

**国土交通省河川局砂防部と気象庁予報部の連携による
土砂災害警戒避難基準雨量の設定手法**

(案)

平成17年6月

国土交通省河川局砂防部

気 象 庁 予 報 部

国土交通省国土技術政策総合研究所

目 次

1 . はじめに	1
2 . 適用	2
2 - 1 . 対象とする現象	2
2 - 2 . 適用地域	2
2 - 3 . 降雨指標	2
3 . 設定方法	3
3 - 1 . 設定手順	3
3 - 2 . 資料収集・整理	4
(1) 降雨資料の収集・整理	4
(2) 土砂災害資料の収集・整理	4
3 - 3 . 土砂災害発生時の降雨の特定	4
3 - 4 . RBFN を用いた応答曲面の設定	5
(1) 非発生降雨データの作成	5
(2) 応答曲面の設定	5
3 - 5 . 等 RBFN 出力値データの抽出	7
3 - 6 . CL の設定	8
(1) CL の検討手順	8
(2) CL の見直し	13

別紙資料 1 土壌雨量指数について

別紙資料 2 RBF ネットワークを用いた応答曲面の設定方法および解析モデルについて

1. はじめに

本資料は、大雨による土砂災害発生の危険度が高まったときに、市町村長が防災活動や住民等への避難勧告等の災害応急対応を適時適切に行えるよう支援するため、その判断基準として国土交通省河川局砂防部と気象庁予報部が連携して策定した土砂災害警戒避難基準雨量（以下「連携案」という。）を解説したものである。本資料をもとに、都道府県と気象庁が共同して作成・発表する土砂災害警戒情報に係る基準策定や、各都道府県・市町村等土砂災害関係部局における土砂災害防止のために広く活用頂くことを期待する。

連携案は、次のような基本的考え方に基づく基準設定手法である。

- ・ 基準の設定にあたっては、短期降雨指標には 60 分間積算雨量、長期降雨指標には土壌雨量指数の 2 指標の組み合わせを用いることとする。
- ・ 土砂災害発生危険基準線（Critical Line：以下「CL」という。）は、過去に土砂災害が発生しなかったときの降雨（以下「非発生降雨」という。）を用いて設定した土砂災害の危険性が低いと想定される降雨の発現する確率の高い領域（以下「安全領域」という。）と、過去の土砂災害の発生状況や避難勧告等の実態などを総合的に勘案して、安全領域と土砂災害の危険性が相対的に高いと想定される降雨の発現する確率の高い領域の境界として設定することとする。
- ・ CL は、ある一定の範囲の土砂災害の危険度を降雨に基づいて評価するために設定するものであり、土砂災害危険箇所ごとの地形・地質および植生等の影響をも考慮して土砂災害の危険度を評価するために設定するものではない。
- ・ CL については、設定した後においても、新たな降雨データや災害データをもとに適宜見直すこととする。

【土砂災害警戒情報に連携案を適用する場合】

土砂災害警戒情報の CL の設定にあたっては、上記基本的考え方を踏まえつつ、都道府県砂防部局と共同で発表作業を実施する気象庁予報部、管区气象台、海洋气象台又は地方气象台（以下「地方气象台等」という。）とが緊密な連携を図るとともに、有識者や最終的な利用者である市町村並びに住民などの意見を踏まえ、避難勧告等に対してより実効性のあるものにすることが望ましい。

なお、本資料の内容については、今後さらに地域特性の考慮やより詳細な地域に対する危険度の提供など、適宜設定手法の高度化に努めることとする。

2. 適用

2 - 1 . 対象とする現象

対象とする現象は、「土石流」および「集中的に発生するがけ崩れ」とする。「集中的に発生するがけ崩れ」とは、土壌雨量指数が一定以上となった場合に、一連の降雨のピーク付近で、ある一定の範囲で発生する崩壊として定義されるものである。

【土砂災害警戒情報に適用する場合】

土砂災害警戒情報の CL 設定にあたり対象とする現象は、市町村長が防災活動や住民等への避難勧告等の災害応急対応を必要とする「土石流」および「集中的に発生するがけ崩れ(CL 設定に用いる降雨データメッシュ区画(以下「降雨メッシュ」という。)内で降雨を誘因として複数件発生する崩壊)」とする。

2 - 2 . 適用地域

CL は、その利用目的や CL 設定に用いる降雨データの密度・精度、土砂災害危険箇所の有無・状況等を勘案して CL 設定が必要かつ妥当と考えられる地域(以下「CL 適用地域」という。)に対してそれぞれ適用する。なお、当該 CL は、各 CL 適用地域内での土砂災害の危険度を降雨に基づいて評価するものであり、地形・地質および植生等の影響をも考慮して土砂災害の危険度を評価するものではない。

【土砂災害警戒情報に適用する場合】

土砂災害警戒情報の CL 適用地域は、CL 設定に用いる降雨メッシュ(約 5km 格子)単位とする。ただし、自然的、社会的条件等の観点から勘案して、土砂災害の危険性が認められない降雨メッシュについては、CL 適用地域から除外する。

2 - 3 . 降雨指標

基準の設定にあたっては、短期降雨指標、長期降雨指標の 2 指標の組み合わせを用いることとし、短期降雨指標には 60 分間積算雨量、長期降雨指標には、降った雨が土壌中に貯まっている状態を推計する土壌雨量指数(土壌雨量指数の詳細な説明については、別紙資料 1 を参照する他、地方気象台等から適宜必要な情報の提供を受けること。)を用いることとする。

3 . 設定方法

3 - 1 . 設定手順

本手法では ,安全領域と過去の土砂災害の発生状況や避難勧告等の実態などを総合的に勘案して CL を設定する . CL の設定手順は、図-1 のフローに示すとおりである。なお、安全領域の特定にあたっては、非線形判別に優れ、CL 設定の客観性向上が図られる RBF ネットワーク (以下「RBFN」という。) を用いることとする (RBFN の詳細な説明については、別紙資料 2 を参照)。



