

量的降水予報とリスク評価に基づく 土砂災害警報基準の検討

松井 京子¹・島村 誠²

A Study of Landslide Warning Policy Based on Precipitation Forecast and Risk Assessment

Kyoko MATSUI¹ and Makoto SHIMAMURA²

Abstract

Landslide disasters cause heavy casualties even today, though observation and forecasts of precipitation have been notably improved. In Japan, the majority of municipalities prescribe just “comprehensive decision” as a criterion for issue, on behalf of quantitative thresholds. The aim of this paper is to provide a quantitative criterion of evacuation warnings, considering accuracy of a precipitation forecast, evacuation costs, and a trade-off between lead-time and certainty. By simulating imaginary warnings using rainfall and forecast data in August, 2014 in Hiroshima city, we evaluated the proposed criterion through performance of detection, false alarm ratio and expected lead-time. In addition, we assumed some imaginary improvements on accuracy of the forecast and simulated the impacts on efficiency of warnings. We concluded that the proposed warnings achieve desirable efficiency, and, improvement of short-term forecasts is especially effective regarding evacuation warnings.

キーワード：警報発令，降水短時間予報，予報精度，避難コスト，意思決定

Key words：evacuation warning, short-term precipitation forecast, accuracy of forecast, evacuation cost, decision making

1. はじめに

2012年の阿蘇市，2013年大島町，2014年広島市

など，近年においても土砂災害による死傷者は絶えない。この原因のひとつは避難勧告の遅れであ

¹ 東京大学工学系研究科社会基盤学専攻
Department of Civil Engineering, The University of Tokyo

² 東京大学工学系研究科社会基盤学専攻（現所属：国立研究開発法人防災科学技術研究所）
Department of Civil Engineering, The University of Tokyo
(Now in National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

り、岡本・他(2012)によれば、2008年から2010年に発令された避難勧告のうち過半数が土砂災害発生後に発令されている。警報により人命を守るためには災害発生前に十分なリードタイムを有することが必要だが、一方ではリードタイムが長ければ長いほど将来の状況は不確実になり空振りの危険が増える。このように早期の勧告による便益と確実な情報提供はトレードオフの関係にあるといえ、警報発令タイミングの適正化は社会的重要性が高い課題である。

土砂災害の危険性を示す気象情報として、気象庁が都道府県ごとに異なる基準にもとづいて土砂災害警戒情報を発表している。これは直接的に住民に避難を促すものではないものの、一部の市町村では避難勧告発令の基準として活用されている。土砂災害警戒情報は多くの都道府県で現時点までの雨量と2時間後までの決定論的な降水短時間予報値をインプット雨量として、土壌雨量指数と時間雨量という二指標によって判断されている。より長いリードタイムの確保には6時間後まで発表されている降水短時間予報の活用が有望だが、3時間後以降の予報精度には課題があるとされているため新たな手法が必要である。

住民へ直接行動を促すための避難勧告・指示は災害対策基本法により市町村長に権限が与えられている。この発令基準は地域防災計画等に規定されることが多いが、具体的な基準が設定されている例は市町村の10%程度にすぎない。残りの多くが「総合的判断により発令」としている状況であり、結果として担当者の主観的判断に依存している場合が多い。この定性的な規定が勧告遅れの要因となっていると考えられるが、現実に避難所の開設コストや避難途中のリスク、空振りに終わった場合の説明責任等、定量化されていない要素が介在する。したがって、単なる雨量や土砂災害のリスク情報以外にも考慮すべき事項が多いため、定量的基準の設定は難しいのが実情である。

本研究は以上の背景と問題意識から、量的降水予報の不確実性と警戒避難におけるリスク評価を行うことによって、誤警報率・見逃し率・リードタイムといった観点から有効な土砂災害警報基準

を考える。降水予報の精度と避難に係るコスト、そして避難のリードタイムと損失の関係性を定式化し、災害の発生・非発生の峻別に留まらない統合的な土砂災害警報発令基準を提案した(図1)。この基準による警報シミュレーションを2014年8月広島県の雨量データによって行い、リードタイムと損失の関係、避難コスト、リスク評価手法について感度分析を行った。加えて、仮想的な降水短時間予報の精度向上を想定し、提案基準による警報にどのような影響が見られるかについてシミュレーションと感度分析を行った。

2. 既往研究

2.1 量的降水予報の精度

現在気象庁の提供する量的降水予報には、1時間後までを対象とした降水ナウキャストと、6時間後までの1時間ずつを30分ごとに予報する1kmメッシュの降水短時間予報がある。本研究では災害前の十分なリードタイムの確保を念頭に、降水短時間予報を使用する。

降水短時間予報の精度評価は気象庁によって実施されている(気象庁予報部, 2015)。ただし、レーダー観測による解析雨量を真値とした検証であり、より土砂災害との関連性が高い地上観測降水量との比較ではないという問題がある。

降水短時間予報と地上観測雨量を比較した既存研究には、和田・他(2005)や久保田・大槻(2008)がある。両者とも少数のオリジナルに設置した地上観測計による実測値と降水短時間予報を比較したもので、これらは先行時間が長い予報ほど過小

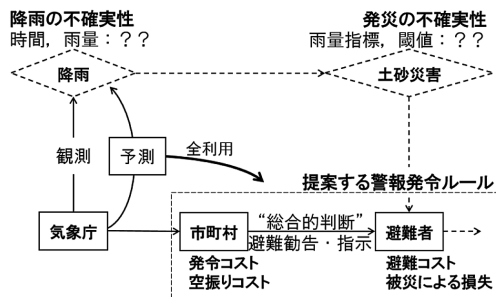


図1 提案する土砂災害警報の位置づけ

予報が多くなること、3時間後以降予報の精度劣化が激しいこと、加えて前線を伴わない降雨では予報精度が下がることを指摘している。

2.2 警報発令の経済評価による判断

前述のように、現行の土砂災害発生危険度判定はリスク評価や予報利用に課題がある。雨量情報だけに依存しており、社会・経済的な要素はまったく加味されていないことに加え、土砂災害警戒情報への降水予報取り入れは2時間後までの降水短時間予報の決定論的な使用であり不確実性が考慮されていない。

一方では、中谷 (2002) が降水予報の精度を用いて期待避難コスト、期待被災損失を比較するコスト・ロス・モデルにより避難警報を発令する枠組みを提案している。ただし、仮想的な降雨状況・災害発生・コスト・損失の下での試算のみに留まり、加えてリスク評価も状態の遷移は考慮せず一時点の雨量指標のみに依存する方法である。

