-3.8(3) 2004年7月30日～8月5日の降雨状況と体積含水率, pF 値

Fig 3.8(3) Relationship among rainfall situation, volumetric soil-water content and pF -value (July 30th to August 5th, 2004)

土壤水分計 SWC1-10 の体積含水率は、 R' 値とよく似た変動傾向を示し、最初の降雨ピーク時には R' 値の上昇に伴って 32～33% まで上昇し、 $R'=120\text{mm}$ 程度の値を境に増減を繰り返す。

返す。2回目の降雨ピークでは、体積含水率は35%以上まで上昇する。2回目の降雨ピーク以降 R' 値は125.9mmまで低下するが、この時には体積含水率は低下せず、3回目の降雨ピークが過ぎ、 R' の値が120mm程度に低下するとようやくこれに伴って下降している。

テンシオメーター pF1-30, pF1-50, pF2-90 では、最初の降雨ピーク時に pF 値が0以下に低下し、以降 pF1-30 では3日間程度、pF2-90 では3.5日程度、pF1-50 では4日間程度にわたって極めて含水の高いことを示す状態が続いている。なお、検討降雨-1 および2のケースでは、pF1-30, pF1-50 は非常に似通った変動傾向を示していたが、検討事例-3のこのケースでは、pF 値が0以上に回復するのに、約1日の差が開いている。設置している計器の特性により、pF 値0を下回る値についてはその数値を計測することはできないが、当降雨では pF 値が測定不能になった後もさらに体積含水率を上昇させ、飽和に近い状態にまで達していた可能性もある。

なお、検討降雨-1 および2において pF1-30, pF1-50 では $R'=50\sim70\text{mm}$ 程度、pF2-90 では半減期72時間の実効雨量70mm程度を pF 値が低下する目安としてきた。この事例においても、土中水分の上昇過程においては、概ねこれらの値を目安にできそうであるが、土中水分が低下し始める時期については、pF1-30, pF1-50 ではそれぞれ $R'=115\text{mm}$ 程度、 $R'=95\text{mm}$ 、pF2-90 では半減期72時間の実効雨量160mm程度とやや高めの値となっている。しかしながら、SWC1-10の体積含水率、pF1-30, pF1-50, pF2-90の pF 値のすべてにおいて、一旦含水率が低下（あるいは pF 値が上昇）した後、長期にわたって降り始めに比べて高い含水状態が続いており、降雨の影響は相当期間継続しているものと考えられる。

【検討降雨-4】2005年7月9日～13日にかけての降雨 [図-3.8(4)]

このケースは、既に先行降雨を受けている状態で雨が降ったときの土中水分の変化に着目したものである。この時には7月1日から8日までの間に総雨量223.0mmのまとまった降雨があり、加えて7月9日から11日の間に総雨量78mm、最大時間雨量14.5mmの雨が降った。7月9日から11日までの降雨は単独では規模の小さな雨であるが、先行降雨の影響で降り始めの時点で既に半減期72時間の実効雨量53.8mm、 $R'=37.2\text{mm}$ の状態であった。

図-3.8(4)に、2005年7月9日～15日の降雨状況と体積含水率の関係を示す。なお、この時は、土壌水分計 SWC1-10 および全てのテンシオメーターが欠測となっている。

この時は、SWC2-10 はあまり大きな変動を示していないが、SWC2-30 の変化は雨量指標 R' の変化とよく似た変動傾向を示している。なお、これまで SWC2-50 の体積含水率は、降雨がある程度継続した後に、 R' 値の上昇に伴って急上昇する傾向があることを示してきたが、ここでも10日16時～17時と11日3時～4時に、 R' 値の上昇に対応して体積含水率も大きく上昇している。この時の時間雨量はそれぞれ14.5mm、10.5mmと大きなものではないが、このケースでは先行降雨量が大きかったため、それぞれの時間帯には、既に体積含水率が上昇する寸前の状態に達していたものと考えられる。

この事例でも SWC2-50 の体積含水率が上昇した時の R' は概ね70mm以上に対応している。視点を変えると、半減期72時間の実効雨量が70mm以上に達していれば、10～15mm/h程度の強度の雨であっても中間層の体積含水率が上昇するといえる。

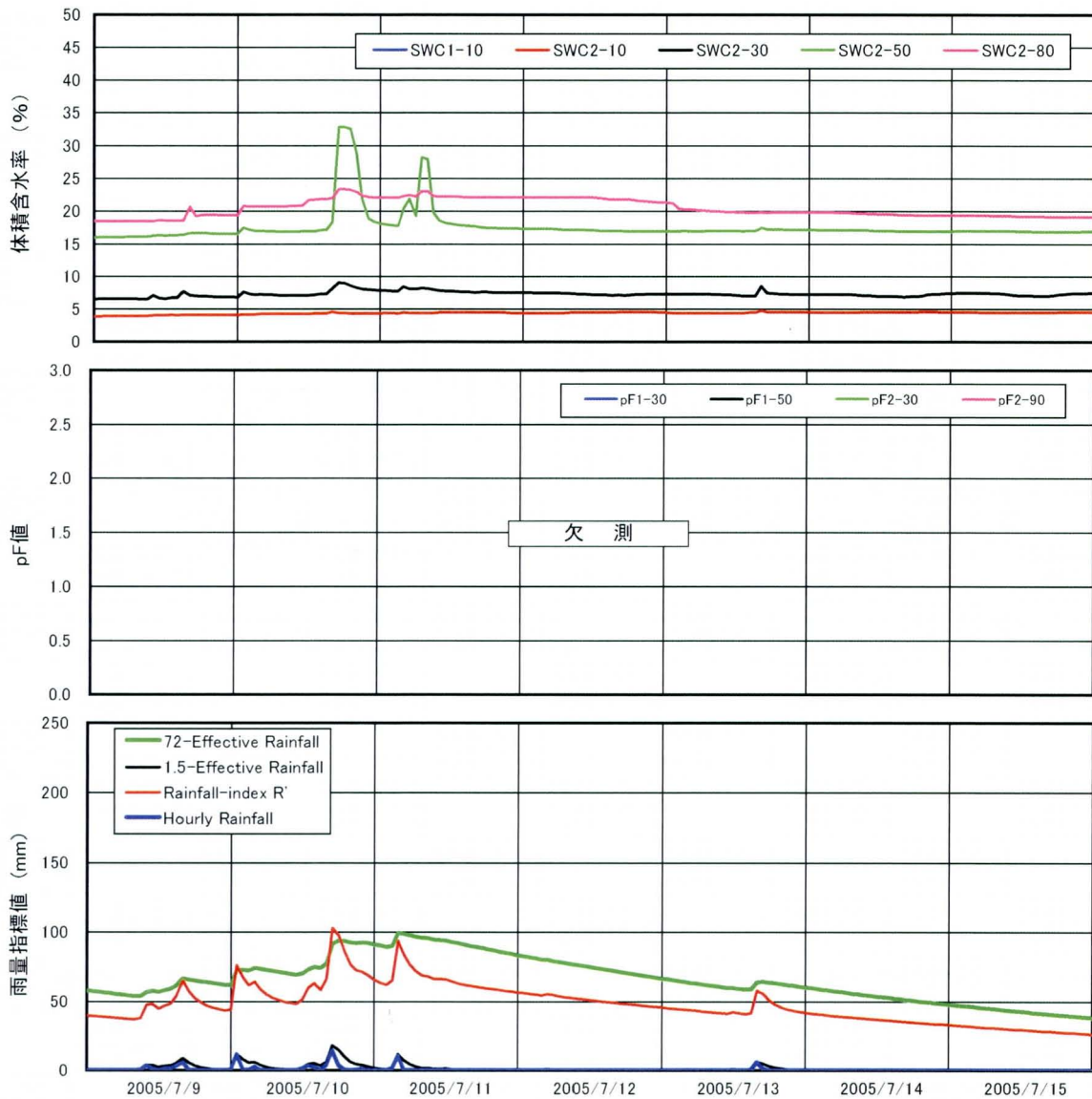


図-3.8(4) 2005年7月9日～7月15日の降雨状況と体積含水率
 Fig 3.8(4) Relationship between rainfall situation and volumetric soil-water content
 (July 9th to 15th, 2005)

【検討降雨-5】 2006年4月10日～4月16日にかけての降雨 [図-3.8(5)]

この期間の前半4月10日～11日にかけて最大時間雨量7mmの比較的弱い雨が断片的に降り総雨量95.5mmに達した。また、期間後半の4月16日～17日未明に33.5mm、最大時間雨量6.5mmの降雨があった。この時の最大R'値は95.4mmとなっている。

図-3.8(5)に、2006年4月10日～16日の降雨状況と体積含水率を示す。なお、この時は全てのテンシオメーターが欠測となっている。

この時は、SWC2-10はあまり大きな変動を示していないが、SWC1-10とSWC2-30の変化は雨量指標R'の変化とよく似た変動傾向を示している。なお、SWC1-10は概ねR'=70mm程度になると体積含水率が35%程度まで大きく上昇しており、前半の降雨ではR'が50mm

程度を下回るまで高含水状態を継続している。また、ここでも SWC2-50 の体積含水率は、降雨がある程度継続した後に、他の計器での上昇に少し遅れて上昇している。この時の R' は概ね 50~60mm 以上に対応している。

なお、この時にも SWC2-80 が 22~24% 程度の高含水状態を示している期間は、概ね半減期 72 時間の実効雨量が 50mm 以上となる期間と一致している。

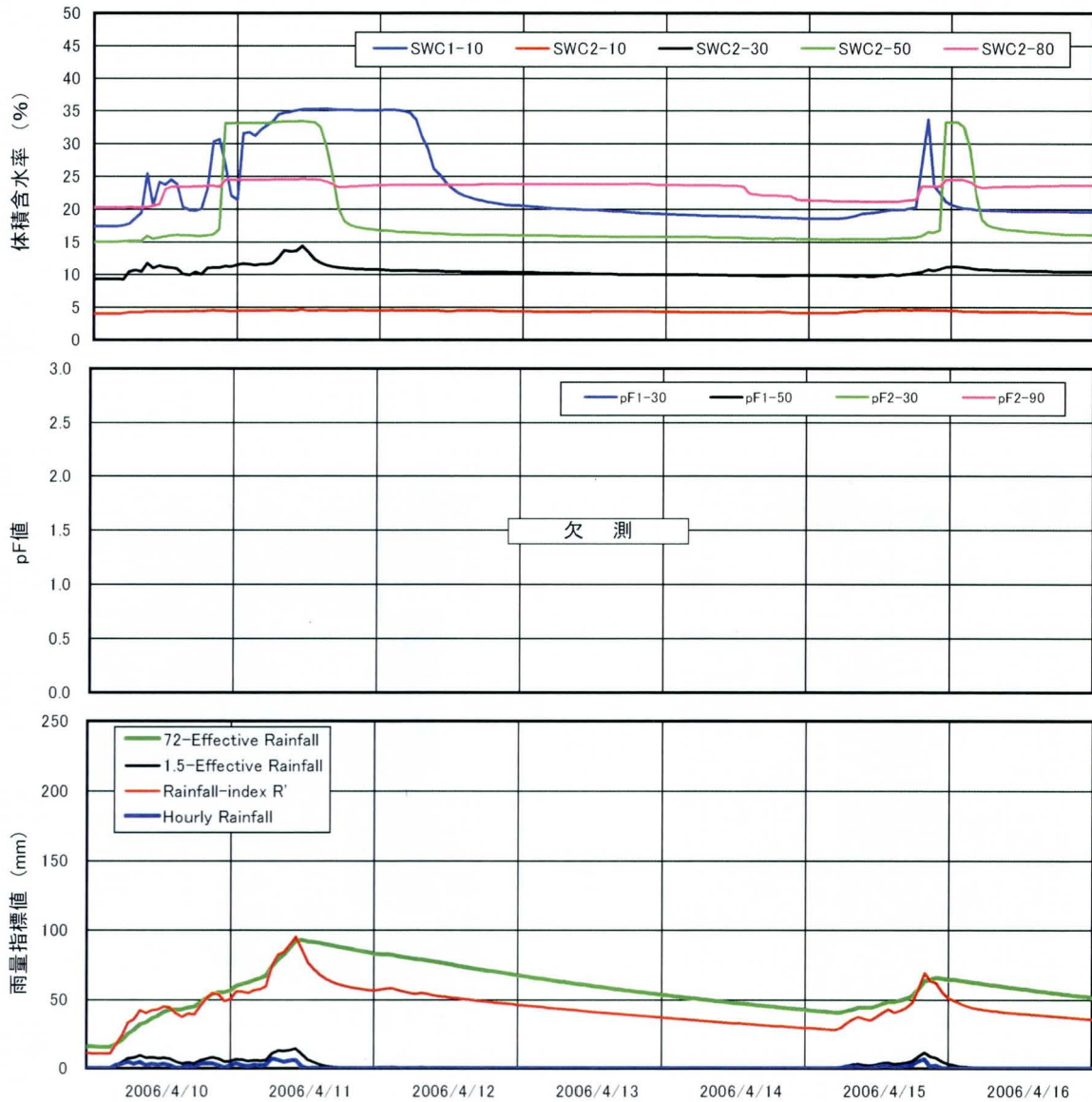


図-3.8(5) 2006年4月10日~4月16日の降雨状況と体積含水率
 Fig 3.8(5) Relationship between rainfall situation and volumetric soil-water content
 (April 10th to 16th, 2006)

3.3 人工降雨実験による降雨と土中水分の関係

降雨パターンの違いと土中水分の関係を把握するために、人工降雨実験を実施した。人工降雨実験は、降雨装置の下に設置した深さ約 70cm の人工地盤に異なる降雨パターンの人工降雨を与え、降雨前と降雨後の含水比およびその鉛直方向の分布の違いを調べるものである。

3.3.1 人工降雨実験の方法

(1) 装置の概要

実験で用いた人工降雨装置および土槽は写真-3.4, 3.5 に示すものである。人工降雨装置は高さ 250cm, 幅 120cm, 奥行き 120cm で、貯水タンクから揚水ポンプで水を引き上げ、ノズルから土槽へと雨を供給するものである。ノズルは縦横 8 列の計 64 個が格子状に 10cm 間隔で並んでおり、ノズル先端部は外径 1.1mm, 内径 0.9mm の注射針でできており、揚水ポンプのバルブで降雨量を調整する。また降雨があるエリアのみに集中しないよう、ノズルを振動させ降水を分散させるための振動モーターが付いている。土槽は縦 60cm×横 60cm で、深さ 100cm まで土を入れることができる。土槽下部に設けた排水用マットによって土槽下部からの排水が行われる構造である。

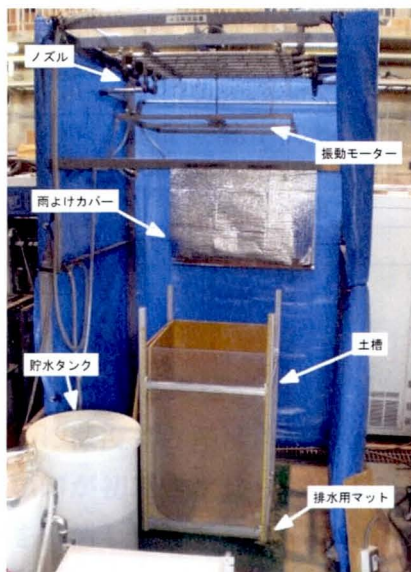


写真-3.4 人工降雨装置と土槽

Photo 3.4 Apparatus of an artificial rain test

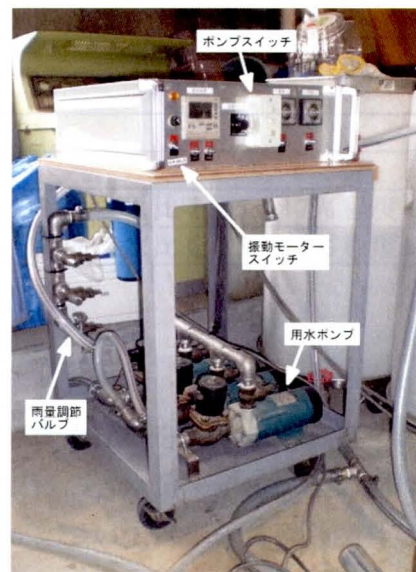


写真-3.5 人工降雨装置操作盤

Photo 3.5 Control unit of the artificial rain

(2) 実験に用いた試料

人工降雨実験には、東広島市の鏡山公園付近で採取したまさ土の攪乱試料を用いた。採取位置付近では 1993 年に土石流災害が発生しており、これと近似した土質状況である当地区で採取した試料は、今回の実験趣旨には適切なものである。採取した試料は自然乾燥させ、草木の根や葉、土槽の大きさに対して大きすぎる礫を取り除いた。

(3) 実験の方法

人工降雨実験は、以下の条件で行った。なお、本実験では鉛直 1 次元の浸透を考え、側方への浸透については考慮していない。

- a) 降雨パターンを 10mm/h×8h, 10mm/h×10h, 40mm/h×2h, 80mm/h×1h, 10mm/h×4h + 40mm×1h, 30mm/h×3h に設定する (表-3.3)。
- b) 人工降雨装置の振動モーターは 100 (最大) に設定する。
- c) 一般的なまさ土斜面での崩壊深を考慮して、土槽には初期地盤高が 70cm 程度になるよう試料を詰める。
- d) 降雨後、概ね深度 10cm ピッチでサンプリングを行い、含水比を測定する。
- e) 降雨量は、土槽に土を入れる直前に内径 78mm のビーカー 16 個を土槽内の任意の場所に置き、メスシリンダーを用いてビーカー内の雨量を計測することにより求める。

表-3.3 実験で用いた降雨パターン

Table 3.3 Rainfall patterns used in experiments

番号	降雨パターン	総雨量	備考
実験 1	80mm/h×1h	80mm	
実験 2	80mm/h×1h	80mm	
実験 3	40mm/h×2h	80mm	
実験 4	40mm/h×2h	80mm	
実験 5	10mm/h×10h	100mm	
実験 6	10mm/h×8h	80mm	
実験 7	10mm/h×4h + 40mm×1h	80mm	
実験 8	10mm/h×4h + 40mm×1h	80mm	
実験 9	30mm/h×3h	90mm	初期含水比を 15~17% 程度に設定
実験 10	40mm/h×2h	80mm	初期含水比を 15~17% 程度に設定

3.3.2 実験結果と考察

図-3.9 に深度ごとの降雨前の初期含水比と降雨後の含水比の分布を示す。図中の青および水色の印が初期含水比、赤およびピンクの印が降雨後の含水比を示す。この図は全実験データを一括して記載したものであるが、実験 9 と 10 についてはやや特殊な条件設定をしたため、ここにはプロットせず別途整理する。

初期含水比と降雨後の含水比の分布状況を比較すると、総雨量においては 80~100mm と同程度の降雨を与えているにも係らず、降雨パターンにより降雨後の含水比の分布状況が大きく異なることがわかる。図-3.9 を見ると、GL-30cm 以浅および 60cm 以深の領域では、降雨パターンに由らず 16~21% 程度まで含水比が上昇しているが、GL-30~60cm の範囲では、全般的に含水比の上昇傾向が小さい上に、降雨パターンにより 8~18% 程度と大きな開きがあることがわかる。

これらの傾向の違いより、ここでも、GL-30cm 以浅を「表層」、GL-30~60cm 程度の区間を「中間層」、GL-60cm 以深を「基底層」と呼ぶこととする。

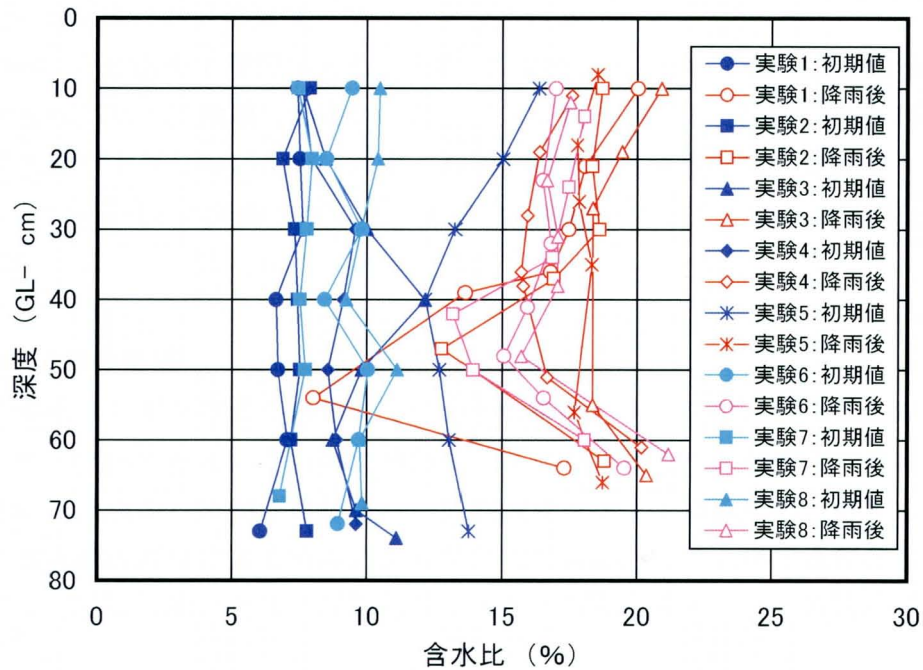


図-3.9 初期含水比と降雨後の含水比の関係（実験1～実験8の結果）
 Fig. 3.9 Relationship of water contents between before and after the artificial rain
 (Results of Experiments 1 to 8)

ここで、降雨パターンと含水比の変化の関係を見るために、図-3.10に降雨パターン別にプロットした。以下に深度に着目して、降雨パターンによる傾向の違いをまとめる。

(1) GL-30cm 以浅の領域

実斜面の地表に相当するこの領域では、全条件において降雨後の含水比は大きく上昇するが、上昇程度は深くなるにつれ減少していく傾向にある。10mm/h×10h や 10mm/h×8h のように長時間にわたって弱い降雨を与えた場合は深度方向の減少が小さく、40mm/h×2h や 80mm/h×1h のように短時間に強い降雨を与えたものは深さ方向の減少が大きい。

長時間にわたり弱い降雨を与えた実験結果は、地表から徐々に浸透していく過程を反映しているものと考えられる。逆に短時間に強雨を与えた場合は、表面に近いところでは大きく土中水分が増える（含水比が上昇する）が、降雨によるインプット量が下方への浸透能力（不飽和透水係数）を上回っており、浸透を妨げられている状態を反映しているものと考えられる。

(2) GL-30cm～60cm の領域

実斜面の中間層に相当するこの領域においては、含水比の上昇程度にばらつきが大きく、比較的大きく上昇しているものと、あまり上昇していないものがある。なお、この区間では GL-40～50cm 程度までは深くなるにつれ含水比が減少するが、それ以深では再び含水比が上昇する傾向が見られた。このことについては後述する。

10mm/h×10h や 10mm/h×8h のように長時間にわたって弱い降雨を与えた場合には、この領域においても含水比が上昇しており、10mm/h の弱い雨を10時間にわたって与えた「実

験 5」では、全深度においてほぼ一様に上昇している。

逆に 80mm/h の強雨を 1 時間与えた「実験 1, 実験 2」においては、この領域での含水比の上昇は表層部に比べて極端に小さい。とくに「実験 1」における GL-55cm 付近においてほとんど含水比が上昇していない。なお、40mm/h を 2 時間与えた「実験 3, 実験 4」や、10mm/h×4h+40mm×1h の降雨を与えた「実験 7, 実験 8」では、その中間的な含水比の分布を示している。

(3) GL-60cm 以深の領域

実斜面の基底層に相当するこの領域では全ての降雨パターンで、含水比が高い状態へ収束していく傾向がみられる。これは土槽側面のアクリル板やベニヤ板との境界部を伝って浸入した水が、底面から上向きに浸透している現象を捉えているものと考えられる。これは、この実験装置の特性によるものであるが、実現象においても地中水が基盤岩（あるいは難透水層など）の上面にたまり、同様の現象が起こりうるものと考えられる。

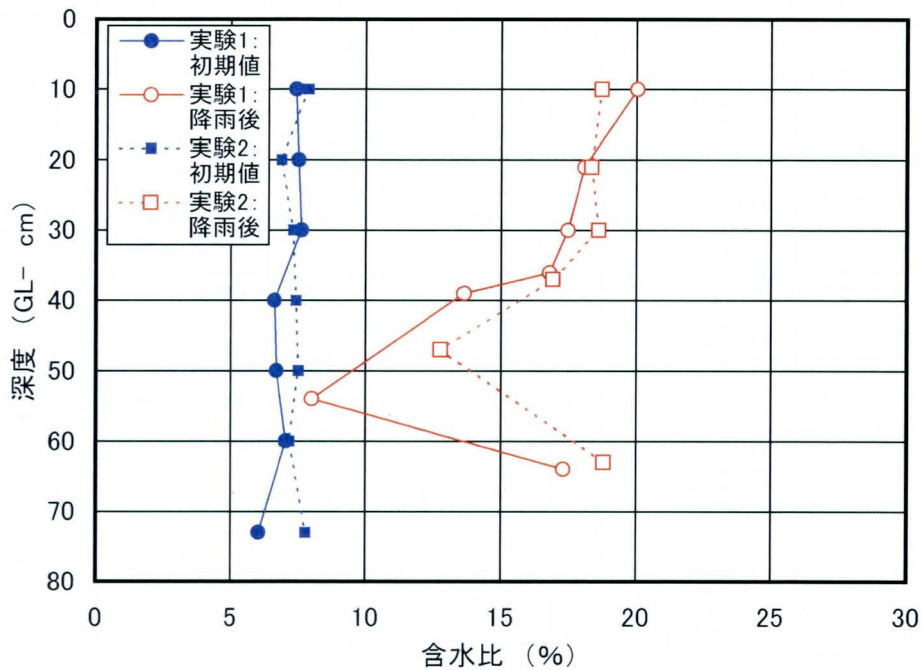


図-3.10(1) 初期含水比と降雨後の含水比の関係
(実験 1, 2; 降雨条件 80mm/h×1h)

Fig. 3.10(1) Relationship of water contents between before and after the artificial rain
(Results of Experiments 1 and 2)

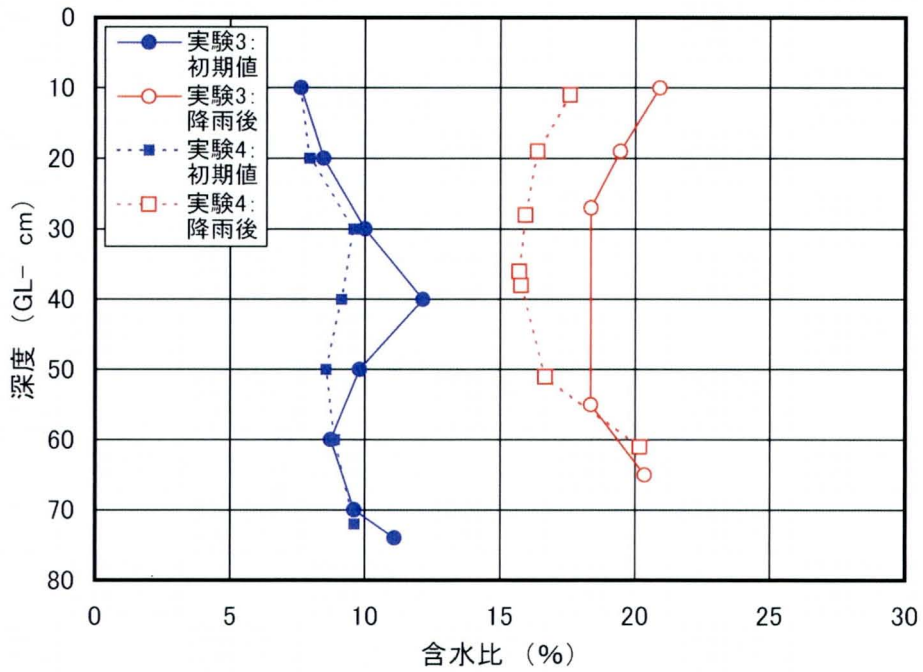


図-3.10(2) 初期含水比と降雨後の含水比の関係
(実験 3, 4 ; 降雨条件 40mm/h×2h)

Fig. 3.10(2) Relationship of water contents between before and after the artificial rain
(Results of Experiments 3 and 4)

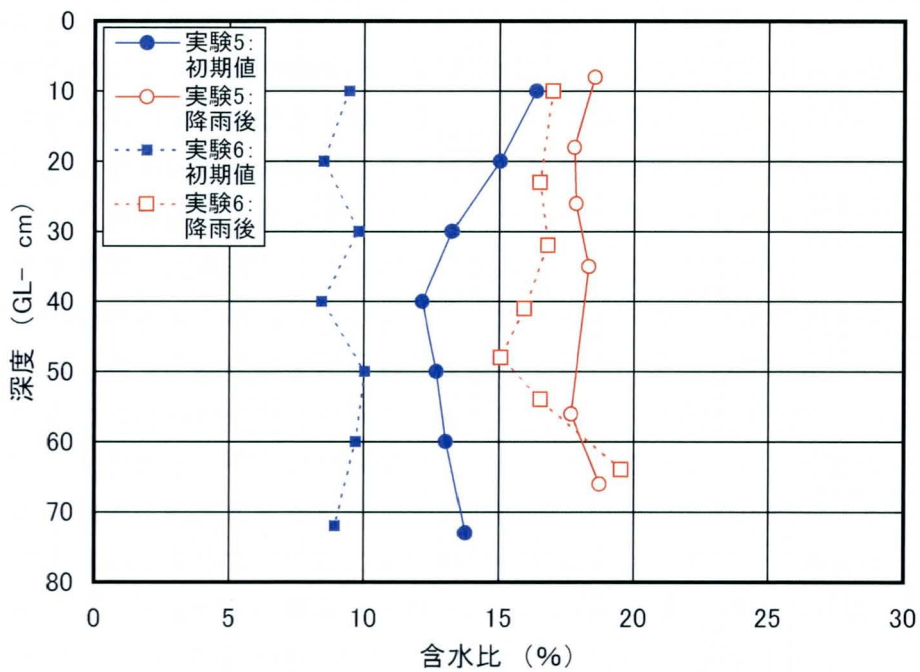


図-3.10(3) 初期含水比と降雨後の含水比の関係

(実験 5 ; 降雨条件 10mm/h×10h, 実験 6 ; 降雨条件 10mm/h×8h)

Fig. 3.10(3) Relationship of water contents between before and after the artificial rain
(Results of Experiments 5 and 6)

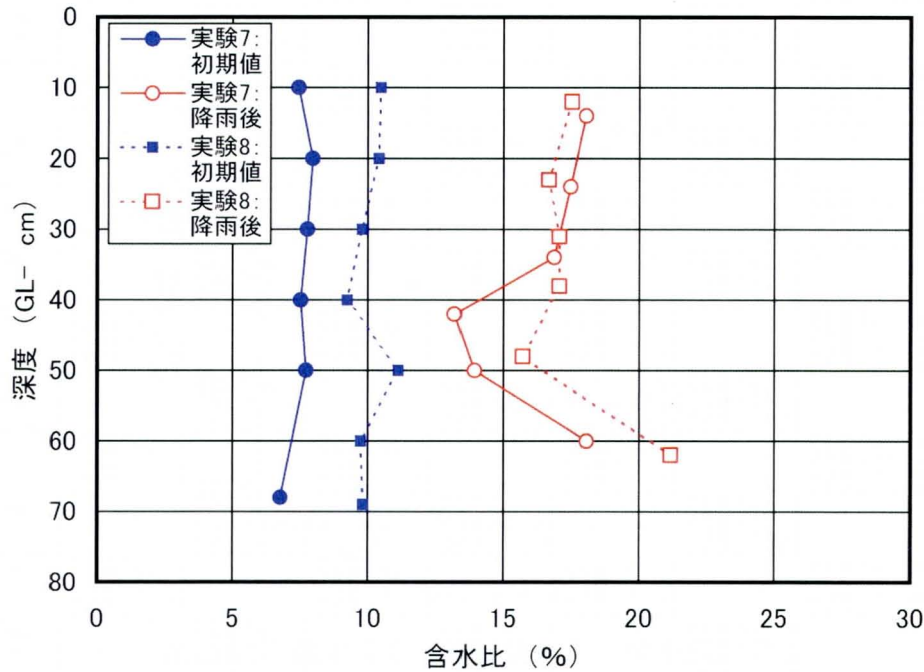


図-3.10(4) 初期含水比と降雨後の含水比の関係
(実験 7, 8 ; 降雨条件 10mm/h×4h + 40mm×1h)

Fig. 3.10(4) Relationship of water contents between before and after the artificial rain
(Results of Experiments 7 and 8)

短時間の強雨では中間層の含水比が上昇せず、逆に強度の小さい降雨を継続して与えると中間層も含めて万遍なく含水比が上昇するという結果は、前節に述べた土中水分の現地モニタリング結果とも調和的である。すなわち、現地モニタリングにおいても、中間層の土中水分は降雨そのものの量や強度との相関は低く、十分な先行降雨があれば短時間の強雨に伴い中間層の土中水分量が急上昇するという結果が得られている。

このように、総量が同程度の降雨を与えても、特に中間層では、降雨パターンにより大きく異なった土中水分の変化を示すことがわかった。一般に不飽和状態での透水係数は、飽和状態の透水係数に比べ著しく小さな値をとることが知られている^{たとえば 15)}(図-3.11)。強度が弱く継続時間の長い降雨では、その時の含水比（あるいは体積含水率）に見合った水分の供給量で、降った雨は徐々に下方へ浸透していき、その過程で徐々に透水係数が上昇していくものと考えられるが、短時間の強雨の場合は、供給量が不飽和状態での浸透能力を超えており、下方へ土中水分が供給されにくい状態にあると考えられる。

このことを実験的に検証するために、既に全体的に 15~17% の比較的含水状態の高い地盤を土槽内に生成しておいて、これに強い雨を与えるという条件で「実験 9, 10」を実施した。実験 9 では 30mm×3h の降雨、実験 10 では 40mm×2h の降雨を与えている。

実験 9 および実験 10 により得られた初期含水比と降雨後の含水比の関係を、図-3.12 に示す。これらの実験結果では、各深度ともほぼ万遍なく 22% 程度まで含水比が上昇しており、ある程度の先行降雨があった後の強雨では、中間層まで土中水が短時間に供給されることを裏付けている。

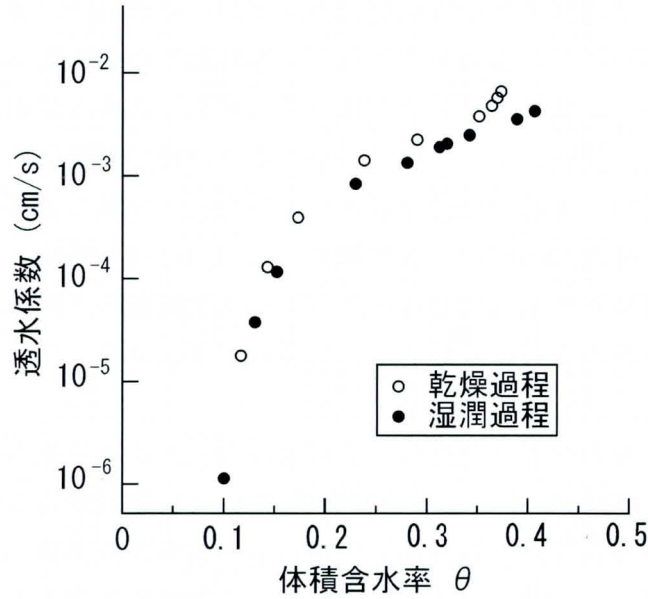


図-3.11 透水係数と体積含水率（豊浦砂）¹⁵⁾

Fig. 3.11 Relationship between coefficient of permeability and volumetric soil-water content (Toyoura sand)

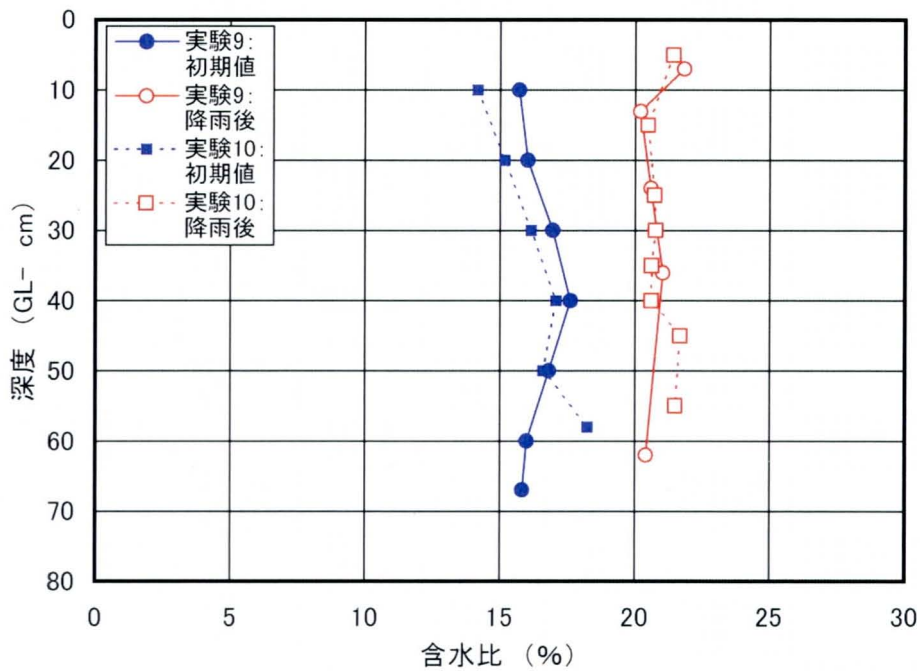


図-3.12 初期含水比と降雨後の含水比の関係

(実験 9 : 初期含水比 15~17% のところに 30mm×3h の降雨,
 実験 10 ; 初期含水比 15~17% のところに 40mm×2h の降雨)

Fig. 3.12 Relationship of water contents between before and after the artificial rain (Results of Experiments 9 and 10)

ここで、不飽和状態での浸透水の最先端部分は浸潤前線を形成して下降するといわれているが、西尾¹⁸⁾は、浸潤前線の下降速度は、続いて下降する含水量の多い伝達帯の下降速度より遅いため、伝達帯の水の下降運動を抑制するはたらきをし、状況によっては土層の不飽和状態のところの部分的に飽和状態のところができるとしている。本実験で得られた結果では、含水比が急激に減少する直前で含水比がわずかながら増加している傾向がみられるものが複数ある（実験2のGL-30cm、実験5のGL-35cm、実験6のGL-32cm、実験8のGL-38cm）。これは誤差の範囲である可能性もあるが、浸透の過程で浸潤前線に該当する下端部で水が停滞して、含水比が一時的に大きくなっている状態を示していると考えられる。

実験1～実験8の結果をみると、この実験条件においては浸潤前線をもって浸透していくと想定される領域の含水比は15～17%程度であると考えられる。西尾の解釈に従えば、初期の湿潤状態がこの程度以上の含水比のものであれば、浸潤前線の下降速度にとらわれずに伝達帯本来の下降速度で水が浸透していくといえる。あらかじめ15～17%程度の含水比に調整した試料で実施した実験9および実験10で、万遍なく22%程度の含水比に上昇したことはこのことを示していると考えられる。

