

# 台湾における非線形土砂災害警戒避難基準雨量線 (CL) 適用の試み

## Study on application of nonlinear critical line to Taiwan

西日本技術開発㈱ ○大石博之・白石貴司  
Hiroyuki OOISHI, Takashi SHIRAISHI  
九州電力株式会社 祐徳泰郎  
Yasuo YUUTOKU  
(財) 中興工程顧問社 許世孟  
Shihmeng Hsu

### 1. はじめに

土砂災害による被害の軽減は、日本を初め東アジア諸国共通の課題であるといえる。我が国においては、平成 13 年の「土砂災害警戒区域等における土砂災害防止対策の推進に関する法律」(以下、土砂災害防止法) の施行以来ソフト対策による防災事業が進められている。ソフト対策とは、対策工事に代表されるハード対策に頼らず防災情報を共有・発信していくことで市民の生命を守ることを主眼とした手法である。土砂災害防止法の中では、これにあたるものとして①危険箇所の周知、②開発の抑制、③警戒・避難体制の整備といった項目が挙げられている。このうち、警戒・避難体制の整備に関しては、気象庁と国土交通省が連携して土砂災害警戒避難情報を発信していく試みが全国的に実施されている<sup>1)</sup>。この情報は、降雨状況をリアルタイムで監視しながら、各地区で設定されている土砂災害発生限界雨量線 (Critical Line, 以下 CL) を超過する規模の雨が確認されたことなどを条件に発信されるものである。情報発信のための基準の一つである CL は、その精度が重要視されるが、古川らにより RBF ネットワークを用いた非線形 CL の設定手法<sup>2)</sup>が確立され、実効性の高い方法として広く受け入れられているところである。

土砂災害については、我が国だけでなく、諸外国においても同様の課題を抱えている。特に台湾は、厳しい気象条件や脆弱な地形条件など我が国と同様な自然環境下にあり、毎年のように甚大な土砂災害が発生するなど、より実効性の高い土砂災害警戒避難情報を発信できるシステムの開発が求められている。本報告では、土砂災害の頻発地域である台湾中部の草嶺地区を対象として、RBF ネットワークによる非線形 CL の警戒・避難行動を支援するための基準としての有効性を検討した結果について述べる。

### 2. RBF ネットワークによる非線形 CL 設定手法の概要

CL の設定手法としてはこれまでもいくつかの手法が知られているが、本報告においては RBF ネットワークによる設定手法を適用した。この方法は、対象地域における過去の降雨履歴を数理的に学習することにより地域の降雨特性に応じた非線形の CL が作成できるものであり、土砂災害の発生降雨データではなく、データの大半を占める非発生降雨データを学習データとして重視することで安全領域となる降雨規模を特定する方法である。以下に RBF ネットワークによる CL 設定手法の概要を記す。

RBF ネットワークは、脳や神経回路網をモデルとした階層構造で入力層、中間層、出力層の 3 層からなり (図-1)、中間層の出力には放射基底関数 (RBF) であるガウス関数 (図-2) を用いる。入力層となる降雨データ (発生、非発生) を中間層の基底関数 (ガウス関数) によって処理・出力し、重み付けと重ね合せによって発生・非発生判別境界面 (図-3) を構築する。この判別境界面の山が高い領域は土砂災害発生の確率の低い安全領域を表し、山の高さが低くなるにつれて危険性の高い領域であることを表す。非線形 CL は、この判別面の等高線を用いて設定する。

