

ISSN 1346 - 7328

国総研資料第 5 号

平成 13 年 9 月

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of
National Institute for Land and Infrastructure Management

No.5 September 2001

土砂災害警戒避難基準雨量の設定手法

危機管理技術研究センター砂防研究室

寺田 秀樹

中谷 洋明

Operating Methods of Critical Rainfall
for Warning and Evacuation from Sediment-Related Disasters

Hideki Terada

Hiroaki Nakaya

国土交通省 国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management,
Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Japan

土砂災害警戒避難基準雨量の設定手法

Operating Methods of Critical Rainfall for Warning and Evacuation from Sediment-Related Disasters

Erosion and Sediment Control Division

Head Hideki Terada

Researcher Hiroaki Nakaya

概要

土砂災害時の人的被害を減少させるために、ソフト対策の面から極めて重要である警戒避難基準雨量の設定及び運用方法を取りまとめた。過去四半世紀にわたり研究・開発された基準雨量に関するモデルの比較検討がなされている。また、運用事例を多数収録し、実務上の留意点を明らかにしている。

降雨予測を取り入れた最近の研究、使用事例を紹介し、警戒避難基準雨量の今後のあるべき姿についても論じた。

キーワード：警戒避難基準雨量、実効雨量、短時間降雨予測

Synopsis

Operating methods of Critical Rainfall for Warning and Evacuation from Sediment-Related Disasters(CRWESRD) are compiled in order to help reduce casualties due to sediment-related disasters, which has significant impacts as non-structural counter-measures. Major models investigated and developed in the past quarter century are compared; and practical examples are covered to provide cautionary points.

Recent studies and examples, incorporating rainfall prediction, are also introduced to argue how the future CRWESRD is to be.

keywords: Critical Rainfall for Warning and Evacuation, Effective Rainfall, Rainfall Prediction utilizing Frequent Measurement Update.

まえがき

土砂災害による人的被害を最小限に抑えるためには、ソフト対策としての警戒避難が必要不可欠である。災害対策基本法 60 条により、警戒避難指示の責務は市町村長となっている。そこで、市町村長が、いつ、どこで避難を開始させるかの判断を支援するために、警戒避難基準雨量の設定・運用がなされてきた。警戒避難基準雨量は、土石流・がけ崩れ発生を降雨状況から予知予測するための手法の 1 つであり、その有効性は研究及び実用上、実証されてきたと言える。

しかしながら、近年新たに災害をもたらした降雨データ等を取り入れ、警戒避難基準雨量の信頼性をより一層高めていくことが求められている。そこで、都道府県防災担当者が基準雨量を更新することを支援し、また、より先進的な設定手法、運用手法の普及を図るために、本資料を作成した。

本資料においては、最も基本的な基準雨量算定手法である「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)」(昭和 59 年)から始めて、総合土砂災害対策検討会による「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手法(案)」(平成 5 年)まで、現在各都道府県で使われている代表的な 4 手法を詳説するとともに、具体的な降雨による事例に基づいて、運用上の留意点を明らかにしている。これによって、基準雨量の更新時に、実務担当者が近年の降雨データ、崩壊データをより精度の高い警戒避難基準雨量設定に活かしていくことを支援するものである。

加えて、10 分間更新による新しい短時間予測雨量の活用方法についても具体的な導入事例を交えて紹介している。本資料は、研究を行政担当者に活かして頂くために、最大限、技術的な専門用語を分かりやすく説明し、また、多くのフローチャートによって読者の理解を助けるように記述されている。これによって、1 つでも多くの都道府県において適切に、警戒避難基準雨量の更新が図られることを期待したい。

目 次

1.	警戒避難基準雨量のあり方	1
2.	基準雨量設定手法の種類	3
2.1.	基準雨量の設定手法の種類と概要	3
2.1.1.	設定手法の種類	3
2.1.2.	設定手法の概要	4
3.	代表的な基準雨量設定手法の解説と手法の特徴	10
3.1.	各手法の経緯と関連性	10
3.2.	指針案による手法	13
3.2.1.	適 用	13
3.2.2.	設定手法	14
3.2.3.	手法の特徴と利用にあたっての注意点	27
3.3.	矢野による手法	29
3.3.1.	適 用	29
3.3.2.	設定方法	30
3.3.3.	手法の特徴と利用にあたっての注意点	30
3.4.	総合土砂災害対策検討会による手法	31
3.4.1.	適 用	31
3.4.2.	設定方法	31
3.4.3.	手法の特徴と利用にあたっての注意点	38
3.5.	基準雨量設定にあたっての留意事項	39
3.5.1.	基準雨量設定のための地域区分	39
3.5.2.	災害発生降雨の収集と選別	39
3.5.3.	災害非発生降雨の収集と選別	40
3.5.4.	CL設定の客観性の向上	40
3.5.5.	特殊な地域での適用（火山等）	41
4.	代表的な基準雨量設定手法の計算例	43
4.1.	取り扱う災害事例	43
4.2.	降雨指標の計算例	44
4.2.1.	A案・B案	44
4.2.2.	矢野案・提言案	46
4.3.	発生危険基準線の設定例	46
4.4.	仮想降雨による試算	52
5.	基準雨量の信頼性の向上	53
5.1.1.	災害調査と資料の蓄積	53
5.1.2.	確実な非発生降雨の調査と蓄積	53
5.1.3.	基準雨量の見直し	53
5.1.4.	手法の改善	55

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

第1章 警戒避難基準雨量のあり方

最近の10年の間（H3～H12年）、毎年全国で平均約960件の土砂災害が発生しており、人命・財産に甚大な被害を与えている。全国に、「土砂災害危険箇所」は、約18万箇所存在する。これらの土砂災害危険箇所は、人家5戸以上（5戸未満でも官公署、学校、病院、駅、旅館、発電所等のある場合も含む）に土砂災害の危険の及ぶ恐れのある箇所を対象としたものであり、現象としての土砂災害発生のおそれのある箇所はさらに膨大な数になることが推察される。一方、砂防設備等の整備状況は2割余りときわめて低い水準にあり、土砂災害による被害を防止・軽減するためには砂防設備等の整備のより一層の推進とともに、警戒避難等によるソフト対応を考える必要がある。

洪水の場合には、降雨状況や水位の変化を監視することにより、ある程度の時間的余裕をもって警戒避難あるいは水防活動を行うことができるが、土砂災害の場合は主に水に起因するものの、発生する場所を特定し、かつ、その場所を常時監視していない限り危険の把握は不可能であり、もし仮に発生を検知したとしても、土石流や崩壊した土塊等が人家等へ到達する時間は極めて短く、住民の避難は困難なことが多い。

そこで、土石流やがけ崩れに対する避難をあらかじめ時間的余裕をもって実施するためには、土石流発生のおそれのある溪流付近やがけ地付近の雨量を観測・解析・予測し、その情報を防災責任者へ提供することによって、地域住民に避難の指示・勧告を行うシステムの整備を促進することが重要である。このため、警戒避難体制をとるための基準雨量を設定する一手法を示した通達が、「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作成指針」（案）として、昭和59年に建設省河川局砂防課長から各都道府県土木担当部長および建設省各地方建設局河川部長等関係機関に出され、関係市町村長による警戒避難基準の設定を促進するよう指導してきた。

また、昭和57年の長崎災害の後、建設事務次官通達「総合的な土石流対策の推進について」が出され、さらに昭和58年の島根災害では、土石流、地すべり、がけ崩れによる災害が輻輳して発生したため、土石流に対して実施されてきた施策を地すべり、がけ崩れをも包含したものに拡充、強化する総合土砂災害対策を推進することとなった。平成12年5月にいわゆる土砂災害防止法が公布され、警戒避難基準を定めることはますます重要となっている。

平成13年6月末において、土砂災害に対する警戒避難基準雨量（以下、「基準雨量」と

いう)を設定している都道府県数は 34、関係市町村に対して警戒避難基準雨量を公表している都道府県数は 20、自主避難の参考に使用したり、防災機関の警戒避難体制の基準等に使用したりするなど、何らかの形で実際の防災対策に活用されている都道府県数は 16 にとどまっている。その主な理由は、土石流発生時の降雨データが十分でないまま設定されたが、その後見直し等が行われず、地域特性に十分適合した基準雨量となっていないため、公表、防災対策への活用に到っていないと考えられる。昭和 59 年以降、基準雨量設定方法の調査研究が進み、より地域特性にあった設定が技術的に可能になったり、土石流発生時の降雨データ整理の蓄積が進むなど、地域特性により適した精度の高い基準雨量の設定が可能になった。一旦設定された基準雨量をこのような新たな知見等に基づいて随時改訂していくことは、極めて重要である。

2. 基準雨量設定手法の種類

2.1. 基準雨量の設定手法の種類と概要

2.1.1. 設定手法の種類

基準雨量の設定手法は、研究者等によって様々な分類がなされている。主要な分類方法には、

- ① 基礎とする学問に応じた分類
- ② 崩壊・土石流等の発生・非発生の境界を定める方法に着目した分類
- ③ 入力値に応じた分類

があげられる。

①の分類では、物理的な発生モデルに基づく「物理的手法」や、流出解析法を応用して水の挙動と崩壊・土石流等の発生を関連付ける「水文学的手法」、雨量と崩壊・土石流等の発生関係を統計的处理により求める「統計的手法」に大別される。

②の分類では、せん断力とせん断抵抗力が不均衡となる境界を物理的に求める「物理的手法」と、発生に関わる要因を過去の発生・非発生実績に基づき評価して経験的にその境界を求める「経験的手法」に大別される。

③の分類では、降雨量のみを入力値として用いる「降雨による手法」と、その他の条件（地形・地質等）を入力値に加える「その他の手法」に大別される。

実用面からは、いくつかの危険箇所を含んだ広がりのある地域に適する手法と局所的な地域に適する手法に分類され、基礎となるデータ取得の難易性や行政運用上の利便性などを考慮して、前者による基準雨量の設定が主流となっている。

以下では、広がりのある地域に適する主な手法として、

- ① タンクモデルによる手法
- ② 実効雨量による手法
- ③ 流出水到達時間内の降雨強度による手法
- ④ 重判別分析による手法

をとりあげ、設定手法の概要を述べる。

2.1.2. 設定手法の概要

(1) タンクモデルによる手法

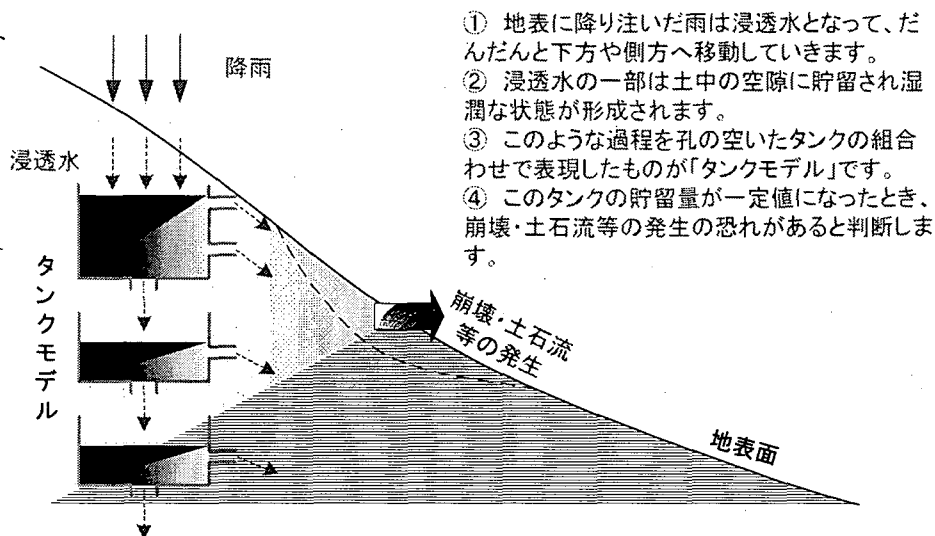


図 2.1 タンクモデルによる手法の概念

タンクモデルは、流出解析手法の一種で斜面や流域における水の浸透量や流出量の変化を追跡する手法である。流出孔の位置や大きさによって浸透や流出の非線形特性が地域ごとに表現される。

タンクモデルを利用した基準雨量の設定手法は、降雨による浸透水が土質特性等に応じて階層的に土中に貯留される様を追跡し、過去の崩壊・土石流等が発生した時点のタンク貯留高（土中の水分量）をもとに発生基準を定めるものである。さらに、今後の降雨によるタンク貯留高が基準を超過したときに発生の恐れがあると判断する（図 2.1）。

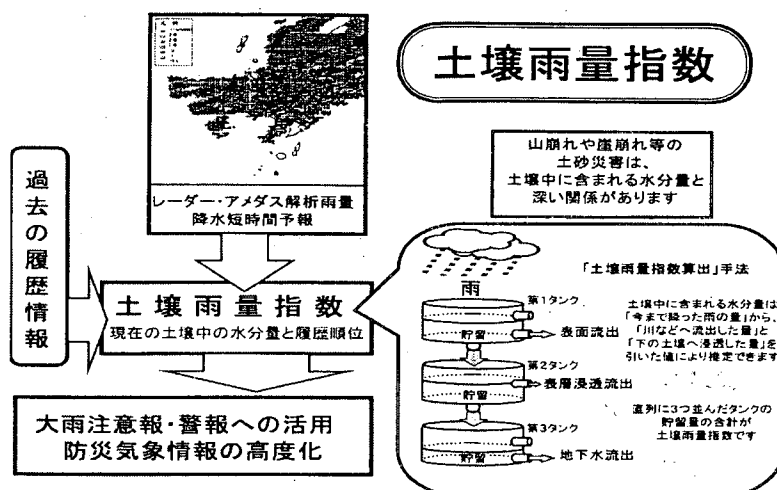
タンク構造については、1段から複数段など様々なものが提案されている。近年、気象庁では3段のタンクモデルによる貯留高を「土壌雨量指数」と称して土砂災害発生の危険性を予測し、危険が予測される場合その旨を大雨注意報・警報に併せて発表している。

◆トピック

「土壌雨量指数とは」

土壌雨量指数は、土壌中の水分量を3段のタンクモデル貯留高の合計値として求めるものであり、降雨による地盤の湿潤の度合いを表す。指数値が高いほど山崩れ・がけ崩れの発生危険性は高いと解釈する。しかし、同じような高い指数値が出現した場合、普段から雨が多い地域よりも雨が少ない地域の方の発生危険性が高い傾向にあるので、指数値から直接危険性を判断することは困難である。また、指数値の大小だけで2地点の危険性を比較することは無意味どころか危険でさえある。そこで、土壌雨量指数に履歴順位という概念を導入し、ある場所での過去の降雨による指数値と現在の値を比較して、現在の指数値が過去何番目の高さかというような相対的な表現が行われて

いる。



「発表時の表現」

土壌雨量指数は現行の手法では大雨注意報・警報の対象とすることが困難な土砂災害も対象と出来ることを第一の目的として開発を進めており、履歴1位を更新するような大雨だけを対象として開発しているのではない。ただし、履歴1位を更新した場合には、気象情報の中で警戒を呼びかけることにしている。

なお、現時点では、「〇〇市では過去数年間で最も土砂災害の危険性が高まっている」といった表現で公表されている。

参考文献：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

(2) 実効雨量による手法

実効雨量は、指数関数を用いて降雨の浸透・貯留過程を表現しようとするもので、1つの流出孔をもつ1段のタンクモデルとも言い換えられる。流出孔の大きさを表す係数は減少係数と呼ばれる。実際の斜面・流域の浸透量や流出量の変化を追跡することに終止するならば、前項で述べたタンクモデルのように複数の階層を設けたほうが適しやすいとされている(図2.2)。

基準の設定や判定方法は、タンクモデルによる手法と同じく、過去の崩壊・土石流等の発生時点の実効雨量値をもとに発生基準を設定し、今後の降雨による実効雨量値が基準を超過したとき発生の恐れがあると判断する。

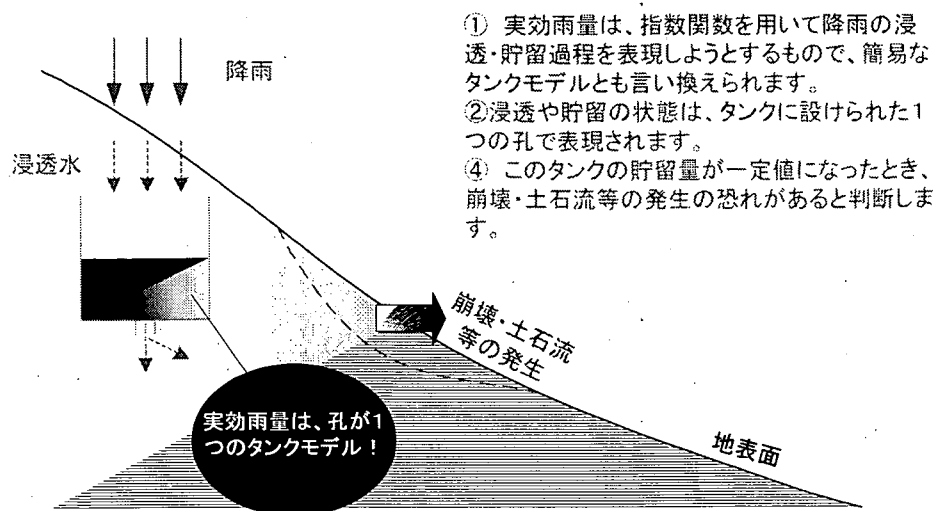


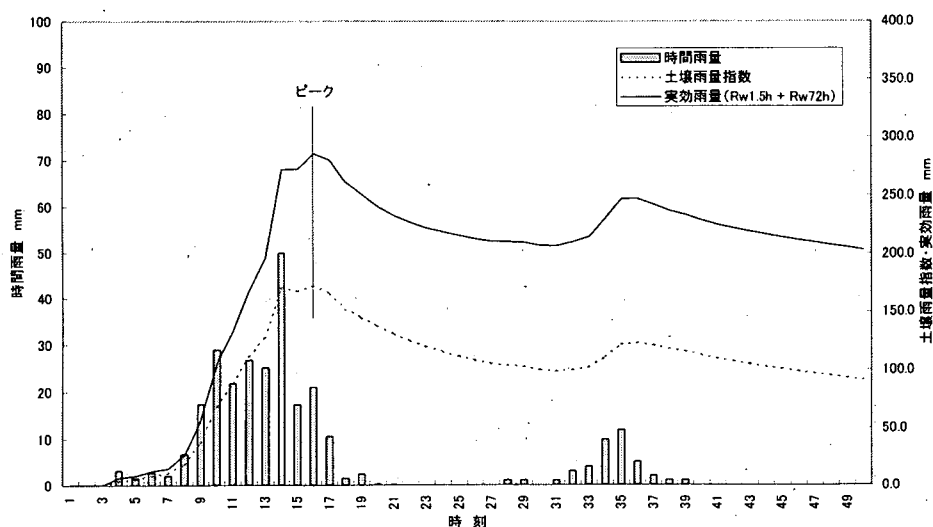
図 2.2 実効雨量による手法の概念

◆トピック

「実効雨量と土壌雨量指数の類似性」

建設省（現国土交通省）では、地表と地中の水分量を独立する二つの実効雨量を用いて近似し、降雨強度（短時間の降雨量）が大きいときは総雨量（長時間の降雨量）が少なくても土砂災害が発生すること、また降雨強度が小さくても総雨量が大きければ土砂災害が発生していることを表現した土砂災害の予測手法を示している（後述する「総合土砂災害対策検討会による手法（提言案）」²⁴⁾）。

同手法による実効雨量と土壌雨量指数は、諸定数の違いにより値の差異はあるものの、下図のようにピークの位置や減衰特性が類似する³⁸⁾。



(3) 流出水到達時間時間内の降雨強度による手法

この手法は、タンクモデルや実効雨量が地中の湿潤状態を指標とするのに対し、地表の流出水量を左右する指標として流出水到達時間時間内の降雨強度を用い、それが一定値となった時点で崩壊や土石流等が発生する恐れがあるとするものである。

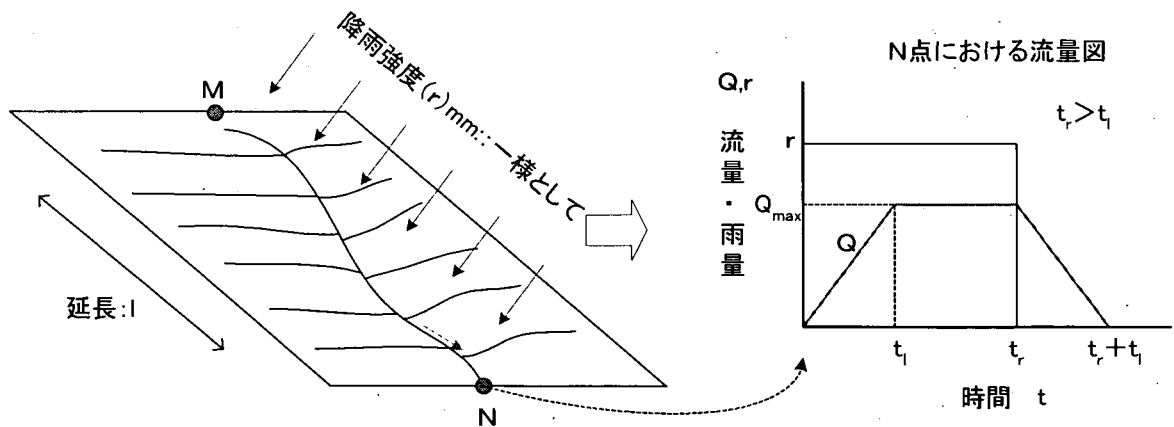
ある地点における地表の流出水量（ピーク流量 $Q_{\max}$ ）と流出水到達時間時間内の降雨強度の関係は下式が代表的であり、合理式（ラショナル式）として一般に活用されている。

$$Q_{\max} = \frac{1}{3.6} \times r_e \times A = \frac{1}{3.6} \times r \times f \times A$$

- $Q_{\max}$: ピーク流量 (m^3/sec)
 r_e : 流出水到達時間内の有効降雨強度 (mm/h)
 r : 流出水到達時間内の降雨強度 (mm/h)
 f : 流出係数
 A : 流域面積 (km^2)

流域を図 2.3（左）に示すように長方形で模式化すると、流域の上流端（M）から末端（N）までの距離を l とし、ここに継続時間 t_r の様な降雨強度 r の雨が降ったとき、MからNまでの地表水の到達時間を t_l とする。簡便のため、 $t_r > t_l$ のときの流量図を考えると、雨の降り始めから $t = t_l$ までの流量はほぼ直線的に増加し、 $t = t_l$ になればNには全流域からの流出水が到達しているので流量の最大値、すなわちピーク流量 $Q_{\max}$ は前式で表される。

したがって、流出水到達時間内の降雨強度は、物理的に土砂移動の発生と関連深いとされる流量を左右し、地域の固有値とみなせる流出係数（ f ）や流域面積（ A ）が類似する地域においては有効な指標と考えられている。



（４）重判別分析による手法

前項までで紹介した手法は、降雨量のみを入力値とし、流出解析法の応用によって崩壊や土石流等の発生を予測しようとするものであった。

降雨量以外に降雨の質的条件や地形・地質などの条件を加味することで、よりの確な予測を行おうとするアプローチがある。

重判別分析による手法は、降雨や地形・地質など崩壊・土石流等の発生に関わり深い要因を取り上げ、それぞれの要因が発生・非発生に関与する重みを統計的に評価・選別することで、発生・非発生の判別式を定めるものである。

（５）各手法の比較

以上で概説した手法は、細部の取り扱い等の違いによりさらに分類される。それらの手法の概要等を整理すると、表 2.1 のようである。

表 2.1 主な基準雨量の設定手法の分類と概要

手法名	手法名（細分類）	指標	対象現象	概 要	特 徴	出 典
タンクモデル による手法	鈴木らによる手法	① 1 段目の貯留高 ② 2 段目の貯留高	崩 壊 土石流	下方への流出孔と側方への流出孔を 設けたタンクを直列 3 段に配置した モデルであり、雨量の入力値に対して タンクに貯留される水量の変化と崩 壊・土石流等の発生タイミングによい 適合性がみられるとしたもの。 最近では、気象庁が土壌雨量指数と称 して公表している。	地域の浸透特性を表すタンクの諸定数は、流量観測結果などとの整合性の検 討によって定めることが望ましいが、観測資料が不足することが多く、定数 の同定に困難な面がある。 牧原らの研究によると、四国一帯の災害事例をもとに複数のタンク諸定数に より解析した結果、花崗岩地帯の定数を用いた場合、異なる地質条件下でも 比較的良好な災害予測が可能であるとしている。	鈴木雅一・福島義宏・武居有恒他：土砂災害発生の危険雨量, 新砂 防, No. 110, pp. 1-7, 1979
	道上らによる手法	① 1 段目の貯留高 ② 1・2 段目貯留高の合計	崩 壊 土石流			道上正規・小島英司：集中豪雨によるがけ崩れの発生予測に関する研 究, 鳥取大学工学部研究報告, 第 12 巻, 第 1 号, pp. 167-178, 1981
	牧原らによる手法	3 つのタンク貯留高の合計値	崩 壊			牧原康隆・平沢正信：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, Vol. 45, No. 2, 1993
実効雨量 による手法	指針案による手法 (A 案)	実効雨量（前期日半減）	土石流	降り始めからの連続雨量に前期の実 効雨量を加算した指標を用いて基準 の設定や判定を行うもの。	検討段階では、当該時刻の時間雨量と当該時刻 1 時間前までの実効雨量に分 解して基準の検討を行うが、判定は当該時刻までの実効雨量とするため、検 討過程に理解を得にくい面がある。 降雨指標が単一で連続雨量と類似するため、周知しやすい反面、長雨や断続 的な降雨下での不適合が指摘されている。	建設省河川局砂防部：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
	指針案による手法 (B 案)	① 有効降雨強度 ② 実効雨量（前期日半減）	土石流	A 案と同じ実効雨量と有効降雨強度 を組合わせて評価するもの。組合わせ 指標となるため、XY のグラフ上で基 準の設定や判定を行う。	A 案と同じ実効雨量を用いるため、長雨や断続的な降雨下での不適合が指摘 されている。 指針案の中では、A 案によって良好な設定が困難な場合の参考手法として位 置付けられており、具体的に利用されている事例は A 案と比べて少ない。	同上
	矢野による手法 (矢野案)	① 実効雨量（1 段タンクモデル）	土石流	A 案における実効雨量の演算方法を 改良し、土中水分量の推移に調和的な 指標としたもの。	実効雨量の演算方法の変更により、長雨や断続的豪雨下での不適合が改善さ れている。また、基準の解除にも有効な指標となっている。 ここで取り扱われる実効雨量は、下方への流出孔を 1 つとするタンクモデル と言い換えられる。 半減期の設定方法については、地域特性を反映するよう検討を要するとして いるが、具体的な設定方法が示されていない。	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 (171), 1990
	総合土砂災害対策検 討会による手法 (提言案)	① 実効雨量（半減期 1.5 時間） ② 実効雨量（半減期 72 時間）	崩 壊 土石流**)	矢野案による実効雨量の演算方法を 用い、3 段のタンクモデルによる災害 予測手法を応用して半減期 1.5 時間 と半減期 72 時間の組合わせ指標とし たもの。	矢野案と同様の実効雨量を用いるため、A 案における長雨や断続的豪雨下で の不適合が改善されている。また、基準の解除にも有効な指標となっている。 半減期は、花崗岩地帯におけるタンクモデルと類似性の高いものとしている。 異なる地域における適用に関しては、いくつかの地域における検討結果より その汎用性が確認されている。	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 松沢昌志・大原正則・今井一之・杉原忠広：がけ崩れ発生限界雨量に ついて, 砂防学会研究発表会概要集, 1993 瀬尾克美・原口勝則・菊井稔宏・吉田真也：土砂災害警戒避難基準雨 量の課題と改良について, 新砂防 Vol. 53, No. 6, 2001
流出水到達時 間内の降雨強 度による手法	平野による手法	流出水到達時間内の 降雨強度	崩 壊 土石流	土石流や崩壊の発生モデル（物理モデ ル）をもとに、発生に関与する流出水 到達時間内の降雨強度を指標とする もの。	流出水到達時間は、地形・地質などの条件によって異なるが、過去の発生・ 非発生降雨を解析することで、経験的に求める方法を示す。 取り扱う過去の災害発生降雨が適切でない場合、流出水到達時間を一義的に 決定しがたい場合などがある。 山地災害危険区域における警戒避難基準雨量の設定指針（林野庁）で利用さ れている。	岩元賢・原田民司郎・平野宗夫：土砂災害に対する警戒・避難基準雨 量の設定について, 新砂防, Vol. 43, No. 3 (170), pp. 3-8, 1990
重判別分析 による手法	荒木らによる手法	地形要因と降雨要因の組合わせ	土石流 崩 壊**)	発生に関連深い地形要因を土石流危 険溪流ごとに調査・計測し、様々な降 雨指標とともに重判別式を定めるもの。	事前の作業として多くの地形計測作業を要するが、地形図を用いた作業が主 体で DEM 等の利用によって省力化が望まれる。 溪流ごとの基準値の設定や類似する溪流の集合ごとに基準値の設定が可能。	荒木義則・古川浩平・松永悟・小笠原貴人・石川芳治・水山高久：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. 574, VI-36, 1997