図-1 CL の設定フロー

3 - 2 . 資料収集・整理

(1) 降雨資料の収集・整理

各 CL 適用地域について、CL 設定に必要な過去の 60 分間積算雨量及び土壌雨量指数を収集・作成する。ここで、CL 設定に必要な過去資料の収集期間は、10 年以上を原則とする。

【土砂災害警戒情報に適用する場合】

土砂災害警戒情報の CL 設定にあたっては、気象庁の解析雨量、土壌雨量指数を用いることとし、これら降雨資料については、関係する地方气象台等と調整の上、当該地方气象台等から各都道府県へ提供する。また、国土交通省、都道府県等が管理する雨量計に基づく降雨資料についても、山間部等の局地性等を反映した効果的な CL 設定が可能となることから、地方气象台等から提供する降雨資料との特性を比較検討の上、CL 設定の際、利用に努めることとする。

(2) 土砂災害資料の収集・整理

降雨資料対象期間内に発生した土砂災害について、発生箇所（住所、緯度・経度）、溪流名もしくは箇所名、発生年月日（時間単位の精度を有することが望ましい）、災害種別（土石流、がけ崩れ、地すべり）、被害状況（死者、行方不明、家屋損壊など）、避難勧告等の発令の有無などを収集・整理する。また、収集した土砂災害の住所、緯度・経度から、当該発生箇所が含まれる CL 適用地域についても整理する。

【土砂災害警戒情報に適用する場合】

土砂災害警戒情報の CL 設定にあたっては、都道府県砂防部局が地方气象台等と連携しながら上記土砂災害資料の収集・整理を行うものとする。

3 - 3 . 土砂災害発生時の降雨の抽出

各 CL 適用地域について、2 - 1 で定義した災害の発生が確認されている一連の降雨（以下、「発生降雨」という。）を抽出する。また、2 - 1 で定義した災害の発生が確認されていない一連の降雨（ただし、何らかの土砂災害の発生は確認）であっても、被害状況などから、発生降雨とすることが妥当であると判断される場合は、当該降雨を発生降雨として取り扱う。なお、収集した降雨資料のうち、発生降雨以外はすべて非発生降雨とする。ここで、一連の降雨とは、一例として、前後に 24 時間以上の無降雨期間があるひとまとまりの降雨と定義する（図-2 参照）。

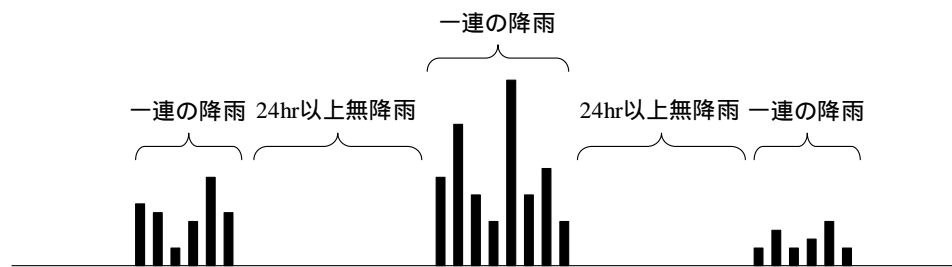


図-2 一連の降雨の概念図

【土砂災害警戒情報に適用する場合】

土砂災害警戒情報においては、各降雨メッシュそれぞれに、発生降雨を抽出する。

3 - 4 . RBFN を用いた応答曲面の設定

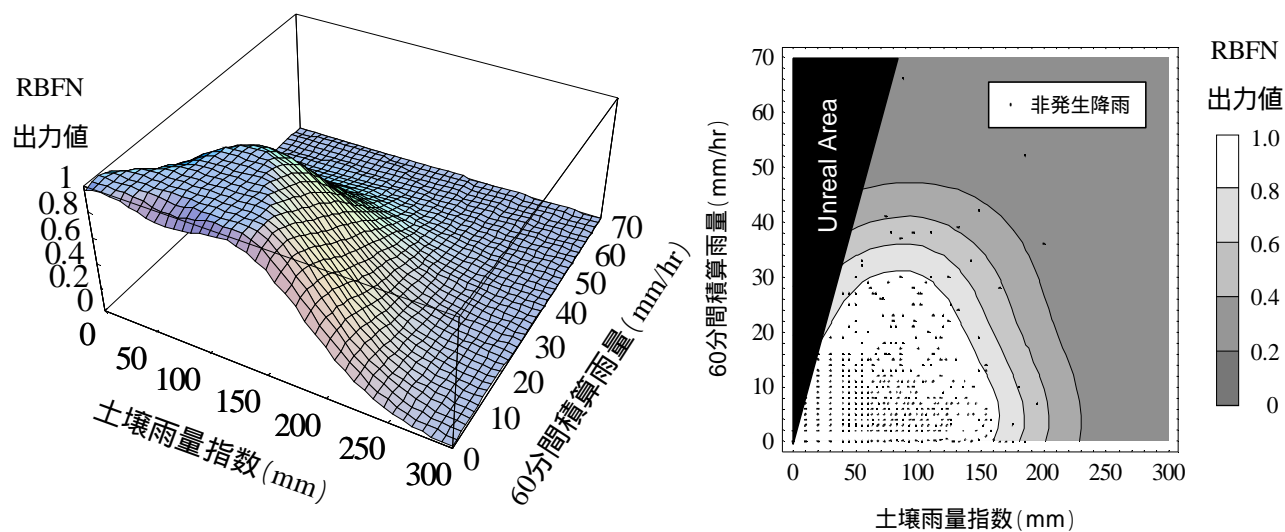
(1) 非発生降雨データの作成

各 CL 適用地域について、収集した降雨資料の中から 3 - 3 . で抽出した発生降雨を除外し、非発生降雨のみとなる降雨データ (以下「非発生降雨データ」という。) を作成する。

