

土砂災害を発生させた豪雨のファクターとスケールの設定法

林 拙郎¹・山田 孝²

Setting method of the factor and the scale of heavy rainfall caused sediment-related disasters

Setsuo HAYASHI¹ and Takashi YAMADA²

Abstract

Antecedent rainfall and triggering rainfall are introduced as factors of heavy rainfall. Antecedent rainfall (R_{2-15}) is the amount of rainfall for the two weeks prior to two days before the disaster. Triggering rainfall (R_{0-1}) is the amount of rainfall over two day period, the day of the disaster and the day before the disaster. However, these factors are affected by the locality of the heavy rainfall. Therefore, to eliminate the influences of locality, a local rainfall ($R_{1/2}$) factor is introduced. By using this local rainfall factor, two rainfall amounts are evaluated, and criteria indicators for heavy rain are established. The indicators for heavy rainfall are formulated by the intensity of antecedent soil moisture ($R_{2-15}/R_{1/2}$) and the intensity of triggering ($R_{0-1}/R_{1/2}$). Using this scale indicator of heavy rainfall, a class of heavy rainfall, from H0 to H6, is introduced to evaluate rainfall levels that cause sediment-related disasters.

キーワード：豪雨災害，先行雨量，先行水分度，トリガー度，豪雨階

Key words: disaster of heavy rainfall, antecedent rainfall, intensity of antecedent soil moisture, intensity of triggering, scale of heavy rainfall

1. はじめに

過去に発生した豪雨による土砂災害と最近のそれとを比較し，総合的に考察するには災害論的アプローチが有効である。その場合，外力に相当す

る「豪雨量」そのものに関する統一的理解が必要となる。従来，土砂災害に直結する外力として，「豪雨量」のファクターとスケールをどう設定するか，の視点は少なかったように見受けられる。豪雨以

¹ 静岡大学防災総合センター
Shizuoka Univ. Center for Integrated Research and
Education of Natural Hazards

² 北海道大学大学院農学研究院
Hokkaido Univ., Research Faculty of Agriculture

本報告に対する討議は平成 30 年 5 月末日まで受け付ける。

外の各種災害において誘起する外力のファクターに関しては、それぞれのスケールが設定されている。例えば、地震災害の場合、マグニチュードや計測震度、加速度など、いくつかのファクターとスケールとが用意されている。また、竜巻の場合、Fスケールが知られている。

これに対して、豪雨による土砂災害では、過去の災害に関して「豪雨量」としてどういう種類の雨量（豪雨のファクター）が適切なのかについては、特に議論されることもなく、各災害において、日雨量や時間雨量、または、それらによる累積雨量が随時、個別に採り挙げられることが多く、場合によっては単なる概要として挙げられるだけのこともあった。そのため、過去の土砂災害で採り挙げられる雨量も累積雨量（総雨量）、日雨量、時間雨量などであり、降雨期間や時間はまちまちであった。これは、土砂災害の全般に関する豪雨のファクターの選定とその結果としての豪雨のスケール（豪雨度や豪雨階）の議論が難しく、これまで設定されていなかったためである。土砂災害に関係する「豪雨量」の設定は、たとえ一地域にて出来たとしても全国的にみると多雨地域・小雨地域などの地域的な偏りや、それによる豪雨に対する慣れの影響が大きく、全国的に統一するのが難しかったためとも考えられる（林，1985；林・山田，2013）。

ここで、豪雨のファクターに対応する豪雨のスケール（豪雨度や豪雨階）が設定されると、過去の土砂災害の豪雨のスケールが求められる（あるいは、推定される）ようになる。こうなると、最近発生した土砂災害の豪雨のスケールは現行データによって直ぐに求められるので、過去の土砂災害の豪雨のスケールとの比較が可能となり、相互の災害論的な位置付け（評価）が行えるようになる。

最近の被害の程度は、学術調査やテレビ・新聞などにより、実態としてのイメージがよく知られるようになったが、現在から過去の災害発生豪雨を同定することが可能になれば、過去の災害の状況を現在の災害からイメージ化することが可能となる。また、地形地質条件が類似している他の地

域において、過去の災害発生豪雨のスケールの方が大きければ、現在の災害発生豪雨からそのスケールに応じて拡大する被害の状況を推測することが可能となる。これは現代人にとって深い意義と教訓を与える。

過去と現在の土砂災害を橋渡しする豪雨のスケールとしてどのファクターを採用すればよいであろうか。これには日雨量を基本ファクターとして用いるのが最適であろう。何故なら、古い降雨データの場合、日雨量しかわからないこともあり、また被害の全体像をみるには、時間単位の雨量より日単位の雨量の方が適しているからである。以下では、まず土砂災害において採用すべき雨量計の位置関係や、災害当日を含む日雨量を用いたトリガー雨量の選定を行い、土砂災害に重要な事前の水分増加を与える先行雨量の設定法について検討する。続いて、過去の土砂災害を発生させた「豪雨量」をトリガー雨量と先行雨量から比較検討を行う。

こうした検討を経て、顕著な土砂災害の降雨経過を後述の4つの視点から採り挙げ、検討する。最後に地域雨量（林，2008；林・山田，2013）を用いて両雨量の基準化を行い、豪雨度・豪雨階について考察し、過去の土砂災害の豪雨を同一指標によって評価可能となるような枠組みを設定する。

2. 土砂災害豪雨の解析方法

土砂災害の発生に関係する豪雨を以下、土砂災害豪雨という。

2.1 土砂災害に関する雨量計の選定法

土砂災害に関する降雨量は、気象庁などの雨量計によって通常測られるが、斜面崩壊などの発生場所は山間地であり、雨量計の選定には注意が必要である。これには、土砂災害の発生した豪雨域内の雨量計を用いることはいうまでもなく、特に、豪雨における里地と山地の降雨量の違いを考慮し、斜面崩壊などの発生地に対応した雨量計の選択が必要である。また、斜面崩壊などの群発する区域は大きな災害を除けば、通常5 km程度ま

であるので、出来るだけ発生地山側の雨量計の雨量を用い、流域平均雨量方式としないこととした。勿論、斜面崩壊などの発生区域を挟むように雨量計があれば、平均雨量を用いることも考えられる。

雨量計の選択にあたっての注意点として以下の三つの方針を採用した。

- (1) 斜面山側の雨量計を選択
- (2) 上記が無理であれば、直近の雨量計を選択
- (3) 古い災害で上記2つが無理であれば、代表点の雨量計を選択

方針(1)の理由は、家屋などのある土砂災害の発生地より山側の雨量によって崩壊発生斜面の土層内部に水分の貯留が形成されるからであり、山地斜面下側の里地にいくら大きな雨量が発生したとしても、斜面崩壊などを起源とする土砂災害には直接関係しないからである。

代表的な事例として、2013年伊豆大島豪雨が挙げられる(以下図中では、年を省略し、「2013伊豆大島豪雨」などと表示する。他も同様)。この場合、斜面崩壊などの発生区域は図1(石川・池田・他, 2014: 林・山田, 2016を加筆修正)に示すような