国外では土砂災害に限らず、コストや損失の経済価値によって早期警報の発令意思決定基準を扱った既存研究例がある。Schröter et al. (2008) は洪水警報について量的降水予報の先行時間別精度と被害算定からコスト・損失評価による警報発令意思決定手法を論じている。土砂災害の事例では Huggel et al. (2010) が、警報発令・非発令の逐次意思決定を損失軽減額と避難コストの比較によって定式化している。

米国では Regnier & Harr (2006) が、ハリケーン警報について動的な意思決定ルールを検討している。リードタイムと精度を考慮した定式化であり、過去データをもとに推定されたハリケーンの状態のマルコフ遷移確率を用いて自治体がコスト・損失の動的最適化を行うという設定である。

Peng & Zhang (2013) が提案するダム崩壊早期警報発令意思決定の動的最適化アルゴリズムでは、昼間・夕方・夜間で避難率が異なる設定により、より現実に近い損失の想定が試みられている。

以上のように警報発令意思決定を社会・経済的価値評価により行う枠組みはしばしば提案されているが、土砂災害を対象に降水予報を確率的要素

として取り入れたリスク評価による意思決定ルールの構築を試みた研究は行われていない。これは雨量観測網とそのデータ蓄積、および量的降水予報の整備が行われている地域が世界的に見ても少ないこと、またハリケーンなどと異なり当該気象事象と災害発生が必ずしも一致しないことが考えられる。

3. 総合的な定量警報発令ルールの構築

ここでは、降水短時間予報が更新される30分ごとに、その時点までの地上観測雨量値と6時間先までの6件の降水予報をインプットデータとして「避難警報の発令・非発令」の二選択肢による非可逆意思決定を行うこととする (図2)。本研究では降水短時間予報を確率的情報として扱い、主観的な発災予測信念は「雨量指標が、ある履歴順位を超過したときに確実に土砂災害が発生する」と設定した。これらから得られる将来の状態遷移確率にもとづいて被災による損失と警報発令コストが発生すると発令主体が考えたとし、6時間後まで確率的に推移する状態を評価することで警報発令・非発令の決定をするルールを提案する。

3.1 降水短時間予報精度

本節では、予報として使用する降水短時間予報の分析結果と利用方法を説明する。利用したデータは、一般財団法人気象業務支援センター提供の降水短時間予報 GPV データ2014年8月分および同期間の気象データベース・アメダスである。図3は、全国観測所1278地点の30分毎地上観測時間雨量を横軸に、当該時刻・当該メッシュの雨量を

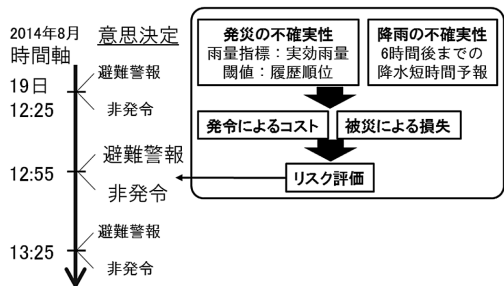


図2 逐次意思決定の概要

予報した降水短時間予報値を縦軸にプロットした予報先行時間ごとの散布図である。一つの地上観測雨量に対して6時間前から1時間前までに予報がなされているので本来は散布図が6枚作成できるが、ここでは傾向が顕著な1, 3, 6時間後予報を掲載した。図中では45度線上に乗るプロットが正確な予報であったことを意味し、先行時間が長くなるにつれ相関が下がっていることが確認できる。また和田・他(2005)が指摘しているように、先行時間が長いほど過小予報、つまり45度線よりも下方の点が増えることがわかる。

図4は図3と同じアメダス雨量値と降水短時間予報値の対応について、降水短時間予報ごとにアメダス雨量値の周辺分布を示したもので、線種は先行時間別になっている。縦軸は分布の累積値である。図4(a), 予報雨量0~10mm/hの場合の実際の雨量値分布は、1時間後予報から6時間後

予報までほとんど精度に変化がない。一方で(c), 50~60mm/hの強降雨が予報されたデータでは、先行時間によって予報精度が大きく異なっていることがわかる。1時間後予報が50~60mm/hであった場合には7割程度の割合で実際には1時間後30mm/h以上の降雨があるが、同じ予報値でも5時間後予報であった場合には実降雨が30mm/hを超過するのは2割程度である。

以降のシミュレーションでは、元の雨量分布がガンマ分布に近似できるとした。現在時刻 t に発表された $n = \{1, 2, \dots, 6\}$ 時間後降水予報 l_n (mm/h)が $[l', l'')$ にあったときの、時刻 $t+n$ のアメダス雨量値 p_{t+n} (mm/h)の確率分布を $g(p_{t+n})$ 、ガンマ分布の形状パラメータを k 、尺度パラメータを θ とすると、内訳は以下の式のようなのである。