(2) 応答曲面の設定

各 CL 適用地域について、RBFN を用いて、3 - 4 . (1) で作成した非発生降雨データに基づく曲面 (以下「応答曲面」という。) を設定する。応答曲面は、x 軸・y 軸をそれぞれ土壌雨量指数・60 分間積算雨量とする平面上の任意の点の降雨量がどの程度の確率で発現するかを表すものである。ここで、応答曲面の z 軸を RBFN 出力値と呼ぶ。また、応答曲面上で RBFN 出力値が同値となる点を結んだ線を等 RBFN 出力値線とし、これを表す座標の集合を等 RBFN 出力値データと定義する。

当該平面上において、非発生降雨データが密にプロットされる領域では、RBFN 出力値が高く、また非発生降雨データが疎の領域では、RBFN 出力値が低くなる。



(a) 3次元での表示例

(b) 2次元での表示例

図-3 応答曲面の設定例

【土砂災害警戒情報に適用する場合】

土砂災害警戒情報における応答曲面の設定については、国土技術政策総合研究所砂防研究室が提供する RBFN プログラムを使用することとする。

3 - 5 . 等 RBFN 出力値データの抽出

各 CL 適用地域について、3 - 4 . にて設定した応答曲面から当該応答曲面の RBFN 出力値 0.1 ~ 0.9 (0.1 間隔) の等 RBFN 出力値データをそれぞれ抽出する (抽出したすべての等 RBFN 出力値データのうち、いずれかひとつは CL を設定する際の基本データとなる)。ここで、等 RBFN 出力値データの抽出間隔は y 軸方向 (60 分間積算雨量) に 1mm/hr 単位とし、それぞれに対応する x 軸方向 (土壌雨量指数) の値を抽出する。

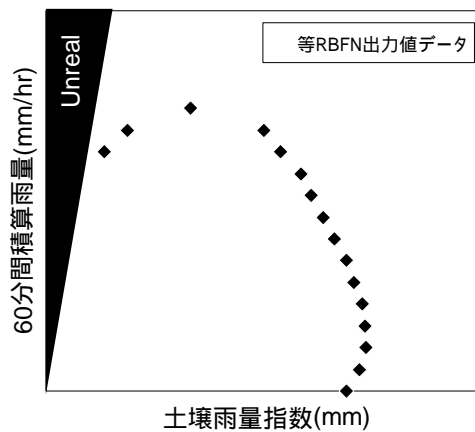


図-4 等 RBFN 出力値データの抽出例

3 - 6 . CL の設定

(1) CL の検討手順

等 RBFN 出力値データの修正

3 - 5 . で抽出した各等 RBFN 出力値データは、実際の現象や危険度と矛盾が生じないようにそれぞれ以下の方法で修正する。

- 1) 図-5 に示すように、等 RBFN 出力値データの土壤雨量指数値が最大となる点 (A1) よりも 60 分間積算雨量値が小さくなる点 (A2 , A3) が存在する場合、A2、A3 の土壤雨量指数値は、A1 点の土壤雨量指数値と同値になるように修正する。

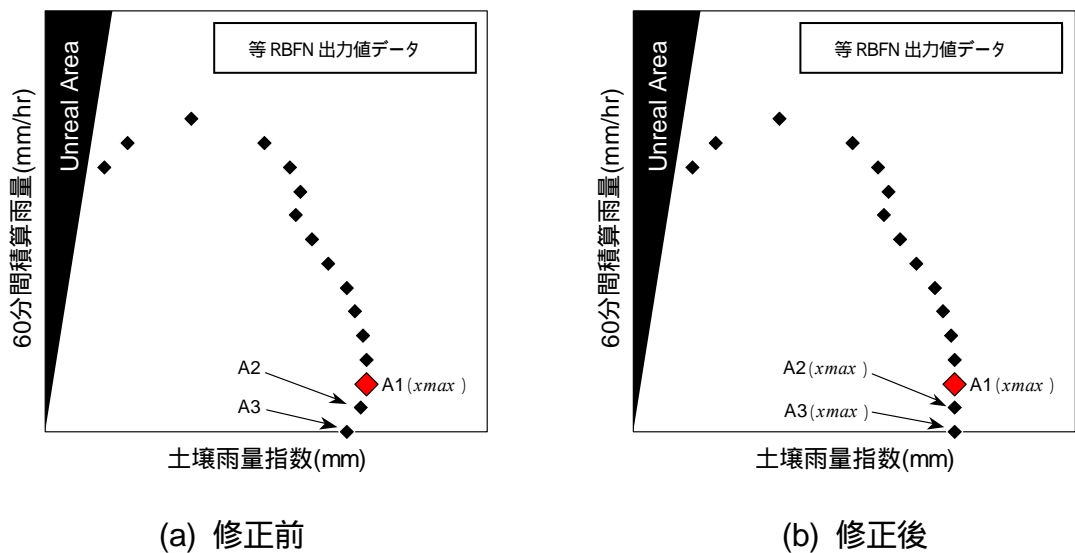


図-5 等 RBFN 出力値データの修正方法
(60 分間積算雨量 min で土壤雨量指数=max となる場合)

- 2) 図-6 に示すように、等 RBFN 出力値データの 60 分間積算雨量値が最大となる点 (B1) よりも土壤雨量指数値が小さくなる点 (B2 , B3) が存在する場合、B2、B3 の 60 分雨量値は、B1 の 60 分間積算雨量値と同値になるように修正する。

