

警戒・避難のための雨量指標の改良

(危険雨量指標 R_f の再吟味と R' の提案)

中井 真司*・佐々木 康**・海堀 正博***・森脇 武夫****

Improvement of Rainfall Index for Warning and Evacuation against Sediment-Related Disaster

(Reexamination of the Rainfall Index R_f , and the Proposal of R')

Shinji NAKAI, Yasushi SASAKI, Masahiro KAIBORI and Takeo MORIWAKI

Proper warning and evacuation are considered to be essential for mitigating sediment-related disaster during a heavy rainfall. For this purpose, scientific and rational rainfall index should be established in accord with the regional geology and topography. A new Rainfall Index, named R' , is proposed through the revision of Rainfall Index R_f . Effect of preceding rainfall prior to a sediment-related disaster is taken into account for this newly proposed Rainfall Index R' by utilizing the concept of the effective rainfall. Rainfall records during the serious disaster happened to take place on 29 June, 1999 and 15 September, 1999 in Hiroshima district were taken as the cases to verify the effectiveness of this newly proposed Rainfall Index. As a result of the comparison between R_f and R' , it was shown that R' is superior to judge the danger of sediment disaster for identifying an area and time from on-going rainfall.

Key words: Effective Rainfall, Preceding Rainfall, Rainfall Index, Sediment-Related Disaster, Warning and Evacuation

1. はじめに

毎年のように豪雨による土砂災害が発生し、尊い人命や財産が失われている。近年の事例では、斜面崩壊やがけ崩れ、土石流などが一部のエリアに同時に多発して大きな被害につながっている場合も多い。

1999年6月29日に広島地域で発生した土砂災害(以下6.29災)の特徴としては、山間部で局所的・集中的な豪雨があったことが挙げられる。当時は、自治体が独自に設置する雨量計やアメダス情報など限られた雨量情報しか得られなかったため、局所的な集中豪雨をリアルタイムで把握することは困難であった。後に、このことが被害の拡大につながった可能性も指摘された¹⁾。

しかし一方で、災害後には、地盤工学会1999年広島県豪雨災害緊急調査団により、複数の観測機関が有する201箇所の雨量観測所における時間雨量観測データが収集され²⁾、従来公開されている雨量データを基にした解

析では把握できなかったような局所的豪雨が災害を誘発したことが解明されている。

また、6.29広島県土砂災害対策検討委員会³⁾でも雨量観測点の高密度化が提言され、多くの機関から雨量データがインターネット等で公開されるようになり、比較的迅速に詳細かつ広範な雨量データ取得が可能になってきている。これを利用して地域に適合した適切な雨量指標を検討、運用し、災害を軽減することが望まれる。

本研究では、著者の一人が提案した雨量指標⁴⁾を再吟味し、改良した雨量指標の有用性を検討する。

2. 危険雨量指標 R_f とその課題

現在運用されている雨量指標には、雨量強度や積算雨量、実効雨量⁵⁾、改良実効雨量⁶⁾、さらに有効雨量と有効雨量強度の組み合わせ⁷⁾や、長期実効雨量と短期実効雨量の組み合わせ⁸⁾等の指標のほか、タンクモデル⁹⁾や、

* 広島大学災害軽減プロジェクト研究センター 広島大学非常勤研究員(復建調査設計株式会社)

** 広島大学災害軽減プロジェクト研究センター 工学研究科

*** 広島大学災害軽減プロジェクト研究センター 総合科学部

**** 広島大学災害軽減プロジェクト研究センター 呉工業高等専門学校

土壌雨量指数¹⁰⁾等がある。

累積雨量と降雨強度の2つの物理量で表現するこれまでの手法では、危険度の空間的分布や時間的な移動を地図上に表現することが難しいことから、海堀は累積雨量の空間分布を表した地図上に、降雨強度を表す等雨量線を描くことを試みており¹¹⁾、佐々木らは斜面崩壊の危険度を表す新しい雨量指標 R_f を提案している⁴⁾。 R_f は式(1)によって定義される。

$$R_f = \sqrt{(R_1 - R)^2 + a^2(r_1 - r)^2} \quad \dots\dots(1)$$

ただし、 R : 1週間前からの累積雨量

r : 時間雨量

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

この提案では、6.29 災を対象に、広島県内 161 箇所(先述の 201 箇所のうち、欠測の無い観測地点)の雨量観測値から算定した R_f を用いた等値線(コンター)図を作成し、この手法で崩壊予測が可能であることを示した。

しかし、 R_f には改善を要する次のような課題が残されていた。

- (1) 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。
- (2) 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、雨が降り続くと危険度が增大するという実感に反している。

そこで、これら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(2)の課題に対処するため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とした。さらに、これらの雨量指標と既往災害事例との適合性を検討した。

3. 実効雨量を考慮した新雨量指標 R'