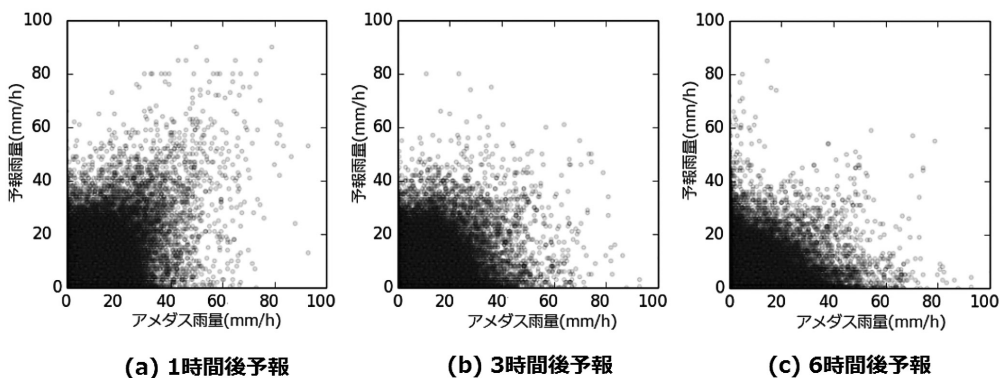


図3 アメダス雨量と先行時間ごとの降水短時間予報散布図

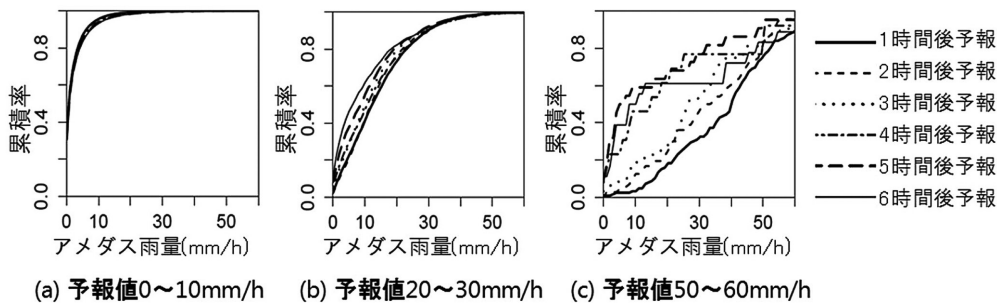


図4 アメダス雨量値・先行時間別の降水短時間予報周辺累積分布

$$g(p_{t+n}) = \Pr(p_{t+n} | l' \leq l_n < l'') \\ = (p_{t+n})^{k-1} \exp(-\frac{p_{t+n}}{\theta}) / \Gamma(k)\theta^k \quad (1)$$

Γ はガンマ関数である。この分布においては n 時間後の雨量は先行時間 n と降水予報値 l にのみ依存するので、パラメータ k および θ は n, l 別に推定した。

また上式の近似は降水短時間予報値ごとに作成した周辺分布だが、同様にアメダス雨量値ごとに作成した周辺分布についても行った。時刻 $t+n$ のアメダス雨量 (mm/h) が $[p', p'']$ にあったときの、 n 時間前に発表された降水短時間予報値分布を $h(l_n)$ とすると、形状・尺度パラメータをそれぞれ k', θ' として

$$h(l_n) = \Pr(l_n | p' \leq p_{t+n} < p'') \\ = (l_n)^{k'-1} \exp(-\frac{l_n}{\theta'}) / \Gamma(k')\theta'^{k'} \quad (2)$$

また、図 4 ではデータを雨量値 10 mm/h ごとに分割しているが、本論文では 1 mm/h 区分・10 mm/h のどちらかを採用した。このモデル選択の基準には、赤池情報量基準を用いた。

30分ごとに得られる降水短時間予報から、この確率分布によって将来時間雨量の確率分布を得ることができる。現在雨量とこの将来雨量分布に実効雨量の減衰係数（詳細は次節）を乗じながら畳み込み積分により、6時間後までの雨量指標値の分布を生成する。

3.2 主観的発災雨量基準

本節では、主観的発災基準としての実効雨量と履歴順位を説明する。土砂災害の雨量による発災予測は「どのような雨量指標によって」「どの程度の閾値によって」の二点で決定される。主な雨量指標として寺田・中谷 (2001) はタンクモデルによる土壌雨量指数、実効雨量、降雨強度や地理的特性も含めた重判別分析を挙げている。この内、実効雨量 ER (Effective Rainfall) は矢野 (1990) により提案されたものであり、時刻 t の時間雨量が $Y(t)$ (mm/h) として離散的に与えられるとき以

下の式で算出される。

$$ER(t) = \sum_{k=-\infty}^t Y(k) \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t-k}{H}} \\ = Y(t) + ER(t-1) \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{1}{H}} \quad (3)$$

ここで H は流出特性を表す半減期 (h) であり、大きいほどより過去の雨量に重み付けすることになる。これは鈴木・小橋 (1981) によって広島のがけ崩れに対する有効性が確認されている他、東日本旅客鉄道 (株) では 1.5, 6, 24 時間半減期の実効雨量が運転規制基準として利用されている。この実効雨量は任意の半減期をとることができるため、様々な雨量特性の土砂災害に対応し得る。

閾値設定では、災害履歴データに依存しないものとして履歴順位による方法がある。これは任意の雨量指標について現在の指標値が過去の履歴中上位何位であるか、という情報から危険を判定する手法で、過去には高知県が実効雨量との組み合わせで土砂災害警戒情報発表基準に用いていた (武田・他, 2008)。履歴順位による閾値設定は災害発生履歴情報を必ずしも必要としないうえ、閾値の上下によって警報発令頻度を調整しやすいという利点がある。

降水短時間予報 6 時間分と 3.1 節で求めた分布、および各半減期実効雨量の履歴順位による閾値から、6 時間後までの毎時における発災確率を求めることができる。ただし意思決定各時点での実効雨量は確定的に算出できるが、降水予報から予測される 1 時間後から 6 時間後までの実効雨量値は不確定である。 n 時間後の実効雨量予測値は、「 $n-1$ 時間後の実効雨量値に半減期 H の減衰率を乗じた実効雨量値の確率分布」と、「降水予報値と、3.1 で得られたパラメータから予測される将来雨量の確率分布」の畳み込み積分によって得られる確率分布とする。

次章のシミュレーション中では、実効雨量の半減期は 1.5, 3, 6, 12, 24, 48, 72, 96, 192 時間を用いた。これら 9 半減期の実効雨量に時間雨量を加えた 10 の雨量指標を 1987 年 12 月 22 日からすべての 1 時間ごとに計算し、各時点の各雨量が履

歴上何番目の大きさかという履歴順位を算出した。用いた雨量データは気象データベース・アメダスのものである。履歴順位の母集団は経年により増加するため、ここでは順位の数値そのものではなく「当該時点までの全時点数の内上位何%に入っているか」を閾値として用いる。次章では全時点の雨量指標値上位1/8000, または上位1/10000を閾値として用いている。

3.3 災害による損失と避難コスト

本節では、避難に要するコストと災害による損失の設定を示す。警報による損失軽減率をリードタイムの関数として表現し、付加的に、夜間避難がもたらす危険を追加コストとして定式化した。

(1) 損失

一般的に警報が出てから災害が起こるまでのリードタイムが長いほど避難が成功しやすいため、災害による被害は小さいと考えられる。Lindell et al. (2008) はハリケーン事例の調査から、避難完了率が警報発令からの時間に対してワイブル分布に近似し、警報発令時の所在など集団の属性・状態によって分布のパラメータが変化することを示している。本研究でも避難完了率はこれに倣いワイブル分布を採用した。また、Regnier & Harr (2006) に倣って「警報発令によって軽減可能な最大の被害」を1とし、警報の便益をリードタイムのみに依存する損失軽減の割合として考

