

1～3 時間降水予報の誤差特性に基づく土砂災害リスク評価

長岡技術科学大学 非会員 ○小椋 詩織
長岡技術科学大学 正会員 陸 旻皎

1. はじめに

陸ら (2023) は、リスク評価における新たな指標として土壌水分欠損量 (soil moisture deficit : SMD), すなわち土柱が降水を受容する余力がリスク評価の良い指標となることを示したり、また、SMD の算出に将来数時間先の短時間雨量予報を用いることで、土砂災害の早期警戒に有効であることを示唆している¹⁾。先行研究として、小林 (2024) は、短時間雨量予報のうち、土壌雨量指数の推定等に使用されている降水短時間予報に着目し、予測雨量を用いる際の不確実性を考慮する必要性を示した²⁾。そのうえで、降水短時間予報における予測誤差がどのような確率分布に従って発生するかを分析した結果、1 時間先の予報誤差が正規分布に従うこと、また不確実性を考慮して SMD を算出することで、1 時間前の段階で災害を捕捉できる可能性があることが明らかにした²⁾。そこで本研究では、先行研究との整合性を確認するとともに、2～3 時間先の降水短時間予報を加えて誤差特性を明らかにすることを目的とする。さらに、陸らによる SMD の算出記録を基に、予測誤差の不確実性を考慮したうえで、1～3 時間先における土砂災害リスク評価の可能性について検証する。

2. 手法

2.1 取得データ

誤差特性の把握にあたって、取得するデータは、①降水短時間予報によって予測された 1～3 時間先の予測雨量データ [mm/h] (本研究では、2024 年 8 月 29 日～30 日までのデータを使用)、②気象庁管轄の雨量観測所にて雨量計によって観測された実測雨量データ [mm] の 2 種類である。

予測データについては、気象庁が公開している Web サイト「今後の雨」より取得した。取得条件は、5.0 mm/h 以上とし、図-1 に示すようにセルの色によりデータを抽出した。なお、予測雨量には幅が存在するため、その色が示す範囲に対して下限値・平均値・上限値の 3 つのパターンを取得した。2、3 時間先の

予測雨量については、それぞれの累積雨量を算出して利用した。

実測雨量データについては、気象庁の「過去の気象データ」より、予測雨量データのメッシュと重なる位置にある雨量観測所の 10 分降水量を取得した。雨量計で測定された 1 時間雨量は積算値であるため、後の計算処理を考慮し、前後 30 分の降水量を合算して 1 時間雨量とした。

2.2 誤差特性の把握

- ① 予測データの妥当性を調査するため、以下の式により、実測値の正規化を行った。

$$\frac{X_{(i)} - f_{T(i)}}{f_{L(i)} - f_{T(i)}} \quad (1)$$

ここで、 $f_{(i)}$:ある時間における予測雨量

$X_{(i)}$:ある時間における実測雨量

- ② 取得した予測雨量データおよび実測雨量データを使用して誤差指標を以下の式より算出した。

$$E_{(i)} = f_{(i)} - X_{(i)} \quad (2)$$

ここで、 $E_{(i)}$:ある時間における予測雨量と実測雨量の差

- ③ ME, MAE, SD, RMSE の算出

精度の評価指標として、

ME, MAE, SD, RMSE を山岸ら (2011)、伊藤ら (2018) の手法に準拠している³⁾⁴⁾。

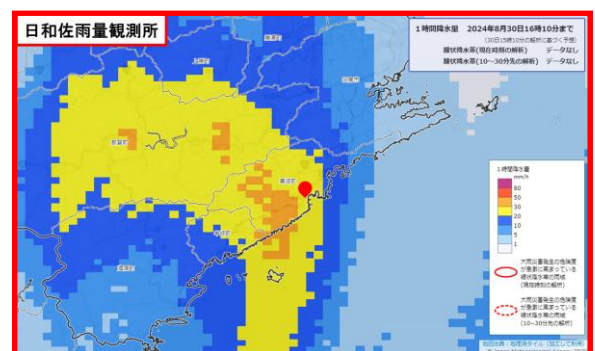


図-1 降水短時間予報による予報結果例

2.3 誤差の分布特性の把握

本研究の対象である降水短時間予報における誤差の分布特性について、一般に誤差は正規分布に従うとされることから、正規性の検証を行った。

まず定性的な評価として、①箱ひげ図、②ヒストグラム、③QQプロットの3種の図を作成した。箱ひげ図は誤差分布の対称性と外れ値の有無を確認、ヒストグラムは誤差の頻度分布形状の確認、QQプロットは理論正規分布との対応関係を視覚的に確認することが目的である。加えて、定量的な評価として、Pythonを用いた正規性検定も実施した。