<3・1> 新雨量指標 R_{fw}

本検討では、先行降雨の時間的減衰を考慮した雨量指標 R_{fw} を導入する。 R_{fw} は、前述の雨量指標 R_f と建設省提言案⁸⁾で用いられている改良実効雨量(長期実効雨量と短期実効雨量の組み合わせ)の利点を組み合わせたものである。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)により算定する。

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

ただし、 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、Fig.1に示すように横軸 R_w 、縦軸 r_w の座標系において、任意の降雨状況を示す点 $A(R_w, r_w)$ と基準点 $B(R_1, r_1)$ 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 $B(R_1, r_1)$ を中心とした半径 R_{fw} の円弧で示される。なお、これを横軸 R_w 、縦軸 r_w の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。

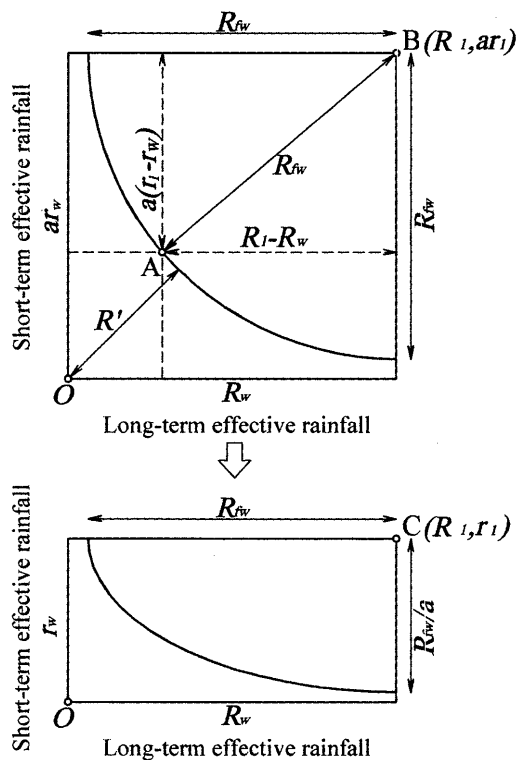


Fig.1 Definition of the rainfall index R_{fw}

<3・2> 雨量指標 R' への変換

先行降雨の時間的減衰を考慮した雨量指標 R_{fw} をもとに、危険度とともに上昇する雨量指標 R' を式(3)のとおり定義する。

$$R' = R_{fw0} - R_{fw} \quad \dots\dots(3)$$

ただし、 R_{fw0} : 原点 O と基準点 $B(R_1, r_1)$ 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、危険度が増大すれば大きくなる指標へ変換できる。

<3・3> 半減期、基準点、係数の取り方に関する検討

本検討では、現在広島県で運用されている雨量指標¹²⁾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。

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。Table 1 にこれまで広島県内で発生した主な災害と、そのときの実効雨量を示す。

なお、1967 年 7 月 9 日災害(以下 42 災)時のデータについては、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) = (450mm, 150mm) を採用した。

Table 1 Rainfall indices during past disasters

	R_w (72h)	r_w (1.5h)
1967.7.9 Kure Observatory	312.1mm (19:00)	100.0mm (18:00)
1988.7.21 Kake Observatory	271.3mm (6:00)	117.6mm (4:00)
1999.6.29 Toyama Observatory	327.2mm (17:00)	114.5mm (15:00)
1999.6.29 Kure Observatory	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。

Fig. 2 に近年に呉市で起こった災害(1976-2003 年および 1967 年災害)³⁾¹³⁾¹⁴⁾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(1967 年災害、6.29 災害)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境界(クリティカルライン)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。

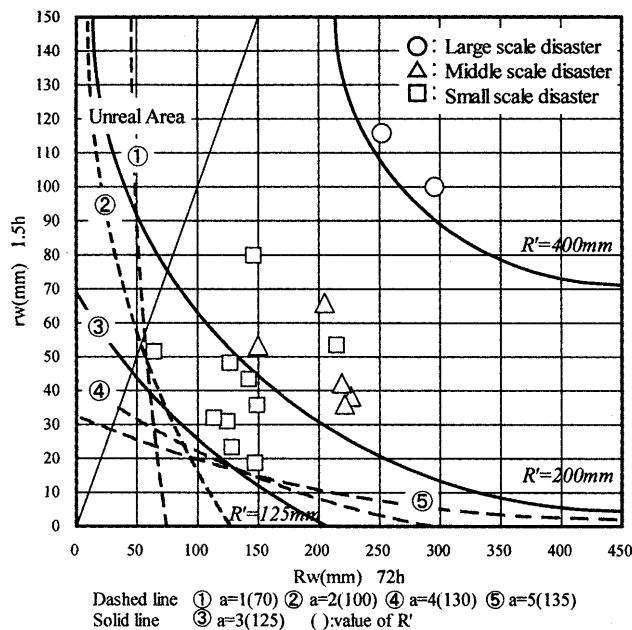


Fig.2 Relationship between R_w-r_w (Past cases in Kure-city)