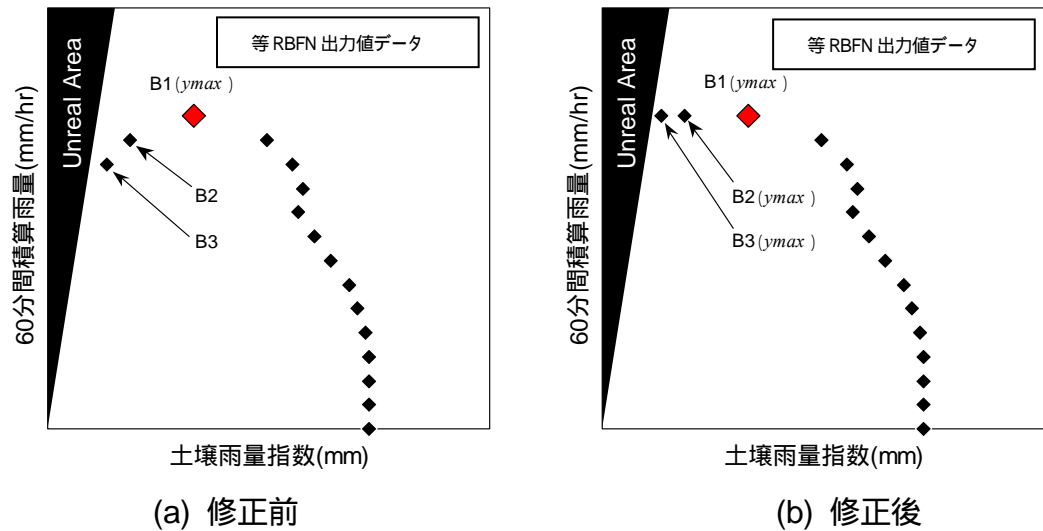


図-6 等 RBFN 出力値データの修正方法
 (土壌雨量指数 min で 60 分間積算雨量=max となる場合)

- 3) 上記 1) 2) を修正した場合であっても、図-7 に示すように、連続する 2 点の等 RBFN 出力値データ (C1, C2) を結んだ直線の傾きが 0 を越えるような場合、C2 の土壌雨量指数値は、C1 点の土壌雨量指数値と同値になるように修正する。

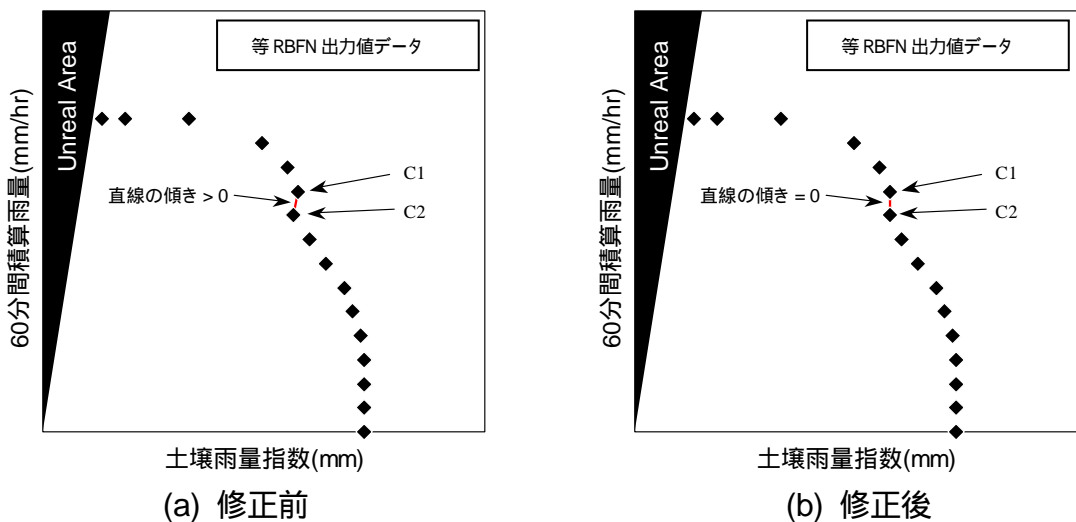


図-7 等 RBFN 出力値データの修正方法 (2 点間の直線の傾き>0 となる場合)

土壌雨量指数の下限値の検討

上記 に基づく曲線をそのまま CL とした場合、地域によっては図-8(a)の斜線 (■) で示す領域 (先行降雨のほとんどない夕立等) で空振りが頻発することも予想される。それらの空振りを回避するために、土砂災害と土壌雨量指数履歴順位や当該領域周辺を通過する発生降雨・非発生降雨のスネークラインの傾向との関係等を参考にして、土砂災害が発生しない安全領域として土壌雨量指数の下限値を設定することができる。土壌雨量指数に下限値を設定した場合、 で設定した曲線は、土壌雨量指数の下限値となる点から左側にある線を y 軸と平行になるように上向きに折り曲げるよう設置する (図-8(b)参照)。

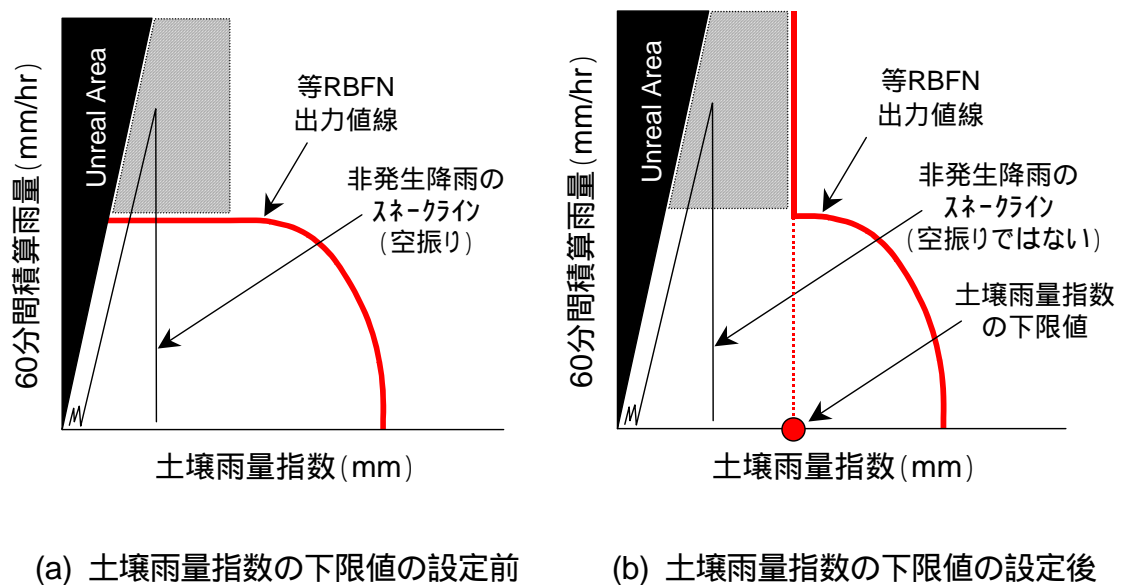


図-8 土壌雨量指数の下限値の設定方法

最終 CL 案の選定

上記 、 を踏まえて修正した各 CL 案 (それぞれ RBFN 出力値 0.1 ~ 0.9 に対応) について、当該 CL に基づく災害捕捉率、発表頻度等を検討した上で、最も妥当と判断される最終 CL 案を選定する。