2.4 土砂災害リスク評価への応用

2.3節にて明らかにした誤差特性を踏まえ、スピ対数時間先における土砂災害リスクを評価する方法を検討した。対象とする土砂災害は、2010年7月29日に発生した事例である。各災害の発生時刻は、住民等による目撃報告や自治体による発見記録に基づくため、正確な発生時刻は不明である。そのため、陸らの研究に倣い、報告があった時刻から遡って前24時間以内に発生したものとする。

① 土砂災害リスク評価への応用方法

陸らの研究によれば、1時間先の予測雨量を用いたSMDは以下の式で求められる。

$$SMD_{(t)(i)} = SMD_{(t-1)} - R_f(t)(i) \quad (3)$$

ここで、 $SMD_{(t)(i)}$ はある時間における土壌水分欠損量である。 $SMD_{(t)(i)} < 0$ となる時、 $SMD_{(t)(i)} = 0$ とする。基準となる $SMD_{(t-1)}$ は陸らの研究によって計算および記録されたものを使用した。

1時間先予測の場合は上記の式でSMDを直接計算できるが、2、3時間先予測では予測雨量を累積する必要があるため、 $SMD_{(t)(i)}$ の算出方法は以下のように変更される。

$$SMD_{(t)(i)} = SMD_{(t-L)} - \sum_{l=1}^L R_f(t-l+1)(i) \quad (4)$$

ここで、 L は予測時間である。

② Norm.Dist 関数の適用

(3)(4)式によって算出された $SMD_{(t)}$ を災害捕捉率における閾値 SMD_c と比較し、 $SMD_{(t)} < SMD_c$ となる確率を求めた。確率の計算には、ExcelのNorm.Dist⁹⁾関数を用いて、以下の式で求めた。

$$P(L) = \text{Norm.Dist}(SMD_c; \mu = SMD_{(t)(i)}, \sigma = \sigma_L) \quad (5)$$

ここで、 σ_L には2.3節で求めた各予測時間での誤差特性を用いる。

加えて、2、3時間先の $SMD_{(t)(i)}$ に対するNorm.Dist関数の適用には、以下の2通りの基準時刻の取り方に考慮した。

● 発表時刻(t)

モデルの精度検証を目的とし、予報発表時刻を基準として累積確率を算出した。

$$P_{pub}(L) = \text{Norm.Dist}(SMD_c; \mu = SMD_t^{(L)}, \sigma) \quad (6)$$

ここで、 $SMD_t^{(L)}$ は発生時刻 t における予測時間 L の $SMD_{(t)(i)}$ である。

● 対象時刻($t+L$)

実際の危険度を確認する目的として、災害発生時刻を基準として累積確率を算出した。

$$P_{target}(L) = \text{Norm.Dist}(SMD_c; \mu = SMD_{t+L}, \sigma) \quad (7)$$

ここで、 SMD_{t+L} は対象時刻基準で算出した $SMD_{(t)(i)}$ である。

本研究では、予測精度の検証を目的とするため、発表時刻(t)を基準として算出した累積確率 $P_{pub}(L)$ を用いて、1～3時間先のリスク評価を比較した。

3. 結果と考察

3.1 誤差指標の計算結果

各誤差指標の計算結果を表-1に示す。先行研究(小林, 2024)のデータと比較すると、1時間予報ではデータ数の違いにより誤差分布がやや小さく算出されたが、平均誤差(ME)の傾向は概ね一致している。2、3時間予報においても平均誤差(ME)は同程度であったが、平均絶対誤差(MAE)および標準偏差(SD)は増大した。これは、予測時間が長くなるにつれて予測雨量の不確実性が累積し、分布の広がりが大きくなるためと考えられる。

表-1 誤差指標の計算結果

| データパターン | 下限 | 平均 | 上限 | 下限 | 平均 | 上限 |
|-------------|-------|------|-------|-------|-------|-------|
| | 先行研究 | | | 2時間予報 | | |
| データ数 | 686 | | | 500 | | |
| ME [mm/h] | 0.52 | 4.59 | 8.66 | -0.48 | 3.69 | 7.86 |
| MAE [mm/h] | 5.06 | 6.98 | 9.98 | 6.65 | 8.34 | 11.11 |
| SD [mm/h] | 6.97 | 7.50 | 8.25 | 9.94 | 11.11 | 12.56 |
| RMSE [mm/h] | 6.91 | 8.67 | 11.78 | 9.95 | 11.71 | 14.82 |
| | 1時間予報 | | | 3時間予報 | | |
| データ数 | 290 | | | 670 | | |
| ME [mm/h] | -0.03 | 3.06 | 6.14 | -0.95 | 4.21 | 9.25 |
| MAE [mm/h] | 4.19 | 5.54 | 7.82 | 8.11 | 9.96 | 13.14 |
| SD [mm/h] | 6.51 | 6.85 | 9.53 | 11.52 | 13.11 | 15.07 |
| RMSE [mm/h] | 6.51 | 7.50 | 9.56 | 11.56 | 13.77 | 17.68 |

