

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

村田郁央・野呂智之・神山嬢子・池田 寛

1. はじめに

平成 26 年 8 月豪雨、平成 27 年 9 月関東・東北豪雨など、近年、線状降水帯に伴う集中豪雨による土砂災害が頻発している。一般的に、夕立のように激しい雨をもたらす積乱雲は数十分から一時間程度で消滅するため、台風が接近する場合を除くと、通常同じ場所で何時間も強い雨が降ることはない。しかし、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、およびそれに加えて側面からも積乱雲が流れ込むバックアンドサイドビルディング型の線状降水帯が形成された場合には、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ため、甚大な被害をもたらす場合が多い。

これらの線状降水帯に伴う集中豪雨は、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・時間について数時間～十数時間前に正確に降雨予測を行うことは困難である。一方、土砂災害に対して警戒を呼びかける情報としては、気象庁及び各地方气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。土砂災害警戒情報は災害捕捉率が高く有用な情報であるが、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場合や、発表したものの災害を伴わない場合が多いなどの課題を抱えている。そのため、國友ら(2016)¹⁾は気象庁数値予報 GPV (MSM: Meso-Scale Model) 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)について検討を行ってきた。

本稿では、MSM よりも時空間分解能が高い LFM: Local Forecast Model (更新時間間隔: 3 時間→1 時間、空間解像度: 10km→4km) を用いて、土砂災害の危険性が高い地域を判定する精度の向上に取り組んだ。また、重大な土砂災害を引き起こすバックビルディング型およびバックアンドサイドビルディング型の線状降水帯に伴う集中豪雨の蓋然性の判別

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	集中豪雨との関連性
可降水量 (PW)	上空の大気に含まれる水蒸気が全て凝結して地上に落下した場合の降水量を表す指標	上空の水分量が多ければ多いほど、豪雨となる可能性が高い
シヨワルター安定指数 (SSI)	大気不安定度を表す指標。500hPa の気温 T_{500} と 850hPa 面にある空気塊を 500hPa 面まで強制的に持ち上げた場合の気温 $T_{850-500}$ の差 (値が小さいほど不安定であることを示す) $SSI = T_{500} - T_{850-500}$	大気が不安定であるほど、上昇気流が発生しやすく、豪雨となる可能性が高い
K 指数 (KI)	大気不安定度を表す指標。下層と上層の気温差 ($T_{850} - T_{500}$) と下層の湿度 T_{850} 、湿潤層の中層への広がり ($T_{700} - T_{4700}$) を考慮した指数 (値が大きいほど不安定であることを示す) $KI = (T_{850} - T_{500}) + T_{850} \cdot (T_{700} - T_{4700})$	大気が不安定であるほど、上昇気流が発生しやすく、豪雨となる可能性が高い
ストームに相対的なヘリシティ (SREH)	環境場中で積乱雲が発生した場合、回転する上昇流が積乱雲内に出現しやすいかを表す指標。本来は竜巻の発生ポテンシャルを表す指標 (高度 3km までの水平風速ベクトル v 、ストームの移動ベクトル c を用いて算出) $SREH = \int_0^{3km} k \cdot (v - c) \times \frac{\partial \omega}{\partial z} dz$	鉛直方向の風速差が適度に存在する場合や風向が下層と上層で異なる状況において、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)	・水蒸気フラックス Q 積乱雲の発達元となる下層 (地上～850hPa) の水蒸気流入量を表す指標。水蒸気量 w が多いほど、また、風速 v が大きいほど大きな値を示す。 $Q = \int_{1000hPa}^{850hPa} w \cdot v dz$ ・水蒸気フラックスの収束量 水蒸気の集まり度合を表す指標 (ここでは収束を正の値で示す) $CFLX = -\nabla_H \cdot Q$	多量の水蒸気をもたらされ、下層で集まるほど、大雨をもたらす積乱雲が発生しやすい

(停滞性の線状降水系の抽出) 精度向上を目標に、リードタイムの確保、捕捉精度および的中率について検証したので報告する。

2. 環境パラメータの計算

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 の仕様を表-2に示す。LFM/GPV は発表間隔 (更新間隔) が 1 時間と短く、MSM に比べて直近の気象状況の変化をよく反映できる。また、予報時間が 1 時間毎、水平格子間隔が 4km と細かく、MSM に比べて集中豪雨が発生する地域をより詳細に把握することが可能である。一方、MSM は予報時間が 39 時間と長く、半日以上のリードタイムを確保できるという利点がある。

表-2 LFM/GPVの仕様

	LFM	MSM (参考)
発表間隔	1日24回	1日8回
予報時間	9時間(地上は30分間隔、 上層は1時間間隔)	39時間(地上は1時間間隔、 上層は3時間間隔)
水平格子間隔	地上:2km、上層:4km	地上:5km、上層:10km