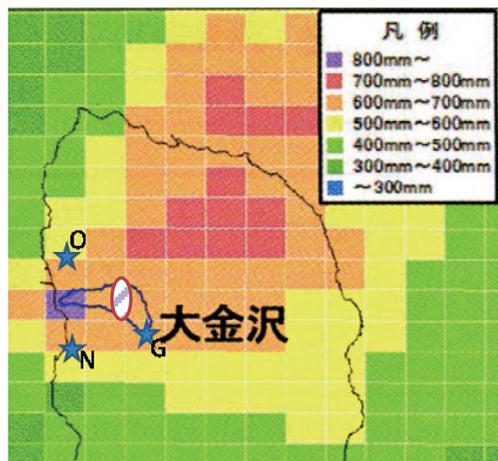


図1 2013伊豆大島豪雨におけるレーダ解析雨量と東京都雨量計位置(★_O: 大島支庁, ★_N: 野増, ★_G: 御神火茶屋), ○: 崩壊箇所, 累積期間は10月14日22時~16日07時まで(林・山田, 2016)

大金沢の赤色楕円の区域であり、雨量計(★G)は崩壊発生地である大金沢の山側にあるので、この雨量計(御神火茶屋)を採用した。また、図2は2012年阿蘇豪雨による土砂災害事例である(林・山田, 2016)。外輪山東側の楕円で囲んだ範囲が斜面崩壊の発生地の一つ(手野)であり、山側の雨量計は、図中の★印熊本県阿蘇城山(以下、県城山)の雨量計を採用した。同図中央平地にはアメダス阿蘇乙姫があるが、県城山との雨量の違いを図3に示す。県城山の雨量計は、平地のアメダス阿蘇乙姫より累積雨量で140 mmを超える減少が生じている。

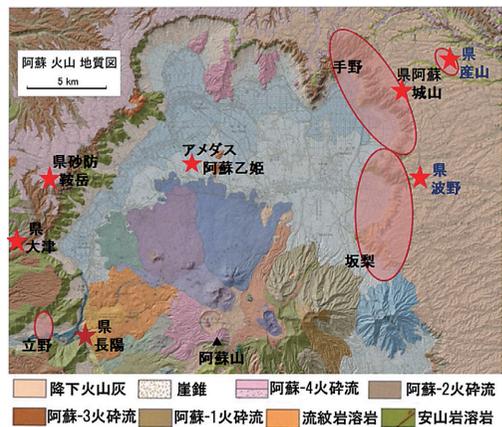


図2 2012阿蘇豪雨における阿蘇地域の火山地質と土砂災害地(○), および各雨量計★の位置(林・山田, 2016)

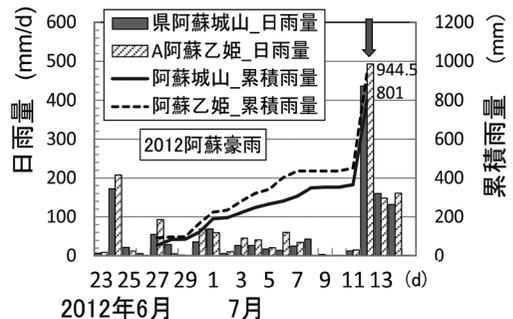


図3 阿蘇地域における6月23日~15日までの日雨量と累積雨量の比較, ↓は災害発生時刻。

方針(2)は、やむを得ず次善の選択であるが、豪雨域を外さないような注意が必要である。図4は、2014年の広島災害の被災箇所と雨量計の設置位置を示している(土田, 2014)。この図を参考にすると、山側上部に雨量計がないため、被災箇所の全体のほぼ中央に位置する広島県上原雨量計(以下、県上原)を採用するのが適切であると推測される。さらに、図5のレーダ累積雨量(防災科学技術研究所_水・土ユニット, 2015)と比較すると、県上原雨量計の位置は豪雨域に含まれていることがわかる。



図4 2014広島豪雨における災害被害区域と各雨量計の位置(土田, 2014)

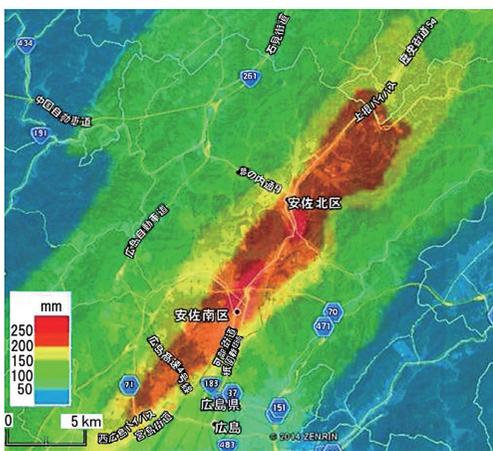


図5 2014広島豪雨時のレーダ累積雨量(19日18時~20日06時)(防災科技研_水・土砂防災ユニット, 2015)

方針(3)は、出来るだけ土砂災害の資料をあたるにしても、当時の山側の雨量計のデータが得られない場合などが該当し、等雨量線図など豪雨域に注意して選択する。以下の事例の1982年長崎豪雨(高橋, 2005)や、1961年伊那谷豪雨(田村, 1999)などがこれに相当し、この場合山側の雨量は、選択した里地の雨量計の雨量より上回っていることに注意すべきである。

2.2 日雨量による土砂災害豪雨のファクター

豪雨性の土砂災害における重要な発生要因は、斜面土層における水分量にあり、それに直接影響を与える因子は災害当日や前日の降雨量である。松四・斉藤・他(2013)は土砂災害に直接影響を与える豪雨のファクターとして「トリガー雨量」という名称を挙げた(正確には「トリガー降雨」)。以下この名称を用いる。

さて、直前の降雨量以外に先行する降雨やそれによる累積雨量(総雨量)も重要である。もともと降雨は、降ったり、止んだりしながら繰り返し、斜面土層内の水分量を増加させる。蒸発散量を無視すれば、斜面土層内の水分量は、降雨による斜面土層内への雨水浸入力から土層基盤への排水量と土層底面方向へ沿う浸透流の流量の差し引きによって決まるが、もとは降雨量にあり、それによる累積雨量は当該区域の斜面土層の水分量に大きく関係する(林・山田, 2015)ので、土砂災害に先行する雨量は第二要因となる。ここでは、この累積雨量(総雨量)を先行雨量と呼ぶ。先行雨量は、結果的に斜面土層内部の水分状態を表すことになる。

典型的な土砂災害は、当該区域の斜面土層の水分が事前の降雨によって高い状態となったところに、トリガー雨量による多量の水分が与えられることによって発生する(大滝, 1986; 林, 2008)。網干・低引(1972)は、トリガー雨量と先行雨量に相当する土砂災害豪雨に関するファクターとして、当日の日雨量と前日まで2週間の総雨量とを最初に採り挙げて広島周辺の土砂災害の発生限界と規模を研究した。図6は佐々木(2008)によって追加データが加えられた図を修正したものであ

り、ここでは縦軸・横軸を入れ替えて、縦軸が災害当日の日雨量、横軸が前日までの2週間雨量としている。ここにおいて、トリガー雨量は災害当日の日雨量(縦軸)であり、先行雨量は前日までの2週間雨量(横軸)である。