*)：がけ崩れに限定して手法が提言されているが、背景するタンクモデルが土石流に対しても有効性を示すため、土石流への適用も可能な手法と評価できる。

**)：文献のタイトルでは、土石流危険溪流を大きく取り上げているが、崩壊の発生と土石流の発生を同一視している。

3. 代表的な基準雨量設定手法の解説と手法の特徴

基準雨量の設定手法として、砂防部局で利用されることの多い以下の4手法を取りあげ、手法の解説ならびに特徴を示す。

- ① 指針案による手法（A案）
- ② " （B案）
- ③ 矢野による手法（矢野案）
- ④ 総合土砂災害対策検討会による手法（提言案）

3.1. 各手法の経緯と関連性

各手法は、技術的発展の過程に沿って提案されたものであり、相互に関連する（図 3.1）。

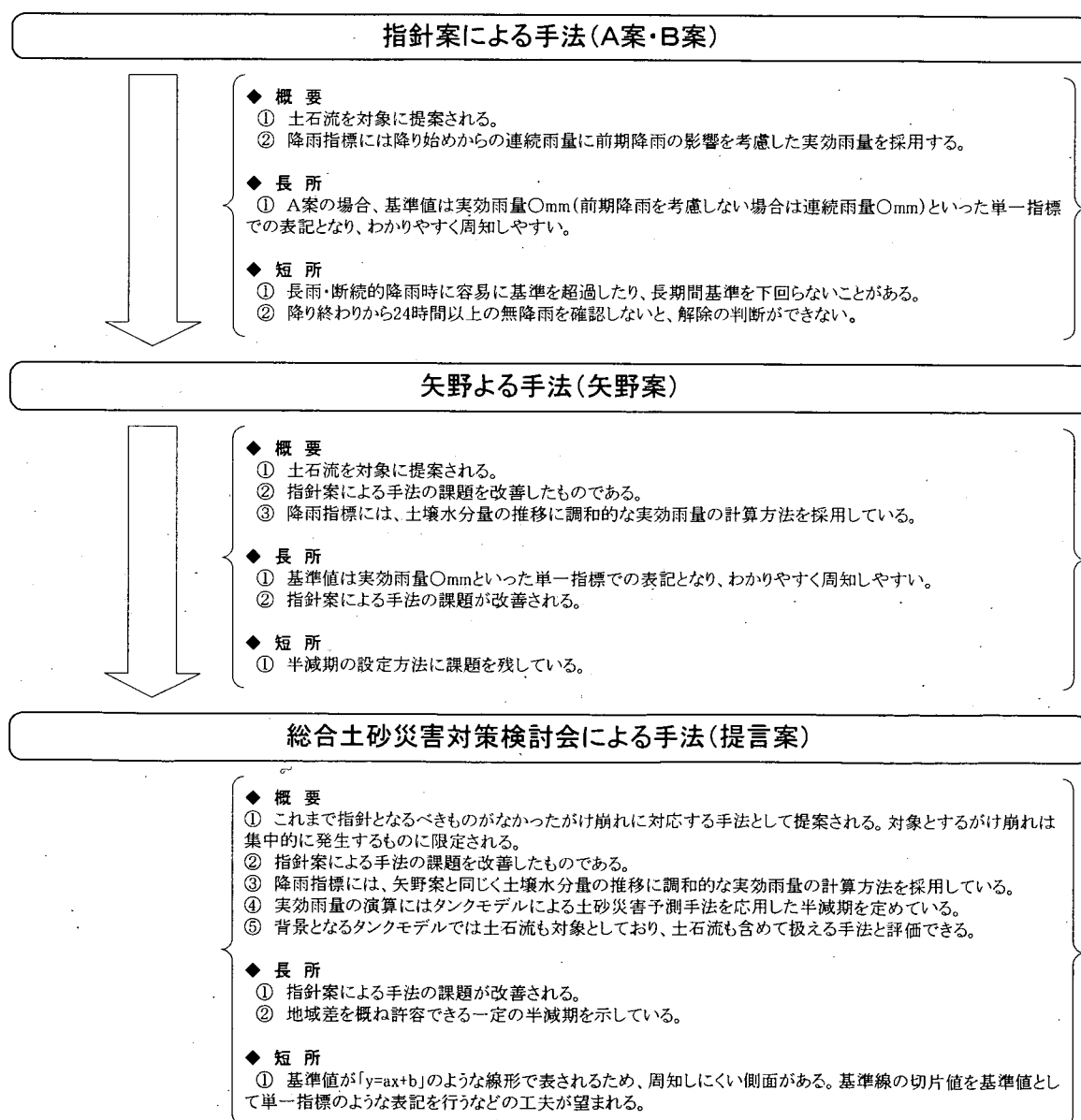


図 3.1 各手法の経緯と関連

「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),建設省,1984」によって示された手法(「指針案による手法(A案・B案)」と呼ぶ)は、土石流災害の実態に関する当時の知見から、降雨強度が大きくなるときは総雨量が少なくても土石流が発生すること、また降雨強度が小さくても総雨量が大きくなれば土石流が発生していることに着目し、降雨強度と総雨量に関する降雨指標を組合わせたものである。総雨量に関連する降雨指標には連続雨量に前期降雨の影響を考慮した実効雨量を採用している。降雨強度に関する指標には時間雨量を用いるA案と有効降雨強度を用いるB案の二つの手法が示され、A案による基準の設定が困難な場合、B案を利用することができるとしている。

A案の場合、検討過程では二つの降雨指標を用いるが、最終的な基準値は「実効雨量○mm」といった単一指標での表記となり、わかりやすく地域防災計画への掲載など周知を促しやすい利点がある。前期降雨を考慮しなければ、連続雨量による表記となり、さらにわかりやすい指標となる。ここでの実効雨量は、降雨の推移に応じて増加の一途をたどる指標であり、少降雨が長期間続いたり、断続的に強さを増すような場合に容易に基準を超過したり、一端基準を超過すると長期間に渡って基準を下回ることがないなどの問題が指摘されている。

矢野(1990)²²⁾は指針案による手法の課題を改善した手法を示した(「矢野による手法(矢野案)」と呼ぶ)。矢野は時刻を追って減少係数を乗じる実効雨量の演算方法を採用し、土中水分量の推移に調和的な降雨指標とすることで、指針案による手法の課題を改善できている。しかしながら、地域の地形や地質などに応じた流出・貯留特性を表す半減期については、その設定方法を具体的に示していない。基準値は、A案と同様に単一指標での表記となるためわかりやすく周知しやすい利点がある。

がけ崩れに対する基準雨量設定手法の必要性から、1993年に建設省(現国土交通省)が主催した「総合土砂災害対策検討会」より一つの手法が提言された(「総合土砂災害対策検討会による手法(提言案)」と呼ぶ)。この手法は、演算が簡便で、土中水分量の推移に調和的な矢野(1990)²²⁾による実効雨量の演算方法を採用し、地表および地中の水分量を表す二種類の実効雨量によって基準雨量を設定するものである。二種類の実効雨量に用いる半減期は、花崗岩地帯において検討された鈴木ら(1979)⁹⁾によるタンクモデル貯留高の推移特性と類似するように定められ、半減期1.5時間(1段目タンクに相当)および半減期72時間(2・3段目タンクに相当)を採用している。半減期は浸透や貯留特性を表す定数であるため、地域ごとに定める必要も考えられるが、いくつかの地域での検討結果より提言案の汎用性が確認されている²⁵⁾。このことは、花崗岩地域におけるタンクモデルが他の地域においても有効性を示すという牧原ら(1993)²³⁾の研究成果とも合致する。この手法で対象とする現象はがけ崩れとされるが、背景とする鈴木ら(1979)のタンクモデルが土石流に対しても有効性を示すことから、土石流に対しても適用可能な手法と評価できる。そのため、最近ではがけ崩れと土石流をこの手法によって統一的に扱うケースが増えている²⁹⁾³⁸⁾。

なお、この手法では設定される基準が「 $y = ax + b$ 」のような線形で定められるため、周知しにくい側面がある。そのため、基準線を「 $b = y - ax$ 」のように変形し、切片値 b を基準値として置き換え、「 $y - ax$ 」の2変数からなる指標との大小関係で基準を判定するなどの工夫が望まれる。

以降に、4つの手法について設定手法等を詳述する。

◆トピック

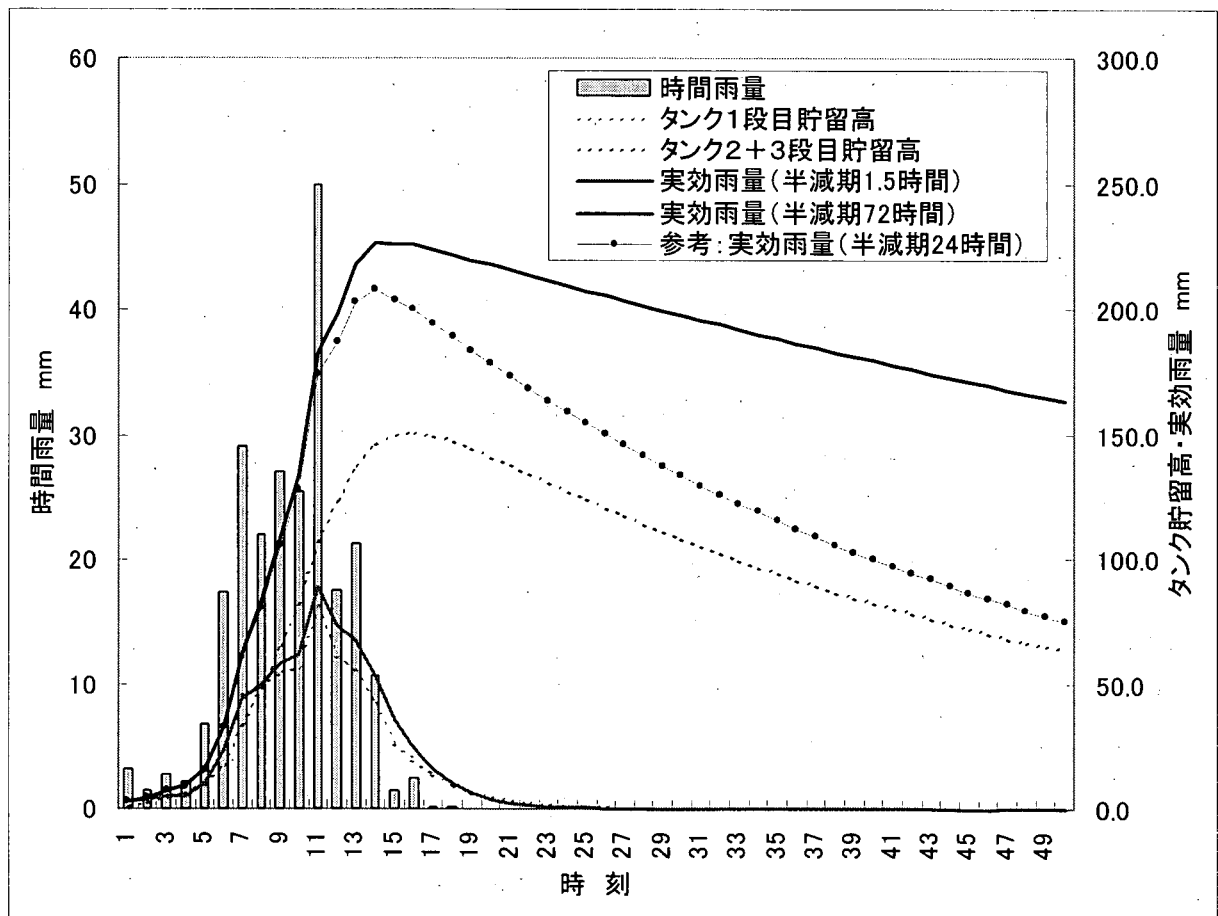
「鈴木ら（1979）のタンクモデルと提言案における実効雨量の比較」

提言案における実効雨量（半減期 1.5 時間および 72 時間）は、鈴木ら（1979）⁶⁾のタンクモデルを背景として推移特性が類似するように導かれたものである。

それでは、仮の降雨パターンを用いてその状況を確認してみよう（下図参照）。

下図をみると、タンク 1 段目の貯留高と実効雨量（半減期 1.5 時間）は、計算値および推移特性ともによく似たものとなっている。一方、タンク 2 段目と 3 段目の貯留高の合計と実効雨量（半減期 72 時間）では、計算値は異なるものの、ピークの位置や曲線の傾きなどの推移特性は類似している。

計算値の違いは設定される基準値の違いに反映されるものであり、手法の類似性を評価する上では指標の推移特性が類似しているかどうかに着目点となる。このような視点でみると、両手法はよく類似するものと理解できよう。



3.2. 指針案による手法

総合土石流対策を実施する上で、土石流の発生予測指標に降雨量を用いるのが適切であるとして、警戒避難体制をとるための基準雨量を設定する一手法を示した通達が1984年に建設省河川局砂防課長から各都道府県土木部長および建設省各地方建設局河川部長等関係機関に出された。

基準雨量を設定する手法は、「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)」(指針案と呼ぶ)として示され、これにより、各都道府県や建設省各地方建設局では昭和60年代前半に势力的な検討が進められ、ほぼ全国で基準雨量の原案が設定された。

3.2.1. 適用

(1) 対象とする現象

「土石流」を対象として検討された手法である。

(2) 適用地域

指針案では、土石流危険渓流ごとに基準雨量を設定するのが望ましいが、設定のための降雨データや土石流災害の発生実績が十分でない現状等もあり、地形・地質・植生等が類似する近傍の土石流危険渓流では同一の基準雨量を採用できるとしている。

過去の検討事例をみると、素因特性等が類似する地域を分類した上で、市町村ごとに避難の指示・勧告が行われることを考慮し、市町村界に沿って区分した地域ごとに基準雨量を設定している例が多い。

(3) 降雨指標

土石流災害の実態に関する当時の知見から、降雨強度と総雨量に関する降雨指標の組合わせとする。

すなわち、図3.2に示すように縦軸に降雨強度(雨の強さの指標)を表し、横軸に総雨量をとり、発生降雨、非発生降雨のデータをそれぞれ◎印、×印でプロットすると、一般に図のように右下がりの直線あるいは曲線で、◎印群と×印群に区分することができる。この境界線の左下側は土石流が発生しない安全領域であり、右上側は土石流発生の危険のある領域となる。

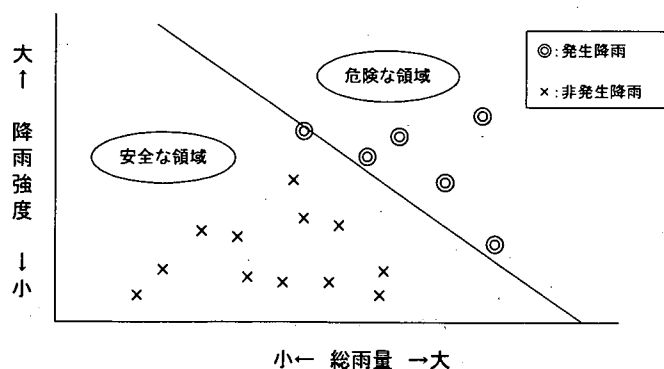


図 3.2 土石流発生の危険な領域
と安全な領域の概念図

(4) その他(運用等について)

指針案は、災害対策基本法に基づいて市町村が土石流災害に関する警報の発令と避難の指示を行うための降雨量（基準雨量）設定について参考とするもので、具体的には設定された基準雨量を市町村地域防災計画に記載し運用することが望ましいとされている。

また、都道府県は、総合土石流対策推進連絡会において、基準雨量の設定についての総合的な検討を行い、都道府県防災会議等を通じて市町村を指導するよう記されている。

なお、建設技術評価制度「昭和 58 年建設省告示第 2014 号：土石流監視装置の開発」によって開発され、現在も多く用いられている土石流監視装置では、この指針案による基準雨量の判定手法が用いられている。

3.2.2. 設定手法

(1) 設定手順

図 3.3、図 3.4 に示すように、まず降雨資料を収集するための雨量観測所を選定する。次に、土石流発生時の降雨（発生降雨と称す）資料と土石流非発生時の降雨（非発生降雨と称す）資料を所定の様式－1，2（表 3.1、表 3.2）に収集整理する。実際上は、土石流に先行して発生するがけ崩れ等についても有効な資料となるため、あわせて収集・整理することが望まれる。

指針では、この様式をもとに図 3.2 における指標の組合わせに応じて、以下の 2 種類の設定方法が示されている。

A 案	:	1 時間雨量（縦軸）	－	実効雨量（横軸）
B 案	:	有効降雨強度（縦軸）	－	実効雨量（横軸）

指針案では、A 案により妥当な設定値が得られない場合は B 案を用いてもよいとされている。これは運用の容易さを考慮して A 案による方法が推奨されたことによる。

3.2.2.(1) 降雨資料を収集するための雨量観測所の選定

- ① 既設雨量観測所の位置と観測期間の整理
- ② 非発生降雨を整理する代表雨量観測所の選定
- ③ 発生降雨を整理する災害箇所近傍の観測所の選定

3.2.2.(3) 土石流発生時の降雨資料の収集

- ① 過去の土石流発生時刻等の整理
- ② 土石流発生時の降雨資料の収集

3.2.2.(4) 土石流非発生時の降雨資料の収集

- ① 代表観測所における長期間の降雨資料の収集

3.2.2.(3)及び3.2.2.(2) 土石流発生時の降雨資料の整理〔表3.1 様式-1の作成〕

- a. 発生時期の古い土石流から順に番号を付ける。
- b. 土石流が発生した渓流名、地先名、番号、発生年月日時刻、代表観測所までの距離を記入。但し、発生時刻が推定の場合、() 書きとする。
- c. 一連続雨量(※3.2.2(2)の①を参照)及び降り始め降り終りの時刻を記入。
- d. 2日前から14日前までの各々の24時間雨量を記入し、設定した半減期ごとの前期実効雨量(※3.2.2(2)の②を参照)を記入。
- e. 一連の降雨の降り始めから土石流が発生する1時間前までの積算雨量、土石流発生1時間前までの実効雨量、土石流発生時点の前1時間雨量を記入。
- f. 総実効雨量と土石流が発生した渓流から代表観測所までの距離を記入。

(市町村名)										(都道府県名)										代表観測所名									
①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯	⑰	⑱	⑲	⑳	㉑	㉒	㉓	㉔	㉕	㉖	㉗	㉘	㉙	㉚
整理番号	渓流名	地先名	土石流発生番号	発生年月日時刻	一連続雨量(Rc)	前期雨量(Ra)	前期雨量(Rb)	前期雨量(Rc)	前期雨量(Rd)	前期雨量(RE)	土石流発生1時間前までの積算雨量	土石流発生1時間前までの実効雨量	土石流発生1時間前までの実効雨量	土石流発生1時間前までの実効雨量	土石流発生1時間前までの実効雨量	土石流発生1時間前までの実効雨量	土石流発生1時間前までの実効雨量	土石流発生1時間前までの実効雨量	土石流発生1時間前までの実効雨量	土石流発生1時間前までの実効雨量	土石流発生1時間前までの実効雨量	土石流発生1時間前までの実効雨量	土石流発生1時間前までの実効雨量	土石流発生1時間前までの実効雨量	土石流発生1時間前までの実効雨量	土石流発生1時間前までの実効雨量	土石流発生1時間前までの実効雨量	土石流発生1時間前までの実効雨量	
a					c																								

3.2.2.(4)及び3.2.2.(2) 土石流非発生時の降雨資料の整理〔表3.2 様式-2の作成〕

- a. 発生時期の古い降雨から順に番号を付ける。
- b. 一連続雨量(※3.2.2(2)の①を参照)及び降り始めと降り終りの時刻を記入。
- c. 2日前から14日前までの各々の24時間雨量を記入し、設定した半減期ごとの前期実効雨量(※3.2.2(2)の②を参照)を記入。
- d. 一連の降雨の中の最大1時間雨量及びその発生時刻を記入。
- e. 一連の降雨の降り始めから最大1時間雨量が発生するまでの積算雨量、最大1時間雨量が発生するまでの実効雨量を記入。
- f. 総実効雨量を記入。

(市町村名)										(都道府県名)										代表観測所名									
①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯	⑰	⑱	⑲	⑳	㉑	㉒	㉓	㉔	㉕	㉖	㉗	㉘	㉙	㉚
整理番号	一連続雨量(Rc)	前期雨量(Ra)	前期雨量(Rb)	前期雨量(Rc)	前期雨量(Rd)	前期雨量(RE)	最大1時間雨量	最大1時間雨量発生時刻	最大1時間雨量発生時刻	最大1時間雨量発生時刻	最大1時間雨量発生時刻	最大1時間雨量発生時刻	最大1時間雨量発生時刻	最大1時間雨量発生時刻	最大1時間雨量発生時刻	最大1時間雨量発生時刻	最大1時間雨量発生時刻	最大1時間雨量発生時刻	最大1時間雨量発生時刻	最大1時間雨量発生時刻	最大1時間雨量発生時刻	最大1時間雨量発生時刻	最大1時間雨量発生時刻	最大1時間雨量発生時刻	最大1時間雨量発生時刻	最大1時間雨量発生時刻	最大1時間雨量発生時刻	最大1時間雨量発生時刻	
a	b																												

3.2.2.(5)① 土石流発生危険基準線(CL)の設定

- ① XYグラフの作成(発生降雨・非発生降雨のプロット)
- ② 発生危険基準線(CL)の設定

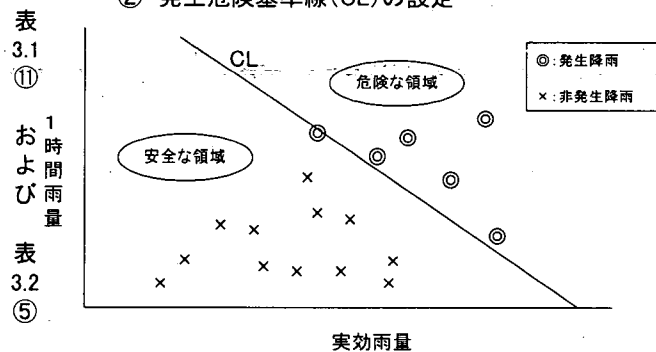
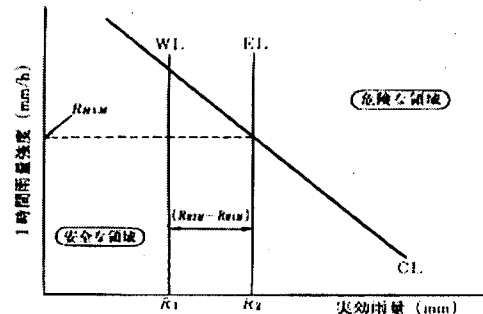


表3.1⑩ および 表3.2⑦

3.2.2.(5)② 警戒基準線(WL)、避難基準線(EL)の設定

- ① CLに対する避難指示のタイミングを設定(一般にCL到達1時間前)
- ② CLに対する警戒発令のタイミングを設定(一般にCL到達2時間前)
- ③ 上記時間内の想定雨量の設定(一般に既往最大雨量や確率雨量)
- ④ EL・WLの設定



3.2.2.(5)③ 各基準線の妥当性の検討

- ① 分離性
- ② 発令頻度
- ③ 空振頻度

3.2.2.(5)④ 警戒基準雨量、避難基準雨量の設定

(複数案の比較検討により最適な基準を設定)

注:各項目の見出し番号は対応する本文の見出し番号を示している。

図 3.3 A 案の基準雨量設定手順

3.2.2.(1) 降雨資料を収集するための雨量観測所の選定

- ① 既設雨量観測所の位置と観測期間の整理
- ② 非発生降雨を整理する代表雨量観測所の選定
- ③ 発生降雨を整理する災害箇所近傍の観測所の選定

3.2.2.(3) 土石流発生時の降雨資料の収集

- ① 過去の土石流発生時刻等の整理
- ② 土石流発生時の降雨資料の収集

3.2.2.(4) 土石流非発生時の降雨資料の収集

- ① 代表観測所における長期間の降雨資料の収集

3.2.2.(3)及び3.2.2.(2) 土石流発生時の降雨資料の整理〔表3.1 様式-1の作成〕

- a. 発生時期の古い土石流から順に番号を付ける。
- b. 土石流が発生した溪流名、地先名、番号、発生年月日時刻、代表観測所までの距離を記入。但し、発生時刻が推定の場合、()書きとする。
- c. 一連続雨量(※3.2.2(2)の①を参照)及び降り始めと降り終りの時刻を記入。
- d. 2日前から14日前までの各々の24時間雨量を記入し、設定した半減期ごとの前期実効雨量(※3.2.2(2)の②を参照)を記入。
- e. 一連の降雨の降り始めから土石流が発生する1時間前までの積算雨量、土石流発生1時間前までの実効雨量、土石流発生時点の前1時間雨量を記入。
- f. 土石流発生時までの実効雨量、初期雨量及び変曲点までの時刻、土石流が発生した時点までの有効雨量(※3.2.2(2)の⑤を参照)を記入する。
- g. 土石流が発生した時点までの有効時間(※3.2.2(2)の⑤を参照)、土石流が発生した時点までの有効雨量強度(※3.2.2(2)の⑤を参照)を記入する。
- h. 総実効雨量と土石流が発生した溪流から代表観測所までの距離を記入。

(様式-1)									
(市町村名)									
①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
整理番号	溪流名	地先名	発生年月日時刻	一連続雨量(日時～日時)	前期実効雨量(日時～日時)	前期実効雨量(日時～日時)	前期実効雨量(日時～日時)	前期実効雨量(日時～日時)	前期実効雨量(日時～日時)
a		b		c	d	e	f	g	h

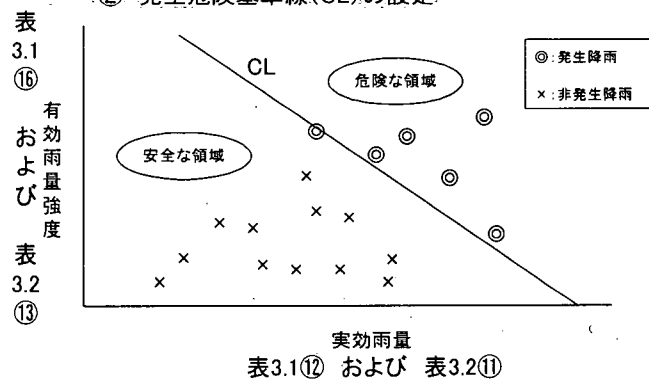
3.2.2.(4)及び3.2.2.(2) 土石流非発生時の降雨資料の整理〔表3.2 様式-2の作成〕

- a. 発生時期の古い降雨から順に番号を付ける。
- b. 一連続雨量(※3.2.2(2)の①を参照)及び降り始め降り終りの時刻を記入。
- c. 2日前から14日前までの各々の24時間雨量を記入し、設定した半減期ごとの前期実効雨量(※3.2.2(2)の②を参照)を記入。
- d. 初期雨量(※3.2.2(2)の④を参照)および変曲点Aの時刻、一連の降雨降り始めから変曲点Bまでの積算雨量及び変曲点Bの時刻、変曲点Bまでの有効雨量(※3.2.2(2)の⑤を参照)を記入。
- e. 変曲点Bまでの実効雨量、変曲点Bまでの有効時間(※3.2.2(2)の⑤を参照)、変曲点Bまでの有効雨量強度(※3.2.2(2)の⑤を参照)を記入する。
- f. 非発生降雨の総実効雨量を記入。

(様式-2)									
(市町村名)									
①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
整理番号	一連続雨量(日時～日時)	前期実効雨量(日時～日時)	前期実効雨量(日時～日時)	前期実効雨量(日時～日時)	前期実効雨量(日時～日時)	前期実効雨量(日時～日時)	前期実効雨量(日時～日時)	前期実効雨量(日時～日時)	前期実効雨量(日時～日時)
a	b	c	d	e	f	g	h	i	j