<3・4> 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。

Fig.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あり、 R_f では段階的に低下する傾向を示すことが読みとれる。

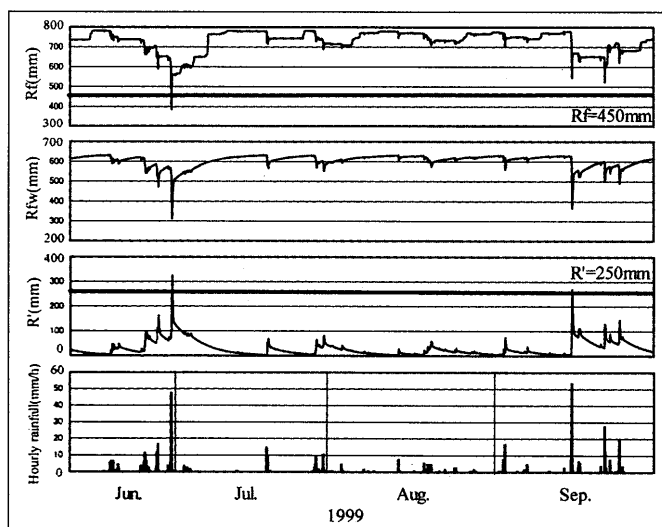


Fig.3 Comparison of rainfall indices (R_f , R_{fw} , R') (1999.6～9, Higashihiroshima Observatory)

これは、 $R'(R_{fw})$ に先行降雨の時間的低減が加味されているが、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災害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Table 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 $R_f=450\text{mm}$ ⁴⁾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。

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小に評価されやすいともいえる。9月21日の降雨においては、災害の発生した台風16号時の降雨よりも R_f が小さな値を示し、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。

Table 2 Comparison of rainfall indices (R_f , R_{fw} , R') (1999.6.29, 1999.9.15, Higashihiroshima Observatory)

	1999.6.29		1999.9.15	Range of fluctuation
	16:00-17:00	17:00-18:00	3:00-4:00	
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

Table 2をみると6.29災害の時には 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。

4. 1999年6月29日災害時の雨量指標値

<4・1> 対象とした災害箇所と観測所

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、前述の地盤工学会の調査²⁾および広島県から公表された資料¹⁵⁾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溪流(うち発生時刻が特定できるもの25溪流)、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地形1616箇所である(Fig.4)。

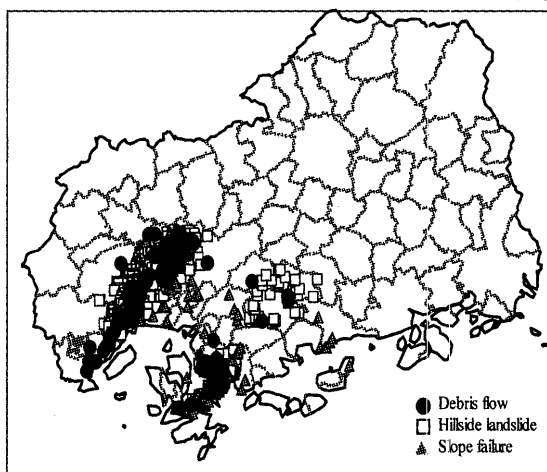


Fig.4 The location of sediment disasters (1999.6.29)

これらの崩壊地点直上で雨量観測が行われているわけではないが、最寄りの観測地点を選択すると、その離隔距離はTable 3のようになった。発生地点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。

Table 3 Distances from disaster point to observatory

	Debris flow	Slope failure	Hillside landslide
Average	2.23km	2.92km	2.61km
Maximum	7.62km	8.37km	8.05km
Minimum	0.12km	0.17km	0.10km

<4・2> 災害発生時刻の検討

災害発生時刻の雨の降り方を検討するために、発生時間帯が特定できる土石流(25溪流)およびがけ崩れ(35箇所)のうち、2.5km以内に雨量観測所があるものについて発生時刻を R_w-r_w 関係図(Fig.5)に示した。図中に実線で示した長期実効雨量 R_w 、短期実効雨量 r_w の関係線(以下

ネークライン)は、短期実効雨量の最大値 r_{wmax} から長期実効雨量の最大値 R_{wmax} までの時間帯を示している。

この結果、土石流が発生した 12 降雨では全てにおいて R' が最大 (R'_{max}) になる時に発生が見られる。このうち 4 降雨では r_{wmax} や R_{wmax} の時にも発生している。

がけ崩れについても、6 降雨中全てで R'_{max} になる時に発生しているが、このうち 3 箇所においては R'_{max} になる 1 時間前のがけ崩れが発生している箇所がある。この 3 箇所はいずれも呉市周辺で、発生時間帯に大きな時間雨量を記録している。