3. 豪雨生起ポテンシャルの分布

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点満点で豪雨生起ポテンシャルを評価した。それぞれのしきい値は、國友ら(2016)が検討した値を用い、KI>35、SSI<0、PW>50、CFLX>1000、SREH>90とした。この結果、以下のことが分かった。なお、空間ズレを考慮するため、当該メッシュの周囲±2メッシュ(MSMは50km四方、LFMは20km四方)の環境パラメータの最大値を用いた。

- ①短時間強雨事例では、13点満点中3~5点未満と高ポテンシャル領域は見られない。
- ②MSMに比べてLFMの方が、高ポテンシャル領域が災害発生地点周辺の狭い領域に分布しており、豪雨発生地点との対応がよい。
⇒的中率の向上が期待できる。
- ③LFMでは、集中豪雨発生地点とは関係のない中部山岳域で高ポテンシャルが分布している。

LFMにおいて、集中豪雨発生地点と関係のない中部山岳域で高ポテンシャルが分布しているのは、CFLXが細かい地形性のノイズを拾っていることが原因と考えられる。そこで、地形に起因したノイズ的な領域を除去し、線状降水帯による豪雨発生域を際立たせるために、メディアンフィルタを当該メッシュの周囲±5メッシュ(44km四方に相当)に広げ、水蒸気フラックスを再計算して新たにCFLX_44kmとしたところ、地形性ノイズが除去された。

表-3 判別条件

	条件	しきい値
a	強雨域	≥100mm/2h
b	軸比(長軸/単軸)	≥3
c	長軸の長さ	≥50km
d	楕円の走向と700hPaの風向の差	≤22.5°
e	50mm/2h以上の面積÷楕円面積	≥50%

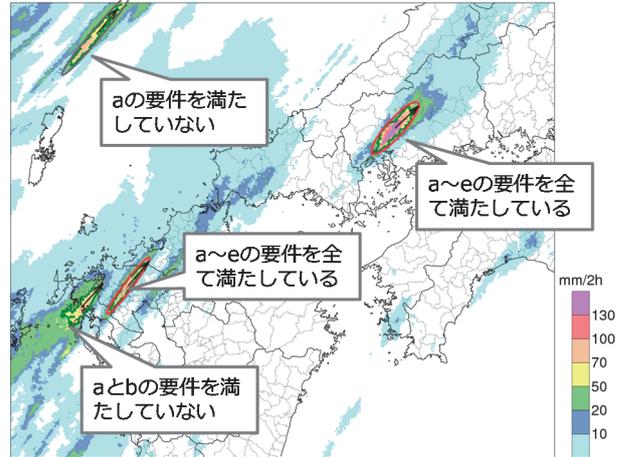


図-1 線状降水帯判定例(2014/8/20 4:00 2h雨量)

4. 線状降水帯の抽出

津口・加藤(2014)²⁾の線状降水帯の定義と、近年の大規模な土砂災害が発生した際の雨量から、100mm/2h以上の降雨で、そ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。ここでは、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。これは、99%、95%、90%の確率長円を実事例に適用して確認したところ、99%では実際の強雨域に対してかなり余裕をもった大きさとなってしまふこと、90%では強雨域に対してあまりにも余裕のない大きさとなってしまふことから95%を採用することとした。軸比(長軸/単軸)は線状という形状を表す要件として津口・加藤(2014)において線状降水帯の判定に用いられている値を採用した。本検討ではバックビルディング型とバックアンドサイドビルディング型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同一となるような条件を設定した。線状でない形状の雨域にもかかわらず結果として軸比等の要件を満たしている楕円を棄却するため、楕円に占める50mm/2h以上の面積割合を設定した。詳細な判別条件を表-3に、実際に判定する場合の例を図-1に示す。これらの雨量・形状等の条件を満たす事例を2014~2016年の暖候期(5月~10月)について抽出したところ、合計200事例が確認できた(図-2)。対象期間が3年と短いものの、地域的には沖縄、九州、四国太平洋側の発生数が多いことがわかる。また、月別の出現状況を見ると、6月まではほとんどの線状降水帯が九州、沖縄で発生し、8月になると多くの線状降水帯は西日本で発生し、東日本と北日本において線状