3.4 本章のまとめ

本章では、現地モニタリングと室内人工降雨実験の結果をから、降雨による土中水分の変化に着目し、雨量指標 R' の物理的意味づけを考察した。降雨による斜面安定の問題は、サクシヨンの低下で強度を失うことと、地下水の形成により間隙水圧が発生することにより説明され、どちらの観点でも土中水分の上昇による影響が大きい。現地モニタリングと室内人工降雨実験は、どちらも土中水分が一様に上昇するためには、あらかじめある程度以上の湿潤状態である必要があることを示す結果となった。本章の成果を以下にまとめる。

(1) 現地モニタリングから得た知見

- ① 平常時の体積含水率と降雨の関係については、比較的小規模な降雨であっても表層 (GL-10~30cm) においては体積含水率が上昇し、その変動傾向は半減期 24~72 時間と 1.5 時間の実効雨量を組み合わせた雨量指標 R' と高い相関にある。
- ② 中間層 (GL-50cm) においては、小規模な降雨では体積含水率の変化はあまりないが、先行降雨と雨量強度の両方の影響が重なったときに急激に上昇する。このときの条件は半減期 72 時間と 1.5 時間の実効雨量を組み合わせた R' を用いることによって、良好に表現することができる。
- ③ 基底層 (GL-80cm) では、体積含水率は短時間の降雨強度には強く関係せず、半減期 48~72 時間の実効雨量とは極めて相関の高い変動傾向を示す。
- ④ 豪雨時においても、表層の体積含水率は雨量指標 R' の変化とよく似た変動傾向を示し、連続降雨中の短時間降雨のピーク時に体積含水率や pF 値が急激に上昇する。表層部が高含水状態を示している期間は概ね R' が 50~70mm 以上である期間と一致している。
- ⑤ 中間層の体積含水率は、降雨がある程度継続した後に、他の計器での上昇に少し遅れて上昇する傾向がみられる。今回の降雨事例では、上昇の目安となる R' 値は 50~70mm 程度である。なお、既に先行降雨を受けて湿潤状態にあるときには 10~15mm/h 程度の降雨であっても中間層の体積含水率が顕著に上昇する。
- ⑥ 基底層における含水状態は半減期 72 時間の実効雨量と対応しており、長期にわたって、非常に含水の高い状態が維持される傾向がある。 $R'=100\sim150\text{mm}$ 規模の降雨では、概ね半減期 72 時間の実効雨量が 50~70mm 以上となる期間と一致している。
- ⑦ それ以上の規模の降雨については未確認であるが、 $R'=150\text{mm}$ 程度の降雨では pF 値があまり下がっていない地点も見られ、地盤全体が飽和するような状態になるには至っていないと考えられる。

(2) 室内人工降雨実験から得た知見

- ⑧ 初期含水比と降雨後の含水比の状況を比較すると、総雨量では同程度の降雨を与えているにも係らず、特に中間層（GL-30～60cm）においては、降雨パターンにより降雨後の含水比の状況が大きく異なる。
- ⑨ 表層（GL-30cm 以浅）では、特に短時間に強雨を与えたケースで大きく含水比が上昇する傾向が見られた。これは、降雨によるインプット量が下方への浸透能力（不飽和透水係数）を上回り、浸透を妨げられている状態を反映しているものであると考えられる。
- ⑩ 長時間にわたって弱い降雨を与えたケースでは、中間層（GL-30～60cm）においても含水比が上昇しているが、短時間に強雨を与えたケースでは、中間層での含水比の上昇は表層部に比べて極端に小さい。
- ⑪ 基底層に相当する GL-60cm 以深では、全ての降雨パターンで含水比が高い状態へ収束していく傾向がみられる。これは実験装置の特性により土槽側面を伝って浸入した水による影響が大きいが、実現象においても基盤上面や難透水層の上面に水がたまる場合があり、これを表現していると考えられる。
- ⑫ 短時間の強雨で中間層の含水比が上昇しにくいという結果は、不飽和状態での透水係数や浸潤前線の下降速度の一般的な性質で説明することができる。本実験においては浸潤前線をもって浸透していくと想定される領域の含水比は 15～17%程度であり、初期の湿潤状態がこの程度以上の含水比であれば、浸潤前線の下降速度は伝達帯本来の下降速度で浸透していくといえる。
- ⑬ 初期値として 15～17%の比較的高含水状態に生成したケースにおいて、強い雨を与えることで深度に因らず万遍なく 22%程度まで含水比が短時間に上昇し、十分な先行降雨があった後の強雨では、中間層まで土中水が短時間に供給されることを実証できた。
- ⑭ 助実地区龍王山におけるモニタリング結果においても、中間層の土中水分はある程度の先行降雨があれば短時間の強雨に伴い急上昇するという結果が得ており、本実験結果と調和的である。
- ⑮ 現地モニタリングと室内人工降雨実験で得られた知見から、先行降雨による湿潤状態を示す長期実効雨量と、その時の降雨強度を示す短期実効雨量を1つの値で言い表すことができる雨量指標 R は地盤の不安定化条件を適切に表現しうるものであるといえる。

【引用文献】

- 1) 小橋澄治(1983): 土砂災害の予測とその対応に関する諸問題, 「地すべり・崩壊・土石流」, 第3編, 鹿島出版会, pp.321-334.
- 2) (社)地盤工学会(2003): 「豪雨時の斜面崩壊のメカニズムおよび危険度予測に関する研究報告書」第2章, 豪雨時における斜面崩壊機構, pp.61-115.
- 3) 網干寿夫, 門田博知, 吉国洋, 中ノ堂裕文(1975): まさ土斜面崩壊の予知と危険ヶ所の類型化に関する基礎的研究, 文部省科学研究報告書, pp.37-41.
- 4) 宇野高雄, 宮下高昭(1981): 浸水による不飽和土の強度低下について, 土と基礎, Vol.29, No.6, pp.41-48.
- 5) 風間英彦(1985): 土質工学的な短期の緩みと崩壊に対する降雨条件, 文部省科学研究費, 自然災害特別研究成果, No.A-60-2「地盤の劣化とその地域特性を考慮した崩壊危険度の評価に関する研究」, pp.162-186.
- 6) 笹原克夫, 海老原和重(1997): 不飽和砂質土の強度特性とそれに基づく急勾配斜面崩壊に関する研究, 砂防学会誌, Vol.34, No.2, p.5-13.
- 7) 西垣誠, 中屋眞司, 河野伊一郎(1992): 前処理付き共役勾配(SSOR-PCG)法を用いた飽和・不飽和多孔質媒体中の三次元浸透解析法, 土木学会論文集, No.448/Ⅲ-19, pp.101-110.
- 8) 亀井健史, 榎本雅夫(1996): 降雨および地下水流が斜面内の間隙水圧挙動に及ぼす影響, 地すべり, Vol.33, No.2, pp.10-16.
- 9) 鶴飼恵三, 祭飛, 阪上最一, 若井明彦(1998): 降雨時の斜面安定性の全体安全率による評価, 地すべり, Vol.35, No.1, pp.19-23.
- 10) 三森利昭, 坪山良夫(1990): 浸透現象を考慮した斜面安定解析法に関する研究, 砂防学会誌, Vol. 43, No.4, pp.14-21.
- 11) 八木則男, 榎明潔, 矢田部龍一(1988): 降雨による砂質土斜面の崩壊予測, 土質工学会四国支部, 斜面崩壊および地すべりの予知と対策に関するシンポジウム発表論文集, pp.37-42.
- 12) 佐々木康, 森脇武夫, 加納誠二, 白石芳樹(2001): 1999年の広島県斜面災害をもたらした降雨特性と警戒・避難のための雨量指標, 土と基礎, Vol.49, No.7, pp.16-18.
- 13) Dissanayake A. Kamalnath, Yasushi Sasaki, Seiji Kano, Desiree A. Uy, Takeo Moriwaki (2001): Rain-induced groundwater flow experiments in relation to the initiation of shallow landslide in hilly area, Ground Engineering, Vol.19, No.1, pp.61-69.
- 14) Thi-Ha (2005): 降雨時の風化花崗岩斜面の不安定化機構に関する研究, 広島大学学位論文(広島大学大学院工学研究科), 255p.
- 15) (社)地盤工学会(2004): 「不飽和地盤の挙動と評価」, 丸善, 217p.
- 16) 梅木健一, 桑田志保, 山田慎也, 海堀正博(2001): 土砂移動に関わった2つの豪雨特性と地盤特性, 平成13年度砂防学会研究発表会, pp.392-393.
- 17) 海堀正博, 梅木健一(2005): まさ土斜面における土中水分の原位置観測その2, 「中国

地方における土砂災害特性に関する研究」報告書，広島大学災害軽減プロジェクト研究センター，国土交通省中国地方整備局太田川河川事務所委託，pp.54-58.

- 18) 西尾邦彦(1992)：表土内での水の動態と崩壊，「砂防学講座」第3巻，斜面の土砂移動現象，山海堂，pp.101-108.

第4章 災害事例を用いた雨量指標 R' の適用性の検証

4.1 検証対象事例の抽出

雨量指標 R' の開発および検証は、主に 1999 年の 6.29 災の事例をもとに行っているが、ここでは、他の事例を用いてその適用性を検証する。

対象事例は表-4.1 に示すとおり、広島県の事例 6 件（事例①～事例⑥）、他地域の事例 2 件（事例⑦～事例⑧）の合計 8 件である。これらは、降雨特性や地域特性、災害形態などが多種多様であるため、様々な側面から雨量指標 R' の適用性を検証するに当たっては妥当なものであると考えられる。

表-4.1 雨量指標 R' の適用性の検証事例

Table 4.1 List of the case studies used for verifying applicability of the rainfall index R'

地域	分布地質	事例	被災概要
広島県	花崗岩(まさ土)主体	事例①: 1988年7月の広島県北西部の災害	多数の土石流
		事例②: 2004年台風10号による呉市の災害	がけ崩れ
	花崗岩, 中古生層	事例③: 2005年台風14号による災害	土石流, がけ崩れ
	花崗岩, 流紋岩, 中古生層	事例④: 2006年台風13号による災害	土石流, がけ崩れ
	流紋岩, 安山岩	事例⑤: 2006年7月18日の豪雨による災害	がけ崩れ
	花崗岩, 中古生層など	事例⑥: 2008年8月の短時間強雨による災害	河川氾濫, がけ崩れ
岡山県	花崗岩(まさ土)主体	事例⑦: 2004年台風21号, 23号による災害	土石流, がけ崩れ
神奈川県	更新世-完新世火山岩	事例⑧: 2005年台風11号による災害	土砂流出による施設被害

4.2 広島県における R' の事例検証

ここで取り扱う広島県における事例検討にあたっては、係数を $R_I=600\text{mm}$, $r_I=200\text{mm}$, $a=3$ とした。なお、最近の事例である③～⑥についての降雨データには、気象庁ウェブサイト（気象統計情報, <http://www.jma.go.jp/jma/>）、国土交通省ウェブサイト（水文水質データベース, <http://www1.river.go.jp/>）、広島県ウェブサイト（広島県防災情報システム, <http://www.bousai.pref.hiroshima.jp/hdis/index.jsp>）より収集した時間雨量データよりエラーデータを除いた 294～314 箇所のデータを用いた。

4.2.1 広島県の花崗岩分布域での災害事例

(1) 1988年7月の広島県北西部の激甚災害（事例①）

1988年7月20日から21日にかけて、広島県北西部の加計町、戸河内町、筒賀村（ともに現安芸太田町）一帯で土石流災害が発生した^{1)~3)}。県内では、20日午後から局地的に強い雨が降り、夜間さらに前線活動が活発化した。県北西部では20日21時すぎから雨が強まり22時以降時間雨量20~30mm以上の雨が5時間にわたって降り続いた。

7月20日9時~21日9時までの総雨量は、内黒山276mm、加計270mm、八幡245mmとなり、最大時間雨量は内黒山で56mm（21日2時~3時）、加計で55mm（21日3時~4時）の記録的短時間強雨となった。広島県加計観測点では、20日22時からの8時間の雨量だけで255mmと短時間に大雨が集中した。

この豪雨により、33溪流の流域で300箇所を越える斜面崩壊が発生し、その多くが土石流になり被害を拡大させた⁴⁾。この土砂災害によって14名の尊い命が奪われ、負傷者11人、家屋全壊38戸、半壊20戸の甚大な被害が発生した。



写真-4.1 加計町西調子地区の土石流（上空から）²⁾
Photo 4.1 Debris flow in Nishi-choshi district in Kake town



写真-4.2 江河内谷川の土石流（殿賀駅より）²⁾
Photo 4.2 Debris flow in Egouch district in Kake town

図-4.1に被害地の中心付近に位置する加計観測所で R' の値が最大（ $R'=425.1\text{mm}$ ）を記録した1988年7月21日4:00の R' の分布図を示す。当時は、観測情報の公開が進んでいなかったため、現在と比べると、一般に入手できる降雨データの観測地点密度が小さい。公開されていたアメダス情報の観測地点は、強い雨の降ったエリアに4箇所しかなく、解析を

行うために十分な状態ではなかった。このため、本解析では被災地周辺の6地点の観測データ¹⁾を加えることにより、解析精度の向上を図った。

ここでも、6.29 災における解析で用いた $R'=250\text{mm}$ を限界降雨量の指標として、土石流災害が発生した領域を都合よく表現することができる。また、この図から豪雨が発生したエリアは非常に狭い範囲であったことがわかる。

災害が発生した範囲は風化花崗岩（まさ土）分布域を主体とするが、一部に泥質岩（中古生層）や流紋岩類の分布域も含まれている。なお、栃木の報告⁴⁾には、花崗岩地帯よりも泥質岩地帯のほうがやや遅れて崩壊が発生した可能性が示されている。

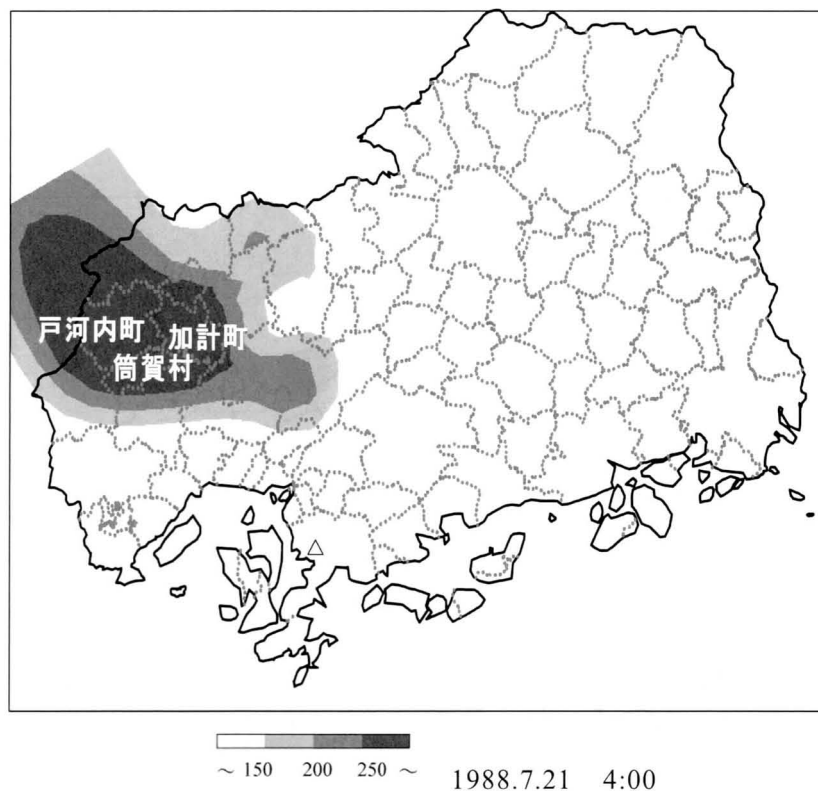


図-4.1 雨量指標 R' の分布図（1988年7月21日災害時）
Fig. 4.1 Distribution of R' -value in Hiroshima Prefecture at July 21, 1988

(2) 2004年台風10号による呉市のがけ崩れ災害（事例②）

2004年の台風10号により、四国地方を中心に甚大な土砂災害が発生したが、広島地区においても呉市山手地区等で数箇所の小規模ながけ崩れ災害が発生した。

呉周辺に強い雨が降った8月1日15:00の R' の分布図を図-4.2に示す。

がけ崩れが発生した呉市山手地区周辺は $R'=150\sim 200\text{mm}$ のエリアに位置し、6.29災害の際にも市街地周辺でがけ崩れ災害が発生した値 $R'=125\sim 150\text{mm}$ を超えている。なお、一連の降雨で記録した最大の R' は加計町水谷観測所の 244.9mm であった。台風10号では県内では小規模ながけ崩れ災害を除いては土石流災害等の発生は報告されていない。

この事例からも、風化花崗岩（まさ土）分布域においては $R'=125\sim 150\text{mm}$ 程度以上の比較的小さな雨でも小規模ながけ崩れ災害は発生しうることがわかる。また、土石流災害のような流動性が高い現象は $R'=250\text{mm}$ に至らないような規模の雨では発生しないことがわかる。

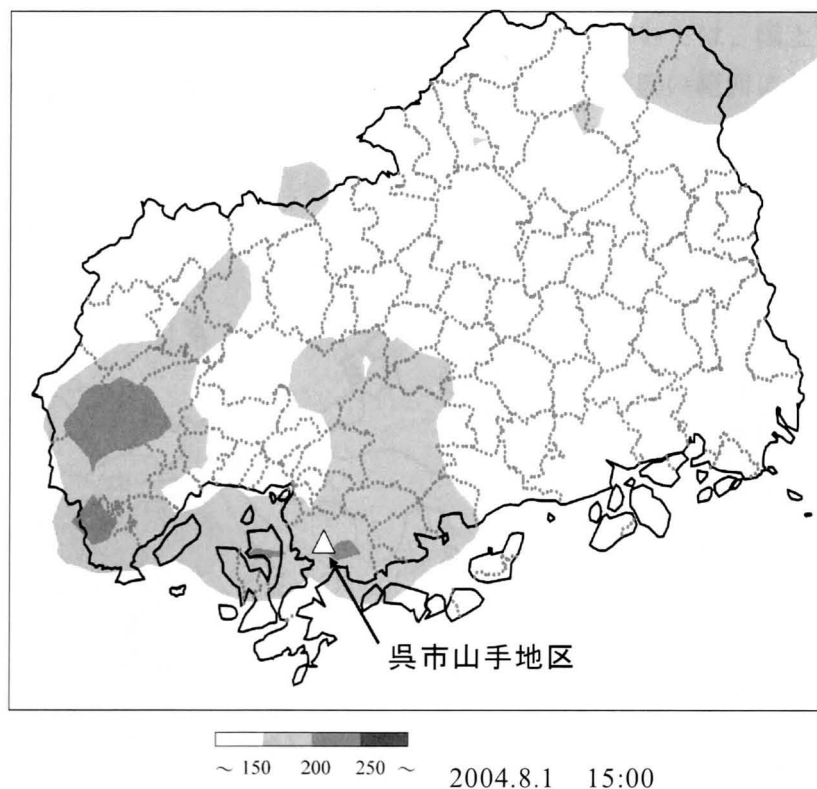


図-4.2 2004 台風 10 号時の雨量指標 R' の分布図

Fig. 4.2 Distribution of R' -value at Typhoon Namtheun in Hiroshima Prefecture

4.2.2 広島県のその他の地質分布域での災害事例

(1) 2005年台風14号による災害（事例③：花崗岩と中古生層の分布域）

2005年台風14号（以下 T0514）は、2005年9月5日～9月7日に九州および中国地方で豪雨による多くの土砂災害をもたらした。広島県でも、広島市佐伯区湯来町（図-4.4中のA位置）の国土交通省大谷観測所で総雨量496mmを記録したほか、県西部の多くの地点で400mmを超え、この地域としては記録的な大雨となった⁵⁾。国土交通省の発表（<http://www.mlit.go.jp/river/sabo/>）によると、全国で362件の土砂災害が発生し、死者19名、行方不明者3名、負傷者3名の人的被害が生じた。広島県内では死者・行方不明者はなかったが、13件の土石流、1件の地すべり、7件のがけ崩れが発生した。

図-4.3は、T0514災害時の最大 R' 値の分布図に土砂移動現象の発生位置を示したものである。この事例では、土石流が発生したすべてのエリアで $R' = 250\text{mm}$ を超えており、まさ土分布域で土石流が発生するのに十分な降雨条件に達していたことがわかる。土石流が発生した地域で最も R' 値が小さかったのは、まさ土分布域である廿日市市宮島町（広島県宮島観測所（図-4.3中のB位置）で $R' = 288.4\text{mm}$ ）であった。また、図示した崩壊は $R' = 200\text{mm}$ を超えた範囲に分布している。しかし、崩壊箇所については、国土交通省の発表分のみを図示しているため、小規模な崩壊を含めるともう少し広い範囲に分布しているものと考えられる。

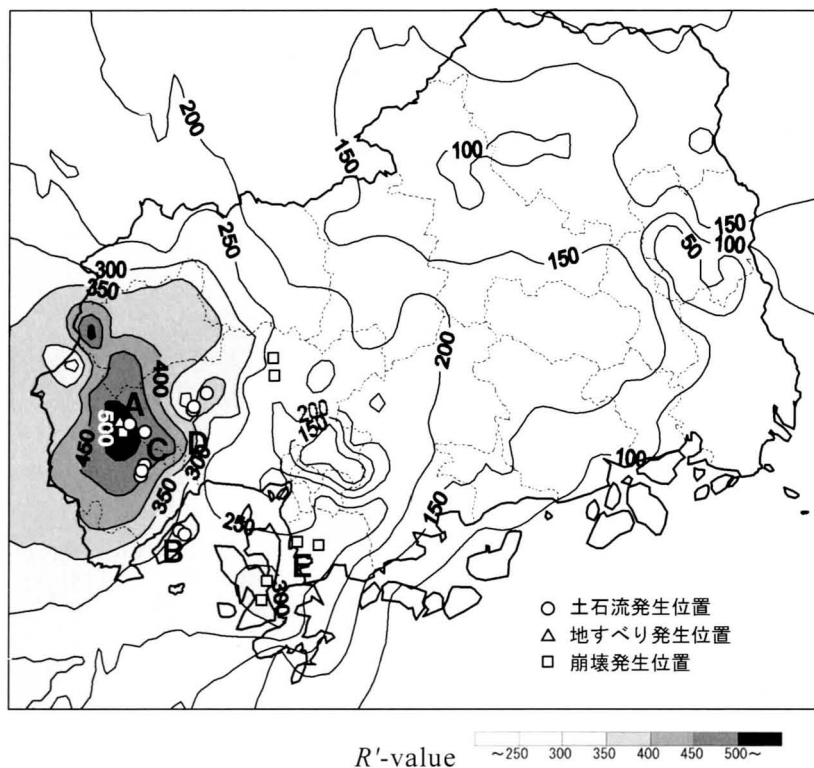


図-4.3 2005年台風14号時の広島県における最大 R' 値の分布

Fig. 4.3 Distribution of maximum R' -value during Typhoon Nabi in Hiroshima Prefecture

廿日市市玖島付近（図-4.3 中 C 位置）や広島市佐伯区湯来町（同 A 位置）では R' 値は 400~450mm 以上に至り、湯来町の国土交通省大谷観測所では最大 $R' = 530.4\text{mm}$ を記録した。この値は 6.29 災害で最も被害の大きかった広島市西部（広島県魚切ダム観測所（同 D 位置）で $R' = 437.3\text{mm}$ ）や呉市（気象庁アメダス呉観測所（同 E 位置）で $R' = 415.6\text{mm}$ ）の値を大きく上回るものであったが、被害程度は 6.29 災害に比べると小さかったといえる。

6.29 災害で被災したほとんどの箇所はまさ土分布域であったが、T0514 災害で被災した箇所は、まさ土分布域と中古生層地帯にまたがって分布している。特に激しい降雨を記録した広島市佐伯区湯来町周辺は中古生層優勢の地域であり、その地質特性からまさ土分布域よりも災害発生限界降雨が大きかった可能性も考えられる。また、まさ土分布域では表層崩壊やそれに起因した土石流が主体であったが（写真-4.3, 4.4）、中古生層地帯ではこれらの他にいくつかの地すべり災害（大きなものは 1 件：写真-4.5）も発生している。

なお、宮島町の白糸川では、6.29 災害の時にも同程度以上の降雨があったにもかかわらず、そのときには大きな土砂移動現象は発生していない。宮島町では 1999 年以降にいくつかの台風の暴風により風倒木被害が出ており、現時点では関係は明らかではないが、このことが一因であった可能性も指摘できる⁶⁾。土砂移動現象の発生・非発生はその降雨や地域の持つ特性に加えて、他の条件（過去の台風などによる斜面のダメージ）にも強く影響されているものと考えられる⁷⁾。



写真-4.3
風化花崗岩分布域で表層崩壊が起源
となり発生した土石流

Photo 4.3
Debris flow due to shallow slope
failure in a decomposed granite area
(広島県廿日市市玖島地区,
位置は図-4.3 の C 位置付近)



写真-4.4
土石流により全壊した家屋

Photo 4.4
Damage by debris flow in Photo 4.3
(広島県廿日市市玖島地区,
位置は図-4.3 の C 位置付近)



写真-4.5
中生層の塩基性岩分布域で発生し
た地すべりの末端部

Photo 4.5
Landslide in an area of a Paleozoic
basic-rock

幅約 35m, 長さ約 70m の土塊が 8m 程度
移動し, 末端部崩壊土塊が流動化して国
道および水内川に到達した。

(広島市佐伯区湯来町志井地区,
位置は図-4.3 の A 位置付近)

(2) 2006 年台風 13 号による災害（事例④：花崗岩，流紋岩，中古生層の分布域）

2006 年台風 13 号（以下 T0613）は、2006 年 9 月 16 日～9 月 18 日に沖縄，九州から中国地方を通過し，豪雨と強風により大きな被害をもたらした。広島県では，台風の影響を受けた前線の活性化により，台風が通過する前々日から前日にかけて，中山間部で激しい雨を記録した。

図-4.4 は，T0613 災害の最大 R' 値の分布図に土砂移動現象の発生位置を示したものである。山県郡北広島町（図-4.4 中の A 位置）の国土交通省本地観測所で総雨量 334mm を記録したほか，中山間部のいくつかの観測地点で 300mm を超える大雨となった。国土交通省の発表（<http://www.mlit.go.jp/river/sabo/>）によると，全国で 56 件の土砂災害が発生し，土砂災害による人的被害は死者 2 名，負傷者 6 名にのぼった。広島県では 8 件の土石流，11 件のがけ崩れが発生し，2 名の負傷者が出た。

T0613 災害時の R' 最大値の分布をみると，土石流の発生は $R'=300\text{mm}$ 程度以上で，崩壊の発生は $R'=150\text{mm}$ 程度以上に分布しており，6.29 災害をはじめとするこれまでのまさ土分布域の災害事例と合致する。

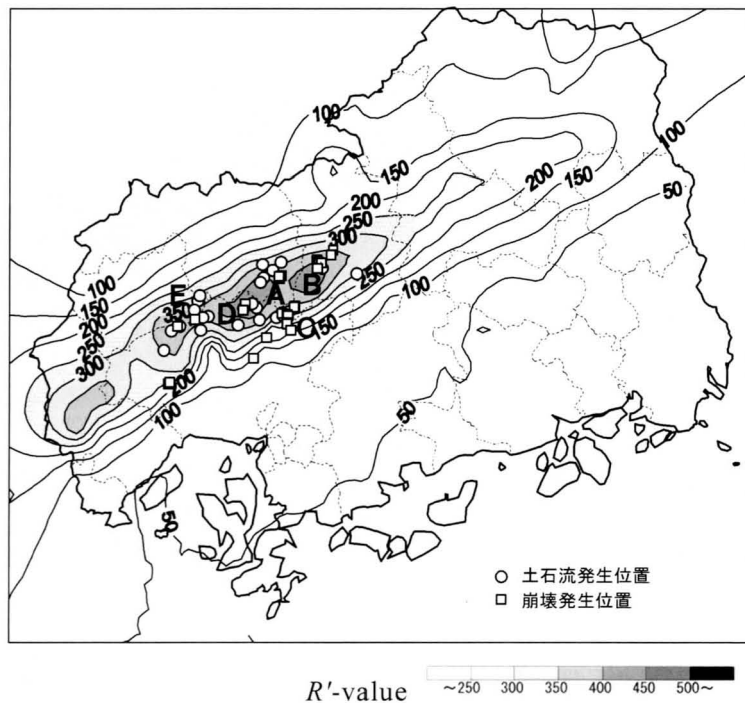


図-4.4 2006 年台風 13 号時の広島県における最大 R' 値の分布

Fig. 4.4 Distribution of maximum R' -value during Typhoon Shanshan in Hiroshima Prefecture

安芸高田市八千代町（図-4.4 中 B 位置）や広島市安佐北区（同 C 位置），北広島町の一部（同 D 位置）では， R' 値は 400mm 以上に至り，八千代町の安芸高田市八千代支所では最大 $R'=436.2\text{mm}$ ，国土交通省土師観測所では最大 $R'=431.5\text{mm}$ を記録した。この値から，この一帯の豪雨は，6.29 災害時の広島市西部や呉市と同程度のものではあったといえる。

豪雨を記録した地域は，花崗岩，流紋岩，中古生層の境界領域であったが，まさ土状に

強風化した花崗岩（および一部流紋岩）の分布域では流動性の高い崩壊や土石流が多く発生し（写真-4.6, 4.7），粘板岩や硬質流紋岩の分布域においては細粒分の少ない石礫堆を形成するような崩壊（写真-4.8）が多く見られた。なお，県西部でも $R'=350\text{mm}$ を超える豪雨が観測されているが，この地域では目立った災害は報告されていない。これは，すでに T0514 の時に同程度以上の豪雨を経験していることが大きな原因と考えられる。



写真-4.6
風化花崗岩分布域で発生した土石流
Photo 4.6
Debris flow in a decomposed granite area
流木を含む大量の土砂が流出した。
（広島県安芸太田町穴地区，
位置は図-4.4 の E 位置付近）



写真-4.7
風化花崗岩分布域で発生した土石流
Photo 4.7
Debris flow in a decomposed granite area
大量の土石が流出し，災害発生の翌々日においても大量の表流水が確認された。
（広島県北広島町本地地区，
位置は図-4.4 の A 位置付近）



写真-4.8
中古生層の粘板岩分布域で発生した崩壊
Photo 4.8
Slope failure in a Paleozoic-slate-area 斜面を流下し，道路際に設置された落石防止柵で石礫堆を形成して停止している。
（広島県安芸太田町地区，
位置は図-4.4 の E 位置付近）

(3) 2006年7月18日の豪雨による災害（流紋岩および安山岩の分布域）

2006年7月15日～24日にかけて、梅雨前線により、中部地方以西の各地で豪雨が発生した。これにより各地で甚大な被害をもたらされ、気象庁はこの豪雨を「平成18年7月豪雨」と命名した (<http://www.jma.go.jp/jma/press/0607/26a/meimei.html>)。中国地方でも7月17日～19日にかけて豪雨があり、中国山地より北の地域で多くの土砂移動現象が発生した。

広島県内でも県北地域では多くの雨が降り、最も多くの雨が降った地域に位置する広島県高野観測所では、連続降雨437mm、最大時間雨量40mm、最大 R' 値324.0mmを記録している。また、国土交通省の報告 (<http://www.mlit.go.jp/bosai/disaster/saigaijyouhou/h18/>)によると、備北地域を中心に県内で8件のがけ崩れが発生したほか、広島県のウェブサイト (<http://www.bousai.pref.hiroshima.jp/hdis/index.jsp>)では25箇所の道路法面や路肩の崩壊が報告されている。また、庄原市西城町熊野地区では、JR芸備線に面した斜面が幅約30m、高さ約50mにわたって崩壊し、JR芸備線は不通となった（写真-4.9）。

このように、この降雨は風化花崗岩（まさ土）分布域であれば土石流発生の限界降雨を超えたものであり（図-4.5）、崩壊が発生した熊野地区の近くに位置する広島県八鳥観測所でも R' の最大値は270.3mmを記録している。しかしながら、この降雨の期間中に、土石流のような流動性の高い土砂移動現象は発生していない。

雨量の多かった県北地域は、高田流紋岩類と呼ばれる火山岩類を主体とする地域で、崩壊が発生した熊野地区には比較的硬質な安山岩類と流紋岩類が分布し、崩壊斜面にはこれを覆って崖錐堆積物が分布していた。

2006年台風13号の事例でも硬質流紋岩域では流動性の高い崩壊現象が発生していなかったが、本事例も併せて考えると、硬質な流紋岩や安山岩などの土石流に対する発生限界降雨は、花崗岩（まさ土）に対するものよりも大きなものである可能性が指摘される。



写真-4.9 庄原市西城町熊野地区で発生した崩壊

Photo 4.9 Slope failure occurred in Kumano district in Saijo-cho, Shobara City

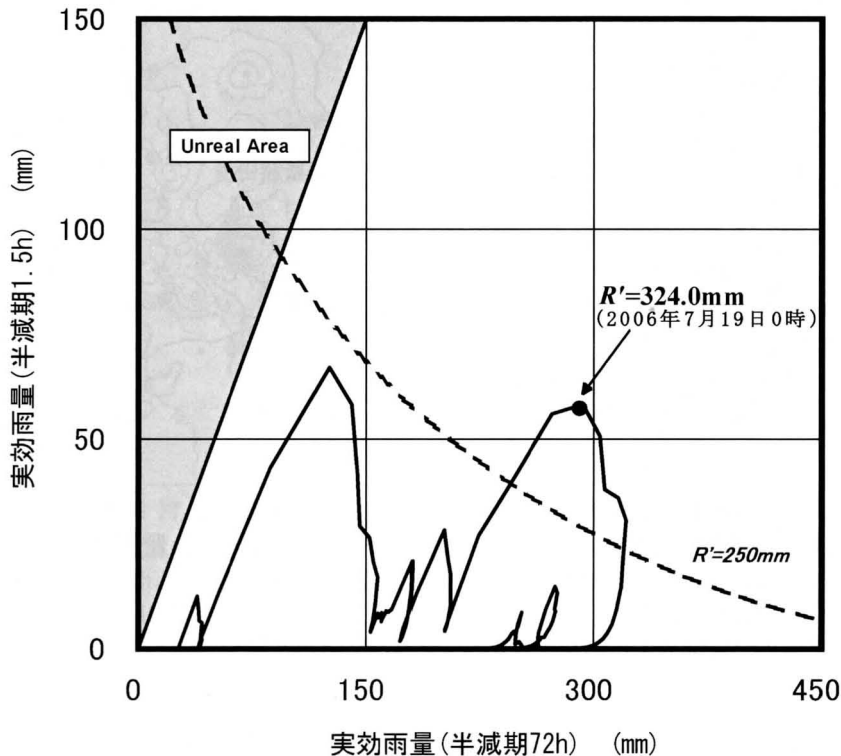


図-4.5 2006年7月16日～21日の広島県高野観測所の降雨状況
 Fig. 4.5 Rainfall situation of the Takano-observatory from July 16th to 21st, 2006
 (Relationship between $R_w - r_w$)

(4) 2008年8月29日の短時間強雨による災害（事例⑥）

2008年の夏季には各地で短時間に強度が大きい雨が降り、急激な河川の増水や鉄砲水あるいはフラッシュフラッドと呼ばれるような急激な出水⁸⁾の被害が相次いだ。7月28日に神戸市灘区の都賀川の急激な増水で5名の尊い命が奪われたのは記憶に新しい。広島県でも、数回にわたり、局部的に時間雨量50mmを超えるような、いわゆる夕立と呼ばれる短時間強雨を記録した。

特に8月の末には、全国各地で短時間に記録的な強雨があり、気象庁は「平成20年8月末豪雨」（<http://www.jma.go.jp/jma/press/0809/01d/gouumeimei200808.html>）と命名した。広島県では、8月29日の明け方から午前10時ごろにかけて県東部を中心に非常に強い雨があり、広島県三原市久井町の吉田観測所では広島県下で過去最高となる時間雨量99mm/hを記録した。広島県の観測所の時間雨量データは正時に計測されるため、県のデータには記録されていないが、気象庁の報告（同上Webサイト）によるとアメダスの福山観測所では8:37～9:37の1時間に93.0mm、河内観測所では7:30～8:30の1時間に88.5mmの60分雨量を記録しており、何れも観測史上1位を更新している。

図-4.6に2008年8月29日の最大1時間雨量の分布状況、図-4.7に最大 R' 値の分布状況を示す。なお、どちらの図も広島県により発表された正時の1時間雨量データを用いて作成したものである。このときの R' 値は比較的広い範囲で150mmを超えているが、250mmを超えた範囲は吉田観測所周辺のわずかな範囲に限られる。

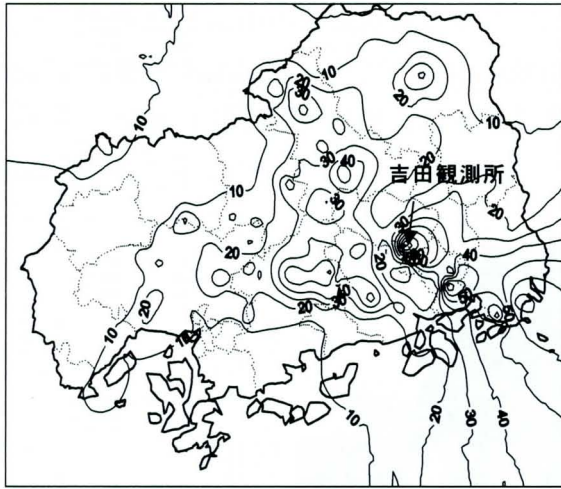


図-4.6 2008年8月29日の
最大1時間雨量の分布

Fig. 4.6 Distribution of the maximum hourly rainfall on August 29th, 2008
(広島県の正時のデータを使用)

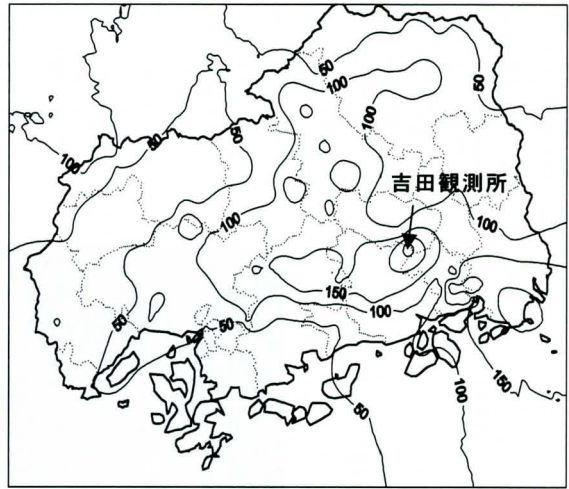


図-4.7 2008年8月29日の
最大 R' 値の分布

Fig. 4.7 Distribution of the maximum R' -value on August 29th, 2008
(広島県の正時のデータを使用)

図-4.8 に、広島県三原市の吉田観測所のスネークラインを示す。この図から、 R' 値の上昇は非常に急激なものであることがわかる。8月29日の8:00時点では $R'=19.2\text{mm}$ であったが、わずか1時間のあいだに $R'=282.7\text{mm}$ まで上昇しているが、3時間後には 150mm を下回る値まで低下している。

