

土砂災害警戒避難のための線状降水帯等の自動抽出システムについて

国土交通省 水管理・国土保全局 砂防部 砂防計画課 地震・火山砂防室
国土技術政策総合研究所 土砂災害研究部 土砂災害研究室

1. はじめに

強雨域を自動抽出することは、土砂災害に対する警戒避難の判断を支援するために不可欠である。実際、風上で発生した積乱雲が次々と流れ込むバックビルディング型をはじめとする線状降水帯等が形成された場合、強雨域がほとんど動かず数時間にわたって激しい雨が降り続くことから、甚大な土砂災害の被害が発生している（平成 29 年 7 月九州北部豪雨、平成 26 年 8 月豪雨など）。現状では、これら豪雨は台風や温帯低気圧に伴う降雨と異なり、数値予報により量・場所・時間を数時間～十数時間前には予測できていない。

土砂災害に対して警戒を呼びかける情報としては、気象庁及び各地方気象台と都道府県が共同で発表している土砂災害警戒情報がある。局所的な集中豪雨の場合、土砂災害警戒情報は発表から災害発生までの時間が短く、リードタイムが確保できない等の課題がある。このことから、國友ら（2016）¹⁾、村田ら（2017）²⁾は、気象庁数値予報 GPV を用いて 12 時間程度先までの豪雨発生危険度を評価する手法（豪雨ポテンシャル）について検討を行うとともに、重大な土砂災害を引き起こすバックビルディング型の線状降水帯等に伴う集中豪雨の抽出手法の研究を行った。

先行研究の結果を踏まえ、線状降水帯等の自動抽出システム（プロトタイプシステム）を開発し、平成 30 年 7 月豪雨等、近年土砂災害を発生させた豪雨に適用した結果を紹介する。本システムに実装されている線状降水帯抽出と同様のアルゴリズムを適用し、国土交通省 X バンド MP レーダの三次元降雨データや気象庁の高解像度ナウキャストデータを用いた線状降水帯等の自動抽出手法についても、併せて紹介する。

2. 豪雨ポテンシャルの評価

豪雨の生起ポテンシャルの検討に使用した環境パラメータを表 1 に示す。使用した環境パラメータは、大気的不安定度を表す指標である KI と SSI、積乱雲の発達に不可欠な水蒸気に関する指標である PW と CFLX、線状降水帯が形成される気象場に特徴的な指標である SREH の 5 種類である。また、環境パラメータ算出に利用する GPV は LFM モデルを用いた。

集中豪雨と短時間強雨を識別するために、環境パラメータに、しきい値を設定し、しきい値を超えた場合の点数を KI、SSI、PW は各 1 点、両者の識別に特に有用な CFLX、SREH は重みを大きくし各 5 点として、計 13 点満点で豪雨ポテンシャルを評価した。それぞれのしきい値は、KI > 35、

表－１ 豪雨ポテンシャルの検討に用いた環境パラメータ

環境パラメータ	指標の説明
可降水量（PW）	大気中に含まれる水蒸気に関する指標。値が高いほど積乱雲の元になる水蒸気が多く、豪雨になりやすい。
ショワルター安定指数（SSI）	大気の安定度を表す指標。値が低いほど下層が高温状態で大気不安定であることを意味し、積乱雲が上空に向かって発達しやすい。一般に SSI が -3°C 以下であれば、雷雨が発生しやすいとされている。
K 指数（KI）	SSI と同じく大気の不安定度を表す指標だが、上空約 3,000 m までの大気の湿り具合を加味している。値が高いほど大気不安定であることを意味し、積乱雲が上空に向かって発達しやすい。
ストームに相対的なヘリシティ（SREH）	風速と風向が上空に向かって変化する度合いを表し、積乱雲内部において回転する上昇気流のしやすさを表す指標。竜巻発生ポテンシャルとしても使われる。値が高いほど線状降水帯が形成されやすい。
下層の水蒸気フラックスの収束量（CFLX）	積乱雲の発達の元となる大気下層（約 1,500 m 以下）の水蒸気が周囲から集まる強さを表す指標。値が高いほど、豪雨をもたらす積乱雲が発生しやすい。