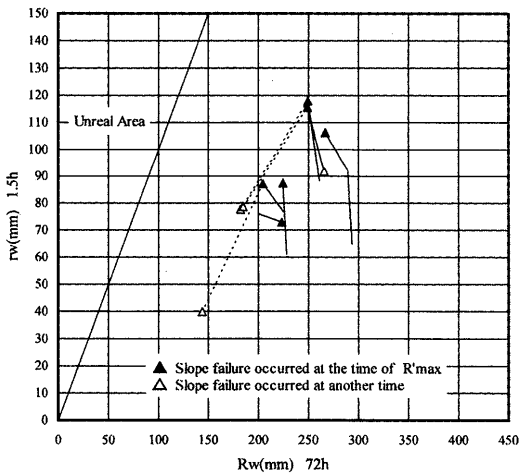
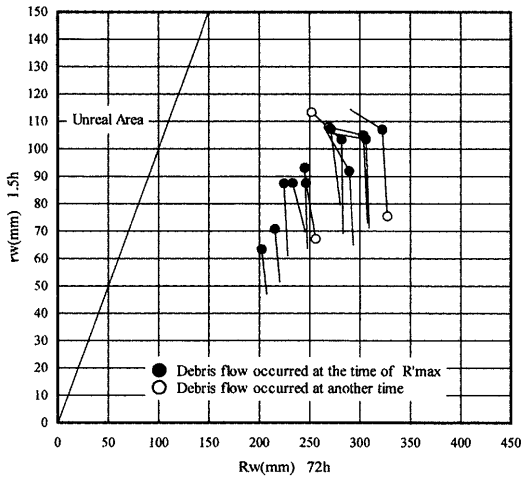


Fig.5 Triggering time during rainfall for sediment-related disasters (1999.6.29)

(Upper ; Debris flow, Lower ; Slope failure)

一般に降雨開始から各指標が上昇し、やがて r_w が最大に達し、降雨最盛期に R' が最大となり、続いて R_w が最大となる。短時間に強度の強い降雨があるときは、これらが同時刻に最大値となる場合もある。

短期実効雨量(半減期 1.5 時間)は、3 段のタンクモデルの 1 段目の貯留高に相当し、地表から表層の貯留高を示し、長期実効雨量(半減期 72 時間)は 2,3 段目の貯留高に

相当し、地下の貯留高を示すといわれている¹⁶⁾。

すなわち r_w が最大であることは地表や表層が最も不安定であることを意味し、 R_w が最大であることは地下が最も不安定であることを意味する。また R' が最大を示す時は、地表と地下の状態が相まって最も危険な状態であると解釈できる。なお、気象庁の提案している土壌雨量指数においても 3 段タンクの貯留高の合計値が最大になるときに最も危険な状態になると考えており¹⁰⁾、この点に関しては R' と類似の概念である。

6.29 災のデータでも 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。

<4・3> 災害形態と雨量指標 R' 値

Fig.6 に 6.29 災時の災害発生箇所について、災害形態別に R' が最大値のときの R_w-r_w 関係図を示す。

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)、 $R'=184.4\text{mm}$ (広島市消防局祇園出張所)、 $R'=146.8\text{mm}$ (広島市消防局温品出張所)である。

Fig.7 は災害発生降雨と非発生降雨の R' の値を 25mm 毎に階級分けし、その発生度数と累積頻度を示したものである。上記の発生下限値はそれぞれ、 $R'=250\sim 275\text{mm}$ 、 $175\sim 200\text{mm}$ 、 $125\sim 150\text{mm}$ の階級に入る。

これらの図から、がけ崩れ、山地崩壊、土石流の順に小さな R' 値で災害が発生しているといえる。また、 $R'=350\text{mm}$ を超える全ての降雨で、土砂災害が発生していることが分かる。

土石流発生に着目すると $R'=250\sim 275\text{mm}$ の階級から発生がみられ、 R' が大きくなるにしたがって発生頻度が増える。

累積曲線を見ると山地崩壊は土石流より 1~2 階級 (R' にして 25~50mm) 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 125~225mm 付近と比較的小さな R' の時に 1 つのピークを持ち、土石流が発生し始める 250~275mm 付近では、既に半数近い発生降雨を記録している。

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 ($R'_{max}=146.8\text{mm}$)、中消防署 ($R'_{max}=150.2\text{mm}$)、戸坂出張所 ($R'_{max}=167.9$) および広島県の広島観測所 ($R'_{max}=159.3\text{mm}$) 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、小さな R' の値でがけ崩れが発生した理由として、以下の点が考えられる。

- (1) 観測所から 2.5km 以内のがけ崩れ発生箇所は山裾部にあたるため、発生箇所と観測箇所の雨の降り方が違う可能性がある。

- (2) 山裾部では、平坦地側に降った降雨より、山側に降った雨の影響が大きい。
- (3) 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以上に条件が悪くなっている。
- (4) 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。