発生降雨が少ない CL 適用地域については、他の CL 適用地域を参考にして最終 CL 案を選定する。

なお、複数の CL 適用地域をまとめた領域を情報発表の単位として考える場合においては、情報発表単位での災害捕捉率、発表頻度等を検討した上で最終 CL 案を選定する。

【土砂災害警戒情報に適用する場合】

土砂災害警戒情報の最終 CL 案選定にあたっては、各 CL 適用地域（降雨メッシュ）や複数の CL 適用地域をまとめた情報発表単位などでの災害捕捉率、発表頻度等を検討した上で、最も妥当とされる案を選定する。

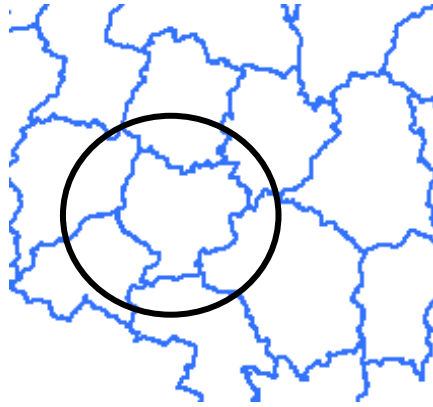


図-9 発表単位が市町村である場合の降雨メッシュのまとめ方

CL の決定

上記 により選定した最終 CL 案について、過去に甚大な土砂災害の発生や避難勧告等の対象となった発生降雨が捕捉されているかを確認し、万一当該発生降雨が捕捉されない場合には、 の再検討を行うほか、適宜、図-10(a)又は(b)の方法等にて、CL の形状を補正するものとする。

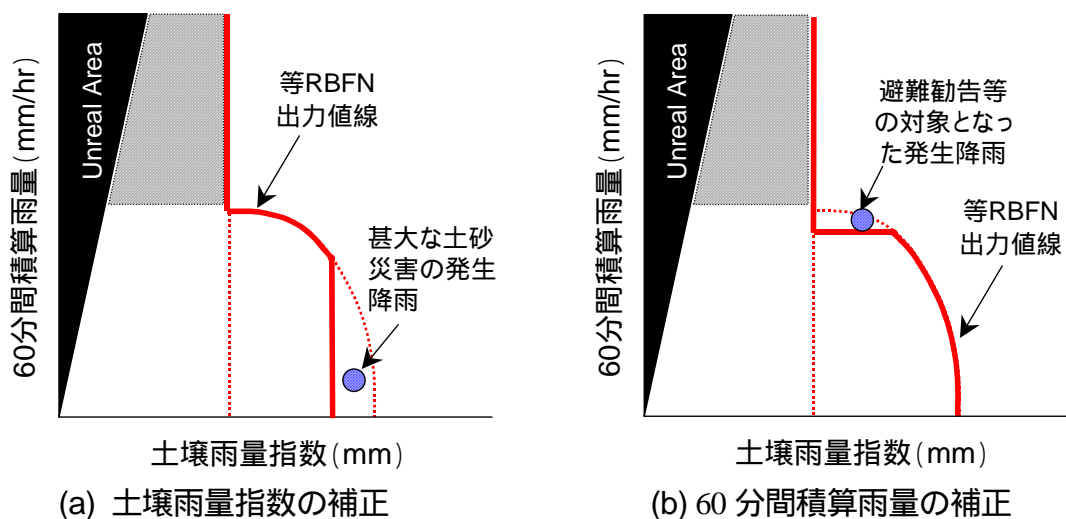


図-10 の CL 案の修正方法

なお、CL 決定に際しては、出来る限り市町村長等の利用者や有識者などの意見を踏まえることが望ましい。

【土砂災害警戒情報に適用する場合】

土砂災害警戒情報の CL 決定にあたっては、市町村長が防災活動や住民等への避難勧告等の災害応急対応を適時適切に行えるよう、都道府県と地方気象台等は密接な連携を図るとともに、市町村長等の利用者や有識者などの意見を踏まえて決定することが望ましい。

また、土砂災害警戒情報の発表基準として決定した CL は、気象庁が土砂災害警戒情報の作成・発表作業用に準備した情報処理システムに登録する必要がある。このためのデータフォーマットは、地方気象台等と調整の上、設定することとする。また、降雨メッシュごとに決定された CL の情報処理システムへの登録にあたっては、当該降雨メッシュ内の各国土数値情報 3 次メッシュ区画(約 1km 格子)領域にて登録することとするが、自然的、社会的条件等の観点から勘案して、土砂災害の危険性が認められない国土数値情報 3 次メッシュ区画については、当該決定 CL の登録を除外するものとする。

災害捕捉率、発表頻度の算出方法

災害捕捉率

発生降雨がある各 CL 適用地域について、3 - 6 .(1) に基づき検討した各 CL 案(それぞれ RBFN 出力値 0.1 ~ 0.9 に対応)に対する発生降雨の超過数・非超過数をそれぞれ求める。超過数・非超過数は CL 案(RBFN 出力値 0.1 ~ 0.9 に対応)別に、ある一定領域(各 CL 適用地域や複数の CL 適用地域をまとめた情報の発表単位など)で整理し、以下の定義にしたがい、各 CL 案における災害捕捉率(%)を算出する。

$$\text{災害捕捉率}(\%) = \frac{\text{発生降雨の超過数}}{\text{発生降雨の超過数} + \text{発生降雨の非超過数}}$$