ところで、被害時一連の豪雨は、24時(00時)をまたぐ場合があり、トリガーとしては災害当日と前日の2日間雨量を設定する必要がある。以下、災害当日と前日の日雨量の合計をトリガー雨量とし、 R_{0-1} と表記する。一方、網干・低引は先行雨量を2週間としているが、実効雨量の半減期を考えると1週間雨量でも良いように考えられる。そこで両因子を検討するために、以下、前々日からの2週間雨量を R_{2-15} と書き、同1週間雨量を R_{2-8} と書くことにする。

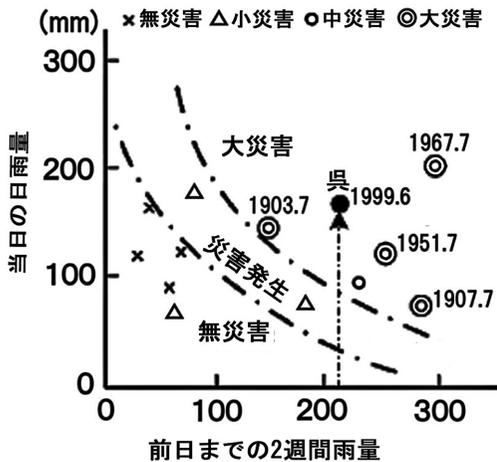


図6 前日までの2週間雨量と当日の日雨量の関係(佐々木(2008)を修正)

先行雨量として、 R_{2-8} と R_{2-15} の因子がどのように影響するのか、広島県呉市における1951年～1976年までの被害程度の比較的小さい土砂災害豪雨(呉市消防局, 1977)を採り挙げて検討した。図7は、縦軸にトリガー雨量 R_{0-1} をとって固定し、横軸の先行雨量を R_{2-8} (同図(a)), R_{2-13} (同図(b)), R_{2-15} (同図(c))と変化させて調べた図である。これを見ると R_{2-8} の図(a)で災害の発生・非発生の分離はほぼ足りており、先行雨量の日数の範囲を同図(b), (c)のように増やしていくと横軸の右側へデータがずれていく傾向がみられる。結果、最小限の横軸の因子は R_{2-8} であることがわかるので、網干・低引がどのように特別な必要性があれば、 R_{2-15} を考慮することにする。

また、図7の説明に「前アメダス」とあるのは、アメダス観測システムより前(1971年11月より前)のシステムを含めてすべてネット上のデータという意味で用いている。この他日雨量の日界は、時間雨量のない気象庁湯ヶ島以外は0時～0時に換算した。

さて、先の図7の発生・非発生を区切る曲線は、呉市における土砂災害豪雨の小さいものを採り挙げたものであるから、以下の限界実効雨量 D_c から類推することが可能である(鈴木, 1993; 林, 2008)。つまり

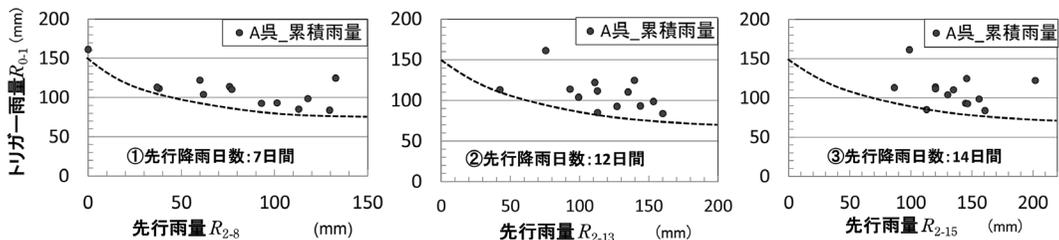
$$D_c = R_i + aD_{i-1} = R_i + a(R_{i-1} + aD_{i-2})$$

$$R_i + aR_{i-1} = D_c - a^2D_{i-2}$$

より、左辺および右辺を次のように

$$R_{0-1} = D_c - f_1(R_{2-8}), \text{ または } R_{0-1} = D_c - f_2(R_{2-15})$$

と表すと、図7の下限の限界包絡線が類推される。ここに、 D : 実効雨量, a : 係数, i : 災害当日を



(a) 先行降雨の日数7日間の場合

(b) 先行降雨の日数12日間の場合

(c) 先行降雨の日数14日間の場合

図7 呉における先行雨量の比較(図中のAは前アメダスを含む略称)

表す添え字であり、 $i-1$ ：災害前日を表す添え字である。

2.3 顕著な土砂災害豪雨の全体的な状況

先行雨量について、網干・低引(1972)は先行雨量を2週間の累積雨量 R_{2-15} を用いるべきであるとしたが、前で述べたように、呉の土砂災害の発生状況からは、前々日から7日間の累積雨量 R_{2-8} を用いても最低の条件を満たしているようであり、ここではこれを出発点として検討する。

そこで、先行雨量 R_{2-8} とトリガー雨量 R_{0-1} を因子とする過去の顕著な土砂災害豪雨をプロットしたものが図8である。図中、破線の呉は図7(a)の破線を示したものであり、その上側の破線は、呉以外の土砂災害発生雨量の推定限界線である。両破線を比較すると、呉はかなり少ない「豪雨量」で土砂災害が発生しているようである。図中の「紀風」、「紀那」は2011年紀伊半島豪雨によるアメダス風屋とアメダス色川の「豪雨量」であり、深層崩壊を含む斜面崩壊および表層崩壊を含む土石流が目立った豪雨域に対応している。この他、「伊」は1961年伊那谷豪雨の前アメダス飯田、「長」は1982年長崎豪雨のアメダス長崎、「島」は1983年島根県西部豪雨のアメダス浜田の降雨量である。その他の略記などの説明は表1に示す。

図8のトリガー雨量に注目すると、2004年徳島豪雨が如何に大きかったか明らかで、「鰐」や「紀那」、「紀風」など宮崎県南部や紀伊半島豪雨の雨

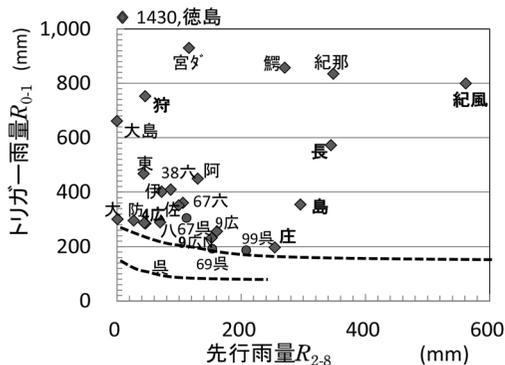


図8 顕著な土砂災害の豪雨の状況(先行雨量： R_{2-8} の場合)

量の多さが明瞭である。次に、典型的な土砂災害豪雨を個別に検討する。

3. 顕著な土砂災害豪雨の特徴と実態

以下、顕著な土砂災害を発生させた降雨の状況と累積雨量の経過を分析する。豪雨名は、大規模水害を連想させる豪雨などと区別するため、土砂災害に対応する豪雨名を心がけた(表1を参照)。実態の分析にあたり、2日間のトリガー雨量と期間1週間あるいは2週間の先行雨量に着目し、2週間を超える降雨日数を図示して日雨量からみた土砂災害豪雨の実態に関して検討を行う。なお、以下では地域雨量 $R_{1/2}$ という用語を用いるが、説