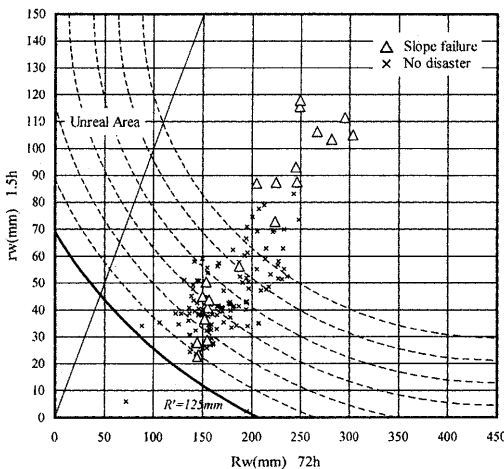
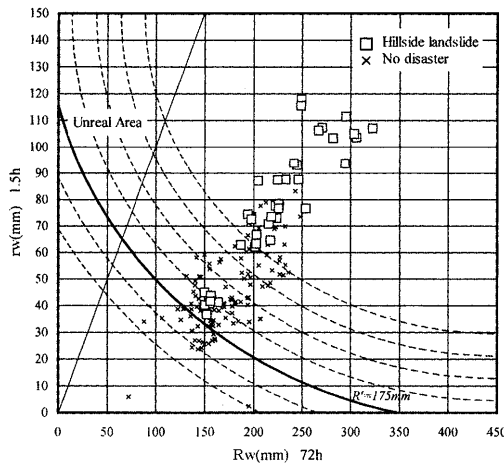
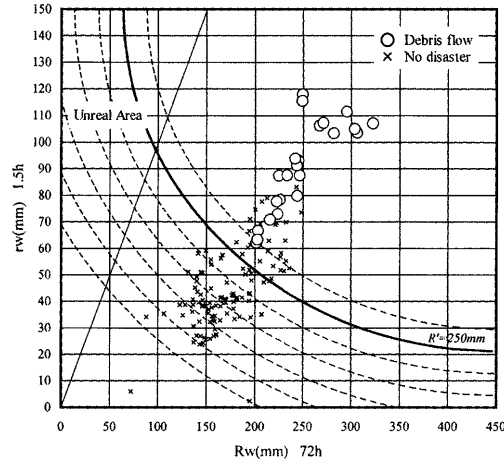


Fig.6 Relationship between R_w - r_w (1999.6.29)

(Upper ; Debris flow, Middle ; Hillside landslide, Lower ; Slope failure)

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、土石流に発展することも考えられる。

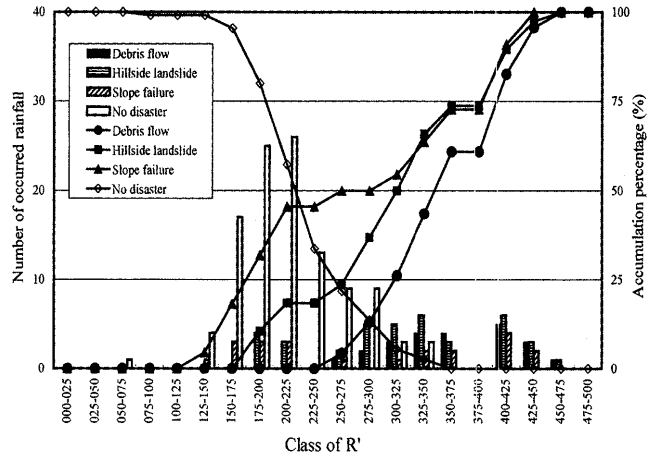


Fig.7 The distribution of a rainfall index R' (1999.6.29)

5. 降雨指標 R' の分布とその時間的変動

従来型の複数雨量指標はそれぞれの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、避難の必要性と時期を判断することが可能である。

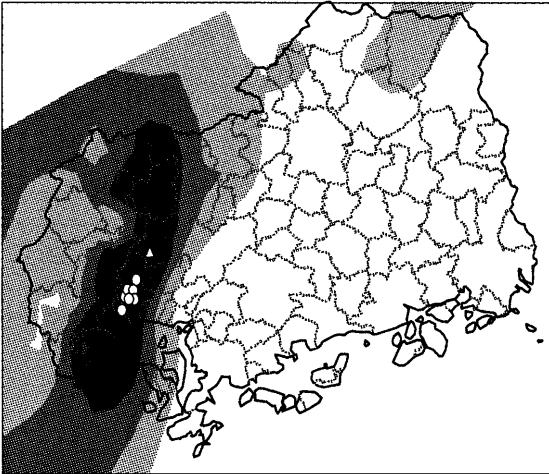
Fig.8に6.29における雨量指標 R' コンター図を示す。ここでは、前項の解析に用いた雨量観測データに県境付近の気象台観測データ(山口県、島根県、鳥取県、岡山県、愛媛県、香川県の一部)を追加した。これにより県境付近での精度が向上することを確認している¹⁷⁾。