発表頻度

各 CL 適用地域について、3 - 6 .(1) に基づき検討した各 CL 案(それぞれ RBFN 出力値 0.1 ~ 0.9 に対応)を超過した一連の降雨数をそれぞれ求める。超過した一連の降雨数は CL 案別に、ある一定領域で(各 CL 適用地域や複数の CL 適用地域をまとめた情報の発表単位など)整理し、以下の定義にしたがい、各 CL 案における 1 年あたりに基準を超過する頻度を算出する。

$$\text{発表頻度}(\text{回/年}) = \frac{\text{CL案を超過した一連の降雨数}}{\text{対象期間}(\text{年})}$$

(2) CLの見直し

CLについては、設定した後においても、新たな降雨データや災害データをもとに適宜見直すこととする。

土壌雨量指数について

1. 用いる雨量データ

気象庁ではピンポイントで正確な雨量を観測する地上のアメダス（雨量計）と、局地的な雨も漏れなく観測できるレーダーの長所を結合し、全国をくまなく格子に区切って雨を正確に算出する「レーダー・アメダス解析雨量」を開発して平成3年から運用している。レーダーで観測した雨量を地上の雨量計で補正することにより、局地的な雨も見逃さず正確な雨量を算出している。

「レーダー・アメダス解析雨量」はこれまでも、算出する格子を細かくし（5km×5km から 2.5km×2.5km）、また全国約 1、300 か所のアメダスに加え、国土交通省河川局・道路局、都道府県が所管する約 5、000 か所の雨量計のデータもリアルタイムで導入するなどして、算出する雨量の精度を高めてきている。

基準設定に用いる土壌雨量指数は、この「レーダー・アメダス解析雨量」を用いて 5km×5km 格子で 30 分ごとに算出しているものである。

2. 土壌雨量指数

土壌雨量指数は、直列3段のタンクモデル貯留高の合計値（指数値）によって求められるものであり、指数値が高いほど山崩れ・がけ崩れの危険性が高いと推定する。

図-1 が土壌雨量指数の概念図である。

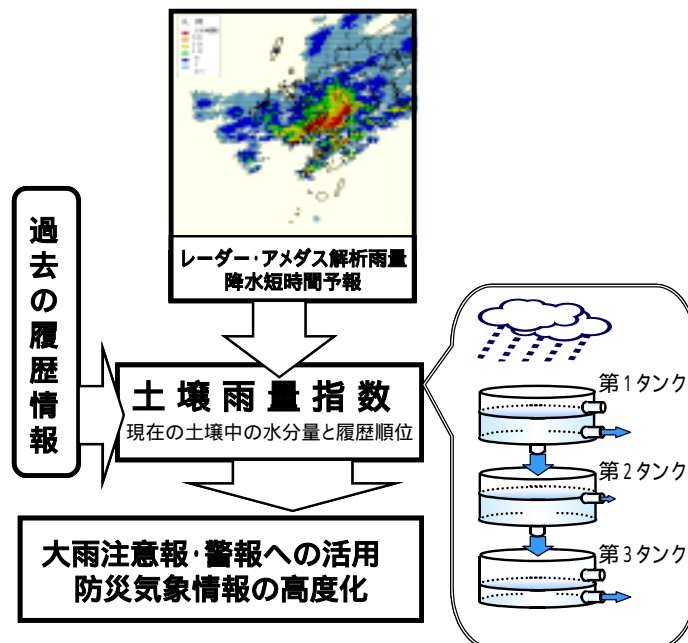


図-1 土壌雨量指数の概念図

土壌雨量指数の各タンクとパラメータ

土壌雨量指数に用いている直列3段タンクモデル(図-2 参照)中の1段目のタンクからの流出量は表面流出に、2段目のタンクからのものは表層浸透流出に、3段目のタンクからのものは地下水流出にそれぞれ対応していると考えられ、各流出量は以下のように記述される。

$$q_1(t) = \alpha_1 \{S_1(t) - L_1\} + \alpha_2 \{S_1(t) - L_2\}$$

$$q_2(t) = \alpha_3 \{S_2(t) - L_3\}$$

$$q_3(t) = \alpha_4 \{S_3(t) - L_4\}$$

ここで、 α_1 、 α_2 、 α_3 、 α_4 ：各流出孔の流出係数

L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 ：各流出孔の高さ

S_i ($i=1, 2, 3$)： i 段目のタンク貯留量

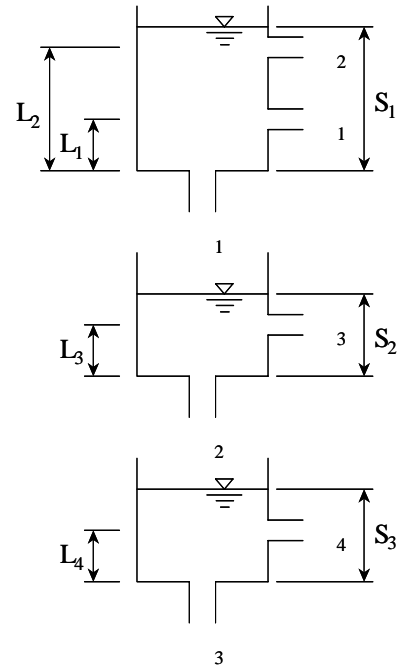
β_1 、 β_2 、 β_3 ：各浸透流出孔の浸透係数

R ：降雨量

$$S_1(t + \Delta t) = (1 - \beta_1 \Delta t) \cdot S_1(t) - q_1(t) \cdot \Delta t + R(t + \Delta t)$$

$$S_2(t + \Delta t) = (1 - \beta_2 \Delta t) \cdot S_2(t) - q_2(t) \cdot \Delta t + \beta_1 \cdot S_1(t) \cdot \Delta t$$

$$S_3(t + \Delta t) = (1 - \beta_3 \Delta t) \cdot S_3(t) - q_3(t) \cdot \Delta t + \beta_2 \cdot S_2(t) \cdot \Delta t$$