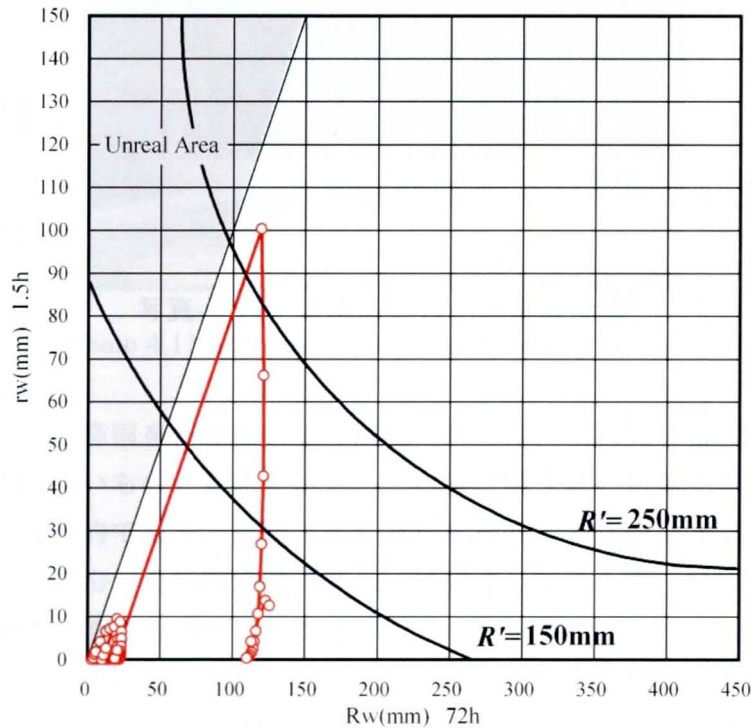


図-4.8 2008年8月20日～29日の吉田観測所のスネークライン

Fig. 4.8 Rainfall situation of the Yoshida-observatory from August 20th to 29th, 2006
(Relationship between $R_w - r_w$)

このときには福山市～三原市にかけて、いくつかの小規模な土砂流出や崩壊があり、道路が一時通行止めになった。これらの強雨域には風化花崗岩（まさ土）分布域も含まれているが、写真-4.10, 4.11 に見られるような小規模のもののみであり、大規模な土砂移動現象は発生していない。



写真-4.10 道路へのわずかな土砂流出
Photo 4.10 Slight sediment discharge onto a road



写真-4.11 道路沿いの小規模な崩壊
Photo 4.11 Small-scale slope failure along the road

このことから、先行降雨を伴わない短時間強雨時では、土石流などの流動性の高い土砂移動現象は発生しにくいものと考えられる。これは、第3章の現地モニタリング結果や人工降雨実験結果と調和的である。また、ごく僅かな範囲で一時的に R の値が 250mm を超えて上昇したが、ほとんどの範囲では 200mm に到達しておらず、短時間降雨強度のみでは過剰に大きな R 値に達さないということがわかった。

なお、このときには下流域にあたる福山市では河川の水位が急激に上昇し、道路の冠水や家屋への浸水被害があった。このことは、先行降雨を伴わずに（土中の水分量が小さい状態で）短時間に集中して降った降雨は、地中にあまり浸透せずに表流水として河川に流出しやすく、土砂災害の危険性より、むしろ急激な増水や鉄砲水、フラッシュフラッドなどの原因となりやすい可能性を示している。

4.3 広島県以外の地域における R' の事例検証

4.3.1 岡山県の花崗岩分布域での災害事例（2004 年台風 23 号）

2004 年は度重なる台風の来襲で、全国的に大きな被害が発生した¹⁰⁾。広島県に隣接する岡山県においても 9 月 29 日の台風 21 号、10 月 20 日の台風 23 号により多くの土砂移動現象が発生した。

中でも台風 23 号による玉野市の風化花崗岩（まさ土）分布域で発生した土石流災害は、民家まで流下した土砂により 5 名の命を失う甚大な被害に至った（写真-4.12）。



写真-4.12 岡山県玉野市で発生した土石流

Photo 4.12 Debris flow occurred in Tamano City in Okayama Prefecture
(2004 年 10 月 20 日, 台風 23 号災害)

玉野市で土石流災害が発生した時間帯の時間雨量は 20~30mm 程度の比較的小規模なものであったが、 R' を適用して先行降雨の影響を考慮すると、 $R' > 250\text{mm}$ となる大きな値を示すことがわかった（図-4.9）。

なお、岡山市東部~瀬戸町、備前市を中心に多くの土砂移動現象が発生した台風 21 号の時には、玉野雨量観測所の最大時間雨量は 46mm と、台風 23 号時を上回る時間雨量を記録している。しかし、これを R' で評価すると 250mm を下回り、台風 23 号時より小さな値となる（図-4.10）。

$R' \geq 250\text{mm}$ という値は、広島地域の災害事例において土石流の発生限界雨量と判定された値であるが、台風 23 号時には玉野市付近で 14 箇所の土砂災害が発生したこと、その中には土石流化したものがあったことなど、今回発生した災害規模を適切に表現することができた。

また、台風 21 号時に玉野市付近では台風 23 号に比べると大きな被害は発生していないことも、このことを支持する結果となった。

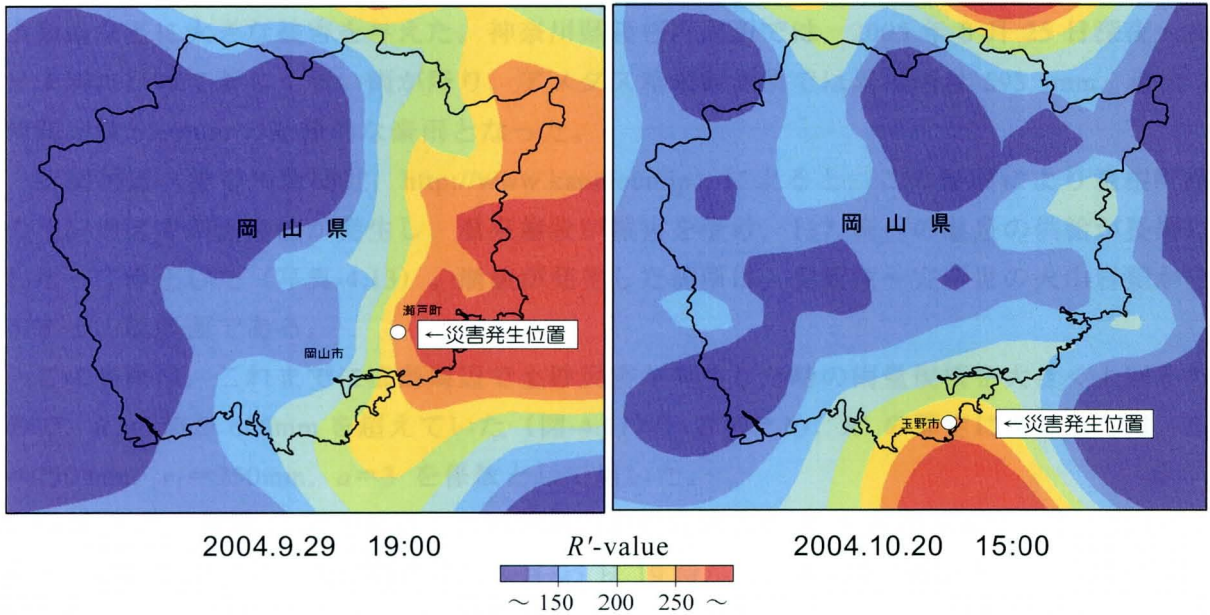


図-4.9 2004年台風21号、台風23号時の岡山県における R' の分布図
 Fig. 4.9 Distributions of R' -value in Okayama Prefecture in Typhoon Meari and Tokage

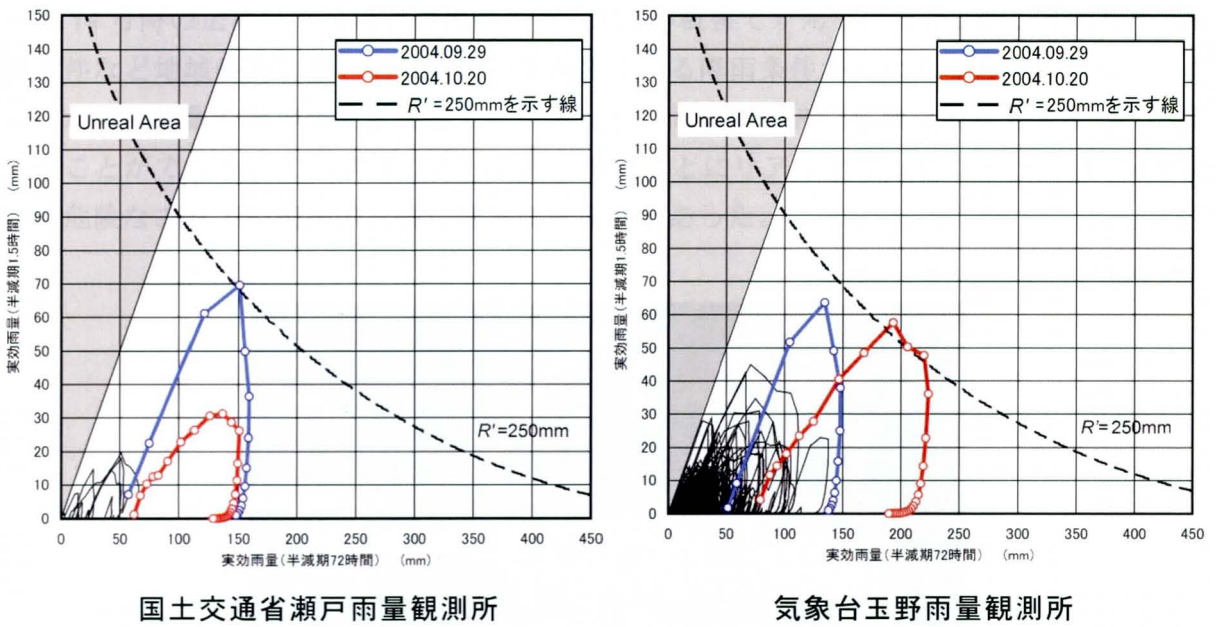


図-4.10 2004年台風21号、台風23号時の $R_w - r_w$ 関係図
 (国土交通省瀬戸雨量観測所と気象台玉野雨量観測所)
 Fig. 4.10 Relationship between $R_w - r_w$ during Typhoon Meari and Tokage
 (Tamano and Seto rain gauge station)

4.3.2 神奈川県火山岩分布域での災害事例（2005年台風11号）

2005年の台風11号は東海～関東地方に豪雨をもたらし、神奈川県、東京都、静岡県、山梨県などに大きな被害を与えた。神奈川県箱根町周辺では、2005年8月25日深夜～26日未明にかけて著しく強い雨が降り、アメダス箱根観測所では累積雨量593.5mm、最大1時間雨量65.0mmの記録的な豪雨となった。

新聞報道（神奈川新聞社、<http://www.kanaloco.jp>）によると、この豪雨により箱根町湯の花沢地区で斜面崩壊が発生し、温泉施設が被害を受け、137軒への温泉の供給が長期にわたって停止した（写真-4.13）。崩壊が発生した箇所は、更新性～完新世の火山岩類が分布する山腹斜面である。

この豪雨は、これまでに広島周辺で土砂災害が発生した時の雨量規模を大きく上回るもので、 R_w の値が600mmを超えていた（図-4.11）。このため、 R' の算定にあたっては、 $R_f = 750$ mm、 $r_f = 250$ mm、 $a = 3$ を係数として用いた。

図-4.12に、台風11号が接近した時間帯の箱根町周辺の R' 分布図を示す。この図から、災害のあった湯の花沢地区周辺では8月25日19時から顕著に R' 値が上昇し、21時から翌1時までの5時間にわたって、 $R' > 500$ mmの状態が続いたことがわかる。このときのアメダス箱根観測所の R' の最大値は $R' = 688.5$ mm（2005年8月25日23時）に達した。

国土交通省の発表（<http://www.mlit.go.jp/river/sabo/>）によると、台風11号での土砂災害の発生件数は8件で、豪雨規模が非常に大きかったわりには1999年の6.29災害や2005年台風14号時の広島県での災害に比べると、少ない被害ですんでいる。このことから、地質条件など地域特性の違いにより、災害が発生する降雨条件が異なることがわかる。しかしながら、係数や基準値を変えることによって、雨量指標 R' は危険な領域を矛盾なく表現することができた。この事例においても、時間ごとにリアルタイムにつくった R' 分布図が、危険なエリアの把握のために非常に効果的であった。



写真-4.13 箱根町湯の花沢地区で発生した土砂移動現象（Google Earthより引用）

Photo 4.13 Debris movement occurred in Yunohanasawa district in Hakone Town
（流下した土砂により道路が閉塞し、温泉施設が被災した）

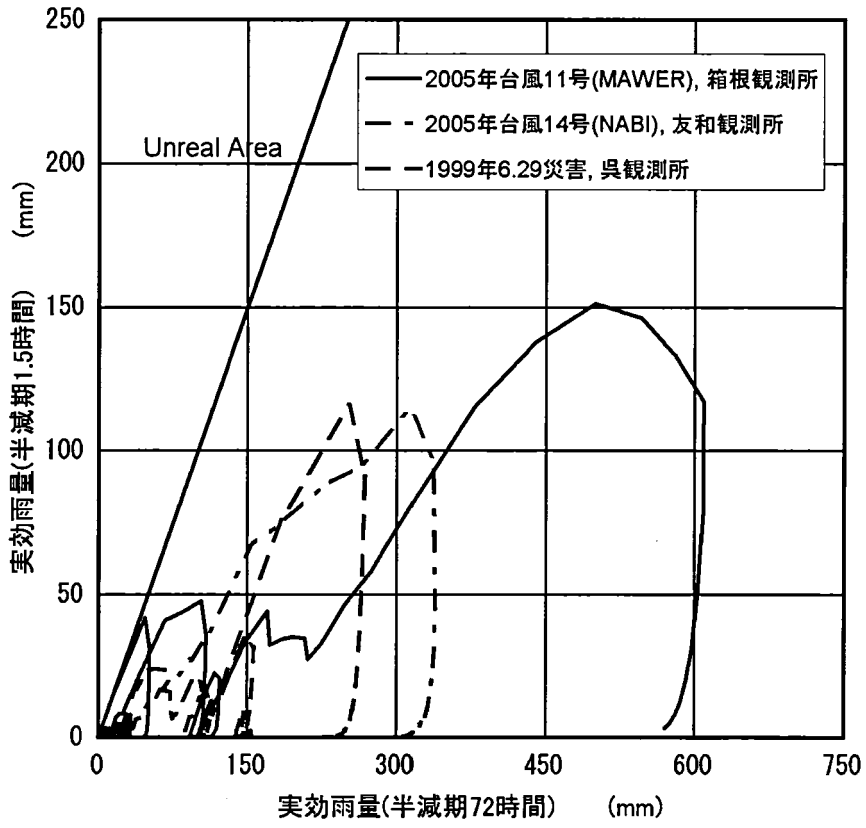


図-4.11 スネークラインの比較図

Fig. 4.11 Comparison of R' -path (snake line) between Hakone region and Hiroshima region
 (2005年台風11号時の神奈川県箱根観測所)
 (2005年台風14号時の広島県友和観測所)
 (1999年6.29災害時の広島県呉観測所)

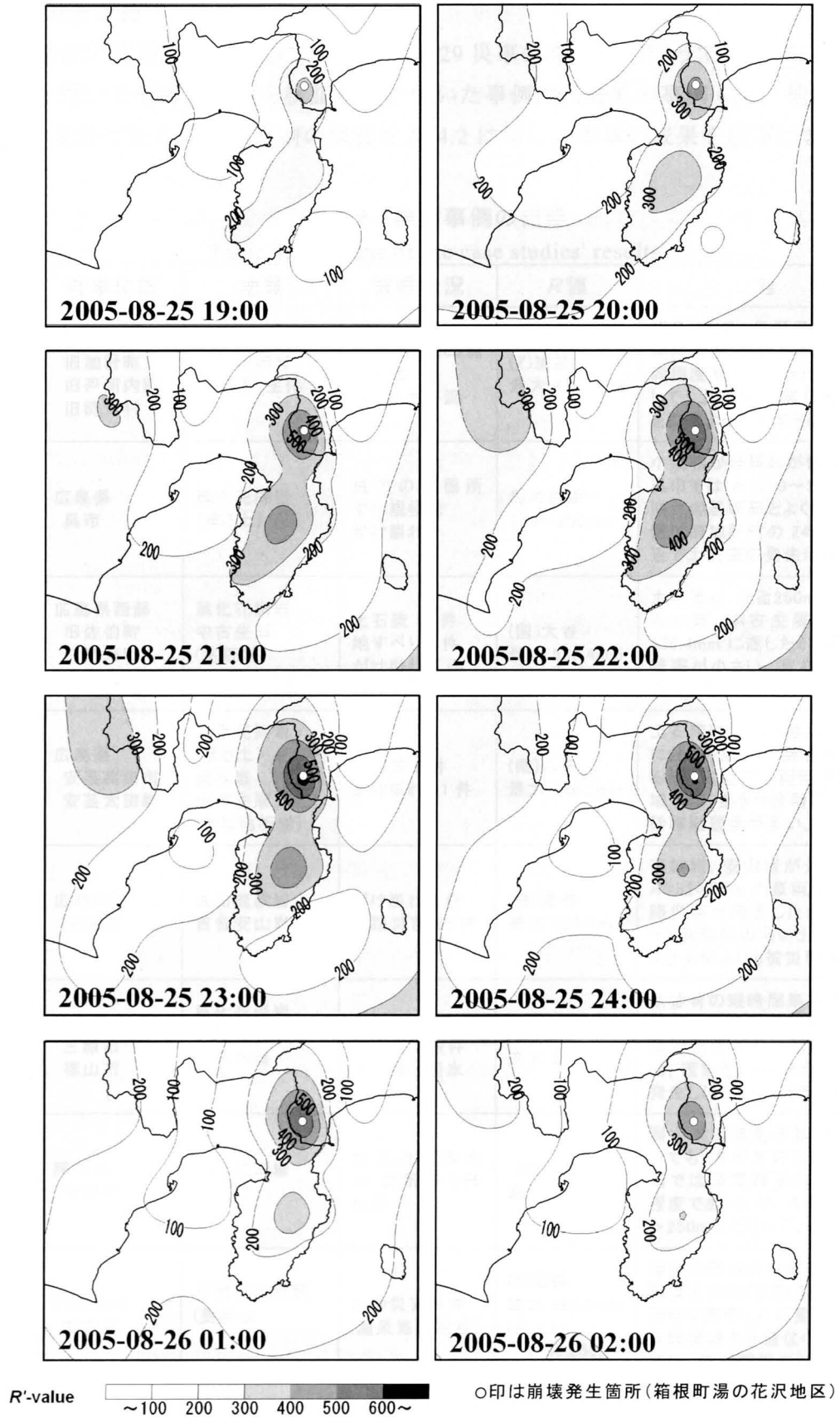


図-4.12 2005年台風11号時の箱根周町辺の R' 分布図
 Fig. 4.12 R' -distribution map (In Kanto region during the Typhoon MAWER)

4.4 本章のまとめ

雨量指標 R' の開発、検証は主に 1999 年の 6.29 災害事例をもとに行っているが、ここでは、他の事例を用いてその適用性を検証した。用いた事例は広島県の事例 6 件、他地域の事例 2 件の合計 8 件である。検討事例の概要を表-4.2 に示し、本章の成果を以下にまとめる。

表-4.2 検討事例の概要

Table 4.2 Outline of the case studies' results

検討事例	対象位置	地質	被害状況	R 値	考 察
①1988年 7月21日	広島県 旧加計町 旧戸河内町 旧筒賀村	風化花崗岩 (まさ土)主体	33流域で300箇 所越の 崩壊、土石流	(Γ)加計 最大 425.1mm	死者 14 名、負傷者 11 名に及ぶ大規模災害。 R の最大値は 6.29 災と同程度である。 $R=250\text{mm}$ を指標にして、土石流災害が発生した領域を都合よく表現できる。
②2004年 (台風10号)	広島県 呉市	風化花崗岩 (まさ土)	呉市の数箇所 で小規模な がけ崩れ	呉市付近 150~200mm	小規模がけ崩れが数箇所発生した呉市では $R=150\sim 200\text{mm}$ で、がけ崩れの基準値とよく合う。県内最大値は旧加計町の 245.3mm だが、付近で土石流の発生はない。
③2005年 (台風14号)	広島県西部 旧佐伯町 旧湯来町 旧宮島町	風化花崗岩 中生層 (粘板岩、 輝緑凝灰岩)	土石流 13 件 地すべり 1 件 がけ崩れ 7 件	(国)大谷 最大 530.4mm	土石流は $R \geq 250\text{mm}$ の範囲にのみ分布。中生層地域では最大 530.4mm に達したが、降雨のわりに被害が小さい。宮島では近年の台風での風倒木の影響が疑われる。
④2006年 (台風13号)	広島県 安芸高田市 安芸太田町	風化花崗岩 (まさ土) 流紋岩 中生層 (主に粘板岩)	土石流 8 件 がけ崩れ 11 件	(県)八千代 最大 436.2mm	土石流は $R \geq 300\text{mm}$ 程度の範囲に分布。風化花崗岩分布域と比べると中生層や硬質流紋岩の分布域では、あまり流動性の高くない土砂移動現象が多い。
⑤2006年 7月18日	広島県 庄原市	高田流紋岩 吉舎安山岩	がけ崩れ 8 件 道路災害 25 件	(県)高野 最大 324.0mm	流紋岩、安山岩が分布する地域で $R=324.0\text{mm}$ の豪雨。がけ崩れや道路災害が発生したが、土石流のような流動性の高い土砂移動はなく、まさ土域よりも被災程度は小さい。
⑥2008年 8月29日	広島県 三原市 福山市	風化花崗岩 (まさ土) 中生層 など	小規模崩壊・土 砂流出が数件 下流域で浸水	(県)吉田 最大 282.7mm	未曾有の短時間集中豪雨だが、大規模な土砂移動現象はない。先行降雨を伴わない短時間強雨時では、流動性の高い土砂移動現象は発生しにくいものと考えられる。
⑦2004年 10月20日 (台風23号)	岡山県 玉野市	風化花崗岩 (まさ土)	土石流を含む 14 箇所の土砂 災害	(Γ)玉野 最大 258.9mm	岡山県の風化花崗岩分布域においても、 R' が良好に適用できる。事例では時間雨量は 20~30mm/h 程度であったが、先行降雨により $R' > 250\text{mm}$ となっている。
⑧2005年 (台風11号)	神奈川県 箱根町	箱根火山岩類 (更新世 ~完新世)	土砂災害 8 件 (温泉施設被害)	(Γ)箱根 最大 688.5mm (R_1, R_2)= (750,250)時	神奈川県の火山地帯。広島 of 既往雨量を大きく上回る豪雨があった。係数を変更した雨量指標 R' により、危険領域を矛盾なく表現できた。被害は、豪雨規模のわりに小さい。

※ (Γ)は気象庁アメダス、(国)国土交通省所管、(県)は広島県所管の雨量観測所を示す。

- ① 風化花崗岩を主体とする地域で甚大な被害が発生した 1988 年の広島県北西部の災害では、土石流が発生した領域は $R' \geq 250\text{mm}$ となる範囲とよく一致している。また、呉市で数箇所のがけ崩れが発生した 2004 年台風 10 号の事例では、この地域の R' 値は 150~200mm となっている。これらは、第 2 章で検討した基準値とよく合っている。
- ② 2005 年台風 14 号の事例で大雨が降った範囲は、風化花崗岩（まさ土）分布域と中古生層分布域にまたがっている。土石流はすべて $R' \geq 250\text{mm}$ の地域で発生しているが、中古生層地帯に比べて、風化花崗岩分布域の方が土石流や崩壊が発生しやすい傾向が見られた。特に強い雨が降った範囲は中古生層優勢の地域であり、 R' は 6.29 災の時に被害地域で降った雨よりも大きかったが、6.29 災に比べると被害程度は小さかった。
- ③ 廿日市市宮島町の事例からは土砂移動現象発生にはその降雨や地域の持つ特性に加えて、他の条件（過去の台風などによる斜面のダメージ）も関係している可能性が指摘できる。
- ④ 2006 年台風 13 号の事例においても、土石流発生は $R' \geq 300\text{mm}$ 、崩壊発生は $R' \geq 150\text{mm}$ に分布しており、これまでの事例と合致する。豪雨を記録した地域は、花崗岩、流紋岩、中古生層の境界領域であったが、まさ土状に強風化した花崗岩（および一部流紋岩）の分布域では流動性の高い崩壊や土石流が多く発生し、粘板岩や硬質流紋岩の分布域においては細粒分の少ない石礫堆を形成する崩壊が多く見られた。
- ⑤ このときには、県西部でも $R' = 350\text{mm}$ を超える豪雨が観測されているが、この地域では目立った災害は報告されていない。これは、すでに 2005 年の台風 14 号の時に同程度以上の豪雨を経験していることが大きな原因と考えられる。
- ⑥ 2006 年 7 月 18 日の豪雨により県内で最も多くの雨が降ったエリアでは、最大 $R' = 324.0\text{mm}$ を記録し、がけ崩れや道路災害が発生した。これは風化花崗岩分布域であれば土石流の基準雨量を大きく超えているが、流紋岩類と安山岩類を主体とするこの地域では、土石流などの流動性の高い土砂移動は発生していない。
- ⑦ 2008 年 8 月 29 日、広島県三原市～福山市において未曾有の短時間集中豪雨を記録した。これにより短時間ではあるが僅かなエリアで $R' = 250\text{mm}$ を超えた。付近ではいくつかの小規模な土砂流出や崩壊があったが、大規模な土砂移動現象は発生していない。このことから、先行降雨を伴わない短時間強雨時では、土石流などの流動性の高い土砂移動現象は発生しにくいものと考えられる。
- ⑧ このとき豪雨域の下流にあたる福山市では、河川の水位が急激に上昇し、道路の冠水や家屋への浸水被害があった。このことは、先行降雨を伴わずに短時間に集中して降った

降雨は、地中にあまり浸透せずに表流水として河川に流出しやすく、急激な増水や鉄砲水、フラッシュフラッドなどの原因となりやすいことを示唆している。これは第3章の現地モニタリングおよび室内人工降雨実験の結果と調和的である。

- ⑨ 2004年台風21号,23号の事例では、岡山県の風化花崗岩分布域や強風化流紋岩地帯においても、 R' を用いて降雨と災害発生との関係を良好に示すことができることがわかった。台風23号の事例では、災害発生時間帯の1時間雨量は20~30mm程度であったが、先行降雨の影響を考慮した R' を適用すると $R'=250\text{mm}$ を超える大きな値を示す。
- ⑩ 2005年台風11号による神奈川県での災害では、これまでに広島周辺で土砂災害が発生した時の雨量規模を大きく上回る豪雨があった。しかし、係数を変更した雨量指標 R' を用いることにより、危険な領域を矛盾なく表現することができた。この事例においても、時間ごとにリアルタイムにつくった R' 分布図が、危険なエリアの把握のために非常に効果的であった。
- ⑪ この災害での神奈川県における土砂災害の発生件数は8件で、豪雨規模が非常に大きかったわりには少ない被害ですんでいる。対象区域は更新性~完新世の火山岩地帯で、地質条件など地域特性が大きく異なることから、これらの要因により災害が発生する降雨条件が異なることが推察される。
- ⑫ これらの事例から、 R' を雨量指標として用いることの有用性、 R' 分布図を用いてリアルタイムで危険な区域を表示することの有効性が確認されたが、その係数や土砂移動現象の目安となる値は地域により異なり、警戒避難指標として運用するためには個別の検討が必要であることがわかった。地域特性や地質条件の違いによって、それに応じた係数や基準値を設定すれば、雨量指標 R' は広く適用できるものと考えられる。

【引用文献】

- 1) 広島県(1988)：昭和 63 年 7 月 20 日～21 日県北西部豪雨災害（速報版），49p.
- 2) 広島県 (1997)：広島県砂防災害史，209p.
- 3) 中国新聞社編(1989)：集中豪雨を追う一昭和 63 年 7 月加計，浜田災害一，溪水社，108p.
- 4) 栃木省二(1989)：昭和 63 年度 7 月豪雨による土砂災害の調査研究，1988 年 7 月島根・広島豪雨災害の調査研究，文部省科学研究費 No.63115045，突発災害調査研究成果，pp.38-52.
- 5) 地盤工学会中国支部台風 14 号災害緊急調査団 (2005)：中国地方における平成 17 年台風 14 号の土砂災害について，土と基礎，Vol.53, No.12, pp.125-130.
- 6) 海堀正博，浦 真，吉村正徳，藤本英治(2006)：2005 年 9 月 6 日広島県宮島で発生した土石流災害，砂防学会誌，Vol.58, No.5, pp.18-21.
- 7) 海堀正博，中井真司，大本直樹，森田耕司，作野裕司(2006)：2005 年台風 14 号による広島での土砂災害とその原因，第 3 回土砂災害に関するシンポジウム論文集，土木学会西部支部，pp.187-192.
- 8) 栗原淳一，武澤永純，山越隆雄，田方智，小田晃，長谷川祐治(2007)：2006 年等に発生した鉄砲水に関する流出特性について，自然災害学会，J.JSNDS, 26-2, pp.149-161.
- 9) 松村和樹，海堀正博，水原邦夫，末峯章，戎信宏，野呂智之，山越隆雄(2005)：2004 年台風 23 号における岡山県玉野市，香川県さぬき市周辺の土砂災害(速報)，砂防学会誌，Vol.57, No.6, pp.40-46.

第5章 予測手法への地域特性の反映

第4章で検討した災害事例においても、土砂移動現象はすべて6.29災などの事例をもとにした R' の基準値を超えた領域で発生している。しかしながら、発生降雨の基準値や発生する土砂移動現象のタイプは、近隣地域であっても降雨履歴や地質条件など地域特性によって異なるものである。広島県の平均の年降水量は1,200mm/年～2,300mm/年程度と、2,500～3,000mm/年以上の年降水量がある九州南部や四国南部と比べるとさほど多くない（図-5.1）。しかし、県土の70%以上が山地・丘陵で、風化花崗岩（まさ土）が広く分布するなどの地形・地質的素因から、土砂災害が起こりやすい場所であることが知られている。

ここでは、降雨履歴と災害発生の関係、地質と災害発生の関係、地形と災害発生の関係、および地震による影響について考察する。

5.1 降雨履歴と土砂移動現象の関係

5.1.1 広島県の降雨履歴と土砂移動現象

全体的にはあまり雨量の多くない広島県においても、県南東部と県北西部では平均降水量に2倍弱の格差があるため（図-5.1）、県内であっても、地域ごとの降雨特性により土砂移動現象の発生に対する耐力にも違いがあるものと考えられる。

表-5.1、表-5.2はT0514災害、T0613災害および6.29災で多くの雨が降った広島市佐伯区湯来町の国土交通省大谷観測所（第4章、図-4.4中のC地点）、安芸高田市八千代町の国土交通省土師観測所（第4章、図-4.4中のD地点）、および気象庁アメダス呉観測所（第4章、図-4.4中のE地点）を例にとり、2002年から2006年の5年間の降雨履歴を比較したものである。

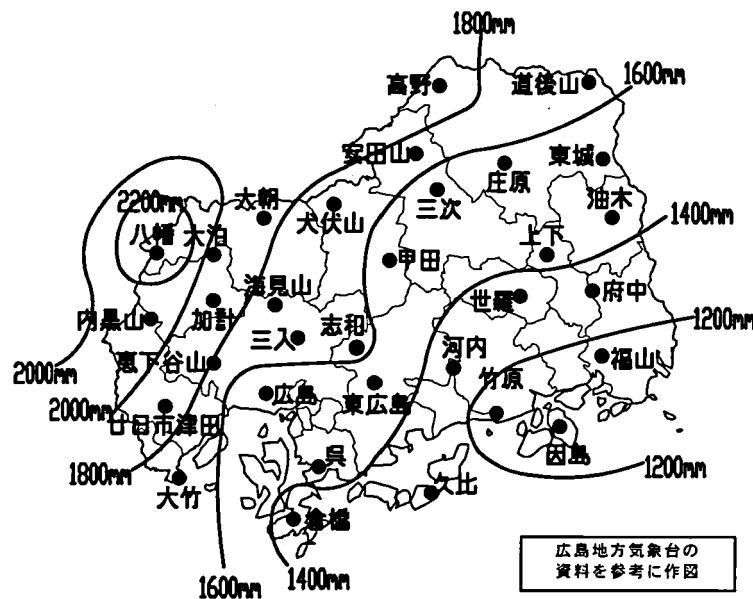


図-5.1 広島県の平均年降水量の分布図

Fig. 5.1 Distribution of an annual rainfall in an average year in Hiroshima Prefecture

表-5.1 2002-2006年の降雨履歴の比較

Table 5.1 Comparison of rainfall histories from 2002 to 2006

指標	大谷	土師	呉
最大1時間雨量 (mm)	65	52	44
最大24時間雨量 (mm)	418	291	208
最大 R'値 (mm)	530.5	431.5	293.7
5年間の総雨量 (mm)	12,469	8,130	7,046

表-5.2 2002-2006年に記録した R'階級の度数

Table 5.2 Frequency of each R'-rank from 2002 to 2006

R'値 (mm)	度数 (回)		
	大谷	土師	呉
150 以上 ~ 200 未満	10	5	5
200 ~ 250	4	2	1
250 ~ 300	1	—	1
300 ~ 350	1	—	—
350 ~ 400	1	—	—
400 ~ 450	—	1	—
450 ~ 500	—	—	—
500 ~ 550	1	—	—
計	18	8	7

比較の結果、大谷観測所では5年間の総雨量が他の観測所の1.5倍程度となっているほか、様々な指標においても、他の観測所よりも大きな値を示している。また、大谷観測所では5年間に $R'=150\text{mm}$ 以上となる降雨が18回もあり、うち4回は $R'=250\text{mm}$ を超えている。しかしながら、この地域で土石流災害が発生したのはT0514災害の時（最大 R' 値は 530.5mm ）のときのみである。

このことから、6.29災で被害が大きかった広島市や呉市周辺で災害発生につながる限界降雨量に相当する $R'=250\text{mm}$ という値は、大谷観測所周辺にとってはあまり大きな降雨とはいえず、この地域の土石流災害に対する限界降雨量は $R'=250\text{mm}$ よりも相当大きい値であることが推察される。

5.1.2 生起確率を用いた評価

地域ごとの降雨履歴を雨量指標 R' の生起確率を用いて評価するために、確率雨量指標 R' 値を求める。降雨量などの頻度分布の形は、左右対称である正規分布とは異なり独特の分布形状を呈している¹⁾。このような水文気象データの分布には、対数正規分布や極値分布、指数分布などがあるが^{2)~4)}、最大値分布の第1形式として、水文統計解析で数多く適用されている Gumbel 分布による極値分布を用いる。

なお、中村ら⁵⁾によると、Gumbel の極値分布に従った再現期間と期待値の関係は資料年数の有限性を考慮すると式(5.1)で求められる。ここでは、この式を用いて再現期間 5 年～100 年の R' の期待値を求めた。

$$V_T = \bar{V} - \frac{S_v}{S_y} \bar{Y} + \frac{S_v}{S_y} \left[-\ln \left\{ -\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right\} \right] \dots\dots(5.1)$$

ここに、

- T : 再現期間 (年)
- V_T : 再現期間 T 年の最大 R' の期待値
- \bar{V} : 資料年数 N 年の最大 R' の平均値
- S_v : 資料年数 N 年の最大 R' の標準偏差
- S_y : y_i の標準偏差
- \bar{Y} : y_i の平均値

ただし、 $y_i = -\ln \left\{ -\ln \left(\frac{i}{N+1} \right) \right\}$

- N : 資料年数
- i : データの大きさの順位
($i = 1, 2, 3, \dots, N$)

表-5.3 再現期間ごとの雨量指標 R' の期待値
Table 5.3 Expected values of rainfall index R' in each return period

	呉	内黒山	八幡
5 年	247.8mm	270.2mm	310.3mm
10 年	294.2mm	317.5mm	368.0mm
30 年	364.2mm	389.0mm	455.1mm
50 年	396.2mm	421.7mm	494.9mm
100 年	439.4mm	465.7mm	548.6mm

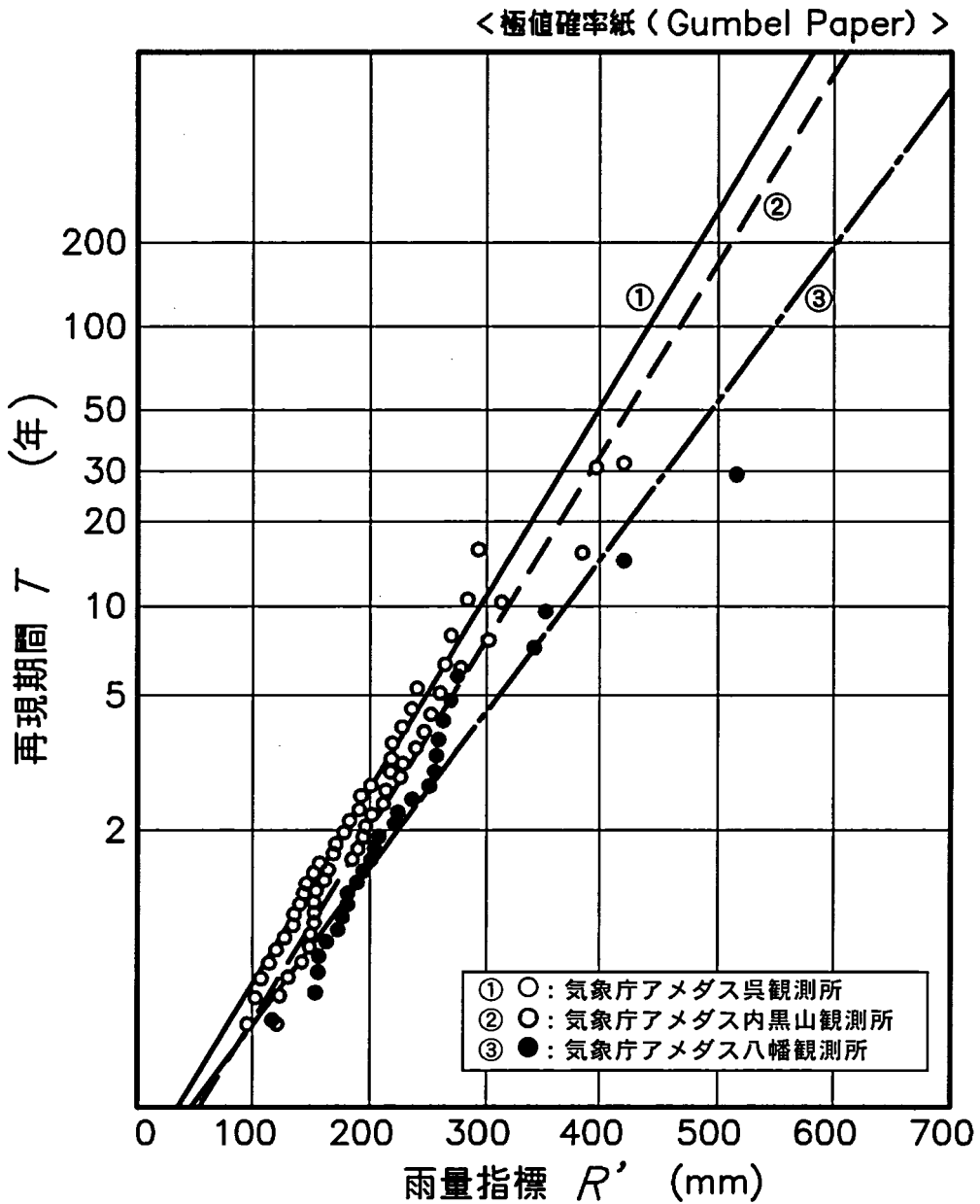


図-5.2 雨量指標 R' の再現期間と期待値 (Gumbel 分布)