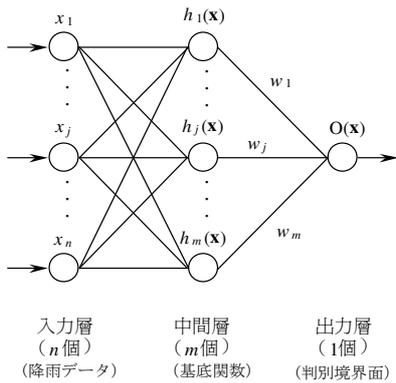


図-1 RBFNの構造

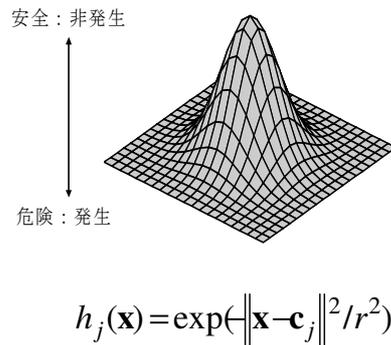


図-2 ガウス関数

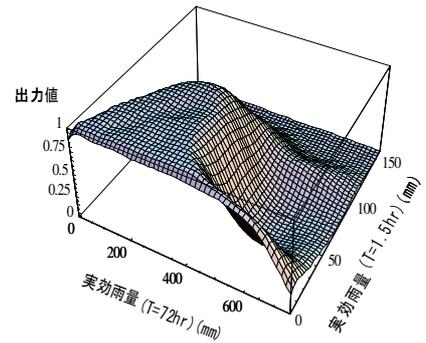


図-3 判別境界面の例

本手法によれば、対象地域の降雨特性を反映した精度の高いCLを設定することが可能となり、災害の見逃しを減らすだけでなく、懸案であった避難情報の空振りをも大幅に低減することができる。

### 3. CLの設定

#### 3.1 対象地域と降雨データ

CL設定の対象地域は、2001年・2004年の台風で甚大な土砂災害が発生した雲林県の草嶺地区とした(図-4)。

CL設定の基礎となる雨量データとして、草嶺地区で観測された時間雨量データを収集した。データ収集期間は、1990年8月1日から2006年12月31日までとし、欠測のデータを含む期間もあるものの、10年以上の期間のデータを確保できた。

判別境界面の構築には、1990年から2004年7月31日までの降雨データを用いた。この間の土砂災害実績データは、過去に多くの災害が発生しているものの正確な記録はほとんど残されていなかったため、土砂災害が確実にあったTORAJI台風(7/30/2001)、MINDULLE台風(7/2/2004-7/4/2004)時の降雨データとした。

2004年8月以降の降雨データは、構築した判別境界面から最適なCLを選択するためのデータとした。この間の土砂災害実績データは、上記と同様の理由により、土砂災害が確実にあったAERE台風(8/24/2004-8/25/2004)時の降雨データとした。さらに、甚大な土砂災害が発生した2009年8月のMORAKOT台風時の降雨データを入手し、設定したCLの妥当性検証のためのデータとして用いた。

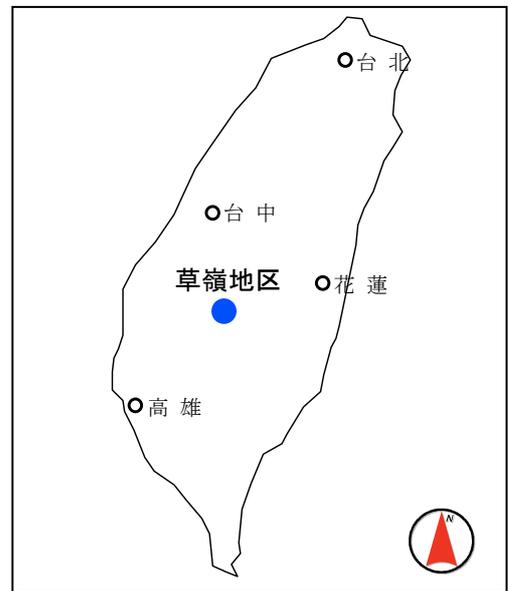


図-4 CL設定地域位置図

#### 3.2 降雨指標について

RBFネットワークによりCLを設定する際には、雨量データから短期降雨指標と長期降雨指標を算出する必要がある。それぞれに用いられる指標については過去様々な研究が行われているが、ここでは現在国土交通省・気象庁が連携して進めている土砂災害警戒情報に向けたCL設定法(案)<sup>3)</sup>に示されているものに従い、短期降雨指標には60分間積算雨量、長期降雨指標には土壤雨量指数を用いることとした。