る。

図5にはシミュレーションに用いた仮想的な損失軽減率を示した。図5(a)はリードタイムに損失軽減率が比例する最も単純なパターンである。次に、避難率の異なる3つの人口グループを想定し、グループの割合から全体の避難完了率を合成した。この合成した避難完了率を損失軽減率と見なし黒の実線で示したのが人口パターン1の図5(b)とパターン2(c)である。避難速度が速いグループを大破線、中程度を中破線、遅いグループの避難完了率を小破線で表した。これらの避難完了率はそれぞれ表1に示したワイブル分布である。人口パターン1(b)とパターン2(c)では避難が速いグループと遅いグループの割合が異なり、同じ被害軽減のためにはパターン2のほうが避難が遅い人口が多いため長いリードタイムを要する。

(2) コスト

避難警報の発令には、警報の周知や避難所の開設が必要である。またこれに加えて、警報が空振りに終わった際には住民への説明責任が発生する可能性がある。本研究の枠組みでは、警報に伴う上記の障害やペナルティをコストとして扱う。これらの金銭価値の測定は中谷(2004)が試みているものの明確な結果は出ていない。そこでRegnier & Harr (2006) 等に倣って、前述の「警報発令によって軽減可能な最大の損失」に対する割合とし

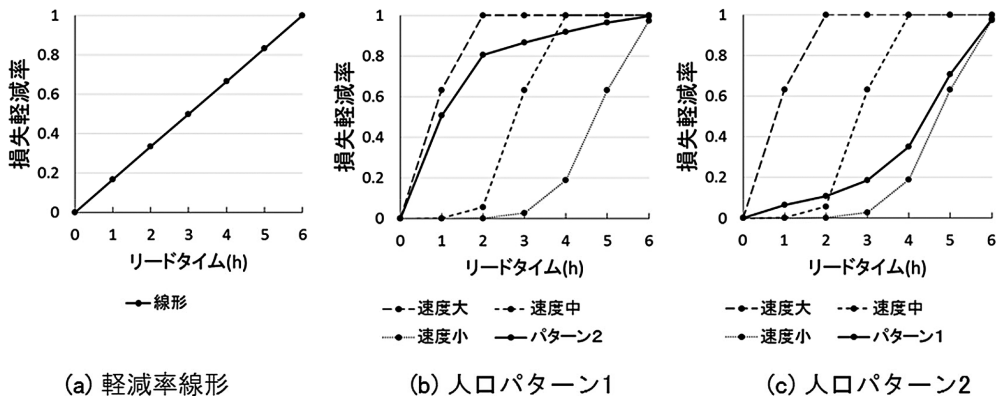


図5 損失軽減率とリードタイムの関係

て仮想的に考えることとする。ここでは、避難警報発令の意思決定をするタイミングで最大損失の3%、警報を発令してから6時間災害がない場合を空振りとして最大損失の3%のコストが発生すると仮定した。

また、通常のコスト以外に夜間避難にかかるコストも考える。一般的に夜間の避難は警報周知の困難や避難途中の被災リスクが非常に大きいため忌避されることが多い。これを表現するために、夜間避難コストを考慮するケースでは17:00~22:00, 22:00~8:00間の避難時間1時間につきそれぞれ最大損失の2%, 5%ずつの避難コストが追加で発生すると仮定した。

3.4 リスク評価

コストや損失は将来の災害発生確率にしたがって発生すると想定するので、単純に警報発令・非発令それぞれの良し悪しを比較することはできない。そこで本節では、確率的に発生するコストや損失を評価する方法として、動的最適化、バリュー・アット・リスク、期待ショートフォールを導入する。

(1) コスト・損失の動的最小化

コスト・損失の動的最適化は Regnier & Harr (2006) や Peng & Zhang (2013) で採用されているリスク評価手法である。ここで提案するのは、「現時点で警報を出すという意思決定が、6時間後までの期待総コスト・損失を最小化する場合のみ警報を出す」というルールである。ここでは将来情報として6時間後までの1時間間隔予報のみを用いるため、現時点を加えた7段、つまり段階 $n = \{0, 1, 2, \dots, 6\}$ とする。また各段で行う意思決定は警報を非発令/発令するの非可逆意思決定、

表1 各グループの避難完了率と人口に占める割合

	避難速い	避難中程度	避難遅い
避難完了率	$= 1 - e^{-\tau^7}$	$= 1 - e^{-\left(\frac{\tau}{3}\right)^7}$	$= 1 - e^{-\left(\frac{\tau}{5}\right)^7}$
人口パターン1	80%	10%	10%
人口パターン2	10%	10%	80%

$d_n = \{0, 1\}$ とする。状態 x_n は、段 n での発災の有無、 $\vec{d} = \{d_0, d_1, \dots, d_n\}$ から求められる何時間前に警報を発令しているかの情報、その段での雨量指標(実効雨量)で構成される。意思決定と状態によって決定されるアウトプット r_n は前節3.3で置いた損失とコストの和である。ここで、 r_n に影響するのは発災の有無と \vec{d} だけである。

状態 x_n から状態 x_{n+1} への遷移確率は3.1, 3.2に示した将来雨量分布と主観的発災雨量基準によって求められる。

ここでは、最適化する値 R_n を段 n 以降の期待総コスト・損失とする。

$$R_n = \sum_{m=n}^6 E[r_m] \tag{4}$$

通常の動的問題と同じように最終段から R_n を最小化する d を決めてゆき、 $d_0=1$ が R_n を最小化する場合のみ仮想警報が発令される。

(2) バリュー・アット・リスクの最小化

前項に述べた期待損失の最適化を用いる古典的なリスクマネジメントでは、発生確率の低い低頻度リスクによる破産を避けることができない。そこで、稀なリスクの発生規模をコントロールするために考案されたのがバリュー・アット・リスク(Value at Risk, 以下 VaR と表記)であり、人命や公共財をも対象とする防災分野への適用性があると考えられる。VaR は主に金融などの分野で用いられるリスク評価の指標である。VaR は、損失額が確率変数であるときに、ある確率の信頼水準 CL (%) よりも発生確率の低いリスクをすべて無視したときの最大損失額である。

$$100\% - CL = \Pr(\text{損失額} \geq \text{VaR}) \tag{5}$$

信頼水準を90%とした場合の概念図は図6の通りであり、このときの VaR は0.75である。VaR の最小化は、「定めた水準以上に稀なリスクは無視した上で損失の最大値を最小化する」と解釈できる。