Fig. 5.2 Return period and expected values of rainfall index R' (on Gumbel's distribution)

表-5.3, 図-5.2 に, 気象庁のアメダス観測所「呉」, 「内黒山」, 「八幡」のデータ (位置は図-5.1 参照) を用いた再現期間と期待値の関係を示す。なお, 解析にあたっては呉では 31 年分, 内黒山では 30 年分, 八幡では 28 年分の時間雨量データを用いた。

この結果からも, 県西部～北西部では呉地域などの瀬戸内海沿岸に比べ大きな降雨履歴を持つことが検証され, 災害の誘因としての降雨を評価する雨量指標 R' の生起確率も大きく異なることがわかった。

5.1.3 土石流発生に対する R' の基準値の検討

これまで 6.29 災などの災害事例をもとに土石流発生に対する R' の基準値を 250mm としてきた。しかし、実際の発生限界降雨量は地域により違いがあり、発生下限値を示す $R'=250\text{mm}$ という値は図-5.3 の A 地点や B 地点に該当するもので、土石流に対する発生限界降雨量が小さな場所に対応したものであると考えられる。

図-5.4 に、広島県内の $R'=250\text{mm}$ に相当する雨量の再現期間の分布図を示す。算出にあたっては県内 32 箇所のアメダス観測所の 28~31 年間の観測データを用いた。

この図から、 $R'=250\text{mm}$ という値は 6.29 災の時に比較的小さな雨で土石流が発生した場所（図-5.4 の A 地点や B 地点；図-5.3 で示したものと同一箇所）においては、再現期間 8 年程度の降雨であるといえる。一方、広島県の西部域においては 5 年に満たない再現期間であり、広島や呉周辺の倍近くの確率で発生する降雨であることがわかる。

図-5.5 に、同データから求めた 8 年確率雨量指標 R' の分布図を示す。8 年確率とは、6.29 災の事例で土石流発生降雨の下限値と評価したものと同程度の確率である。この図を見ると、8 年確率の R' 値は、6.29 災の時に被害が大きかった広島市西部や呉地域（図-5.3 参照）では 260~270mm 程度であり、2005 年の台風 14 号災害時に被害のあった広島県の西部~北西部（第 4 章、図-4.4 参照）においては 300~320mm にのぼることがわかる。

図-5.3 や第 4 章の図-4.4、図-4.5 に示される R' 値の分布と土石流発生箇所をみると、6.29 災や 2005 年の台風 14 号災害、2006 年の台風 13 号災害の時には 8 年確率程度の R' 値を土石流の発生限界降雨量と考えて基準値を設定するのが適切であることがわかる。

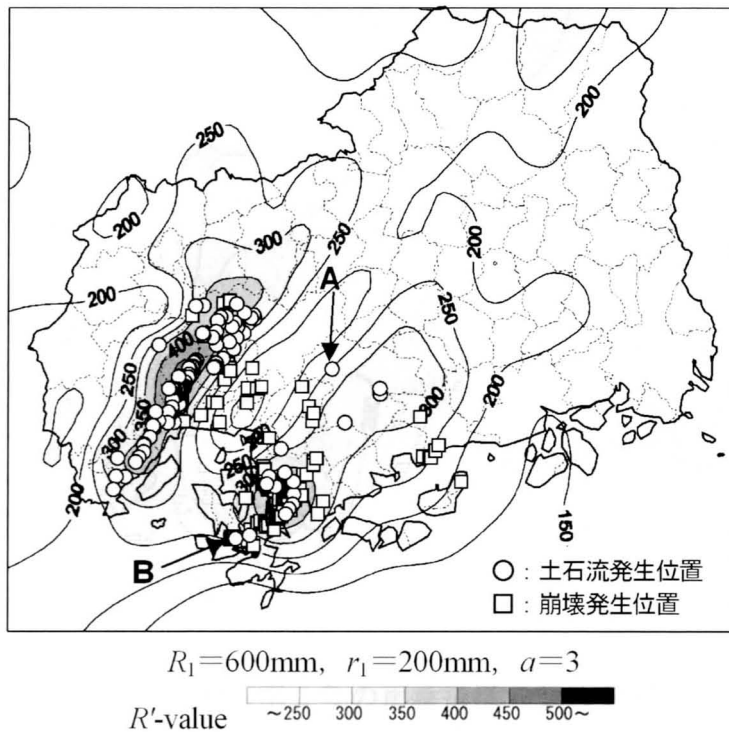


図-5.3 1999年6月29日(6.29災時)の R' 最大値の分布
 Fig. 5.3 R'_{\max} -distribution map (in Hiroshima Prefecture on June 29, 1999)

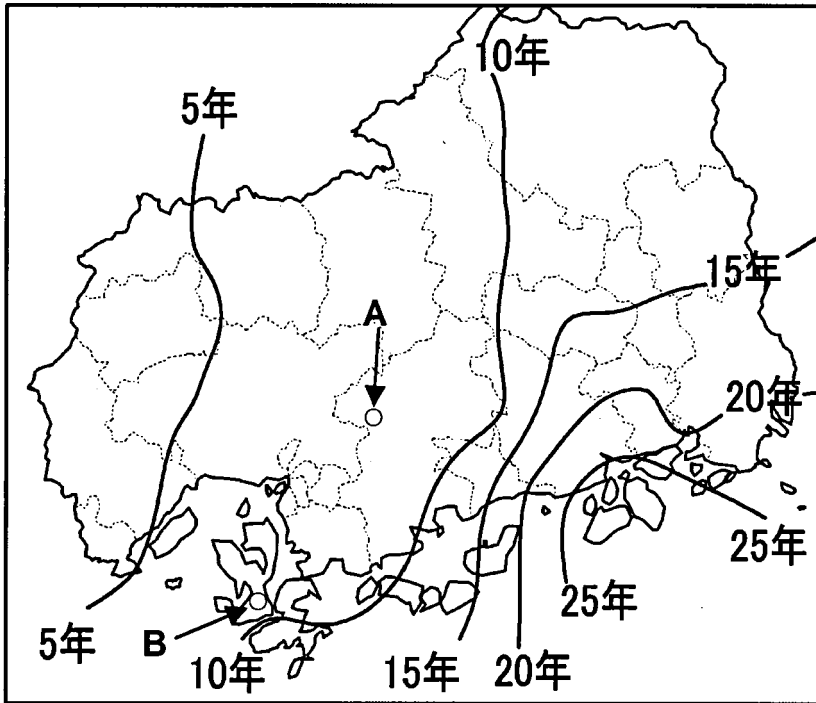


図-5.4 $R'=250\text{mm}$ の再現期間の分布図
 Fig. 5.4 Distribution of the return period at $R'=250\text{mm}$

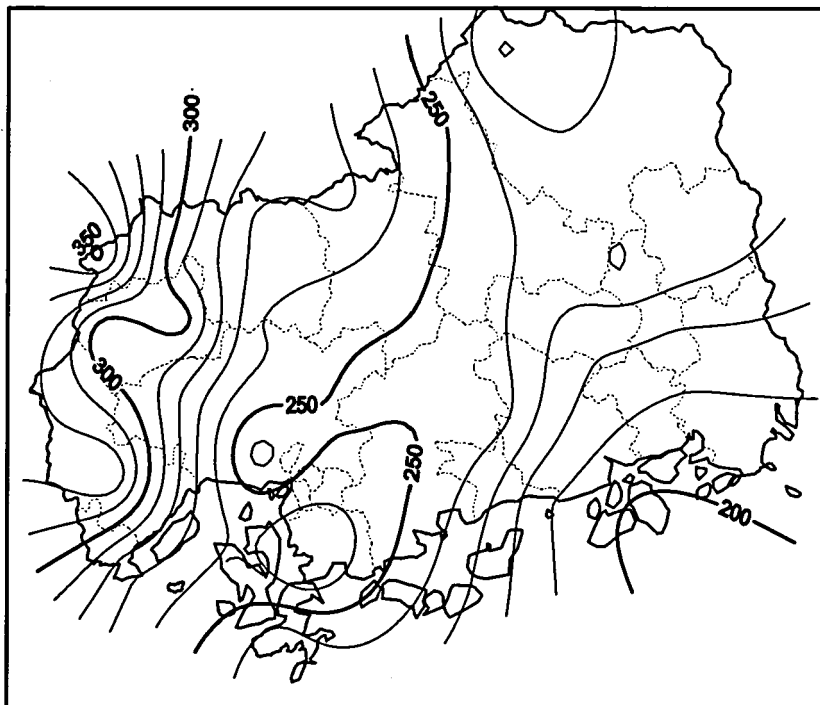


図-5.5 生起確率 8 年の雨量指標 R' 値の分布図
 Fig. 5.5 Distribution of an expected R' -values in a return period of 8 years

5.2 地質特性と土砂移動現象の関係

本章の冒頭でも述べたが、広島県は九州南部や四国南部と比べると降雨量はさほど多くないが、山地・丘陵がちな地形的素因や、風化花崗岩（まさ土）が広く分布するなどの地質的素因から、土砂移動現象が起こりやすい場所であることが知られている。

日浦・海堀ほか⁶⁾は2004年台風10号災害の四国南部の調査報告で、半減期72時間の実効雨量が350mmを超えたときにおいても、その時点では災害につながるような土砂移動現象が発生していなかったことを報告している。このとき、四国南部で土石流などの甚大な災害が発生した時点では、半減期72時間の実効雨量は950mmを超えており、第2章の表-2.1にあげた広島県の事例に比べると極めて大きな値である。同報告では、土砂災害が発生した地域は全て堆積岩の分布地帯であったことが示されている。前節で地域ごとの災害に対する耐力の違いを、降雨履歴を用いることにより検討したが、それに加えて分布地質の違いによるところも大きいと考えられる。

第4章の検討ケースを見ると、広島県においても2005年の台風14号の際には、中古生層の堆積岩分布地帯に比べて、まさ土地帯の方が土石流や崩壊が発生しやすい傾向が見られた。また、神奈川県箱根町の火山岩分布地帯で土砂移動現象が発生した2005年台風11号の時も、周辺の降雨量は広島県周辺のまさ土地帯の災害発生基準値よりもはるかに大きな値であった。

これらの事例から、その地質特性は土砂移動現象の起こりやすさを決定付ける大きな要因であると考えられる。ここでは地質特性と災害発生の関係について考察する。

5.2.1 広島県の地質特性と土砂移動現象

広島県の地質は、中生代白亜紀の花崗岩（広島花崗岩類）及び流紋岩（高田流紋岩類）が広く分布し県下のほぼ70%を占める（図-5.6）。特に花崗岩は48%を占め分布率の高さは全国1位である⁷⁾。これ以外の地質では、県北東部の帝釈付近一帯には石灰岩が分布し（図-5.6中のA付近）、それらに接して南北には砂岩、粘板岩、チャートなど、旧吉舎町付近にかけては吉舎安山岩類が見られる（同B付近）。また、県西部の旧吉和村から旧湯来町にかけては緑色岩及び粘板岩が分布し（同C付近）、旧加計町から広島市安佐北区にかけての太田川沿いには粘板岩が見られ（同D付近）、このような粘板岩及び緑色岩類は県東部の福山及びその周辺部にも見られる。島嶼部では花崗岩の上部にルーフペンダントで粘板岩が分布している箇所も見られる。

中生代白亜紀後期に進入したとされる広島県南部から西部一体に分布する花崗岩類は広島花崗岩と呼ばれ、その分布を東に追うと岡山県南部まで、西方へは山口県東部、西北部では島根県まで達し、東西230km、南北は東部では50km、西部では100kmに及ぶ日本最大の連続貫入帯である⁸⁾。広島花崗岩類の多くは、粗粒の黒雲母花崗岩で石英、カリ長石、斜長石、黒雲母などの鉱物から構成される。粗粒のものはとくに黒雲母と斜長石が容易に化学的風化を受け二次鉱物としての粘土鉱物に変質する。また断層や節理などの割れ目が多く、これに水が浸み込むと深部まで化学的変質が進行し、いわゆる「まさ土」と呼ばれる風化花崗岩となる。

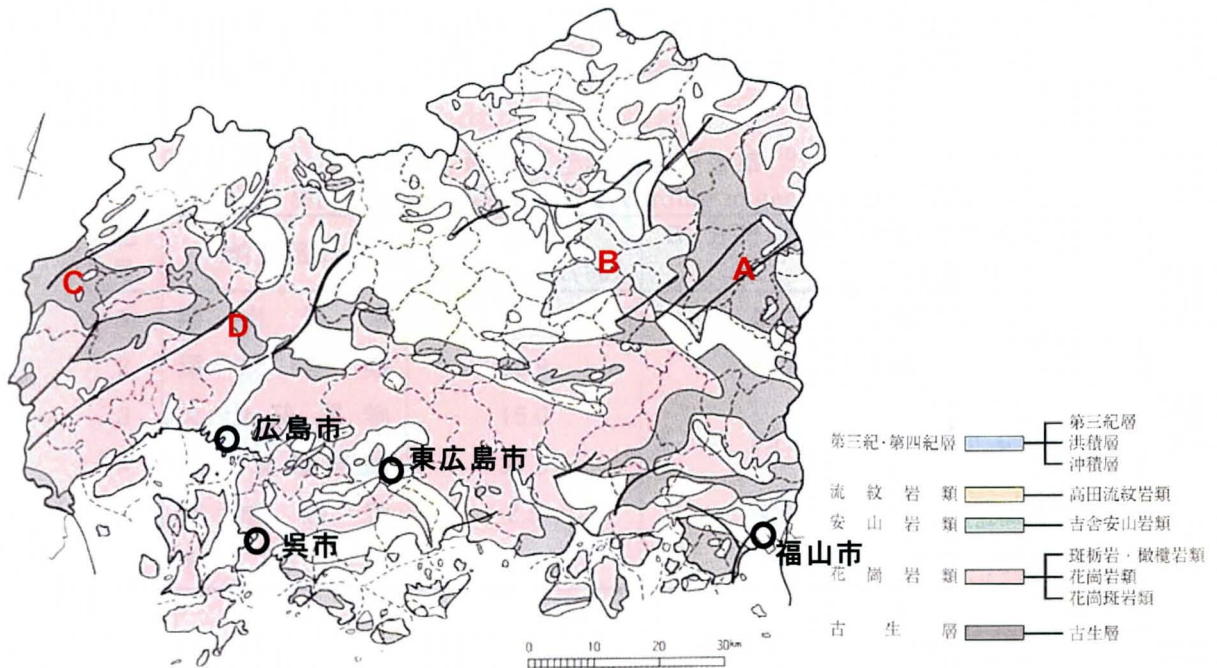


図-5.6 広島県の概略地質図⁷⁾に一部加筆
 Fig. 5.6 Geologic map of Hiroshima Prefecture

まさ土は、分布地域によって鉱物組成の変化が多いことや、風化の程度によって粒径や強度、透水性が異なることから地盤工学上は特殊土と分類され、一般的な土砂と比べると鉱物種などの一次的要素が工学的性質に及ぼす影響が大きいとされている。なお、広島花崗岩などの白亜紀型花崗岩類は、粘着力が少なく、透水性は大きいが表面侵食を受けやすい特性を有している⁹⁾。

花崗岩は、風化してまさ土になると豪雨により崩壊を起こしやすい地質として知られている。渡¹⁰⁾は1972年から1974年に発生した地質区分ごとの崖崩れの比率と地質の面積分布率を求め、地質区分ごとの崩壊発生率を示している(表-5.4)。これによると、花崗岩などの深成岩類域の崩壊発生率は2.62%と他の地質域の3倍以上(他は1%未満)となっている。この傾向は広島県においても顕著で、佐々木ら¹¹⁾が作成した広島県内の戦後の土砂災害被災地をプロットした図(図-5.7)や、近年広島県南西部で発生した比較的規模の大きい災害が発生した位置を、地質調査所発行の1:20,000地質図¹²⁾上にプロットした図(図-5.8)を見ても、この地域の土砂災害の大部分が花崗岩地帯で発生していることがわかる。なお、図-5.8で対象とした災害は1982年に中津岡川流域で発生した土石流^{13),14)}、6.29災で発生した土石流とがけ崩れ、および2005年台風14号が発生した土石流である。また、栃木¹⁵⁾による1988年7月の広島県北西部豪雨災害(63災)調査では、花崗岩地帯で181箇所、泥質岩地帯で61箇所、流紋岩地帯で10箇所の崩壊が発生したとされている。このときの1箇所あたりの崩壊土量は花崗岩地帯では95m³、泥質岩地帯では89m³、流紋岩地帯では68m³と花崗岩地帯でもっとも多かったことが報告されている。

千木良¹⁶⁾は、花崗岩と火砕流凝灰岩の分布域を特に豪雨によって崩壊が多数発生する地

域と指摘し、その原因をこれらの岩石の風化のしかたにあるとして、マイクロシーティングの存在などを挙げている。また、北川^{17),18)}は、花崗岩中の粘土細脈（粘土シーム）の存在を挙げ、これを崩壊のきっかけになりうる大きな要因の1つと指摘している。

表-5.4 地質ごとの崩壊発生率¹⁰⁾
Table 5.4 Slope failure possibility according to geological features

記号	地質区分	A. 崖崩れ (47~49年)(%)	B. 分布面積 (%)	崩壊発生確率 A/B(%)
1	噴出岩類	13.2	26.7	0.49
2	深成岩類	30.9	11.8	2.62
3	火山碎屑物	15.0	} 55.9	} 0.85
4	水成堆積岩類	31.9		
5	変成岩類	2.5	4.6	0.54
	その他	6.5	1.6	0.25

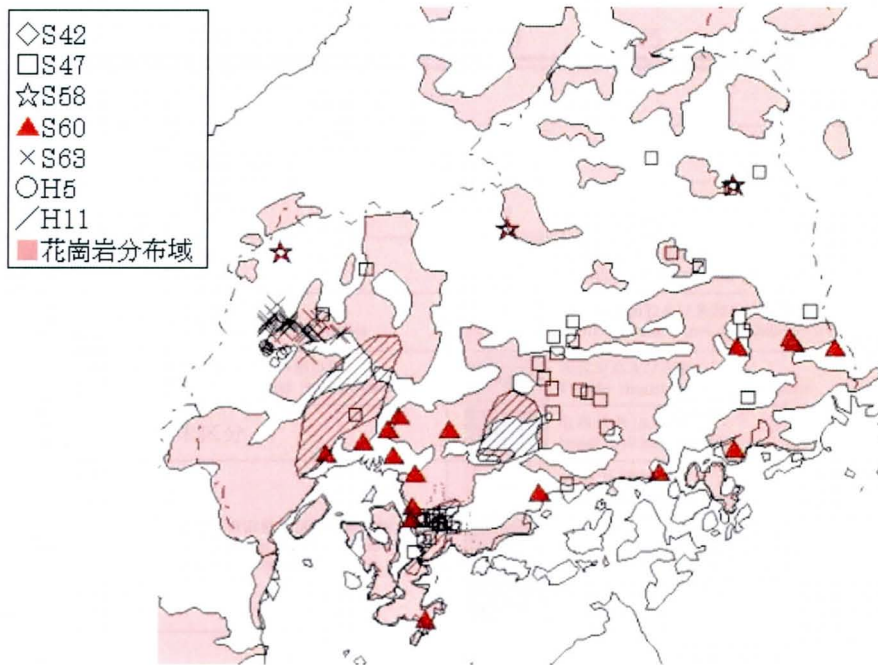
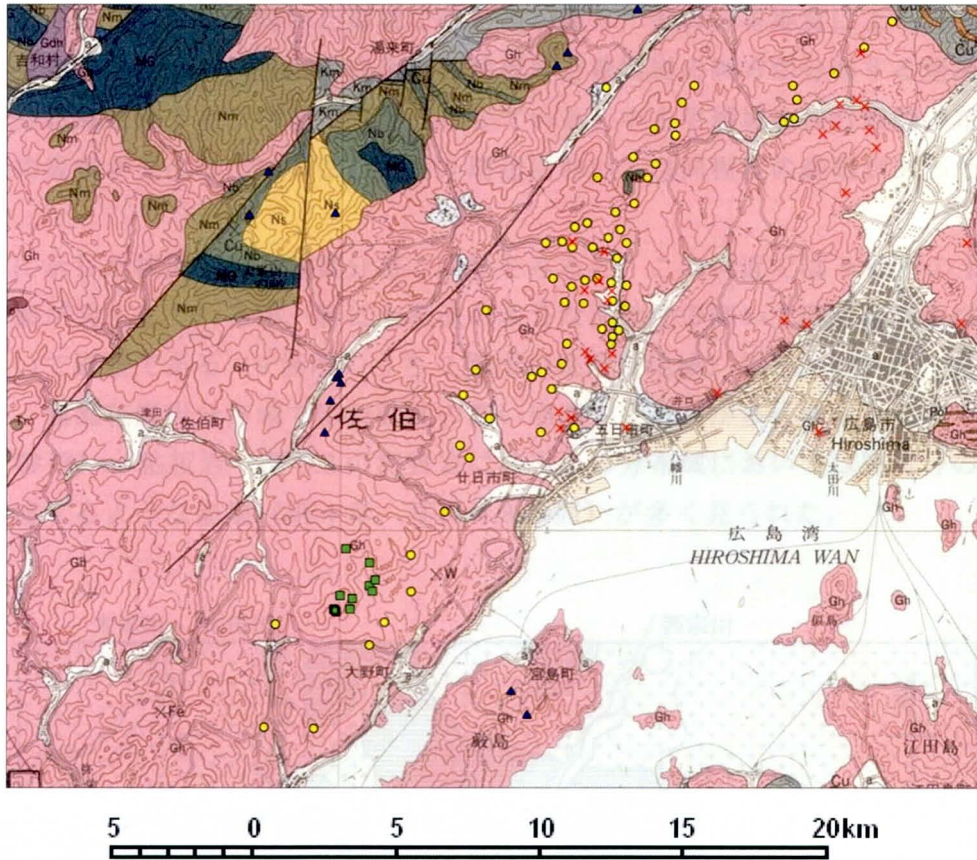


図-5.6 広島県内の戦後の土砂災害被災地と花崗岩類分布域¹¹⁾
Fig. 5.6 Relationship between sediment-related disaster points and granite area



第四紀	埋立地 Reclaimed land	r	
	沖積層 Alluvium	a	礫・砂及び泥 Gravel, sand and mud
白亜紀	岩脈 Dikes	Gph	花崗斑岩及び文象斑岩 Granite porphyry and granophyre
ジュラ紀	広島花崗岩類 Hiroshima Granitic Rocks	Gh	黒雲母花崗岩及び角閃石黒雲母花崗岩 Biotite granite and hornblende-biotite granite
	玖珂層群及びその相当層 Kuga Group and its equivalents	Km	礫質泥岩及び泥岩 Pebbly mudstone and mudstone
未区分		Nb	塩基性火山岩類 Basic volcanic rocks
二畳紀	錦層群・菊田層及びそれらの相当層 Nishiki Group, Karita Formation and their equivalents	Ns	砂岩及び礫岩 Sandstone and conglomerate
		Nm	泥岩（酸性凝灰岩層を挟む） Mudstone (intercalating acid tuff layers)
		MG	変斑れい岩及び変輝緑岩 Meta-gabbro and meta-dabase

図-5.7 広島県南西部で発生した災害と地質の関係

Fig. 5.7 Sediment-related disaster points plotted on geologic map
(Southern western part of Hiroshima Prefecture)

(素図には地質調査所発行の 1:20,000 地質図「広島図幅」⁷⁾を用いた)

- : 1982 年中津岡川流域で発生した土石流, ● : 6.29 災で発生した土石流
▲ : 2005 年台風 14 号出発生した土石流 × : 6.29 災で発生したがけ崩れ

なお、第4章で示した2006年の台風13号災害の事例では、山県郡安芸太田町と広島市の境界周辺の地質境界域を跨いだ領域で強い雨が降り、その分布地質により災害形態などに違いが見られた。この付近は、中生層の粘板岩と花崗岩の両方が分布する地域であり、中生層分布域を囲うように花崗岩が分布している。中生層域を挟む両側の花崗岩地帯で、同様の災害が発生していることから、周辺においては同程度の豪雨があったものと推察される。

図-5.8 に示した被災箇所と地質分布の関係をみると、この付近では9箇所の土石流と5箇所の崩壊が発生しているが、特に土石流のような流動性の高い土砂移動現象は花崗岩分布域において顕著である（9箇所のうち7箇所が花崗岩地域）ことがわかる。第4章にも述べたが、強風花崗岩分布域では流動性の高い崩壊や土石流が多く発生し（第4章、写真-4.6, 4.7 参照）、粘板岩（図-5.8 の泥質岩に該当）の分布域においては細粒分の少ない石礫堆を形成するような崩壊（第4章、写真-4.8 参照）が多く見られた。

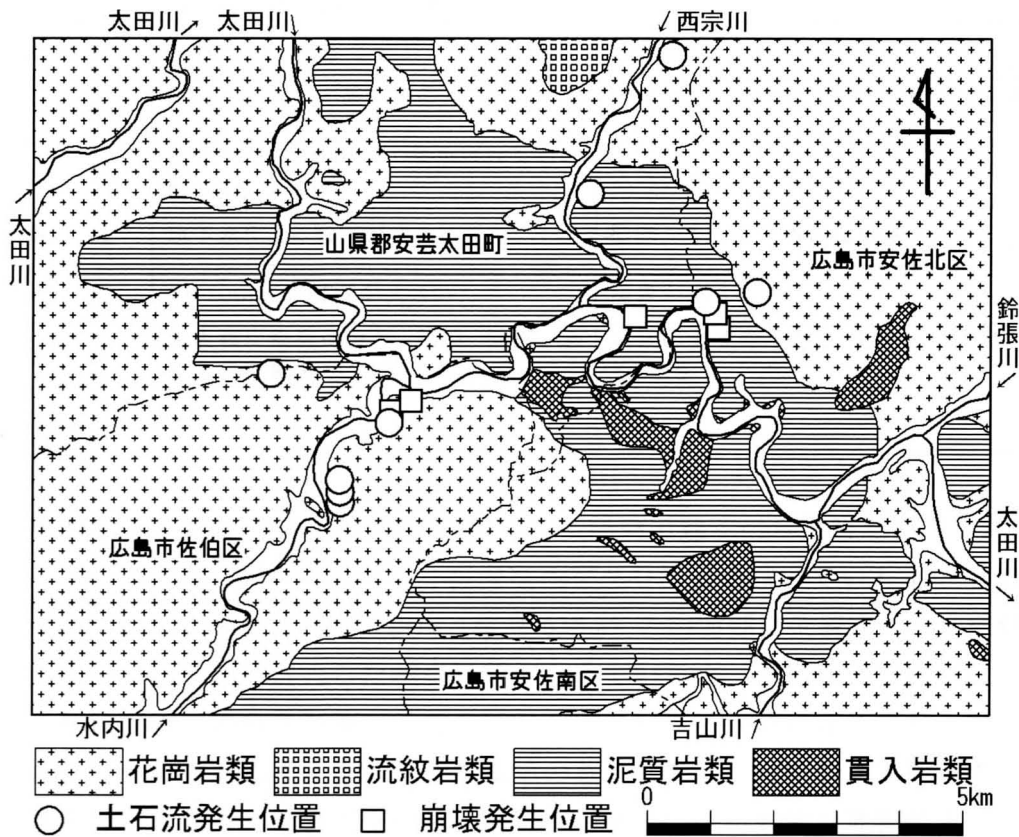


図-5.8 安芸太田町と広島市の境界付近の T0613 災害の被災箇所と地質分布
 Fig. 5.8 Damage locations and geological distributions on Typhoon Shanshan
 (Boundary region of Akiotamachi and Hiroshima City)
 (地質分布は広島県土地分類基本調査¹⁹⁾を参考にした)

5.2.2 地質構造と土砂移動現象

ここでは、広島県東部に位置する広島県世羅町の地すべり事例^{20),21)}を取り上げ、地質構造に起因する地すべりの滑動と降雨の関係について検討する。なお、ここで言う地すべりとは表-5.5に示すような、いわゆる粘性土をすべり面として緩斜面が比較的ゆっくりと動く現象を指し、まさ土地帯で頻繁に発生する表層崩壊（表-5.5の急傾斜地の崩壊に該当するもの）とは区別したものである。

表-5.5 地すべりと急傾斜地の崩壊
Table 5.5 Difference between "Landslide" and "Slope failure"
(渡らによる表²²⁾を一部修正)

	地すべり	急傾斜地の崩壊
1)地質	特定の地質または地質構造のところに多く発生する	地質との関連は少ない
2)土質	主として粘性土をすべり面として滑動する	砂質土(まさ, よな, しらすなど)のなかでも多く起こる
3)地形	5~30°緩傾斜面に発生し, 特に上部に台地状の地形を持つ場合が多い	30°以上の急傾斜地に多く発生する
4)活動状況	継続性, 再発性	突発性
5)移動速度	0.01~10mm/日のものが多く, 一般に速度は小さい	10mm/日以上で速度は極めて大きい
6)土塊	土塊の乱れは少なく, 原形を保ちつつ動く場合が多い	土塊は攪乱される
7)誘因	地下水による影響が大きい	降雨, 特に降雨強度に影響される
8)規模	1~100haで規模が大きい	規模が小さい
9)兆候	発生前に亀裂の発生, 陥没, 隆起, 地下水の変動等が生ずる	兆候の発生が少なく, 突発的に滑落してしまう
10)すべり面勾配	10~25°	35~60°

図-5.9の地すべり-1は2004年の台風23号による降雨で地すべり災害が発生した地区で、地すべり-2はその北約200mに位置する緩慢な地すべり活動を続けている地区である。

地すべり-1, 地すべり-2はともに新山(標高635m)の山麓部に位置する。世羅町周辺の地質は、大部分が白亜紀に侵入した花崗岩類が占めているが、市街地の北側には中生層の粘板岩、輝緑凝灰岩の分布がみられる。これらは花崗岩侵入時にルーフペンダントとして取り残されたものであると考えられる。対象地の基盤地質は、粘板岩を主体とする地層である。粘板岩は熱水変質の影響を受け、風化変質が著しい。特徴的な地質構造として、新山の山頂付近には第四系の火山活動による玄武岩ドームがキャップロック状に分布している(図-5.10)。この玄武岩は硬質な性状を持つが、マグマが固まる際に発生した亀裂が多く、地下水の貯留層となりやすい。

今回の地すべりにおいても、地下水の供給メカニズム等においてキャップロック構造が関係しており、山体上部で浸透した水が地下に貯留した地下水が、比較的長い期間にわたって地すべりブロック内に供給されているものと考えられる。

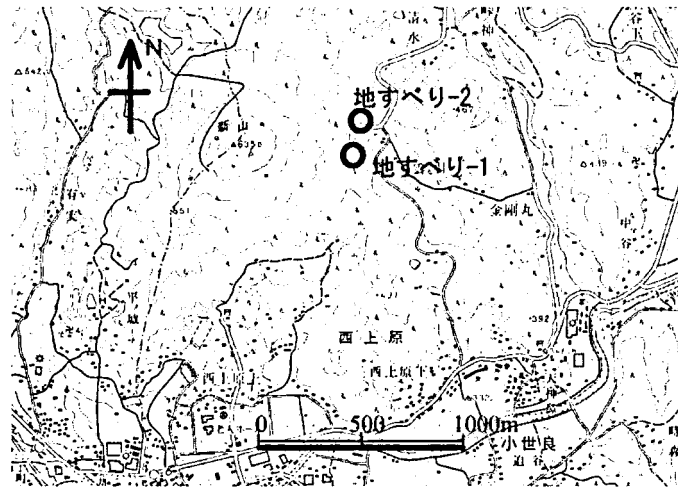


図-5.9 広島県世羅町新山周辺の地形と対象地すべりの位置
 Fig. 5.9 Location of examined landslide in topographical map

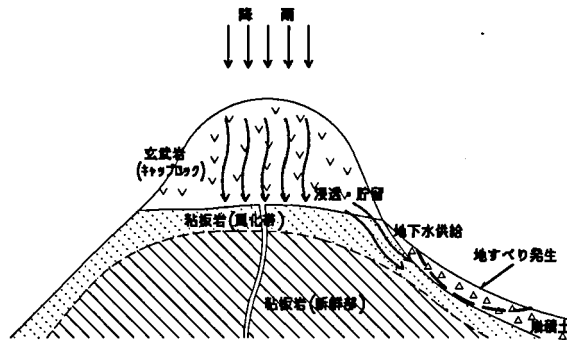


図-5.10 地すべり発生箇所の模式断面図
 Fig 5.10 Outline of a geological structure in a cross section of a landslide position

地すべり-1 が発生したのは 2004 年 10 月 20 日で、直近のアメダス世羅観測所の雨量では、最大 24 時間雨量 109mm、最大時間雨量 11mm であった。この観測所の 2000 年から地すべりが発生するまでの期間の最大時間雨量は 38mm (2000 年 10 月 9 日および 2001 年 8 月 24 日)、最大 24 時間雨量は 122mm (2001 年 6 月 20 日) であり、地すべり発生時の雨は決して未曾有のものではなかった。しかし、264 時間 (11 日) 以上の長い半減期を持つ実効雨量では、この降雨が 2000 年以降で最大となり²⁰⁾、480 時間 (20 日) 程度の半減期を用いると、近年では突出して危険な状態にあったことが表現できる (図-5.11)。

地すべり-2 は、観測結果から半減期 480 時間 (20 日) の実効雨量値が 150mm 以上のときに、日雨量 40mm 以上のまとまった雨があれば徐々に変動することがわかっている²¹⁾。ここで、長期指標に半減期 480 時間の実効雨量、短期指標に一連の降雨の規模を表す指標として 72 時間の実効雨量を用いて R' を算定すると、この地すべりでは $R' > 300\text{mm}$ 程度を変動の目安とすることができる (図-5.12)。

一般に、土石流やがけ崩れの危険指標としては、 R' の計算にも用いている 1.5 時間と 72 時間の半減期の実効雨量の組み合わせが用いられるが、この地すべり活動では長い半減期の実効雨量と一連の降雨規模を示す実効雨量を組み合わせることが有効であることがわかった。

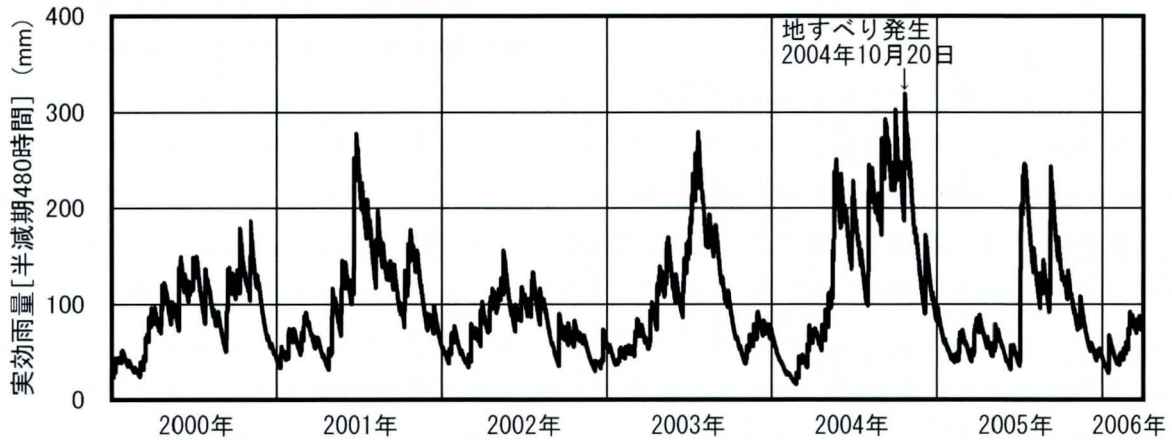


図-5.11 半減期 480 時間の実効雨量の推移 (2000 年 1 月～2006 年 3 月)
 Fig. 5.11 Transition of effective rainfall in 480 hours' half value period

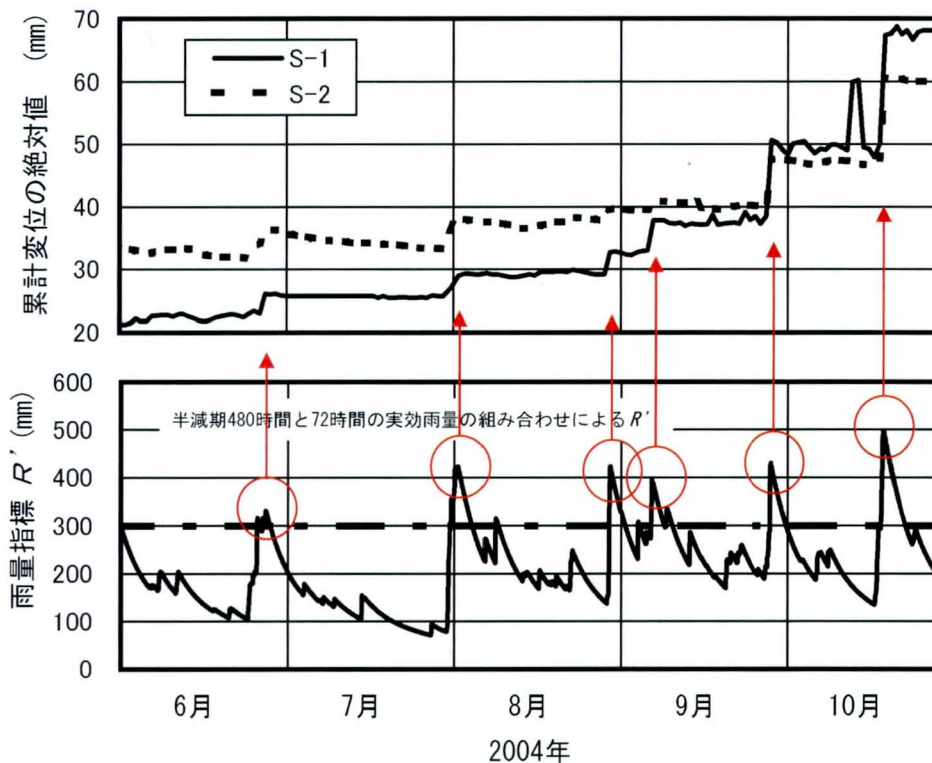


図-5.12 半減期 480 時間と 72 時間の組合せによる R' と地すべり変動の関係
 Fig. 5.12 Relationship between R' and landslide movement
 (R' is calculated using combination of 480 and 72 hours' half value period)