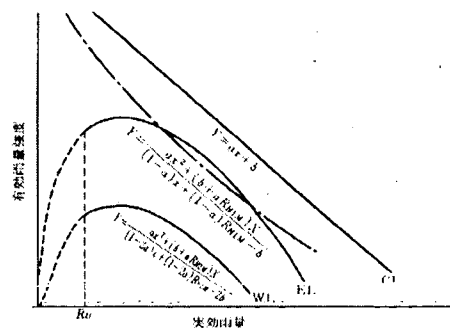
3.2.2.(6)① 土石流発生危険基準線(CL)の設定

- ① XYグラフの作成(発生降雨・非発生降雨のプロット)
- ② 発生危険基準線(CL)の設定



3.2.2.(6)② 警戒基準線(WL)、避難基準線(EL)の設定

- ① CLに対する避難指示のタイミングを設定(一般にCL到達1時間前)
- ② CLに対する警戒発令のタイミングを設定(一般にCL到達2時間前)
- ③ 上記時間内の想定雨量の設定(一般に既往最大雨量や確率雨量)
- ④ EL・WLの設定



3.2.2.(6)③ 各基準線の妥当性の検討

- ① 分離性、② 発令頻度、③ 空振頻度

3.2.2.(6)④ 警戒基準雨量、避難基準雨量の設定

(複数案の比較検討により最適な基準を設定)

注:各項目の見出し番号は対応する本文の見出し番号を示している。

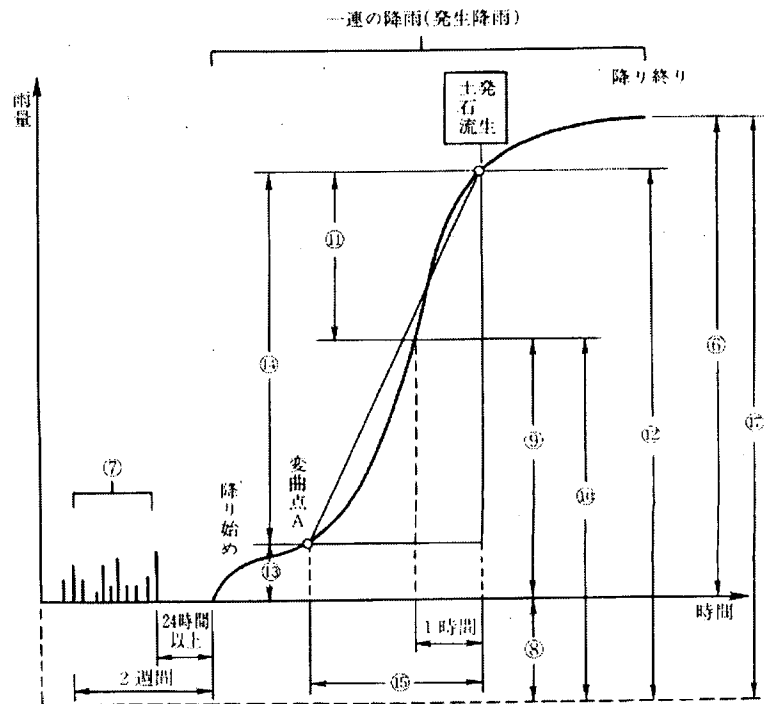
図 3.4 B 案の基準雨量設定手順

[illegible]

表 3.1 発生降雨整理表 (様式-1)

図2.151の記入要領（様式-1）

- ① 発生時刻の古いものから順に番号をつける。
- ② 溪流名を記入する。
- ③ 溪流に係る地先名を記入する。
- ④ 昭和57年9月1日河砂第50号砂防部長通達「総合的な土石流対策の推進について」の様式-1による溪流番号を記入する。
- ⑤ 土石流の発生年月日、時刻を記入する。なお、発生時刻が推定による場合には()書きとする。
- ⑥ 一連総雨量(R_c)および降り始めと降り終りの時刻を記入する。
- ⑦ 2日前から14日前までの各々の24時間雨量を記入する。
- ⑧ 設定した各半減期ごとの前期実効雨量(R_{WA})を記入する。
- ⑨ 一連の降雨の降り始めから土石流が発生する1時間前までの積算雨量を記入する。
- ⑩ 土石流が発生する1時間前までの実効雨量を記入する。
- ⑪ 土石流が発生した時点の前1時間の雨量を記入する。
- ⑫ 土石流が発生した時点までの実効雨量を記入する。
- ⑬ 初期雨量(R_i)および変曲点Aの時刻を記入する。
- ⑭ 土石流が発生した時点までの有効雨量(R_E)を記入する。
- ⑮ 土石流が発生した時点までの有効時間を記入する。
- ⑯ 土石流が発生した時点までの有効雨量強度(I_E)を記入する。
- ⑰ 発生降雨の総実効雨量を記入する。
- ⑱ 土石流が発生した溪流から代表観測所までの距離を記入する。



市町村名															都道府県名		代表観測所名	
① 整理 番号	② 一連総雨量 (R_c) (年月日)	③ 前期降雨				④ 前期実 効雨量 (R_{wa})		⑤ 非発生降雨に おける最大 1時間雨量 (～日時)	⑥ 最大1時間 雨量発生時 までの積算 雨量	⑦ 最大1時間 雨量発生時 までの実効 雨量 (④+⑥)	⑧ 初期雨量 (R_l) (日時)	⑨ 変曲点Bま での積算雨 量 (日後)	⑩ 変曲点Bま での有効雨 量 (R_e) (⑨-⑧)	⑪ 変曲点Bま での実効雨 量 (④+⑩)	⑫ 有効時間	⑬ 有効雨量 強度 (⑬÷⑫)	⑭ 総実効 雨量 (⑫+⑬)	備考
		2 日 前	3 日 前	4 日 前	-----	14 日 前	半 減 期											

図2.152の記入要領(様式-2)

- ① 降雨資料の古いものから順に番号をつける。
- ② 一連総雨量(R_c)および降り始めと降り終りの時刻を記入する。
- ③ 様式-1の記入要領⑦に同じ。
- ④ 様式-1の記入要領⑧に同じ。
- ⑤ 一連の降雨の中の最大1時間雨量およびその発生時刻を記入する。
- ⑥ 一連の降雨の降り始めから最大1時間雨量が発生する前までの積算雨量を記入する。
- ⑦ 最大1時間雨量が発生する前までの実効雨量を記入する。
- ⑧ 初期雨量(R_l)および変曲点Aの時刻を記入する。
- ⑨ 一連の降雨の降り始めから変曲点Bまでの積算雨量および変曲点Bの時刻を記入する。
- ⑩ 変曲点Bまでの有効雨量を記入する。
- ⑪ 変曲点Bまでの実効雨量を記入する。
- ⑫ 変曲点Bまでの有効時間を記入する。
- ⑬ 変曲点Bまでの有効雨量強度(I_e)を記入する。
- ⑭ 非発生降雨の総実効雨量を記入する。

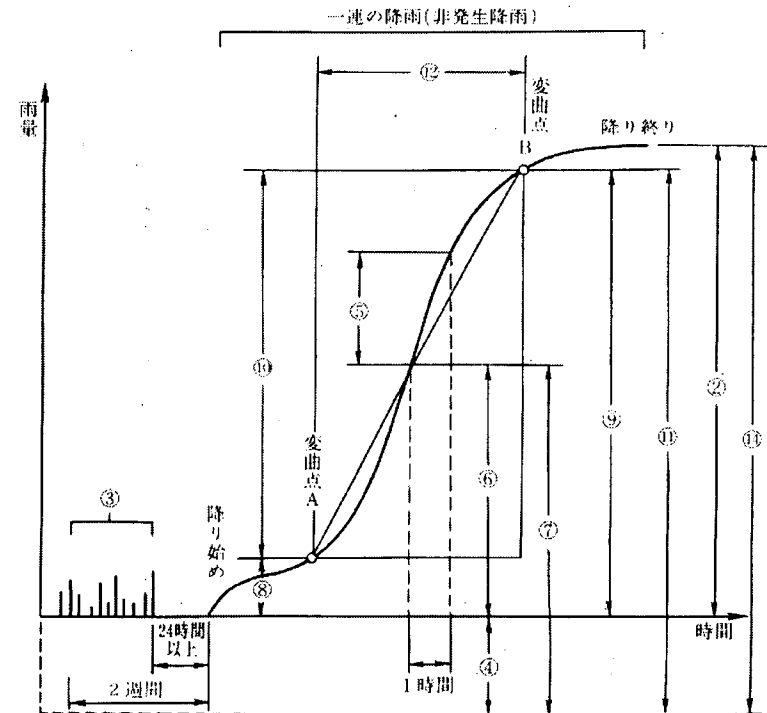


表 3.2 非発生降雨整理表(様式-2)

(2) 降雨指標の定義

様式－1、2の作成にあたっては、様々な降雨指標の演算を行うことになる。

ここでは、様式中の降雨指標の定義について解説する。

① 一連の降雨、一連続雨量 (R_C)、前期降雨、前期雨量 (R_A)

降雨の前後に24時間以上の無降雨期間を有するひとまとまりの降雨を「一連の降雨」と呼び、その総雨量を「一連続雨量 (R_C)」という。この関係を図3.5に示す。

一連の降雨の降り始め時刻から1週間～2週間前程度（後述する実効雨量の半減期と関連する）までの降雨を「前期降雨」といい、その雨量を「前期雨量 (R_A)」という。前期降雨は一連の降雨の降り始め時刻から起算して24時間前までを1日前の降雨、24時間前から48時間前までを2日前の降雨、以下同様に降雨を定める。ただし、一連の降雨の定義から1日前の降雨量は常に0である。

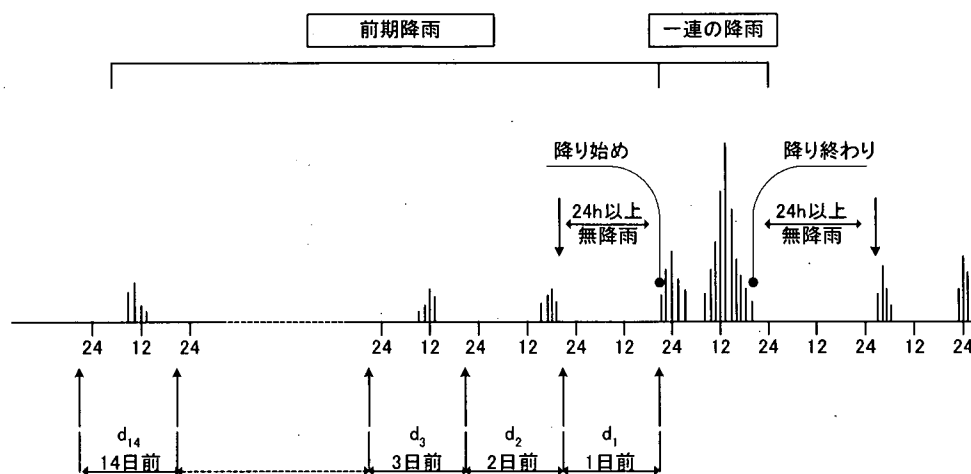


図 3.5 一連の降雨と前期降雨の概念

② 実効雨量 (R_W)、前期実効雨量 (R_{WA})、減少係数

実効雨量とは前期降雨の影響を考慮した積算雨量である。一般に土石流は発生降雨だけではなく前期降雨の影響を受けており、この影響の度合いは、発生降雨との時間差が大きくなるほど減少するものと考えられる。そこで、発生降雨の1日前の24時間雨量についてはその雨量の α_1 倍、2日前については α_2 倍というように、 t 日前までの24時間雨量(d_t とする)に係数を α_t ($\alpha_t < 1$)をかけて、その和を前期実効雨量 (R_{WA})と名付ける。

$$R_{WA} = \alpha_1 d_1 + \alpha_2 d_2 + \dots + \alpha_{14} d_{14} = \sum_{t=1}^{14} \alpha_t d_t$$

ここで、この係数 α_t を t 日目の減少係数と呼ぶ。 α_t の決め方はいろいろ考えられるが半減期を1日とした場合、すなわち1日経つと α の値が α_{t-1} の $1/2$ になるものとして前期実効雨量 (R_{WA})を計算すると、

$$R_{WA} = 0.5d_1 + 0.25d_2 + 0.125d_3 + \dots$$

となる。土石流発生、非発生の判別を行うとき、半減期を2日、3日と置き換えて判別の適正を検討する。このときの減少係数と半減期の関係は次式で与えられる。

$$\alpha_t = 0.5^{t/T}$$

ただし、 T : 半減期の日数、 t : 降り始めからの前日数である。

なお、半減期1日、2日、3日に応じた減少係数の演算結果は表 3.3 のとおりであり、減少係数が約 0.004 未満となる期間では演算値への影響が少ないことが多いので、演算を省略することができる。しかしながら、前期の降雨量が大きく減少係数を乗じた値が無視できない場合はこの限りではない。

表 3.3 半減期と減少係数 (α_t)

降り始めから の前日数	半減期		
	1日	2日	3日
1	0.50000	0.70711	0.79370
2	0.25000	0.50000	0.62996
3	0.12500	0.35355	0.50000
4	0.06250	0.25000	0.39685
5	0.03125	0.17678	0.31498
6	0.01563	0.12500	0.25000
7	0.00781	0.08839	0.19843
8	0.00391	0.06250	0.15749
9	0.00195	0.04419	0.12500
10	0.00098	0.03125	0.09921
11	0.00049	0.02210	0.07875
12	0.00024	0.01563	0.06250
13	0.00012	0.01105	0.04961
14	0.00006	0.00781	0.03937
15	0.00003	0.00552	0.03125
16	0.00002	0.00391	0.02480
17	0.00001	0.00276	0.01969
18	0.00000	0.00195	0.01563
19	0.00000	0.00138	0.01240
20	0.00000	0.00098	0.00984
21	0.00000	0.00069	0.00781
22	0.00000	0.00049	0.00620
23	0.00000	0.00035	0.00492
24	0.00000	0.00024	0.00391

注1：表中の網掛けは、実効雨量に大きな影響を与えない期間の目安

注2：例えば減少係数 0.004 のときの 24 時間雨量 200mm とすると
実効雨量に加算される値は $0.004 \times 200\text{mm} = 0.8\text{mm}$ となる。

③ 変曲点A、変曲点B

変曲点Aとは一連の降雨の積算雨量曲線において急に立ち上がる点をいい、通常最初に1時間雨量4mm以上の降雨が降り始めた点をいう。

また、変曲点Bとは一連の降雨の積算雨量曲線において急に伸びが少なくなる点をいい、時間雨量4mm以下の降雨が3時間以上継続し始めた時点という(図 3.6)。

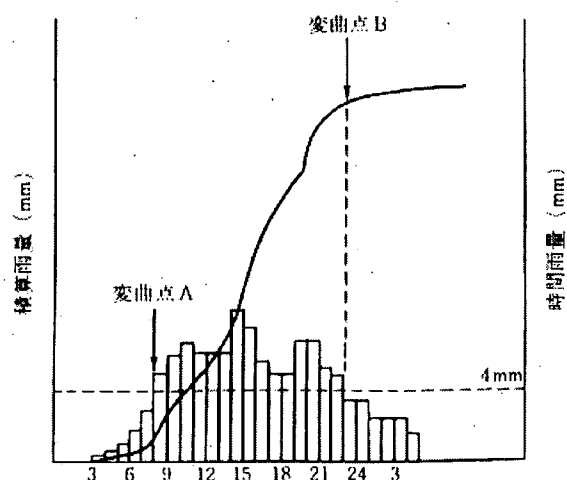


図 3.6 変曲点AとBの定義図

④ 初期雨量 (R_I)

初期雨量とは一連降雨の降り始めから変曲点 A までの積算雨量をいう。

⑤ 有効雨量 (R_E)、有効時間、有効雨量強度 (I_E)

有効雨量とは、ある時点までの一連の降雨の積算雨量から変曲点 A までの積算雨量を差し引いた雨量である。すなわち、変曲点 A 以降の積算雨量をいう。有効時間とは変曲点 A 以降の有効雨量までの降雨時間をいう。有効雨量を有効時間で除した値を有効雨量強度という (図 3.7)。

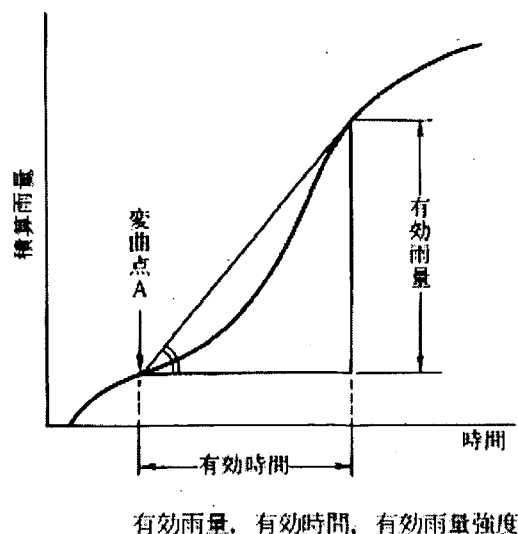


図 3.7 有効雨量、有効時間、有効雨量強度

(3) 土石流発生時の降雨資料の收集整理

過去土石流が発生した時刻を文献や聞き込み調査等により調査し、近傍の雨量観測所の降雨を表 3.1 の項目で整理する。

発生時刻によって発生時までの降雨量が決まるので、精度の高い情報を得よう努めることが重要である。特に古い災害の場合、がけ崩れの発生か土石流の発生か判別し難く、また発生時刻も判然としない場合が多いので、広く行政機関等の災害資料を収集し調査する必要がある。なお、雨量観測所と土石流発生渓流との距離はできるだけ近いほうが望ましく、この条件にあわない場合は、今後資料を整備することを目標として雨量計の新設を計画することが望ましい。

(4) 土石流非発生時の降雨資料の收集整理

一連の降雨のうち、土石流が発生しなかった降雨について代表雨量観測所の降雨資料より整理し、土石流の発生する限界を判別する資料とするものである。

土石流の発生と関連性の少ない少量の一連の降雨を含めて取り扱うことは煩雑であるため、「連続雨量 80mm 以上または 1 時間雨量強度が 20mm 以上」の降雨量を有するものを対象とし、表 3.2 の様式で整理する。

(5) A 案による基準雨量の設定

① 発生危険基準線の設定

様式-1 (表 3.1) の⑩⑪、様式-2 (表 3.2) の⑦と⑤をそれぞれ横軸、縦軸にとって XY グラフを作成する (図 3.8)。

XY グラフに図示する各降雨指標は表 3.4 のように定義されるものであり、横軸と縦軸の時刻を意図的に 1 時間ずらしていることに注意が必要である。これは後述する警戒基準雨量や避難基準雨量を単一の降雨指標で表現するための工夫であり、数学で用いられる通常の XY グラフとは本質的に異なるものである。

表 3.4 図示する降雨指標の定義

	X 軸（横軸）	Y 軸（縦軸）
発生降雨	⑩：土石流が発生する1時間前までの実効雨量	⑪：土石流が発生した時点の前1時間の雨量
非発生降雨	⑦：最大1時間雨量が発生する前までの実効雨量	⑤：一連の降雨中の最大1時間雨量

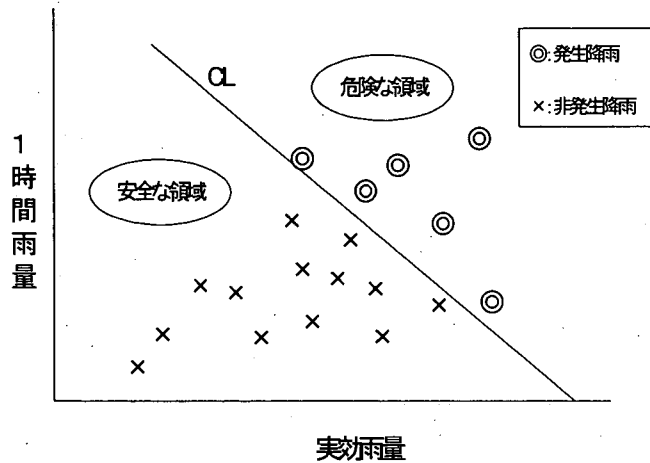


図 3.8 A案によるXYグラフ

図 3.8 において、発生降雨と非発生降雨との境界線を引くと、この直線の右上側は土石流の発生に関して危険な領域、左下側は一応安全な領域となる。なお、この境界線を土石流発生危険基準線（Critical Line；略してCL）という。

CL の設定に際しては、図 3.8 のように発生・非発生降雨が良く分離した分布を示すことは稀であり、実務上は後述する表 3.9 の設定パターンが参考となる。

なお、CL の傾きを「a」とするとき、傾き a は図 3.9 に示すように「-1」より緩やかなものとするべきであり、「 $-1 < a < 0$ 」の範囲内で定める。

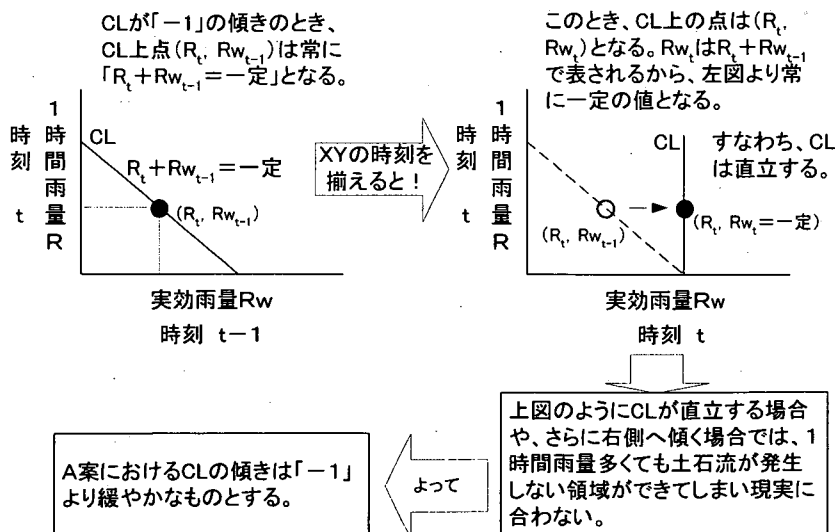


図 3.9 A案におけるCLの傾きの限度

② 警戒・避難基準線の設定

警戒発令を行うための基準雨量（以下「警戒基準雨量」と呼ぶ）及び避難の指示を行うための基準雨量（以下「避難基準雨量」と呼ぶ）の設定方法について以下に示す。以下では、警戒基準雨量を示す基準線を警戒基準線（Warning Line；略して WL）、避難基準雨量を示す基準線を避難基準線（Evacuation Line；略して EL）と称する。

警戒・避難基準線の設定には、まず警戒の発令や避難の指示のタイミングを定める必要がある。すなわち、土石流の発生が予想される時点に対して警戒の発令や避難の指示をどれぐらいの時間前に行うかについて設定する。さらに、それぞれの時間内に想定される降雨量と CL をもとに基準線を設定する。

指針案では、表 3.5 に示す条件による設定方法を例示しているが、発令・指示のタイミングについては地域の実状に応じて定めるべきものとしている。なお、想定雨量については空振の頻度等の状況に応じて確率雨量や短時間予測雨量の採用などを検討するとよい。

表 3.5 指針における警戒の発令と避難の指示のタイミングと雨量の想定

分 類	発令・指示のタイミング	左時間内の想定雨量
警戒の発令	CL 到達 2 時間前	既往最大 2 時間雨量 (R_{H2M})
避難の指示	CL 到達 1 時間前	既往最大 1 時間雨量 (R_{H1M})

以下では、表 3.5 を前提とした場合の設定方法を例示する。

《EL の設定》

既往最大 1 時間雨量を R_{H1M} とする。

図 3.10 は、ある降雨の実効雨量が R_2 に達し、今後 1 時間の想定雨量が R_{H1M} 以上あれば、CL の右上側、すなわち危険な領域に入ると読図するものである。今後 1 時間の想定雨量 R_{H1M} を既往最大 1 時間雨量などとして R_2 を導けばそれが避難基準雨量となる。

実際の EL の設定方法は、今後 1 時間の想定雨量 R_{H1M} を縦軸にとり、その点を通り横軸に平行な直線を引く。次に、この直線と CL の交点から横軸に向かって垂線を下ろす。これを EL とする。

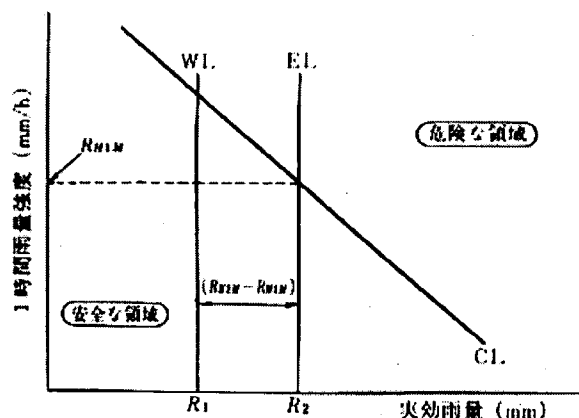


図 3.10 警戒・避難基準線の設定 (A 案)

《WL の設定》

既往最大 2 時間降雨を R_{H2M} とする。

EL に達する 1 時間前が WL とすれば、EL を $(R_{H2M} - R_{H1M})$ だけ左へ平行移動した直線が WL となる (図 3.10)。

③ 土石流発生基準線、警戒基準線、避難基準線の妥当性の検討

設定された CL (土石流発生危険基準線)、EL (警戒基準線)、WL (避難基準線) について、分離性、発令頻度、空振り頻度について妥当性を検討する。

《分離性の検討》

CL を境界として、右上側にすべての発生降雨、左下側にすべての非発生降雨が分布する場合、発生降雨と非発生降雨がよい分離性を示していると言える。しかし、実際には図 3.11 のように CL の右上側に非発生降雨が分布する場合があるので、CL の分離性を非発生降雨数によって検討する。

非発生降雨の総資料数を kn 個、非発生降雨のうち CL の左下側にある資料数を knc 個として、

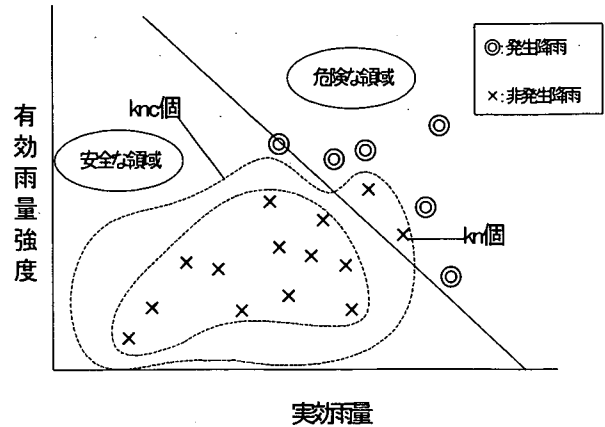


図 3.11 分離性の検討

$$Sc = \frac{knc}{kn}$$

を計算する。Sc の値が大きいほど分離性がよいと判断する。

《警報の発令及び避難の指示頻度の検討》

設定した WL、EL について、1 年あたりの警報の発令頻度と避難の指示頻度を検討する。発生降雨の総実効雨量 (様式-1、⑩) が図 3.10 に示す R_1 、 R_2 を超えるものの資料数をそれぞれ kyw 個、 kye 個とし、非発生降雨の総実効雨量が R_1 、 R_2 をこえるものの資料数をそれぞれ knw 個、 kne 個とする。このとき、警報の発令頻度及び避難の指示頻度は以下のように求められる。

$$\text{警報の発令頻度: } Fw = \frac{kyw + knw}{n} \quad (\text{回/年})$$

$$\text{避難の指示頻度: } Fe = \frac{kye + kne}{n} \quad (\text{回/年})$$

ただし、 n は資料収集年数

《警報の発令及び避難の指示空振り頻度の検討》

警報の発令、避難の指示が行われても、実際には土石流が発生しないことがある。そのような空振りの頻度は以下の式で求められる。ここでいう空振りは、CL の精度を意味するものではなく、EL・WL の設定に用いた想定雨量の妥当性を評価するものである。

$$\text{警報の発令空振り頻度: } Mw = \frac{knw}{n} \quad (\text{回/年})$$

$$\text{避難の指示空振り頻度: } Me = \frac{kne}{n} \quad (\text{回/年})$$

④ 警戒・避難基準雨量の設定

複数案の検討ののち、CL（土石流発生危険基準線）、EL（警戒基準線）、WL（避難基準線）が妥当なものであると判断されたものについて、警戒基準雨量、避難基準雨量を次のように設定する。

警戒基準雨量： R_1 (mm)

避難基準雨量： R_2 (mm)

（6）B案による基準雨量の設定

① 発生危険基準線の設定

様式－1及び様式－2で整理した各発生降雨、非発生降雨について「有効雨量強度（縦軸）－実効雨量（横軸）」の関係を図示する。すなわち、様式－1（発生降雨整理表）では「⑫土石流が発生した時点までの実効雨量」と「⑯土石流が発生した時点までの有効雨量強度」を、様式－2（非発生降雨整理表）では「⑪変曲点Bまでの実効雨量」と「⑬変曲点Bまでの有効雨量強度」をプロットしてCLを設定する。

