

参考資料

1. 短時間降雨予測の活用
2. B案におけるEL・WLの線形誘導
3. 提言案におけるEL・WLの線形誘導と留意点

1. 短時間降雨予測の活用¹⁾

1.1 短時間降雨予測活用の必要性

現時点では、土石流発生危険基準線(CL)をもとに、警報の発令を行うための警戒基準雨量線(WL)及び避難を指示するための避難基準雨量線(EL)を設定する際に、既往最大1時間雨量などを用いる場合が多いため、空振り率が多くなるという問題がある(図-1)。また、その一方で、既往最大を上回る降雨がある場合に対応できないという問題がある(図-2)。

これらの問題を改善し、かつ避難行動を起こすための時間的な余裕を確保するためには、短時間降雨予測を活用することが有効であると考えられる。

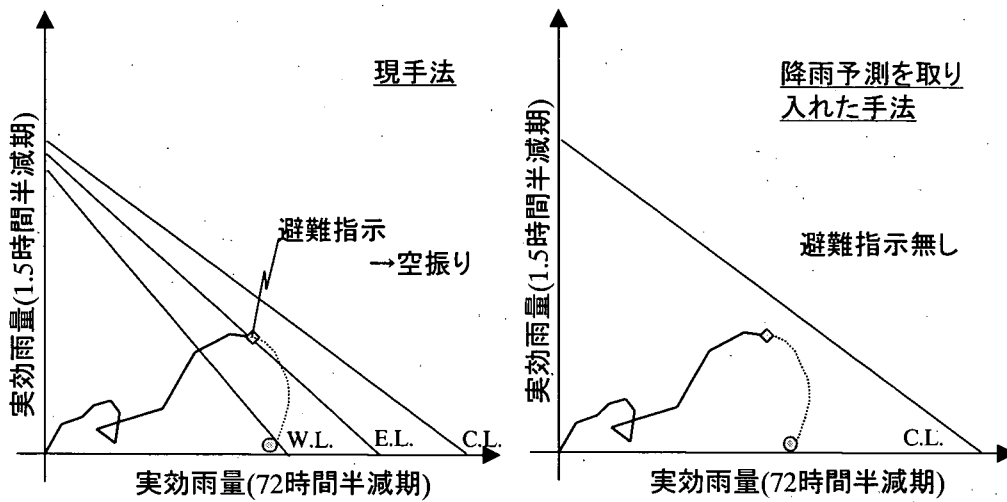


図-1 現手法では避難指示が空振りに終わる場合

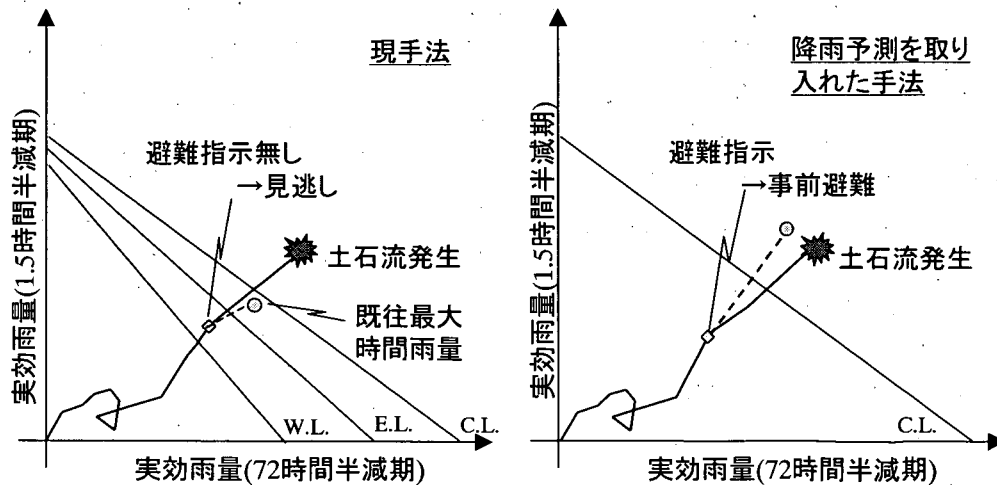


図-2 現手法では避難が失敗に終わる場合

1.2 都道府県における実用例

全国の都道府県の中には、すでに、先行的に降雨予測を取り入れている府県がある²⁾。平成13年6月時点で短時間降雨予測を活用している都道府県について、活用している短時間降雨予測の概要を表-1にまとめた。

表-1 短時間降雨予測を取り入れている府県での活用事例

都道府県	予測手法	運用開始年	空間分解能	更新頻度	予測時間	特記事項
愛知県	運動学的手法	平成11年	2.5kmメッシュ	10分間	3時間	
鹿児島県	運動学的手法	平成13年	5kmメッシュ	1時間	3時間	
京都府	運動学的手法	平成13年	5.5kmメッシュ	1時間	2時間	
静岡県	気象力学的手法	平成13年	2.5kmメッシュ (1kmメッシュ) ^{#1}	10分間	2時間	#1: 大粒レーダーの運用範囲内に限る
和歌山県	運動学的手法	平成8年	5.5kmメッシュ	1時間	3時間	現在2.5kmメッシュ、10分更新、3時間予測の導入を検討中

多くの府県で採用されている降雨予測手法は、これまでも運用実績の豊富な運動学的手法と呼ばれているものであるが、一部の県では、より進んだ気象力学的な降雨予測手法をすでに取り入れているところもある。運動学的手法とは、雨域をレーダー雨量情報によって連続的にとらえ、外挿計算によって降雨予測をするものである。レーダー雨量情報と、地上雨量データがあれば、予測を行うことができるため実用的であるが、外挿が基本であることから突発的に発生する局地豪雨には対応できない。それに対して、気象力学的手法は、運動方程式、連続式、熱力学方程式に基づいて予測を行うため、突発的な局地豪雨についても予測が可能である。しかし、決定すべきパラメータが多く、方程式を解くための初期値として、極めて多くの気象データを必要とする。今後、リモートセンシング技術等の向上により、各種初期値データの取得が容易になれば、気象力学的な手法が主流となって行くものと考えられる。ここでは、短時間降雨予測を取り入れている府県の内のほとんどが採用しており、現在の主流でもある。運動学的手法に基づく短時間降雨予測情報のうち、最近になって実運用され始めたより時間、空間精度の高い10分間更新短時間降雨予測情報のスネークライン作成への適用性を示す。