このように、地質構造によっては降雨による地下水変動傾向が大きく異なり、これによって土砂移動現象の発生メカニズムが大きく異なる地すべり現象が発生する可能性があることがわかった。

この事例のような土砂移動は、本研究の対象としているような広域的な予測手法で、一律に危険性を評価することは困難である。しかしながら、個々に降雨と変動の関係を調査すれば、 R' を用いて危険雨量を設定することが可能であると考えられる。

5.3 地形特性と土砂移動現象の関係

5.3.1 広島県の地形特性と土砂移動現象

広島県は中国地方のほぼ中央に位置し、北部は島根県及び鳥取県に、西部は山口県、東部は岡山県に接し、南部は瀬戸内海を挟んで愛媛県、香川県に相對している。中国地方の地形的な特徴として、図-5.17 に示されるように道後山面と呼ばれる脊梁面、吉備高原面、世羅台地面と呼ばれる中位面、瀬戸内面と呼ばれる低位面の3つの侵食小起伏面を持ち、巨視的には階段状の地形を呈することが知られている^{23),24)}など。小起伏面は高位より標高1,339mの冠山を中心とする県西部の冠山山地及び県北部一帯の中国山地とによって構成される脊梁山地面、その南に標高400~600mの世羅台地を中心とする吉備高原面、および瀬戸内面に大別できる。これらが移り変わる部分では、急な崖が形成され、三段峡、二河峡といった景勝地を生んでいる。特に吉備高原面と瀬戸内面の境界部分には、沿岸部の人口密集地と接するため、土砂災害対策上の重要部となっている。

広島県の主な地形の配列は、脊梁山地方向であるが、これと斜交または平行する北東-南西方向の開析が進み、直線的な谷・山列が発達している。また、北西-南東方向の直線谷もよく発達し、北東-南西方向と組み合わせあって菱形模様を形づくっている。

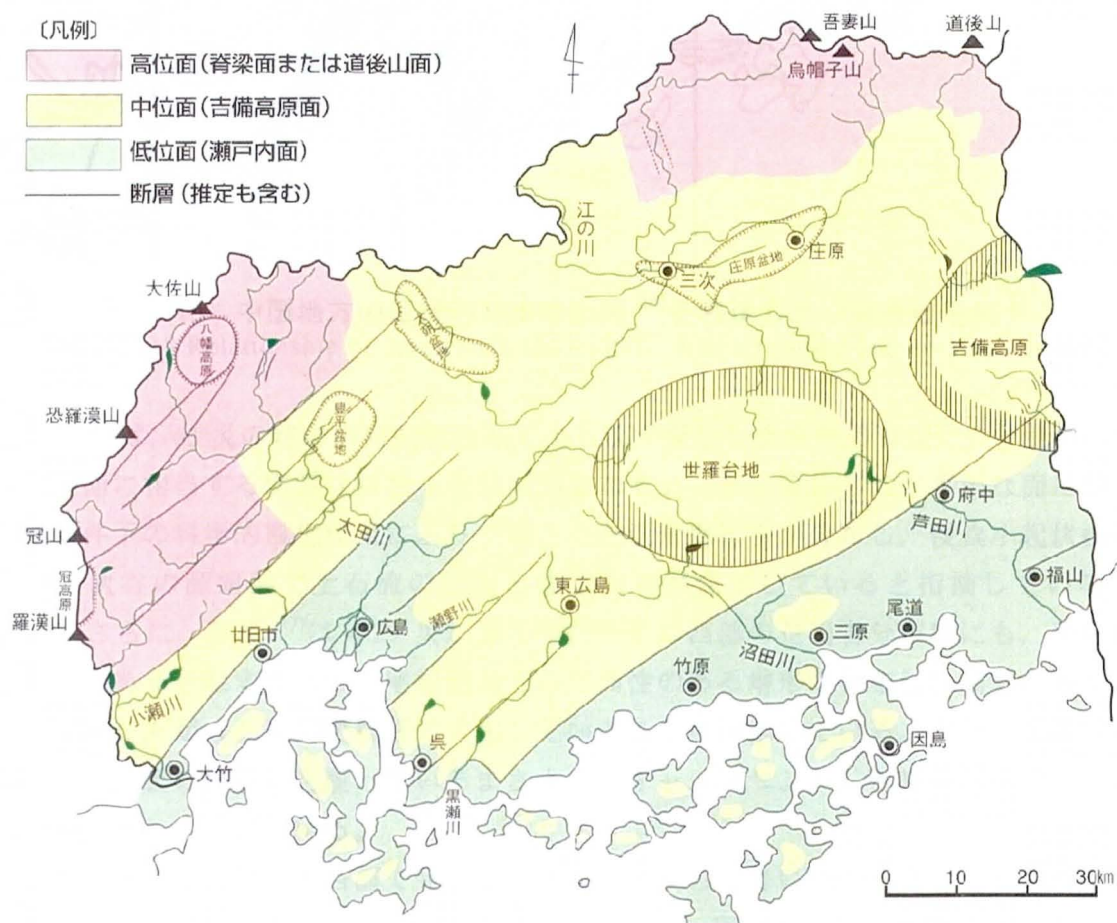


図-5.17 広島県の概略地形区分図⁷⁾

Fig. 5.17 Outline of a topography classification in Hiroshima Prefecture

図-5.18 は中国地方の巨視的な接峰面図²⁵⁾に、図-5.6 に示されている戦後の土砂災害被災地¹¹⁾を重ね合わせたものであるが、これによると、既往の土砂災害の多くが侵食小起伏面の移行域で発生していることがわかる。

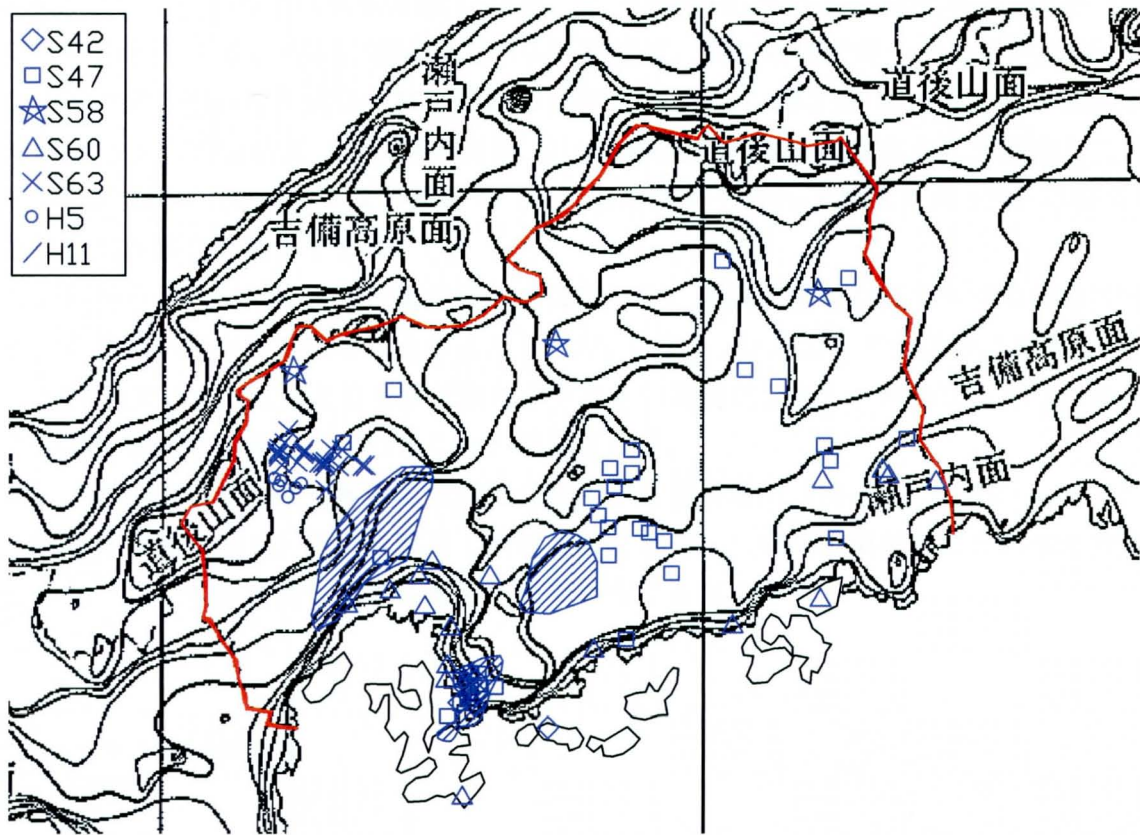


図-5.18 中国地方の巨視的な接峰面図²⁵⁾と戦後の土砂災害被災地⁶⁾

Fig. 5.18 Relationship between sediment-related disaster points and erosion surface

藤原ら²⁶⁾は、63 災の時に広島県北西部で土石流が発生した流域の背後に、吉備高原面や世羅台地面に相当する明瞭な侵食小起伏面が分布することに着目して、平坦な面にかつての気候条件下の科学的風化作用により生成された深層風化帯が分布し、侵食小起伏面縁辺を刻む一次谷の源頭部で土石流の原因となる崩壊が発生していると指摘している（図-5.19）。さらに、藤原²⁷⁾は 6.29 災が発生した広島市西部の花崗岩分布域にも、平らな山頂や丸みのある（なまこ状の）尾根筋などの定高性のある地形が分布し、崩壊の多くが尾根筋から少し下がった傾斜変換部で発生していることを指摘している。また、山地・丘陵地の山頂や山腹の緩斜面を覆っているまさ土を「キャップサンド」と呼び、崩壊・土石流発生の素因として挙げている。

ここでは、近年広島県南西部で発生した比較的規模の大きい災害が発生した箇所が地形的にどういった箇所に分布しているかを把握するために、国土地理院の地形図「湯来」, 「川角」, 「祇園」, 「津田」, 「廿日市」, 「広島」, 「玖波」, 「巖島」, 「似島」の 9 図幅に該当する範囲を対象に DEM データを用いた接峰面図を作成し、図上に前出の図-5.8 と同様、

1982年に中津岡川流域で発生した土石流、6.29災で発生した土石流とがけ崩れ、および2005年台風14号が発生した土石流の位置をプロットした。接峰面図の作成に用いたDEMデータは、広島大学・地域防災ネットワークが所有するGISMAP Terrain仕様のものである。このデータは1/25,000の地形図1図幅が1000×1000のメッシュデータに区切られたもので、1メッシュの大きさは経度方向0.45秒（実距離で約12.1m）、緯度方向0.3秒（実距離で約9.2m）である。なお、標高値は10cm単位で、負の数はサポートしていない。

このデータを用いて作成した接峰面図を図-5.20に示す。図-5.20の上図は格子法により10×10メッシュの最高点（概ね経度方向121m×緯度方向92mの最高点）を抽出して作成し、下図は100×100メッシュの最高点（概ね経度方向1,210m×緯度方向920mの最高点）を抽出して作成したものである。

この図からも、中位面と低位面の境界部において、背後に平坦な面を有する斜面の凹部で多くの災害が発生していることがよくわかる。しかし、分布エリアを詳細に見ると、1999年の6.29災では、土石流よりもがけ崩れの方が広い範囲に分布し、背後に大きな山体を有していない箇所でも発生していることが確認される。

また、その山腹や山裾で多数の土石流が発生した極楽地山（図-5.20上図のA地点）、のうが高原（同B地点）、中津岡川上流域（同C地点）には、山頂付近にため池や貯水池などが見られ、水を涵養しやすい地形状況であることがわかる。

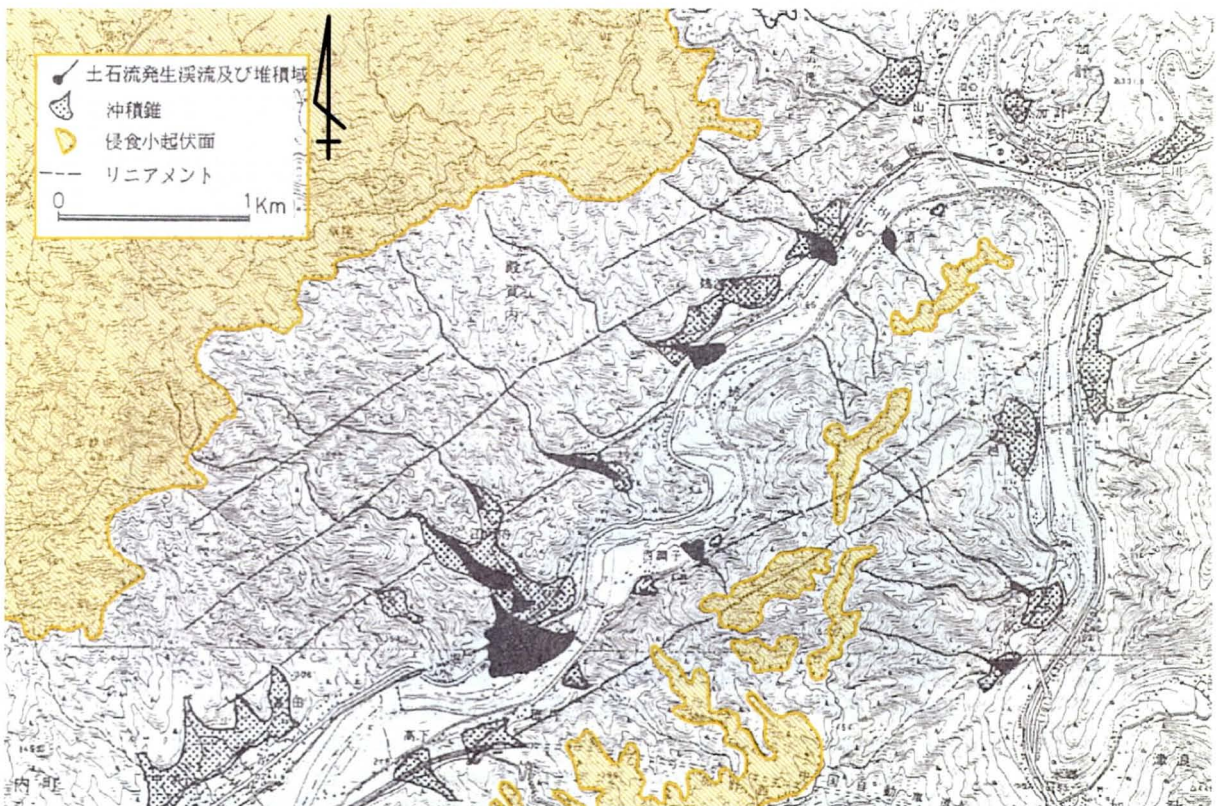


図-5.19 土石流と侵食小起伏面（加計土石流災害地域の地形²⁶⁾に加筆）

Fig. 5.19 Debris flow occurred around the flat erosion surface in Kake district

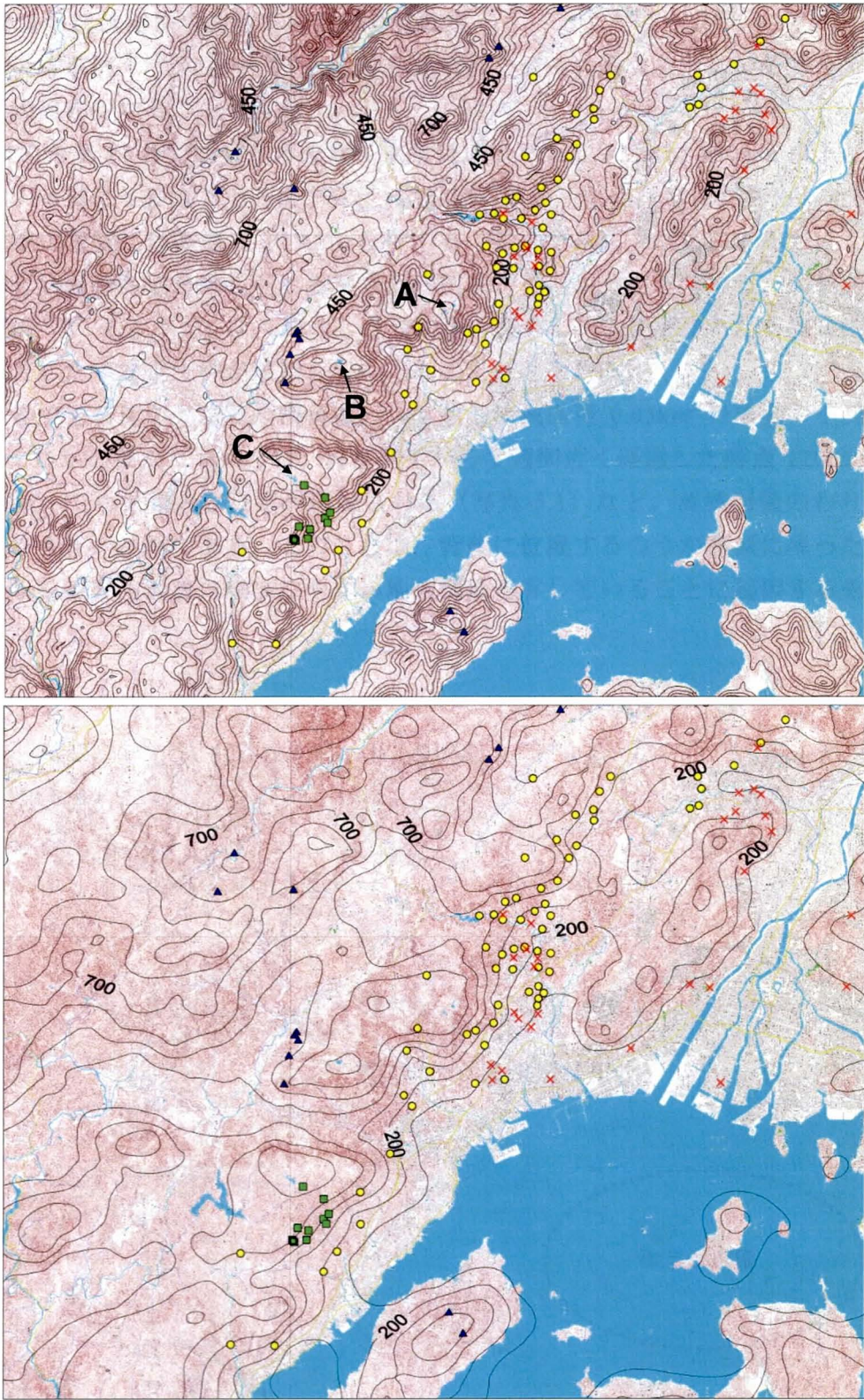


図-5.20 広島県南西部で発生した災害と地形の関係

Fig. 5.20 Sediment-related disaster points plotted on summit level map
(Southern western part of Hiroshima Prefecture)

上図は、経度方向 121m×緯度方向 92m メッシュの接峰面図上にプロット
下図は、経度方向 1,210m×緯度方向 920m メッシュの接峰面図上にプロット

- : 1982 年中津岡川流域で発生した土石流, ● : 6.29 災で発生した土石流
- ▲ : 2005 年台風 14 号出発生した土石流 × : 6.29 災で発生したがけ崩れ

5.3.2 侵食小起伏面からの地下水供給の可能性

最近の災害事例^{28),29)}においても、土砂移動現象の発生となっている斜面や溪流の背後に小起伏面を有することも多い。

2005年の台風14号で廿日市市永原～玖島付近において R' 値は450mm以上に至る豪雨があり、9月6日に6溪流で土石流が発生したほか、数箇所では山腹崩壊が発生した(図-5.21)。

この付近は背後に最高標高719.5mを有する“のうが高原”が存在するが、この山頂にも侵食小起伏面の名残と考えられる平坦面～凹状の地形が分布している。山頂付近には藤原らの指摘^{26),27)}のように、よく風化した花崗岩が分布し、山麓部にあたる溪流内にもそれらを起源とした不安定土砂が堆積していたものと考えられる。

この一帯で土石流が発生した溪流は、いずれも流域面積 0.05km^2 の未満の小流域であったが、いくつかの溪流においては、災害発生から2週間近く経過した時点(2005年9月19日調査時点)でも大量の表流水が確認される(写真-5.1)など、流域面積のわりに非常に水が集まりやすい箇所である。このことは、背後に位置するのうが高原に降った雨が地下水として土石流発生溪流に集まりやすい地質構造を有していることに起因するものと考えられる。

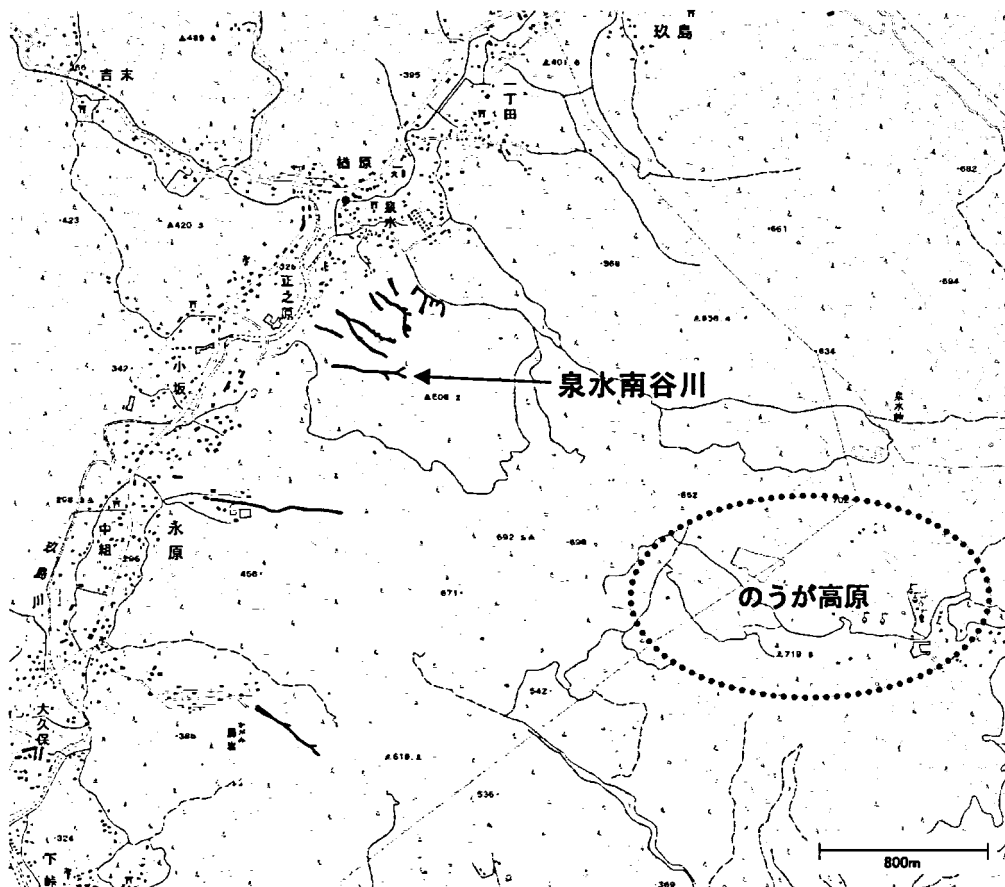


図-5.21 廿日市市永原地区～玖島地区の土砂災害発生状況

Fig. 5.21 Sediment-related disaster situation around Saiki and Kujima in Hatsukaichi City
(背景は電子国土ポータル：<http://cyberjapan.jp>より取得した国土地理院発行 1/25,000 地形図)



写真-5.1 泉水南谷川の出口付近の表流水

Photo 5.1 Water flow in exit of "Sensui-minami" mountain stream

被災2週間後に撮影, 古い土石流堆積物と考えられるよく締まった堆積物の存在も確認される

同様に, 2006年の台風13号時には, 土師ダム周辺においてもいくつかの流域面積が極めて小さな凹地形で流動性の高い崩壊が発生している(図-5.22)。これらの地点では写真-5.2, 5.3に示すように崩壊源頭部付近にパイピング状の集中湧水箇所が確認され, 発生後数日を経ても多くの湧水が見られた。

この付近は中国山地の中位面に当たり, 被災箇所の北方向には, より標高の高い小起伏面が確認されるが, これらの面に降った雨が浸透し, 地下水として崩壊地に集められたことも考えられる。

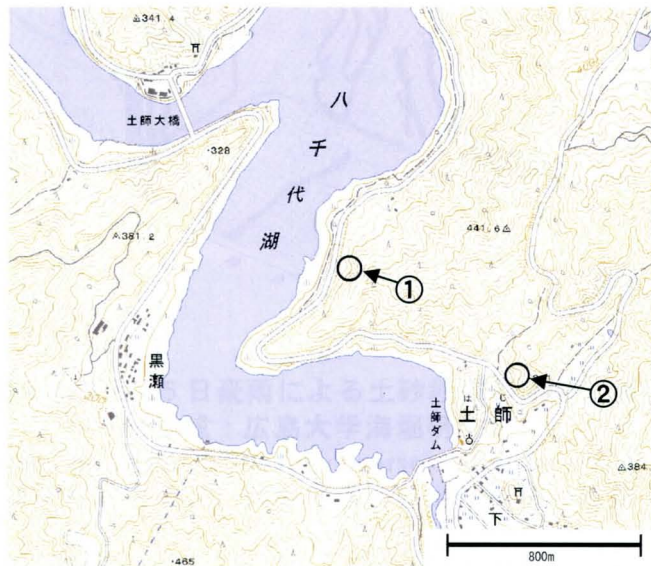


図-5.22 土師ダム周辺の土砂災害発生位置 (T0613)

Fig. 5.22 Location of sediment-related disaster around Haji dam

(背景は電子国土ポータル: <http://cyberjapan.jp/>より取得した国土地理院発行 1/25,000 地形図)



写真-5.2 崩壊源頭部のパイピング湧水
Photo 5.2 Piping-spring water at the head part of slope failure
(図-5.22 中の①)



写真-5.3 崩壊源頭部のパイピング湧水
Photo 5.3 Piping-spring water at the head part of slope failure
(図-5.22 中の②)

なお、海堀・梅木ら^{30)~32)}は、これらと同様の現象が1999年9月15日に土石流災害が発生した広島県東広島市助実地区(第3章の観測現場)でも見られることを、指摘している(図-5.23)。

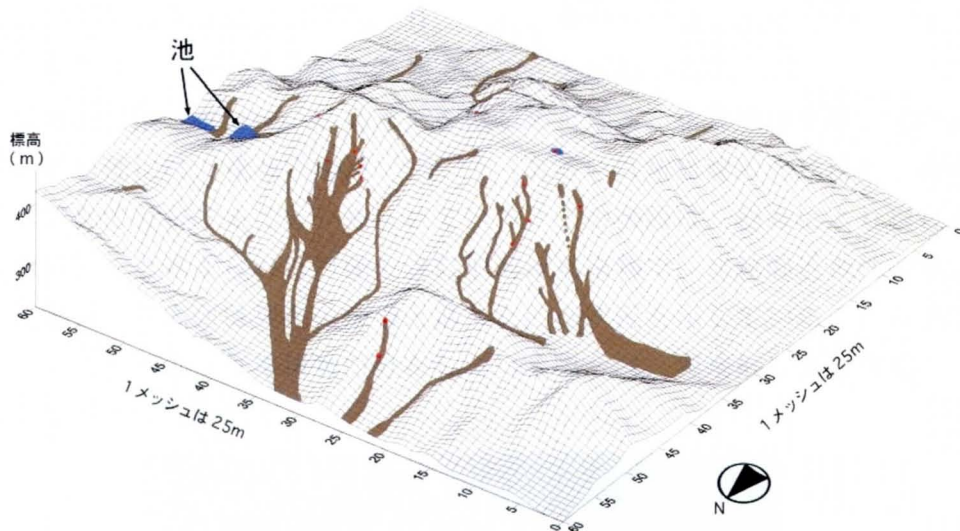


図-5.23 1999年9月15日豪雨による土砂移動の流路と湧水確認箇所³¹⁾
(作成：広島大学海堀研究室)

Fig 5.23 Spring water point and debris flow course of disaster in September 15, 1999
(東広島市西条町助実地区；図中の赤点は常時湧水の確認できる箇所)

第2章では6.29災で比較的小さな降雨($R=125\sim 150\text{mm}$ 程度)で崩壊が発生した箇所が広島市や呉市周辺の山麓地であり、背後山地から集められた水がその発生に関与した可能性についても指摘したが、背後地からの集水の影響は、現在の地表面地形からは必ずしも明瞭でなくても、土砂移動現象の発生要因の一つになっている可能性があることが推察される。

一般に土砂移動現象の発生危険性や、砂防基本計画（土石流対策計画）の際の流量³³⁾を評価するための流域面積は、現地形の尾根部に着目して求められる。しかし、荒巻ら³⁴⁾は、一度地下へ浸透してから供給される水の存在を指摘し、流域界を厳密な意味で規定すると、図-5.24のように現在の地形的な分水界の範囲外に降った雨が供給される可能性を示している。なお、この要因として地質構造を挙げている（図では流れ盤の堆積構造で説明している）が、平坦な地形では流域界がはっきりしないことも述べている。

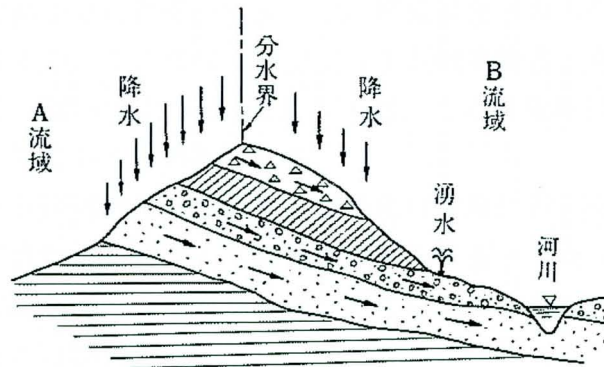


図-5.24 降水と地下水流出の関係³⁴⁾

Fig. 5.24 Relationship between rain area and base runoff
(A流域に降った降水がB流域に流出している例)

流れ盤や断層などの地質構造はもとより、今回の事例からは、流域背後に水をためやすい地形条件が存在するときにも注意が必要であることがわかる。

なお、極楽地山（図-5.20(1)のA地点）をはじめとする、広島県南西部の中位面の名残を示す山頂の平坦部には、極楽寺礫層^{35),36)}など（あるいは相当層）と呼ばれる礫層が花崗岩の上位に不整合で分布することが知られている。この礫層は、侵食により現在の地形となる以前に堆積したと考えられる円礫を含む旧河床堆積物で、比較的透水性の高いものである。また、礫層の基底面は現在の地形と違った凹凸状況を示していることも多く、背後山地の小起伏面にこのような堆積物が分布している場合は、現地形の流域を超えて地下水が流域に集まる可能性も高い。



写真-5.4 礫層の基底付近からの湧水事例

Photo 5.4 Spring water from the base of gravelly layer
(広島市内、礫層は古期崖錐相当のもので、湧水箇所は元地形は谷筋ではない)



写真-5.5 層状をなす旧土石流堆積物
Photo 5.5 Stratified debris flow deposits in ancient days

(2) 風倒木による斜面の不安定化

災害発生要因の一つに風倒木被害によるダメージが考えられることを 2005 年台風 14 号により宮島町白糸川で発生した土石流災害を例に挙げ前述したが、同じく 2005 年台風 14 号で土石流災害が発生した広島市佐伯区湯来町の赤土地地区においても風倒木によるダメージが確認されている³⁸⁾。

これは、地形図から読み取ることができる情報ではないが、地表踏査や注意深い空中写真の判読により、ある程度は把握しうるものであると考えられる。赤土地地区では、崩壊位置の発生前空中写真（写真-5.6）を事後に HSI 変換による処理画像することにより、崩壊位置の植生密度が周辺に比べやや低いことが示されている³⁸⁾。



写真-5.6 赤土地地区源頭部崩壊位置の発生前空中写真
Photo 5.6 Aero photograph taken before the slope failure occurrence (Akatochi district)

〔 国土交通省中国地方整備局太田川河川事務所により 2004 年 11 月に撮影された写真を海堀ら³⁸⁾が HSI 変換処理したもの。崩壊位置は周辺に比べやや植生の密度が低いことが読み取れる。 〕

5.4 地震による斜面不安定化の影響

地震は斜面崩壊など土砂移動現象の要因の一つに挙げられており、地震の揺れで斜面が崩壊するケースもあるが、地震時には崩壊しなかった斜面においても安定度が低下し、その後の少量の降雨でも崩壊することが知られている³⁹⁾。呉市では、2001年3月24日に安芸灘を震央とするマグニチュード $M_j=6.7$ の芸予地震によって石積み擁壁をはじめとした多くの崩壊が発生した。森脇らは^{40),41)}、崩壊しなかった斜面においても少なからぬダメージを受け、その後の降雨によって多くの斜面崩壊が発生したことを報告している。

ここでは、雨量指標 R' を用いて芸予地震前後の崩壊発生降雨を比較し、芸予地震による不安定化について検討する。芸予地震以前に発生した崩壊については、第2章の検討で用いたデータを使用し、芸予地震以降に発生して崩壊については、佐々木ら⁴²⁾による報告をもとにした。また R' の計算には、アメダス呉観測所の時間雨量データを用いた。

図-5.26は R' 値と災害発生の関係を時系列で表したもので、図-5.27は R_w-r_w 関係図に示したものである。この図をみると、芸予地震以降の呉市においては明らかに小さな R' の値でも崩壊が発生していることがわかる。特に地震発生から間のない2001年5月2日と6月14日には、それぞれ $R'=72.5\text{mm}$ 、 55.1mm と極めて小規模な降雨で崩壊が発生している。なお、佐々木ら⁴²⁾の報告では、これらは道路沿いのがけ崩れや宅地の石積み斜面の崩壊といった規模の小さなものではあるが、発生箇所においては地震の影響で相当な不安定化が進んでいたものと考えられる。

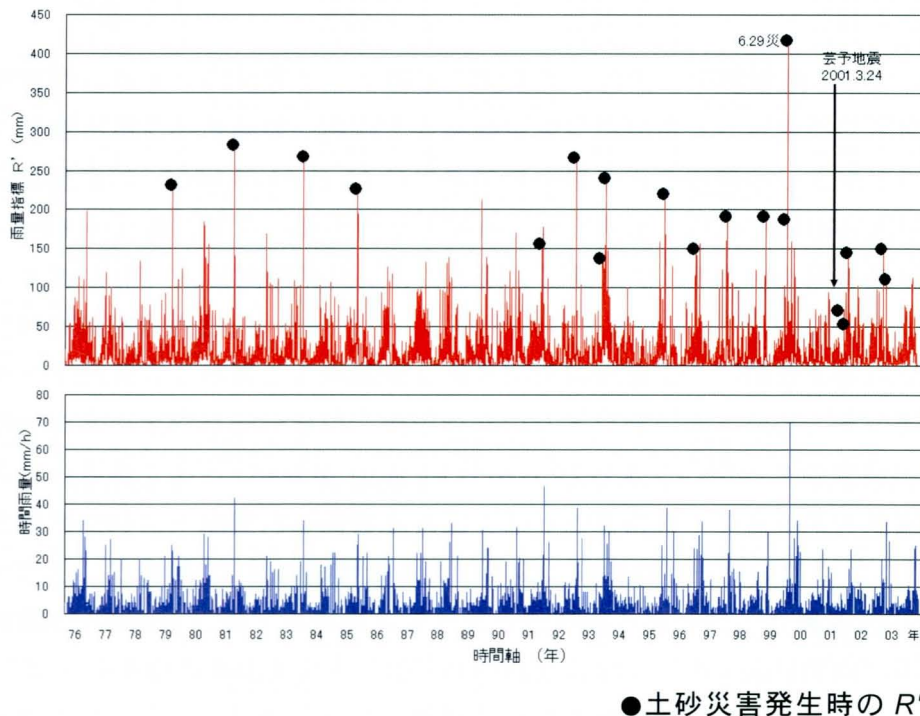


図-5.26 芸予地震前後における災害時雨量指標の変化

Fig. 5.26 Rainfall index values for trigger of disasters (before and after the Geiyo Earthquake in 2001)

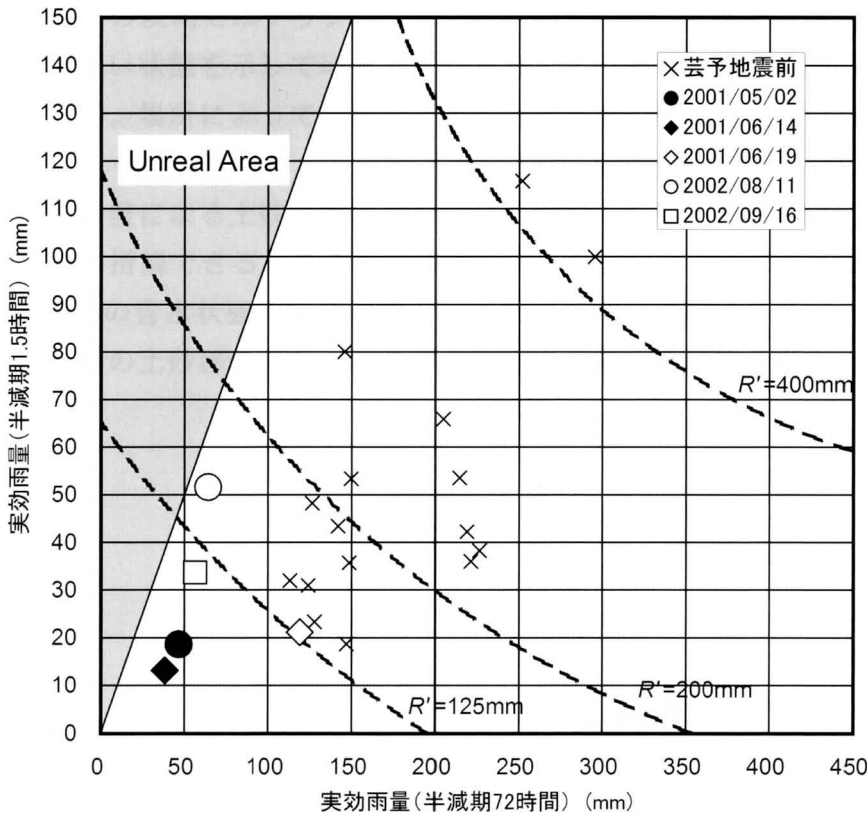


図-5.27 芸予地震以降の土砂災害時の $R_w - r_w$ 関係図

Fig. 5.27 Relationship between R_w and r_w on disasters after the Geiyo Earthquake in 2001

次に、地震時に数多くの地すべりや崩壊が発生した新潟県中越地震の時の R' 値を求め、先行降雨の影響が多く流動性の高い土砂移動現象につながった可能性に言及する。

新潟県中越地震は、2004年10月23日に新潟県中越地方を震源として発生したマグニチュード $M_j = 6.8$ の地震であり、新潟県小千谷市、十日町市、および旧山古志村を中心とした地域(図-5.28 参照、雨量観測所位置もこの図に記載)で、多数の土砂移動現象で数多くの道路や河川が閉塞された。