なお、土壤雨量指数を算出する際のタンクモデルパラメータは、台湾で整備されたものがなかったため、上記CL設定法(案)に記載されている値を適用した。

### 3. 3 RBFネットワークのパラメータ

上記データを用いて、RBF ネットワークによる判別境界面を構築した。CL の設定の際には、基底関数であるガウス関数の半径  $r$  および基底関数を配置する格子間隔、データ数に応じて変化する基底関数の信頼性を表す  $\lambda$  の最大値および最小値といったパラメータを設定する必要がある。  $r$  と格子間隔に関しては、過去の文献<sup>2)</sup>を参考とした値を使用した。  $\lambda$  については対象地点の降雨特性によって最適な値が異なるものと考えられるためケーススタディにより値を設定した。  $\lambda$  は、最大値 (以下、 $\lambda_{\max}$ )、最小値 (以下、 $\lambda_{\min}$ ) を設定する必要があるが、実質的には  $\lambda_{\max}$  と  $\lambda_{\min}$  の差をどれだけとるかが問題となるため、検討ケースは  $\lambda_{\max}$  のみを変化させた表-1 に示す5 ケースとした。

表-1 検討ケース パラメーター一覧表

	Grid Space		Basic Function Radius	$\lambda$	
	Horizontal Axis	Vertical Axis		Maximum	Minimum
CASE1	1/60 of maximum value		7	50	1
CASE2	1/60 of maximum value		7	100	1
CASE3	1/60 of maximum value		7	200	1
CASE4	1/60 of maximum value		7	300	1
CASE5	1/60 of maximum value		7	500	1