(3) 期待ショートフォールの最小化

VaRは低頻度リスクの評価を可能にする手法だが、低頻度リスク内の分布形状を弁別できない難点がある。これを解決するのが期待ショートフォール(Expected Shortfall, ES)であり、損失額を確率変数として、ある信頼水準額よりも損失額が大きいリスクの期待値を表している。ここで「ある信頼水準額」を仮に前項 VaR の値とすると、ES は当該 VaR よりも額が大きいリスクすべての期待損失額である。

$$ES = E(\text{損失額} | \text{損失額} \geq \text{VaR}) \quad (6)$$

ESの最小化とはある信頼水準確率よりも稀な甚大リスクの期待損失額の最小化を意味している。前項3.4(2)にて示した例のESを図6に図示した。この例では、VaR以上という条件付きでの損失期待額は0.80となる。

4. 警報シミュレーション結果

本章では、前章に提案した警報発令ルールを

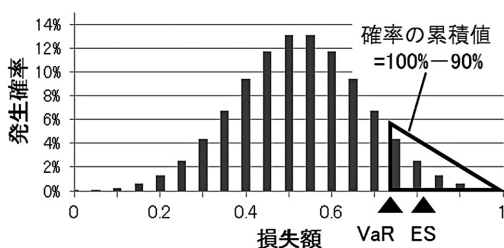


図6 信頼水準90%のVaR, ESの概念図

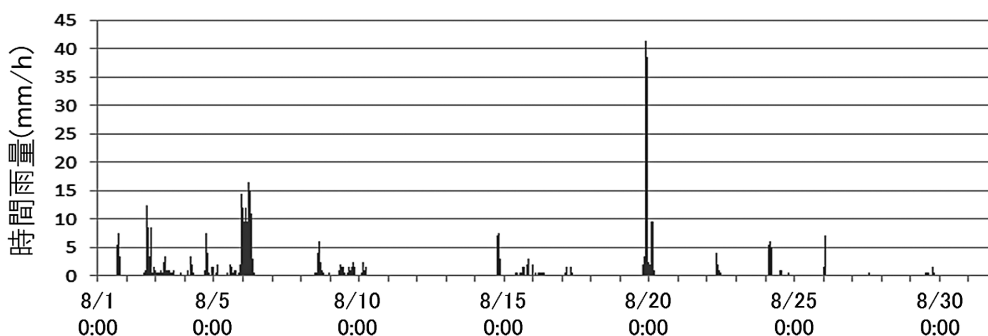


図7 シミュレーションに用いた広島観測所2014年8月の雨量

2014年8月広島観測所のアメダス雨量データ(図7)、および観測所のあるメッシュの降水短時間予報データに適用して仮想警報シミュレーションを行う。ここでは6時間分の降水短時間予報が発表される毎時25分、55分の1時間に2回警報発令・非発令を決めていくとする。結果として出力された仮想警報を、2014年8月20日、3:20の広島土砂災害発生と比較して評価する。

4.1 警報発令シミュレーション

主観的発災雨量基準、被災による損失・コスト、またリスク評価は様々な値・手法をとり得る。ここでは損失軽減率とリードタイムの関係、夜間避難コスト、リスク評価手法について感度分析を行う。

(1) 損失軽減率バリエーション

本項では、3.3(1)で論じた警報によるリードタイムと損失軽減率の関係が、提案する基準にもとづく仮想警報に与える影響を見る。表2は図8に結果を示した3パターンシミュレーションの各条件設定である。

図8(a)は、線形の損失軽減率(図5(a))を設定した場合の仮想警報シミュレーションである。横軸は8/19 16:00~8/20 12:00の時間軸であり、緑のラインは実際に土砂災害警戒情報が発令された時刻、赤線は8/20 3:20の広島土砂災害発生時刻を示している。図中の十字プロットが仮想警報発令タイミングである。プロット各色の半

減期を有する実効雨量と履歴順位上位1/8000を主観的発災基準としたときに、プロットのタイミングでは3.3 (1) に述べた警報発令意思決定 $d_0 = 1$ が警報非発令 $d_0 = 0$ の期待総コスト・損失を下回る。

結果を見ると、時間雨量および短半減期の実効雨量を基準とした場合では災害を捕捉できており、発災や土砂災害警戒情報と比較しても十分に早く、21:25から仮想警報が発令されている。これは降雨予報の結果(例えば21:25時点で1時間後に28mm/h、6時間後に12mm/hの降雨が予報されている)を利用したためであると言える。一方で12時間以上の長い半減期を基準とした仮想警報は発令されておらず、災害を見逃している。こ

表2 損失軽減率バリエーションのシミュレーション条件

発災閾値	軽減率線形	
	人口パターン1	人口パターン2
損失軽減率	実効雨量, 履歴順位の上位 1/8000位	
避難コスト	線形	
空振りコスト	発令時に最大損失の3%, 夜間コストなし	
リスク評価	発令後6時間災害がない場合, 最大損失の3% コスト・損失の動的最小化	

れは土石流の場合は短半減期実効雨量が卓越するとした鈴木・小橋(1981)などと整合的な結果である。つまり、今回対象にした土石流は短半減期の実効雨量と深く関係しており、長半減期実効雨量は卓越していなかった。

図8 (b), (c) は他の条件を変えないまま損失軽減率を図5 (b), (c) に変えたものである。避難が速いグループが多いとした図8 (b) では図8 (a) に比べ警報数が減少, 発令タイミングが遅れている。一方で遅いグループが多いとした図8 (c) では発災直前も含めて発令数が増加, リードタイムも増えている。これは避難が速い場合に比べて遅い場合では、警報発令を先延ばしにして発災直前に避難することによる損失軽減率が小さいために、発令の意思決定がされやすいからである。反対に避難が速い場合では相対的に意思決定を遅らせるメリットが大きいいため、警報発令が忌避されることになる。

これら3件のシミュレーション結果を2014年8月の一ヶ月間で半減期別に集計したものが表3である。誤警報数はこの一月間で発令された各半減期実効雨量の仮想警報のうち、8月19日15:20~