1.3 短時間降雨予測手法の概要

ここで、検討対象とした運動学的手法による短時間降雨予測手法は、レーダ情報を運動学的手法によって外挿し雨域の発達・収束を反映させることを基本としている。レーダデータはあくまでも上空の降水エコーのみを観測しているものであることから、エコー強度のみによる降水強度と実際の降雨量との間には差異が生ずることがある。そこで降雨量の計算に際しては、レーダ雨量情報を実際の降雨観測データによって補正してから外挿計算を行っている。従来の短時間降雨予測では、5.5kmメッシュ、1時間(正時)毎の予測が提供されていたが、現在では、気象庁のAMeDAS観測データのみならず、国土交通省や各自治体のテレメータデータも用いることにより、2.5kmメッシュ、10分間毎の予測データが提供されるようになっている。本報の検討ではこの2.5kmメッシュ、10分間雨量予測降雨情報(10分間雨量ベース)を用いた。以下では、従来の短時間降雨予測を、1時間更新短時間降雨予測と呼ぶのに対し、最近のものを10分間更新短時間降雨予測と呼ぶこととする。

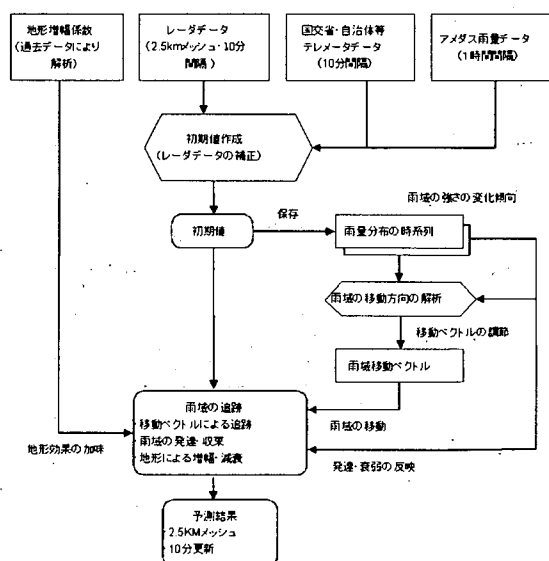


図-3 運動学的手法による短時間降雨予測の例

表-2 降雨予測情報を適用した過去の土砂災害事例

災害名	発生期日	気象現象の空間 スケール	一雨降水量 (mm)	一雨継続時間 (時間)	気象特性
佐渡島災害 ³⁾	1998年8月4日	数10km ²	270	15	梅雨前線停滞による梅雨 末期特有の集中豪雨
栃木・福島災害 ⁴⁾	1998年8月29日	数10~100km ²	1254	132	南方の熱帯擾乱から停滞 前線が刺激された豪雨
広島災害 ⁵⁾	1999年6月29日	数10km ²	186.5	18	梅雨前線停滞による梅雨 末期特有の集中豪雨
三重県藤原岳災害 ⁶⁾	1999年8月19日	数km ²	52	1	典型的な夏場の大気不安 定による局所的豪雨
東海(恵南)災害 ⁷⁾	2000年9月11~ 12日	数10~100km ²	567	39	南方の熱帯擾乱から停滞 前線が刺激された豪雨

1.4 土砂災害への適用

短時間降雨予測の土砂災害への適用性を検討するために、最近の事例の内から、降雨規模の異なる 5 つの事例について、実際に予測情報を適用し、その適用性を検討した。

1.4.1 適用対象土砂災害

表-2 に 10 分間更新短時間降雨予測情報を適用した災害の一覧を示す。どれも、甚大な被害をもたらした災害であるが、栃木・福島災害及び東海豪雨は 24 時間降水量が 500mm を超過する雨量を観測した地点があるなど降雨の規模が時間的にも空間的にも大きいのが特徴である。一方、藤原岳災害時の降雨は、災害発生地点から数 km 程度離れたアメダス観測所では、災害発生時に降雨がほとんど観測されておらず、非常に局所的な豪雨であった。

1.4.2 降雨分布の予測状況

図-4 および図-5 に、栃木・福島災害時の 10 分間更新短時間降雨予測結果を、広域図(図-4)および土砂災害発生地点周辺の拡大図(図-5)として示す。

広域図において、例えば栃木県付近に南西方向から北東方向へのびている雨域は、60 分前の予測図(図-4 右下)においてほぼ予測されていることがわかる。しかし、局所的に拡大して見ると、実況と予測値の雨域の分布状況にはいくらか違いがあることも分かる(図-5)。したがって、ある地点において、降雨を

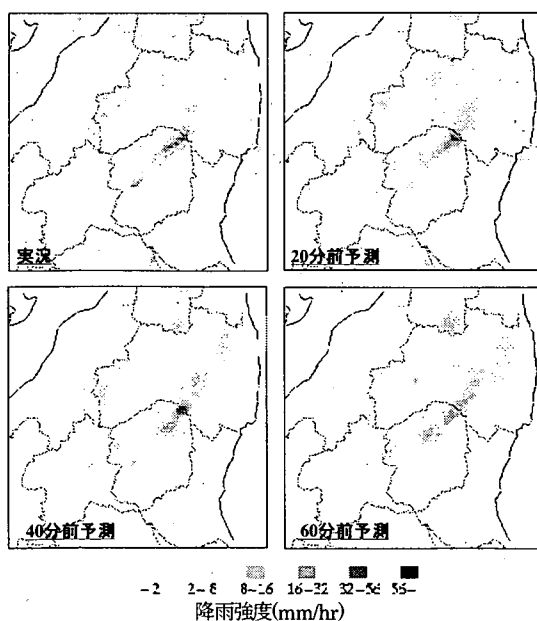


図-4 栃木福島災害時の予測状況(広域図)
(1998年8月27日4:30)