このときの土砂災害と地震との直接的な因果関係は明確でない部分も多いが、一部で発生した流動性の高い土砂移動現象は、地中が高い含水状態にあるなど、水の影響がなければ発生しえない現象である。2004年10月14日から23日までの間の R' の変動状況を図-5.29 に示す。地震発生時に、地盤内が高含水状態であった理由の一つとして、地震の3日前に強い雨をもたらした台風23号の影響が考えられる。降雨のピークの際には、アメダス小国観測所で R' 値が129mmに達する程度のまとまった降雨となった。台風通過の後、22日～23日にかけても小規模な降雨があり、地震発生時点においても、先行降雨の影響で被災地に近いアメダスの小国、十日町、小出の観測所では R' 値は50～60mm以上(アメダス小出観測所で61.9mm)の比較的高い値となっていた。

新潟県の第三紀層分布エリアを対象とした R' の計算に用いるべき係数や、土砂移動現象に対する R' の臨界値などは不明であり明確なことは言えないが、第3章で検討した東広島

市助実地区の龍王山の現地モニタリングでは、 $R'=50\sim 60\text{mm}$ 程度の状態では部分的にかなり体積含水率が高い状態を示していることから、この規模の先行降雨の影響により地震発生時においては、場所によっては地盤が相応の高含水状態になっていた可能性も考えられる。

この事例から、地震による土砂移動現象の発生要因の1つに、先行降雨による地盤の含水比の増加の影響が指摘できる。あらかじめケーススタディーで、 R' を算定する際の式や R' の値の大小と地中の含水状態の関係が明らかになっている地域であれば、地震などの外的要因が加わった際の土砂移動現象が発生の危険性に対する指標値を推定できる可能性もあると考えられる。



図-5.28 新潟県中越地震で被害を受けた地域と雨量観測所の位置
Fig. 5.28 Location of the observatories around a damaged area by the Mid Niigata Prefecture Earthquake in 2004

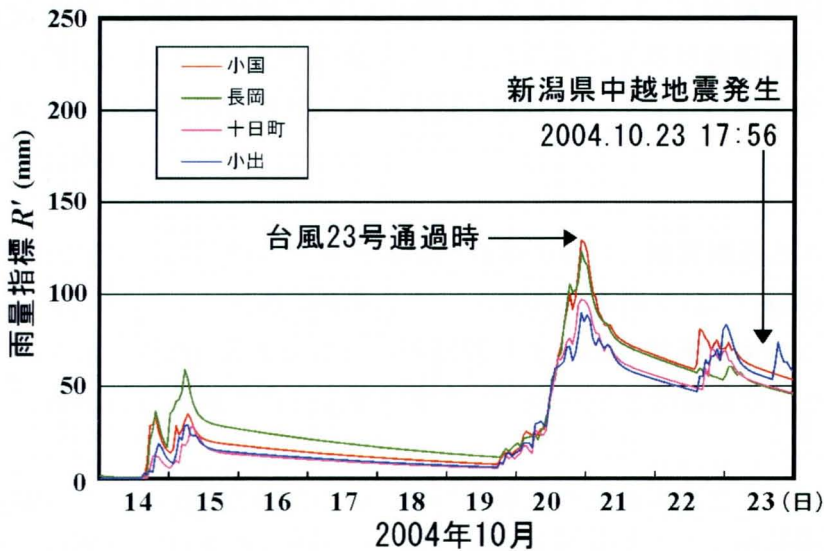


図-5.29 新潟県中越地震発生前の先行降雨による R' 値の変動
Fig. 5.29 Transition of R' -value by previous rainfall of the Mid Niigata Prefecture Earthquake in 2004

5.5 本章のまとめ

第4章における事例検証から、土砂移動現象の発生限界降雨は降雨履歴や地質条件、地形条件などによって異なることがわかった。ここでは、土砂移動現象と影響要因について事例を用いながら検討した。特に降雨履歴と土石流発生限界降雨の関係については、統計的手法を用いてこれを評価する方法を提案した。本章の成果を以下にまとめる。

- ① 広島県は県南東部と県北西部ではその平年降雨量に2倍弱の格差があるため、地域ごとの降雨特性による土砂移動現象の発生に対する耐力にも違いがある。このことから、6.29 災で被害が大きかった広島市や呉市周辺での限界降雨に相当する $R'=250\text{mm}$ という値は、県北西部ではあまり大きな降雨とはいえ、この地域の土石流に対する発生限界降雨量は $R'=250\text{mm}$ よりも相当大きい値であることが推察される。
- ② 地域ごとの降雨履歴を評価するために、Gumbel の極値分布に従い確率 R' 値を求めると、県西部～北西部では呉地域などの瀬戸内海沿岸に比べ大きな降雨履歴を持つことが検証され、土砂移動の発生限界降雨量に相当する R' の生起確率も大きく異なることがわかった。検討の結果、広島地域では8年確率程度の R' 値を用いて土石流発生の基準雨量を設定することが妥当である。
- ③ 広島県の実例を整理すると、土砂災害の大部分が花崗岩地帯で発生していることがわかる。これまでの統計的な研究事例や、花崗岩の鉱物組成や風化のしかた、マイクロシーティングや粘土細脈（粘土シーム）の存在に関する文献においても、風化花崗岩が土砂移動現象に対する抵抗が小さい地質として取り上げられている。
- ④ 花崗岩と中古生層の地質境界域で強い雨が降った事例では、土砂移動現象は両方の地域にわたって発生しているが、土石流などの流動性の高い土砂移動現象は特に花崗岩分布域で顕著である。中古生層分布域においては、細粒分の少ない石礫堆を形成するような崩壊が多く見られた。
- ⑤ 土砂移動現象の発生のきっかけとなる降雨や移動形態は、地質構造とも関係深い。玄武岩ドームがキャップロック構造で分布している地域の事例では、一般的な危険指標として用いられるものよりも、はるかに長い半減期の実効雨量で表現される地下水の変動があり、これを起因として地すべり変動が発生していることが確認された。
- ⑥ 地すべり現象については、広域的かつ一律に危険性を評価することは困難であるが、個別の調査により危険雨量を設定すれば、その変動を予測することが可能であると考えられる。この事例では480時間と72時間の長い半減期を組み合わせた実効雨量による R' により地すべりの変動を適切に表現することができた。

- ⑦ 地形に関しては、これまで言われてきた、背後に、吉備高原面や世羅台地面に相当する侵食小起伏面が分布する箇所での土石流の発生しやすさを改めて検証するとともに、大きな山体でなくても、地質構造や上部の地形形状により地下水を集めやすい地域があり、これが土砂移動現象の発生要因となる可能性があることを示した。
- ⑧ 加えて、土砂移動現象に対する注意が必要な箇所として、土石流の発生履歴がある箇所を指摘し、いくつかの事例を示した。土石流の発生には周期性があることも多く、既往災害履歴や溪流の出口に形成された扇状地形、古い時代の土石流堆積物の存在などに着目することも重要であることがわかった。
- ⑨ 土砂移動現象の要因の一つと考えられる風倒木被害によるダメージを把握するにあたっては、現地踏査により、倒木の有無や密度に加え、樹林の倒れる方向と倒れ方も確認することが有効である。広域的な倒木の把握に当たっては、処理画像を行った空中写真を用いてある程度把握できる可能性が示されている。
- ⑩ 土砂移動現象の要因の一つと考えられる地震について検討した結果、地震の影響で地震後しばらくの間は小さな降雨でも崩壊が発生しうること、先行降雨の影響で地盤の含水状態が高いときは地震により流動性の土砂移動現象が発生しうることがわかった。現段階では定量的な傾向はつかめていないが、前者については、発生限界雨量を減じることにより R' を用いて対応できると考えられる。後者については、あらかじめ R' の値の大小と地中の含水状態の関係を明らかにすることができれば、危険性の程度を推定できる可能性がある。

【引用文献】

- 1) 下村和正(1998): 水文資料の統計的解析, 「水圏水文学」, 第11章, 山海堂, pp.137-155.
- 2) 岩井重久, 石黒政儀(1970): 応用水文統計学, 第6~7章, 森北出版株式会社, pp.64-137.
- 3) (財)日本河川協会(1997): 改定新版建設省河川砂防技術基準(案)同解説調査編, 第4章, 建設省河川局監修, 山海堂, pp.61-76.
- 4) 星 清(1998): 水文統計解析, 開発土木研究所月報, No.540, pp.31-63.
- 5) 中村秀治, 水津育男(2007): 地形影響を考慮した局地的強風・豪雨の予測手法の検討について, 平成18年度地域防災ネットワーク成果報告書, 第2章, 2.1, 広島大学・地域防災ネットワーク, 広島大学災害軽減プロジェクト研究センター, pp.31-87.
- 6) 日浦啓全, 海堀正博, 末峯章, 里深好文, 堤大三(2004): 2004年台風10号豪雨による徳島県木沢村と上那賀町における土砂災害緊急調査報告(速報), 砂防学会誌, Vol.57, No.4, pp.39-47.
- 7) 広島県(1964): 広島県地質図解説書, 小島丈児記載「深成岩類」, pp.87-101.
- 8) 広島県土木建築部砂防課(1997): 広島県砂防災害史, 209p.
- 9) 土質工学会編(1974): 日本の特殊土, 土質基礎工学ライブラリー10, pp.86-140.
- 10) 渡正亮(1978): 斜面災害に関する2~3の問題点, 土地と基礎, Vol.26, No.6, pp.14-20.
- 11) 佐々木康, 森脇武夫, 加納誠二, Dissanayake, A.K., 西本大介(2000): 斜面崩壊に対する雨量指標 R_f の適用性, 第36回地盤工研究発表会講演概要集, p.2413-2414.
- 12) 地質調査所(1986): 20万分の1地質図幅「広島」.
- 13) 森本日佐人(1984): 地すべり・山崩れの地下探査に関する研究とその対策—中津岡川流域の荒廃調査と対策—, 広島大学大学院環境科学研究科修士論文, 44p.
- 14) 栃木省二(1985): 中・四国地方に於ける崩壊・地すべりと調査法, 地盤の劣化とその地域特性を考慮した崩壊危険度の評価に関する研究, 文部省科学研究費自然災害特別研究成果, pp.126-141.
- 15) 栃木省二(1989): 昭和63年度7月豪雨による土砂災害の調査研究, 1988年7月島根・広島豪雨災害の調査研究, 文部省科学研究費突発災害調査研究成果, pp.38-52.
- 16) 千木良雅弘(2002): 群発する崩壊, 近未来社, 228p.
- 17) Kitagawa, R. (1988): Clay veins and clay minerals in the granitic rocks in Hiroshima and Shimane Prefectures, southwest Japan. — Effect of the hydrothermal activities on the decomposition of the granitic rock —, Jour. Sci. Hiroshima Univ. Ser. C, Vol.8, pp.47-80.
- 18) 北川隆司(1996): 花崗岩の斜面崩壊方向の指標としての粘土細脈, 応用地質, 37巻, 第1号, pp.64-72.
- 19) 広島県(1988): 表層地質図, 土地分類基本調査「加計」1:50,000.
- 20) 中井真司, 村上信夫, 田丸實伸, 石岡一光(2005): 広島県東部地域で発生した地すべり災害の発生機構, 第44回日本地すべり学会研究発表会講演集, pp.109-112.
- 21) 中井真司, 吉田昌弘, 田丸實伸, 石岡一光(2006): 地すべり変動に影響を与える降雨の検討, 第45回日本地すべり学会研究発表会講演集, pp.81-84.

- 22) 渡正亮, 小橋澄治(1987): 地すべり, 斜面崩壊の予知と対策, 山海堂, 264p.
- 23) 藤原健蔵(1996): 地形学のフロンティア, 大明堂, pp.47-70.
- 24) 藤原健蔵(1980): 中国山地の侵蝕小起伏面研究の諸問題, 西村嘉助先生退官記念地理学論文集, pp.159-164.
- 25) 猪木幸男, 村上允英, 大久保雅弘(1987): 日本の地質 7「中国地方」, 共立出版社, 290p.
- 26) 藤原健蔵(1989): 加計土石流災害の地形的考察, 1988年7月島根・広島豪雨災害の調査研究, 文部省科学研究費突発災害調査研究成果, pp.53-68.
- 27) 藤原健蔵(2000): 広島市近郊を急襲した H11.6 広島災害の水文地形学的考察, 広島経済大学研究論集, 第22巻, 第4号, pp.3-38.
- 28) 平成17年台風14号災害緊急調査団(2005): 平成17年台風14号災害緊急調査団報告書, (社)地盤工学会中国支部, 29p.
- 29) 地盤工学会中国支部台風14号災害緊急調査団(2005): 中国地方における平成17年台風14号の土砂災害について, 土と基礎, Vol.53, No.12, pp.125-130.
- 30) 梅木健一, 桑田志保, 山田慎也, 海堀正博(2001): 土砂移動に関わった2つの豪雨特性と地盤特性, 平成13年度砂防学会研究発表会, pp.392-393.
- 31) 海堀正博(2003): 斜面災害発生予測のための雨量指標と地形, まさ土地帯の風化及び降雨浸透特性と斜面災害に関する研究報告書, (社)地盤工学会中国支部, pp.181-244.
- 32) 海堀正博, 梅木健一(2005): まさ土斜面における土中水分の原位置観測その2, 「中国地方における土砂災害特性に関する研究」報告書, 広島大学災害軽減プロジェクト研究センター, 国土交通省中国地方整備局太田川河川事務所委託, pp.54-58.
- 33) 国土交通省国土技術政策総合研究所(2007): 砂防基本計画策定指針(土石流・流木対策編)解説, 国総研資料, No.364, 74p.
- 34) 荒巻孚, 高山茂美(1968): 河川の流域, 地球科学講座9巻「陸水」5.1, 山本荘毅編, 共立出版社, pp.119-132.
- 35) 楠見久, 鷹村權(1979): 広島県地学のガイドー広島県の地質のおいたちー, コロナ社, 304p.
- 36) 鷹村權(1979): 広島県の地質をめぐって(増補版), 日曜の地学ー7, 築地図書, 208p.
- 37) 建設省河川局砂防部(1999): 土石流危険渓流および土石流危険区域調査要領(案).
- 38) 海堀正博, 中井真司, 大本直樹, 森田耕司, 作野裕司(2006): 2005年台風14号による広島での土砂災害とその原因, 第3回土砂災害に関するシンポジウム論文集, 土木学会西部支部, pp.187-192.
- 39) 網干寿夫, 小堀慈久(1986): マサ土斜面崩壊のケースレコード「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, 文部省科学研究費補助金・自然災害特別研究(1)研究成果報告書, pp.11-14.
- 40) 森脇武夫, 佐々木康(2001): 2001年3月24日芸予地震被害調査報告, 2.土木施設および地盤関連, 地震工学ニュース, No.179, pp.7-15.
- 41) 森脇武夫, 佐々木康, 海堀正博, 中井真司(2004): 呉市における斜面災害の特徴と防災対策, 広島大学地域防災ネットワークシンポジウム2004講演論文報告集, pp.97-106.

- 42) 佐々木康, 海堀正博(2002): 斜面都市の災害危険度診断法に関する基礎的研究, 平成13年度(財)先端建設技術センター研究開発助成報告書, (第II章を参照), pp.9-21.

第6章 警戒避難に向けた表現方法の検討

6.1 雨量指標 R' の課題

雨量指標 R' 値は、現在の土砂災害発生危険度とその分布をわかりやすく示すことができる指標であるが、一方で、同じ R' 値で次の1時間に同量の降雨が加わった場合でも、その先行降雨の条件（すなわち、長期雨量と短期雨量の影響程度）により1時間後の R' 値が異なるという特性を持っている。

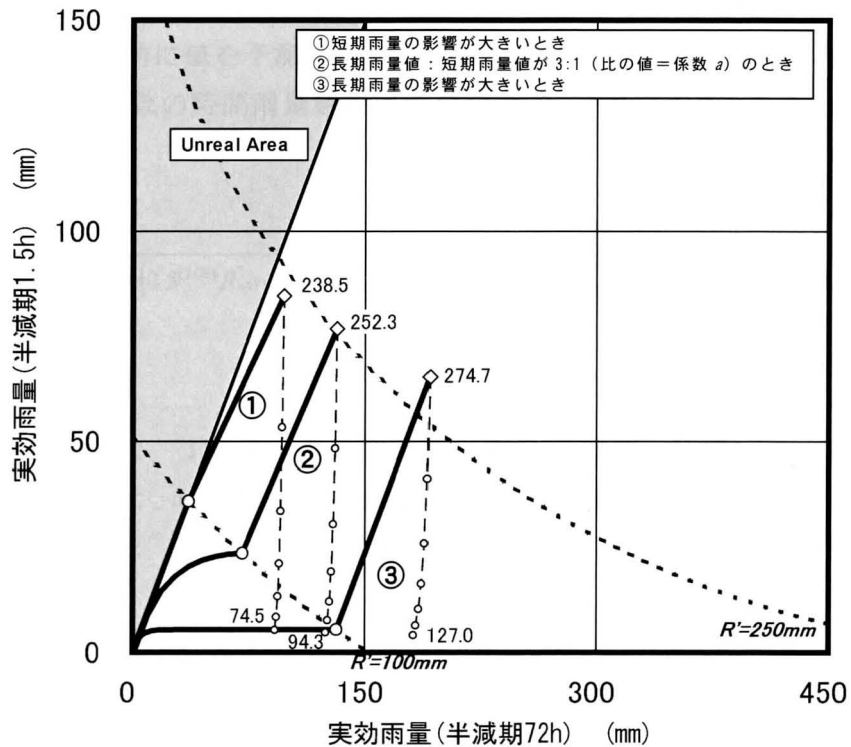


図-6.1 先行降雨の条件による同一時間雨量での R' 値の変化

Fig. 6.1 Change of R' -values during a following hourly rainfall in various antecedent precipitations

図-6.1に長期雨量と短期雨量条件が異なる条件で $R'=100\text{mm}$ となり、その直後に 62mm/h の降雨が加わった場合の R' の上昇程度、その後6時間無降雨状態が続いたときの下降程度を示した。 62mm/h という雨量は、長期雨量値と短期雨量値の比の値が係数 $a (=3)$ に等しい状態で $R'=100\text{mm}$ のときに、次の1時間でちょうど $R'=250\text{mm}$ を超える程度の降雨である。

検討の結果、①のように短期雨量の影響が強いときには R' 値は 250mm を超えず、③のように長期雨量の影響が強いときには R' 値は 250mm を大きく超えることがわかる。なお、短期雨量の影響が強いときには一旦上昇した R' 値は無降雨が続くと速やかに下降し、長期雨量の影響が強いときにはなかなか下降しないことがわかる。

6.2 監視雨量強度 R_R の提案

警戒避難のための指標として用いるためには、「現時点でどの程度危険な状態であるのか」ということに加え、「数時間後にどのような危険度となっているのか」あるいは「あとどれくらいの雨が降れば土砂災害に対する危険が急激に高まるのか」を把握することが重要である。これに応えるためのひとつの方法として、次の1時間でどれだけの降雨があれば雨量指標 R が基準値を超えるかを把握する方法が考えられる。この方法によれば、判断基準が時間雨量という身近な指標となるため、感覚的にも危険を判断しやすい。

ここで、危険と判定される R' (R_{fw}) に至るのに要する時間雨量を監視雨量強度 R_R と呼ぶことにする。

前述のように R' (R_{fw}) は長期実効雨量と短期実効雨量と3つの係数のみで計算される値であるため、1時間前に値を予測するための未知数は時間雨量のみである。

すなわち、この未知数の時間雨量を監視雨量強度 R_R で表現すると、 R_{fw} は式(6.1)のように表される。

$$R_{fw} = \sqrt{\{R_1 - (0.5^{(1/n)} R_{w(t-1)} + R_R)\}^2 + a^2 \{r_1 - (0.5^{(1/m)} r_{w(t-1)} + R_R)\}^2} \quad \dots\dots(6.1)$$

ここに、

$$\begin{aligned} R_{w(t-1)} &: 1 \text{ 時間前の長期実効雨量 [半減期 } n \text{ 時間]} \quad (\text{mm}) \\ r_{w(t-1)} &: 1 \text{ 時間前の短期実効雨量 [半減期 } m \text{ 時間]} \quad (\text{mm}) \\ R_R &: \text{ 監視雨量強度} \quad (\text{mm}) \end{aligned}$$

ここで、 $R_1 - 0.5^{(1/n)} R_{w(t-1)} = X$
 $r_1 - 0.5^{(1/m)} r_{w(t-1)} = Y$ とすると式(6.1)は、

$$R_{fw} = \sqrt{(X - R_R)^2 + a^2 (Y - R_R)^2} \quad \dots\dots(6.2)$$

と表すことができる。

これを R_R で解くと、

$$R_R = \frac{X + a^2 Y}{1 + a^2} - \sqrt{\left(\frac{R_{fw}^2 - X^2 - a^2 Y^2}{1 + a^2}\right) + \left(\frac{X^2 + 2a^2 XY + a^4 Y^2}{(1 + a^2)^2}\right)} \quad \dots\dots(6.3)$$

となり、この式により、任意の時点で1時間にどれだけの降雨があれば危険な状態に達するかを判定することができる。

6.3 監視雨量強度 R_R による警戒避難情報の検討

監視雨量強度 R_R を警戒避難のための方法として用いる際には1時間雨量の生起確率や短時間降水量予測などを参考に、表-6.1のような指標を設けることも一つの方法である。

2005年の台風14号で土石流が発生した宮島町白糸川¹⁾を例にとり、広島県宮島観測所の降雨を用いて監視雨量強度 R_R の経時変化を図化した(図-6.2)。ここでは、宮島周辺の8年確率の R 値に相当する270mm(第5章, 図-5.5参照)を土石流に対する基準値とし、レベルA, レベルB, レベルCの警戒避難情報を発するための閾値を、 $R_R=30\text{mm}$, 50mm , 70mm とした。時間雨量 30mm , 50mm , 70mm という値は、ほぼこの地域における2年確率, 10年確率, 100年確率に相当するものである。

この事例では、災害発生の6時間前にC: 要注意 ($50 < R_R \leq 70\text{mm}$)、4時間前にB: 危険 ($30 < R_R \leq 50\text{mm}$)、2時間前にA: 極めて危険 ($R_R \leq 30\text{mm}$) の状態になっており、警戒手段として妥当と考えられる時間的余裕がある。

表-6.1 監視雨量強度 R_R 値を用いた警戒避難情報の例
Table 6.1 Example of warning and evacuation information with R_R

危険度レベル	R_R 値	対応
A: 極めて危険	$R_R \leq X \text{ mm}$	避難が必要
B: 危険	$X < R_R \leq Y \text{ mm}$	
C: 要注意	$Y < R_R \leq Z \text{ mm}$	警戒が必要

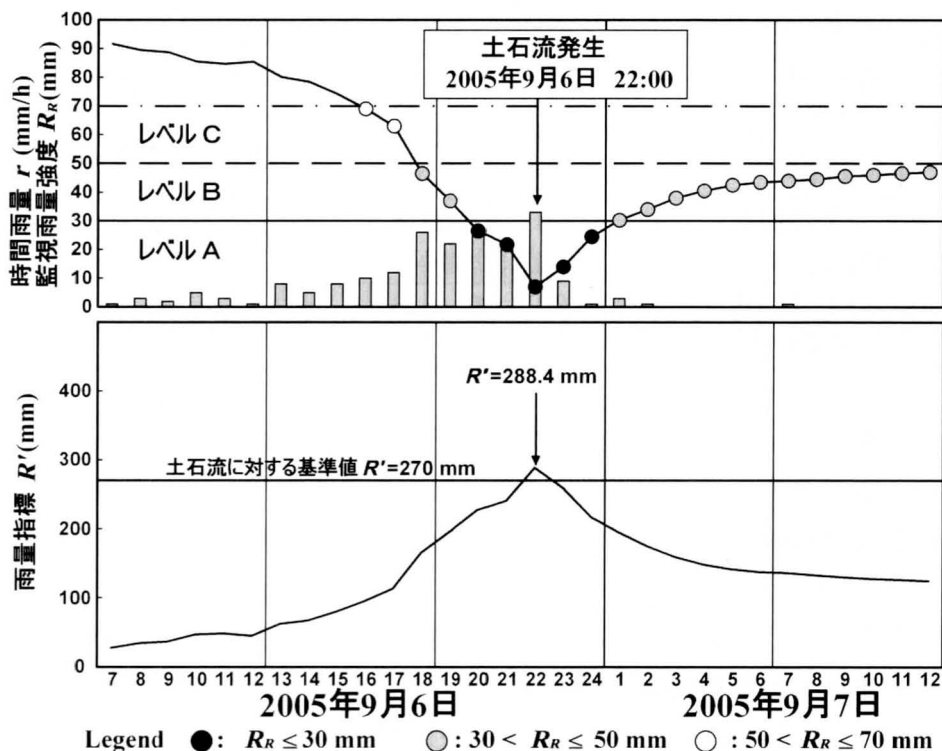


図-6.2 監視雨量強度 R_R の経時変化 (宮島観測所)

Fig. 6.2 Remarkable rainfall intensity R_R from 6th to 7th September, 2006 (Miyajima Observatory)

また、土石流で発生時間がわかっている他の災害事例を対象に、宮島町白糸川の場合と同じ手法により、事前に警戒避難のための予測ができたか否かを検討し、その結果を表-6.2に示した。事例としては、2005年の台風14号のときに周辺でいくつかの土石流災害が発生した廿日市市佐伯地区²⁾と、2004年の台風23号のときに死者5名を出す土石流災害が発生した岡山県玉野地区³⁾を用いる。

検討にあたっては、最寄りのアメダス観測所「廿日市津田」および「玉野」のデータを用い、これらの事例においても、8年確率の R' を基準値として用い、2年確率、10年確率、100年確率の時間雨量をレベルA、レベルB、レベルCの閾値とした。

なお、これらのケースでは、災害発生時点において予知できたかどうかを検証するために、災害発生前年までのデータを用いて基準値等を設定した。

表-6.2 監視雨量強度 R_R 値を用いた警戒避難情報の検討結果の例
Table 6.2 Examination example with R_R for warning and evacuation

	廿日市市佐伯地区	岡山市玉野地区
発生日月日	2005年9月6日	2004年10月20日
発生時刻	22:00	15:00
R' の基準値	330 mm	204 mm
2年確率時間降雨	33 mm	22 mm
10年確率時間降雨	56 mm	35 mm
100年確率時間降雨	85 mm	50 mm
レベルC到達時刻	6日 16:00 (6時間前)	20日 7:00 (8時間前)
レベルB到達時刻	6日 18:00 (4時間前)	20日 11:00 (4時間前)
レベルA到達時刻	6日 20:00 (2時間前)	20日 13:00 (2時間前)

これらの事例でも、宮島町で発生した土石流災害と同じように6~8時間前にレベルCの危険度、4時間前にレベルBの危険度、2時間前にはレベルAの危険度と適切な時間帯に警戒避難情報を出しうる結果となり、広島県や岡山県の花崗岩地帯ではこの方法が適用できる可能性を示すものとなった。

このように、地域ごとの降雨履歴の特性を反映することにより、より適切な土砂災害に対する基準値を設定しうるものと考えられる。また、雨量指標 R' により現在の土砂災害発生危険度とその分布・変遷を知り、併せて監視雨量強度 R_R により「あとどれくらいの降雨が降れば土砂災害に対する危険が著しく増すのか」を知った上で、今後の降雨予測情報に着目すれば、より直感的でわかりやすい警戒避難情報となりうるものと考えられる。

6.4 東広島市を対象とした警戒避難情報のケーススタディー

6.4.1 東広島市の概要と近年の土砂災害

警戒避難情報のケーススタディーに先立ち、ここでは近年東広島市で発生した土砂災害について整理する。なお、入手データの都合で、旧市内周辺の災害のみを対象とする。

図-6.3 に災害発生位置と地質の関係を、図-6.4 に災害発生位置と地形の関係を示す。なお、図-6.4 の接峰面図は第5章と同様の方法で作成したものである。

東広島市の旧市内周辺（以降、6.4.1においては単に旧市内という）では、1993年6～7月、1999年6月29日、1999年9月15日の3回にわたって、まとまった数の土砂災害が発生した。図-6.3、図-6.4にプロットしている発生位置はこれらのときのものである。

1993年は太平洋高気圧の勢力が弱く、梅雨期の気圧配置が8月まで続き、非常に雨量の多い夏であった。6月から7月は雨の日が多く、中でも6月28日～7月2日にかけてと、7月26日～28日にかけては強い雨となった。このときに旧市内を含む東広島地区周辺で多くの崩壊が発生した。とりわけ、山間部の林道沿いでは多くの崩壊が発生しており、広島県のまとめによると⁴⁾、東広島管内の26路線で38箇所崩壊が発生した。

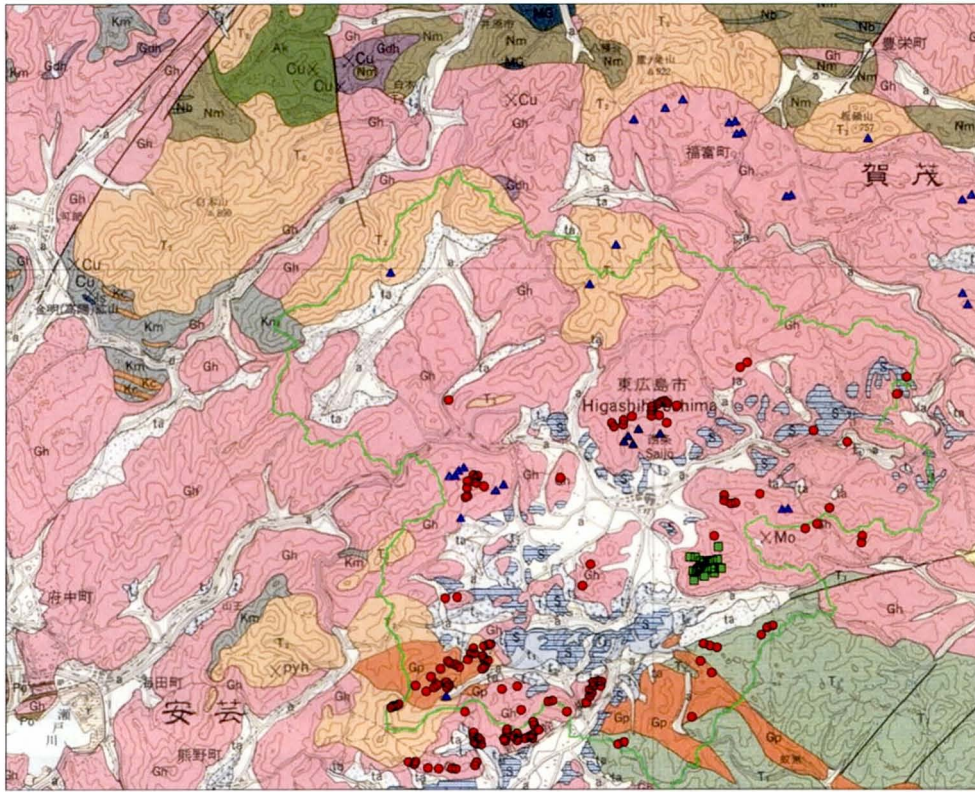
1999年6月29日は、いわゆる6.29災と称されるもので、広島県南西部を中心に非常に多くの土砂災害が発生したが、東広島市においても、図-6.3及び図-6.4に示すように相当数の土石流をはじめとする土砂移動現象が発生した。

1999年9月15日には、台風16号の影響で助実地区付近一帯（第3章参照）のみにおいて、土石流などの流動性の高い土砂移動現象が発生した。

旧市内の地質は大部分が広島花崗岩類に属する花崗岩を基盤岩とし、一部に高田流紋岩類に属する流紋岩及びデイサイトが分布している。市街地の南側の一帯には西条盆地と呼ばれる盆地が広がり、ここには西条層と呼ばれる湖成堆積物が分布している。また、低位～高位の複数の段丘による礫がちの堆積物も分布している（図-6.3）。

図-6.4下段の巨視的な接峰面図を見ると、第5章に示した広島県南西部と比べて全体になだらかな地形で、南西部で問題となっているような広い小起伏面に接する急峻斜面の分布は少ない。しかしながら図-6.4の上段を見ると、やはり背後山地からの地下水供給の可能性のあるところでの災害が多い。なお、図-6.4上段のA地点やB地点付近では、1993年と6.29災のときの2回にわたって土砂災害が発生しているが、6.29災の時のほうがより標高が高い（集水面積が小さい）ところでも土砂移動現象が発生している。しかも、1993年には林道脇の崩壊などの小規模な土砂移動現象が多かったが、6.29災の時には流動性の高い土石流も発生している。このことは、より雨量の多かった6.29災の時には、1993の降雨では土砂移動現象が発生する条件に達していなかったような箇所においても、より流動性の高い土砂移動現象が発生する条件を満たしていたことを示している。

また、C地点やD地点の付近は、背後に大きな山体が分布していない、独立した山であるが、流動性の高い土石流が発生している。この付近には、特にため池が多く見られることから、山の規模のわりに地下水を集めやすい地質構造を有していることが考えられる。



		5 0 5 10 15 20km
第四紀	沖積層 Alluvium	a 礫・砂及び泥 Gravel, sand and mud
	段丘堆積層 低位 Terrace deposits Lower	t ₂ 礫・砂及び泥 Gravel, sand and mud
	段丘堆積層 高位 Terrace deposits Higher	t ₁ 礫・砂及び泥 Gravel, sand and mud
	西条層 Saijō Formation	S 砂・泥及び礫(亜炭層及び火山灰層を挟む) Sand, mud and gravel (intercalating lignite beds and volcanic ash layers)
白亜紀	広島花崗岩類 Hiroshima Granitic Rocks	Gh 黒雲母花崗岩及び角閃石黒雲母花崗岩 Biotite granite and hornblende-biotite granite
		Gp 角閃石黒雲母花崗斑岩及び黒雲母花崗斑岩 Hornblende-biotite granite porphyry and biotite granite porphyry
	高田流紋岩類及び匹見層群 Takada Rhyolites and Hikimi Group	T ₂ 流紋岩溶結凝灰岩(非溶結火砕岩及びデイサイト溶結凝灰岩などを伴う) Rhyolite welded tuff with non-welded pyroclastic rock, dacite welded tuff and others
	T ₁ デイサイト-流紋岩溶結凝灰岩, 凝灰質砂岩・泥岩・礫岩など Dacite to rhyolite welded tuff, tuffaceous sandstone, mudstone, conglomerate and others	
ジュラ紀	玖珂層群及びその相当層 Kuga Group and its equivalents	Km 礫質泥岩及び泥岩 Pebbly mudstone and mudstone

図-6.3 東広島市(旧市内)周辺で発生した災害と地質の関係

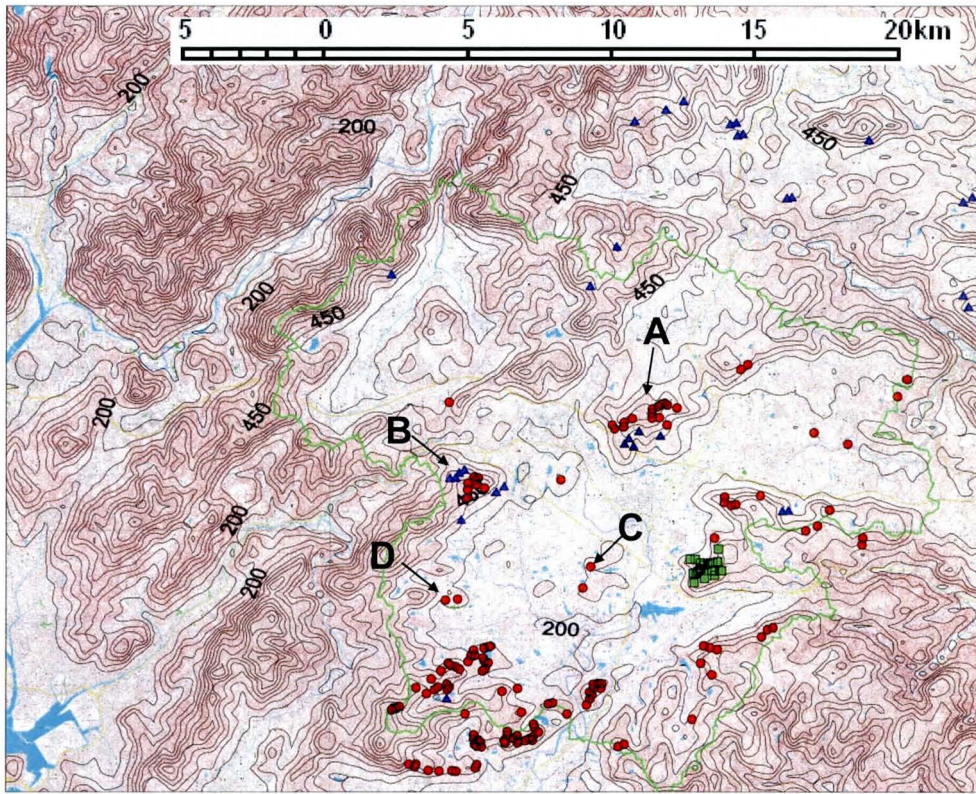
Fig. 6.3 Sediment-related disaster points plotted on geologic map (Higashi-Hiroshima City)

(素図には地質調査所発行の 1:20,000 地質図「広島図幅」⁵⁾を用いた)

▲ : 1993年6~7月に発生した崩壊,

● : 6.29 災で発生した土石流, ■ : 1999.9.15 に発生した土石流

※緑色の線は, 東広島市旧市内の境界を示す。



* A~Dについては文中で説明

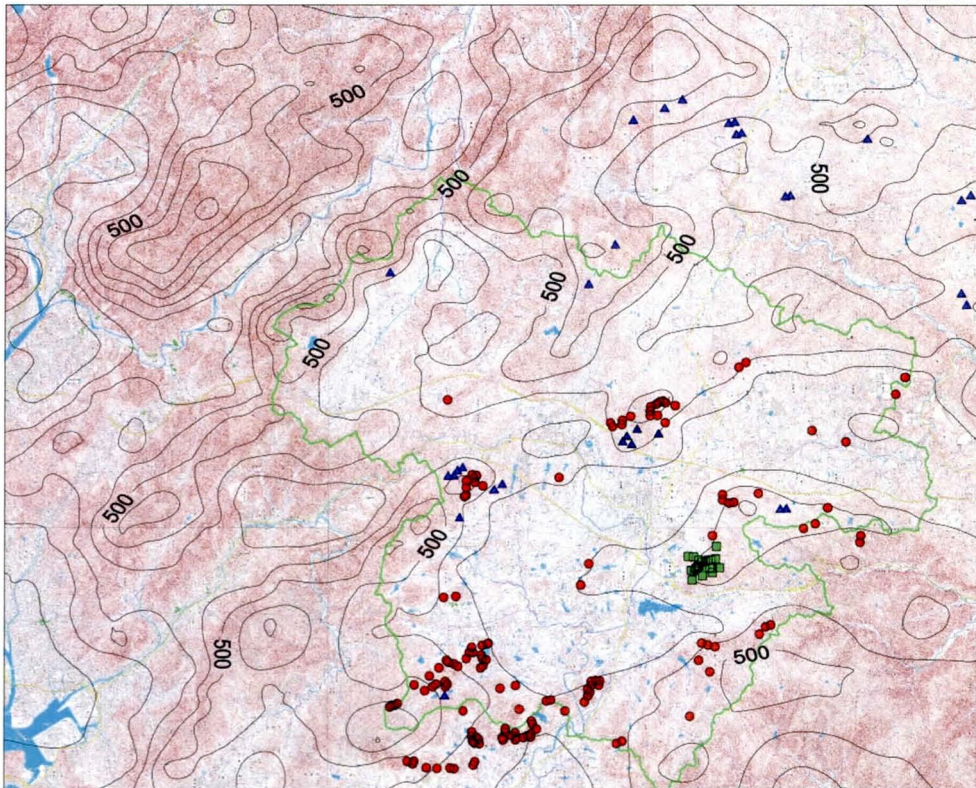


図-6.4 東広島市(旧市内)周辺で発生した災害と地形の関係

Fig. 6.4 Sediment-related disaster points plotted on summit level map (Higashi-Hiroshima City)