CLの設定パターンについては、A案と同様に表 3.9 が参考となる。

なお、B案は先のA案と異なり、横軸と縦軸に時間の「ズレ」がないため、A案において述べたCLの傾きの制約（-1より大きい）は適用されない。

② 警戒・避難基準線の設定

発令・指示のタイミングや想定雨量の考え方はA案と共通であり、表 3.5 を条件とした設定方法を以下に例示する。

《EL の設定》

図 3.12 において、CL 上の任意の点を $P(R_p, I_p)$ 、想定雨量を既往最大1時間雨量 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、 $I_{p'}$ は以下のように示される。なお、式の誘導は参考資料を参照されたい。

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

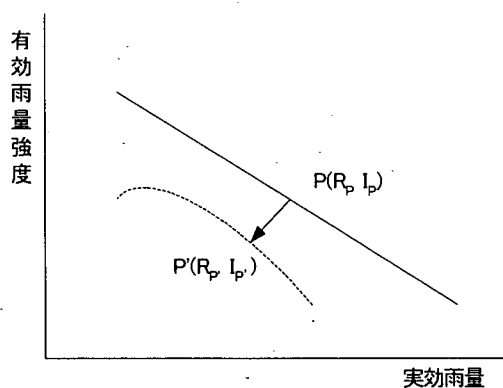


図 3.12 避難基準線の設定

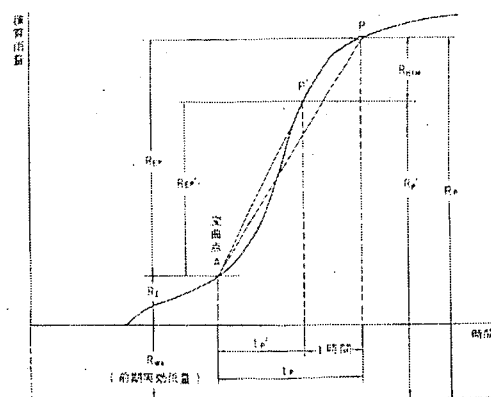


図 3.13 時間－積算雨量関係

また、避難基準線の一般式は、Y：有効降雨強度、X：実効雨量とすると、

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

と示される。

《WL の設定》

EL の設定と同様に、CL 上の任意の点を P (R_p , I_p)、想定雨量を既往最大 2 時間雨量 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。

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

また、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。

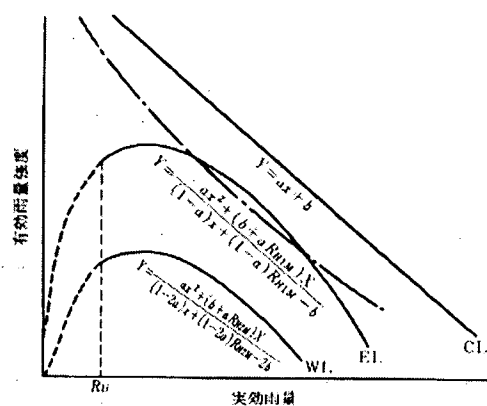


図 3.14 避難基準線・警戒基準線の一般式

《EL、WL の曲線形》

EL と WL は原点 (0, 0) を通り、上に凸の曲線である。 R_U は、この値以下では土石流の発生に影響しないと考えられる実効雨量で、一般的には 40mm 程度とするが、収集した降雨資料によりその地域に適した値があれば、その値を採用する。

③ 土石流発生基準線、警戒基準線、避難基準線の妥当性の検討

検討方法の考え方は A 案に同じである。取り扱いの異なる点を中心に妥当性の検討方法を述べる。

《分離性の検討》

A 案と同様の手法を用いて CL の分離性を検討する。

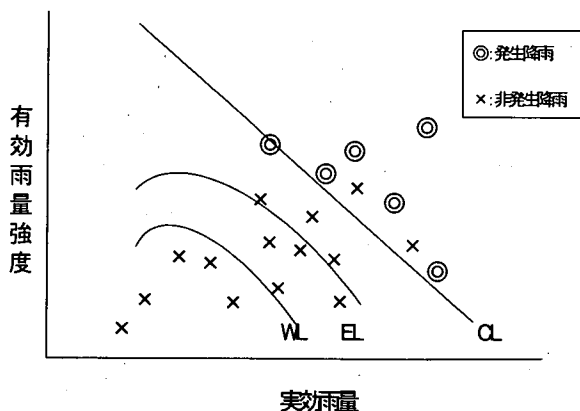


図 3.15 警報の発令及び避難の指示頻度の検討

《警報の発令及び避難の指示頻度の検討》

設定した WL、EL について、警報の発令頻度と避難の指示頻度を検討する。発生降雨の総実効雨量が図 3.15 に示す WL、EL を超えるものの資料数をそれぞれ k'_{yw} 個、 k'_{ye} 個とし、非発生降雨の総実効雨量が WL、EL をこえるものの資料数をそれぞれ k'_{nw} 個、 k'_{ne} 個とする。すると、警報の発令頻度及び避難の指示頻度は以下のように求められる。

$$\text{警報の発令頻度: } F'w = \frac{k'_{yw} + k'_{nw}}{n} \quad (\text{回/年})$$

$$\text{避難の指示頻度: } F'e = \frac{k'_{ye} + k'_{ne}}{n} \quad (\text{回/年})$$

ただし、 n は資料収集年数

《警報の発令及び避難の指示空振り頻度の検討》

警報の発令、避難の指示が行われても、実際には土石流が発生しないことがある。そのような空振りの頻度は以下の式で求められる。

$$\text{警報の発令空振り頻度: } M'w = \frac{k'_{nw}}{n} \quad (\text{回/年})$$

$$\text{避難の指示空振り頻度: } M'e = \frac{k'_{ne}}{n} \quad (\text{回/年})$$

④ 警戒・避難基準雨量の設定

複数案の検討ののち、CL、EL、WL が妥当なものであると判断されたものについて、警戒基準雨量と避難基準雨量を次のように設定する。

$$\text{警戒基準雨量: } Y = \frac{aX^2 + (b + aR_{HIM})X}{(1 - 2a)X + (1 - 2a)R_{HIM} - 2b} \quad (X \geq R_U)$$

$$\text{避難基準雨量: } Y = \frac{aX^2 + (b + aR_{HIM})X}{(1 - a)X + (1 - a)R_{HIM} - b} \quad (X \geq R_U)$$

ただし、 a 、 b は定数

3.2.3. 手法の特徴と利用にあたっての注意点

(1) スネークラインによる判定方法と留意点

スネークラインは、2つの降雨指標の変化について時刻を追って図 3.16 のように図示するものである。図中では 30 分間隔ごとにスネークラインを表示しているが、より短時間の間隔で表示すればよりの確な判定が可能となる。

なお、図 3.16 は指針からの抜粋であるが、この図にはいくつかの誤解を招きやすい点があるので、以下のことに十分留意する必要がある。

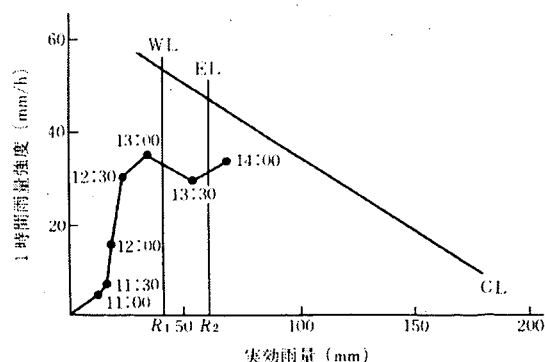


図 3.16 指針におけるスネークラインを用いた判定例

図 3.16 は、A 案によって予め設定された EL、WL に対して、現在までの降雨指標の到達状況を視覚的に見ようとするものである。図中には CL も表示されており一見するとスネークラインの CL への到達状況も判定しているように見える。しかしながら、基準雨量の設定方法で述べたように、A 案では横軸と縦軸に時刻の「ズレ」があり、現時点の実効雨量が横軸上の R1 あるいは R2 に到達したとき、想定雨量とした既往最大 2 時間雨量や既往最大 1 時間雨量等が今後生じれば CL に到達することを意味するものである。すなわち、本来は縦軸が今後の予測雨量を意味し、指針で例示されるように横軸と同時刻の 1 時間雨量をあてるべきでない。よって、指針で例示されたスネークラインと CL を単純に見比べると間違いを生じることがあるので注意を要する。

A 案における EL、WL は横軸の実効雨量のみで定義される基準であるから、本来縦軸の指標の推移は必要としない。縦軸の指標の推移もあわせてみるならば、図 3.17 のような表現で要が足りるうえ、時間軸もわかりやすく誤解を生じる恐れが少ない。

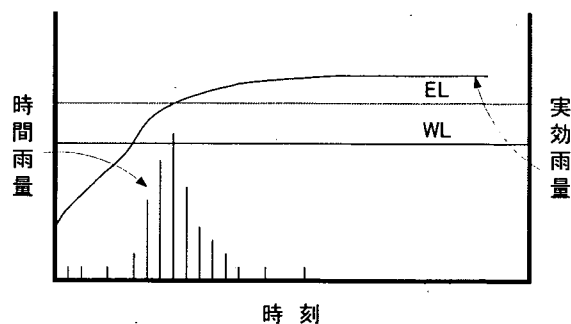


図 3.17 判定方法の改善

以上のことは、A 案における場合の問題点であり、横軸と縦軸に時刻の「ズレ」のない B 案には該当しない。

(2) スネークラインの推移特性

A 案・B 案におけるスネークラインは、実効雨量の演算が降り始めからの連続雨量に前期の実効雨量分を嵩上げするような方法となっているため、横軸に対しては一連の降雨期間中常に増加する。

そのため、少降雨が長期間にわたり継続するケースや断続的に降り続くケースでは容易に基準を超過したり、超過する期間が長引くことがある。特に基準を解除しようとする場合に問題となることが多い。

3.3. 矢野による手法

3.3.1. 適 用

(1) 対象とする現象

矢野による手法（矢野案）は、前述の指針案によるA案の改良法を示したものであり、指針案と同じく「土石流」を対象として検討されている。

(2) 適用地域

適用地域は、指針案と同じく土石流危険渓流であり、設定のための降雨データや土石流災害の発生実績が十分でない現状等を踏まえると、地形・地質・植生等が類似する近傍の土石流危険渓流では同一の基準雨量を採用するとよい。

(3) 降雨指標

矢野案は、A案における実効雨量の推移特性に関する問題点を改善したものであり、具体的には時間単位で減少係数を乗じて積算する方法を提案している。

これにより改善された事項を整理すると、表 3.6 のとおりである。

表 3.6 矢野案によるA案の改善事項

1	A案による実効雨量の演算方法は、一連の降雨期間内は単純な積算値として演算される。例えば、一連の降雨期間が4日と1日の降雨において、それぞれ降り終わり時点の実効雨量を計算しようとするとき、前者では降り終わりから4日以上前の降雨量に減少を評価し、後者では降り終わりから1日以上前に減少を評価するといった不平等な扱いとなる。そのため、一連の降雨を定義する必要のない実効雨量の演算方法を採用することで、この問題を解消している。
2	24 時間以上の無降雨が生じない限りは増加の一途である従来型の実効雨量に比べ、降雨量の減少に伴い実効雨量が減衰すること、同時に土中水分量の推移に調和的な特性をもつことによって、長雨等による発生・非発生降雨の分離性が良好となる。
3	スネークラインの演算は、降り始めや降り終わりの設定を必要とせず、常時連続的に演算でき、コンピュータを利用したシステムづくりが容易である。
4	スネークラインの推移が降雨の減少とともに原点方向へ移動するため、基準解除の指標として利用することも可能である（下図参照）。

3.3.2. 設定方法

設定方法については、A案と異なる実効雨量の演算方法について述べる。その他の方法についてはA案を踏襲するため図 3.3 の流れに沿って検討する。

実効雨量の演算は、土石流発生 1 時間前までの降雨をすべて前期降雨として減少係数を乗じたうえで下式により積算する。

実効雨量の計算にあたっては、現時点よりどれぐらい前時刻まで遡って計算するかが問題となる。この計算期間は、A案・B案の実効雨量の計算方法で述べたように実効雨量への影響を考慮して減少係数 0.004 以上となる期間が目安となろう。

$$Rw = \sum \alpha_{li} \times R_{li}$$

Rw : 実効雨量

R_{li} : i 時間前の 1 時間雨量

α_{li} : i 時間前の減少係数

$\alpha_{li} = 0.5^{i/T}$ 、 T : 半減期 (時間)

なお、非発生降雨の場合はA案と同様に一連の降雨期間中の最大時間雨量時刻において実効雨量の演算を行うことになる。

3.3.3. 手法の特徴と利用にあたっての注意点

(1) 半減期の取り扱い

半減期は、地域の流出・貯留特性を表現する指標と考えられる。半減期の設定にあたっては、タンクモデル等の流出解析により別途検討したり、試行錯誤的に発生・非発生降雨を分離しやすい半減期を求めて経験的に得られた値とするなど、地域特性にあったものとする必要がある。

(2) 解除時期の判断

この手法によるスネークラインは、避難解除の判断に有効な情報ではあるが、実際の解除にあたっては、気象情報、今後の予測雨量、周辺における地表の変化、当該溪流の状況等を総合的に判断しなければならない。特に、避難指示・勧告の解除の場合は、降雨の状況のみならず、パトロール等によって周辺部の状況を十分確認の上、解除すべきである。

3.4. 総合土砂災害対策検討会による手法

3.4.1. 適用

(1) 対象とする現象

総合土砂災害対策検討会による手法（提言案）は、建設省（現国土交通省）が主催した「総合土砂災害対策検討会」の中で検討されたものであり、「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手法（案）」として提言されている。

「集中的に発生するがけ崩れ」とは、定性的に実効雨量が一定以上となった場合に、一連の降雨のピーク付近で面的に限られた範囲で発生する崩壊と定義されるものである。

このように提言案は「集中的に発生するがけ崩れ」に対して示されたものであるが、手法が導かれる背景となったタンクモデルが土石流の発生予測にも有効性を示すことから、土石流に対しても有効な手法と評価されている。

(2) 適用地域

急傾斜地崩壊危険箇所などがけ崩れの恐れがある箇所に適用される。設定のための降雨データやがけ崩れ災害の発生実績が十分でない現状等を踏まえると、地形・地質・植生等が類似する近傍箇所では同一の基準雨量を採用するとよい。

(3) 降雨指標

これまでの研究から、タンクモデルの貯留高の変動によりがけ崩れ発生タイミングを説明できることが知られており、地表水の変動を示すタンクモデル1段目の貯留高さの変動と半減期1.5時間の実効雨量の変動が、また、地下水の変動を示すタンクモデル2・3段目の貯留高の変動と半減期72時間の実効雨量の変動がよく合致することが確認されている。

そこで、がけ崩れの発生限界降雨を評価する指標は、取り扱いの比較的容易な実効雨量としてCLを設定しようとしたものである。

なお、この手法における実効雨量の演算方法は、土石流を対象とする矢野案と同じである。

3.4.2. 設定方法

(1) 設定手順

設定手順や具体的手法については、設定手法案の中で具体的に記されていない部分もあるが、A案・B案の手法に準じて整理すると、図3.18の手順が考えられる。

図3.18に示すように、まず降雨資料を収集するための雨量観測所を選定する。次に、がけ崩れ発生時の降雨（発生降雨と称す）資料とがけ崩れ非発生時の降雨（非発生降雨と称す）資料を収集整理する。がけ崩れの発生に遅れることの多い土石流についても有効な資料となるため、あわせて収集・整理する。

さらに、集中的に発生するがけ崩れとそれ以外の現象を分類整理し、発生降雨と非発生降雨について、横軸を半減期72時間の実効雨量、縦軸を半減期1.5時間の実効雨量としたXYグラフを作成し、同図上で各種基準線を設定する。

(2) 降雨指標の定義

本手法では、降雨指標として実効雨量のみを取り扱うので、実効雨量の定義について述べる。

実効雨量の演算方法は、前述の矢野案と同じであり、土砂災害発生1時間前までの降雨をすべて前期降雨として減少係数を乗じたうえで積算するものである。

具体的には、下式により土砂災害の発生時点や非発生時点の実効雨量を半減期 1.5 時間、72 時間とした2種類の指標を演算する。

実効雨量の計算にあたっては、現時点よりどれくらい前時刻まで遡って計算するかが問題となる。この計算期間は、A案・B案の実効雨量の計算方法で述べたように実効雨量への影響を考慮して減少係数 0.004 以上となる期間が目安となろう。減少係数が 0.004 未満となるのは半減期 1.5 時間の場合で約 12 時間前、半減期 72 時間の場合で約 574 時間（約 24 日）前である。

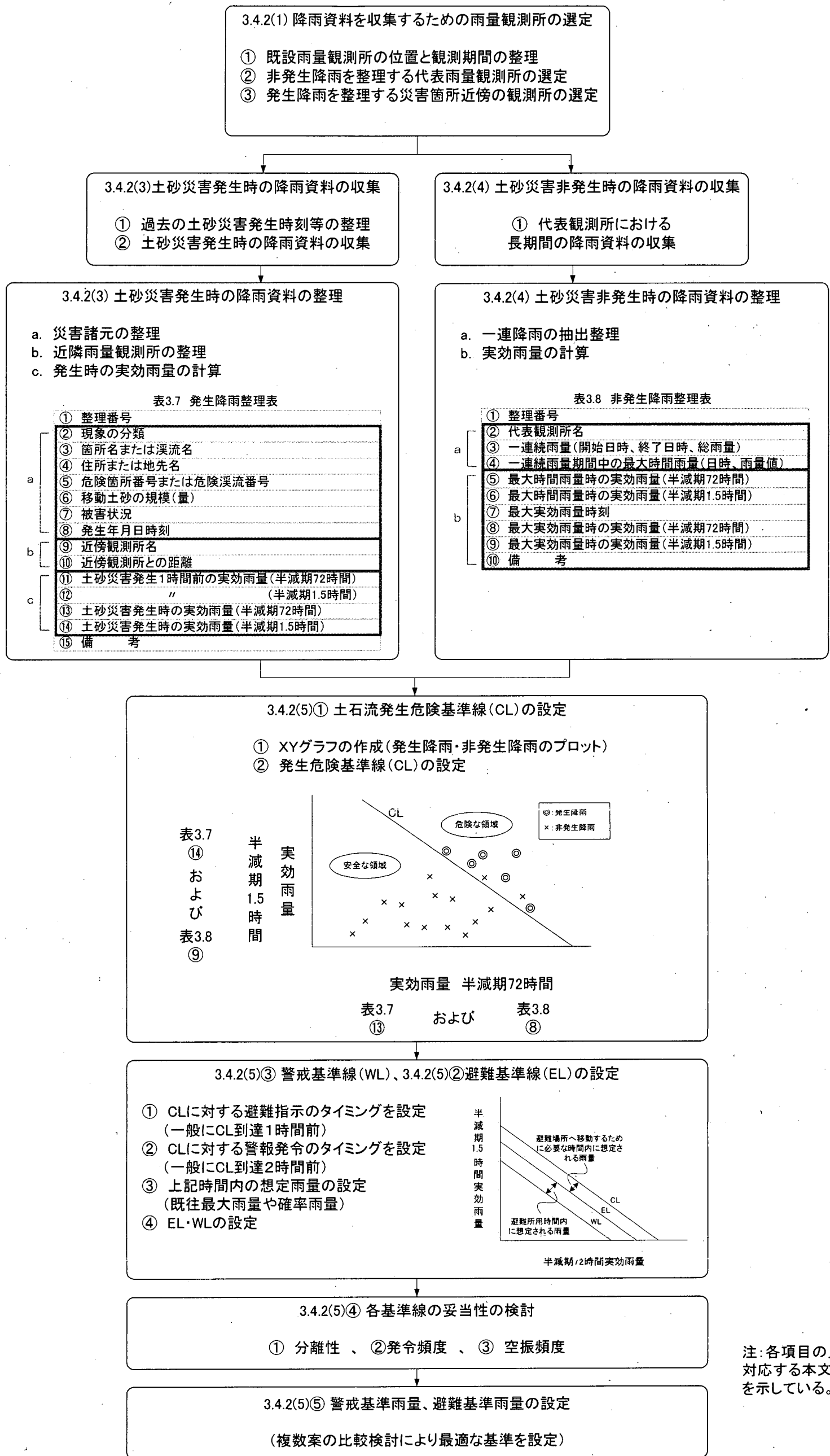
$$Rw = \sum \alpha_{li} \times R_{li}$$

Rw : 実効雨量

R_{li} : i 時間前の 1 時間雨量

α_{li} : i 時間前の減少係数

$\alpha_{li} = 0.5^{i/T}$ 、 T : 半減期 (時間)



注:各項目の見出し番号は
対応する本文の見出し番号
を示している。

図 3.18 提言案の基準雨量設定手順

(3) 土砂災害発生時の降雨資料の収集整理

過去土砂災害が発生した時刻を文献や聞き込み調査等により調査し、近傍の雨量観測所の降雨資料をもとに表 3.7 に整理する。

発生時刻によって、発生までの降雨量が決まるので、精度の高い情報を得るよう努めることが重要である。特に古い災害の場合、がけ崩れの発生か土石流の発生か判別し難く、また発生時刻も判然としない場合が多いので、広く行政機関等の災害資料を収集し調査する必要がある。なお、雨量観測所と土石流発生溪流との距離はできるだけ近いほうが望ましく、この条件にあわない場合は、今後資料を整備することを目標として雨量計の新設を計画することが望ましい。

表 3.7 発生降雨整理表

整理項目	適 用
① 整理番号	
② 現象の分類	がけ崩れ（集中発生）、がけ崩れ（単発）、土石流等
③ 箇所名または溪流名	
④ 住所または地先名	
⑤ 危険箇所番号または危険溪流番号	
⑥ 移動土砂の規模（量）	
⑦ 被害状況	
⑧ 発生年月日時刻	
⑨ 近傍観測所名	
⑩ 近傍観測所との距離	
⑪ 土砂災害発生 1 時間前の実効雨量（半減期 72 時間）	X Y グラフに図示
⑫ "（半減期 1.5 時間）	"
⑬ 土砂災害発生時の実効雨量（半減期 72 時間）	"
⑭ "（半減期 1.5 時間）	"
⑮ 備 考	

(4) 土砂災害非発生時の降雨資料の収集整理

提言案の中では、非発生時の降雨資料の取り扱いが記されていないが、基準雨量の設定において有効な資料となるため、A 案・B 案に準じた方法を示す。

前後に 24 時間の無降雨期間を有する一連の降雨のうち、土砂災害が発生しなかった降雨について資料を整理する。

降雨量の少ない一連の降雨の全てを取り扱うことは煩雑であるため、「連続雨量 40mm 以上または 1 時間雨量強度が 10mm 以上」の降雨量を有するものを対象とし、表 3.8 の様式で整理する。なお、A 案・B 案では、「連続雨量 80mm 以上または 1 時間雨量強度が 20mm 以上」を基準としているが、土石流より少降雨で発生することの多いがけ崩れを取り扱うために基準を半分の値に引き下げた方法を示したが、発生降雨量や作業性などの状況に応じて適宜変更するとよい。

表 3.8 非発生降雨整理表

整理項目	適 用
① 整理番号	
② 代表観測所名	
③ 一連続雨量（開始日時、終了日時、総雨量）	A 案・B 案に同じ
④ 一連続雨量期間中の最大時間雨量（日時、雨量値）	
⑤ 最大時間雨量時の実効雨量（半減期 72 時間）	
⑥ " （半減期 1.5 時間）	
⑦ 最大実効雨量時刻	一連続降雨期間中における $\sqrt{x^2 + y^2}$ の最大時刻（原点 より最も離れる時刻）
⑧ 最大実効雨量時の実効雨量（半減期 72 時間）	XY グラフに図示
⑨ " （半減期 1.5 時間）	"
⑩ 備 考	

（5）基準雨量の設定

① 発生危険基準線の設定

対象とする地域において集中的に発生したがけ崩れのデータを基に、がけ崩れ発生時刻までの降雨量および非発生時刻までの降雨量を実効雨量（時間半減期 72 時間、時間半減期 1.5 時間）で評価し、その境界線として発生危険基準線（CL）を設定する。CL の設定パターンは表 3.9 が参考となる。

なお、降雨データが、時間雨量しか入手できない場合には、がけ崩れ発生 1 時間前の実効雨量と、がけ崩れ発生時刻の実効雨量との中間で CL を設定する方法もある（図 3.19）。

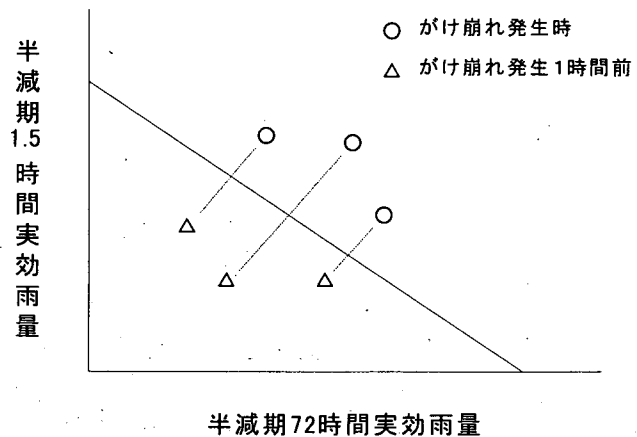


図 3.19 発生危険基準線（CL）の設定

② 避難基準線の設定

今後の降雨状況に配慮して、避難場所へ移動するために必要な時間後に、実効雨量によるスネークラインが CL へ到達することが予想される場合、避難行動を開始するものとし、この境界線を避難基準線（EL）とする（図 3.20(a)）。

今後の降雨状況については、レーダ雨量計等を利用した短期降雨予測値により把握するものとするが当該地域における精度の確認ののち利用を判断する。短期降雨予測値が利用できないと判断される場合は、その地域における降雨実績等を参考に避難に要する時間内の想定雨量を定めて EL を設定する。

避難に要する時間は地域の実態に応じて定めることが望ましく、以下では避難に要する時間を1時間とした場合の設定方法について例示する。

- 1) A案・B案と同様、その地域における既往最大時間雨量を利用する（図 3.20(b)）。
- 2) 1)として設定した場合、発令頻度、空振り頻度が多くなった際には、土石流警戒・避難基準雨量で適用されることの多い10年超過確率時間雨量を利用する（図 3.20(c)）。
- 3) 2)として設定した場合、やはり発令頻度、空振り頻度が多くなった場合2年超過確率時間雨量を下限として設定する（図 3.20(d)）。