表1 使用した豪雨の名称と略称、雨量計など

災害年	豪雨名	略記	雨量計の名称とそれとの位置関係	地域雨量
1938年7月	六甲	38六	前アメダス神戸(2)	アメダス神戸
1958年9月	狩野川	狩	気象庁湯ヶ島(2)	アメダス湯ヶ島
1961年6月	伊那谷	伊	前アメダス飯田(3)	アメダス飯田
1967年7月	神戸	67六	前アメダス神戸(2)	アメダス神戸
1967年7月	呉	67呉	前アメダス呉(2)	アメダス呉
1967年7月	佐世保	佐	前アメダス佐世保(3)	アメダス佐世保
1969年7月	呉	69呉	前アメダス呉(2)	アメダス呉
1970年6月	呉	70呉	前アメダス呉(2)	アメダス呉
1971年9月	尾鷲	尾	前アメダス尾鷲(2)	アメダス尾鷲
1982年7月	長崎	長	アメダス長崎(3)	同左
1983年7月	島根県西部	島	アメダス浜田(3)	同左
1998年8月	福島(*1)	98福	国交省_真船(2)	アメダス那須
1999年6月	呉	99呉	アメダス呉(2)	同左
1999年6月	99広島	9広N	NEXCO八幡川(2)	魚切ダム
1999年6月	99広島	9広	広島県魚切ダム(1)	魚切ダム
2000年9月	東海	東	アメダス稲武(2)	アメダス稲武
2004年7月	美山	美	アメダス美山(2)	同左
2004年8月	徳島	徳	国交省_沢谷(2)	同左
2004年9月	宮川	宮ダ	三重県_宮川ダム(2)	同左
2005年9月	鰐塚	鰐	アメダス鰐塚山(1)	同左
2009年7月	防府	防	国交省_真尾(2)	アメダス防府
2010年7月	庄原	庄	広島県大戸(2)	アメダス庄原
2010年7月	八百津町	八	アメダス伽藍(2)	同左
2011年9月	紀伊那智	紀那	アメダス色川(2)	同左
2011年9月	紀伊風屋	紀風	アメダス風屋(2)	同左
2012年7月	阿蘇	阿	熊本県阿蘇城山(1)	アメダス阿蘇乙姫
2012年8月	大津南部	大	滋賀県大石(2)	アメダス大津
2013年10月	伊豆大島(*2)	大島	都_御神火茶屋(1)	アメダス大島
2014年8月	広島	4広	広島県上原(2)	アメダス三入
2015年9月	栃木(*1)	5栃	国交省_中三依(2)	アメダス今市

(*1)は図17と表2のみ表示、(*2)一部都野増雨量より推定
注)1971年尾鷲豪雨以前の雨量計の名称で「前アメダス尾鷲」等とあるのは、アメダス以前の前身を含めてすべてネット上のデータという意味で用いている。地域雨量のアメダスは前アメダスを含んでいる。

明や計算方法は後の4.1にて説明する。

図8との関連で実雨量のみから採り挙げた発現豪雨は次の通りである。

- ①トリガー雨量・先行雨量がともに多い豪雨
- ②トリガー雨量の多い豪雨
- ③先行雨量の多い豪雨
- ④雨量は少なくとも顕著な被害の発生した豪雨

3.1 トリガー雨量・先行雨量がともに多い豪雨

(1) 2011年紀伊半島豪雨

2011年8月31日から9月4日まで、5日間続いた台風12号による降雨の影響で地盤がゆるみ、紀伊半島各地で土石流・地すべり・崖崩れなどの土砂災害が発生した。奈良県・和歌山県・三重県における崩壊箇所は約3,000箇所へのぼり、崩壊土砂量は約1億 m^3 と推定された。これは豪雨による土砂災害としては戦後最大の崩壊量である。河道閉塞が17箇所が発生し、特に奈良県五條市赤谷、十津川村長殿・栗平、野迫川村北股、和歌山県田辺市熊野では大規模な河道閉塞が形成された。また、和歌山県那智勝浦町の二級河川那智川では、支川8箇所で大規模な土石流災害が発生し、死者26名、行方不明者1名の甚大な被害が発生した。これらの支川では表層崩壊などに起因する土石流が流下し、大量の不安定土砂が堆積した(国交省近畿地方整備局, 2014)。

ここでは2011年紀伊半島豪雨の日雨量の経過の図示を省略するが、次に述べる雨量は山地中央部に位置するアメダス風屋の雨量である(以下、アメダス・前アメダス雨量計の場合は図示を省略)。このときの先行雨量は、 R_{2-15} が690 mmで、 R_{2-8} は561 mmである。トリガー雨量 R_{0-1} は799.5 mmと大きい値である。先行雨量・トリガー雨量ともに、地域雨量 $R_{1/2}$ は166.5 mmに比して大きい降雨となった。

(2) 1982年長崎豪雨

1982年7月23日から25日にかけて、低気圧が相次いで西日本を通過し、梅雨前線の活動が活発となった。特に長崎県では23日夜に1時間に100 mmを超える猛烈な雨が降り続いた。長崎では

3時間に313 mm、日雨量448 mmの豪雨となり、長崎市郊外を中心に土砂災害が多発した。気象庁は、7月23日から25日の大雨を「昭和57年7月豪雨」と命名した(中央防災会議, 2005)。

長崎市は、すり鉢状の地形からなる斜面に都市が形成されていることもあり、土石流や崖崩れなど(県内で4,457箇所)によって、多くの死者・行方不明者(299名)が出るなど多大な被害が発生した(高橋, 2005)。

現在、1982年長崎豪雨における市郊外山地部の必要な雨量は求められないので、雨量計の位置は海に近いが、やむを得ずアメダス長崎の雨量で記述する(図は省略)。このときの先行雨量は、 R_{2-15} が581.5 mmで、 R_{2-8} は344.5 mmである。トリガー雨量 R_{0-1} は572 mmと大きい値である。先行雨量・トリガー雨量ともに、地域雨量 $R_{1/2}$ は131.7 mmに比して大きい降雨といえる。

3.2 トリガー雨量の多い豪雨

(1) 2004年徳島豪雨

2004年台風10号の影響で徳島県と高知県における四国南東部では7月末から8月2日にかけて豪雨となり、8月1日夜から2日未明にかけて相次いで規模の大きな土砂移動現象が木沢村や上那賀町を中心とする地域に集中して発生し、大きな被害を出した(日浦・海堀・他, 2004)。土砂災害の発生は、8月1日20時~23時頃とみられる。

両地区は、全国的にも屈指の多雨地域にあり、中でも木沢村は、急峻な山地からなり、梅雨や台風時に豪雨となりやすく、これまでたびたび斜面災害を受けてきた。近年では、1976年9月の台風に伴う豪雨により木沢村西部の山間部で斜面災害が多発した区域があったが、特に今回の2004年8月には、村内各地で複数の斜面崩壊が発生し、家屋・道路・山林などに大きな被害をもたらした(西山・寺戸・他, 2005)。