SSI < 0 , PW > 50 , CFLX > 1000 , SREH > 90 とし、國友ら（2016）¹⁾が検討した値を用いた。

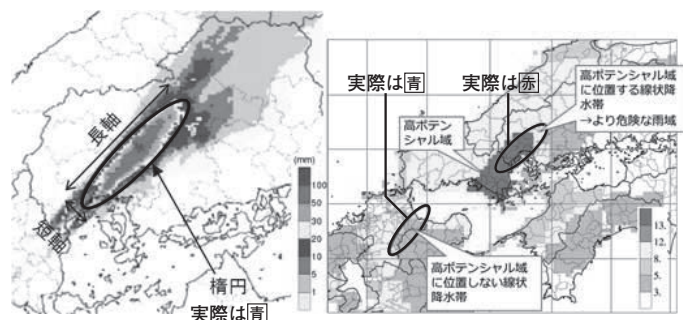
3. 線状降水帯の抽出手法

ここでは 50 mm/h 以上の降雨を含み、かつ 20 mm/h の降雨領域が楕円に近似できる場合を線状降水帯の条件とした。これは、津口・加藤（2014）³⁾の線状降水帯の定義と國友ら（2016）¹⁾での検討条件を基本としつつ、近年の大規模な土砂災害が発生した際の雨量条件を考慮して設定した。楕円の大きさは 95% の確率長円（強雨域を 95% の確率でカバーする楕円）とした。軸比（長軸／短軸）は、線状という形状を表す要件として津口・加藤（2014）³⁾において線状降水帯の判定に用いられている値を参考とした。また、ここでは、バックビルディング型等の線状降水帯を対象とするため、中層風の風向と楕円の走向がほぼ同じであることも条件に加えた。線状でない形状の雨域にもかかわらず軸比等の要件を満たしてしまう楕円を棄却するため、楕円に占める雨量 20 mm/h 以上の面積割合を設定している。詳細な判別条件を表－２に、実際に判定する場合の例を図－１に示す。

表－２ 入力データの諸元等（上）と線状降水帯の定義（下）

入力データ	気象庁レーダ（1 km メッシュ）の前 15 分平均値
更新頻度	5 分間隔
情報内容	線状降水帯の領域を楕円表示
ランク	青：線状降水帯 赤：線状降水帯（高ポテンシャル域に存在）

項目	値
線状降水帯の面積	$\geq 200 \text{ km}^2$
線状降水帯を定義する雨量	$\geq 20 \text{ mm/h}$
線状降水帯内に必要な最大雨量	$\geq 50 \text{ mm/h}$
軸比（長軸／短軸）	≥ 2.4
長軸の長さ	$\geq 40 \text{ km}$
楕円の走行と雨域の移動ベクトルの差	22.5 度
20 mm/h 以上の面積／楕円面積	$\geq 40\%$
高ポテンシャル域の定義	豪雨危険度 12 点以上の領域



図－１ 線状降水帯の抽出とランク

4. 近年の主要土砂災害発生事例での適用性

(1) 平成 26 年 8 月広島市での土砂災害

平成 26 年 8 月豪雨による広島市での線状降水帯抽出を行った結果を図-2 に示す。8 月 19 日 21 時頃に豪雨ポテンシャルが高い判定（実況）となり、20 日 0 時頃には線状降水帯を検知し、3 時頃まで停滞していた。その間、1 時頃に広島市で土砂災害警戒情報が発表され、3 時頃に土砂災害が多発したと考えられる。大規模な土砂災害発生約 6 時間前に豪雨ポテンシャルが高くなり、災害発生の 3 時間前に停滞性の線状降水帯が現れたと判定した。