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がよく一致しており、 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。

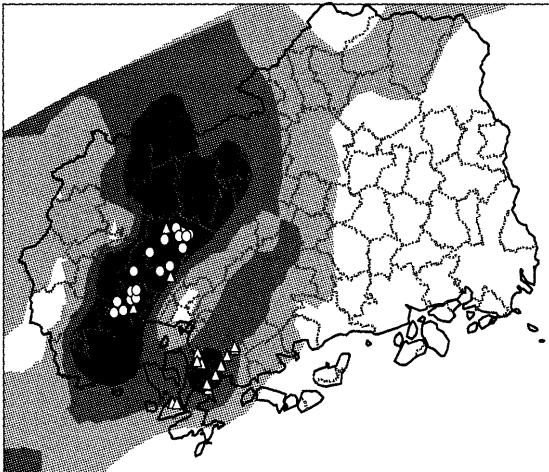
発生時間が特定できたものに関しては、土石流災害は全て $R'=250\text{mm}$ 以上のところで発生しており、がけ崩れ災害は $R'=200\text{mm}$ 以上のところで発生している。

また、Fig.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

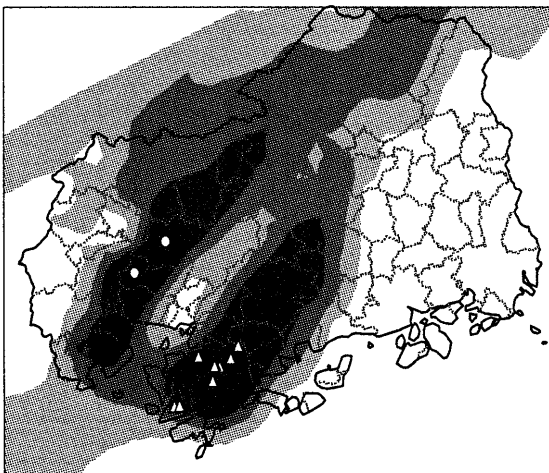
1999.6.29 14:00~15:00



1999.6.29 15:00~16:00



1999.6.29 16:00~17:00



○ : Debris flow that has occurred during shown time
 △ : Slope failure that has occurred during shown time

~ 150 200 250 ~

Fig.8 Spatial distribution of R' and its change with time (1999.6.29)

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 $R'=125\text{mm}$ 程度の値を目安に発生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' の関係については後節で検討する。

6. 他の災害事例における降雨指標 R'

<6・1> 1988年7月21日災害

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、筒賀村一帯で土石流災害が発生した(以下63災)。Fig.9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3:00~4:00の R' コンター図を示す。

1988.7.21 3:00~4:00

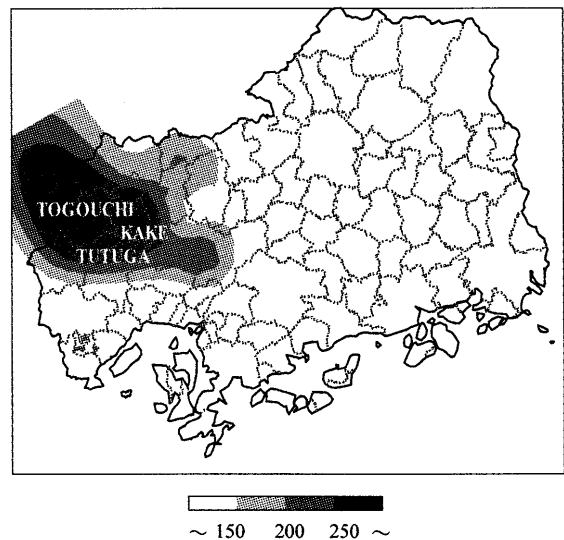


Fig.9 Contour of R' (1988.7.21)

ここでも、6.29災における解析で用いた $R'=250\text{mm}$ 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することができる。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分かる。

63災当時は、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。本解析では、被災地周辺6地点の観測データ¹⁸⁾を加えたものを用いることにより、解析精度の向上を図った。

<6・2> 1999年9月15日災害(台風16号)

6.29災害の発生した1999年には、台風16号により9月15日未明にも東広島市周辺の狭いエリアで大きな雨が降り、東広島市内の10溪流程度で土石流災害が発生した。Fig.10に気象台東広島観測所で R' の値が最大($R'=268.0\text{mm}$)を記録した1999年9月15日3:00~4:00の雨量指標 R' コンター図を示す。