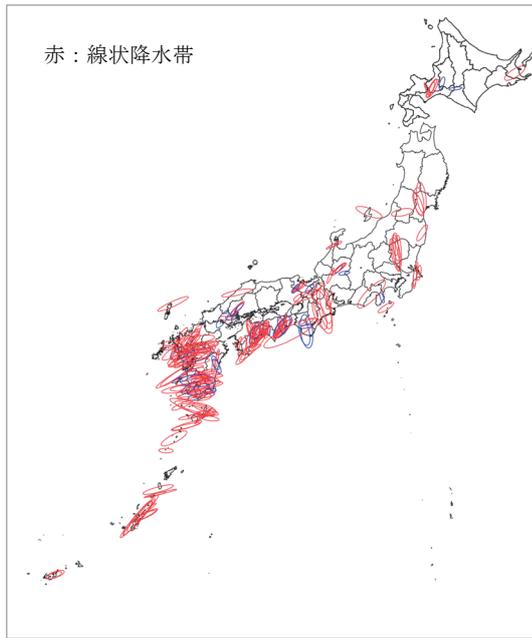


図-2 線状降水帯出現位置 (2014~2016)

降水帯が出現するのは8月以降であり、9月になると九州での出現数は激減する傾向がある。

5. 線状降水帯と豪雨生起ポテンシャルの関係

5.1 捕捉率

線状降水帯が形成された全200事例(2014~2016)のうち、豪雨生起ポテンシャルが高い領域で線状降水帯が形成された事例の割合を捕捉率とし、豪雨生起ポテンシャルにより線状降水帯の形成を捕捉できたか否かについて評価を行った。

2時間100mm以上の雨量を判別条件の1つとしているため、線状降水帯抽出時刻をTとすると、線状降水帯の発生時刻はT-2となる。LFMの配信時刻と豪雨生起ポテンシャルの計算時間を考慮し、T-4~T-2を対象として時刻T-11でしきい値を13点とした場合のLFM7~9時間先予測値の捕捉率を200事例に対して算出すると83%となった(図-3~5)。これは、同時帯のMSMを用いた場合と同等であり、LFMを用いても利用できる精度を確保していることが確認できた。

豪雨生起ポテンシャルによって線状降水帯を捕捉



図-3 線状降水帯の発生時間帯と豪雨生起ポテンシャルの時間帯の関係

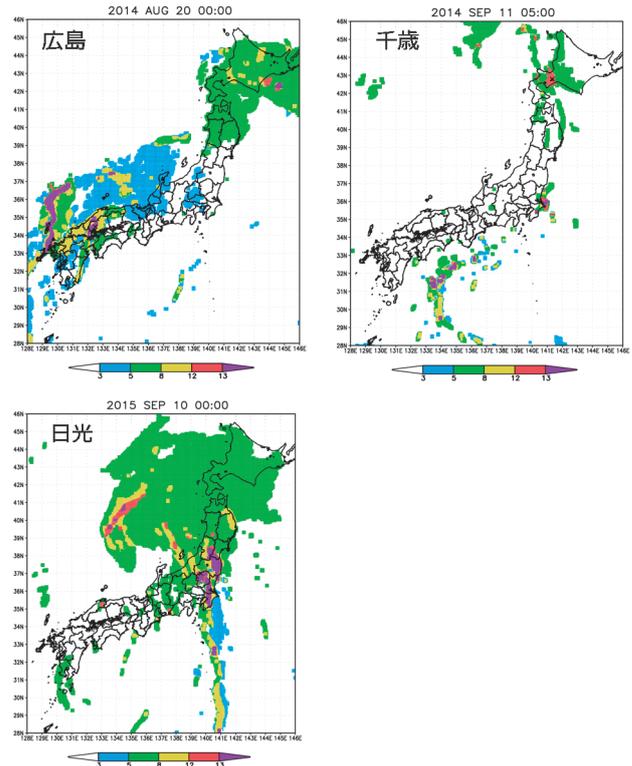


図-4 環境パラメータによるポテンシャル判定結果

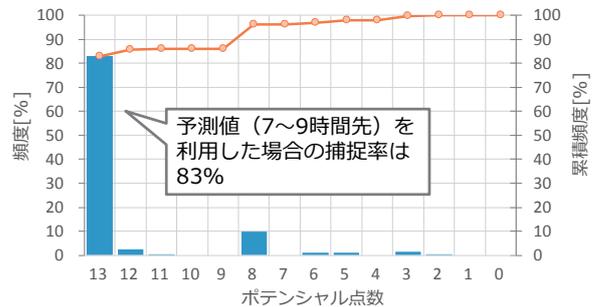


図-5 線状降水帯内の最大ポテンシャル点数の割合

できなかった(豪雨生起ポテンシャルの低い領域で線状降水帯が発生した)事例を確認すると、北海道や島嶼部の事例が多い結果となった。

5.2 的中率

豪雨生起ポテンシャルが高い値(13点)を示した場合に、実際に線状降水帯が発生した割合を的中率とし、評価を行った。

線状降水帯毎に高ポテンシャル領域がかかっているか否かを判定するのは困難であるため、メッシュ毎に判定することとした。ポテンシャルはLFMで算出しているため4kmメッシュ毎に存在しているが、4kmメッシュ毎に判定するのは線状降水帯毎に判定すること(一般的に的中したと感ずる感覚)とは大きく異なる。このため、一般的な大きさの線状降水帯の面積と同程度の60×60kmの大領域のメッシュを設定し、大領域メッシュに高ポテンシャルが存在し、