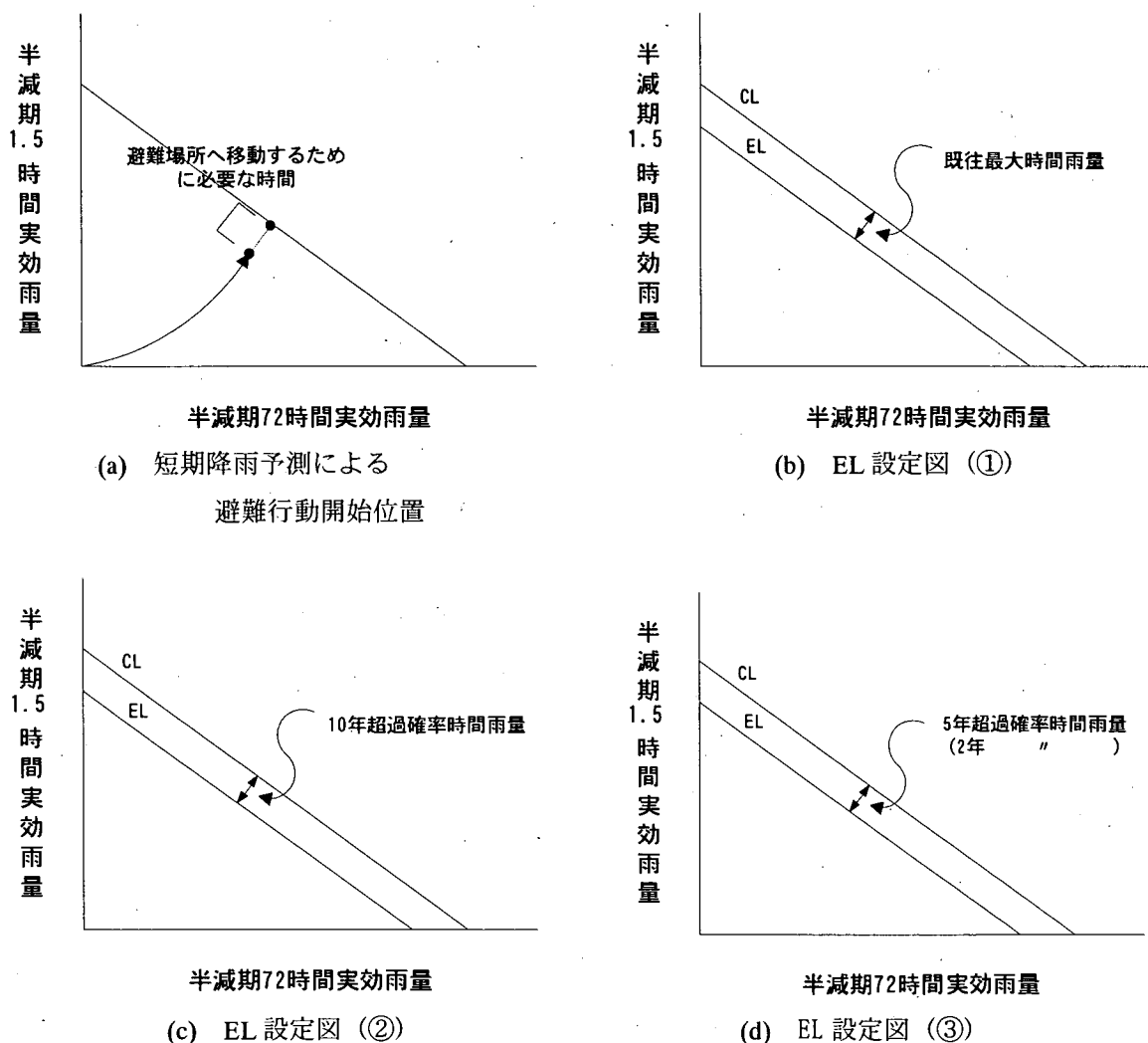


図 3.20 避難基準線の設定

③ 警戒基準線の設定

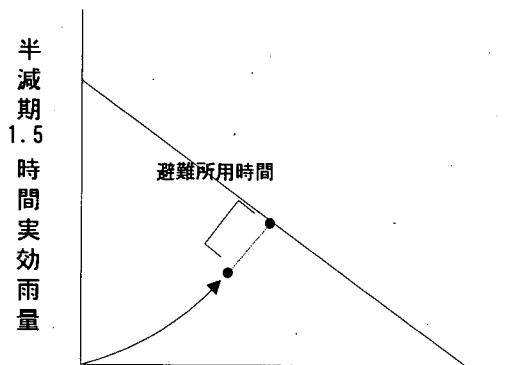
ELの設定と同様に、今後の降雨状況に配慮して、実効雨量によるスネークラインが次の条件を満たす場合、警戒体制を実施するものとし、この境界線をWLとする。

- 避難所要時間後には、実効雨量によるスネークラインが、CLに到達すると予想される場合。避難所要時間とは、避難準備時間と避難場所へ移動するために必要な時間の合計とする。
- 避難準備時間後には、実効雨量によるスネークラインが、ELに到達すると予想される場合。

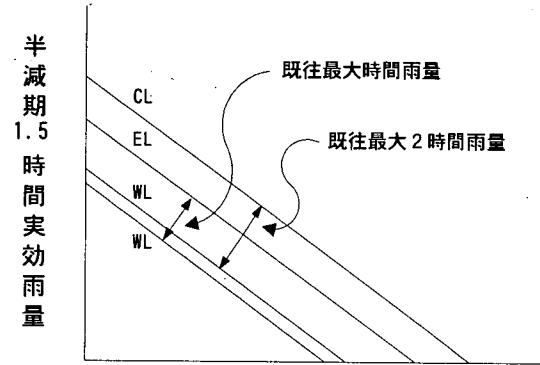
今後の降雨状況については、レーダ雨量計等を利用した短期降雨予測値により把握するものとするが当該地域における精度の確認ののち利用を判断する。短期降雨予測値が利用できないと判断される場合は、その地域における降雨実績等を参考に避難所用時間内の想定雨量を定めてWLを設定する。

避難所用時間は地域の実態に応じて定めることが望ましく、以下では避難準備時間を1時間、避難場所へ移動するために必要な時間を1時間の合計2時間を避難所用時間としたWLの設定方法について例示する。

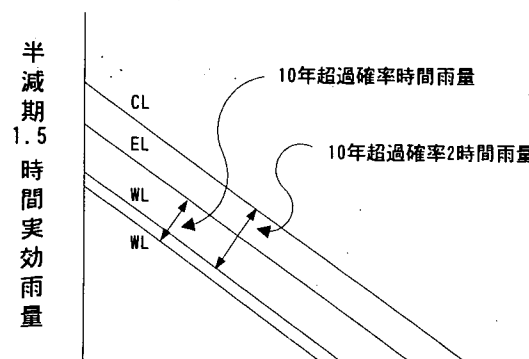
- 1) A案・B案と同様、その地域における既往最大時間雨量を利用する。または、既往最大2時間雨量を利用する（図 3.21(b)）。
- 2) 1)として設定した場合、発令頻度、空振り頻度が多くなった際には、10年超過確率時間雨量を利用する。または、10年超過確率2時間雨量を利用する（図 3.21(c)）。
- 3) 2)として設定した場合、やはり発令頻度、空振り頻が多くなった場合、2年超過確率時間雨量を下限として設定するものとする。または、2年超過確率2時間雨量を利用する（図 3.21(d)）。



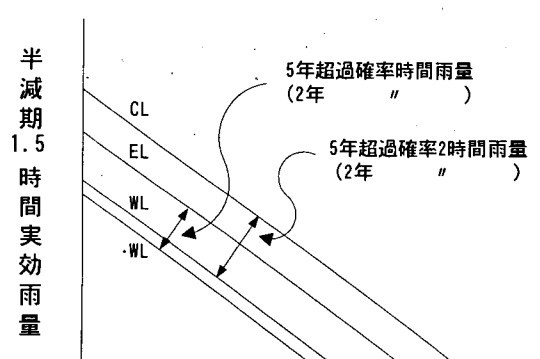
半減期72時間実効雨量
(a) 短期降雨予測による
避難準備行動開始位置



半減期72時間実効雨量
(b) WL 設定図 (①)



半減期72時間実効雨量
(c) WL 設定図 (②)



半減期72時間実効雨量
(d) WL 設定図 (③)

図 3.21 警戒基準線の設定

④ 土石流発生基準線、警戒基準線、避難基準線の妥当性の検討

各基準線の妥当性の評価方法は、設定手法案の中では述べられていないが、A案・B案の方法と同様に行うことが考えられる。

なお、非発生降雨が各基準を超過する頻度を求めるとき、基準線の傾きにもよるが表 3.8 ⑦、⑧の最大実効雨量時点で評価するとよい。

⑤ 警戒・避難基準雨量の設定

複数案の検討ののち、CL、EL、WL が妥当なものであると判断されたものについて、警戒基準雨量と避難基準雨量を設定する。

3.4.3. 手法の特徴と利用にあたっての注意点

(1) 半減期の取り扱い

半減期は、地域の流出・貯留特性を表現する指標と考えられる。地表の特性を表す半減期 1.5 時間については、著しい地域差は考えにくいですが、地中の特性を表す半減期 72 時間については地域差に応じた調整を行うことも試みたい。調整にあたっては、タンクモデル等の流出解析により別途検討したり、試行錯誤的に発生・非発生降雨を分離しやすい半減期を経験的に得られた値とするなどの方法が考えられる。

(2) スネークラインの推移特性

この手法によるスネークラインは、矢野案とほぼ同じ特性を示す。同時に矢野案による A 案の改善点も本手法においても評価できる。すなわち、長雨や断続的な降雨への対応や避難解除の判断材料として有効性を示す。

3.5. 基準雨量設定にあたっての留意事項

3.5.1. 基準雨量設定のための地域区分

基準雨量の設定は、対象箇所の特性を反映させるために、溪流・斜面ごとに設定することが望ましい。

しかしながら、設定のための降雨データや災害発生事例が十分に無い現状等もあり、地形・地質・植生など基準値を左右する条件が類似する地域を区分して、地域区分ごとに基準雨量を設定する方法が実用的である。

地域区分に用いる条件は、降雨データや災害発生事例の収集状況に応じて、土石流やがけ崩れなど対象現象の特性を踏まえ、発生に関わり深い素因条件のうち地域区分や基準雨量の設定が可能となる条件を選定する。また、避難の指示・勧告が市町村長の責務として市町村ごとに運用されることや、土砂災害危険箇所の管轄、気象予警報などの関連基準の地域区分など、運用面を考慮することも必要であろう。

3.5.2. 災害発生降雨の収集と選別

土砂災害の発生実績に関する資料は、都道府県砂防部局や道路部局における災害報告や新聞、聞き込み調査等によって広く収集することが望まれる。

これらの災害資料は、内容や正確さなどが異なる様々な情報が入り乱れることが多いため、基準雨量の設定にあたっては、設定しようとする基準のレベルを定めた上で、信頼性によって選別した発生降雨を用いることが重要である。

(1) 基準のレベル

「基準のレベルを定める」とは、小規模なものから大規模なものまで発生する土砂移動現象について、災害をもたらす土砂移動の規模あるいは設定する基準雨量で対処する土砂移動の規模を定めることである。

実際には、土砂移動の発生場と人家等との位置関係や土砂量の多少等によって災害となったり、逆にならなかつたりもするので、土砂移動現象の規模を予め設定することは困難な場合が多い。しかしながら、無条件に収集された全ての災害発生降雨を取り扱うと、偶然性の強い小規模な土砂移動現象等も含めて取り扱うことになり、結果的に低めの基準となって空振りが多くなるなどの問題が容易に予想される。

そのため、提言案のように降雨のピーク付近で位置的にもある限られた範囲に集中的に発生する複数の土砂移動現象を限定的に対象とすることで、偶然性の強い小規模なものや、降雨以外の要因に強く起因した可能性のある特異な崩壊などを除外した上で、限定された土砂移動現象の発生降雨をもとに基準雨量を設定することが实际的である。

(2) 発生降雨の信頼性

発生降雨の信頼性は、発生時刻の正確さや発生時雨量を評価する雨量データの質（10 分間雨量、1 時間雨量等）、雨量データの空間的な代表性などによって評価する。

① 発生時刻の正確さ

発生時刻の正確さは、目撃証言によるものであるか、また、複数の証言によって裏付けられたものであるか、発生後に発見された時刻と取り違えられていないか、降雨の激しかった

時刻に応じて安易に推定されたものでないかなどのチェックポイントがあげられる。

② 発生時雨量を評価する雨量データの質

発生時雨量を評価する雨量データの質は、例えば、発生時刻が 7:40 と判明しており、1 時間雨量データを用いて発生時の時間雨量を求めようとするとき、6:00～7:00 の時間雨量を当てるか、それとも 7:00～8:00 の時間雨量を当てるかによって発生雨量を左右するということである。1 時間あたりの雨量が大きい場合ほどこの問題が深刻となるので、できるだけ 10 分間雨量など短い単位時間の雨量データを利用すべきである。10 分間雨量などの入手が困難な場合には、7:00～8:00 の時間雨量が 60mm のとき、7:00 から発生時刻（7:40）までの雨量を比例配分によって $(60\text{mm}/60\text{分}) \times 40\text{分} = 40\text{mm}$ と取り扱うなど状況に応じた工夫が必要である。

③ 雨量データの空間的な代表性

災害発生箇所と雨量観測所は離れていることが多い。その隔たりが大きいほど、地形的障害や雨域の移動・発達・収束等の様々な影響が増し、災害発生箇所の雨量を正確に把握することが困難となる。そのため、災害発生箇所と雨量観測所の距離を指標に信頼性を評価することが有効である。

情報基盤緊急整備事業などによって雨量観測網の充実が図られている現在では、このような問題が改善されつつあるが、過去の土砂災害について発生箇所の雨量を知ろうとする場合にはどうしても付きまとう問題である。

土砂災害の発生実績が少ない地域では、代表性の問題を考慮してデータを選別すると、基準雨量の設定に利用できる発生降雨がほとんど無くなってしまうこともある。このため、少ない発生実績を活用するために時刻ごとの等雨量線により災害発生地点の雨量時系列を推定するなどの試みもある³⁸⁾。

3.5.3. 災害非発生降雨の収集と選別

非発生降雨は、地域区分ごとに代表する 1 観測所の雨量データを用いて整理されることが多い。しかしながら、地域区分が大きく一つの雨量観測所では代表し得ない場合や、過去に発生降雨が無いあるいは少ない場合、非発生降雨の信頼性が重要となる。このようなケースでは、地域区分内の複数の観測雨量データを用いて多くの非発生降雨を抽出したり、画一的に最大時間雨量時をもって非発生時刻とするのではなく、非発生期間のスネークラインによって全容を視覚的に把握できるようにするなど、非発生領域をより明確に把握する工夫が望まれる。

3.5.4. CL 設定の客観性の向上

CL の設定は、XY グラフ上の発生・非発生降雨の分布状況に応じて設定するが、その分布状況によっては客観性を欠くものとなりがちである。

そのため、CL の設定パターンとして原則的な考え方を表 3.9 にとりまとめたので参考とされたい。

特に、発生降雨がなく、非発生降雨のみで CL を設定せざるを得ないケースでは、「3.5.3.

災害非発生降雨の収集と選別」で述べた方法を参考に非発生領域をより明確に把握する工夫をした上で、表 3.9 および図 3.22 を参考として設定されたい。

- ① 地域区分内で長期間の降雨資料がある観測所を複数選定する。
- ② 歴代の最大雨量を更新するような降雨で土砂災害が多いことを考慮して、前後に 24 時間の無降雨期間を有する一連の降雨のうち、長期的な降雨指標（下図では実効雨量半減期 72 時間）が最大となる降雨と、短期的な降雨指標（下図では実効雨量半減期 1.5 時間）が最大となる降雨を除き、残る全ての降雨についてスネークライン（非発生スネークライン）を描く。
- ③ 非発生スネークラインの X Y 値が最大となる点を基点に補助線を設け、それを平行移動することにより非発生スネークラインの上限に CL を設定する。これにより、X Y 両軸に対する重み付け（傾き）を降雨実績に応じたものとする。

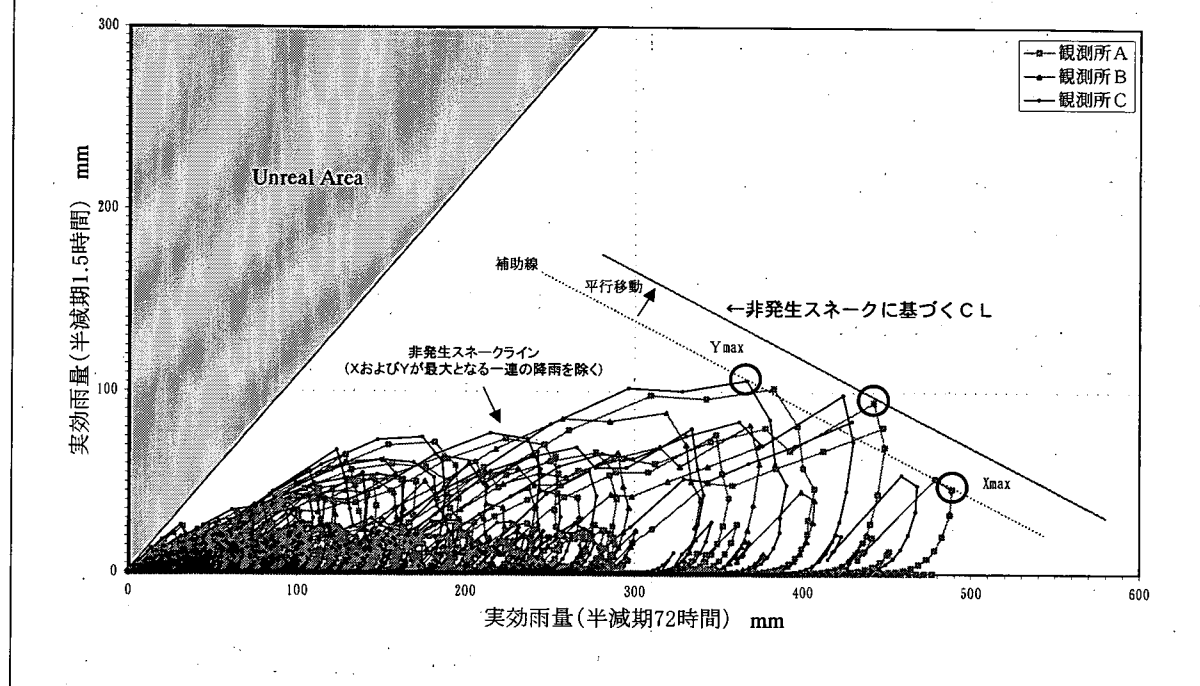


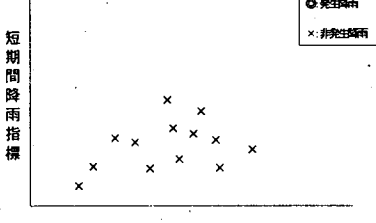
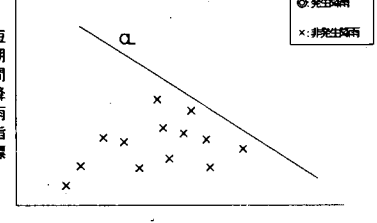
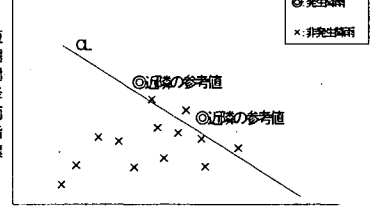
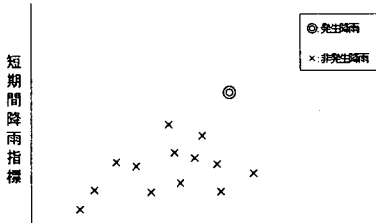
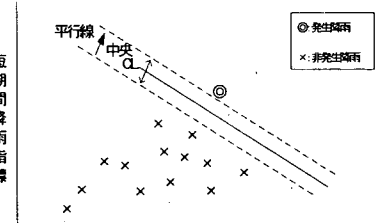
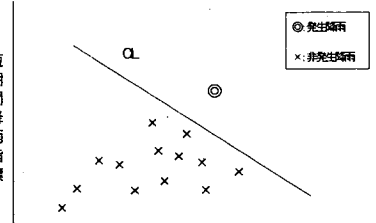
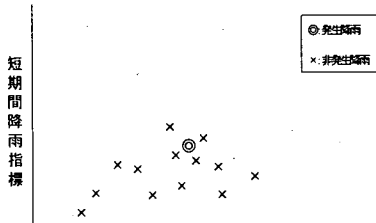
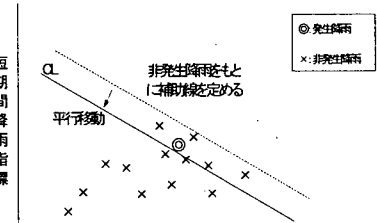
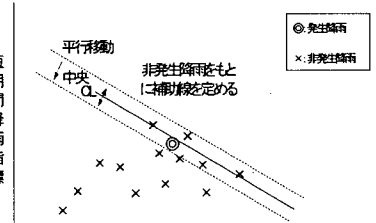
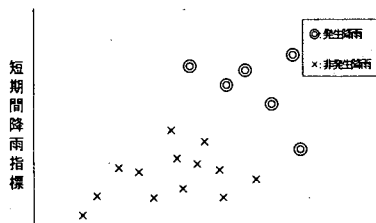
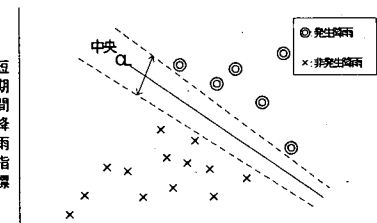
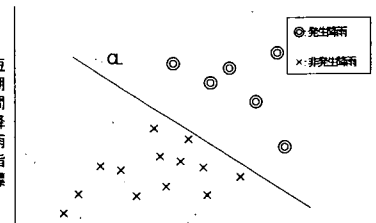
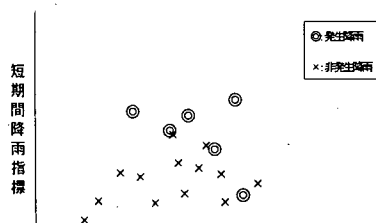
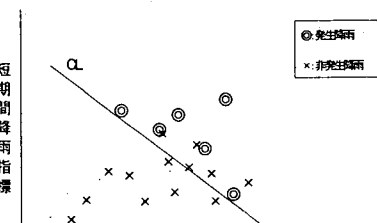
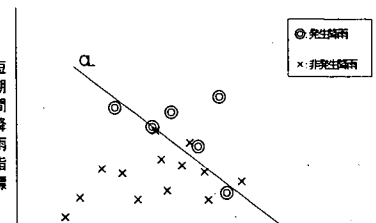
図 3.22 非発生降雨のみでの CL 設定の概念

なお、CL の客観性の向上を図る方法には、スネークラインを利用した他の方法²⁷⁾や重判別分析³²⁾³⁴⁾による方法、ニューラルネットワークモデル³⁹⁾を利用した方法などがある。

3.5.5. 特殊な地域での適用（火山等）

いずれの手法も縦軸は、1 時間程度の雨量強度を示す指標となっているが、活火山等の地域（鹿児島桜島等）等で土砂が移動しやすい状態にあるときは、10 分間あるいは 20 分間程度の雨量が適当である場合もある。

表 3.9 発生危険基準線 (CL) の設定パターン

発生・非発生降雨の分布パターン	CL の設定パターン		
	発生・非発生降雨の信頼性：高い	発生・非発生降雨の信頼性：低い あるいは 不明	適用
発生降雨がない場合 	非発生降雨の上限に設定 		信頼性が高いプロットの場合は、図 3.22 の適用も視野に入れ、非発生降雨の上限を基本として CL を設定する。 信頼性が低いあるいは不明なプロットの場合には、中でも信頼性の高いプロットのみに着目した設定を試みる。困難な場合は、比較的素因の類似する近隣の発生降雨を参考とする。
発生降雨が 1 つで非発生降雨と離れる場合 	発生と非発生の中央に設定 	非発生の上限に設定 	発生プロットが 1 つで CL の傾きを得難いため、非発生降雨の上限線を補助線として CL の傾きを定める。 信頼性が高いプロットの場合は、発生・非発生分布の中央を基本として補助線を平行移動した CL を設定する。 信頼性が低いあるいは不明なプロットの場合には、中でも信頼性の高いプロットのみに着目した設定を試みる。困難な場合は、図 3.22 の適用も視野に入れ、非発生の上限を基本として CL を設定する。
発生降雨が 1 つで非発生降雨と混在する場合 	発生の下限に設定 	混在領域に設定 	発生プロットが 1 つで CL の傾きを得難いため、非発生降雨の上限線を補助線として CL の傾きを定める。 信頼性が高いプロットの場合は、発生の下限を基本として補助線を平行移動した CL を設定する。 信頼性が低いあるいは不明なプロットの場合には、中でも信頼性の高いプロットのみに着目した設定を試みる。困難な場合は、図 3.22 の適用も視野に入れ、発生・非発生混在域の中央を基本として補助線を平行移動した CL を設定する。
発生降雨と非発生降雨が離れる場合 	発生と非発生の中央に設定 	非発生の上限に設定 	信頼性が高いプロットの場合は、発生・非発生分布の中央を基本として CL を設定する。 信頼性が低いあるいは不明なプロットの場合には、中でも信頼性の高いプロットのみに着目した設定を試みる。困難な場合は、図 3.22 の適用も視野に入れ、非発生の上限を基本として CL を設定する。
発生降雨と非発生降雨が混在する場合 	発生の下限に設定 	混在領域に設定 	信頼性が高いプロットの場合は、発生降雨の下限を基本として CL を設定する。 信頼性が低いあるいは不明なプロットの場合には、中でも信頼性の高いプロットのみに着目した設定を試みる。困難な場合は、図 3.22 の適用も視野に入れ、発生降雨と非発生降雨の混在する領域に CL を設定する。

4. 代表的な基準雨量設定手法の計算例

4.1. 取り扱う災害事例

計算例で用いる災害事例は、表 4.1 のとおりであり、長雨・断続型の降雨と集中豪雨型の降雨に大別される。

表 4.1 取り扱う災害事例

降雨型	地域	代表雨量観測所	整理番号	現象名 (数字は箇所数)	発生年月日時
長 雨 ・ 断 続 型	鹿児島	鹿児島（気）	1	がけ崩れ 1	1993/07/02 03:00
			2	がけ崩れ 4	1993/08/06 18:00
	福 島	西郷村役場	3	がけ崩れ 1	1998/08/27 04:00
			4	がけ崩れ 3・土石流 1	1998/08/27 05:00
			5	がけ崩れ 1	1998/08/27 06:00
			6	がけ崩れ 1	1998/08/27 07:00
			7	がけ崩れ 1	1998/08/27 08:00
			8	がけ崩れ 1	1998/08/27 15:00
			9	がけ崩れ 1	1998/08/27 20:00
			10	土石流 1	1998/08/27 21:00
集 中 豪 雨 型	広 島	魚切ダム	11	土石流 8、がけ崩れ 1	1999/06/29 15:00
			12	土石流 2	1999/06/29 16:00
	岐 阜	河合（気）	13	土石流 2	1999/09/15 12:00

注 1：発生時刻は、分単位で判明しているが、簡単のため直近の正時を用いている。

注 2：災害事例は代表雨量観測所より約 5km 内の事例である。

4.2. 降雨指標の計算例

基準雨量の設定は、過去の発生・非発生降雨をもとに検討するものであるが、ここでは一連の降雨における災害事例を取り扱うため、一連の降雨期間（前後 24 時間無降雨を有する期間）内におけるスネークラインの計算例やそれに基づく発生危険基準線の設定例を示す。

なお、計算例はマイクロソフト社の表計算ソフト（エクセル）上での計算例として示す。

4.2.1. A 案・B 案

(1) 前期実効雨量の計算

A 案・B 案における前期実効雨量は、一連の降雨の降り始め時刻・降り終わり時刻を特定したのち、降り始め以前の雨量を 24 時間ごとに区切り、その積算値（24 時間雨量）をもとに、下図のように計算する。

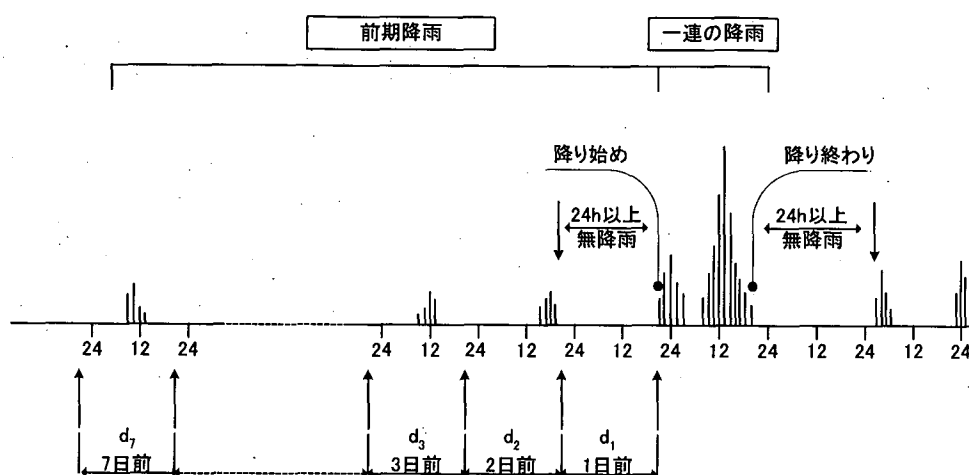


図 4.1 一連の降雨と前期降雨の概念（再掲）

Microsoft Excel - 計算例2.xls											
MS P-シシク											
H27											
前期実効雨量の計算											
=E14*E\$10+F14*F\$10+G14*G\$10+H14*H\$10+I14*I\$10+J14*J\$10+K14*K\$10											
=0.5*(4/1)											
		一連の降雨期間		前期24時間雨量(下段は半減期1日とした場合の減少係数)mm							前期実効雨量 mm
地域名	代表雨量観測所名	降り始め	降り終わり	1日前 0.5	2日前 0.25	3日前 0.125	4日前 0.0625	5日前 0.03125	6日前 0.015625	7日前 0.007813	
鹿児島	鹿児島(気)	1993/06/30/ 04:00	1993/07/02/ 19:00	0	32	0	70	74	0	16	14.81
		1993/08/05/ 16:00	1993/08/06/ 22:00	0	12	2	3	88	173	12	8.98
福島	西郷村役場	1998/08/26/ 17:00	1998/08/01/ 14:00	0	0	0	0	0	0	0	0.00
広島	魚切ダム	1999/06/29/ 00:00	1999/07/01/ 00:00	0	31	36	7	66	21	0	15.08
岐阜	河合(気)	1999/08/14/ 17:00	1999/08/16/ 16:00	0	0	0	6	0	0	12	0.47