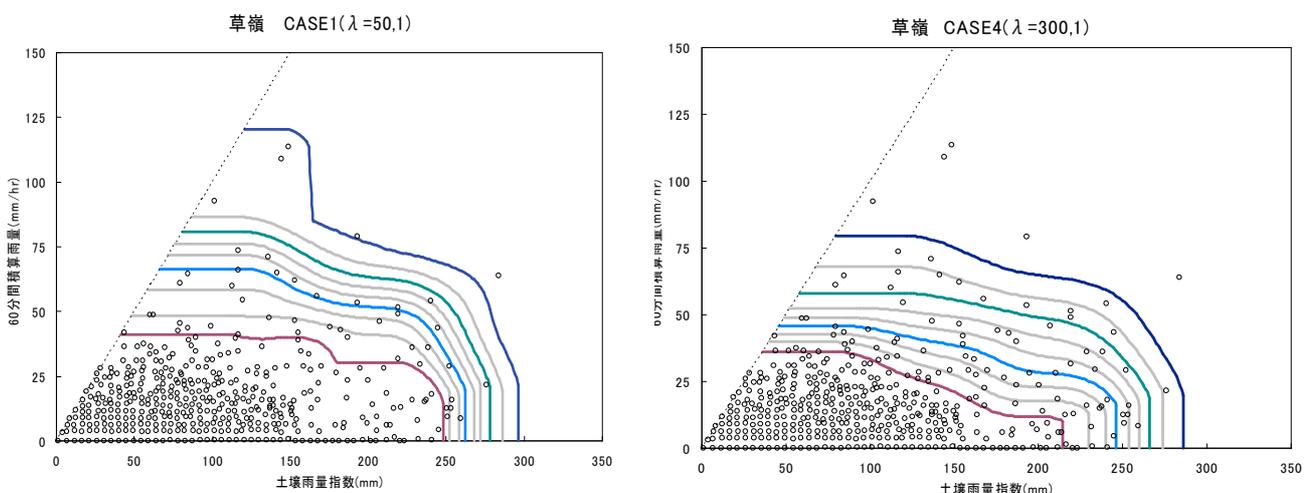
※7 times of the grid space

### 3. 4 CL の設定

#### (1) 判別境界面の構築

以上の諸条件の下で、草嶺地区の非線形 CL を設定した。CASE1 ( $\lambda_{\max}50$ ) および CASE5 ( $\lambda_{\max}300$ ) の判別境界面を図-5 に示す。CASE1 の判別境界面は、少数の非発生データにもネットワークの出力が影響を受け、複雑な形状となっている。このように判別境界面の形状が複雑になった場合、学習データに対しては高い整合性を確保出来るものの、判別基準としての汎用性は後退する。

各検討ケースの判別境界面を比較すると、 $\lambda_{\max}$  が 100 より大きければ、概ねスムーズな形状となり、 $\lambda_{\max}300$  以上では概ね形状が変化しないことが確認された。よって本報告では、CASE4 ( $\lambda_{\max}300$ ) を判別境界面として採用することとした。



等高線は判別境界面を表し、最も内側が 0.9 で外に向かって 0.1 ずつ小さくなる。図中の点は RBF ネットワークの学習に用いた非発生降雨データ。

図-5 構築した判別境界面

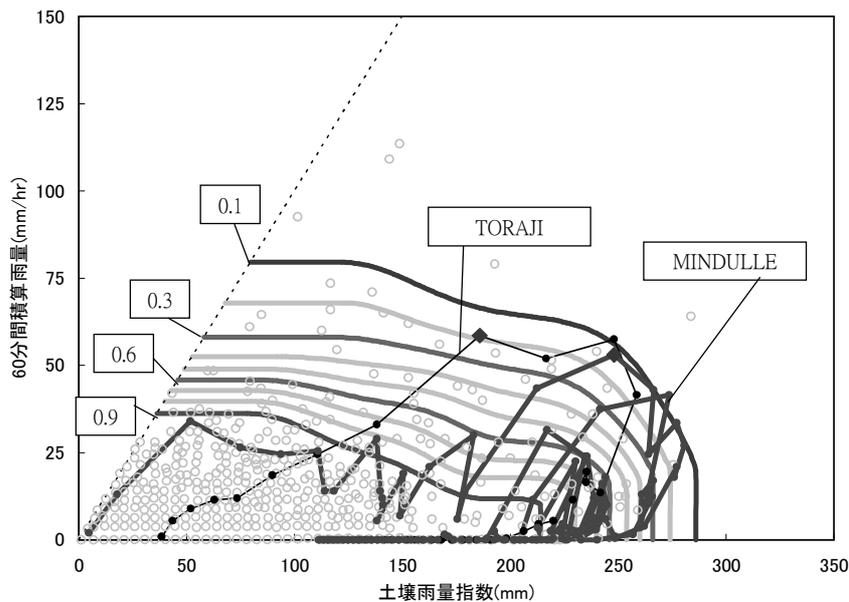
(2) 学習データに対する精度の検証

CL は、判別境界面から出力値の等高線を選び出すことによって設定される。ここでは出力値 0.1 毎の等高線に対し、非発生降雨に対する的中率および発生降雨に対する的中率が共に出来るだけ大きくなる等高線を選択することで、最適な CL を設定した。ここで言う的中率とは、以下のように定義されるものとする。

- ・ 非発生降雨に対する的中率 = CL 等高線を超過しなかった非発生降雨数 / 全非発生降雨数
- ・ 発生降雨に対する的中率 = CL 等高線を超過した発生降雨数 / 全発生降雨数