上図は、経度方向 121m×緯度方向 92mメッシュの接峰面図上にプロット

下図は、経度方向 1,210m×緯度方向 920mメッシュの接峰面図上にプロット

▲：1993年6～7月に発生した崩壊，

●：6.29災で発生した土石流， ■：1999.9.15に発生した土石流

※緑色の線は、東広島市旧市内の境界を示す。

6.4.2 東広島市で災害の誘因となる降雨

図-6.5 に、6.29 災の時の旧市内周辺の最大 R' 値の分布図を示す。この図では、 R' 値が大きくなる地域ほど土石流が多発する傾向が見られる。概ね $R' > 260\text{mm}$ の範囲で土石流が発生し、 $R' > 300\text{mm}$ では特に多発している。この一帯で降雨が最も大きかった $R' > 320\text{mm}$ の範囲は、山岳部ではなく盆地となるので災害発生数は少ないが、この範囲内でも小規模な丘陵斜面で土砂移動が発生している。

このことから、 $R' > 320\text{mm}$ というこの地域では極めて大きな降雨があった場合には、流域面積（地下からの供給も含めた実流域面積）の小さい場所においても、土石流のような流動性が高い土砂移動が起こるといえることがわかった。

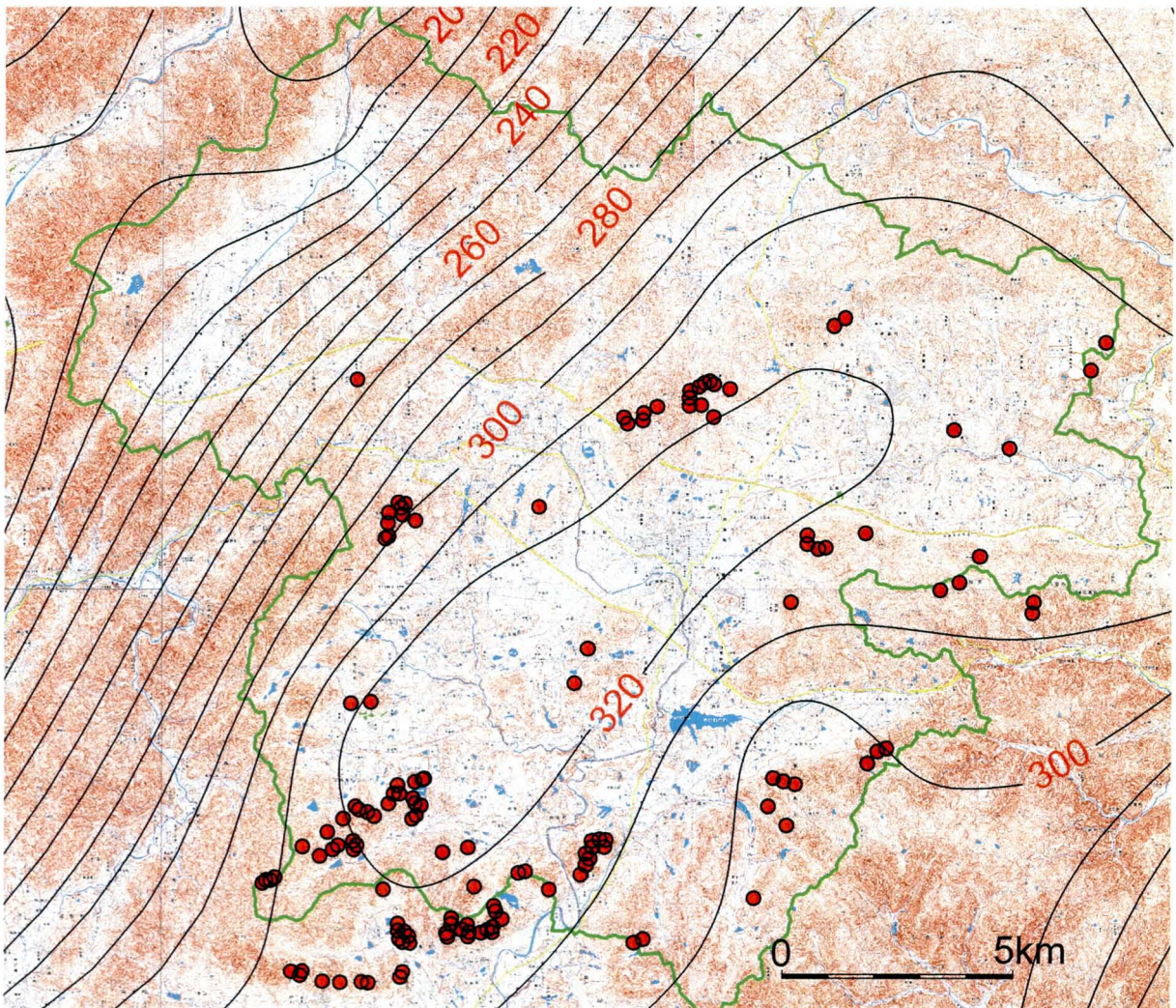


図-6.5 東広島市（旧市内）周辺の6.29災時の最大 R' 値の分布

Fig. 6.5 Distribution of the R' -max value around Higashi-Hiroshima City during the 6.29-disaster
(●: 土石流発生溪流)

6.4.3 東広島市の基準値と R_R の管理閾値の設定

東広島市を対象に 6.3 節で提案した R_R を用いた手法を適用するにあたって、「広島県防災 Web」 (<http://www.bousai.pref.hiroshima.jp/hdis/index.jsp>) からほぼリアルタイムで取得できる東広島市の 20 箇所の雨量観測所について、個々に土石流に対する基準値および管理閾値を設定する。ここでは、旧市内に、旧豊栄町、旧福富町、旧河内町、旧黒瀬町、旧安芸津町を加えた現在の東広島市の範囲を対象とする。

監視雨量強度 R_R 値を用いて土石流に対する警戒避難情報を発するためには、対象地区での限界降雨量に相当する基準値と、警戒避難情報の基準となる危険度レベル「A」～「C」の管理閾値を決定する必要がある。ここまでの検討では、地域の 8 年確率の R' 値に相当する値を土石流に対する基準値とし、レベル A、レベル B、レベル C の警戒避難情報を発するための管理閾値を、地域における 2 年確率、10 年確率、100 年確率に相当する 1 時間雨量を用いることにより良好な結果が得られている。

ここでもこれに従い、土石流発生に対する基準値および管理閾値を設定した。図-6.6 に東広島市の 8 年確率 R' 値の分布、図-6.7 に 2 年確率時間雨量の分布、図-6.8 に 10 年確率時間雨量の分布、図-6.9 に 100 年確率時間雨量の分布を示す。ここから読み取った基準値および管理閾値を表-6.3 にまとめる。なお、安全側を考慮して、基準値は切り捨て、管理閾値は切り上げで丸めている。

表-6.3 確率降雨から求めた土石流に対する基準値および管理閾値
Table 6.3 Reference value and management threshold of a debris flow occurrence calculated with a rainfall probability

		土石流に対する 基準値(mm)	レベル A の閾値(mm/h)	レベル B の閾値(mm/h)	レベル C の閾値(mm/h)
1	志和 (アメダス)	254	31	46	64
2	志和東	254	31	46	64
3	東広島 (アメダス)	253	31	48	69
4	郷曾	252	31	47	66
5	東広島建設局	250	31	46	64
6	造賀	248	31	44	61
7	高美が丘	248	30	43	60
8	黒瀬支所	254	30	46	66
9	岩伏	243	29	43	60
10	三津	241	29	42	60
11	久芳	248	30	43	58
12	乃美	246	30	42	57
13	吉原	245	30	42	57
14	宇山	246	30	42	57
15	入野	244	29	41	56
16	日本ヶ峰	246	30	41	54
17	河内支所	246	30	40	53
18	椋梨ダム	244	30	41	54
19	河内 (アメダス)	246	30	40	53
20	河内 (中河内)	245	30	40	53

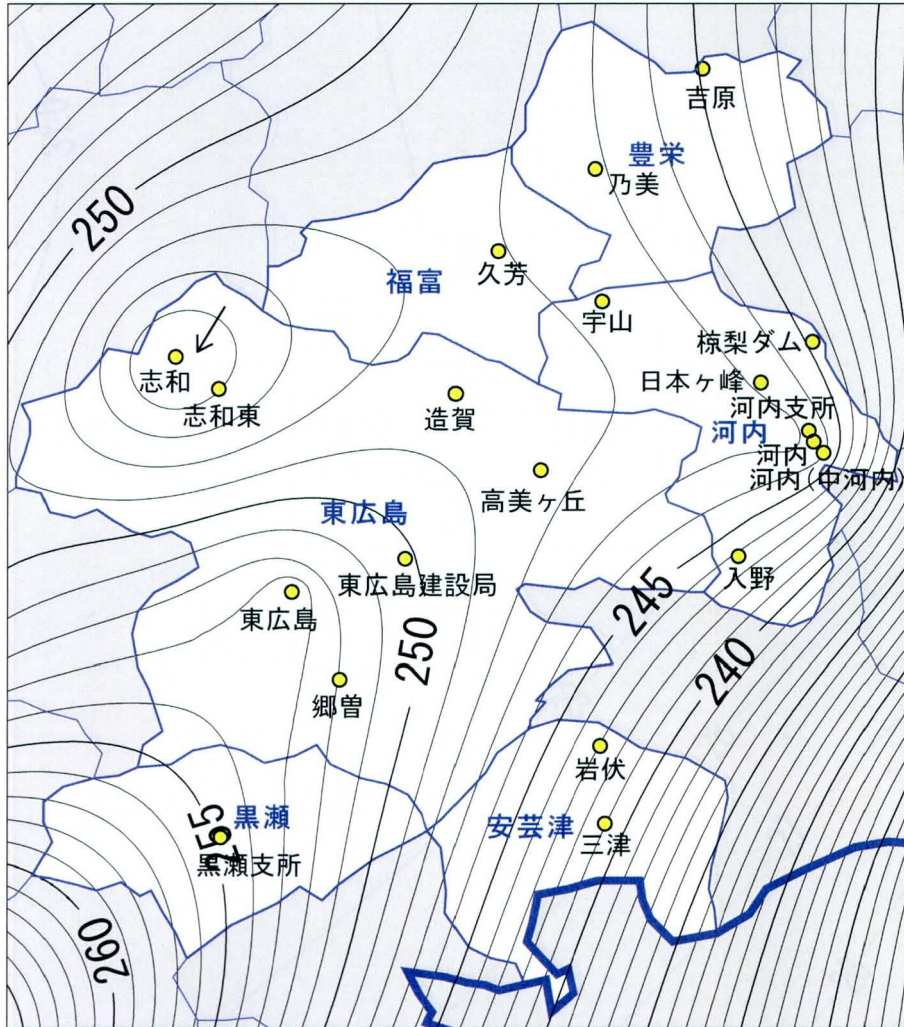


図-6.6 東広島市の8年確率 R' 値の分布（土石流に対する基準値となる雨量）
 Fig. 6.6 Distribution of R' -value of 8 years' probability in Higashi-Hiroshima City
 (Reference value of debris flow occurrence)



図-6.7 東広島市の2年確率時間雨量の分布（レベルAの管理閾値となる雨量）
 Fig. 6.7 Distribution of hourly rainfall of 2 years' probability in Higashi-Hiroshima City
 (Management threshold against "Level A")

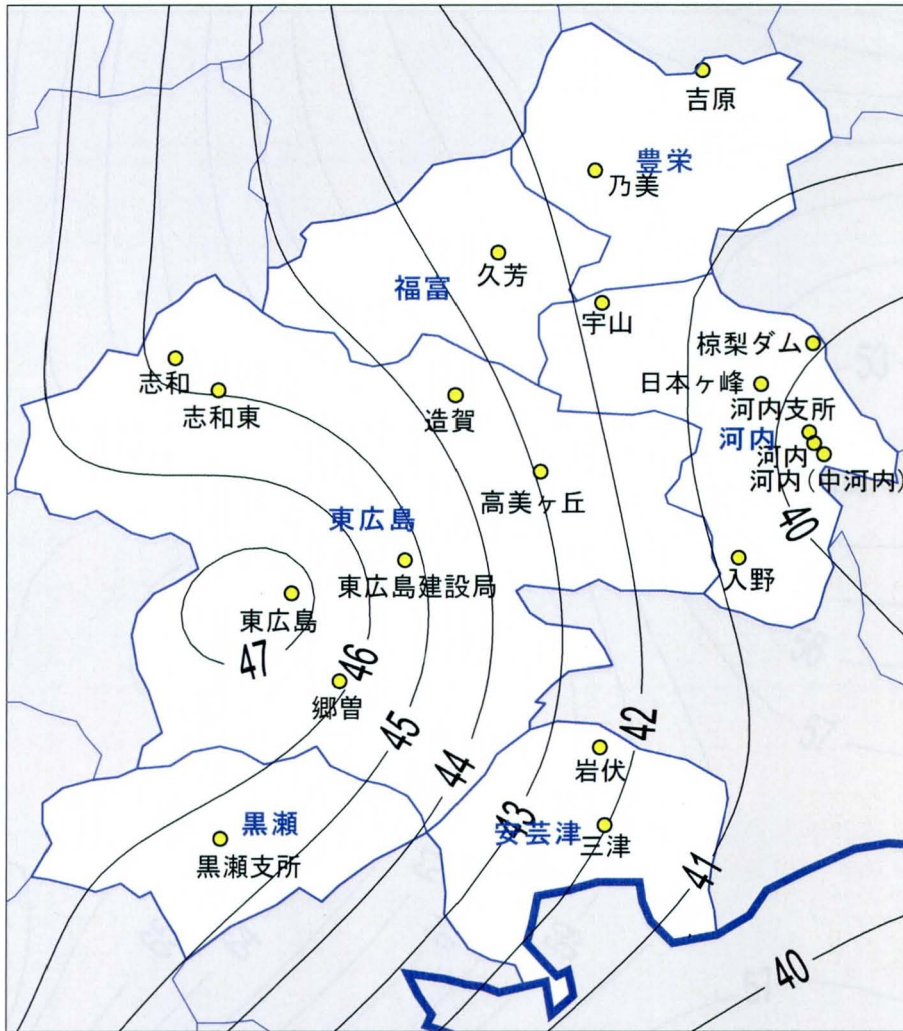


図-6.8 東広島市の10年確率時間雨量の分布（レベルBの管理閾値となる雨量）
 Fig. 6.8 Distribution of hourly rainfall of 10 years' probability in Higashi-Hiroshima City
 (Management threshold against "Level B")

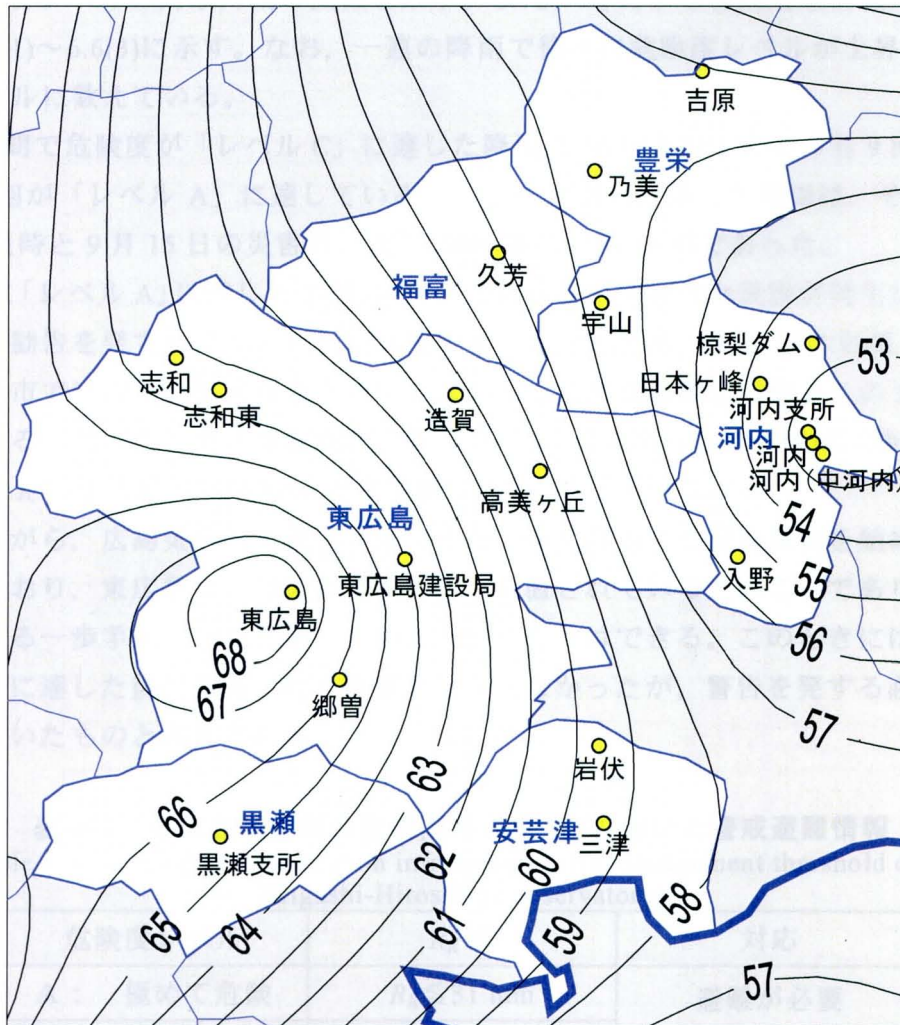


図-6.9 東広島市の100年確率時間雨量の分布（レベルCの管理閾値となる雨量）
 Fig. 6.9 Distribution of hourly rainfall of 100 years' probability in Higashi-Hiroshima City
 (Management threshold against "Level C")

6.4.4 東広島観測所での警戒避難頻度

前項(6.4.3)で検討した土石流に対する基準値および管理閾値により、東広島観測所(アメダス)での1999年から2006年までの降雨による R_R を算出し、危険度レベルの頻度を求めた。ここで、表-6.3の基準値および管理閾値を用いれば、東広島観測所での監視雨量強度 R_R の用いた警戒避難情報は、表-6.4にしたがって発されることになる。

表-6.5に各レベルの対象降雨の回数を示す。また、 R_R による警戒避難情報対象降雨の一覧を表-6.6(1)~6.6(3)に示す。なお、一連の降雨で徐々に危険度レベルが上昇した場合は、両方のレベルに数えている。

8年間の間で危険度が「レベルC」に達した降雨は56回あり、そのうち9回が「レベルB」に、3回が「レベルA」に達している。「レベルA」に達した降雨は、それぞれ1999年の6.29災時と9月15日の災害時、及び2005年の台風14号であった。

1999年に「レベルA」に達した2回は何れも、周辺地区で甚大な災害が発生したときで、まさに避難勧告を発するにふさわしい状況であったといえる。2005年の台風14号の際には、東広島市では深刻な災害は発生していないが、広島県西部では数多くの土石流などが発生している。このとき東広島観測所では、レベルAに至ったのち降雨が徐々に収まり、結果的には R の値は最大207.0mmと基準値に達していない。

しかしながら、広島気象台の報告⁶⁾によると、東広島市でも浸水被害を始めとした災害が発生しており、東広島市には災害対策本部が設置されているとのことであり、甚大な災害が発生する一歩手前の状況に至っていたということはできる。このときには、たまたま危険レベルに達した後に強雨がなく惨事には至らなかったが、警告を発する必要がある状況に至っていたものと考えられる。

表-6.4 東広島観測所の監視雨量強度 R_R の用いた警戒避難情報
Table 6.4 Warning and evacuation information with management threshold of R_R
(Higashi-Hiroshima observatory)

危険度レベル	R_R 値	対応
A : 極めて危険	$R_R \leq 31$ mm	避難が必要 } 警戒が必要
B : 危険	$31 < R_R \leq 48$ mm	
C : 要注意	$48 < R_R \leq 69$ mm	

表-6.5 R_R による警戒避難情報の対象降雨の頻度(東広島観測所;1999~2006年)
Table 6.5 Frequency of a warning and evacuation information using R_R
(Higashi-Hiroshima observatory, 1999 to 2006)

年 レベル	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	計
A以上	2	0	0	0	0	0	1	0	3
B以上	2	1	1	0	0	2	2	1	9
C以上	5	3	11	3	6	10	5	13	56

※一旦低したレベルが24時間以内に再上昇した場合は、一連の警戒情報として集計した。

表-6.6(1) R_R による警戒避難情報対象降雨の一覧表(東広島観測所;1999~2001年)
 Table 6.6(1) Periods of warning and evacuation information using R_R
 (Higashi-Hiroshima observatory, 1999 to 2001)

		期間	レベル	継続時間	備考
1999	①	05/27 01:00 ~ 05/27 11:00	C	10	
	②	06/06 23:00 ~ 06/08 24:00	C	49	
	③	06/24 12:00 ~ 06/26 05:00	C	41	
		06/26 18:00 ~ 06/27 02:00	C	8	
		06/27 02:00 ~ 06/27 05:00	B	3	
		06/27 05:00 ~ 06/29 16:00	C	11	
		06/29 16:00 ~ 06/29 23:00	A	7	6.29 災発生
		06/29 23:00 ~ 07/01 07:00	B	32	
		07/01 07:00 ~ 07/05 08:00	C	97	
	④	07/25 02:00 ~ 07/25 06:00	C	4	
	⑤	09/15 02:00 ~ 09/15 03:00	C	1	
		09/15 03:00 ~ 09/15 04:00	B	1	
		09/15 04:00 ~ 09/15 07:00	A	3	助実地区で土石流
		09/15 07:00 ~ 09/15 10:00	C	3	
		09/15 10:00 ~ 09/24 10:00	B	216	
		09/24 10:00 ~ 09/26 06:00	C	44	
2000	①	05/27 16:00 ~ 05/27 24:00	C	8	
	②	10/09 08:00 ~ 10/09 09:00	C	1	
		10/09 09:00 ~ 10/09 12:00	B	3	
		10/09 12:00 ~ 10/11 05:00	C	41	
③	11/02 09:00 ~ 11/02 14:00	C	5		
2001	①	05/02 11:00 ~ 05/02 19:00	C	8	
	②	05/23 23:00 ~ 05/24 03:00	C	4	
	③	06/19 14:00 ~ 06/19 22:00	C	8	
		06/19 22:00 ~ 06/20 07:00	B	9	
		06/20 07:00 ~ 06/27 10:00	C	171	
	④	07/01 07:00 ~ 07/01 11:00	C	4	
	⑤	07/06 03:00 ~ 07/06 15:00	C	12	
	⑥	08/10 15:00 ~ 08/10 16:00	C	1	
	⑦	09/07 04:00 ~ 09/07 06:00	C	2	
	⑧	09/15 10:00 ~ 09/15 11:00	C	1	
	⑨	10/09 22:00 ~ 10/10 01:00	C	3	
⑩	10/16 21:00 ~ 10/16 22:00	C	1		
⑪	10/22 16:00 ~ 10/22 17:00	C	1		

※期間の終了時刻は、次の値に更新される正時を記載している。

表-6.6(2) R_R による警戒避難情報対象降雨の一覧表(東広島観測所;2002~2004年)
 Table 6.6(2) Periods of warning and evacuation information using R_R
 (Higashi-Hiroshima observatory, 2002 to 2004)

		期間	レベル	継続時間	備考
2002	①	05/15 17:00 ~ 05/16 16:00	C	23	
		05/17 01:00 ~ 05/17 03:00	C	2	
	②	06/11 10:00 ~ 06/11 12:00	C	2	
	③	09/16 23:00 ~ 09/16 24:00	C	1	
		09/17 02:00 ~ 09/17 03:00	C	1	
2003	①	05/14 16:00 ~ 05/14 21:00	C	5	
	②	06/24 09:00 ~ 06/24 12:00	C	3	
	③	07/03 20:00 ~ 07/03 22:00	C	2	
	④	07/07 23:00 ~ 07/08 14:00	C	15	
	⑤	07/13 15:00 ~ 07/14 15:00	C	24	
	⑥	07/18 21:00 ~ 07/21 17:00	C	68	
2004	①	04/27 05:00 ~ 04/27 09:00	C	4	
	②	05/13 10:00 ~ 05/14 03:00	C	17	
		05/15 21:00 ~ 05/15 23:00	C	2	
		05/16 01:00 ~ 05/17 03:00	C	26	
		05/17 03:00 ~ 05/17 04:00	B	1	
		05/17 04:00 ~ 05/21 08:00	C	100	
	③	06/26 07:00 ~ 06/28 05:00	C	46	
	④	07/22 16:00 ~ 07/22 17:00	C	1	
	⑤	07/31 20:00 ~ 08/01 23:00	C	27	
		08/01 23:00 ~ 08/02 02:00	B	3	
		08/02 02:00 ~ 08/02 12:00	C	10	
		08/02 12:00 ~ 08/02 22:00	B	10	
		08/02 22:00 ~ 08/05 21:00	C	71	
	⑥	08/30 18:00 ~ 08/31 02:00	C	8	
	⑦	09/07 14:00 ~ 09/07 22:00	C	8	
	⑧	09/29 09:00 ~ 09/30 12:00	C	27	
⑨	10/20 07:00 ~ 10/22 09:00	C	50		
⑩	12/04 20:00 ~ 12/05 04:00	C	8		

※期間の終了時刻は、次の値に更新される正時を記載している。

表-6.6(3) R_R による警戒避難情報対象降雨の一覧表(東広島観測所;2005~2006年)
 Table 6.6(3) Periods of warning and evacuation information using R_R
 (Higashi-Hiroshima observatory, 2005 to 2006)

		期間	レベル	継続時間	備考
2005	①	07/02 07:00 ~ 07/03 01:00	C	18	
		07/03 01:00 ~ 07/03 02:00	B	1	
		07/03 02:00 ~ 07/03 15:00	C	13	
		07/03 15:00 ~ 07/03 16:00	B	1	
		07/03 16:00 ~ 07/04 14:00	C	22	
		07/04 14:00 ~ 07/04 15:00	B	1	
		07/04 15:00 ~ 07/07 11:00	C	68	
	②	07/10 14:00 ~ 07/11 24:00	C	34	
		07/12 05:00 ~ 07/12 06:00	C	1	
	③	08/15 12:00 ~ 08/15 19:00	C	7	
	④	08/21 17:00 ~ 08/21 20:00	C	3	
	⑤	09/06 18:00 ~ 09/06 21:00	C	3	
		09/06 21:00 ~ 09/06 23:00	B	2	
		09/06 23:00 ~ 09/07 01:00	A	2	台風14号通過時
		09/07 01:00 ~ 09/07 10:00	B	9	
		09/07 10:00 ~ 09/10 10:00	C	72	
2006	①	04/11 06:00 ~ 04/12 06:00	C	24	
	②	04/15 20:00 ~ 04/15 21:00	C	1	
	③	05/10 17:00 ~ 05/11 08:00	C	15	
	④	06/22 14:00 ~ 06/23 22:00	C	32	
	⑤	06/25 11:00 ~ 06/27 21:00	C	58	
	⑥	07/01 05:00 ~ 07/06 07:00	C	122	
	⑦	07/20 06:00 ~ 07/21 10:00	C	28	
	⑧	07/23 19:00 ~ 07/24 10:00	C	15	
	⑨	08/11 16:00 ~ 08/11 17:00	B	1	
		08/11 17:00 ~ 08/11 22:00	C	5	
		08/12 16:00 ~ 08/12 17:00	C	1	
	⑩	08/14 20:00 ~ 08/14 22:00	C	2	
	⑪	08/18 19:00 ~ 08/19 01:00	C	6	
	⑫	08/22 14:00 ~ 08/22 16:00	C	2	
	⑬	09/06 11:00 ~ 09/06 19:00	C	8	
	⑭	09/09 23:00 ~ 09/10 13:00	C	14	
⑮	09/13 07:00 ~ 09/13 17:00	C	10		
⑯	09/16 08:00 ~ 09/16 09:00	C	1		

※期間の終了時刻は、次の値に更新される正時を記載している。

6.4.5 2005年台風14号時のケーススタディ

ここでは、前項のアメダス東広島観測所での検討で、 R_R の値がレベルAに達した2005年の台風14号を対象に、東広島市内の20箇所の雨量計のデータをもとに、 R_R の値を算出し、その危険度レベルを求めた。表-6.7に検討結果を示す。表中ではレベルAは赤文字、レベルBは青文字、レベルCは緑文字で表記している。なお、レベルAのときに R 'の値が基準値（土石流発生限界降雨量）を超えたものには黄色のハッチを掛けている。危険度レベルがCに達していないところにはグレーのハッチを掛けている。

表-6.7 2005年台風14号時の東広島市各雨量観測所の危険度レベル
Table 6.7 Risk levels of each observatory in Higashi-Hiroshima City during Typhoon Nabi

	2005年9月6日								2005年9月7日																					
	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	24:00	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
志和(ア)	-	C	C	C	C	B	A	A	B	B	B	B	B	B	B	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
志和東	-	C	C	C	C	B	B	B	B	B	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
東広島(ア)	C	C	C	B	B	A	A	B	B	B	B	B	B	B	B	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
郷曾	-	C	C	B	B	A	A	B	B	B	B	B	B	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	
東広島(建)	-	C	B	B	A	A	A	A	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	
造賀	-	-	C	B	B	A	A	A	A	B	B	B	B	B	B	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	
高美が丘	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
黒瀬支所	C	B	B	A	A	A	A	A	A	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	C
岩伏	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
三津	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
久芳	C	B	B	A	A	B	B	B	B	B	B	B	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
乃美	C	C	C	B	B	B	B	B	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
吉原	C	C	C	B	B	B	B	B	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
宇山	C	C	C	B	B	B	B	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
入野	C	C	C	B	B	B	B	B	B	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
日本ヶ峰	C	C	B	B	B	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
河内支所	C	C	C	C	C	C	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
棕梨ダム	C	C	B	B	A	B	B	B	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
河内(ア)	C	C	C	B	A	B	B	B	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	-	-	-	-
河内(中)	C	C	B	B	B	B	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

* A :基準値を超えたもの, A :レベルA, B :レベルB, C :レベルC, - :レベルCに達していないもの

東広島市内では、9月6日の18:00～19:00の時間帯からレベルCの危険度レベルが出はじめ、20:00～24:00（24:00正時の値が観測されるまで）の間は、20箇所全ての観測所においてレベルC以上の危険度レベルとなった。このとき16箇所の観測所ではレベルB以上、

うち9箇所の観測所ではレベルAとなり、黒瀬支所においては2時間に渡って基準値 ($R'=254\text{mm}$) を超えて $R'=286.1\text{mm}$ に達した。

2005年の台風14号のときには、東広島市で甚大な土砂災害は発生していないが、前述のように浸水被害などの災害は報告されており、甚大な災害が発生する一歩手前の状況に至っていたものと考えられる。

レベルAに達した旧市内や旧黒瀬町、旧福富町の一部は、実際に浸水した範囲⁷⁾とよく対応しており、この事例においては、特に危険度が高かったエリアを抽出することができる。したがって、この降雨を対象に監視雨量強度 R_R 値を用いれば、図-6.10に示すように、適切な時間帯に必要なかつ十分な範囲に絞って警戒避難情報を発することができるものと考えられる。

なお、今回の降雨では重大な土砂災害が発生していないが、 R' 値が土石流発生の限界降雨量を超えた箇所は20箇所中1箇所のみで、しかも短時間であったことから、 R' 値の基準値は過大に安全側ということではなく、相応のものであるといえる。

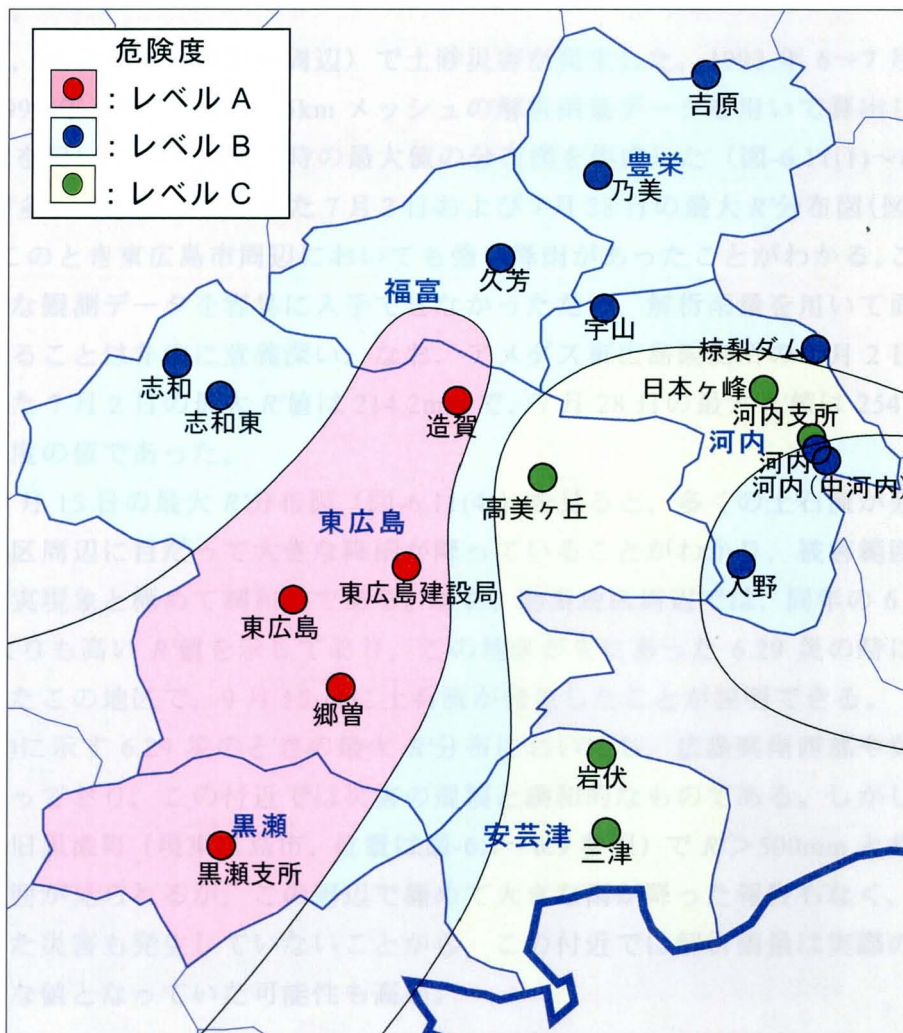


図-6.10 2005年9月6日23:00時点の東広島市の危険度レベル分布

Fig. 6.10 Distribution of the risk level in Higashi-Hiroshima City (September 6th, 2005, 23:00)

6.5 レーダー・アメダス解析雨量利用の検討

国土交通省から発表されている「解析雨量」^{8),9)}（レーダー・アメダス解析雨量）は、国土交通省河川局・道路局と気象庁が全国に設置しているレーダーと、アメダス等の地上の雨量計を組み合わせ、降水量分布を1kmメッシュで解析したものである。また、これをもとにして、今後6時間の1時間ごとの降水量分布を予測した「降水短時間予報」や、1時間先までの各10分間雨量を予報した「降水ナウキャスト」が発表されている。

近年都道府県と気象庁が共同して運用している、連携案方式による土砂災害警戒情報¹⁰⁾でも、レーダー・アメダスによる解析雨量と降水短時間予報が用いられている。

現在「広島県防災 Web」（<http://www.bousai.pref.hiroshima.jp/hdis/index.jsp>）で公表されている時間雨量データは、県内で289箇所あるが、短時間の局地的な降雨なども含めると、全ての降雨が把握できる訳ではない。

この点では、レーダー・アメダス解析雨量は1kmメッシュで全域をカバーしているので、利用価値の高いものであると考えられる。しかしながら、解析雨量と地上観測雨量では精度に差があることも指摘されており^{たとえば^{11)~13)}}、利用にあたって注意が必要なことも指摘されている。

ここでは、東広島市（旧市内周辺）で土砂災害が発生した、1993年6~7月、1999年6月29日、1999年9月15日の2.5kmメッシュの解析雨量データを用いて算出したメッシュごとの R' 値を用いて、災害発生時の最大値の分布図を作成した（図-6.11(1)~(4)）。

1993年で多くの崩壊が発生した7月2日および7月28日の最大 R' 分布図（図-6.11(1),(2)）を見ると、このとき東広島市周辺においても強い降雨があったことがわかる。この当時は、県内の詳細な観測データを容易に入手できなかったため、解析雨量を用いて面的な降雨傾向を把握することは非常に意義深い。なお、アメダス東広島観測所の7月2日の実測雨量から算出した7月2日の最大 R' 値は214.2mmで、7月28日の最大 R' 値は254.2mmと解析雨量と同程度の値であった。

1999年9月15日の最大 R' 分布図（図-6.11(4)）を見ると、多くの土石流が発生した東広島市助実地区周辺に目だって大きな降雨が降っていることがわかり、被害範囲がこの付近に限られた実現象と極めて調和的である。なお、助実地区周辺では、同年の6月29日（図-6.11(3)）よりも高い R' 値を示しており、この地区が先にあった6.29災の時に土砂災害発生しなかったこの地区で、9月15日に土石流が発生したことが説明できる。

図-6.11(3)に示す6.29災のときの最大 R' 分布においても、広島県南西部や呉地域では大きな値となっており、この付近では災害の規模と調和的なものである。しかし、呉市の北東に当たる旧黒瀬町（現東広島市、位置は図-6.7~6.9参照）で $R' > 500\text{mm}$ と非常に大きな値を示す範囲が見られるが、この周辺で極めて大きな雨が降った報告もなく、またこの範囲で目立った災害も発生していないことから、この付近では解析雨量は実際の降雨よりもかなり大きな値となっていた可能性も高い。