図 4.2 前期実効雨量の計算例（降り始めから 7 日前までの例）

(2) 時刻別降雨指標の計算

スネークラインを作図するもととなる時刻別降雨指標の計算例について示す。

有効雨量強度は、降り始めから最初に 4mm/h 以上を記録した時刻（変曲点A）を特定したのち、変曲点Aからの時間数と降り始めからの連続雨量をもとに下図のように計算する。

実効雨量は、前項で求めた前期実効雨量を初期値として、下図のように時間雨量との累積値として計算する。

■ A・B案 時刻別降雨指標の計算 (広島災害を例として)						
年月日時	時間雨量 mm	変曲点A からの時間数	有効雨量強度 mm/h	降始めから 連続雨量mm	A案・B案 実効雨量mm	前期実効雨量
1999/06/28/ 23:00	0.0	-	0.0	0.0	15.1	
1999/06/29/ 00:00	1.0	-	0.0	1.0	16.1	← 降り始め時刻
1999/06/29/ 01:00	2.0	-	0.0	3.0	18.1	
1999/06/29/ 02:00	4.0	1.0	4.0	7.0	22.1	← 変曲点A
1999/06/29/ 03:00	2.0	2.0	3.0	9.0	24.1	
1999/06/29/ 04:00	3.0	3.0	3.0	12.0	27.1	← 最初4mm/h以上を記録した時刻からの時間数
1999/06/29/ 05:00	9.0	4.0	4.5	21.0	36.1	=E15-\$E\$7)/C15
1999/06/29/ 06:00	10.0	5.0	5.0	31.0	46.1	
1999/06/29/ 07:00	8.0	6.0	6.0	39.0	54.1	
1999/06/29/ 08:00	4.0	7.0	5.7	43.0	58.1	=E14+E15
1999/06/29/ 09:00	1.0	8.0	5.1	44.0	59.1	
1999/06/29/ 10:00	3.0	9.0	4.9	47.0	62.1	=F14+E15
1999/06/29/ 11:00	12.0	10.0	5.6	59.0	74.1	
1999/06/29/ 12:00	19.0	11.0	6.8	78.0	93.1	
1999/06/29/ 13:00	29.0	12.0	8.7	107.0	122.1	
1999/06/29/ 14:00	41.0	13.0	11.2	148.0	163.1	
1999/06/29/ 15:00	63.0	14.0	14.9	211.0	226.1	← かけ崩れ(1箇所)、土石流(8箇所)
1999/06/29/ 16:00	37.0	15.0	16.3	248.0	263.1	← 土石流(2箇所)
1999/06/29/ 17:00	7.0	16.0	15.8	255.0	270.1	← 変曲点B
1999/06/29/ 18:00	0.0	17.0	14.8	255.0	270.1	
1999/06/29/ 19:00	0.0	18.0	14.0	255.0	270.1	
1999/06/29/ 20:00	0.0	19.0	13.3	255.0	270.1	
1999/06/29/ 21:00	0.0	20.0	12.6	255.0	270.1	
1999/06/29/ 22:00	0.0	21.0	12.0	255.0	270.1	
1999/06/29/ 23:00	0.0	22.0	11.5	255.0	270.1	
1999/06/30/ 00:00	1.0	23.0	11.0	256.0	271.1	
1999/06/30/ 01:00	0.0	24.0	10.5	256.0	271.1	
1999/06/30/ 02:00	0.0	25.0	10.1	256.0	271.1	
1999/06/30/ 03:00	0.0	26.0	9.7	256.0	271.1	
1999/06/30/ 04:00	0.0	27.0	9.4	256.0	271.1	
1999/06/30/ 05:00	0.0	28.0	9.0	256.0	271.1	
1999/06/30/ 06:00	0.0	29.0	8.7	256.0	271.1	
1999/06/30/ 07:00	0.0	30.0	8.4	256.0	271.1	
1999/06/30/ 08:00	0.0	31.0	8.2	256.0	271.1	
1999/06/30/ 09:00	0.0	32.0	7.9	256.0	271.1	
1999/06/30/ 10:00	0.0	33.0	7.7	256.0	271.1	
1999/06/30/ 11:00	0.0	34.0	7.4	256.0	271.1	
1999/06/30/ 12:00	0.0	35.0	7.2	256.0	271.1	
1999/06/30/ 13:00	0.0	36.0	7.0	256.0	271.1	
1999/06/30/ 14:00	0.0	37.0	6.8	256.0	271.1	
1999/06/30/ 15:00	0.0	38.0	6.7	256.0	271.1	
1999/06/30/ 16:00	0.0	39.0	6.5	256.0	271.1	
1999/06/30/ 17:00	0.0	40.0	6.3	256.0	271.1	
1999/06/30/ 18:00	0.0	41.0	6.2	256.0	271.1	
1999/06/30/ 19:00	0.0	42.0	6.0	256.0	271.1	
1999/06/30/ 20:00	0.0	43.0	5.9	256.0	271.1	
1999/06/30/ 21:00	0.0	44.0	5.8	256.0	271.1	
1999/06/30/ 22:00	0.0	45.0	5.6	256.0	271.1	
1999/06/30/ 23:00	0.0	46.0	5.5	256.0	271.1	
1999/07/01/ 00:00	0.0	47.0	5.4	256.0	271.1	← 降り終わり

図 4.3 時刻別降雨指標の計算例 (広島災害を例として)

4.2.2. 矢野案・提言案

矢野案や提言案における実効雨量は、降り始めや変曲点などの特定作業を必要とせず、極めて簡単な算式で計算できる（下図）。

なお、下図において最初の時刻（6/28 23:00）の実効雨量は、それ以前の降雨データより連続的に計算された結果である。

Microsoft Excel - 計算用2-1													
P27													
■ 矢野・提言案 時刻別降雨指標の計算 (広島災害を例として)													
年月日時	時間雨量 mm	実効雨量(下段は半減期(時間)を表す) mm											
		1.0	1.5	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0	24.0	48.0	72.0	
1999/06/28/ 23:00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	1.0	2.4	4.3	20.6	52.6	74.7	←この行は以前の雨量データより逐次計算した結果
1999/06/29/ 00:00	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.2	1.9	3.2	5.0	21.0	52.9	0.0	=M5*0.5^(1/M54)+\$B6
1999/06/29/ 01:00	2.0	2.5	2.6	2.7	2.9	3.1	3.8	5.0	6.8	22.4	54.1	2.0	=M6*0.5^(1/M54)+\$B7
1999/06/29/ 02:00	4.0	5.3	5.7	5.9	6.4	6.8	7.5	8.7	10.4	25.8	57.3	6.0	
1999/06/29/ 03:00	2.0	4.6	5.6	6.2	7.4	8.0	8.8	10.1	11.8	27.0	58.5	7.9	
1999/06/29/ 04:00	3.0	5.3	6.5	7.4	9.2	10.1	11.1	12.4	14.1	29.3	60.7	10.8	
1999/06/29/ 05:00	9.0	11.7	13.1	14.2	16.7	18.0	19.2	20.6	22.3	37.4	68.8	19.7	
1999/06/29/ 06:00	10.0	15.8	18.3	20.0	24.1	26.1	27.6	29.2	31.1	46.4	77.8	29.6	
1999/06/29/ 07:00	6.0	15.9	19.5	22.2	28.2	31.2	33.3	35.3	37.3	53.0	84.7	37.3	
1999/06/29/ 08:00	4.0	12.0	16.3	19.7	27.8	31.8	34.5	36.9	39.2	55.5	87.5	40.9	
1999/06/29/ 09:00	1.0	7.0	11.3	14.9	24.3	29.3	32.7	35.4	38.0	54.9	87.2	41.5	
1999/06/29/ 10:00	3.0	6.5	10.1	13.5	23.5	29.1	33.0	36.1	38.9	56.4	89.0	44.1	
1999/06/29/ 11:00	12.0	15.2	18.4	21.6	31.7	38.0	42.2	45.6	48.7	66.8	99.7	55.7	
1999/06/29/ 12:00	18.0	26.6	30.6	34.3	45.7	52.8	57.7	61.6	65.0	83.9	117.3	74.2	
1999/06/29/ 13:00	29.0	42.3	48.3	53.2	67.4	76.1	81.9	86.5	90.3	110.5	144.6	102.5	
1999/06/29/ 14:00	41.0	62.2	71.4	78.6	97.7	108.8	116.1	121.7	126.3	148.3	183.5	142.5	
1999/06/29/ 15:00	63.0	94.1	108.0	118.6	145.1	159.9	169.5	176.5	182.2	207.1	243.9	204.1	←かけ崩れ(1箇所)、土石流(8箇所)
1999/06/29/ 16:00	37.0	84.0	105.0	120.9	159.1	179.5	192.4	201.7	209.0	238.2	277.4	239.2	←土石流(2箇所)
1999/06/29/ 17:00	7.0	49.0	73.2	92.5	140.7	166.9	183.5	195.2	204.2	238.4	280.4	243.9	
1999/06/29/ 18:00	0.0	24.5	46.1	65.4	118.4	146.7	168.2	182.1	192.8	231.7	276.4	241.5	
1999/06/29/ 19:00	0.0	12.3	29.0	46.2	99.5	132.4	154.3	169.9	181.9	225.1	272.4	239.2	
1999/06/29/ 20:00	0.0	6.1	18.3	32.7	83.7	118.0	141.5	158.5	171.7	218.7	268.5	236.9	
1999/06/29/ 21:00	0.0	3.1	11.5	23.1	70.4	105.1	129.7	147.9	162.1	212.4	264.7	234.7	
1999/06/29/ 22:00	0.0	1.5	7.3	16.3	59.2	93.7	119.0	138.0	153.0	206.4	260.9	232.4	
1999/06/29/ 23:00	0.0	0.8	4.6	11.6	49.8	83.4	109.1	128.8	144.4	200.5	257.1	230.2	
1999/06/30/ 00:00	1.0	1.4	3.9	9.2	42.8	75.3	101.0	121.2	137.3	195.8	254.4	229.0	
1999/06/30/ 01:00	0.0	0.7	2.4	6.5	36.0	67.1	92.6	113.0	128.6	190.2	250.8	226.8	
1999/06/30/ 02:00	0.0	0.3	1.5	4.6	30.9	59.8	85.0	105.5	122.9	184.8	247.2	224.6	
1999/06/30/ 03:00	0.0	0.2	1.0	3.2	25.5	53.3	77.9	98.4	115.5	179.5	243.7	222.5	
1999/06/30/ 04:00	0.0	0.1	0.6	2.3	21.4	47.5	71.4	91.8	109.0	174.4	240.2	220.3	
1999/06/30/ 05:00	0.0	0.0	0.4	1.6	18.0	42.3	65.5	85.7	102.9	169.5	236.7	218.2	
1999/06/30/ 06:00	0.0	0.0	0.2	1.1	15.1	37.7	60.1	79.9	97.1	164.6	233.3	216.1	
1999/06/30/ 07:00	0.0	0.0	0.2	0.8	12.7	33.6	55.1	74.6	91.6	160.0	230.0	214.0	
1999/06/30/ 08:00	0.0	0.0	0.1	0.6	10.7	29.9	50.5	69.6	86.5	155.4	226.7	212.0	
1999/06/30/ 09:00	0.0	0.0	0.1	0.4	9.0	26.6	46.3	64.9	81.6	151.0	223.4	210.0	
1999/06/30/ 10:00	0.0	0.0	0.0	0.3	7.6	23.7	42.5	60.6	77.1	146.7	220.2	208.0	
1999/06/30/ 11:00	0.0	0.0	0.0	0.2	6.4	21.1	39.0	56.5	72.7	142.5	217.1	206.0	
1999/06/30/ 12:00	0.0	0.0	0.0	0.1	5.4	18.8	35.7	52.7	68.7	138.4	214.0	204.0	
1999/06/30/ 13:00	0.0	0.0	0.0	0.1	4.5	16.8	32.8	49.2	64.8	134.5	210.9	202.0	
1999/06/30/ 14:00	0.0	0.0	0.0	0.1	3.8	14.9	30.0	45.9	61.2	130.7	207.9	200.1	
1999/06/30/ 15:00	0.0	0.0	0.0	0.1	3.2	13.3	27.5	42.8	57.7	127.0	204.9	198.2	
1999/06/30/ 16:00	0.0	0.0	0.0	0.0	2.7	11.9	25.3	40.0	54.5	123.3	202.0	196.3	
1999/06/30/ 17:00	0.0	0.0	0.0	0.0	2.3	10.6	23.2	37.3	51.4	119.8	199.1	194.4	
1999/06/30/ 18:00	0.0	0.0	0.0	0.0	1.9	9.4	21.2	34.8	48.5	116.4	196.2	192.5	
1999/06/30/ 19:00	0.0	0.0	0.0	0.0	1.6	8.4	19.5	32.5	45.9	113.1	193.4	190.7	
1999/06/30/ 20:00	0.0	0.0	0.0	0.0	1.3	7.5	17.9	30.9	43.2	109.9	190.6	188.9	
1999/06/30/ 21:00	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	6.7	16.4	28.3	40.8	106.8	187.9	187.1	
1999/06/30/ 22:00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	5.9	15.0	26.4	38.5	103.7	185.2	185.3	
1999/06/30/ 23:00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	5.3	13.8	24.6	36.4	100.8	182.5	183.5	
1999/07/01/ 00:00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	4.7	12.6	23.0	34.3	97.9	179.9	181.7	

図 4.4 矢野・提言案における降雨指標の計算例

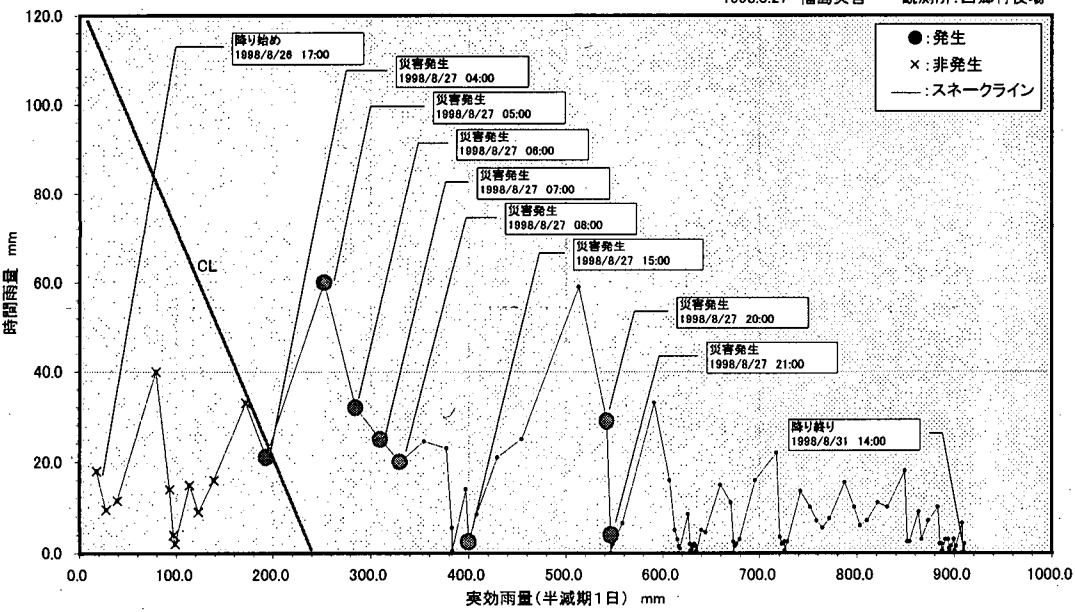
4.3. 発生危険基準線の設定例

前項における降雨指標の演算結果より、発生危険基準線（CL）の設定例を以下に示す。

以下では、便宜的に降り始めから発生時刻前までの各時刻を非発生時刻として取り扱うことでCLの設定を行ったものである。

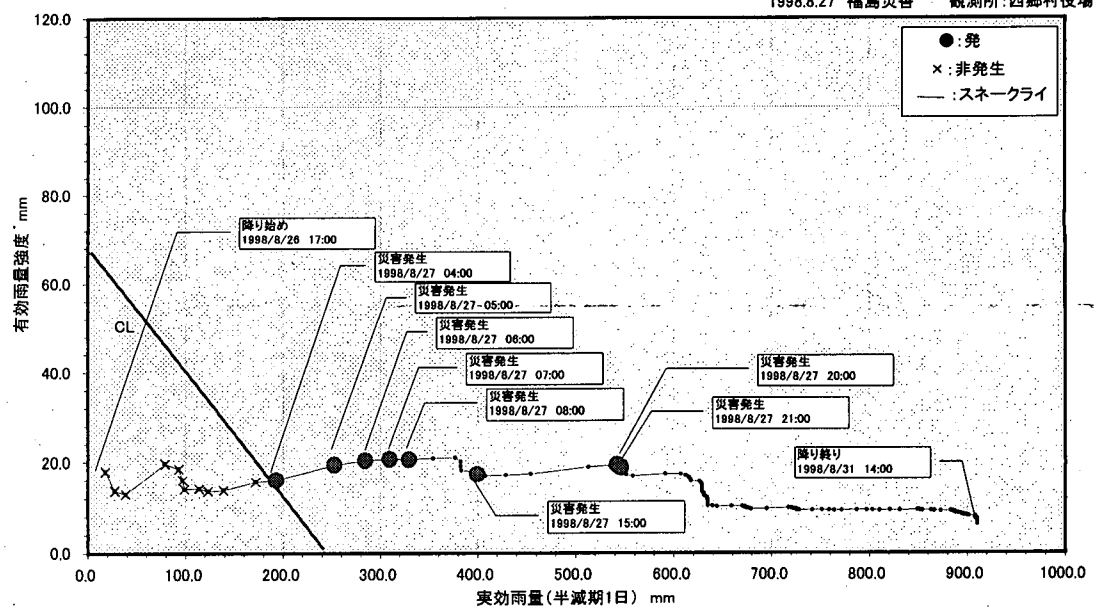
A案

1998.8.27 福島災害 観測所:西郷村役場



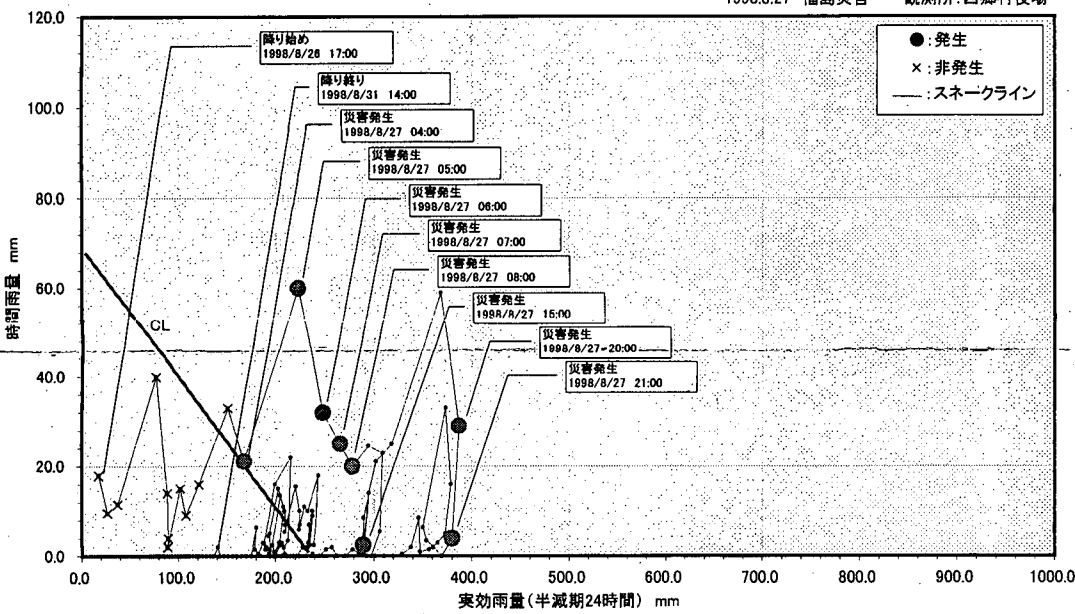
B案

1998.8.27 福島災害 観測所:西郷村役場



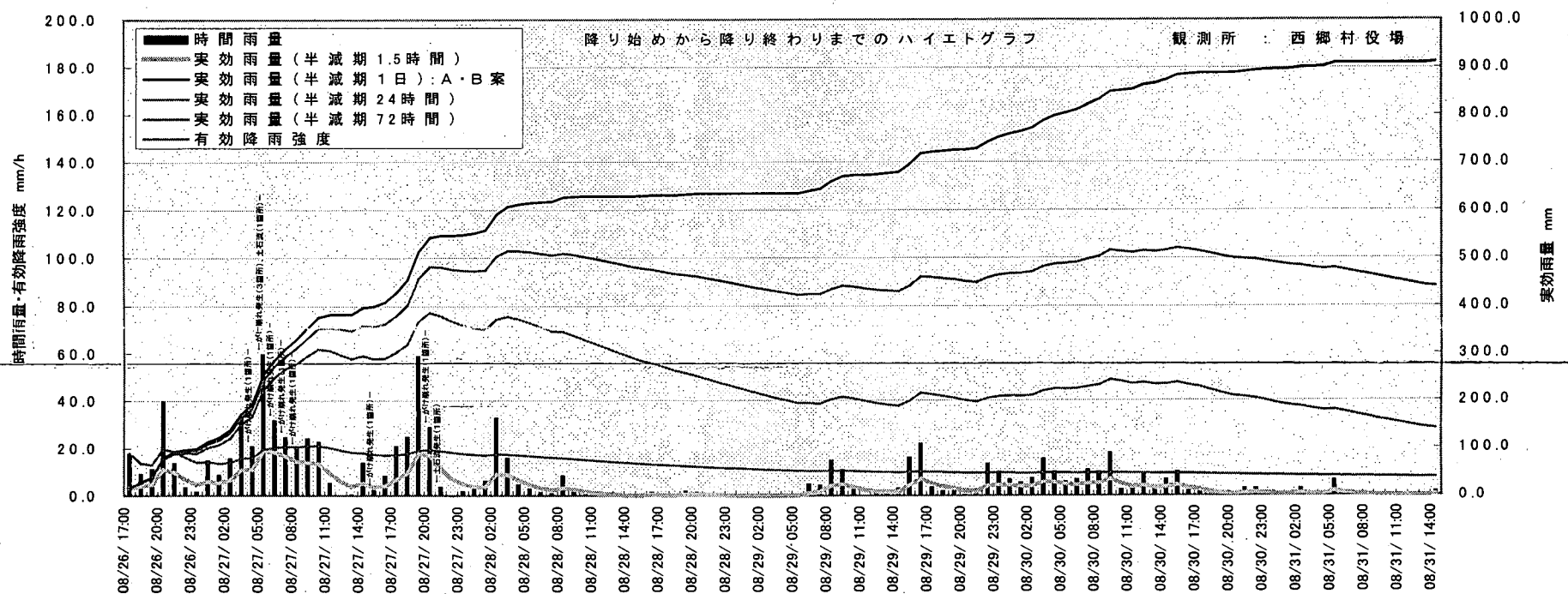
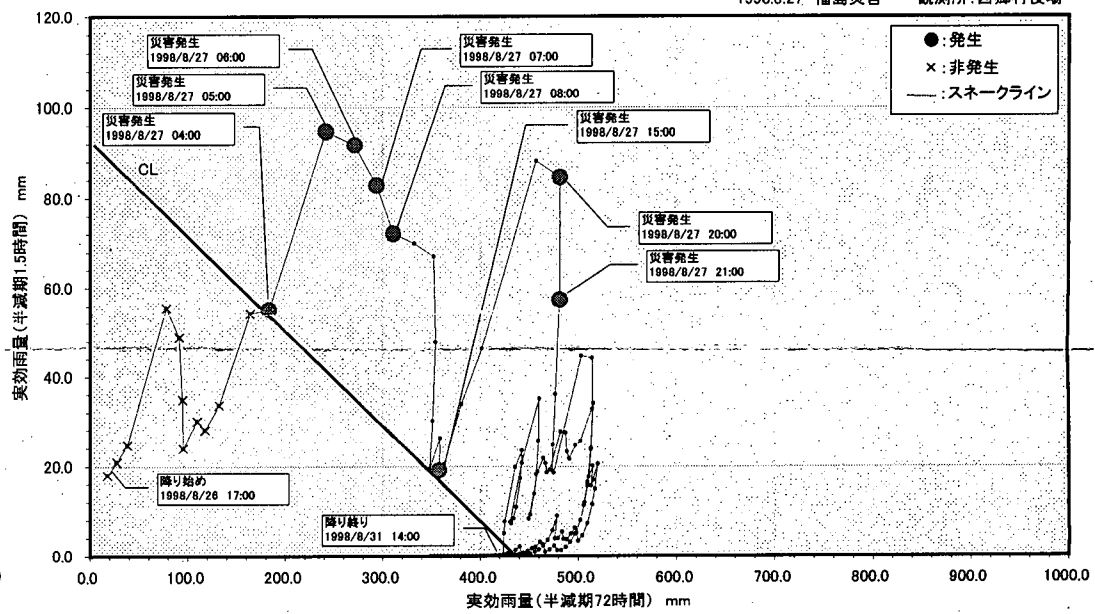
矢野案