図-6 に草嶺地区の判別境界面および降雨データを、表-2 に発生・非発生降雨に対する的中率および土砂災害警戒避難情報の発表頻度の算出結果を示す。発生降雨に対する的中率に関しては 0.2 よりも内側の等高線であれば、TORAJI 台風、MINDULLE 台風共に、降雨のピーク時には、土砂災害警戒避難情報を発表できた結果となっている。一方、非発生降雨に対する的中率に着目すると、最も外側の等高線 0.1 では約 98%，最も内側の等高線 0.9 をとっても約 87%が的中という結果となった。

このことから、学習データに対しては非常に高い精度を有した判別境界面が構築されたものと評価できる。



細実線は TORAJI, MINDULLE の両台風のスネーク曲線を示す。図中の点は学習データである非発生降雨。

図-6 構築した判別境界面

表-2 学習データに対する的中率

発生	閾値 0.1	閾値 0.2	閾値 0.3	閾値 0.4	閾値 0.5	閾値 0.6	閾値 0.7	閾値 0.8	閾値 0.9
CL超過降雨数(①)	0	2	2	2	2	2	2	2	2
CL未超降雨過数(②)	2	0	0	0	0	0	0	0	0
一連降雨数(③=①+②)	2	2	2	2	2	2	2	2	2
災害捕捉率(%)①/③*100	0	100	100	100	100	100	100	100	100

非発生	閾値 0.1	閾値 0.2	閾値 0.3	閾値 0.4	閾値 0.5	閾値 0.6	閾値 0.7	閾値 0.8	閾値 0.9
CL超過降雨数(①)	5	6	10	15	15	15	21	24	29
CL未超降雨過数(②)	216	215	211	206	206	206	200	197	192
一連降雨数(③=①+②)	221	221	221	221	221	221	221	221	221
非発生包括率(%)②/③*100	97.74	97.29	95.48	93.21	93.21	93.21	90.50	89.14	86.88

### (3) 未学習データによる CL の設定

前節での検討では、学習データにより構築した判別境界面を基に、その精度を検証したが、汎用的な CL を設定するためには未学習データに対する適用性を確認することが重要な条件となる。

よって、図-6 の出力値 0.1 毎の等高線に対し、未学習データである 2004 年 8 月以降の発生・非発生降雨に対する的中率を算出した。表-3 に、未学習データについての発生・非発生降雨に対する的中率および土砂災害警戒避難情報の発表頻度の算出結果を示す。

未学習データの発生降雨を的中させるためには 0.4 より大きい値の等高線でなければ正しく危険性を判断できない結果となっている。この 0.4 の時の非発生の的中率に着目すると約 92% と高い値が確保されていた。このことから、草嶺地区に適用する CL は等高線 0.4 を採用することとした。図-7 に設定した草嶺地区の CL と土砂災害実績データとして用いた AERE 台風時のスネーク曲線を示す。

表-3 未学習データに対する的中率

発生	出力値_0.1	出力値_0.2	出力値_0.3	出力値_0.4	出力値_0.5	出力値_0.6	出力値_0.7	出力値_0.8	出力値_0.9
CL超過降雨数(①)	0	0	0	1	1	1	1	1	1
CL未超降雨過数(②)	1	1	1	0	0	0	0	0	0
一連降雨数(③)=①+②	1	1	1	1	1	1	1	1	1
災害捕捉率(%)①/③*100	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

非発生	出力値_0.1	出力値_0.2	出力値_0.3	出力値_0.4	出力値_0.5	出力値_0.6	出力値_0.7	出力値_0.8	出力値_0.9
CL超過降雨数(①)	2	3	4	4	5	5	8	9	11
CL未超降雨過数(②)	46	45	44	44	43	43	40	39	37
一連降雨数(③)=①+②	48	48	48	48	48	48	48	48	48
非発生包括率(%)②/③*100	95.83	93.75	91.67	91.67	89.58	89.58	83.33	81.25	77.08