図9に2004年徳島豪雨の日雨量の経過を示す。雨量は、木沢村内に位置する国交省沢谷雨量計のデータである。このときは、7月31日までの先行雨量は少なく、 R_{2-8} 、 R_{2-15} のどちらも12 mmである。ところが、トリガー雨量 R_{0-1} は1430 mmと極端に

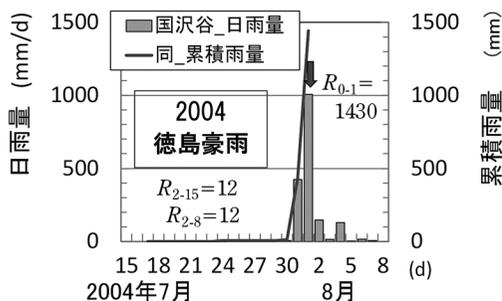


図9 2004徳島豪雨における国交省沢谷雨量計(木沢村内)の日雨量の経過

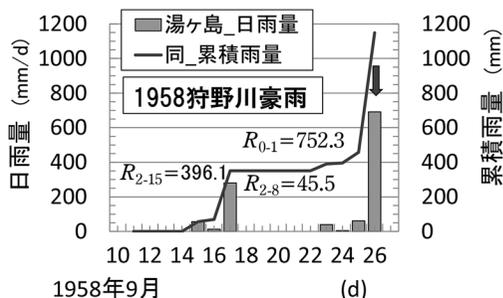


図10 1958狩野川豪雨における林野庁湯ヶ島雨量計の日雨量の経過

多く、地域雨量 $R_{1/2}$ も302.6 mm と多い地域でもある。

(2) 1958年狩野川豪雨

この豪雨は1958年狩野川台風時のものである。同年9月26日夜伊豆半島東岸を北上して三浦半島に上陸した台風22号は伊豆半島中部に750 mm を超える豪雨を降らせた。この台風22号は毎時50 km の速さで北上してきたが、静岡県南沖で速度が急速に落ち、一時毎時20 km 程度まで低下した。台風の気圧は、24日に中心気圧877 hPa を観測するなど、大型で猛烈な台風となった(内閣府, 2017)。

土砂災害は、湯ヶ島を中心に各地で発生し、狩野川の上中流域で堤防を氾濫させる大水害となり、多大な被害が発生した(中部建設協会, 2012)。

図10に1958年狩野川豪雨の日雨量の経過を示す。雨量計は当時の天城営林署(湯ヶ島; 現アメダス湯ヶ島の前身)の9時-9時日界のネット上にないデータである。先行雨量は、 R_{2-15} が396.1 mm で、 R_{2-8} は45.5 mm である。トリガー雨量 R_{0-1} は752.3 mm と大きい雨量となった。トリガー雨量は地域雨量 $R_{1/2} = 198$ mm に比して大きい、先行雨量はそれに対して大きい値ではない。

3.3 先行雨量の著しく多い豪雨

(1) 2010年庄原豪雨

2010年7月16日午後、広島県庄原市のわずか5 km 弱四方のエリアに3時間強の間、猛烈な強

雨があった。当日15時から18時までの3時間の各時間雨量は広島県大戸雨量計で順時、38, 72, 63 mm であり、計173 mm となった。これに対し、被災地より5-6 km 離れたアメダス庄原雨量計の3時間合計雨量は64 mm であり、典型的なゲリラ豪雨のタイプであった。

これにより、急激な中小河川の水位の上昇や、道路沿いの斜面崩壊・土石流が家屋を襲うなど、結果的には1,500箇所を超える斜面崩壊が発生し、その崩土が土石流・泥流・濁流となって流下し、大きな被害が発生した。死者は住居ごと流された1名だけであるが、土砂や濁流に巻き込まれながらも脱出して助かった人々もいた(海堀・杉原・他, 2010)。

図11に2010年庄原豪雨の日雨量の経過を示す。日雨量は直近の県大戸雨量計のデータである。先行雨量は、 R_{2-15} が350 mm、 R_{2-8} は254 mm であるが、トリガー雨量 R_{0-1} は197 mm であり、後者は大きな雨量ではない。先行雨量は、地域雨量 $R_{1/2} = 89.3$ mm に比して大きい雨量である。

(2) 1983年島根県西部豪雨

本豪雨は、気象庁命名の「昭和58年7月豪雨」に含まれる。以下のように、島根県西部に土砂災害が主に発生したので、ここでは、表題のような豪雨名を用いるが、主な土砂災害の被害地として浜田市を挙げる。

1983年7月23日、前線に向かって南海上から暖湿な空気が強く流入し、前線を低気圧が通過する際に島根県西部で局地的な豪雨が発生した。典

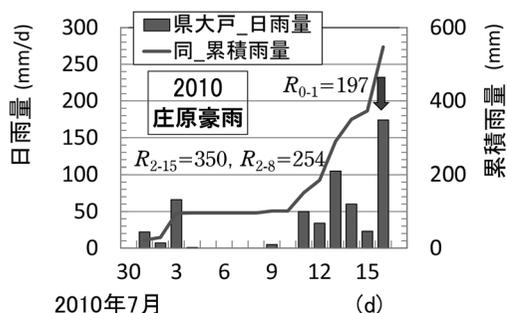


図11 2010庄原豪雨における広島県大戸雨量計の日雨量の経過

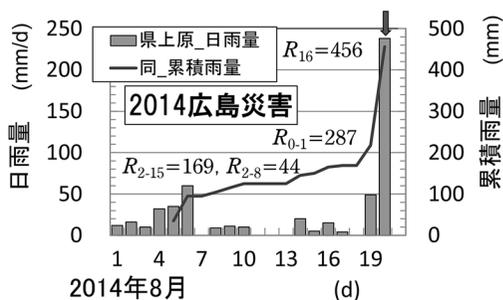


図12 2014広島豪雨における広島県上原雨量計の日雨量の経過

型的な梅雨末期の集中豪雨で1982年長崎豪雨と類似している。この豪雨によって、島根県西部では軒並み記録破りの集中豪雨となり、中小河川の大氾濫による水害および山地・急傾斜地の斜面崩壊・土石流の発生による激甚な土砂災害が発生した(内閣府, 2017)。

1983年島根県西部豪雨の経過の図示は省略するが、採り挙げた雨量はアメダス浜田の日雨量である。先行雨量は、 R_{2-15} が296.5 mm、 R_{2-8} は29.5 mmである。トリガー雨量 R_{0-1} は355 mm と大きい値である。先行雨量・トリガー雨量ともに、地域雨量 $R_{1/2}$ =94.9mm に比して大きい雨量である。

3.4 雨量は少なくとも被害の発生した豪雨

(1) 2014年広島豪雨

2014年8月は、2つの台風(第11号と第12号)が日本に接近、上陸したことに加え、前線の位置や湿った気流の影響を受け、北海道から九州まで多くの地域で大雨が発生した。これらの一連の大雨に対し、気象庁は「平成26年8月豪雨」と命名した(気象庁, 2014)。