1998.8.27 福島災害 観測所:西郷村役場



提言案

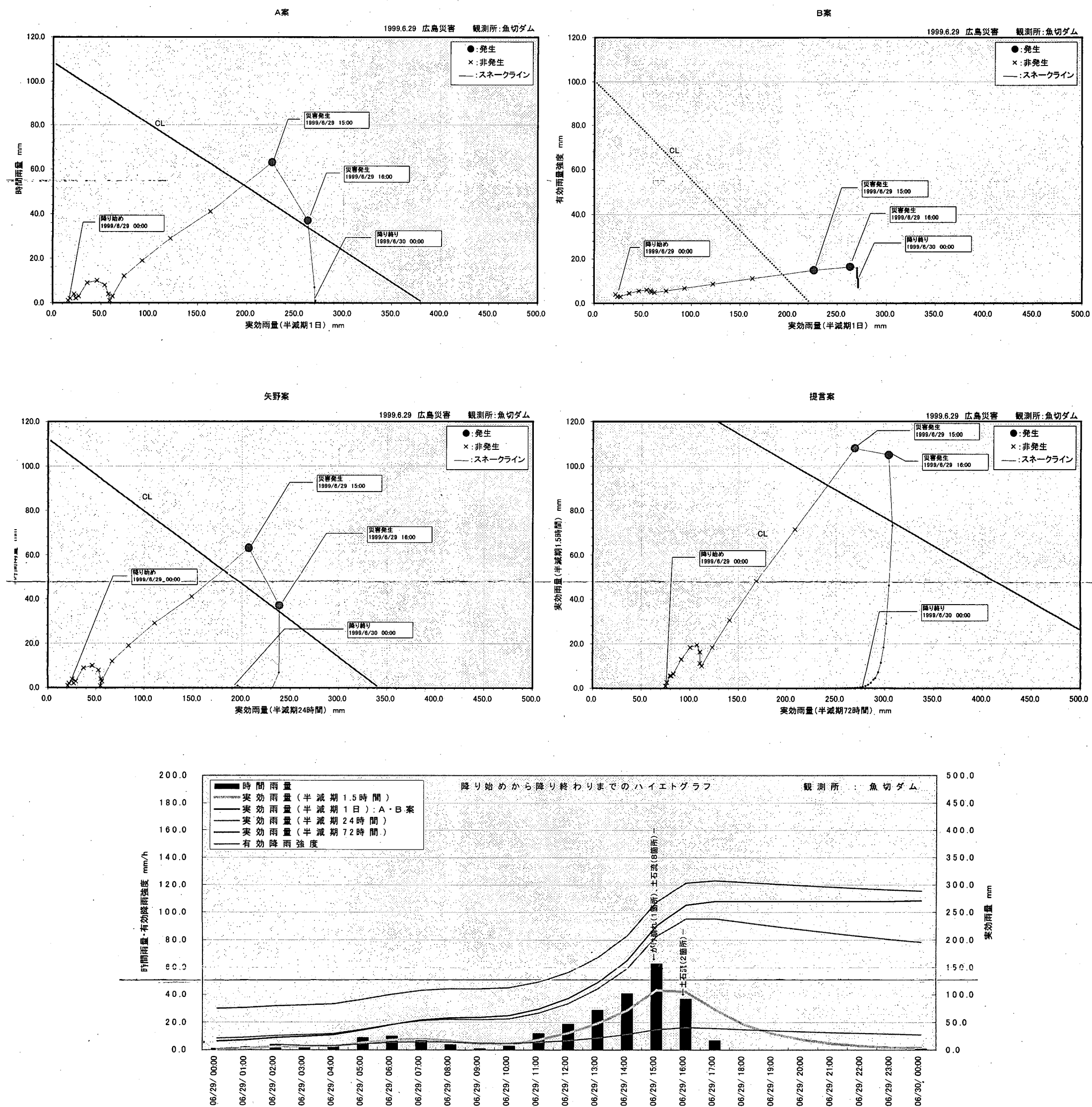
1998.8.27 福島災害 観測所:西郷村役場



注1: A案は便宜的にXY軸の時刻を揃えて図示している。

注2: 非発生は便宜的に降り始めから発生時刻前までの各時刻としている。

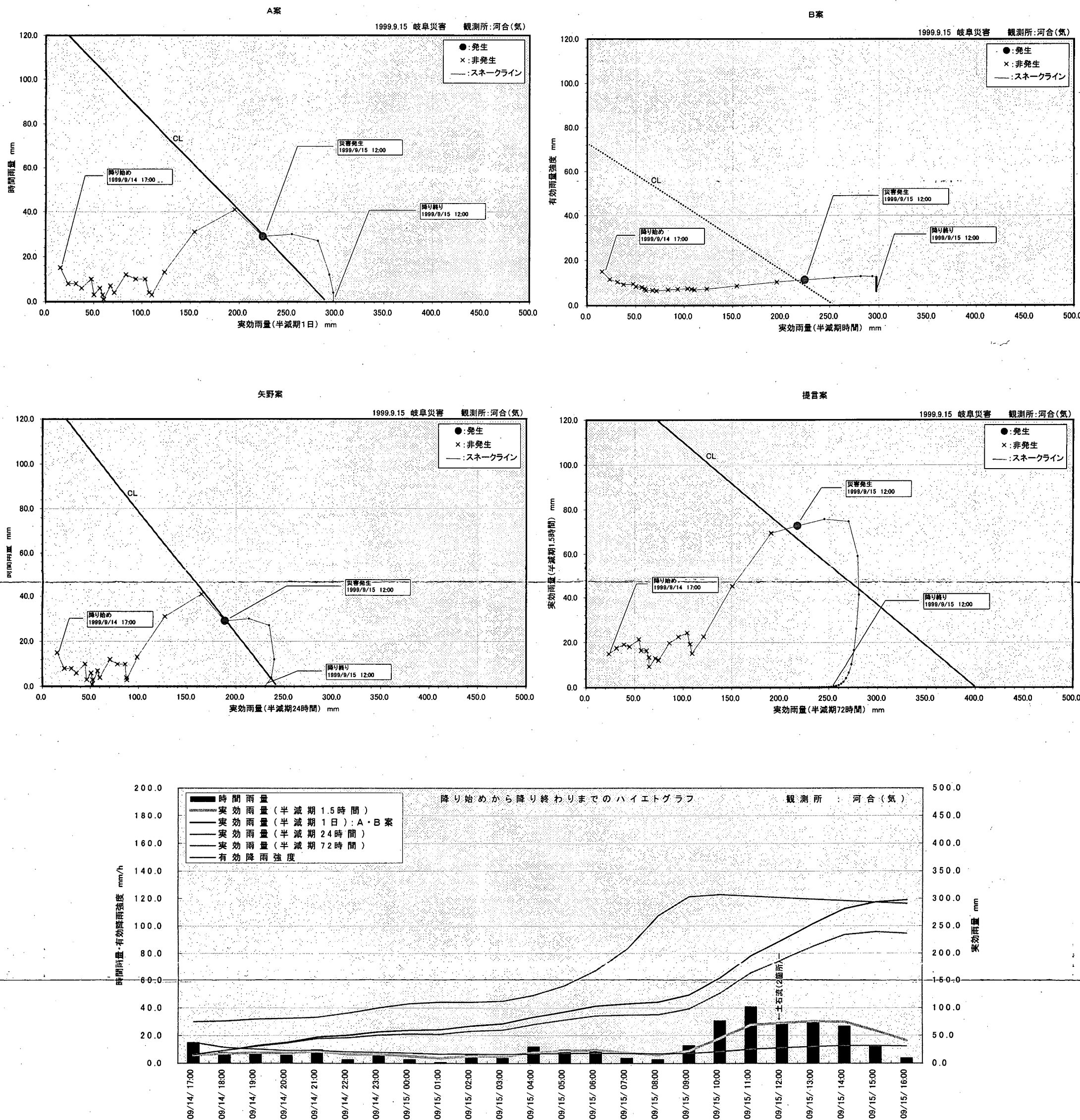
図 4.6 発生危険基準線設定図(平成10年 福島災害)



注1：A案は便宜的にXY軸の時刻を揃えて図示している。

注2：非発生は便宜的に降り始めから発生時刻前までの各時刻としている。

図 4.7 発生危険基準線設定図（平成 11 年 広島災害）



注1：A案は便宜的にXY軸の時刻を揃えて図示している。
 注2：非発生は便宜的に降り始めから発生時刻前までの各時刻としている。

図 4.8 発生危険基準線設定図（平成 11 年 岐阜災害）

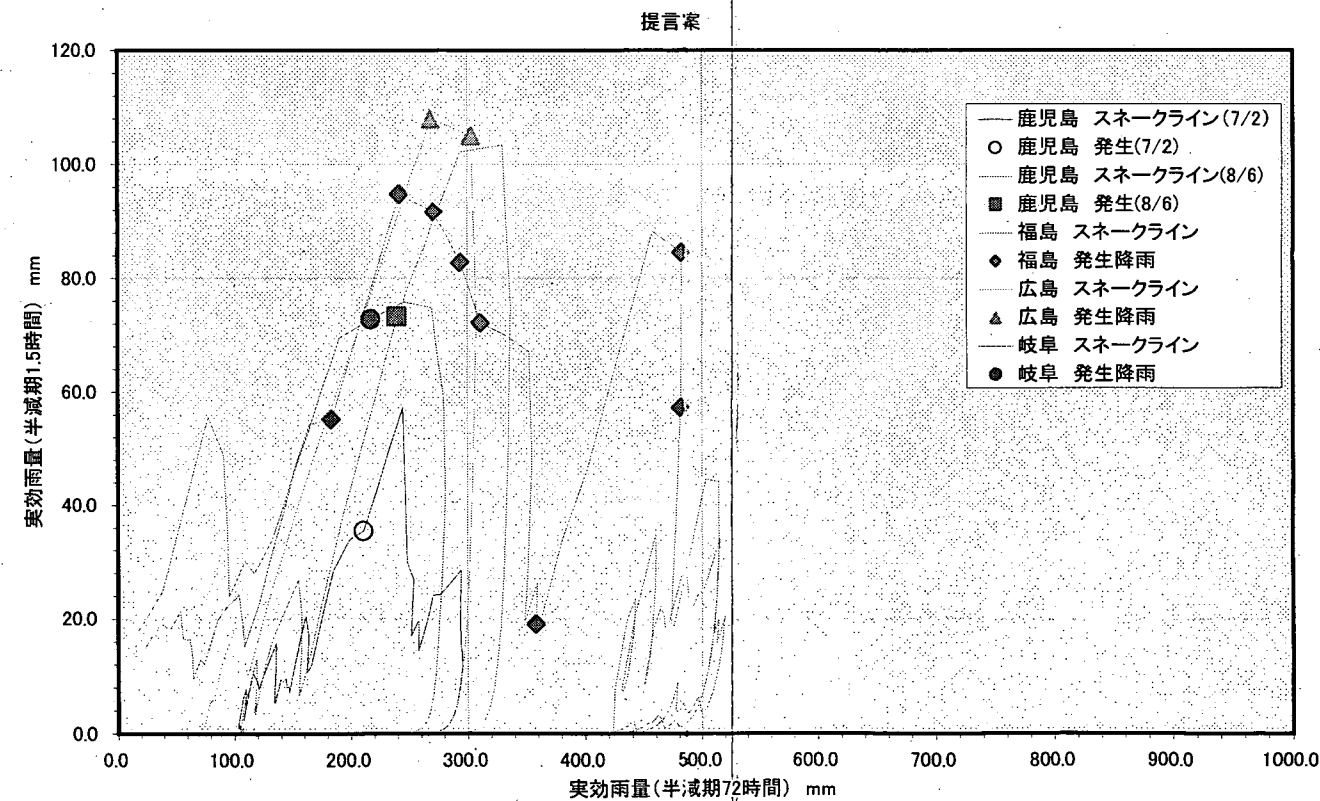
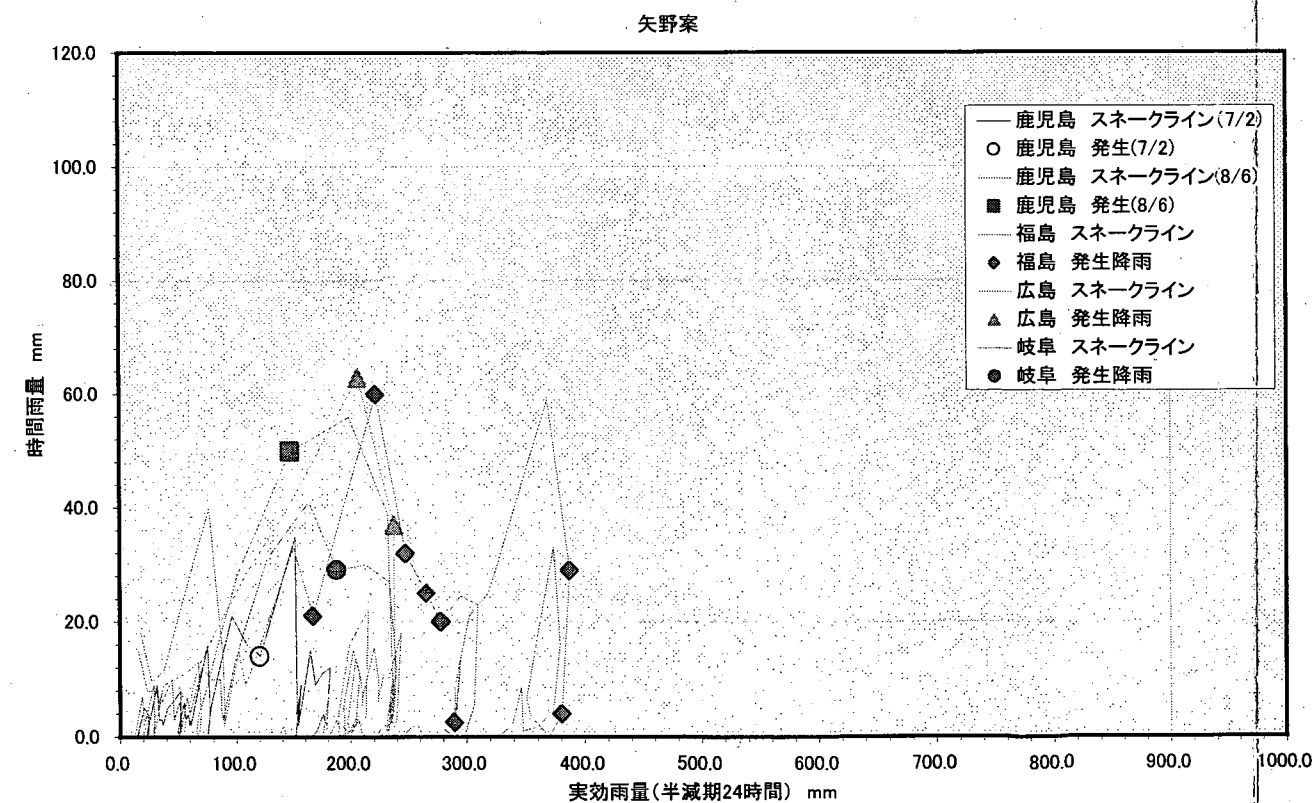
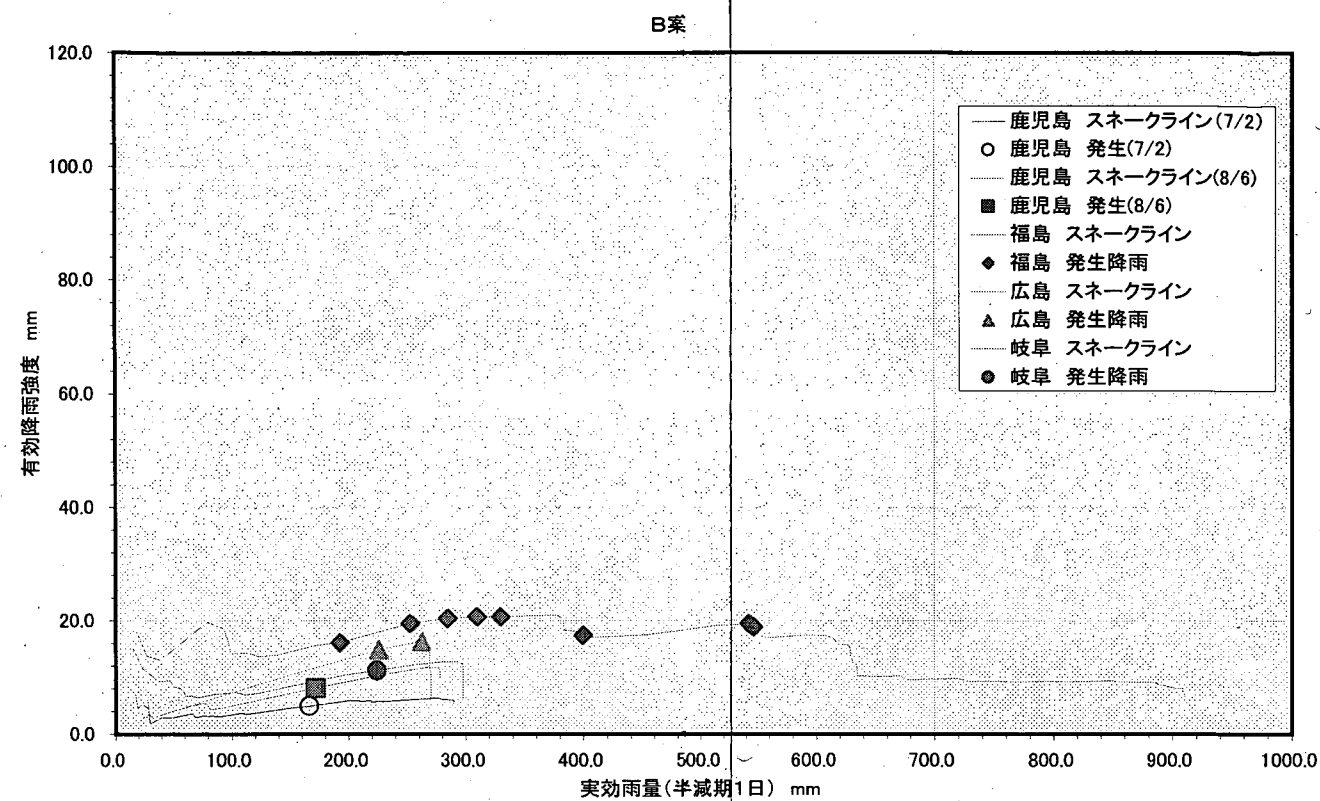
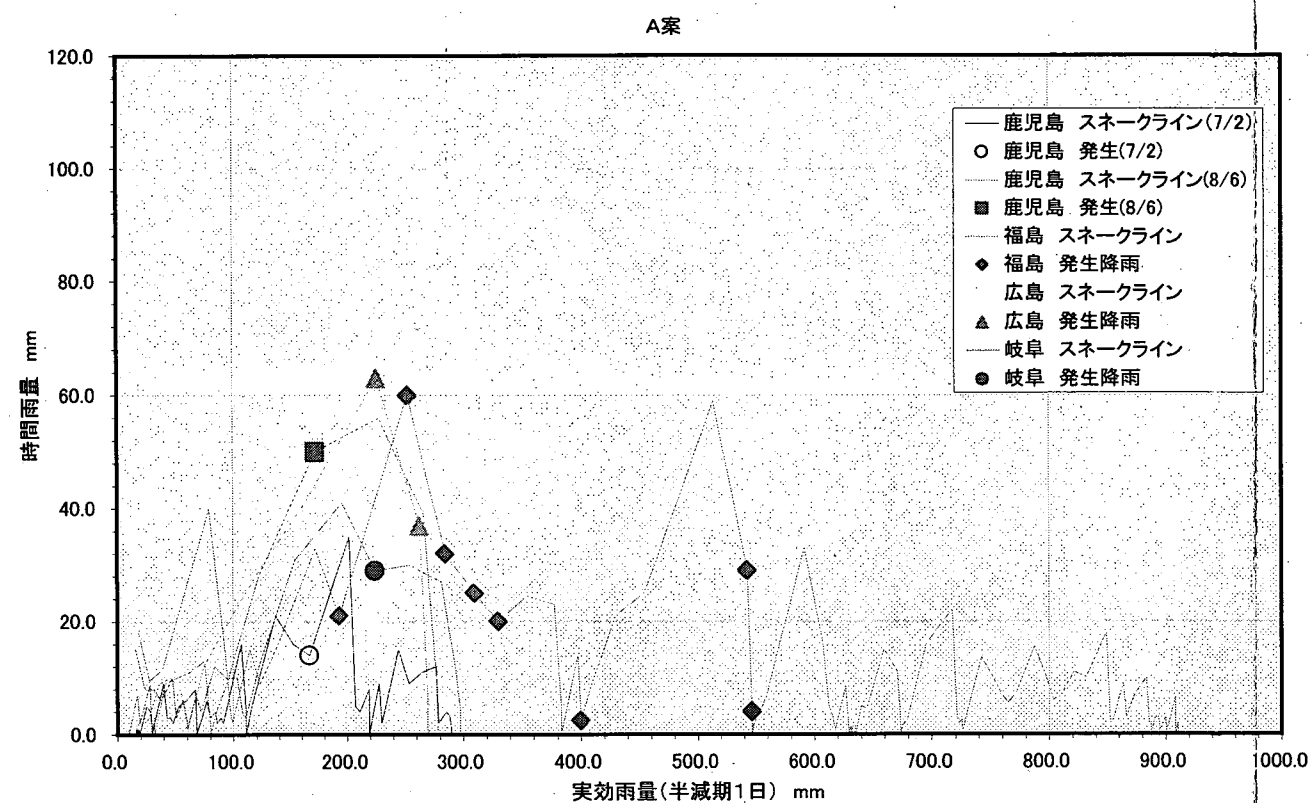


図 4.9 各手法によるスネークラインの比較図

4.4. 仮想降雨による試算

基準雨量においては、少降雨が長期間降り続くようなケースで空振り等の不具合が指摘されることが多い。

そのため、仮想の降雨パターンにより長雨時におけるスネークラインの推移状況を試算し、手法ごとの特性の違いを見ておくことにする。

仮想降雨は、降り始め以前の降雨が全く無い状態に以下の3タイプの降雨が生じた状況を想定した。

表 4.2 長期間降り続く仮想降雨の想定

仮想降雨名	前期降雨	降雨パターン	備考
タイプ1	なし	3mm/h の降雨が4時間おきに7日間継続	総雨量 126mm
タイプ2	なし	1.5mm/h の降雨が連続的に7日間継続	総雨量 252mm
タイプ3	なし	2mm/h の降雨が連続的に7日間継続	総雨量 336mm

各仮想降雨のスネークラインを計算すると、下図のようになる。

図中には、計算例で示した平成5年鹿児島災害における発生レベルを目安として図示しており、各スネークラインが発生レベルに対してどの程度接近するかを見ようとしたものである。この図をみると、A案ではタイプ2・3のスネークが発生レベルを超過し、一方、矢野案および提言案はいずれも発生レベルを超過しない。ちなみに、A案のタイプ3のスネークは降り始めから約3.5日経って発生レベルに到達する。

このように、短時間の降雨強度でみれば土砂災害の発生が考えにくい降雨であっても、手法の違いによって発生レベルに到達したり、しなかったりする。

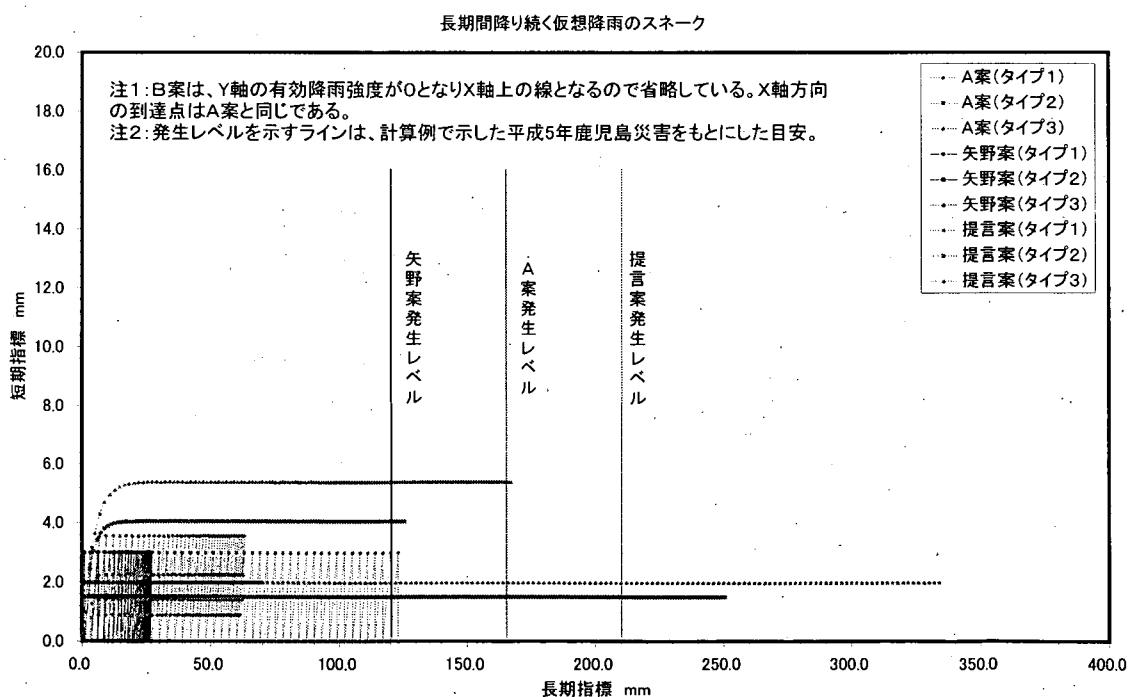


図 4.10 長期間降り続く仮想降雨のスネークライン

5. 基準雨量の信頼性の向上

5.1.1. 災害調査と資料の蓄積

基準雨量の設定結果は、基礎となる土砂災害の発生時刻の正確さに応じて左右される（図5.1）。また、発生した場所がわからなければ降雨データとの付き合い合わせができない。さらに、土砂移動の規模（量）、被害状況など災害の程度が十分に把握されていなければ安全側の基準となり過ぎたり、逆に危険側の基準となり過ぎたりする。

今後土砂災害が発生した場合には発生時刻や位置、規模（量）、被害状況等に関する災害調査を積極的に行い、確実な資料の蓄積を進めていかなければ的確な基準雨量の設定は望めない。

確実な資料の蓄積のためには、警戒・避難基準を超過するような降雨が生じた場合に、必ず災害や現象の発生状況を確認するための調査を徹底するなど、対応が必要であろう。また、災害報告等の記録者が正確なものと曖昧なものを区別して書くだけでも多いに役立つものとなるであろう。さらに、災害調査では、被災者や近隣の在住者などへの聞き込み調査が有効な手段となるので、必ず実施するようにしたい。

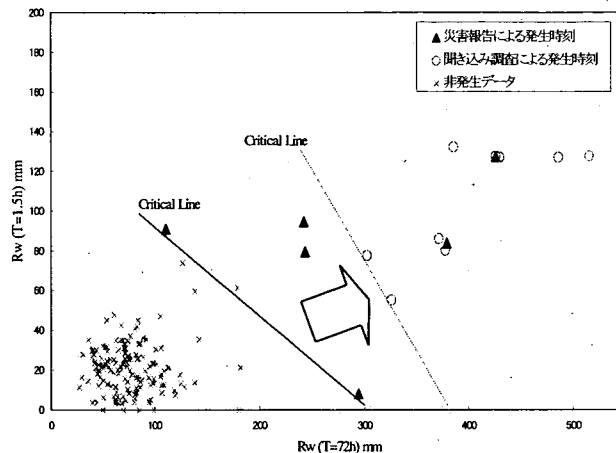


図 5.1 発生時刻の正確さ応じた基準線の相違 38)

5.1.2. 確実な非発生降雨の調査と蓄積

土砂災害をもたらす降雨よりそうでない降雨の方が遥かに多いことや、災害調査の困難さを考慮すると、日頃より災害を生じなかったと確信できる降雨と非発生であった範囲を確実に蓄積し、発生降雨はもとより非発生降雨のみでも積極的に基準雨量を見直す姿勢で取り組むことが重要である。

確実な非発生降雨の把握は、非発生であった事実を日報として記録したり、定期的あるいは豪雨後に空中写真撮影を行って崩壊・土石流の発生・非発生状況を網羅的に確認する方法が考えられる。

5.1.3. 基準雨量の見直し

(1) 見直しの必要性和時期

基準雨量は、雨量データや災害状況に関する資料の密度と精度に依存する。また、地盤の強度などの災害発生条件も変化している可能性がある。そのため、前項まで述べた災害調査や非発生降雨の調査に基づき、常に基準雨量の見直しのための資料を蓄積することが必要である。その上で対象区域内で災害が発生した場合、非発生降雨であっても発生危険基準や避難基準を超過する降雨が蓄積された場合など基準雨量の見直しのための検討を行うことが

必要である。

(2) 大きな土砂生産環境の変化に伴う見直し

地震・噴火・風倒木の大量発生等に伴って大きな土砂生産環境の変化を生じることがある。このような場合、影響が広域に及んだり、現地立入りの危険性などから、状況把握や二次的な土砂災害予測に困難を極める場合が多い。特に、梅雨等による降雨が目前に迫っているなどの状況下では、極めて緊急な対応が要求される。

そのため、土砂生産環境に大きな変化が生じた際には、過去の事例を参考とするなど、状況に応じて暫定的に基準を引き下げ、降雨による土砂移動現象の発生状況を監視しながら、徐々に実態に応じた基準に引き上げるなどの対応が有効である。

(3) 基準の見直し方法

前述のとおり、基準雨量の信頼性を向上させるためには、定期的あるいは状況変化に応じて見直しを重ねることが必要である。また、発生降雨はもとより非発生降雨のみでも積極的に見直すことが重要である。

基準雨量の見直しは、図 5.2、図 5.3 および前述の図 3.22 を参考にして、既に設定された基準雨量の設定図上に基準設定時点より現在までのスネークラインや土砂災害の発生時点を図示する。次に、発生の集中域や非発生スネークの集中域を把握し、表 3.9 の CL 設定パターンを参考に CL の見直しを行う。CL の見直しにあたっては、信頼性の曖昧な過去の発生・非発生降雨に固執することなく、最近の正確な情報に基づき見直すことが重要である。

EL・WL については、各基準線の超過時刻と災害発生時刻までの時間差が想定に対して適正であったか否かを検証し、想定雨量の見直しや短時間降雨予測の活用などを検討した上で必要に応じて見直す。