各パラメータ(流出孔の高さ、流出係数、浸透係数)の値は表-1に示すとおりである。

図-2 直列3段タンクモデル

表-1 タンクモデルのパラメータ

	一段目	二段目	三段目
流出孔高 (mm)	$L_1=15$ $L_2=60$	$L_3=15$	$L_4=15$
流出係数 (1/hr)	$\alpha_1=0.1$ $\alpha_2=0.15$	$\alpha_3=0.05$	$\alpha_4=0.01$
浸透係数 (1/hr)	$\beta_1=0.12$	$\beta_2=0.05$	$\beta_3=0.01$

土壌雨量指数の指数値は、各タンクの貯留高の和($= S_1 + S_2 + S_3$)で定義する。
 なお、タンクモデルの特徴として、指数値が同じであっても、その後の指数値の変化は各タンクの貯留高に依存することに注意が必要である。

土壌雨量指数履歴順位

履歴順位とは、各格子において、過去の一定期間内で出現した指数値を高い順に並べ直して順位付けしたものである。履歴順位を用いることによって、現在降っている雨による指数値の相対的な順位を把握することが可能となる。この手法により、例えば現在の降雨の履歴順位と同等の履歴順位の降雨で過去に土砂災害が発生していれば、土砂災害発生の危険度が高いと推定できる。また、土砂災害の発生危険度と土壌雨量指数値との対応は地域によって異なるが、土砂災害の発生と履歴順位との対応は地域によって大きな差がない。このことを利用して、過去の土砂災害発生記録が得られない格子であっても、災害記録が入手できる格子の情報から危険度を類推することができる。

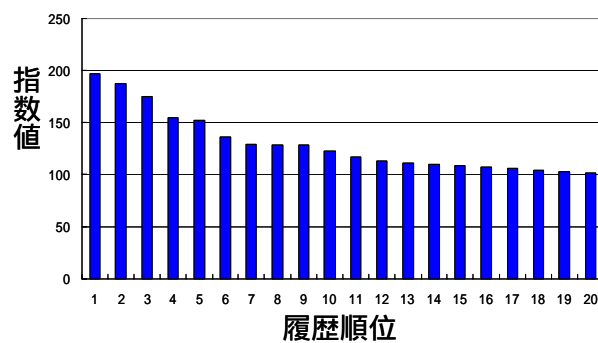


図-3 土壌雨量指数値と履歴順位の関係の例

RBF ネットワークを用いた応答曲面の設定方法および解析モデルについて

1. RBF ネットワークの概要

(1) RBF ネットワークの構成

RBFN は、脳や神経回路網をモデルとした階層構造で、図-1 に示す通り入力層（素子数 n 個）、中間層（素子数 m 個）、出力層（素子数 1 個）の 3 層からなっている。各層は入出力を行う素子から構成されており、各層間の素子は結線によって結ばれているが、同じ層内の素子同士は結合されていない。

中間層における j 番目の素子の出力は主として基底関数の一つである釣鐘状のガウス関数（図-2）を用いる。ガウス関数は式(1)に示す通りであり、基底関数の中心から同心円状にその影響を考慮していくものである。

$$h_j(\mathbf{x}) = \exp(-\|\mathbf{x} - \mathbf{c}_j\|^2 / r^2) \quad (1)$$

ここで、 $h_j(\mathbf{x})$ ：中間層素子からの出力値

$\mathbf{x}(=x_1, \dots, x_n)$ ：入力層素子からの入力データ

\mathbf{c}_j ：基底関数の中心点

r ：基底関数の半径

式(1)に示す基底関数は、 r が大きくなるほど広がり、また、その出力値は入力データが基底関数の中心に近いほど大きな値となる。なお、 $\mathbf{c}_j = (c_{j1}, \dots, c_{jn})$ とするとき、式(2)によって楕円形の基底関数とすることもできる。

$$h_j(\mathbf{x}) = \exp(-\sum_{k=1}^n (x_k - c_{jk})^2 / r_k^2) \quad (2)$$

RBFN におけるデータの流は入力層から出力層への一方通行であり、入力層からのデータは中間層の出力関数によって処理され、出力層に向けて出力される。その際、

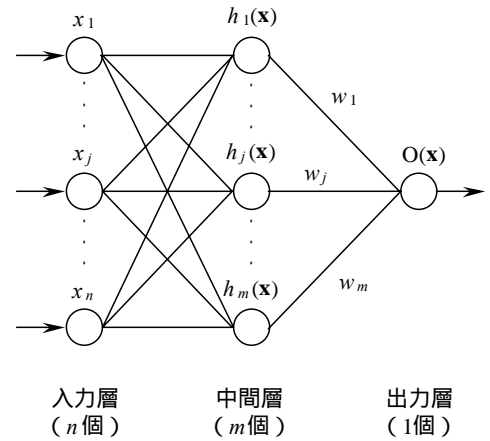


図-1 RBF ネットワークの構造

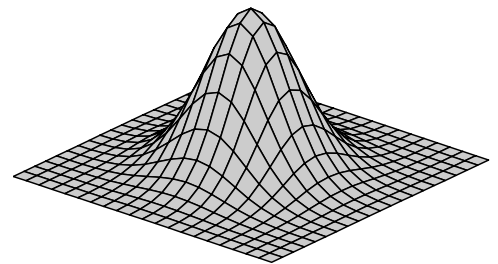


図-2 ガウス関数の形状

中間 - 出力層間は荷重係数と呼ばれる重み付きの結線により両層間の素子が結合されているため、出力層素子への出力は式(3)に示す通りそれぞれの中層素子の出力と結合係数（重み）の積の総和として表される。

$$O(\mathbf{x}) = \sum_{j=1}^m w_j h_j(\mathbf{x}) \quad (3)$$

ここで、 $O(\mathbf{x})$ ：出力層素子の出力値
 w_j ：結合係数

(2) 学習

ニューラルネットワーク（Neural Network：以下「NN」という。）による関数近似の場合、与えられた入出力のデータセットをいかに正確に再現させ、さらにその近傍で汎化性を持たせるかが問題となる。RBFN においても同様に、与えられたデータセットを正確に再現させることが重要であるが、そのためには最適な結合係数を決定する必要がある。RBFN においては、その結合係数を決定するプロセスを学習と称することとする。