これらの台風の影響を受けて広島県上原雨量計では、8月1日～6日までに165 mmの累積雨量に達していた(図12)。7日から18日までは、日雨量0 mmや10 mm、20 mm程度の雨量であったが、19日夜からは日本海に停滞する前線に向かい、暖かく湿った空気が流れ込み、広島県では大気の状態が非常に不安定となっていた(気象庁, 2014)。このため、19日夜から20日明け方にかけて

豪雨となった。

広島市安佐北区三入では1時間雨量の日最大値101 mm、3時間雨量の日最大値217.5 mm、24時間雨量の日最大値257 mmを観測し、通年の観測史上1位を記録した(気象庁, 2014)。この豪雨により広島市では、土石流107箇所、崖崩れ59箇所が発生し、死者74名、全半壊家屋255棟にも及ぶ甚大な被害が発生した(加藤・上森, 2015)。

図12に2014年広島豪雨の日雨量の経過を示す。先に述べたように、この豪雨は線状降水帯によるものであり、雨量は豪雨域のほぼ中心にある県上原雨量計の雨量を用いた(山地の雨量は観測されていない)。先行雨量は、 R_{2-15} が169 mm、 R_{2-8} は44 mmである。しかし、トリガー雨量 R_{0-1} は287 mmと大きい値である。先行雨量・トリガー雨量ともに、地域雨量 $R_{1/2}$ =113.6 mmに比してそれ程大きくはない。

(2) 2012年阿蘇豪雨

2012年7月12日00時より熊本県阿蘇地域においては、激しい豪雨にみまわれた。いわゆる「平成24年7月九州北部豪雨」による土砂災害である。本州付近に停滞していた梅雨前線に向かって九州南からの非常に湿った空気の流れ込みによる豪雨が発生し、アメダス阿蘇乙姫の最大24時間雨量は507.5 mmとなり、死者・行方不明者は25名、家屋全壊は169棟であった(阿蘇地域土砂災害対策検討委員会, 2013)。

土砂災害は、主に阿蘇カルデラ外輪部の東側の手野地区から直ぐ南の坂梨地区において激しく発

生した。

先の図3に2012年阿蘇豪雨の日雨量の経過を示す。雨量計は、アメダス阿蘇乙姫と県城山であり、発生日までの16日間の累積雨量は、それぞれ944.5 mmと801 mmである。土砂災害発生域の県城山雨量は里地の雨量より140 mm程少なくなっている。このことは県城山雨量計の南にある県波野雨量計でも同様である。ここでは、後者の県城山の雨量を使用する。先行雨量は、 R_{2-15} が325 mm、 R_{2-8} は130 mmであり、トリガー雨量 R_{0-1} は449 mmと大きい値である。しかし、地域雨量 $R_{1/2}=209.1$ mmに対しては、先行雨量・トリガー雨量ともに小さい雨量である。

4. 豪雨度・豪雨階に関する考察

前章では、顕著な土砂災害豪雨の一部を採り挙げ、降雨の原因と特徴、実態などを検討し、トリガー雨量と先行雨量を示した。それは、土砂災害の被害全体に関する「豪雨量」として両雨量が大きく関係するからである。以下、得られた顕著な土砂災害豪雨に対する両雨量の役割を明らかにし、土砂災害の規模に関する基準化豪雨指標と豪雨度・豪雨階について考察する。

4.1 基準化豪雨指標

先に示した図8は、先行雨量とトリガー雨量をそのままの数値で示したものであり、多雨地域や小雨地域などにおける「豪雨量」の地域的な多寡の影響は考慮していない。また、第3章の①～④で採り挙げた発現豪雨も地域的な豪雨特性は考慮せず、単に雨量の多寡によって豪雨の実態を示したものである。それらを考慮するために超過確率が2年に1度の超過確率雨量である地域雨量 $R_{1/2}$ を用いて豪雨の基準化(林, 1985; 林, 2008; 林・山田, 2013)を行う。そこで、これまで用いてきた先行雨量 R_{2-8} とトリガー雨量 R_{0-1} を地域雨量 $R_{1/2}$ で除して基準化したものが図13である。基準化した横軸・縦軸をそれぞれ先行水分度・トリガー度ということにする。先に述べたように、被災地の雨量データは、直近のアメダスを含む各観測所のデータを用い、地域雨量はダムデータや国

交省のデータを除く当該地域における直近のアメダスの降雨データから算出している(表1参照)。気象庁アメダスは、前アメダスを含めて他に比して歴史が古く地域雨量として代表的な降雨地点を網羅しているものと考えられるからである。この地域雨量 $R_{1/2}$ の算定には、(財)国土技術研究センター(2011)の公開ソフト「水文統計ユーティリティ」を用いた。

これまでみてきたように、先行雨量は、発生場つまり、斜面土層内部に事前に浸入する雨水の累積量であり、概略斜面内部の水分量を表している。これを地域雨量で基準化したものを先行水分度ということにする。該当する豪雨の土砂災害を想起すると縦軸は規模を示しているようであり、横軸は土砂災害の多発性を表しているようである。

さて、この基準化によって豪雨域における雨慣れなどの影響は解消されるのであるが、図13をみると、横軸と縦軸の最大枠の値は4と5となっており、値の大きさが縦軸と横軸とでは異なっている。これは、図14に示すように、豪雨Aと豪雨Bとが同じような意味を持たせるには、最大値の値をもつ豪雨Cに対して、最低でも横軸の最大値と縦軸の最大値とが同じ枠の値をとる必要がある。

このようなことを考えた上で、先の図13の「紀風」をみると、横軸の最大枠の値と縦軸の最大枠の値が一致していない。そこで、先行水分度の最

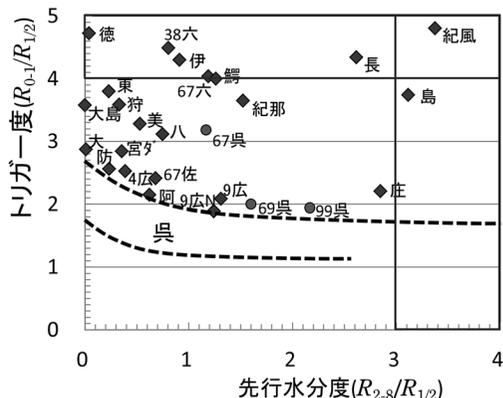


図13 地域雨量 $R_{1/2}$ で基準化した豪雨指標(先行雨量が R_{2-8} の場合)

大枠の値4を縦軸のトリガー度の最大枠の値5と一致させるために、先行雨量の範囲をここまで2日前から1週間としていたものを2日前から2週間とし、 R_{2-15} を用いることにする。先行水分度も $R_{2-15}/R_{1/2}$ と表す。累積雨量の期間を2週間とするのは、網干・低引(1972)が提案した方法である。こうして求め直した基準化豪雨指標が図15である。

これによって「紀風」、「長」の横軸・縦軸の最大枠の値が4-5の範囲に入っており、豪雨度・豪雨階の設定の有用性が保たれることになった。1982年長崎豪雨は、この R_{2-15} を採用することによって両軸の最大枠に入ってきた。都市型災害の筆頭とされる長崎豪雨の災害は、35年前の土砂災害でもあり、他の災害との比較が難しかったが、先行雨量(梅雨末期の長雨)の影響が当初から指