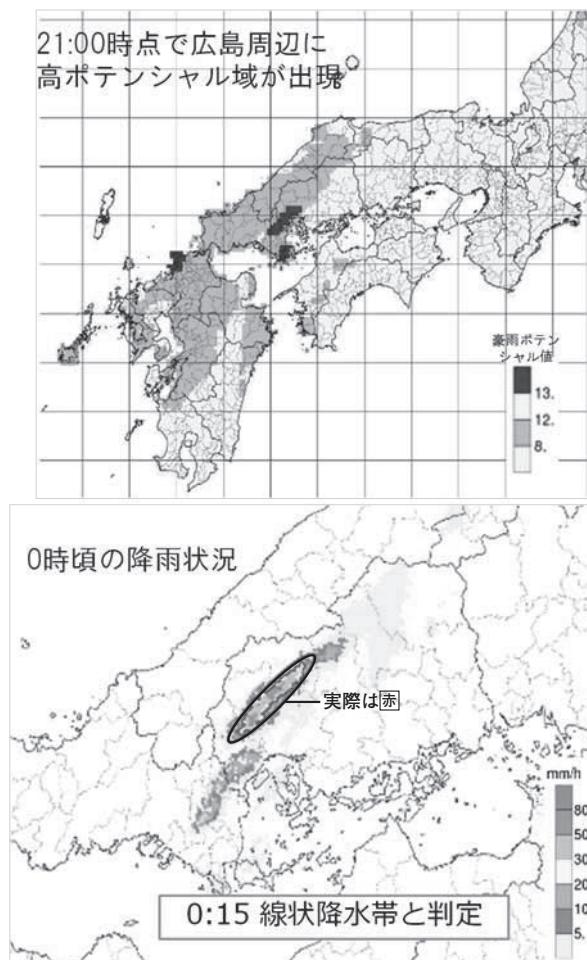


図-2 平成 26 年 8 月広島豪雨土砂災害時の線状降水帯抽出事例

(2) 平成 29 年 7 月九州北部での土砂災害

7 月 5 日 9 時頃に豪雨ポテンシャルが高い判定となり、5 日 13 時頃には線状降水帯を検知し 20 時頃まで概ね停滞していた。その間、14 時頃に朝倉市で土砂災害警戒情報が発表され、15 時以降土砂災害が多発したと考えられる。大規模な土砂災害発生の約 6 時間前に豪雨ポテンシャルが高くなり、災害発生の約 2 時間前に停滞性の線状降水帯が現れたと判定した。

(3) 平成 30 年 7 月豪雨での土砂災害

平成 30 年 7 月豪雨（西日本豪雨）による広島周辺での線状降水帯抽出を行った結果を図-3 に示す。6 日 12 時の時点で豪雨ポテンシャルの 6 時間先（18 時）の予測値が高くなり、18 時頃に線状降水帯が出現したと判定した。その後、他地域とは異なり 22 時頃まで継続的に停滞した。14～19 時頃に広島県内の各市町村で土砂災害警戒