RBFN の学習においては、 p 個の学習データ $\mathbf{x}_i (i=1, \dots, p)$ と教師データ $y_i (i=1, \dots, p)$ 、ならびに m 個の基底関数を用いて教師値と出力値の差の 2 乗和を考え、それに結合係数 $w_j (j=1, \dots, m)$ （以下「 \mathbf{w} 」という。）の抑制項を加えた式(4)が最小となるような \mathbf{w} を求める。

$$E = \sum_{i=1}^p (y_i - O(\mathbf{x}_i))^2 + \sum_{j=1}^m \lambda_j w_j^2 \rightarrow \text{Min} \quad (4)$$

ここで、 λ_j ：正則化パラメータ

式(4)の右辺を w_j で偏微分し、それぞれの式を $=0$ として \mathbf{w} について解くと求める \mathbf{w} が得られる。中間層の出力行列 \mathbf{H} と教師データのベクトル \mathbf{y} をそれぞれ式(5)とすると、 \mathbf{w} は式(6)で表せる。

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_1(\mathbf{x}_1) & h_2(\mathbf{x}_1) & \Lambda & h_m(\mathbf{x}_1) \\ h_1(\mathbf{x}_2) & h_2(\mathbf{x}_2) & \Lambda & h_m(\mathbf{x}_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ h_1(\mathbf{x}_p) & h_2(\mathbf{x}_p) & \Lambda & h_m(\mathbf{x}_p) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_p \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{w} = (\mathbf{H}^T \mathbf{H} + \mathbf{\Lambda})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{y} \quad (6)$$

ただし、 $\mathbf{\Lambda}$ は $\lambda_1, \dots, \lambda_m$ を対角成分とする対角行列である。以上のことから、RBFNにおける学習は、逆行列 $\mathbf{A}^{-1} = (\mathbf{H}^T \mathbf{H} + \mathbf{\Lambda})^{-1}$ を求めることと同等であり、さらに出力に対して λ_i が一定値であるとする、出力に無関係に学習でき、式(6)によってそれぞれ出力値に応じて結合係数を決定していけばよいことになる。すなわち、このことは入力のみで学習が終了することを意味している。

2. RBF ネットワークを用いた応答曲面の設定

RBFN においては、基本的に各データセットに対して基底関数を設定し、それらの重ね合せによって応答曲面を設定する。しかしながら、膨大なデータ量を取り扱う場合、すべてのデータセットに基底関数を割り当てると完全学習が望める反面、行列サイズが大きくなり計算が困難になる。しかも、データの分布に偏りが生じることで、汎化能力の低い応答曲面になる危険性がある。したがって、RBFN において効率的で、かつ汎化能力の高い応答曲面を設定するためには、できる限り基底関数の数を減少させることやデータの密度を均等化させることが重要である。そこで、図-3 に示す通り、雨量データの存在する範囲内に x 軸、 y 軸それぞれ一定間隔 (R_x , R_y) の格子を設定し、設定した格子の中にデータが存在する場合に限り、当該格子の左下に基底関数を設定することとする。また、雨量データについては、格子ごとに重心法によるクラスタリングを行い、当該領域内にクラスタの代表点を設定する (図-4 参照)。当該代表点は RBFN における学習用のデータセットとして用いる。さらに、基底関数は、その周辺に含まれるデータ数の違いによって信頼度が異なるため、それについては各格子に含まれるデータ数に応じてそれぞれ λ を変化させ、信頼度をシステムに反映させる。なお、データ数に伴う λ は式(7)によって与える。

$$\lambda = \lambda_{\min} + \frac{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}{1 + count} \quad (7)$$

ここで、 λ_{\max} : の最大値
 λ_{\min} : の最小値
 $count$: 各格子に含まれるデータ数

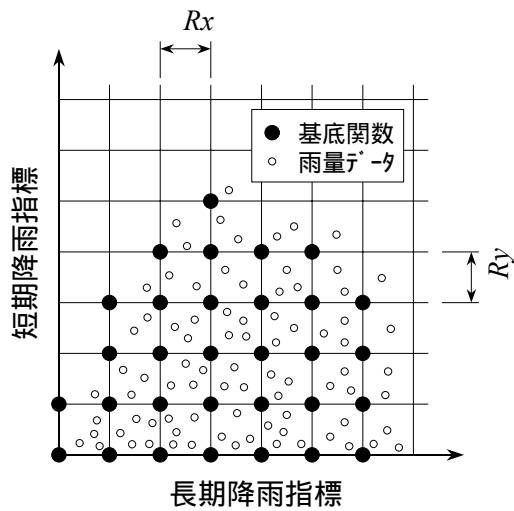


図-3 格子および基底関数の設定

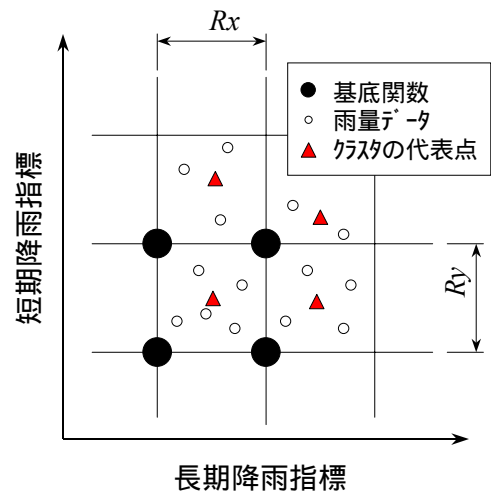


図-4 クラスタリングの概念図

式(7)の λ_{\max} 、 λ_{\min} の値は $\lambda_{\max} \geq \lambda_{\min}$ の関係を満足する範囲内であれば任意に設定することができる。

これにより、基底関数の数を効率的に減少させ、データの頻度も均等にすることが可能である。また、基底関数の信頼度をシステムに反映させることで、より客観的に降雨による危険度を表現することも可能である。