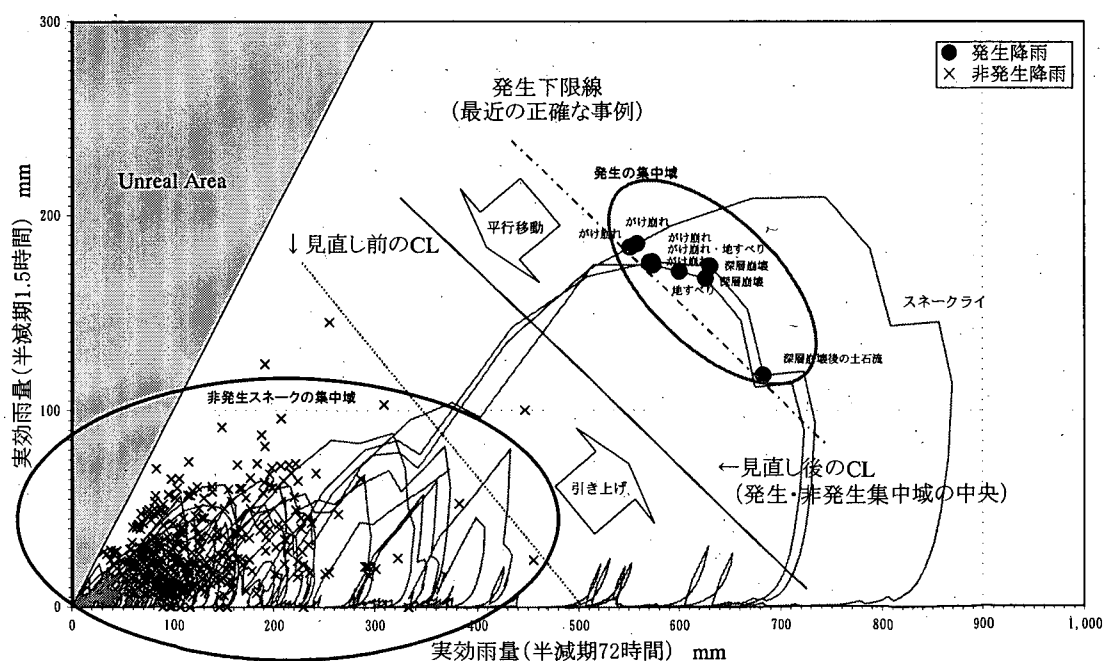


図 5.2 長期間のスネークラインを利用した基準雨量の見直し

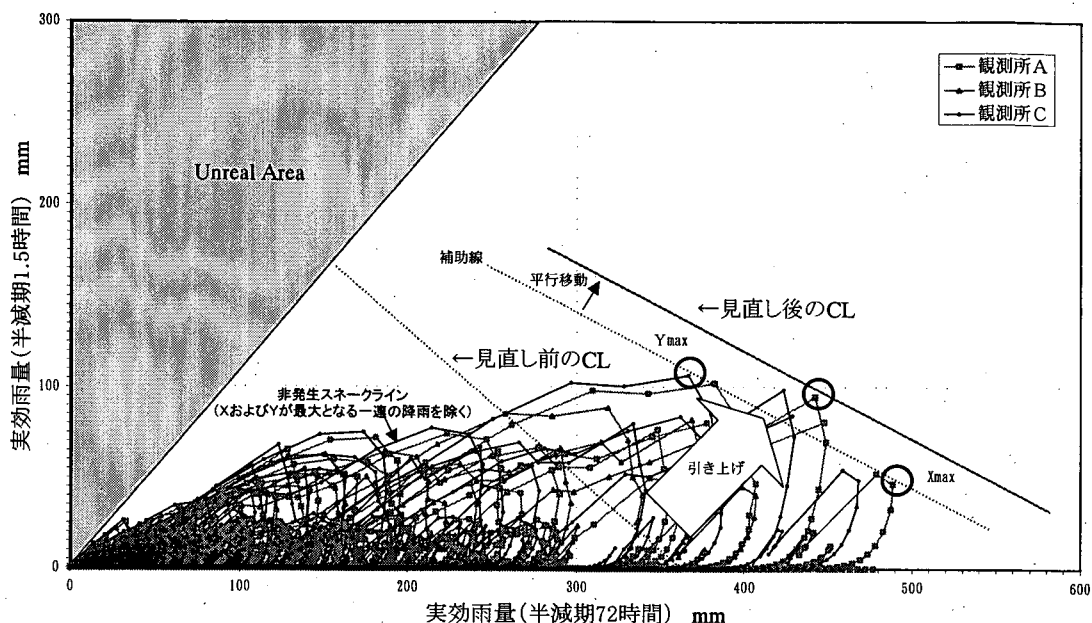


図 5.3 複数観測所の雨量資料を利用した非発生スネークラインによる見直し

5.1.4. 手法の改善

過去に設定された基準雨量において、空振りが多く実用に耐えないとの声を耳にすることがある。この問題は、既往最大雨量等により CL を引き下げるかたちで EL・WL を設定している方法に起因していることが多いようである。この場合、10 分間更新の新しい短時間降雨予測情報を活用するなどの方法で改善できる余地があり⁴⁰⁾、対象地域における短時間降雨予測情報の精度を確認したのち、活用することを検討したい。

一方、CL の的確さや降雨指標の適正などに関しては、現時点で手法の善し悪しを論じる以前に、設定根拠とした災害発生・非発生降雨の信頼性に関する問題が多いように思われる。そのため、まずは正確な情報の蓄積に精力を注ぐことが最優先の課題であり、情報の蓄積を待って手法の適性を再評価したり、新たな手法（わかりやすい手法、斜面・溪流ごとに精度よく予測できる手法など）を検討することによって手法の改善に努める必要がある。

あとがき

本報告書では、土砂災害から人的被害を防止、軽減するための警戒避難基準雨量の設定手法について、現在各都道府県で用いられている代表的な4つの手法を取り上げ、その考え方や実際の設定手順を述べた。また、基準の精度は、基となる土砂災害の発生データの質に大きく依存すること、設定された基準は土砂災害の発生、非発生にかかわらず随時見直すことで信頼性を向上させる必要があることを述べた。本書を参考に、警戒避難基準雨量が設定され、また設定されている警戒避難基準雨量が活用されることにより、土砂災害による人的被害が減少することを願って止まない。

本報告書は、砂防情報戦略会議（座長；南哲行砂防計画調整官）のメンバーに御議論いただくとともに、ご意見を参考にさせていただいている。ここにメンバーのお名前を列举することで、感謝の意を表させていただく。山田孝北海道大学農学部助教授、板屋英治砂防計画課課長補佐、伊藤仁志同課課長補佐、越智英人同課計画係長、立松明憲同課計画係員、吉柳岳志中部地方整備局河川部建設専門官、渡正昭独立行政法人土木研究所土砂管理研究グループ火山・土石流チーム上席研究員、櫻井亘同主任研究員、山越隆雄同研究員、西本晴男（財）河川情報センターデータベース部部长、反町雄二（財）砂防・地すべり技術センター企画部部长、関信明同総合防災部部长、嶋大尚同総合防災部主任技師。

最後になりますが、本報告書のとりまとめにあたっては、（財）砂防・地すべり技術センターの多大なるご協力をいただきました。ここに、深く感謝申し上げます。

参考文献および関連文献

- 1) 瀬尾克美・船崎昌継 (1974) : 土砂害 (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.27, No.2
- 2) 池谷 浩 (1974) : 降雨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
- 3) 瀬尾克美・横部幸裕 (1978) 土砂害 (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
- 4) 泉 岩男・池谷 浩 (1978) : 土石流危険区域調査および警戒避難: 基準雨量の想定方法に関する一試案, 砂防学会誌 (新砂防) Vol.31, No.1
- 5) 芦田和男・高橋保・澤井健二 (1978) : 土石流危険度の評価手法に関する研究, 京都防災研究所年報, 第 21 号 B-2
- 6) 鈴木雅一・福嶋義宏・武居有恒・小橋澄治 (1979) : 土砂災害発生の危険雨量, 砂防学会誌 (新砂防) Vol.31, No.3
- 7) 渡辺 敏・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: 一高知県仁淀川流域を対象として一, 砂防学会誌 (新砂防) Vol.31, No.3
- 8) 道上正規・小島英司 (1981) : 集中豪雨によるがけ崩れの発生予測に関する研究, 鳥取大学工学部研究報告, 第 12 巻, 第 1 号
- 9) 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
- 10) 渡辺 敏・西脇 弘・小林文位 (1982) : 土石流災害の避難基準雨量に関する一試案: 一災害例の殆ど知られていない地域への適用を目的として一, 砂防学会誌 (新砂防) Vol.34, No.4
- 11) 瀬尾克美・水山高久・山口勝輔・岩淵登喜夫 (1983) : 土石流警戒避難のための短時間降雨予測実験, 砂防学会誌 (新砂防) Vol.36, No.3
- 12) 水山高久・瀬尾克美 (1984) : 山地小流域の洪水到達時間および短時間降雨強度と継続時間の関係, 砂防学会誌 (新砂防) Vol.37, No.3
- 13) 建設省河川局砂防部 (1984) : 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)
- 14) 瀬尾克美・五大 均・原 義文・塩島由道 (1985) : 土石流警戒・避難基準としての降雨指標について, 砂防学会誌 (新砂防) Vol.38, No.1
- 15) 飯田 修・田中隆文・竹田泰雄・片岡 順 (1986) : 月ヶ平流域における表層崩壊に関する雨量についての一考察, 砂防学会誌 (新砂防) Vol.39, No.4
- 16) 駒村富士弥 (1988) : 表層崩壊発生危険雨量の予測, 地すべり, 第 25 巻 1 号
- 17) 山口伊佐夫 (1989) : 地域防災対策特別整備治山事業推進の要点(Ⅱ) 治山, 第 33 巻 2 号
- 18) 久保田哲也・正務 章・板垣昭彦 (1990) : 流域の代表地点における短時間降雨予測手法の開発, 砂防学会誌 (新砂防) Vol.42, No.5
- 19) 久保田哲也・正務 章・板垣昭彦 (1990) : 流域の任意地点における短時間降雨予測手法の土石流発生危険度判定図の開発, 砂防学会誌 (新砂防) Vol.42, No.6
- 20) 石川芳治 (1990) : 気象と土砂災害- 8 : : 降雨量を用いた土石流の警戒・避難基準, 砂防学会誌 (新砂防) Vol.43, No.1
- 21) 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
- 22) 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
- 23) 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, Vol.45, No.2

- 24) 建設省河川局砂防部 (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
- 25) 松沢昌志・大原正則・今井一之・杉原忠広 (1993): がけ崩れ発生限界雨量について, 砂防学会研究発表会概要集
- 26) 井良沢道也・北川 明・杉浦幸彦・竹森史郎 (1994): レーダによる降雨予測の土砂災害への適用, 砂防学会誌 (新砂防) Vol.46, No.6
- 27) 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
- 28) 久保田哲也・池谷 浩 (1994): 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
- 29) 仲野公章・富田陽子・桜井亘 (1995): 兵庫県南部地震後の六甲山系における土砂災害ソフト対策, 砂防学会誌 (新砂防) Vol.48, No.2
- 30) 村石尚 (1996): 鉄道沿線の斜面災害の危険度評価, 砂防学会誌 (新砂防) Vol.49, No.1
- 31) 井良沢道也・竹森史郎・兪 朝夫・遠藤治郎 (1997): 短時間降雨確率予測値の土砂災害への適用, 砂防学会誌 (新砂防) Vol.50, No.3
- 32) 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): 土石流危険渓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.574, VI-36
- 33) 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渓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
- 34) 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 (新砂防) Vol.53, No.1
- 35) 林 孝標・我部山佳久・小山内信智 (2000): 警戒体制解除の目安としての土石流警戒避難基準雨量の運用に関する検討, 砂防学会誌 (新砂防) Vol.53, No.2
- 36) 瀬尾克美・平川泰之・天野 篤・小橋澄治・菊井稔宏・川満一史 (2000): 1998年8月末福島県南部災害における崩壊と降雨の関係, 砂防学会誌 (新砂防) Vol.53, No.5
- 37) 瀬尾克美・原口勝則・菊井稔宏・齋藤義文 (2000): 地域住民にわかりやすい防災システムについて: 砂防学会誌 (新砂防) Vol.53, No.5
- 38) 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
- 39) 倉本和正・鉄賀博己・荒川雅生・中山弘隆・古川浩平 (2001): RBF ネットワークを用いたがけ崩れ警戒避難基準雨量の設定について, 砂防学会研究発表会概要集
- 40) 山越隆雄・山田孝・仲野公章・渡正昭 (2001): 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 (投稿中)

参考資料

1. 短時間降雨予測の活用
2. B案におけるE L・W Lの線形誘導
3. 提言案におけるE L・W L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。

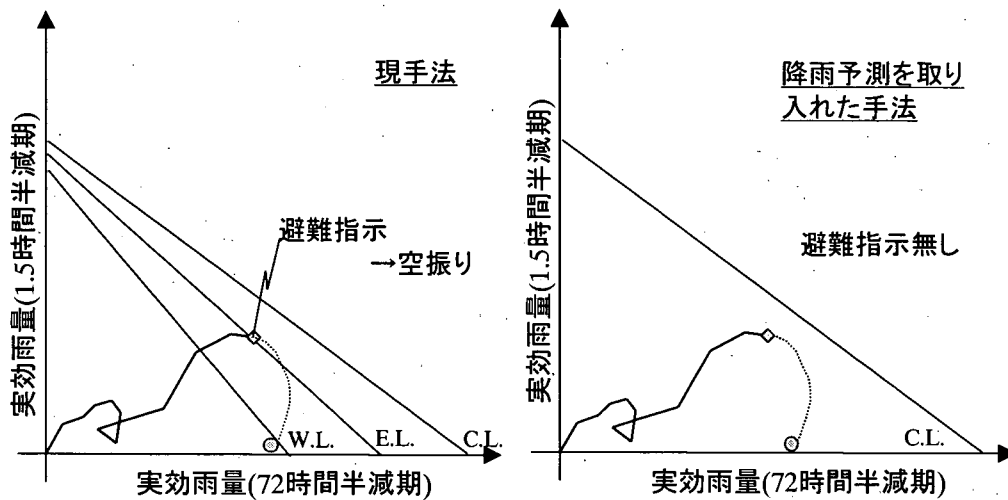


図-1 現手法では避難指示が空振りに終わる場合

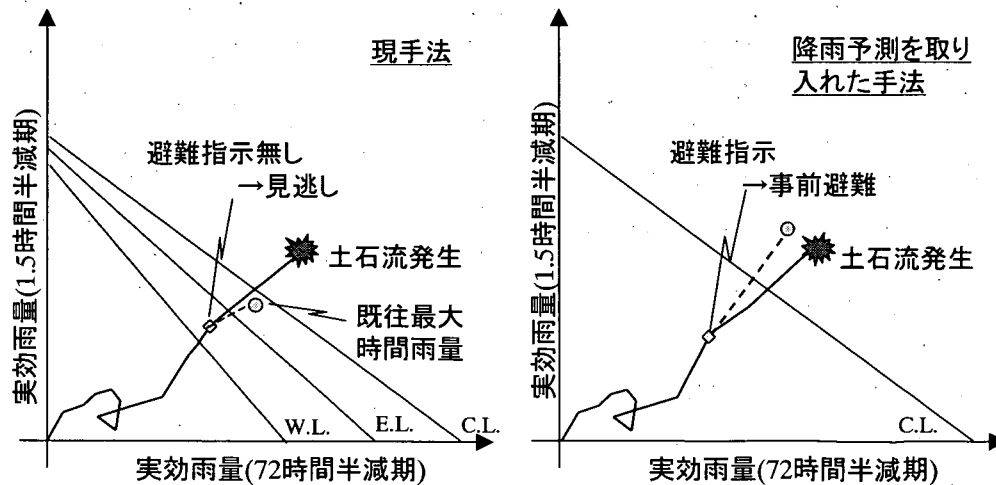


図-2 現手法では避難が失敗に終わる場合

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: 大峠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。

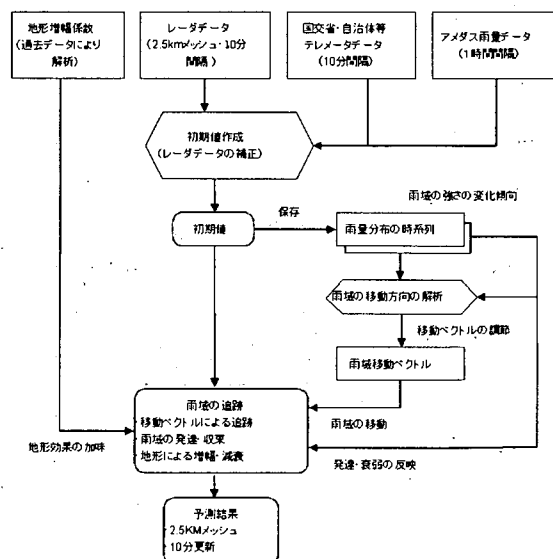


図-3 運動学的手法による短時間降雨予測の例

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

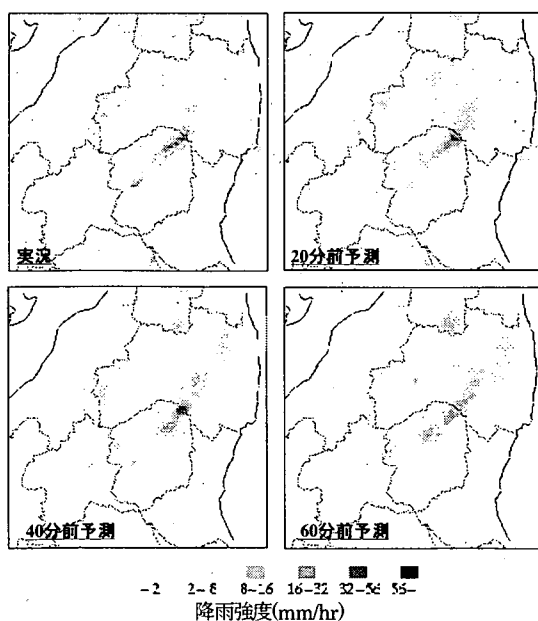


図-4 栃木福島災害時の予測状況(広域図)
(1998年8月27日4:30)

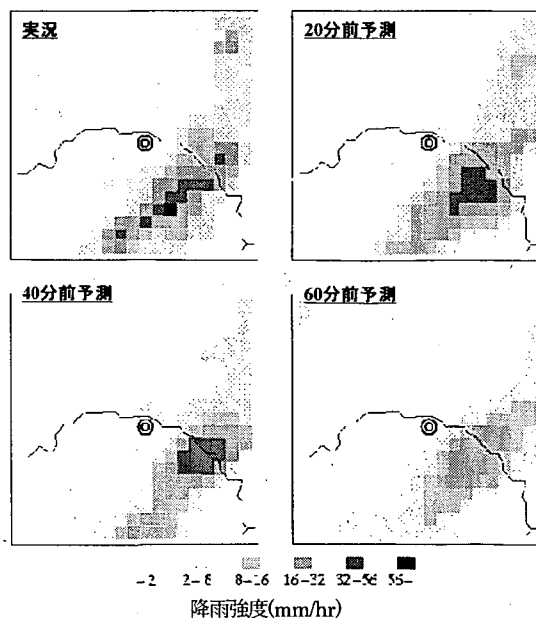


図-5 栃木福島災害時の予測状況(拡大図)
(1998年8月27日4:30)

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。

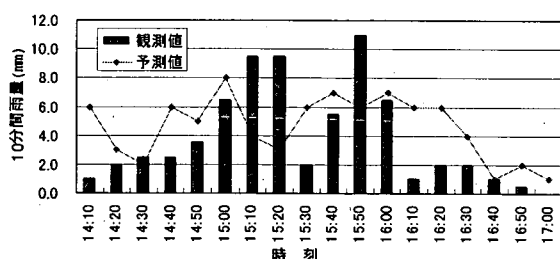


図-6 10分間更新短時間降雨予測(60分前予測)と実測値の比較(1999年6月29日、広島市可部)

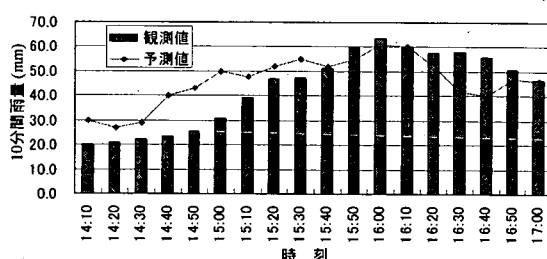


図-7 10分間更新短時間降雨予測値(60分前予測)と実測値による1.5時間半減期の実効雨量の比較(1999年6月29日、広島市可部)

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、「 t 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。

$$R_t = \alpha \cdot R_{t-1.5\text{時間}} + r_t$$

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

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。

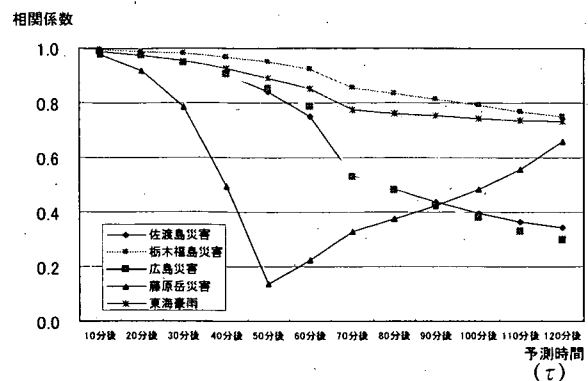


図-8 半減期 1.5 時間の 10 分間更新短時間降雨予測による実効雨量と実測値による実効雨量との予測時間別相関係数

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

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。

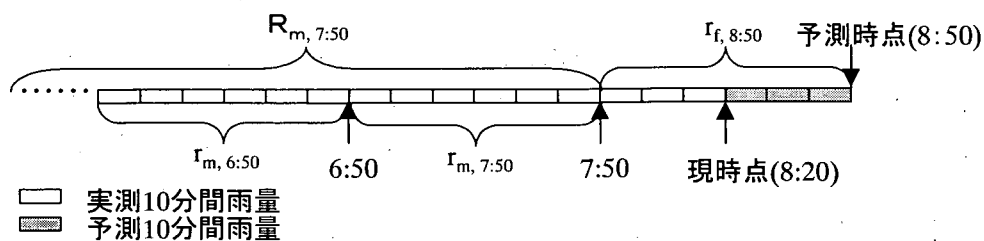


図-9 予測実効雨量の求め方の例

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。

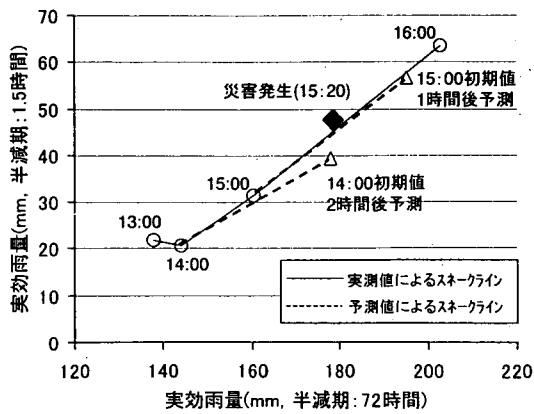


図-10 広島災害時の60分更新短時間降雨予測によるスネークライン

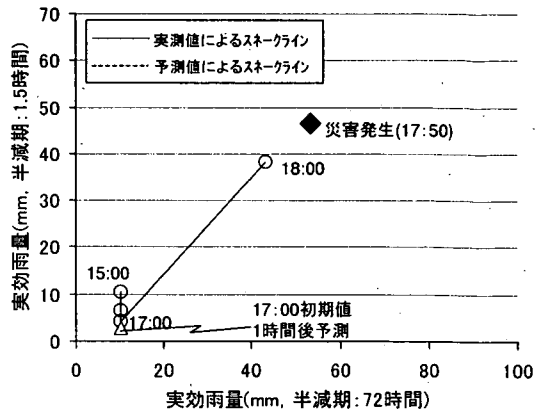


図-12 藤原岳災害時の60分更新短時間降雨予測によるスネークライン

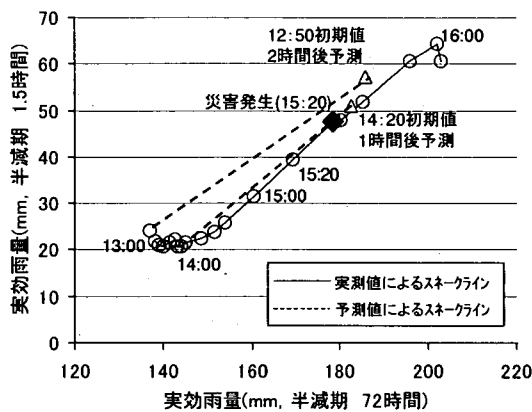


図-11 広島災害時の10分間更新短時間降雨予測によるスネークライン

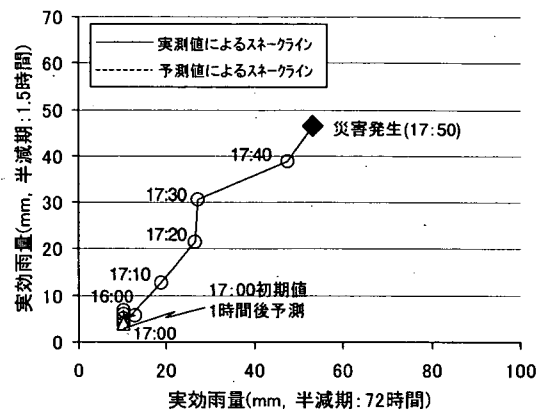


図-13 藤原岳災害時の10分間更新短時間降雨予測によるスネークライン

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 10km^2 程度）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見える。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) Orlanski, 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。

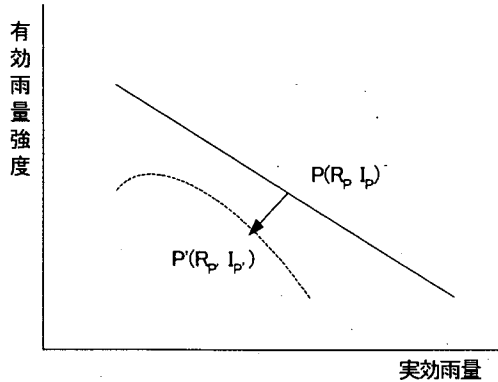


図1 避難基準線の設定

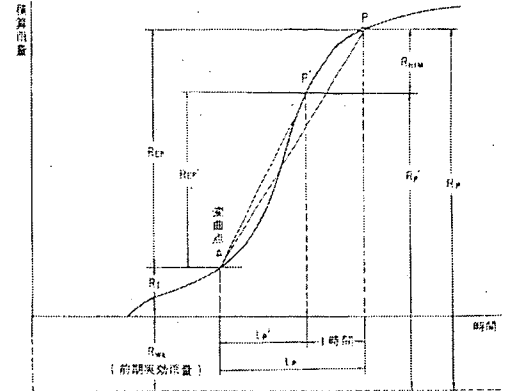


図2 時間-積算雨量関係

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。

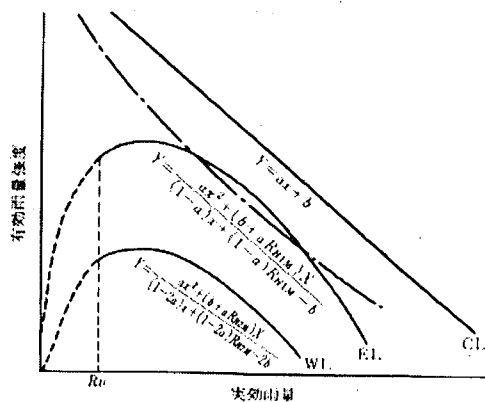


図3 避難基準線・警戒基準線の一般式

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。

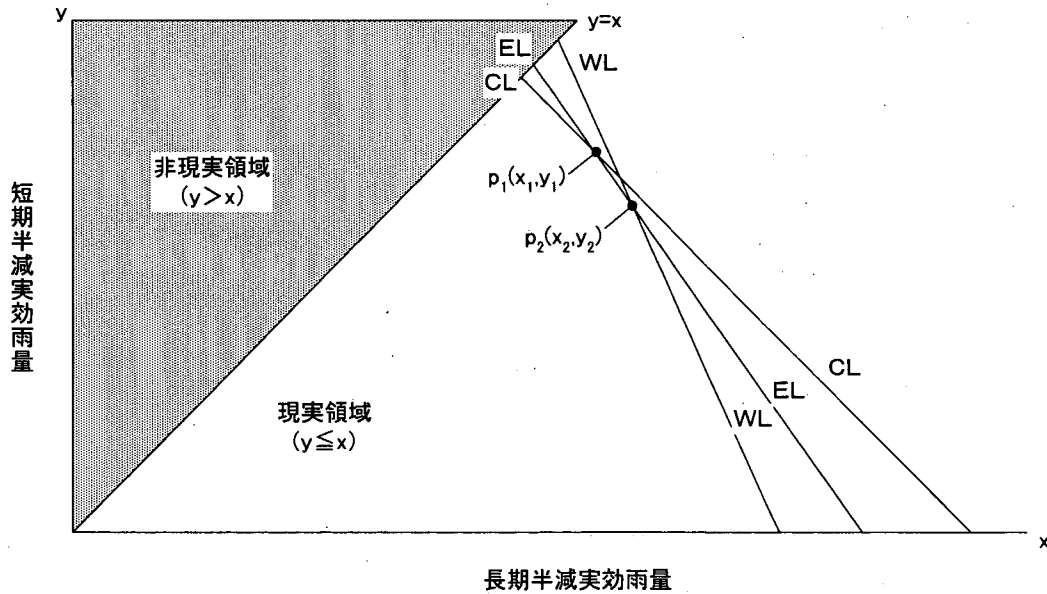


図4 基準線の逆転現象

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。

© 国土技術政策総合研究所資料
TECHNICAL NOTE of NILIM
No. x 2001.9

編集・発行 国土技術政策総合研究所
(住所) 茨城県つくば市 旭一番地

本資料の転載・複製の問い合わせは (0298-64-2211, ext.3211)