### 4. CL の妥当性検証

これまでの検討は 2006 年までのデータを利用した結果によるものであった。その後も台湾では多くの土砂災害が発生しているが、中でも 2009 年 8 月 8 日に襲来した台風 8 号(MORAKOT) による被害は甚大なものであった。台湾の中央気象局によると 6 日 0 時から 9 日 19 時までに嘉義県阿里山で 2726mm、屏東県尾寮山で 2551mm の雨量が記録され、これに伴う死者は 160 人以上、行方不明者 490 人以上の被害があったものと報じられた。特に台湾中部の山間地域である高雄県甲仙では被害が甚大な規模に達しており、政府の救難対応の遅れなどが社会問題にまで発展した。今回の検討対象地区は集中的な被害がでた場所ではないものの、草嶺地区は、台湾中部雲林県の山間部に位置していることから、MORAKOT 台風時の降雨データに対する CL の適用性検証を試みた。

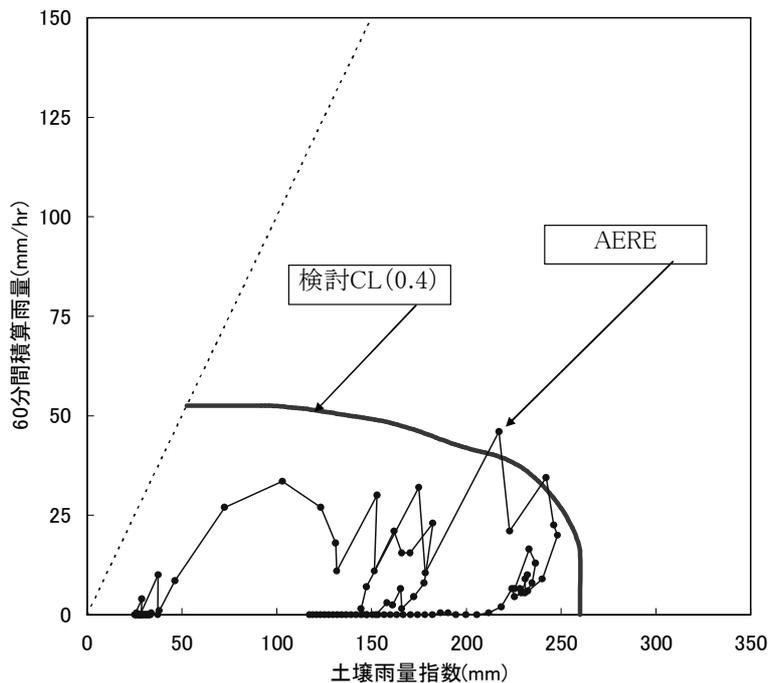


図-7 草嶺地区の CL と AERE 台風時のスネーク曲線

図-8 に草嶺地区で設定した CL と草嶺地区および甲仙地区観測データに基づく MORAKOT 台風時のスネーク曲線および草嶺地区観測データに基づく MINDULLE 台風時のスネーク曲線を示す。図-8 より、

MORAKOT 台風時には草嶺地区でも甲仙地区と同等の降雨が発生していたことがわかる。CL と降雨の関連に着目すると、草嶺地区では8月7日8:00に降雨がCLを超過しており、この時点でMINDULLE 台風のピーク時と同等の状況であったことが認められる。災害発生を伴ったとみられる降雨のピーク到達は9日の0:00であったことから、仮にCL超過直後に警戒・避難情報を発信していれば十分な余裕を持った上での避難行動を行うことが可能であったものと考えられる。

仮に甲仙地区の雨量を本CLで評価することを想定しても、同様な結果が得られたことが示されている。甲仙地区の降雨が本CLを超過するのが8日の2:00、災害発生を伴ったとみられる降雨のピーク到達は8日の17:00であった。草嶺に比べCL超過レベルの降雨量に到達するのが遅く、一方でピークまでの到達時間が短かったことが本地域の特徴であり大きな被害を生んだ要因の一つと考えられるが、それでも仮にCL超過直後に警戒・避難情報を発信していれば15時間のリードタイムを持って避難することが可能であったものとみられる。