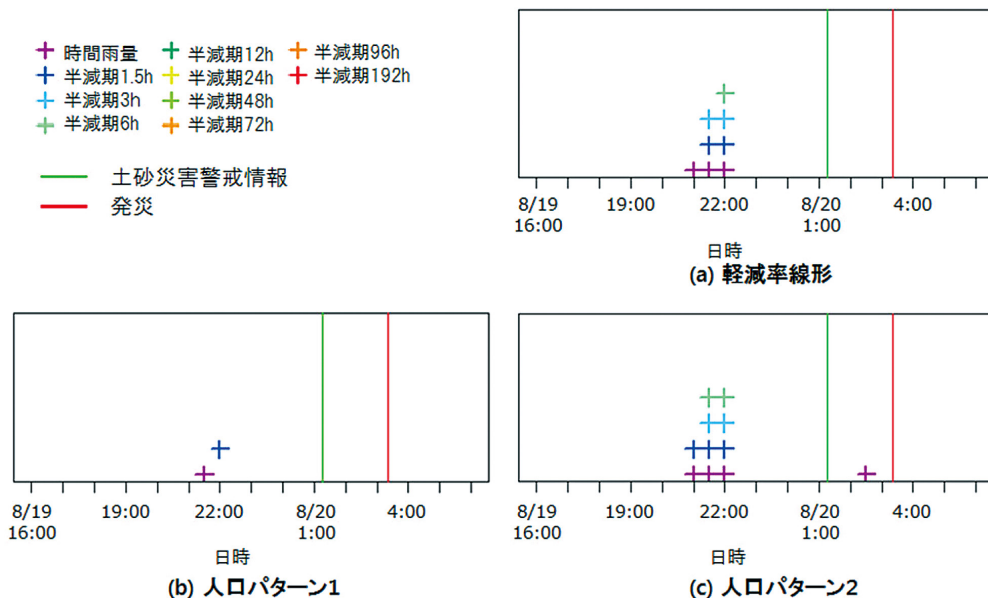


図8 シミュレーション結果

表3 損失軽減率バリエーションの結果集計

	軽減率線形			人口パターン1			人口パターン2		
	誤警報数	総警報数	最大LT	誤警報数	総警報数	最大LT	誤警報数	総警報数	最大LT
時間雨量	1	4	5.9	0	1	5.4	1	4	5.9
半減期1.5h	0	2	5.4	0	1	4.9	0	3	5.9
3h	0	2	5.4	0	0		0	2	5.4
6h	0	1	4.9	0	0		0	2	5.4
12h	0	0		0	0		0	0	

8月20日3:20の間以外に発令されたものをカウントしている。また最大LT(リードタイム)とは、8月19日15:20~8月20日3:20間の仮想警報のうち最も早いものから20日3:20までの時間(h)である。軽減率線形・時間雨量にて発生している誤警報は8月22日明け方の降雨に伴うもので、5:25に発令されている。図7からは8月22日の降雨はそれほど強くないことがわかるが、ここで仮想警報が発令されているのは、この時に降水短時間予報で非常に強い降雨(4時間後予報で31mm/h)が予報されたことが原因だと考えられる。なお、この予報は外れており実際にはそれほど強い降雨は発生しなかった。

(2) 夜間避難コスト

本項では、3.3(2)で提案した3つの時間区分のうち、夜間と深夜における避難には特に危険や手間が伴うとしてコストを設定した。シミュレーション条件は表4に示した。ここではリスク評価手法として、信頼水準90%でのES最小化を用いている。前項と同様に、2014年8月での仮想警報シミュレーションをした結果の集計が表5である。夜間避難コストを導入すると、時間雨量を基準とした場合においてはリードタイムが減っている。しかし実効雨量を基準とした場合ではリードタイムを保ったまま特に夜間の警報発令が減り、誤警報数も大きく減少していることがわかる。

(3) リスク評価手法

本項では、3.4で挙げた3種類のリスク評価手法によって仮想警報発令がどのように変化するかを見る。表6のように、他の条件を一致させてリスク評価手法のみ異なる条件で仮想警報シミュ

表4 夜間避難コストに関するシミュレーション条件

	避難コスト一定	夜間コストあり
	発災閾値	実効雨量, 履歴順位の上位1/10000位
損失軽減率	軽減率線形	
避難コスト	発令時に最大損失の3%	左に加え17:00~22:00, 22:00~8:00間の避難時間1時間につき、それぞれ最大損失の2%, 5%ずつの避難コスト
空振りコスト	発令後6時間災害がない場合, 最大損失の3%	
リスク評価	信頼水準90%のES最小化	

表5 夜間避難コストに関する結果集計

	避難コスト一定			夜間コストあり		
	誤警報数	総警報数	最大LT	誤警報数	総警報数	最大LT
時間雨量	29	34	9.9	20	23	5.9
半減期1.5h	13	16	5.9	3	6	5.9
3h	9	11	5.4	2	5	5.9
6h	7	9	5.4	3	5	5.4
12h	0	3		0	1	5.4
17~22時発令	16回			13回		
22~8時発令	49回			19回		

表6 リスク評価手法に関するシミュレーション条件

	動的最適化	VaR	ES
	発災閾値	実効雨量, 履歴順位の上位1/8000位	
損失軽減率	軽減率線形		
避難コスト	発令時に最大損失の3%, 夜間コストなし		
空振りコスト	発令後6時間災害がない場合, 最大損失の3%		
リスク評価	動的最適化	VaR, 信頼水準90%	ES, 信頼水準90%

表7 リスク評価手法に関する結果集計

	動的最適化			誤警報数	VaR			誤警報数	ES	
	誤警報数	総警報数	最大 LT		総警報数	最大 LT	誤警報数		総警報数	最大 LT
時間雨量	1	4	5.9	7	11	5.9	35	41	9.9	
半減期1.5h	0	2	5.4	4	7	5.9	17	20	5.9	
3h	0	2	5.4	2	4	5.4	10	12	5.4	
6h	0	1	4.9	3	5	5.4	7	9	5.4	
12h	0	0		0	2		0	5		

レーションを行った。VaR, ES を用いるケースでは、各時点で警報発令した場合の VaR または ES が非発令時の VaR または ES を下回るとき警報発令となる。信頼水準は VaR, ES ともに90% を使用している。2014年8月一ヶ月分の集計結果が表7である。VaR や ES ではリードタイムが延びているものの、特に ES で誤警報数が非常に多くなっていることがわかる。この誤警報は強い降雨があった8月6日、および強い降雨が予報された22日明け方の降雨周辺に集中して発令されている。誤警報数は少ないほうが、リードタイムは長いほうが優れた警報であると考えられることができるが、誤警報数とリードタイムはトレードオフとなっていることがわかる。