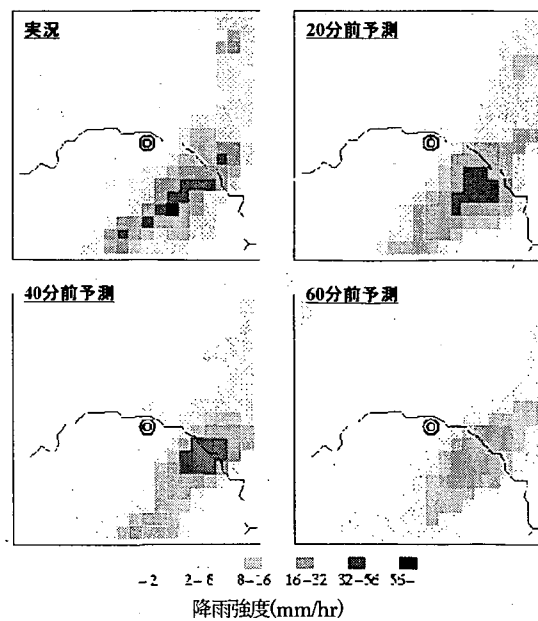


図-5 栃木福島災害時の予測状況(拡大図)
(1998年8月27日4:30)

予測する場合には、該当メッシュと、その周囲の隣接する8メッシュを加えた9メッシュの平均をとる等の処理をする必要がある。以下、降雨予測値は、該当メッシュを含む9メッシュの平均値を用いることとする。

1.4.3 10分間雨量の予測

10分間更新短時間降雨予測の精度を検討するために、実際の10分間雨量と、10分間更新短時間降雨予測の内60分前の時点での予測値(10分間雨量)の比較を行った。例を図-6に示す。図-6を見ると、実測値と予測値の適合度は低く、予測精度は高くない。しかし、降雨強度の増減の傾向は類似しており、この図において、予測値を10分後ろにずらせば、実測と予測の降雨のピークが一致し、予測の適合度がある程度は向上することが期待される。このように、10分間降雨量を対象とした予測は、10分間程度の時間的ずれを許容できない場合は、予測精度が悪いと評価されることがあり得る。しかしながら、もっと時間刻みの長い雨量を対象とすれば、時間的な変動が平均化され、予測の精度は向上するものと考えられる。

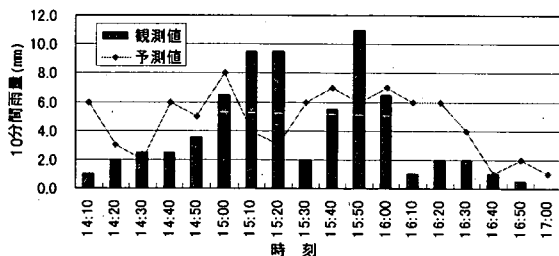


図-6 10分間更新短時間降雨予測(60分前予測)と実測値の比較(1999年6月29日、広島市可部)

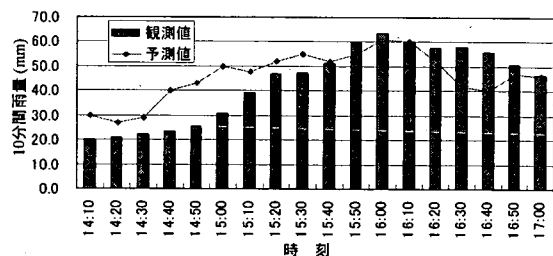


図-7 10分間更新短時間降雨予測値(60分前予測)と実測値による1.5時間半減期の実効雨量の比較(1999年6月29日、広島市可部)

1.4.4 実効雨量の予測

本編で述べられているように、スネークラインを描く際の短期雨量指標、長期雨量指標の取り方には複数の方法があるが、いずれも、時間単位の雨量や時間単位に半減期をもつ実効雨量として表現される。例えば、総合土砂災害対策検討会による提言⁹⁾においては、短期指標および長期指標は、それぞれ、1.5時間および72時間半減期の実効雨量として表されている。ここでは、短時間降雨予測情報の精度の影響を強く受ける短期指標である1.5時間半減期の実効雨量について検討することとする。

既に本編の3.4.2節(2)に降雨指標の定義式が示されているが、本編における式は、数式中の文字の時刻標記を、「i時間前」等のように、相対的に標記する形式を取っている。このような形式は、過去の雨量データのみを取り扱う場合は都合がよいが、ここで述べるような予測雨量という未来の値を扱う場合に混乱を招きやすい。そこで、本節では、数式中のパラメータは絶対時刻によって標記し、降雨指標の定義式の標記を下記式(1)のように改めた。なお、この式は本編の定義式と等しい。

$$R_t = \alpha \cdot R_{t-1\text{時間}} + r_t$$

$$R_0 = 0 \quad \dots\dots(1)$$

- R_t : 時刻 t における実効雨量
- α : 1時間毎の減少係数 $= (0.5)^{1/T}$
- T : 半減期 $(= 1.5\text{時間})$
- r_t : 時刻 t における時間雨量

まず、図-6に示したものと同一降雨に対して、実測値と降雨予測値による1.5時間半減期の実効雨量を計算し、比較を行った(図-7)。この図において、棒グラフは実測値を表し、折れ線は予測値を表す。予測値のグラフの各点は、その時刻から60分遡った時点における60分後予測の結果である。この図の

前半部分では、大きくずれているが、ピーク前後からよく合致していることが分かる。これにより降雨量を実効雨量化することによって、利用上の予測精度は高まることがわかる。