3.2 誤差の分布特性（正規性の検証）

定性的評価として、図-2 に箱ひげ図、図-3 にヒストグラム、図-4 に QQ プロットを示す。左上に先行研究（小林，2024），左下に 1 時間予報，右上に 2 時間予報，右下に 3 時間予報の結果を配置している。

箱ひげ図では、中央値が箱の中央付近に位置し、外れ値が少ないことから、誤差分布は概ね対称的であると判断される。ヒストグラムでは、1 時間先予測は正規分布に近い形状を示したのに対し、2・3 時間先予測ではわずかに裾が広がる傾向が見られた。QQ プロットにおいては、すべての予測時間でプロットがおおむね 45°の対角線上に並んでおり、正規分布に近い分布形状を示した。

さらに、5 種類の正規性検定の p 値の結果を表-2 に示した。すべての検定で有意水準 5%において帰無仮説「データは正規分布に従う」を棄却できなかった。したがって、1〜3 時間先のいずれの予測誤差も正規分布に従うとみなすことができる。このことから、降水短時間予報の誤差は外れ値や偏りが少なく、安定した予測特性を持つといえる。

3.3 土砂災害リスク評価への応用

図-5 に雨量とSMD の関係を表したグラフを、図-6 に 1〜3 時間先予測における Norm.Dist 関数を用いた累積結果の結果を示す。

SMDは土柱が降水を受容する余力であるため、値が小さいほど土壌は飽和状態に近づいている。確率値は「災害が発生する可能性の高さ」を表しており、値が大きいほど土壌が飽和に近い状態にあり、降雨による災害発生リスクが高いことを意味する。

図-5 より、降雨によるSMDの減少を確認できた。さらに、図-6 から、予測時間が長いほど、より早い段階から降雨を予測しているため、累積的な降水の影響を反映してリスク値が高くなる傾向が見られた。

例えば、図-6 の 4 時間付近に着目すると、この時点での 3 時間先予測は、4〜6 時間目の累積雨量を考慮しており、1 時間先予測に比べて明確に高い確率値を示している。これは、予測時間が長い予測ほど降雨継続を早い段階から取り込み、土壌が飽和状態に近づく過程をより敏感に反映していることを示している。