4.2 仮想予報精度下における警報シミュレーション

(1) 仮想精度にもとづく降水短時間予報

前節では、実際に発表された2014年8月の降水短時間予報を確率的将来雨量情報として用いた。一方で、降水短時間予報は1988年の運用開始以来、時空間的なサービス提供範囲拡張に加えて予報精度の向上も漸次的に達成している。本節では、3.1で分析した現行の予報精度を仮想的に変化させた架空の精度を持つ降水短時間予報をシミュレートし、これをインプットとして前節と同様に仮想警報シミュレーションを行う。これにより、提案する警報発令ルールにどのような性質の予報精度向上が資するかを分析する。

3.1で行った分布への近似においては、実際の降雨量 p_{t+n} および先行時間 n ごとに推定されたパラメータ k', θ' のみによって予報値の確率分布 $h(Q_n)$ が与えられる。ここでは降雨量 p_{t+n} には2014

年8月広島観測所のアメダス実績値を用い、仮想的な k', θ' を与えることで、逐次6時間分の予報をシミュレートする。

ここでは予報精度が高いことを「予報値 $h(Q_n)$ の期待値が実際の降雨量 p_{t+n} に近い」、「 $h(Q_n)$ の分散が小さい」という二つの条件で説明するとする。なお、ガンマ分布の期待値 μ および分散 σ^2 は以下のようなものである。

$$\mu = k' \times \theta' \tag{7}$$

$$\sigma^2 = k' \times \theta'^2 \tag{8}$$

μ, σ^2 を与えれば k', θ' は一意に定まることを利用して、分布の期待値・分散を操作することにより新しい予報精度パラメータ $k'_{imag}, \theta'_{imag}$ を先行時間 n , アメダス雨量ごとに生成した。以下に予報精度改善の3つのシナリオを説明する。

a) 時間的改善

3.1に示したように先行時間 n が大きくなるにつれ予報精度は劣化する。このシナリオでは、3時間後以降予報の $k'_{imag}, \theta'_{imag}$ をすべて2時間後予報の k', θ' に一致させた。

b) 量的改善

ここでは先行時間に係らず、全体的に予報が将来雨量、つまりアメダス実績値に近づき、かつ予報のばらつきが小さくなるシナリオを考える。すべてのパラメータの組 k', θ' において分散を元の分散 σ^2 の2/3とし、新しい期待値を推定した k', θ' から得た期待値 μ と実現値であるアメダス雨量値 p_{t+n} の1:2内分点とした。この新しい期待値と分散から $k'_{imag}, \theta'_{imag}$ を生成した。

c) 直近予報改善

このシナリオでは、1時間後予報のみ飛躍的に

正確になった予報精度を想定する。2時間後以降のパラメータは k, θ のままに、1時間後予報についてのみ分散を元の分散 σ^2 の1/4、期待値 μ と実現値であるアメダス雨量値 $p_{t,n}$ の1:7内分点とした。この新しい期待値と分散から $k'_{imag}, \theta'_{imag}$ を生成した。

(2) シミュレーション結果の評価

前述のように仮想予報は確率的に与えられるので、一様乱数を与えて300回分、2014年8月広島観測所の雨量を用いて仮想予報、及びそれにもとづく警報シミュレーションをした。本項で用いた警報発令ルールの諸条件はすべて表2の軽減率線形のものである。このシミュレーション警報の性能を図9に示す。横軸は8月19日15:20~8月20日3:20の間の仮想警報のうち最も早いものから20日3:20までの時間(h)の全試行の平均値、縦軸は誤警報数平均値である。リードタイムは長く、誤警報数は少ない警報の性能がよいと言える。

結果を見ると、量的改善と直近予報改善が推定現行精度に比較してリードタイムの拡大に成功している。ここでリードタイムが0とは災害の見逃しであるので、リードタイムが伸びているこの2シナリオでは見逃し率が下がっていることになる。また、直近予報の改善では誤警報数も抑えられていることがわかる。

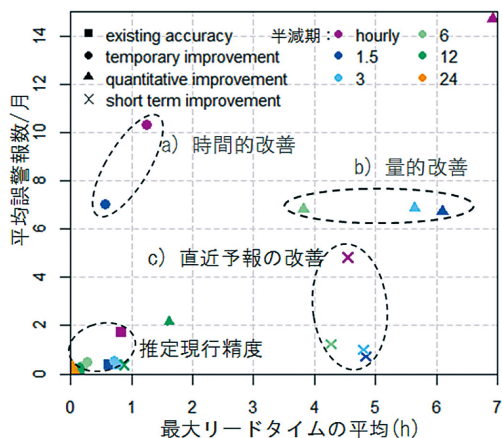


図9 仮想予報精度下における警報性能

4.3 考察

(1) 警報発令シミュレーション

4.1で確認したように、提案する警報発令ルールを用いると現実の災害発生時付近に仮想警報が発令され、概ね良好な結果が得られることがわかった。広島土砂災害については特に短半減期実効雨量による発災閾値が有効である。また、避難に長時間を要する設定を導入することで長いリードタイムが得られること、夜間避難コストの考慮により夜間の警報発令を抑制できることがわかった。リスク評価手法については、試行の範囲内では動的最適化が有効な結果である。VaR, ESを用いたケースでは、誤警報の観点から過敏となる結果が出た。VaRやESは元来発生確率の低いリスクを避けるための手法であり、今回の「雨量が閾値を超えると一定規模のハザードが発生する」設定よりも、雨量に応じてハザード規模が変化するような設定では有効だった可能性がある。

(2) 仮想予報精度下における警報シミュレーション

4.2の結果からは、1時間後予報の大きな精度改善をする直近予報の改善が提案する警報発令ルールに有用であることがわかった。これは提案手法においては3.2に説明したように将来雨量を確率分布で捉え量み込みをするため、直近将来の予測精度が警報精度を左右するからである。なお、この直近予報の改善は「短時間予測の精度向上」という気象予報分野の近年の重点課題と合致している(気象庁気象研究所, 2014)。

5. おわりに

5.1 まとめ

本研究ではリードタイムの長短に依存して警報による損害軽減度が増減すること、避難行動や空振り警報にコストを要することを定式化した。その上でリスク評価手法としてコスト・損失の動的最小化, VaRの最小化, ESの最小化に基づいて、量的降水予報の不確実性を考慮しながら警報の発令・非発令を決める基準を提案した。