次に、表-2 に示す各災害において、10 分間更新短時間降雨予測によって、どの程度先まで、精度良く実効雨量を予測することが可能か検討を行う。図-8 に、各災害事例における、実測および予測に基づく実効雨量(1.5 時間半減期)の予測時間(τ)の長時間化に伴う相関係数の変化を示した。予測時間毎の相関係数は、実測値に基づく実効雨量(R_m)と予測値に基づく実効雨量(R_f)の時系列データ同士の相関をとることによって求めた。

実測値に基づく実効雨量(R_m)は、10 分毎に式(1)によって計算した。ただし、式(1)は、時間雨量データの時系列に対して使用するよう定められているので、実効雨量を求めようとする時刻から 60 分ずつ遡り、10 分雨量の時系列データを 60 分雨量のものに区切り直した上で、式(1)に適用した。

ある予測時間 τ の 10 分間更新短時間降雨予測値に基づく実効雨量(R_f)もまた、10 分毎に式(1)によって求めた。ただし、10 分間更新短時間降雨予測値を用いるのは、予測を行う時刻から後についてのみであり、前については、実測雨量を用いた。例えば、8:20 を予測の起点時刻とした場合の予測時間 30 分後(8:50)の予測実効雨量の求め方を以下に示す。

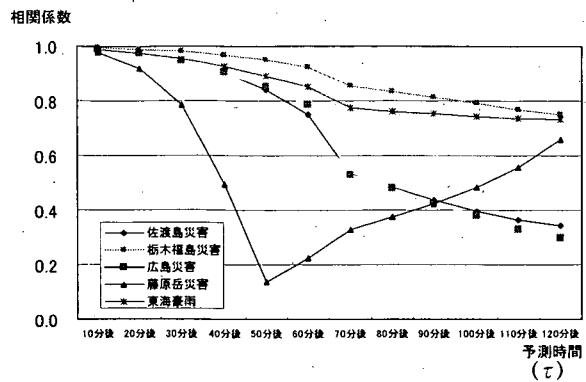


図-8 半減期 1.5 時間の 10 分間更新短時間降雨予測による実効雨量と実測値による実効雨量との予測時間別相関係数

$$R_{f, 8:50} = \alpha R_{m, 7:50} + r_{f, 8:50} \\ = \alpha R_{m, 7:50} + r_{m, 10min, 8:00} + r_{m, 10min, 8:10} + r_{m, 10min, 8:20} + r_{f, 10min, 8:30} + r_{f, 10min, 8:40} + r_{f, 10min, 8:50} \quad \dots(2)$$

ここで、 $r_{10min, t}$ は時刻 t における 10 分間雨量、であり、添え字の m, f は、それぞれ、実測値であるか予測値であるかを示す。

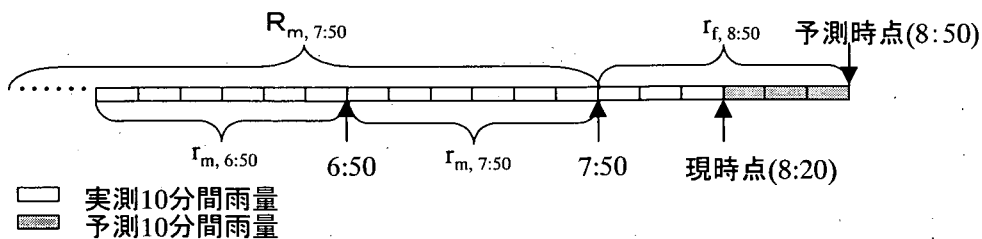


図-9 予測実効雨量の求め方の例

図-8 より、降雨規模が大きかった栃木・福島災害や東海豪雨では 120 分後の予測における相関係数が 0.8 近くに達しているのに対し、不安定性降雨で極めて局所的な降雨であった三重県藤原岳災害の相関係数は、40 分後、50 分後になると急激に低下していることがわかる。なお、藤原岳災害において、50 分後以降の予測で相関係数が増加している。これは、災害発生時 60 分以上前には別の降雨系が存在し、この降雨系が 1 時間前後継続して、災害発生時刻前後に災害発生地点近傍に降雨をもたらすと予測していたため結果的に予測精度が向上したものである。本質的に災害時の降雨を予測していたものではない。また、降雨規模がこれらの中間に位置付けられる広島災害と佐渡島災害では、予測時間 60 分までは、栃木・福島災害等とほぼ同等の相関を有するが、60 分を過ぎると急に相関が悪化している。降雨の規模が大きいくほど、より先の予測が可能だが、現象が小さくなるほど、先の予測が困難となることが分かる。

この降雨予測法が外挿手法をベースとしているため、基本的に降雨現象のライフタイム⁹⁾を超えて予測することは不可能である。したがって、ライフタイムが長い空間スケールの大きな降雨現象ではかなり先まで降雨予測が可能であるが、ライフタイムの短い空間スケールの小さな降雨現象では予測が難しいものと考えられる。

1.4.5 スネークラインへの適用

表-2に掲げた土砂災害事例の内、広島災害と三重県藤原岳災害について実際にスネークラインを作成し、従来の1時間更新短時間降雨予測情報と10分間更新短時間降雨予測情報を適用することにより、その活用方法について検討した。

広島災害と三重県藤原岳災害について、短期雨量指標を1.5時間半減期実効雨量とし、長期降雨指標を72時間半減期実効雨量としてスネークラインを作成し、図-10～13に示した。実効雨量は式(1)によって求めた。

各図とも◆印は災害発生時刻の実効雨量を表す。どちらの場合も、土石流が発生して災害をもたらした例である。実線は観測値によるスネークライン、破線は予測値によるスネークラインを表す。ここでは、時間雨量を元にした毎正時更新の短時間降雨予測情報によるスネークライン(図-10, 12)と、10分間雨量を元にした10分間更新短時間降雨予測情報によるスネークライン(図-11, 13)に分けて示し、両者の予測能力の違いを検討する。なお、実況の実効雨量は、式(1)を適用して求めることとし、1時間後予測、2時間後予測の実効雨量については以下の式(3-1)、(3-2)によって求めた。

$$R_{t, (t+1時間)} = \alpha \cdot R_{n, t} + r_{t, (t+1時間)} \quad \dots\dots(3-1)$$

$$R_{t, (t+2時間)} = \alpha^2 \cdot R_{n, t} + \alpha \cdot r_{t, (t+1時間)} + r_{t, (t+2時間)} \quad \dots\dots(3-2)$$