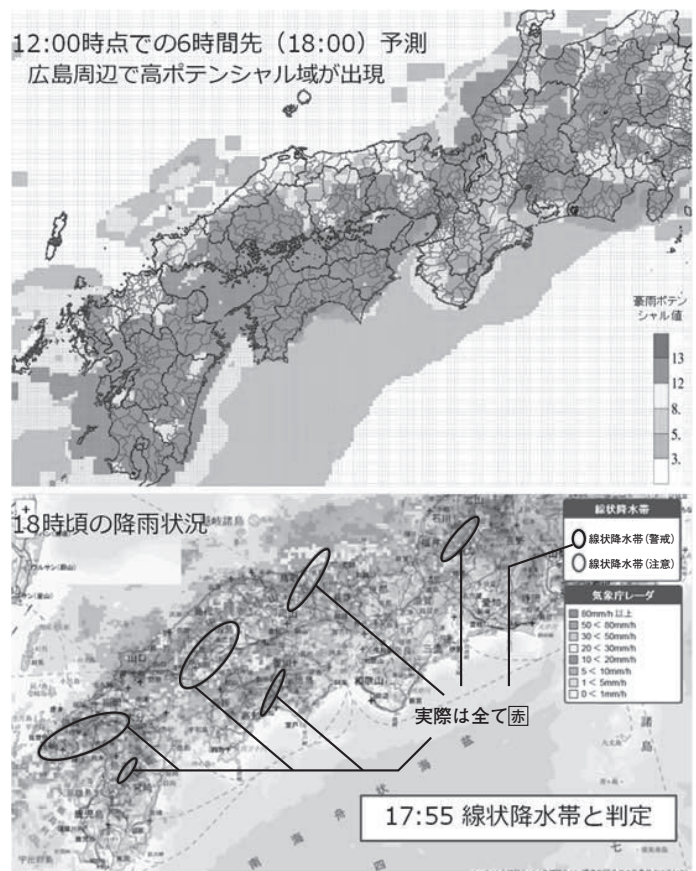


図-3 平成 30 年 7 月西日本豪雨時（広島周辺）の抽出事例

情報が発表され、16時～翌未明に土砂災害が多発したと考えられる。豪雨ポテンシャルは広範囲で高い状態が長時間見られ、危険地域の絞り込みは困難であった。また、同豪雨で愛媛県宇和島市周辺でも多くの土砂災害が発生した。愛媛県宇和島市周辺では、5日22時頃、6時間先（6日4時頃）の豪雨ポテンシャルが高くなり、実際に4時頃に線状降水帯が現れたと判定した。その後、6日12時頃までの約8時間にわたり線状降水帯が停滞したものの、大規模な土砂災害の発生は翌7日0～7時頃であった。

5. 線状降水帯抽出手法の高度化

バックビルディング型の線状降水帯等では風上側に新たな降水セルが発生し、発達しながら下流に移動する特徴がある。XバンドMPレーダの三次元観測値を活用することで、線状降水帯等の風上側に位置する降水セルの発達段階（ライフステージ）を判別することができ、線状降水帯等の判定精度の向上が期待できる。ここでは、MPレーダの観測値から推定した降水セル内部の粒子の構成状況から降水セルの発達段階の判別を行う増田(2016)⁴⁾の方法(図-4)を用いた。図-4(下)は、セルが成長期から成熟期に移行するとセル内の高密度な粒子群（降水エコー強度の高い部分）が上昇から下降に転じ、大粒子の割合が大きく減少することを模式図で示した。

平成26年8月広島土砂災害での線状降水帯等の抽出を試みた結果を図-5に示す。0時の時点で線状降水帯の兆候があり、その風上側で新たな成長期の降水セルが現れ始めた。0時30分にはそれらが別の小さな線状降水帯となり、1時に両者が合体し1つの線状降水帯を形成し、土砂災害警戒情報が発表された1時15分頃には、ほとんど停滞している状態であった。広島市内で土砂災害が頻発したのは3時過ぎと考えられる。この線状降水帯は4時前まで継続して、線状降水帯として判定された。その後、線状形状ではなくなり、

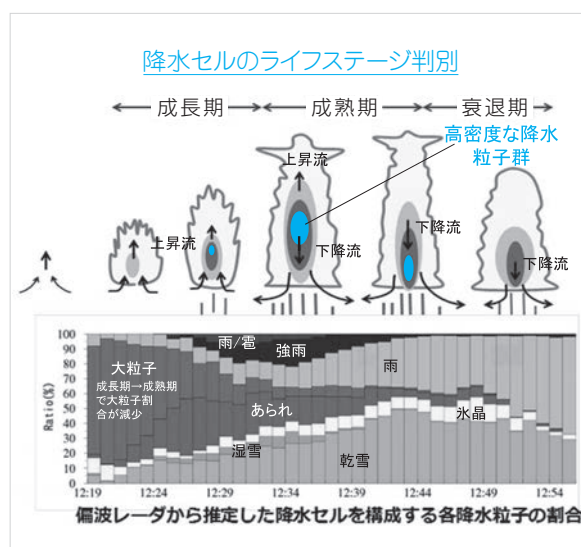
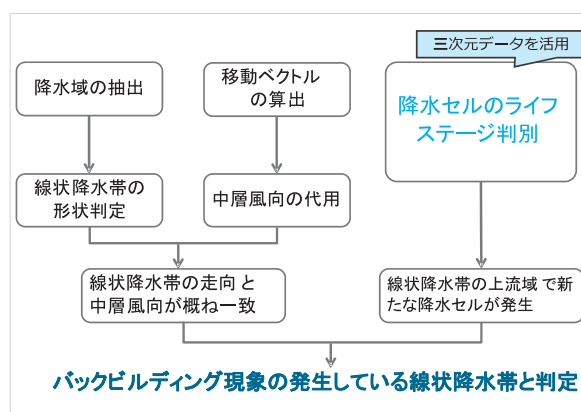
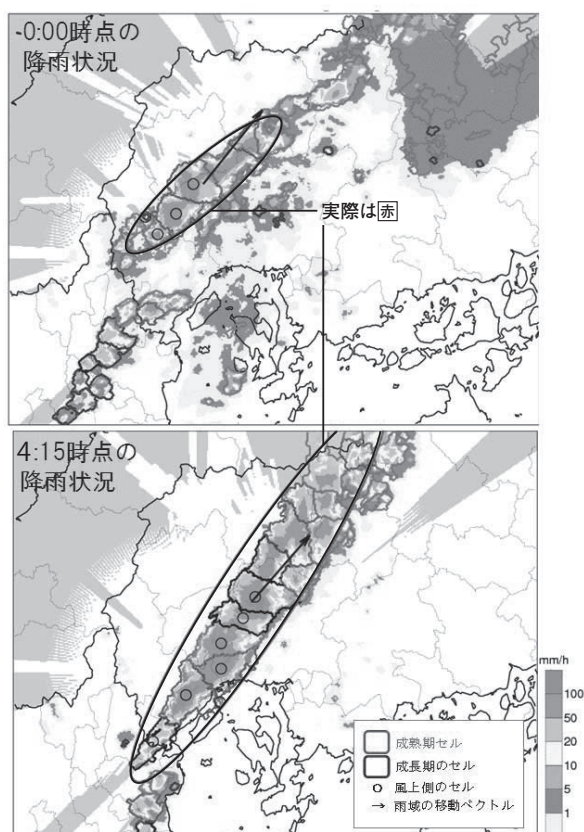