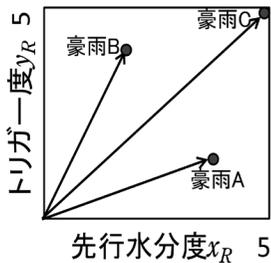


図14 トリガー度と先行水分度を等スケールとする豪雨度の設定方法

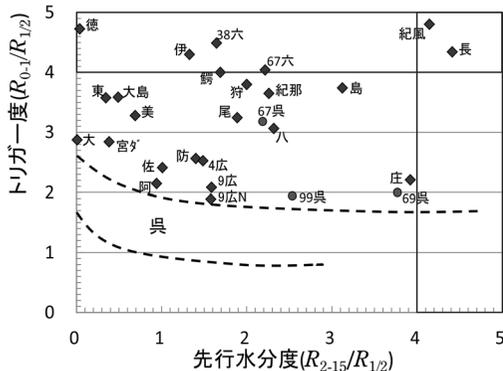


図15 地域雨量 $R_{1/2}$ で基準化した基準化豪雨指標 (先行雨量が R_{2-15} の場合)

摘されていた(荒生, 1982)。その影響による豪雨の規模には改めて驚くに値する。

この他に図15をみると、先行水分度4付近に「庄」や「69呉」が来ている。これらの豪雨による土砂災害は、トリガー度は低いが、長雨タイプの雨による水分上昇の上にトリガー雨量の影響が加わったものによることがわかる。これに対して「徳」、「伊」「38六」などは、トリガー度が高い割に先行水分度の値がそれほど高くなく、トリガー雨量に支配された土砂災害であるとみられる。

さらに、この図における1938年六甲豪雨「38六」と2014年広島豪雨「4広」とを比較すると、先行水分度はほぼ同じであるが、トリガー度が約1.8倍「38六」の方が上回っている。両者とも花崗岩の同じような山地山麓を形成している土地柄であり、豪雨を直接比較できるこのような方法によって、1938年六甲豪雨の甚大さが2014年広島豪雨を直接知っている現代の人々によりみえることになる。逆に、2014年広島豪雨があつた倍近く発生したと考えると、「38六」の土砂災害のすさまじさを実感することができる、と同時に「4広」の豪雨があつた程度で収まったことに安堵することもある。基準化豪雨指標を表す図15からはこのようなことを読み取ることが可能である。

4.2 豪雨度および豪雨階の設定

(1) 豪雨のスケール(豪雨度・豪雨階)

先の図15のように、横軸と縦軸の大きさを合わせることが出来たので、豪雨度 H は次式で求められる。

$$H = \sqrt{x_R^2 + y_R^2} \tag{1}$$

ここに、 $x_R = R_{2-15}/R_{1/2}$ (先行水分度)、 $y_R = R_{0-1}/R_{1/2}$ (トリガー度)である。こうして(1)式より各豪雨に対して豪雨度が設定されるので豪雨全体のスケールを表す豪雨階も設定出来る。図16には、H0~H6までの豪雨階が破線で示されている。

この図16をみると、豪雨階H6の土砂災害を発生させた豪雨は2件存在するが、豪雨階H5に対応する土砂災害豪雨は図中に存在していない。ここまで挙げた土砂災害豪雨は、中部より西の地域

が圧倒的に多いので、関東以北を調べると、1998年福島豪雨がある(図17)。これは、福祉施設「太陽の国」が被災したときの豪雨(鈴木・南・他, 1998)である。これまでのところ、豪雨階 H5の土砂災害を発生させた豪雨は少ないが、その理由をはっきりしない。図17には、この他に2015年栃木豪雨を挙げている。この豪雨は、いわゆる2015年9月の関東・東北豪雨の際に日光市周辺に土砂災害を発生させた豪雨(竹歳, 2016)である。

豪雨階の設定は、豪雨度 H の値によって例えば、H3の場合、以下のような範囲に設定した。

$$3.0 \leq H < 4.0$$

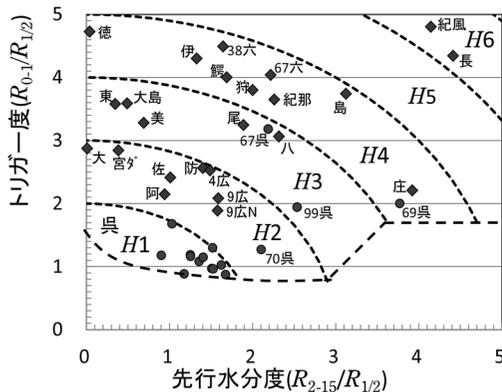


図16 豪雨のスケール(豪雨度, 豪雨階)

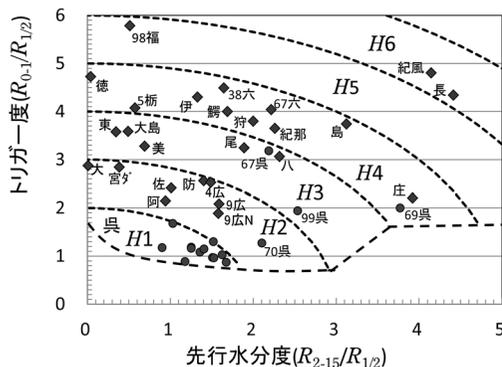


図17 豪雨のスケール(福島豪雨, 栃木豪雨を追加)

(2) 豪雨階の設定

図17の豪雨度より、H0~H6までの7つの豪雨階を設定することができるので、各豪雨階に対応する豪雨を表2に挙げる。最終的には、このような豪雨階の設定によって、過去・現在・将来の豪雨のスケールが設定出来ると思われるが、図17においては、各豪雨の先行水分度とトリガー度の豪雨の成分がわかるという特徴がある。

この表2は、豪雨階3がゲリラ豪雨的な土砂災害が多く、豪雨階4が集中豪雨的なものが多くことを表しているようであり(勿論, 例外はある), 豪雨階6は大規模な土砂災害に相当しているようである。この方法(図17, 表2)によって土砂災害を発生させる豪雨の評価が可能になるものと思われる。

5. 結語

本稿では、過去から現代における土砂災害の発生と規模に関係する豪雨を先行雨量・トリガー雨量という面から検討を行った。土砂災害に先行する降雨量は当該区域の斜面土層内の水分状態を支配しており、ここに直前の豪雨によるトリガー的な水分量が作用することによって土砂災害が発生する。

このようなことを明確にするために過去の多くの土砂災害豪雨を収集し、考察を行った。結論は以下のようにまとめられる。

- ①被災当日と前日の2日間雨量をトリガー雨量

表2 豪雨のスケール(豪雨階)と発生豪雨

豪雨階 H (H スケール)	顕著な土砂災害事例
0	
1	呉(小豪雨)
2	佐世保, 70呉, 宮川, 4広島, 9広島*, 防府, 阿蘇, 大津
3	伊豆大島, 美山, 東海, 尾鷲, 67呉, 99呉, 8百津
4	38六甲, 67六甲, 69呉, 島根, 狩野川, 庄原, 徳島, 紀那智, 伊那谷, 鰐塚, 栃木
5	福島
6	長崎, 紀風屋