図-10は、広島災害時の広島市可部における実測時間雨量に基づくスネークラインと短時間降雨予測値に基づくスネークラインを比較した図である。災害発生20分前の15:00初期値の1時間後予測値は災害発生以上の降雨を予測しており、15:00の時点では災害発生規模の降雨が1時間以内に発生することを把握できる状況にある。しかしながら災害発生1時間20分前の14:00初期値の2時間後予測値は、災害発生水準まで予測値が達しておらず、この時点では2時間以内に災害発生規模の降雨が発生することを把握できない。

次に、同じく広島災害について、10分間更新短時間降雨予測値に基づいて1時間先および2時間先の予測実効雨量を求めた場合に、いつの時点で、災害発生規模の降雨を予測できるかを検討した。

検討方法は以下の通りである。14:00から、10分間毎に、順次10分間更新短時間降雨予測に基づく予測時間1時間および2時間の予測実効雨量(R_p)を計算する。そして、これらの予測実効雨量を、災害発生時の1.5時間および72時間半減期実効雨量と比較し、その両方を初めて超過する時刻を求めた。

その結果、予測時間2時間の予測実効雨量は、12:50に、予測時間1時間の予測実効雨量は、14:20に災害発生規模の実効雨量を超過したことが明らかになった(図-11)。すなわち、予測情報の伝達等にかかる時間を考えなければ、実際の災害発生(15:20)よりも150分前に警戒体制をとり、60分前に避難体制を取ることが可能であったことを意味する。これは、情報更新頻度の違いと、10分間更新降雨予測の予測能力が高いことに起因するものと考えられる。

一方、藤原岳災害時の短時間降雨予測は、災害発生50分前の17:00においても降雨強度が増大傾向に転ずることを予測していなかった(図-12)。10分間更新短時間降雨予測も、17:00においては、短時間降雨予測同様に予測をはずしていた(図-13)。この事例から、この予測手法によって藤原岳災害のような不安定性突発型の豪雨を60分以上前から予測することは困難であることがわかる。しかし、情報更新頻度が高いため、10分間毎に更新される実況データによって、時々刻々と降雨量が災害発生規模に近づくことを把握することはできる。