## 5. まとめ

以上のことから、RBF ネットワークを用いた非線形CLは、土砂災害のソフト対策のひとつとして台湾国内においても十分な適用性があることが判明した。今後、台湾国内の雨量観測網との連携や警戒・避難情報発信システム等が整備されれば、本技術が広く用いられる可能性があるものと考えられる。更に精度を向上させていくためには、より多くの地域を対象にした検証や土壌雨量指数の各種パラメータのフィッティングを目的とした調査・解析が必要と考えられ、将来への課題として取り組んでいきたい。

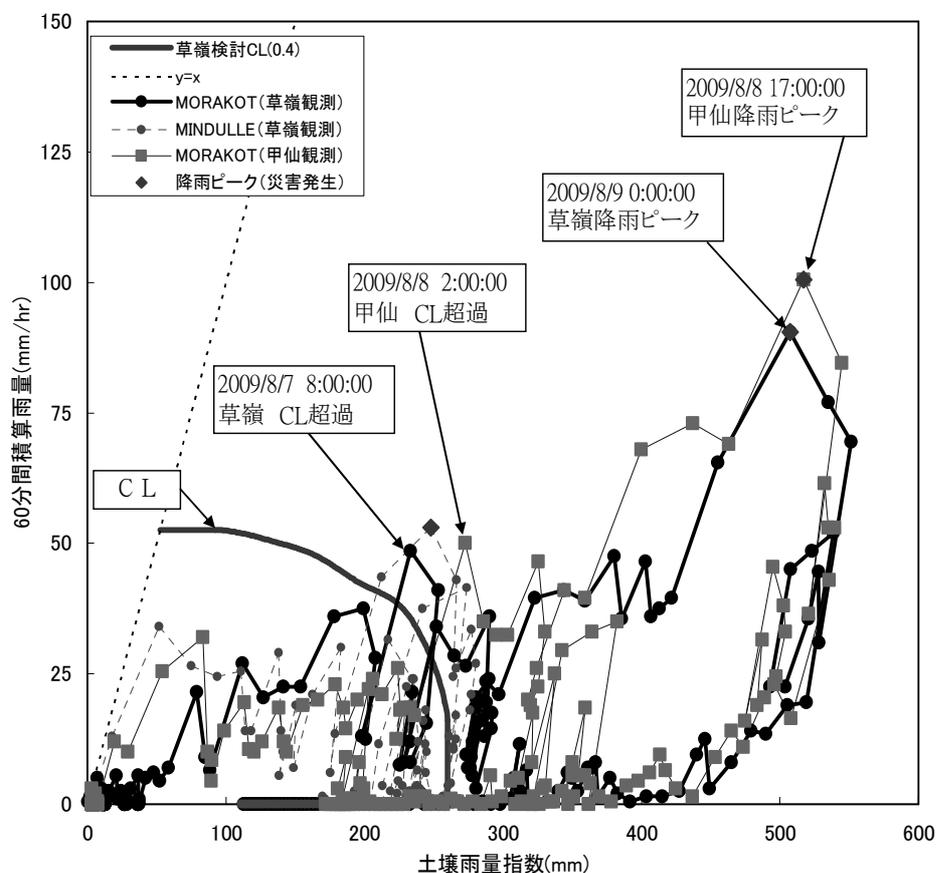


図-8 草嶺地区のCLとMORAKOT台風時のスネーク曲線

## 引用文献

- 1) 国土交通省河川局砂防部，気象庁予報部(2005)；都道府県と気象庁が共同して土砂災害警戒情報を作成・発表するための手引き
- 2) 倉本和正，鉄賀博己，東寛和，荒川雅生，中山弘隆，古川浩平(2001)：RBF ネットワークを用いた非線形がけ崩れ発生限界雨量線の設定に関する研究，土木学会論文集，第672号/VI-50，pp. 117-132.
- 3) 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(2005)；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）