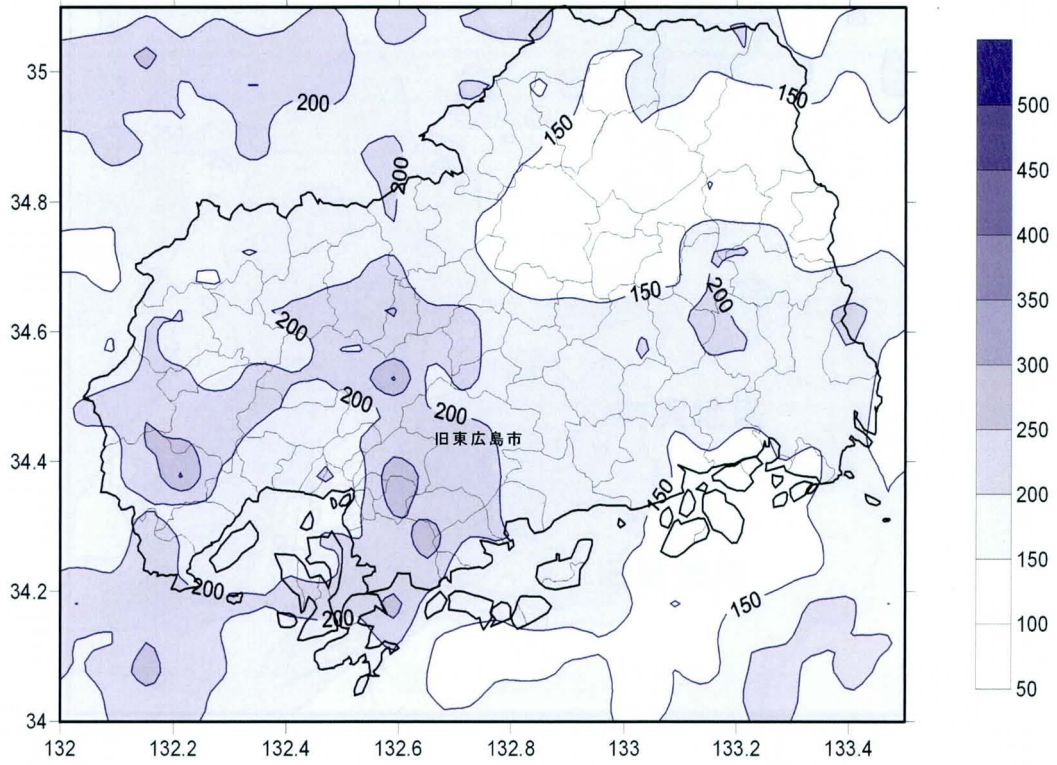


図-6.11(1) レーダー・アメダス解析雨量による最大 R' 値の分布図(1993年7月2日)
 Fig. 6.11(1) Distribution of the R' max-value by radar AMeDAS analysis rainfall (July 2nd, 1993)

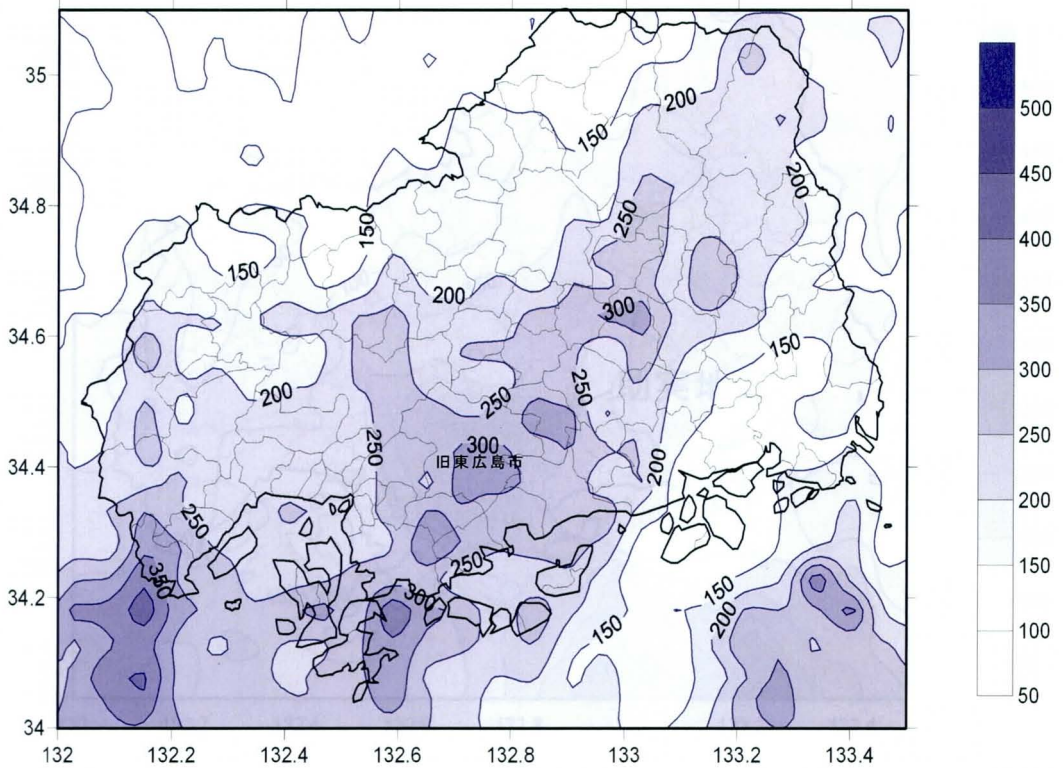


図-6.11(2) レーダー・アメダス解析雨量による最大 R' 値の分布図(1993年7月28日)
 Fig. 6.11(2) Distribution of the R' max-value by radar AMeDAS analysis rainfall (July 28th, 1993)

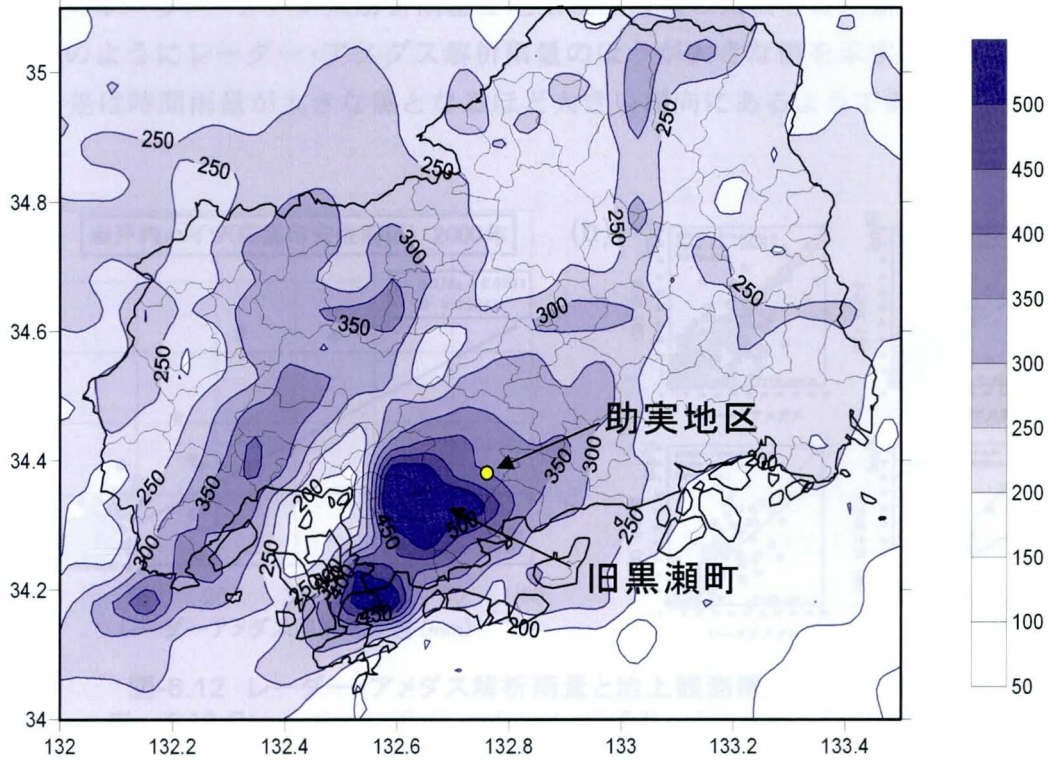


図-6.11(3) レーダー・アメダス解析雨量による最大 R' 値の分布図(1999年6月29日)

Fig. 6.11(3) Distribution of the R' max-value by radar AMEDAS analysis rainfall (June 29th, 1999)

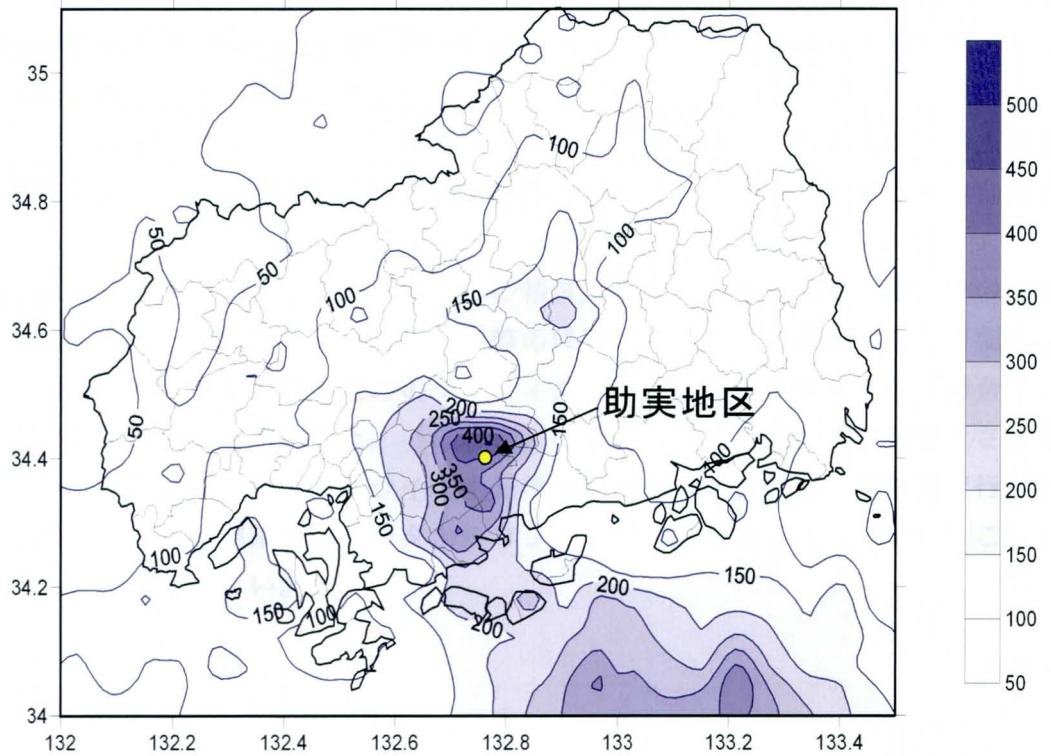


図-6.11(4) レーダー・アメダス解析雨量による最大 R' 値の分布図(1999年9月15日)

Fig. 6.11(4) Distribution of the R' max-value by radar AMEDAS analysis rainfall (Sep. 15th, 1999)

これまでのレーダー・アメダス解析雨量と地上観測雨量の比較をした研究¹¹⁾⁻¹³⁾においては、図-6.12のようにレーダー・アメダス解析雨量のほうが大きな値を示す例も多い。また、その解析誤差は時間雨量が大きな値となるほど大きい傾向にあるようである。

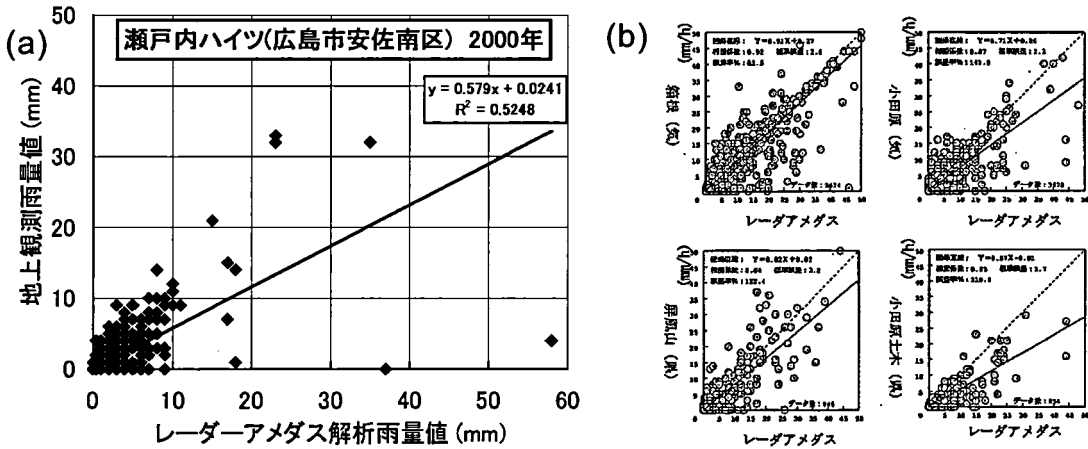


図-6.12 レーダー・アメダス解析雨量と地上観測雨量の比較例
 Fig. 6.12 Comparison of an analyzed rainfall using radar AMeDAS with an observed rainfall on a ground
 (a) : 海堀ら¹¹⁾による比較例, (b)村上ら¹³⁾による比較例

東広島市周辺のこれらの災害事例では、レーダー・アメダス解析雨量は広範囲で一定精度を持つ雨量を示すものであり、降雨の分布範囲を把握するのに有用なものである。また、地上観測で把握しきれないような局地的な豪雨を捉えることができる可能性もあり、非常に利用価値の高いものであることがわかる。

さらに、「降水短時間予報」や「降水ナウキャスト」による6時間先までの1時間降水量や1時間先まで10分間雨量の予報は、降雨を防災指標とする上で非常に有益なものであるといえる。

しかしながら、上記のように地上観測との精度差があるものであるため、その精度を考慮して運用することが望まれる。特に、実際の降雨よりも大きい値がとれる可能性があるため、既往降雨から警戒避難のためのクリティカルラインや基準値を決める場合にレーダー・アメダス解析雨量を用いると、「危険側」の値となってしまうことが懸念される。

したがって、特にクリティカルラインや基準値を決める場合には、本研究で行ったように、これまでの地上観測雨量のデータからコンターマップを描くことにより、これらの値を設定することが望ましい。

6.6 本章のまとめ

本章では、新しく監視雨量強度 R_R なる指標を定義し、これを用いた警戒避難のためのわかりやすい情報手段を提案した。本章の成果を以下にまとめる。

- ① 雨量指標 R' 値は、土砂災害発生危険度とその分布をわかりやすく示すことができる一方で、同じ R' 値で次の1時間に同量の降雨が加わった場合でも、その先行降雨の条件（すなわち、長期雨量と短期雨量の影響程度）により1時間後の R' 値が異なるという特性を持っている。
- ② R' の算定において、1時間前に値を予測するための未知数は時間雨量のみであるため、この未知数を監視雨量強度 R_R とすると、 R_R を用いて1時間後に雨量指標 R' が基準値を超えるのに必要な時間雨量を表現することができ、任意の時点で1時間にどれだけの降雨があれば危険な状態に達するかを把握することができる。
- ③ 雨量指標 R' によりリアルタイムで土砂災害発生危険度とその分布・変遷を知り、あわせて監視雨量強度 R_R により「あとどれくらいの雨が降れば土砂災害に対する危険が著しく増すのか」を知った上で、今後の降雨予測情報に着目すれば、より直感的でわかりやすい警戒避難情報となりうる。
- ④ 監視雨量強度 R_R を警戒避難のための方法として用いる際には1時間雨量の生起確率や短時間降水量予測などを参考に、レベルA～レベルCなどの危険度指標を設けることが有効である。
- ⑤ 第5章で提案した方法で、8年確率に相当する R' 値を土石流に対する基準値とし、レベルA、レベルB、レベルCの警戒避難情報を発するための閾値を、その地域における2年確率、10年確率、100年確率に相当する時間雨量で与えると、警報手段として妥当な時間的余裕をもって危険を予知することができる。
- ⑥ 東広島市内にある20箇所の雨量観測所での、土石流に対する基準値は $R'=241\sim 254\text{mm}$ 、レベルAのための閾値は $29\sim 31\text{mm/h}$ 、レベルBのための閾値は $40\sim 48\text{mm/h}$ 、レベルCのための閾値は $53\sim 69\text{mm/h}$ となり、近隣地域においても、その降雨履歴に差があることが確認された。
- ⑦ アメダス東広島観測所の1999～2006年のデータを用いた頻度検証では、8年間に3回危険度が「レベルA」に達している。3回のうち2回は、周辺地区で甚大な災害が発生したときで、残りの1回も広島県西部で多くの土石流が発生し、東広島市でも災害対策本部が設置されており、避難勧告を発するにふさわしい状況であったといえる。

- ⑧ 東広島市内での2005年の台風14号を対象としたケーススタディーでは、レベルAの危険度になった地域と、このときに浸水した区域がよく対応しており、特に危険度が高かったエリアを抽出することができている。また、このケースでは重大な土砂災害が発生していないが、1箇所を除いてR'値は土石流発生限界降雨量に達していないことから、基準値は相応のものであるといえる。
- ⑨ 東広島市で土砂災害が発生した3回の降雨を対象に、レーダー・アメダス解析雨量による最大R'値の分布図を作成すると、地上観測雨量のみでは表現できなかった強雨域の分布を示すことができた。一方で、解析雨量が実際の降雨よりもかなり大きな値となっていた可能性を示す範囲も確認された。
- ⑩ R'分布による方法は地上での実測値をもとにした容易なものであるが、これにレーダー・アメダス解析雨量による予想降水量の情報を加えてR'値の予測値を出すことができれば、事前の警戒避難により適切に供することができると思われる。

【引用文献】

- 1) 海堀正博, 浦 真, 吉村正徳, 藤本英治(2006): 2005年9月6日広島県宮島で発生した土石流災害, 砂防学会誌, Vol.58, No.5, pp.18-21.
- 2) 地盤工学会中国支部台風14号災害緊急調査団(2005): 中国地方における平成17年台風14号の土砂災害について, 土と基礎, Vol.53, No.12, pp.125-130.
- 3) 松村和樹, 海堀正博, 水原邦夫, 末峯章, 戎信宏, 野呂智之, 山越隆雄(2005): 2004年台風23号における岡山県玉野市, 香川県さぬき市周辺の土砂災害(速報), 砂防学会誌, Vol.57, No.6, pp.40-46.
- 4) (社)広島県森林協会(1994): 平成5年発生林道災害総合調査報告書, 100p.
- 5) 地質調査所(1986): 20万分の1地質図幅「広島」.
- 6) 広島地方气象台(2005): 平成17年台風第14号に伴う9月6日から7日にかけての大雨, 広島県(宮島町, 廿日市市)現地調査報告書, 16p.
- 7) 東広島市(2007): 東広島市ハザードマップ, 「八本松地区洪水・土砂災害」, 「黒瀬地区洪水・土砂災害」, 「福富地区洪水・土砂災害」.
- 8) 気象庁(2005): 気象業務はいま, 30p.
- 9) 国土交通省(2005): 台風・豪雨等に関する気象情報の充実—災害による被害軽減に向けて—, 平成16年度政策レビュー結果評価書, 53p.
- 10) 国土交通省河川局砂防部, 気象庁予報部, 国土交通省国土技術総合研究所(2005): 国土交通省河川局砂防部と気象庁予報部の連携による土砂災害警戒避難基準雨量の設定手法(案), 18p.
- 11) 海堀正博, 中井真司, 大本直樹, 森田耕司, 作野裕司(2006): 2005年台風14号による広島での土砂災害とその原因, 第3回土砂災害に関するシンポジウム論文集, 土木学会西部支部, pp.187-192.
- 12) 栗原淳一, 山越隆雄, 麿嶋直樹(2007): わかりやすい土砂災害情報に関する実証実験, 土木研究所試料第4048号, 140p.
- 13) 村上隆博, 菊井稔宏, 嶋大尚, 清水基成(2008): 雨量計の有効範囲に関する一考察, 砂防学会誌, Vol.61, No.2, pp.16-22.

第7章 結論および展望

近年、毎年のように日本のどこかで自然災害が発生し、住民の防災に関する関心は高まってきている。また、土砂災害軽減のための取り組みとして、発生防止や移動土砂の停止を目的としたハード対策や、発生予測・情報伝達・警戒避難などのソフト対策が行われている。

適切なソフト対策のためには、豪雨の際に市町村の防災担当者や地域住民が「自分の住んでいる地域の周辺はどの程度危険な状態になっているのか？」ということを確認に把握する必要がある。土砂災害の危険度を的確に把握するためには、①雨量・地形・地質特性などの地域特性を考慮した危険度情報を、②迅速かつ的確に、③わかりやすい形で発する必要がある、本研究ではこの点をもっとも重視してきた。

本研究は、土砂災害の危険度を判断する際の一助となるよう、わかりやすい土砂移動現象の予測手法をつくり上げることを目指して進めてきた。このための新しい雨量指標を考案し、これを用いて地域ごとの雨の降り方や地域の特性を反映させることにより、地域に応じた土砂災害軽減のための防災情報手段を提案したものである。以下に、本研究で得られた結論をまとめる。

7.1 本研究の結論

本研究では、雨量指標 R' なる手法を提案し、この物理的意味を考察し、地域ごとの特性を反映する方法について検討した。 R' を用いたケーススタディーから、土砂移動現象が発生するための限界降雨が地域特性に大きく依存することを再確認し、地域ごとに特性を考慮することの必要性を指摘した。そして、よりわかりやすい警戒避難のための手法として監視雨量強度 R_R なる指標を提案し、これを用いて情報を発することの有用性を確認した。

各章から得られた結論は以下のとおりである。

(1) 第1章（既往の土砂災害予測手法と課題）

本研究で取り扱う雨量指標を用いた土砂災害予測に関する研究は1970年ごろから取り組まれるようになり、様々な雨量指標が開発されてきた。

現在、主として用いられている手法としては、実効雨量をはじめとする複数の指標を用いて $X-Y$ グラフで危険を判断するものと、都道府県と気象庁の共同による連携案方式によるものが挙げられる。連携案方式による手法は、予測降雨により数時間後までの情報が必要にわかるという利点や、RBFNにより非発生降雨から CL を設定できる利点がある。一方で、多くのパラメーターを設定する必要があるため、地域の防災担当者が独自に地域特性を反映した基準を設定することは困難である。実効雨量を用いた $X-Y$ グラフによる手法は、その簡便性と実用性の高さから警戒避難の判断手法として利用されてきた実績も多い。実効雨量は比較的簡便な式で表され係数も少ないため、地域ごとに基準を設定することも容易であり、精度高く予測することが可能である。従来、実効雨量を用いた手法は

時の予測に用いられていたが、多くの雨量観測データを用いて降雨の空間的移動を把握することにより、危険な場所を予測する試みがなされている。

これらのことを受け、本研究では、市町村の防災担当者や地域住民にもわかりやすい、身近な雨量指標の開発を目指しているため、比較的簡便な式を用いる予測手法を開発することを基本とした。

(2) 第2章（新しい雨量指標 R' の提案）

本研究で提案した新しい雨量指標 R' は、先行降雨の影響を示す長期実効雨量と短時間の降雨強度の影響を示す短期実効雨量の影響を1つの値で表す指標である。危険度が1つの値の大小で表されるため、直感的に危険を判断しやすく、さらに、時間ごとに R' 値の等値線図を描くことにより、危険性の空間分布をリアルタイムで追従することができる。

広島周辺の花崗岩分布域では、実効雨量の半減期を72時間と1.5時間とし、 $R_1=600\text{mm}$ 、 $r_1=200\text{mm}$ 、重み係数 $a=3$ を用いれば、土石流は $R'=250\text{mm}$ 、山地崩壊は $R'=175\text{mm}$ 、がけ崩れは $R'=125\text{mm}$ を発生限界降雨量の目安にできることがわかった。また、 R' 値の大小により、土砂災害の規模を推定できる可能性があることもわかった。

雨量指標 R' は、計算式のわずかな変更により様々な形状の CL を表現することができ、既に用いられている雨量指標を容易に R' に変換することができる。ここでは、事例を示しながら変換手法を提案した。

(3) 第3章（雨量指標 R' の物理的意味）

東広島市助実地区でのモニタリングと室内での人工降雨実験の結果を用いて、降雨による土中水分量の変化に着目し、雨量指標 R' の物理的意味づけを試みた。

降雨時の斜面安定の問題は、サクシヨンの低下に伴うせん断強度の低下と、地下水による間隙水圧の発生で説明され、どちらの観点でも土中水分の変化による影響が大きい。

現地モニタリングでは、表層（ここでは地表～GL-30cm程度）の湿潤状態は小規模降雨であっても変化し、基底層（ここでは概ねGL-60cm以深）では累積された降雨に伴って変化する傾向が確認された。一方で、中間層（ここではGL-30～60cm程度）では、平常時の降雨では土中水分はあまり変化せず、先行降雨と雨量強度の両方が重なったときに急激に上昇する傾向が見られた。

人工降雨実験では、長時間にわたり降雨を与えたケースでは全体的に含水比が上昇したが、同じ雨量を短時間強雨として与えたケースでは、表層と基底層の含水比のみが上昇した。しかし、ある程度含水比が高い状態（実験では15～17%）になるよう先行降雨を与えた後に、短時間強雨を与えると中間層も含めて万遍なく含水比が上昇する結果となった。

現地モニタリングと室内人工降雨実験では、どちらも土中水分が一様に上昇するためには、あらかじめある程度以上の湿潤状態である必要があることを意味する結果となった。このことは、先行降雨と雨量強度の両方の影響で地盤が不安定化することを示している。

R' を用いると、両者の影響を1つの値で表すことができる。この意味では R' は地盤の不安定化条件を適切に表現しうるものといえる。現地モニタリングでの中間層の体積含水率

の上昇条件は、半減期 72 時間と 1.5 時間の実効雨量を組み合わせた R' 値によって良好に表すことができ、 R' を斜面が不安定化する降雨条件の指標として使用できることが示された。

(4) 第 4 章（災害事例を用いた雨量指標 R' の適用性の検証）

広島県や岡山県の花崗岩分布域の事例では、土石流は $R' \geq 250\text{mm}$ の範囲で発生し、がけ崩れは R' 値 = 150~200mm 程度の範囲でも発生しており、第 2 章の検討値とよく合っている。しかし、花崗岩分布域では、他の地質の分布域に比べて土砂移動現象が容易に発生する傾向が見られた。特に 2005 年台風 14 号の事例では中古生層分布域に、2006 年 7 月の事例では流紋岩や安山岩の分布域に非常に大きな雨が降ったが、その被害程度は既往の花崗岩分布域での災害に比べて小さなものであった。また、2006 年台風 13 号の事例では、花崗岩分布域では土石流が多く発生し、粘板岩や硬質流紋岩の分布域においては石礫堆を形成する崩壊が多く見られるなど、土砂移動形態も分布地質により異なることがわかった。さらに、土砂移動現象の発生には、過去の台風などによる斜面のダメージや降雨履歴なども関係している可能性が指摘された。

2005 年台風 11 号による神奈川県の実例では、これまでに広島県周辺で土砂災害が発生した時の雨量規模を大きく上回る豪雨があったが、係数を変更した雨量指標 R' を用いることにより、危険な領域を矛盾なく表現することができた。

2008 年 8 月の短時間集中豪雨の実例では、流動性の高い土砂移動現象はなく、河川水位の急上昇による道路の冠水や家屋への浸水被害があった。このことは、先行降雨を伴わない短時間強雨時では、地中にあまり浸透せずに表流水として流出しやすいことを示唆しており、第 3 章のモニタリングおよび人工降雨実験の結果と調和的である。

これらの事例からも、 R' を雨量指標として用いることの有効性が確認されたが、その係数や土砂災害の目安となる値は地域により異なり、警戒避難指標として運用するためには個別の検討が必要であることがわかった。

(5) 第 5 章（予測手法への地域特性の反映）

降雨履歴と土砂移動現象の関係については、統計的手法を用いて地域ごとの R' の生起確率により評価し、これに従って土石流の発生限界降雨量を求める方法を提案した。これによると、広島地域では 8 年確率程度の R' 値を用いて土石流発生の基準値を設定することが妥当であることがわかった。

地質と土砂移動現象の関係については、既往の研究でも花崗岩は土砂災害に対する抵抗が小さい地質として取り上げられているが、事例整理により、広島県の主要な土砂災害の多くも花崗岩地帯で発生していることを確認した。また、地質境界域での豪雨事例では、土砂移動現象は両地質分布域にわたって発生しているが、土石流などの流動性の高い土砂移動現象は特に花崗岩分布域で顕著であることがわかった。

さらに、玄武岩ドーム分布箇所での地すべり事例をもとに地質構造との関係について検討した。対象地域では、地質構造に起因して非常に長い半減期の実効雨量で表現されるような地下水変動があり、それに伴った変動が発生している。当事例では 480 時間と 72 時間

の半減期を組み合わせた実効雨量による R' を用いることにより変動時期を適切に表現することができた。

地形と土砂移動現象の関係については、既往研究でも言われている、背後に侵食小起伏面が分布する箇所での発生しやすさを改めて検証するとともに、上部の地形形状や地質構造によって地下水を集めやすい地域があれば、土砂移動現象が発生しやすいことを示した。

加えて、注意が必要な箇所として、溪流の出口に形成された扇状地形、古い時代の土石流堆積物の存在、風倒木被害によるダメージなどに着目する必要があることを示した。

また、地震と土砂移動現象の関係について、地震後しばらくの間は小さな降雨でも崩壊が発生しうることを、先行降雨の影響で地盤の含水状態が高いときは地震により流動性の土砂移動現象が発生しうることを示した。

(6) 第6章（警戒避難に向けた表現方法の検討）

新しく監視雨量強度 R_R という指標を定義し、警戒避難のためのわかりやすい情報手段を提案した。監視雨量強度 R_R は「次の1時間に降れば R' の値が基準値を超える雨量」を指し、豪雨に伴う土砂移動現象の危険度の高まりを予測するものである。

警戒避難のための方法として用いる際には、1時間雨量の生起確率や短時間降水量予測などを参考に、レベル A～レベル C などの危険度指標を設け、雨量指標 R' と併せて用いれば、より直感的でわかりやすい警戒避難の情報手段となると考えられる。ここでは、第5章の方法で基準値を設定し、東広島市でケーススタディーを行った結果、この方法で R_R を用いることにより適切な危険度評価が可能であることがわかった。

また、東広島市の災害事例を対象に、レーダー・アメダス解析雨量による R' 値を適用すると、地上観測雨量のみでは表現できない強雨域の分布を示すことが可能であり、解析雨量が非常に利用価値の高いものであることが検証された。

7.2 今後の展望と課題

雨量指標 R' 値の分布と監視雨量強度 R_R を表示する方法を用いれば、豪雨時に「現時点でどの程度危険な状態であるのか」ということに加え、「あとどれくらいの雨が降れば土砂災害に対する危険が急激に高まるのか」を把握することができる。これを把握して降雨予測情報に注目すると、警戒避難のタイミングを適切に判断できるものと期待される。

以下に、今後この手法の実用化を目指していくにあたっての展望と課題を述べる。

(1) 運用に当たっての地域特性の反映

この手法は、比較的容易に地域特性を取り入れることができるため、地域に応じた細やかな警戒避難基準を設定することが可能であると考えられる。この手法を他の地域に展開するに当たっては、それぞれの地域の事例を適用して係数を設定することが望まれる。

本論文では、土砂移動現象に対する降雨履歴、地質、地形など影響について検討し、このうち降雨履歴については、統計的手法を用いて影響程度を評価する手法を提案した。地質や地形については影響要因を絞り込んだが、現段階では広島周辺の花崗岩地帯における

係数や基準値の提案に留まっている。雨量指標に地質要因や地形要因を盛り込んでいくに当たっては、GISなどを用いて、その分布の面的広がりを反映させることが望まれる。

その際には、対象とする町のつくりや、人口構成、避難路や避難場所などの社会的要因や地域のハザード情報も盛り込んでいくことが必要と考えられる。

(2) レーダー・アメダス解析雨量による予測 R'

本手法は、現段階では地上での実測値をもとにしたものであるが、これにレーダー・アメダス解析雨量の予想降水量の情報を加えて、 R' 値の予測値を出すことができれば、より適切に警戒避難に供することができる指標となるものと考えられる。

本研究による監視雨量強度 R_R に通じる考え方が用いられているアメリカ合衆国の Flash Flood Guidance (FFG)という洪水予測情報では、解析雨量をもとに6時間後までの予測情報が示されているが、筆者の手法とレーダー・アメダス解析雨量を組み合わせれば、同様の情報を発することが可能であると考えられる。

(3) 地域住民にわかりやすい指標に向けて

ソフト対策に取り組むためには「自助」・「共助」・「公助」のバランス取れた協働体制が不可欠である。このためには、地域住民を含めたすべての人が防災情報の正確な内容を理解することが重要である。

筆者は、わかりやすい土砂移動現象の予測手法をつくり上げることを目指して研究を進め、成果である雨量指標 R' や監視雨量強度 R_R 、さらにはこれらを組み合わせた手法を提案した。この手法は、ケーススタディーの結果からも、わかりやすい防災情報手段になるものと期待でき、少なくとも地域の防災担当者が危険状態を把握するには適切なものであると考えられる。

現況では、地域住民の一人ひとりに正確な防災情報を伝えることは、決してたやすいことではない。しかしながら、いたずらにアウトプット情報を簡単にするだけではなく、防災教育・啓発活動により地域住民の理解を深めることが重要であると考えられる。このためには、ウェブサイトなどによる防災情報の公開はもとより、住民参加型の防災訓練やワークショップの実施などにより、地域の防災意識を向上させることが重要である。

筆者は、広島大学・地域防災ネットワークの活動や、建設コンサルタントとしての業務などを通じて、一般住民や高齢者、小学生に向けた災害図上訓練 (DIG: Disaster Imagination Game)¹⁾や、幼稚園児に向けた防災プログラム²⁾などの手法を用いて地域住民に対する防災啓発活動を行ってきた³⁾が、今後も「地域住民を含めたすべての人が防災情報の正確な内容を理解する」ことを目標に、このような啓発活動を続けていきたい。

【引用文献】

- 1) 瀧本浩一(2008): 地域防災とまちづくりーみんなをその気にさせる災害図上訓練ー, 自治体議会政策学会叢書, イマジン出版, 107p.
- 2) (社)土木学会 巨大地震災害への対応検討特別委員会(2006): 幼稚園・保育園・家庭防災ハンドブック(子どもの命を守るための防災マニュアル), 学研教育総合研究所, 192p.
- 3) 渡邊真悟, 藤本睦, 中井真司(2008): 土砂災害に対する地域防災支援の事例紹介, 第43回地盤工学研究発表会, p.1709-1710.

謝 辞

本論文は、2003年9月から広島大学非常勤講師（地域貢献特別事業費，工学研究科）として、また2006年4月から広島大学非常勤研究員（工学研究科），さらに2007年4月からは広島大学大学院総合科学研究科博士課程の学生として研究してきた成果を取り纏めたものです。社会人として、長期間にわたって研究を進めることができたのは、ご指導下さった諸先生のご尽力はもとより、会社の諸氏のご理解と惜しみないご協力の賜物であると、深く感謝しております。

研究を進め、学位論文を纏めるにあたって、広島大学大学院総合科学研究科の海堀正博准教授には終始適切なご指導・ご鞭撻を賜りました。また、同研究科の於保幸正教授，福岡正人教授，戸田昭彦教授に貴重なご意見を頂戴いたしました。

広島大学総合科学部の学生時代、私は当時同学部の教授でいらっしゃった広島大学名誉教授の栃木省二先生の教えで砂防・地すべりを学ぶようになりました。同学部の助手をされていた海堀先生は、その当時からの恩師で、広島大学大学院生物圏科学研究科博士課程前期に進学した際には、指導教官として私を育てて下さいました。また、社会人になってからも研究に係ることのみならず、私生活や業務においても悩みが生じた時には親身にご指導下さっています。

本研究は、2003年9月から広島大学非常勤講師として広島大学地域防災ネットワーク構築事業に係らせて頂いていた際、当時工学研究科の教授でいらっしゃった広島大学名誉教授の佐々木康先生にご指導頂きながら着手したものです。以降、沢山の方々にご協力頂きました。特に呉工業高等専門学校森脇武夫教授は、海堀先生、佐々木先生とともに共同研究者として、学術論文や学会発表のたびに適切に指導下さいました。また、広島大学・地域防災ネットワークを通じて、広島大学大学院工学研究科の中村秀治教授，土田孝教授，一井康二准教授，加納誠二助教，同国際協力研究科の山本春行教授，同理学研究科の北川隆司教授，同メディア教育研究センターの吉富健一助手，当時研究員をされていた古川智氏（中電技術コンサルタント）には、様々な立場から防災に関する貴重な考え方をご教示賜りました。

また、技術研鑽の場として参加させて頂いている、地盤工学会中国支部土質工学セミナー，斜面崩壊発生予知研究会，および地すべり学会関西支部運営委員のメンバーの皆様には、様々なアドバイスや数多くの励ましのお言葉を頂戴いたしました。

ご指導・ご鞭撻下さった方々には、心より感謝の意を表します。

室内人工降雨実験や現地モニタリングにあたっては、海堀先生ほか、広島大学総合科学部砂防学研究室のOBや学生諸氏にも大変なご協力を賜りました。特に、鈴木あゆみ氏（2008年4月卒業）とは室内人工降雨実験を共に行い、いろいろな議論を交わしました。これに更なる考察を加えて本論文の論点の一つとさせて頂きました。

現地モニタリングについては、研究室に蓄積されているデータを使用させて頂きましたが、モニタリング開始に当たっては、梅木健一氏（2001年3月修了）、井上新平氏（2004年3月卒業）がご苦勞され、その他の学生諸氏もデータ取得に汗を流されています。

この研究成果も研究室のOBや学生の諸氏のご尽力があつてのものだと再認識し、ここに改めて御礼申し上げます。

厳しい社会情勢の中、学位取得の貴重なチャンスを与えて下さった近藤英樹社長をはじめとする復建調査設計株式会社の皆様には、この上ない恩義を感じております。

福田直三常務、小田秀樹常務は筆者に学位取得を勧めてください、そして数々の後押ししてくださいました。また、技術者として育ててくださった岡山支社の田中元副支社長、山田琢哉技術課長、技術研究所の来山尚義所長、地盤技術部の西田宣一課長、若槻好孝課長補佐、高松支社の松木宏彰課長、東京支社の藤井照久課長ほか諸先輩は、折に触れ励まして下さいました。深く感謝しております。

所属する防災システム部の藤本睦部長、植田哲司課長をはじめとする皆様には、業務遂行上ご迷惑をおかけする場面が多々あったと思いますが、研究活動を支援して下さい、大変感謝いたしております。

研究成果およびこの貴重な体験を活かし、今後の業務や会社の発展に貢献して参る所存でございます。

また、論文執筆中は生活が不規則になりがちで、大変な時期もありました。そんな時にも妻と子供たちの笑顔に励まされ、これを乗り越えることができました。支えてくれた家族に感謝します。

最後に私事ではありますが、大学院博士課程在学中の2007年6月に母節子、2008年11月には父一夫が他界いたしました。父母はともに戦前の生まれで、私にはわからない様々な苦勞をしてきたと思います。また、父は幼い頃に父親を亡くして決して裕福ではない環境で、苦學をして医師そして医学博士になったそうです。私はというと、平和な時代に生まれ、父母に甘やかされて何不自由なく育ててもらったにもかかわらず、中学～高校時代はあまり学業が好きではなく、特に母には成績のことで心配を掛けたと記憶しています。そんな私も、かつて散々迷惑を掛けた頃の父母に近い年齢となり、いつの日か学位の取得を目指すようになりました。学術領域は違いますが、少しでも父に近づきたいという思いがあつたのかもしれませんが、できれば、父母が活着ているうちに学位取得を報告し、喜ぶ顔が見たかったのですが、今ではそれは叶いません。遅れた報告にはなりますが、計り知れない感謝の意とともに博士（学術）の取得を報告したいと思います。

中井真司