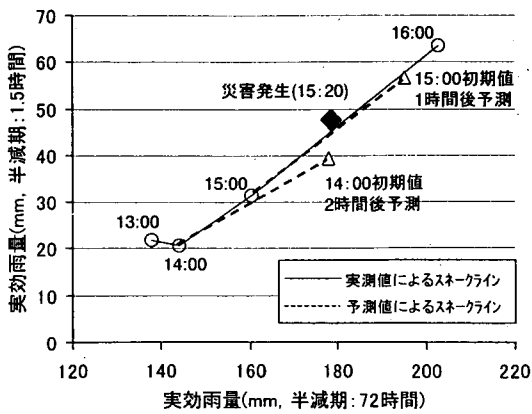


図-10 広島災害時の60分更新短時間降雨予測によるスネークライン

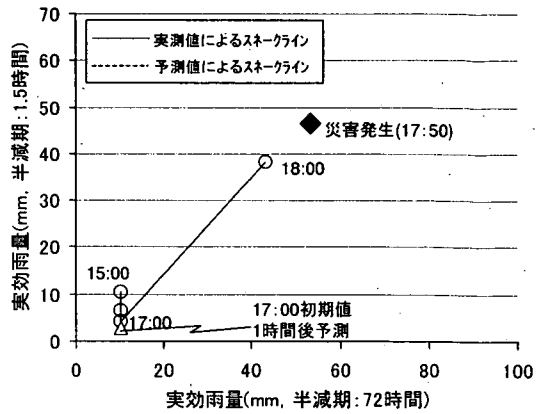


図-12 藤原岳災害時の60分更新短時間降雨予測によるスネークライン

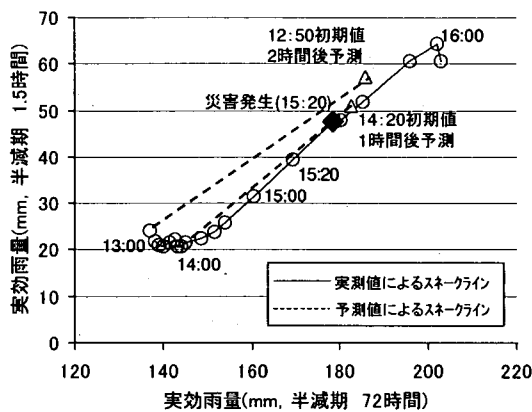


図-11 広島災害時の10分間更新短時間降雨予測によるスネークライン

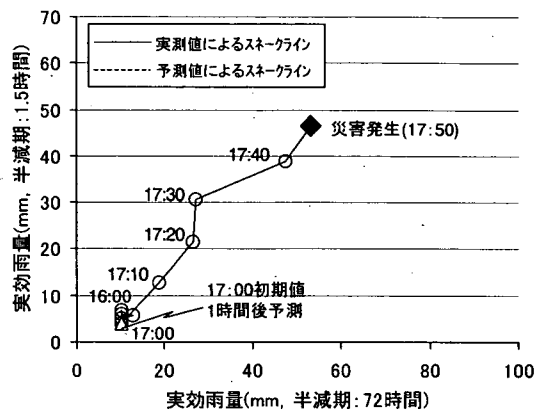


図-13 藤原岳災害時の10分間更新短時間降雨予測によるスネークライン

1.5 まとめ

近年発生した土砂災害に、10分間更新短時間降雨予測情報を適用し、降雨予測情報の活用方法および適用限界について検討した結果、以下の知見が明らかになった。

- (1) 時空間的に規模の大きな降雨（数10km²〜）に対しては、10分間更新短時間降雨予測に基づく予測実効雨量は1時間程度先まで、実測値に基づく実効雨量との相関が高い。
- (2) 10分間更新短時間降雨予測の10分間雨量予測値の予測精度は低いですが、通常、土砂災害発生予測に用いられる降雨指標は時間単位であるため、時間的な誤差が吸収されるので利用上大きな障害にはならない。
- (3) 広島土砂災害の事例に適用したところ、60分間更新短時間降雨予測よりも、10分間更新短時間降雨予測の方が早く災害発生規模の降雨を予測することが可能であった。これは、情報更新頻度が高く、予測精度が良いためであると考えられる。
- (4) 予測手法が基本的に外挿手法である短時間降雨予測手法では、三重県藤原岳災害をもたらしたような、突発性の不安定性局地豪雨を予測することは難しい。しかし、10分間更新短時間降雨予測であれば、実況雨量情報が10分毎に更新されるため、時々刻々と降雨量が災害発生規模に近づくことを把握することはできる。

これらの知見より、10分間更新短時間降雨予測による土砂災害対策への適用性がある程度示されたといえる。広域にわたる大規模豪雨に対しては、良好な予測情報をもたらす、従来の60分間更新予測情報

報よりも早期の警戒避難を可能にすることが示された。しかし、藤原岳災害のような突発的な不安定性局地豪雨の予測は困難であった。実際に、短時間降雨予測情報を取り入れて、警戒避難システムを構築する際には、予測情報が絶対ではないことに十分に留意して運用しなくてはならない。

参考文献

- 1) 山越隆雄・山田 孝・仲野公章・渡 正昭：10 分間更新短時間降雨予測の土砂災害警戒避難への適用，土木技術資料，Vol.43, No.11, pp.26-31, 2001
- 2) 友村光秀・堀内成郎・岸岡正哲・水山高久：降雨予測情報を用いた土砂災害発生予測システムの開発事例，平成13 年度砂防学会発表概要集，p.198-199, 2001
- 3) 瀬尾克美・原口勝則・高橋幸彦：平成10 年8 月4 日新潟県佐渡地方の土砂災害における地元住民の対応と教訓，砂防学会誌，Vol.52, No.1, p.35-40, 1999
- 4) 牛山素行：1998 年8 月26 日～31 日に栃木・福島県で発生した豪雨災害の特徴，自然災害科学，Vol.17, No.3, p.237-243, 1998
- 5) 例えば，(財)砂防・地すべり技術センター：平成11 年広島県土砂災害調査報告，SABO，Vol.63, p.42-51, 1999
- 6) 牛山素行・林 拙郎・川邊 洋・粟飯原篤史：1999 年8 月19 日三重県員弁郡藤原町で発生した土石流，砂防学会誌，Vol.53, No.3, p.30-36, 2000
- 7) 例えば，吉谷純一・古本一司・山田 孝・石田哲也・山越隆雄・浅井健一・柳原幸希：平成12 年9 月10 日からの秋雨前線豪雨による洪水・土砂災害報告，土木技術資料，Vol.42, No.12, p.2-5, 2000
- 8) 建設省河川局砂防部：総合土砂災害対策検討会における提言および検討結果，1993
- 9) Orlandi, I. : A rational subdivision of scales for atmospheric processes, Bull. Am. Meteorological Soc., Vol.56, No.5, 19

2. B案におけるEL・WLの線形誘導

《ELの線形誘導》

図1において、CL上の任意の点をP (R_p , I_p)、既往最大1時間雨量を R_{HIM} とする。点Pに達する前1時間の位置をP' ($R_{p'}$, $I_{p'}$) とすると、点P'はEL上の点となる。図2は点P'を通り、点Pに達した一連の降雨について、「積算雨量-時間」の関係を示したものである。

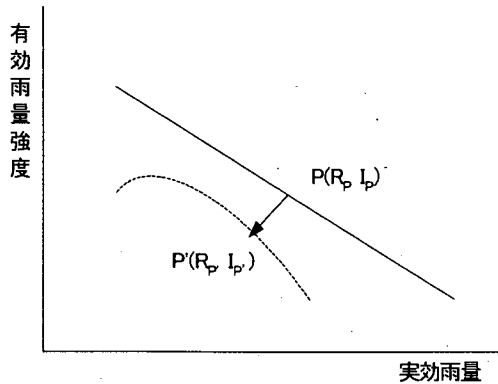


図1 避難基準線の設定

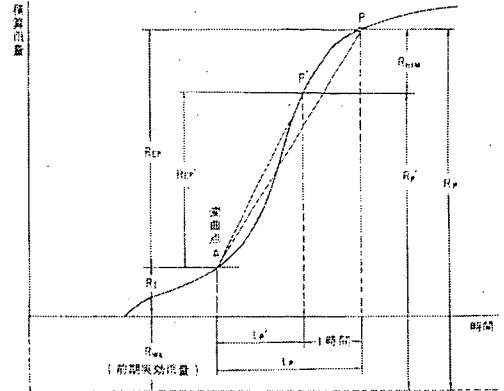


図2 時間-積算雨量関係

以上より、 $R_{p'}$ は、

$$R_{p'} = R_p - R_{HIM} \quad (1)$$

$I_{p'}$ は、

$$I_{p'} = \frac{R_{EP'}}{t_{p'}} = \frac{R_{EP} - R_{HIM}}{t_p - 1} \quad (2)$$

R_{EP} は、

$$R_{EP} = R_p - (R_{WA} + R_I) \quad (3)$$

となる。ここで、

$$I_p = \frac{R_{EP}}{t_p} \quad (4)$$

であるから、(4)式に(3)式を代入して、

$$t_p = \frac{R_{EP}}{I_p} = \frac{R_p - (R_{WA} + R_I)}{I_p} \quad (5)$$

また、(3)式と(5)式を(2)式に代入すると、

$$I_{p'} = \frac{R_p - (R_{WA} + R_I) - R_{HIM}}{\frac{R_p - (R_{WA} + R_I)}{I_p} - 1} \quad (6)$$