* : 9広島Nは省略

注) 各図より豪雨名称を詳しく表記

R_{0-1} とし、前々日から2週間(14日間)雨量 R_{2-15} を最終的に先行雨量として設定した。

- ②地域雨量 $R_{1/2}$ によって豪雨指標の基準化を行った。基準化豪雨指標は先行水分度 ($R_{2-15}/R_{1/2}$) とトリガー度 ($R_{0-1}/R_{1/2}$) によって表される。これにより全データの全国比較が可能である。
- ③基準化豪雨指標による豪雨度より、土砂災害用に H0~H6までの豪雨階を設定した。

このような豪雨階によって、土砂災害を引き起こした過去の豪雨と現代の豪雨とを比較することが可能となった。また、現代における豪雨性土砂災害時の収集データの種類を明確にすることができ、発生豪雨の評価法も一般化が可能になるものと考えられる。

参考文献

- 網干寿夫・低引洋隆：真砂土自然斜面の崩壊について、第7回土質工学研究発表講演集、507-510、1972。
- 荒生公雄：昭和57年長崎豪雨による災害の調査報告書(第2章気象)、長崎大学学術調査団、pp.2-13、1982。
- 阿蘇地域土砂災害対策検討委員会：阿蘇地域土砂災害対策検討委員会報告書、熊本県、pp.1-74、2013 (<http://www.pref.kumamoto.jp/soshiki/138/asokaigi-data.html>)。2014年11月10日閲覧。
- 防災科学研究技術研究所_水・防災ユニット：<http://mizu.bosai.go.jp>、2015年1月16日閲覧。
- 中部建設協会：自然に学び自然に備える-近年の豪雨災害記録集・2012-、中部建設協会、pp.3-6、2012。
- 中央防災会議：1982長崎豪雨災害報告書、pp.1-9、2005。
- 林 拙郎：崩壊面積率と水文データとの二、三の関係、日本林学会誌、Vol.67, No.6, pp.209-217、1985。
- 林 拙郎：自然環境保全のための保全砂防学入門-土砂災害の予知と防災、電気書院、pp.198-234、2008。
- 林 拙郎・山田 孝：最近の土砂災害における実効雨量の係数の特性について、砂防学会誌、Vol.66, No.2, pp.31-39、2013。
- 林 拙郎・山田 孝：豪雨による斜面表層崩壊と実効雨量-斜面内土層の浸透流からの検討-地

盤工学ジャーナル、Vol.10, No.1, pp.157-162、2015。

- 林 拙郎・山田 孝：伊豆大島および阿蘇地域における土砂災害発生に関する実効雨量式の係数特性、自然災害科学、Vol.34, No.4, pp.285-294、2016。
- 日浦啓全・海堀正博・末峯 章・里深好文・堤 大三：2004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、2004。
- 石川芳治・池田暁彦・柏原佳明・牛山素行・林真一郎・森田耕司・飛岡啓之・小野寺智久・宮田直樹・西尾陽介・小川 洋・鈴木 崇・岩佐直人・青木 規・池田武徳：2013年10月16日台風26号による伊豆大島土砂災害、砂防学会誌、Vol.66, No.5, pp.61-72、2014。
- 海堀正博・杉原成満・中井真司・荒木義則・山越隆雄・林真一郎・山下 祐：2010年7月16日に発生した広島県庄原市の土砂災害の緊急調査報告、砂防学会誌、Vol.63, No.4, pp.30-37、2010。
- 加藤誠章・上森弘樹：平成26年8月に広島市で発生した大規模土砂災害、sabo、Vol.117, pp.2-7、2015。
- 国土交通省近畿地方整備局：2011年紀伊半島大水害-国土交通省近畿地方整備局災害対応の記録-、pp.18-27、2014。
- 気象庁：災害時気象速報平成26年8月豪雨、災害時自然現象報告書2014年第4号、pp.1-11、2014。
- 国土技術研究センター：水文統計ユーティリティ、<http://www.jice.or.jp/tech/software/rivers>、2011年11月10日閲覧。
- 呉市消防局：呉市の火災と水災の記録、呉市消防局、pp.1-125、1977。
- 松四雄騎・斉藤 仁・福岡 浩・古谷 元：平成24年7月九州北部豪雨による阿蘇山カルデラ壁および中央火口丘での斜面崩壊、京大防研年報、第56号B, pp.237-241、2013。
- 内閣府防災情報のページ：1958年(昭和33年)狩野川台風、1983年(昭和58年)豪雨：http://www.bousai.go.jp/kaigirep/houkokusho/hukkousesaku/saigaitaiou/output_html_1/jirei-menu.html、2017年2月1日閲覧。
- 西山賢一・寺戸恒夫・石田啓祐・村田明広・岡田憲治：2004年台風10号に伴う豪雨で発生した木沢村の斜面災害と地すべり地形、阿波学会紀要、第51号、pp.1-8、2005。
- 大滝俊夫：雨と斜面崩壊、斜面災害の予知と防災、

- 白亜書房, pp.222-242, 1986.
- 佐々木康：土に関する三つの話題, JICE REPORT vol.13, pp.74-85, 2008.
- 鈴木雅一：発生誘因としての降雨条件, 山地保全学 第Ⅱ章 3 節, 文永堂, pp.64-83, 1993.
- 鈴木勇二・南 哲行・土屋 智・北原 曜・逢坂興宏・執印康裕：福島・栃木土砂災害緊急調査報告(速報) - 福島県西白河郡西郷村「太陽の国からまつ荘」の災害に関して -, 砂防学会誌, Vol.51, No.4, pp.40-42, 1998.
- 高橋和雄：過去の災害に学ぶ(第3回)1982長崎豪雨災害, 広報ほうさい, No.27, 18-19, 2005.
- 竹歳健治：平成27年9月関東・東北豪雨による日光市芹沢地区の土石流災害への対応, 砂防学会誌, Vol.69, No.3, pp.67-74, 2016.
- 田村秀夫・筒井康二・下井田実・有澤俊治：昭和36年6月伊那谷災害, 砂防学会誌, Vol.52, No.1, pp.50-55, 1999.
- 土田 孝：土砂災害警戒情報と避難基準に関する検討, 土木学会・地盤工学会平成26年広島豪雨災害合同緊急調査団調査報告書, pp.211-227, 2014.
- (投稿受理：平成29年4月28日
訂正稿受理：平成29年9月19日)

要 旨

必要な豪雨ファクターとして、トリガー雨量と先行雨量を設定した。トリガー雨量は被災当日と前日の2日間雨量 R_{0-1} であり、先行雨量は前々日から2週間(14日間)雨量 R_{2-15} である。しかし、このファクターは豪雨の地域性を含んでおり、その影響を除去するために、地域雨量 $R_{1/2}$ を導入した。この $R_{1/2}$ によって2つの雨量を基準化した。これが基準化豪雨指標である。基準化豪雨指標は先行水分数 ($R_{2-15}/R_{1/2}$) とトリガー度 ($R_{0-1}/R_{1/2}$) によって表される。この2つの指標より豪雨のスケールとして豪雨度が設定される。設定された豪雨度より、土砂災害用に H0 ~ H6 までの豪雨階を設定した。