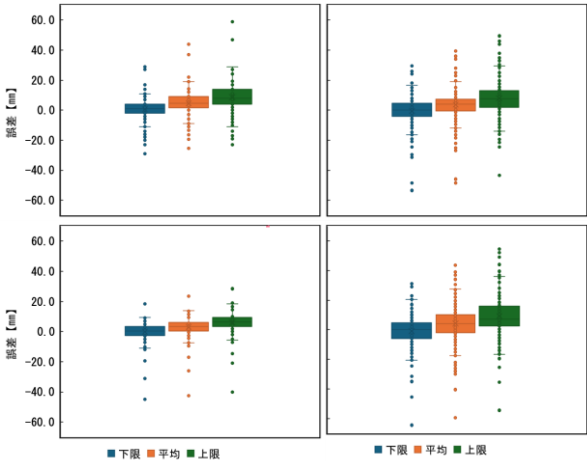


図-2 箱ひげ図

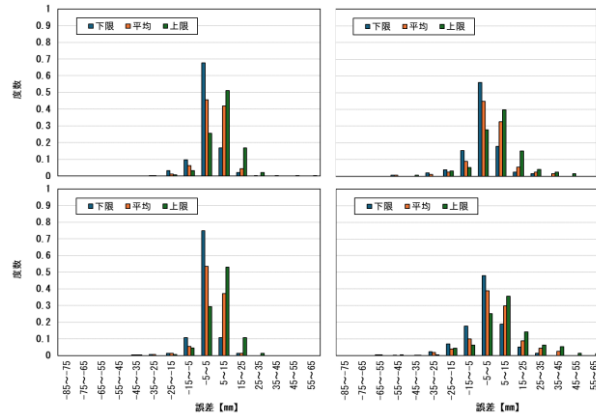


図-3 ヒストグラム

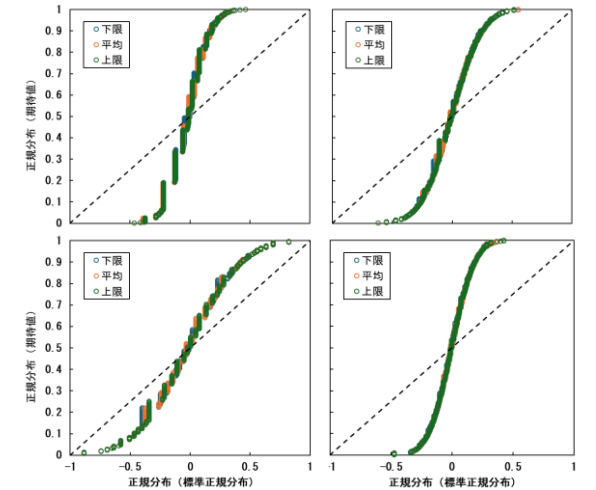


図-4 QQ プロット

表-2 正規性検定の結果（p 値）

| 検定方法 | 1hr | 2hr | 3hr |
|--------------------|-------|-------|-------|
| Shapiro-Wilk | 0.753 | 0.461 | 0.517 |
| Anderson-Darring | 0.777 | 0.781 | 0.782 |
| Kolmogorov-Smirnov | 0.461 | 0.574 | 0.893 |
| Jarque-Bera | 0.671 | 0.309 | 0.418 |
| D'Agostino-Pearson | 0.587 | 0.282 | 0.408 |

したがって、対象時刻基準での解析においても、長時間予測を活用することで、より早期の土砂災害の警戒を把握できる可能性が示唆される。

4. 結論および今後の展望

降水短時間予報による予測雨量と気象庁にて観測された雨量計データを比較し、誤差を求めた。求めた誤差の定性的評価と定量的評価を行った結果、1～3時間先の予測誤差が正規分布に従うとみなすことができた。

また、誤差が正規分布に従って発生することから、降水短時間予報の誤差特性より、陸らが導いた計算手法に基づいて予測値が有する不確実性を考慮したSMDを求めた。結果として、予測時間が長いほど、より早期の段階で災害を捕捉できる可能性があることがわかった。

今後、複数の土砂災害のケースについても同様に検証を行い、現状での捕捉に対する信頼度を調査していく必要がある。

5. 参考文献

- 1) 陸旻皎・小椋崇弘・ThandarTunZIN・岡滋晃・鬼束俊一・川村直明・山本隆広・込山晃市
2023：土壌水分欠損量による土砂災害リスク評価の試み -2010年と2011年に新潟県で発生した土砂災害を例として-, 水文・水資源学会誌 36: 118-128, DOI: 10. 3178/jjshwr. 36. 1752
- 2) 小林 徹 (2024)：降水短時間予報の誤差特性とその土砂災害リスク評価への応用，長岡技術科学大学大学院工学研究科 修士論文.
- 3) 山岸良雄・佐治憲介・青木功・谷川亮一・藤井康正：2011，気象庁気象予報データを用いた日射量予測手法の精度検証，電気学会論文誌 B, Vol. 132, No. 4, pp. 334-340. DOI: 10. 1541/ieejpes. 132. 334
- 4) 伊藤公紀・伊藤裕康：身につく統計学，pp. 18-19，森北出版株式会社，2018
- 5) 水本篤・竹内理 2010. 効果量と検定力分析入門—統計検定を正しく使うために—。外国語教育メディア学会（LET）関西支部 メソドロロジー研究部会 2010 年度報告論集. 47-73

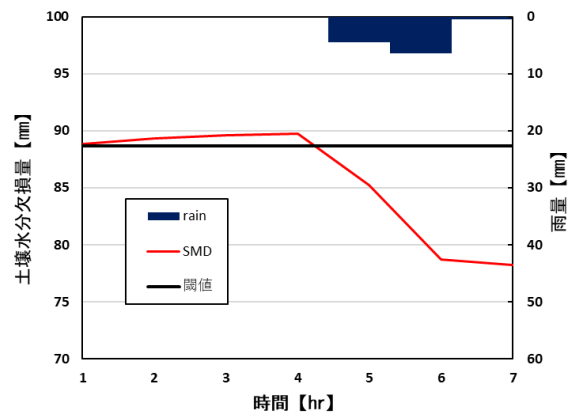


図-5 雨量と SMD の関係
(災害事例：2010 年 7 月 29 日)

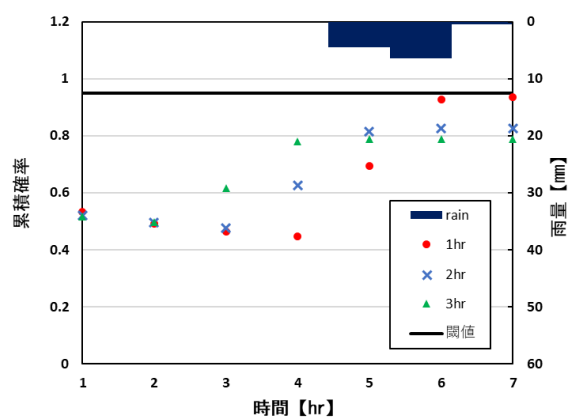


図-6 Norm. Dist 関数による累積確率結果
(災害事例：2010 年 7 月 29 日)