となる。一般的には R_{WA} 、 R_I の値は未知であることが多く、 R_p に比べてかなり小さな値をとる。そこで、 $R_{WA} + R_I \approx 0$ とすると、(6)式は近似的に、

$$I_{P'} = \frac{R_P - R_{H1M}}{\frac{R_P}{I_P} - 1} = \frac{(R_P - R_{H1M})I_P}{R_P - I_P} \quad (7)$$

と表される。

CLの方程式を、

$$Y = aX + b \quad (a, b \text{ は定数}) \quad (8)$$

Y : 有効降雨強度

X : 実効雨量

とすると、CL上の点P (R_P, I_P) に対して1時間前の点P' ($R_{P'}, I_{P'}$) は、(1)式と(7)式を(8)式に代入し、 R_P, I_P を消去して、

$$I_{P'} = \frac{a(R_{P'})^2 + (b + aR_{H1M})R_{P'}}{(1-a)R_{P'} + (1-a)R_{H1M} - b} \quad (9)$$

となり、避難基準線の一般式は、

$$Y = \frac{aX^2 + (b + aR_{H1M})X}{(1-a)X + (1-a)R_{H1M} - b} \quad (10)$$

と示される。

《WLの線形誘導》

ELの設定と同様に、CL上の任意の点をP (R_P, I_P)、既往最大2時間雨量を R_{H2M} とする。点Pに達する前2時間の位置をP'' ($R_{P''}, I_{P''}$) とすると、 $I_{P''}$ は以下のように表される。

$$I_{P''} = \frac{a(R_{P''})^2 + (b + aR_{H2M})R_{P''}}{(1-2a)R_{P''} + (1-2a)R_{H2M} - 2b}$$

となり、警戒基準線の一般式は、

$$Y = \frac{aX^2 + (b + aR_{H2M})X}{(1-2a)X + (1-2a)R_{H2M} - 2b}$$

なる。

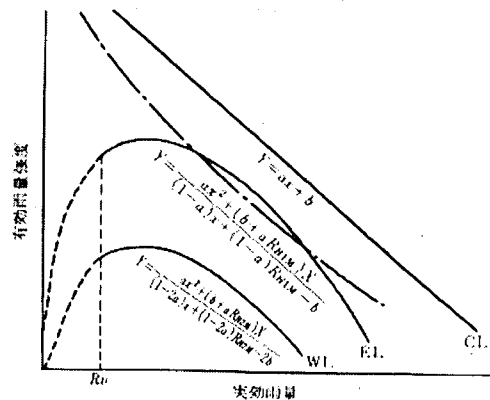


図3 避難基準線・警戒基準線の一般式

3. 提言案における EL、WL の線形誘導と留意点

《EL, WL の線形誘導》

EL, WL の線形は、CL をもとに以下のように導かれる。なお、簡便には CL に平行な線とすることも考えられる。

半減期 72 時間実効雨量を X 軸、半減期 1.5 時間の実効雨量を Y 軸にとり、実効雨量がそれぞれ X_0 、 Y_0 であり、次の 1 時間の想定雨量 R で CL に達するとすれば、1 時間後の降雨 X_1 、 Y_1 には次の CL が成立する。

$$Y_1 = aX_1 + b \quad (1)$$

また、実効雨量の定義より

$$X_1 = (0.5)^{1/7.2} X_0 + R = k_1 X_0 + R \quad (2)$$

$$Y_1 = (0.5)^{1/1.5} Y_0 + R = k_2 Y_0 + R \quad (3)$$

逆に CL に到達する 1 時間前の X_0 、 Y_0 は、(1)式に(2)式および(3)式を代入して、

$$Y_0 = a(k_1/k_2)X_0 + (b + (a-1)R)/k_2 \quad (4)$$

となる。

よって、避難に必要な時間（1 時間）内の想定雨量を R とする EL の一般式は、

$$Y = a(k_1/k_2)X + (b + (a-1)R)/k_2 \quad (5)$$

$$k_1 = (0.5)^{1/7.2}, \quad k_2 = (0.5)^{1/1.5} \quad (6)$$

となる。

仮に、CL ラインの傾きを -1 にした場合の EL は次式のように表される。

$$Y = -(k_1/k_2)X + (b - 2R)/k_2$$

$$Y = -1.572X + 1.587b - 3.175R$$

また、WL については CL から EL を求めた場合と同様に、避難の準備に必要な時間（1 時間）内の想定雨量を R' として、EL に達する 1 時間前の位置を示す以下の一般式が得られる。