図-4 三次元観測データによる線状降水帯抽出手法(上)と降水セルのライフステージ判別(下)、増田(2016)⁴⁾の図に加筆

降雨域は北東方向に移動しながら衰退していった。MPレーダによる三次元観測データを用いることで、線状降水帯を構成する個々の降水セルについて、発達段階にあるのか衰退段階にあるのか、ライフステージをリアルタイムで評価しつつ追跡できる可能性がある。

気象庁が配信している高解像度ナウキャストデータを用いることで、二次元の実況値で抽出された線状降水帯の強雨域が1時間後も同じ地域にとどまるかどうかを予測値で確認し、とどまるものを停滞性の線状降水帯として抽出する手法を開発した。平成26年8月の広島豪雨土砂災害を引き起こした降雨に適用したところ、停滞性を示す紫色の楕円が0時40分頃検知された。線状降水帯は4時頃まで広島市付近に停滞した(図-6)。



図－5 三次元観測データを用いた線状降水抽出の例（平成26年8月広島豪雨土砂災害時）

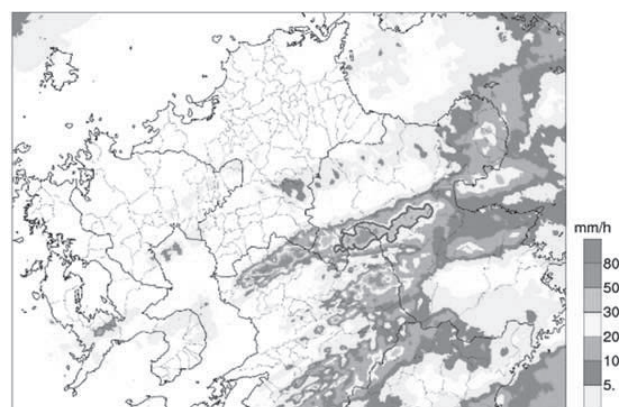
また、平成30年6月に九州北部の土砂災害の発生していない移動性の線状降水帯の事例について適用したところ、従来の手法では線状降水帯として抽出するものの、高解像度ナウキャストデータを用いた手法では停滞性の線状降水帯として抽出されなかった（図－7）。

6. 土砂災害事例への適用結果に関する考察

近年の主要な土砂災害を発生させた豪雨に対して、二次元観測データを用いた線状降水帯抽出のプロトタイプシステムを適用したところ、豪雨生起ポテンシャルによる実況値もしくは予測値による評価によって、大規模な土砂災害の発生もしくは線状降水帯発生のおおむね6時間前に土砂災害の危険性の高まりを把握できた。平成30年7月豪雨における愛媛周辺の土砂災害への適用結果でも、