この時にも東広島市周辺の狭いエリアに $R'=250\text{mm}$ 以上の階級が分布しており、土石流災害発生領域とよく対応している。

1999.9.15 3:00~4:00

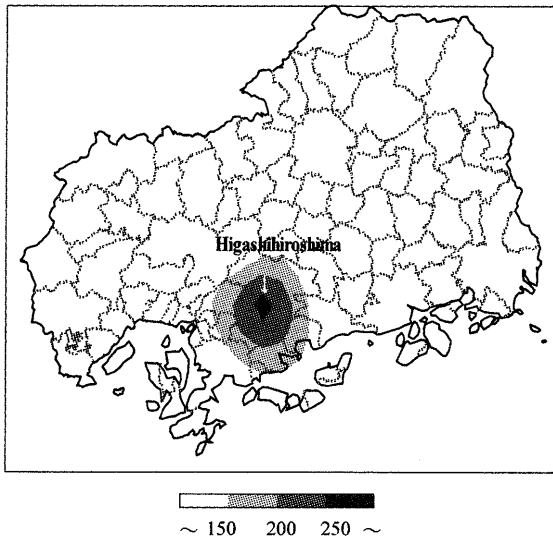


Fig.10 Contour of R' (1999.9.15)

<6・3> 2004年8月1日(台風10号)

2004年の台風10号による被害は、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。

呉周辺に比較的強い雨が降った8月1日14:00~15:00間の R' コンター図をFig.11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、小規模ながけ崩れ災害は $R'=125\sim 150\text{mm}$ 程度以上の比較的小さな雨でも発生しうるが、土石流災害のような流動性が高い現象は $R'=250\text{mm}$ に至らないような雨では発生しないことが分かる。

2004.8.1 14:00~15:00

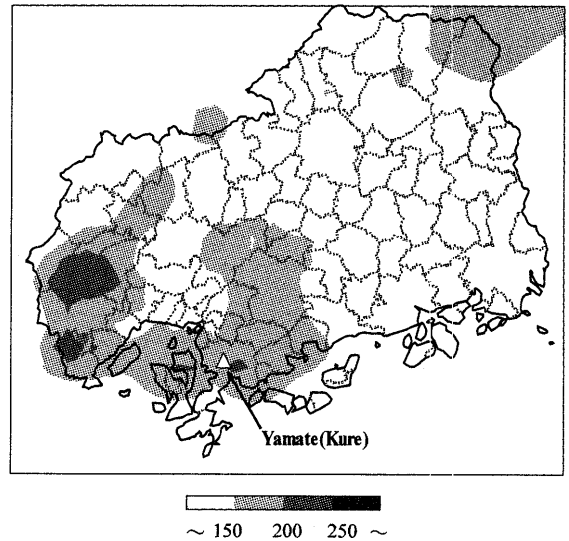


Fig.11 Contour of R' (2004.8.1)

7. 呉市における危険雨量

呉市を対象に R' の値の再来頻度を検討してみた。このために、気象台呉観測所の1976年~2003年までの全降雨を対象にスネークラインを連続的に図化した(Fig.12)。

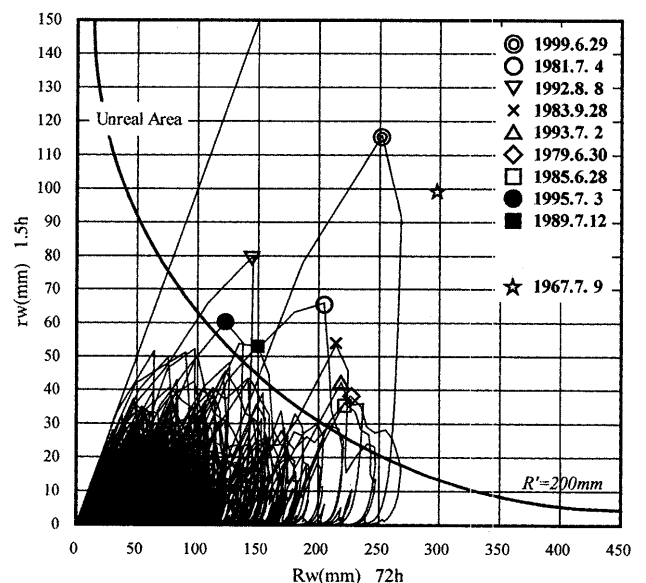


Fig.12 R' path (snake line)
(1976~2003, Kure Observatory)

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。

Fig.13 は一連の降雨中に R' が 100mm 以上を記録した 101 降雨を抽出し、 R' のピーク値を 25mm 毎に階級分けし、その度数を示したものである。

Fig.12, Fig.13 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。6.29 災と S42 災の大災害の時には、 R' の値はそれぞれ 413.2mm, 421.0mm と極めて大きな値となっている。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。