また、提案手法によって2014年8月の広島市で

仮想警報のシミュレーションと各設定による感度分析を行った。主に災害のあった19～20日付近で警報発令の判断がなされる、降水予報の利用によってより早い警報発令が得られるなど、全体的に妥当な結果を得た。また今回の試行中では動的最適化が誤警報率やリードタイムの観点から比較的良好な性能を示している。避難行動に時間がかかる想定により、より長いリードタイムが得られること、また夜間の警報発令の抑制のためには夜間避難コストの考慮は効果があることを示した。

加えて、仮想の精度をにおいて仮想降水短時間予報を生成し、上記の動的最適化による警報発令基準で2014年8月における仮想警報シミュレーションを行った。ここでは予報精度の改善シナリオとして先行時間上の予報精度改善、雨量値の量的精度改善、直近の短時間予報の精度改善を試行した。結果として量的改善と直近予報の改善が長いリードタイム・見逃し減少を実現し、かつ後者は誤警報数抑制も達成することがわかった。

5.2 課題

本研究では提案する警報発令ルールにおいて諸設定の感度分析を行ったが、実用を考えれば地域の実態や要請に見合った設定を用いるべきである。ただし、警報発令・警戒避難によって自治体が負うコストや避難活動の実際については中谷(2004)の試みからもわかるように計量が非常に困難であり、手法の構築が必要である。

また、本研究3.1で行った降水短時間予報の精度分析は全ての観測点を無差別に扱っており精密ではない。地理的特徴や季節変動といった他条件の考慮が望まれる。

加えて、本研究のフレームワークでは主体として予報発表者と警報発令者のみを想定している。しかし実際の警戒避難体制においては、避難行動をとる避難者の考慮が不可欠である。ここまでは避難者の避難行動と警報のインタラクションを想定しなかったが、繰り返しゲームといった枠組みで空振り警報と避難率の相互依存的関係を考慮することが必要だと考えられる。

謝辞

本研究は、「大規模災害に対する交通インフラのリスク管理学寄付講座 (JR 東日本)」の活動の一環として行われました。有用なご助言、示唆をくださった東京大学の家田仁教授、羽藤英二教授、鳩山紀一郎講師、柳沼秀樹特任助教、および本稿に丁寧なコメントを下された三名の査読者の皆様に感謝申し上げます。

参考文献

- Huggel, C., N. Khabarov, M. Obersteiner and M. Ramirez, J.: Implementation and integrated numerical modeling of a landslide early warning system: a pilot study in Colombia, *Natural hazards*, Vol. 52, No. 2, pp. 501-518, 2010.
- Lindell, K.M., C.S. Prater, R.W. Perry and J.Y.Wu: EMBLEM2: An empirically based large scale evacuation time estimate model, *Transportation research part A: policy and practice*, Vol. 42, No. 1, pp.140-154, 2008.
- Peng, M. and L. M. Zhang: Dynamic decision making for dam-break emergency management-Part 1: Theoretical framework, *Natural Hazards and Earth System Science*, Vol. 13, No. 2, pp.425-437, 2013.
- Regnier, E. and P. A. Harr: A dynamic decision model applied to hurricane landfall, *Weather and forecasting*, Vol. 21, No. 5, pp.764-780, 2006.
- Schröter, K., C. Velasco, S. Torres, D., P. Nachtnebel, H., B. Kahl, M. Beyene, C. Rubin, and M. Gocht: Effectiveness and Efficiency of Early Warning Systems for Flash Floods, *CRUE Research Report No I-5*, 2008.
- 気象庁気象研究所, メソスケール気象予測の改善と防災気象情報の高度化に関する研究 研究計画, <http://www.mri-jma.go.jp/Research/project/H27/plans/A1.pdf>, 2014, 2016年1月23日
- 気象庁予報部: 平成26年度予報技術研修テキスト, 量的予報技術資料第20号, 2015
- 久保田哲也・大槻恭一: インターネット降水短時間予報情報の山地実測雨量との誤差, *新砂防*, Vol. 60, No. 5, pp.31-38, 2008.
- 岡本 敦・他: 土砂災害警戒避難に関するデータ解析共同研究, 国総研資料第682号, 2012.
- 寺田秀樹・中谷洋明: 土砂災害警戒避難基準雨量の設定方法, 国総研資料第5号, 2001.

- 中谷洋明：警戒避難の意思決定と降雨の量的予測精度，新砂防，Vol. 55, No. 4, pp.23-28, 2002.
- 中谷洋明：風水害時の自治体の警戒避難活動のコスト・ロス構造，新砂防，Vol. 57, No. 1, pp.13-19, 2004.
- 武田悦寿・桜井 亘・山内 健・小松雄二：高知県における土砂災害警戒情報運用の取り組み，新砂防，Vol. 60, No. 6, pp.52-55, 2008.
- 矢野勝太郎：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，新砂防，Vol. 43, No. 4, pp.3-13, 1990.
- 鈴木雅一・小橋澄治：がけ崩れ発生と降雨の関係について，新砂防，Vol. 121, pp.16-26, 1981.
- 和田一範・川崎将生・富澤洋介：河川の高水管理における予測降雨情報の適用性に関する考察，水文・水資源学会誌，Vol. 18, No. 6, pp.703-709, 2005.
- (投稿受理：平成28年4月7日
訂正稿受理：平成28年7月11日)

要 旨

近年，甚大な人的被害を伴う土砂災害が多発している。降雨の観測・予測技術は大きく改良され続けているにも関わらず，現状の警戒避難体制では多くの自治体で避難勧告発令は総合的判断という定性的プロセスに依存している。

本研究の目的は，量的降水予報の不確実性や警戒避難のコスト，リードタイムと情報の正確性のトレードオフを考慮した土砂災害警報基準の提案である。提案基準を評価するために，2014年8月の広島観測所における雨量値と降水短時間予報を用いて提案基準に基づく警報をシミュレートし，この警報を捕捉率・誤警報率・リードタイムの観点から分析した。また，今後の降水予測の技術進展が警報にもたらす影響を検討するために，仮想的な予報精度改善の設定から生成した降水短時間予報を用いて提案警報のシミュレーションと評価を行った。以上より，提案した土砂災害警報基準が2014年広島のケースにおいて有効であること，また，特に降水の短時間予報の精度向上が避難警報に資すると考えられることを示した。