図－6 高解像度ナウキャストを用いた停滞性の線状降水抽出の例（平成26年8月広島豪雨土砂災害時（8月20日0:50））



図－7 高解像度ナウキャストを用いた線状降水抽出の例（平成30年6月土砂災害非発生事例（上：従来の二次元レーダ判定、下：ナウキャスト判定、いずれも6月19日23:40））

線状降水帯の発生について事前にポテンシャルの高まりを把握し、線状降水帯の発生を判定・監視できた。ただし、土砂災害の発生までに約 12 時間の時間があった。広島周辺では花崗岩、九州北部では花崗岩や安山岩等といった火山岩類が中心であるのに対して、愛媛周辺では付加体が中心となっており地質特性が異なる。また、土地利用形態も大きく異なる。これは、地質等の地域特性によつては、土砂災害が発生するまでの時間に大きな幅があることを示唆しているものと考えられる。

二次元観測データに加え、X バンド MP レーダによる三次元観測データや高解像度ナウキャストデータを活用することで、線状降水帯の抽出だけでなくその停滞性について分析することができる。これまでのシステムでは、二次元観測データから平面的な強雨域の形状等から概略的に線状降水帯を抽出しているが、その時々々の雨域の形状等から線状降水帯を抽出するため、その後数時間、線状降水帯が停滞するかどうかの評価が難しかった。三次元データを用いて線状降水帯を構成する個々のセルを抽出し発達段階をリアルタイムで評価することや、ナウキャストの予測値を用いて 1 時間後の強雨域の移動状況を考慮することによって、線状降水帯の停滞性をより明確に表現しうる。

現在、三次元データを活用した手法は関東地方に限定している。また、高解像度ナウキャストを活用した手法は全国を対象としてプロトタイプシステムに用いている。今後、過去のレーダ観測データ等を用いて、線状降水帯の停滞性について事例検証を行い判別学習することで、これら手法による停滞性の評価の適切さを確認したいと考えている。

7. 実証実験

線状降水帯等の自動抽出システムの実装に向けて、今出水期中、全国の地方整備局及び都道府県の土砂災害担当部局でプロトタイプシステムの実証実験を行っている。実証実験終了後は、システ

ムの使い勝手や情報表示方法等に関するアンケートを行う予定であり、その結果を踏まえてシステムの改良等を行い、防災担当者にとって使いやすいものにしていきたい。

8. おわりに

本稿では、国土技術政策総合研究所で開発中の土砂災害を引き起こす線状降水帯等の自動抽出システムの検討状況について紹介した。三次元観測データによる線状降水帯抽出手法の高度化については、X バンド MP レーダに加え、将来的には高精度なフェーズドアレイレーダ (MP-PAWR) の活用等についても検討していく。

線状降水帯等による土砂災害の危険度評価を適切に行うためには、誘因である降雨等のデータ活用による線状降水帯抽出手法の改良等に加え、地形・地質等の素因を加味する必要がある。本研究は、総合科学技術・イノベーション会議の SIP (戦略的イノベーション創造プログラム) によって実施された。

【参考文献】

- 1) 國友 優, 渡 正昭, 神山嬢子, 池田 寛, 増田有俊, 片山勝之: 土砂災害発生予測の精度向上に向けた集中豪雨生起ポテンシャル評価の試み, 平成 28 年度砂防学会研究発表会概要集, B-184 ~ 185, 2016
- 2) 村田郁央, 野呂智之, 神山嬢子, 池田 寛: 環境パラメータを用いた同時多発的な土砂災害予測技術, 土木技術資料, 第 59 巻, 第 6 号, pp.8 ~ 11, 平成 29 (2017) 年 6 月号
- 3) 津口裕茂, 加藤輝之: 集中豪雨事例の客観的な抽出とその特性・特徴に関する統計解析, 天気, No.61, pp.455 ~ 469, 2014
- 4) 増田有俊: X バンド偏波レーダによる積乱雲の構造解析を基礎にした降水セルのライフステージ判別と局地的豪雨予測手法の開発に関する研究, 京都大学博士論文, 2016
- 野村康裕, 神山嬢子, 野呂智之: 土砂災害警戒避難のための線状降水帯等の自動抽出システムの開発, 土木技術資料, 第 60 巻, 第 12 号, 平成 30 (2018) 年 2 月号