$$Y = a(k_1/k_2)^2 X + (b + (a-1)R + (k_1 a - k_2)R')/k_2^2 \quad (7)$$

仮に、CL ラインの傾きを -1 にした場合の WL は次式のように表される。

$$Y = -(k_1/k_2)^2 X + (b - 2R - (k_1 + k_2)R')/k_2^2$$

$$Y = -2.472X + 2.520b - 5.040R - 4.083R'$$

《EL,WL の逆転現象》

EL,WL を CL より逆算的に求めて設定する場合、CL より引き戻す想定雨量（確率雨量等）が小さいとき図4のように基準線が逆転する場合がある。

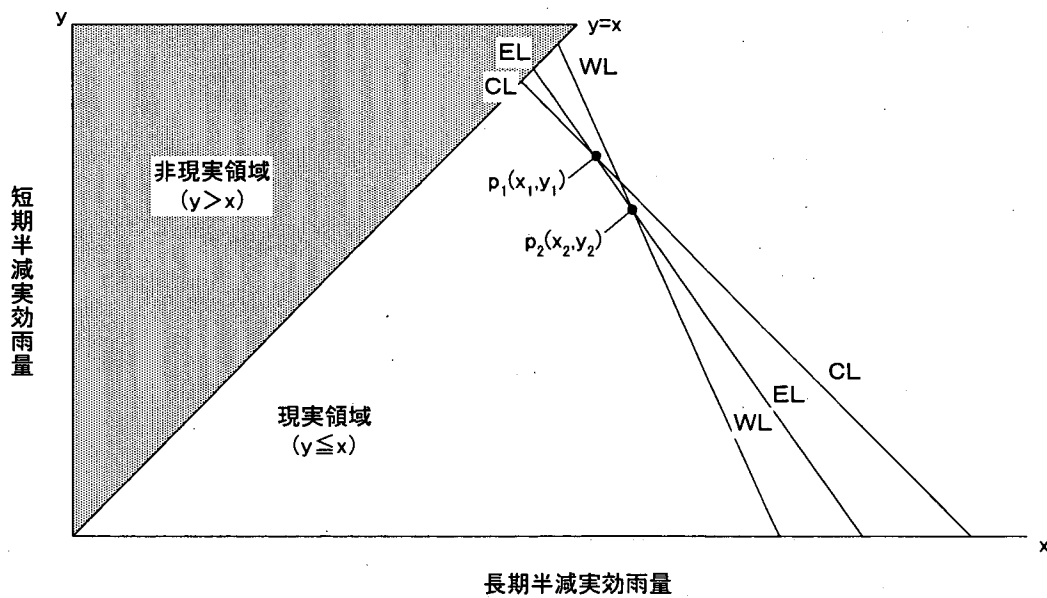


図4 基準線の逆転現象

上図のような基準線の逆転を起こさないためには、現実領域で常に基準線の縦軸値が $CL \geq EL \geq WL$ となるような、想定雨量 (R_1 または R_2) の範囲を求めておく必要がある。

● R_1 の適正範囲

CL と EL の交点を $P_1(x_1, y_1)$ とし、CL、EL の式を設定手法に基づき、

$$CL : y = ax + b$$

$$EL : y = a(k_1/k_2)x + (b + (a-1)R_1)/k_2$$

ただし、 $k_1 = 0.5^{1/T_1}$ 、 $k_2 = 0.5^{1/T_2}$ (T_1 : 長期半減期(h)、 T_2 : 短期半減期(h)、 $T_1 > T_2 > 0$)

とすると、CL と EL の交点 P_1 は、次の(8),(9)式を解くことにより求められる。

$$y_1 = ax_1 + b \quad (8)$$

$$y_1 = a(k_1/k_2)x_1 + (b + (a-1)R_1)/k_2 \quad (9)$$

(8),(9)式を解くと、

$$x_1 = \frac{a-1}{a(k_2-k_1)} R_1 + \frac{1-k_2}{a(k_2-k_1)} b$$

$$y_1 = \frac{a-1}{k_2-k_1} R_1 + \frac{1-k_1}{k_2-k_1} b$$

となる。

ここで、現実領域において CL と EL が逆転しないためには、(10)式が成立する必要がある。

$$\frac{a-1}{a(k_2-k_1)} R_1 + \frac{1-k_2}{a(k_2-k_1)} b \geq \frac{a-1}{k_2-k_1} R_1 + \frac{1-k_1}{k_2-k_1} b \dots\dots (10)$$

これを解くと、

$$R_1 \geq \frac{(ak_1-k_2-a+1)b}{(a-1)^2} \quad (11)$$

となり、(11)式が R_1 の適正範囲となる。

したがって、EL を設定する場合には、想定雨量が(11)式を下回らないようにする必要がある。

● R_2 の適正範囲

同様に、EL と WL が逆転しない R_2 の範囲を計算する。

EL と WL の交点を $P_2 (x_2, y_2)$ とし、EL、WL の式を設定手法に基づき、

$$EL : y = a(k_1/k_2)x + (b + (a-1)R_1)/k_2$$

$$WL : y = a(k_1/k_2)^2 x + (b + (a-1)R_1 + (k_1 a - k_2)R_2)/k_2^2$$

ただし、 $k_1 = 0.5^{1/T_1}$ 、 $k_2 = 0.5^{1/T_2}$ (T_1 : 長期半減期(h)、 T_2 : 短期半減期(h)、 $T_1 > T_2 > 0$) とすると、EL と WL の交点 P_2 は、次の(12),(13)式を解くことにより求められる。

$$y_2 = a(k_1/k_2)x_2 + (b + (a-1)R_1)/k_2 \dots\dots (12)$$

$$y_2 = a(k_1/k_2)^2 x_2 + (b + (a-1)R_1 + (k_1 a - k_2)R_2)/k_2^2 \dots\dots (13)$$

(12),(13)式を解くと、

$$x_2 = \frac{(1-k_2)(a-1)R_1 + (1-k_2)b + (k_1 a - k_2)R_2}{ak_1(k_2-k_1)}$$

$$y_2 = \frac{1}{k_2} \left\{ \frac{(1-k_2)(a-1)R_1 + (1-k_2)b + (k_1 a - k_2)R_2}{k_2-k_1} + b + (a-1)R_1 \right\}$$

となる。

ここで、現実領域において EL と WL が逆転しないためには、(14)式が成立する必要がある。

$$\frac{(1-k_2)(a-1)R_1 + (1-k_2)b + (k_1 a - k_2)R_2}{ak_1(k_2-k_1)} \geq \frac{1}{k_2} \left\{ \frac{(1-k_2)(a-1)R_1 + (1-k_2)b + (k_1 a - k_2)R_2}{k_2-k_1} + b + (a-1)R_1 \right\} \quad (14)$$

これを解くと、

$$R_2 \geq \frac{\{(a-1)R_1 + b\} \{(1-k_2)k_2 - (1-k_1)ak_1\}}{(ak_1-k_2)^2} \quad (15)$$

となり、(15)式が R_2 の適正範囲となる。

したがって、WL を設定する場合には、想定雨量が(15)式を下回らないようにする必要がある。