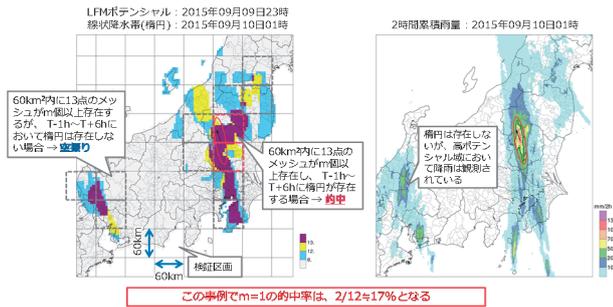


図-5 関東・東北豪雨における的中率の検証例

線状降水帯の一部がかかっていたら中として判定した。具体的な判定方法は以下のとおりである。

- ①時刻Tにおける豪雨生起ポテンシャルの点数を算出
- ②検証区画（60×60km=15×15メッシュ=225メッシュ）内に存在する高ポテンシャル値（13点）の個数を計算
- ③高ポテンシャル値がm個（m=1,10,20,30,40,50）以上存在する場合について、線状降水帯はポテンシャルの高まりからかなり遅れて形成されることがあることからT-1～T+6時間に存在する線状降水帯（楕円）を探索し、いずれかの線状降水帯が検証区画にかかっていたら中（NOK）、かかっていなければ空振り（NNG）とする
- ④対象期間内、全国を対象に、NOKとNNGを計算し、
的中率 = $100 \times N_{OK} / (N_{OK} + N_{NG})$ を算出する

検証例を図-5に示す。予測値を用いて算出した全期間的中率を表-4に示す。検証区画内に存在する高ポテンシャルメッシュ数が多いほどの中率は高く

表-4 的中率（2014～2016）

検証区画内の高ポテンシャルメッシュ数	7時間先	8時間先	9時間先
1以上	3.4%	3.3%	3.3%
10以上	3.9%	3.9%	4.0%
20以上	4.4%	4.4%	4.5%
30以上	4.9%	4.8%	4.8%
40以上	5.2%	5.1%	5.2%
50以上	5.4%	5.3%	5.4%

村田郁央



国土交通省国土技術政策
総合研究所土砂災害研究
部土砂災害研究室 研究
官
Ikuo MURATA

野呂智之



国土交通省国土技術政策
総合研究所土砂災害研究
部土砂災害研究室長
Tomoyuki NORO

神山嬢子



国土交通省国土技術政策
総合研究所土砂災害研究
部土砂災害研究室 主任
研究官
Joko KAMIYAMA

池田 寛



研究当時 国土交通省
国土技術政策総合研究所
土砂災害研究部土砂災害
研究室長、現 中電技術
コンサルタント(株)
Hiroshi IKEDA

なるが、リードタイムによる精度の低下（7時間先と9時間先の精度の差）は見られなかった。

6. おわりに

本稿では、LFMの予測値を用いて豪雨生起ポテンシャルを算出し、バックビルディング型およびバックアンドサイドビルディング型の線状降水帯の形成を捕捉できるかについて評価した。この結果、捕捉率については線状降水帯の形成される7～9時間前の時点で83%と問題なく利用できる精度であることが確認された。これにより、夕方時点で夜間の防災体制構築の参考とすることが可能となる。また、豪雨生起ポテンシャルが高い値を示した領域で土砂災害警戒情報が発表された場合には、強雨が継続し甚大な災害が発生するおそれが高いと言える。一方での中率については、定義の仕方にもよるものの、一般に捕捉率を高くするにはポテンシャル点数の基準を下げることであり、同時に空振りが増加し中率が低くなる。今後、土砂災害警戒情報を補足する情報として、線状降水帯の形成により甚大な被害を及ぼす土砂災害の危険性を、避難勧告等を発令する市町村長に対して切迫感を持って伝えるためには、捕捉率を下げることなくいかに的中率を上げていくか、更なる検討が必要と考えられる。

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、B184～185、2016
- 2) 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
- 3) 加藤輝之：線状降水帯発生要因としての鉛直シアと上空の湿度について、平成26年度予報技術研修テキスト、pp.114～132、2015