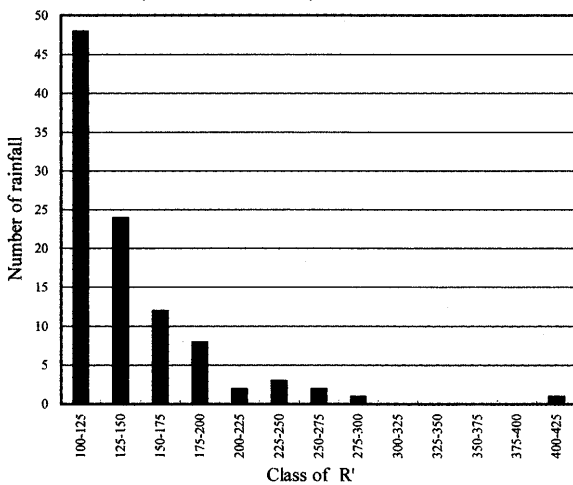


Fig.13 Distribution of the number of the rainfall index R' (1976~2003, Kure Observatory)

次にこれらの降雨と土砂災害の関係を吟味してみる。近年に呉市で起こった災害の資料³⁾¹³⁾¹⁴⁾から、 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。

1991 年~2003 年の間に発生した土砂災害¹⁴⁾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 Table 4 のようになる。この表においても、前出の Fig.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 $\leq R' < 200$ mm 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 $R'=125\sim 175$ 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 $R'=175\sim 200$ 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 $R'=200$ mm 以上であった。

Table 4 Relationship between sediment-related disaster and rainfall index R'

	number of rainfall	Number of sediment disaster			Rate of occurring sediment disaster(%)		
		L*	M*	S*	L*	M*	S*
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

* L : Large scale disaster
M : Middle scale disaster
S : Small scale disaster

この章で用いた資料は、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。しかしながら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。

1991 年~2003 年間の呉市のデータを基に、散發的ながけ崩れなどが発生危険性を評価する目安は $R'=125$ 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 $R'=200$ mm であると考えられる。

なお、 $R'=200$ mm という値は、6.29 災で発生時間が特定できな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。

8. ま と め

本研究では、雨量指標 R_f を再吟味し、先行降雨の時間的減衰を考慮した実効雨量指標 R_{fw} を提案し、 R' へと展開した。その結果、以下のようなことが明らかとなった。

- (1) 1999年の6.29災と台風16号による災害の比較考察から、 R_f を用いた場合には先行降雨の影響が過大に評価されるため、これを改善した雨量指標 R' の方がよりよく現象を表現できる。
- (2) 複数の事例解析により、新しい雨量指標 R' を用いることにより広島県の近年に発生した災害を矛盾無く表現することができる。
- (3) 土石流の発生要因のひとつである山地崩壊は $R'=175\text{mm}$ 程度で発生し、 $R'=250\text{mm}$ を超えると土石流災害が発生しやすくなる。
- (4) がけ崩れは散発的なものも含むと $R'=125\text{mm}$ 程度から発生しているが、同時多発するがけ崩れ災害は $R'=200\text{mm}$ 程度を目安にできそうである。
- (5) 雨量指標 R' 値が大きくなるほど、その頻度が小さくなり、呉市においては $R' \geq 200\text{mm}$ の降雨は3～4年に1回程度の割合で発生している。

以上のように、雨量指標 R' を警戒・避難の基準として使えることが分かったが、今後、警戒・避難を出すタイミング等を考慮した基準値の設定が必要である。また、数時間後までの危険度を予測するレーダー・アメダス等の降雨予測技術を組み合わせることにより、より精度の高い雨量指標への発展が期待される。さらに、雨量指標 R' が実効雨量の考え方を用いたものであることから、先行降雨の影響を経過時間に応じて減衰できる。このため、さらなる吟味により、避難解除への適用も可能であると考えられる。今後、工学的意味付けを含め、様々な角度からの検証を行いたい。

参 考 文 献

- 1) 中央防災会議(2000):「豪雨災害対策のための情報提供の推進」について～平成11年梅雨前線豪雨災害の検証より～, 中央防災会議関係局員会議提言。
- 2) 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.
- 3) 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。
- 4) 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.
- 5) 総合土石流対策等技術検討会(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)。
- 6) 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.
- 7) 瀬尾克美・船崎昌継(1973):土砂害(主に土石流の被害)と降雨量について,砂防学会誌(新砂防),Vol.26, No.2, pp.22-28.
- 8) 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。
- 9) 鈴木雅一・福島義宏・武居有恒・小橋澄治(1979):土石流発生の危険雨量,砂防学会誌(新砂防),Vol.31, No.3, pp.1-7.
- 10) 岡田憲治(2000):土壌雨量指数開発の現状,気象, No.521, pp.36-41
- 11) 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.
- 12) 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(新砂防),Vol.54, No.4, pp.46-54.
- 13) 広島県防災議会(2003):広島県地域防災計画。
- 14) 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.
- 15) 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)。
- 16) 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(新砂防),Vol.53, No.6, pp.37-44.
- 17) 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.
- 18) 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)。

平成16年9月30日 受理