

単一の X バンド MP レーダーと C バンドレーダーを活用した山地 域における土砂災害危険度推定

渡邊 彩花¹・相馬 一義²・大石 哲³・佐野 哲也⁴・柿澤 一弘⁵・馬籠 純²・
石平 博²・市川 温⁶・末次 忠司²・砂田 憲吾²

Estimation of shallow landslide risk in a mountainous area using
a single X-band multi-parameter radar and C-band radars

Ayaka WATANABE¹, Kazuyoshi SOUMA², Satoru OISHI³, Tetsuya SANO⁴,
Kazuhiro KAKIZAWA⁵, Jun MAGOME², Hiroshi ISHIDAIRA²,
Yutaka ICHIKAWA⁶, Tadashi SUETSUGI² and Kengo SUNADA²

Abstract

We used rainfall information obtained using a single X-band multi-parameter (UY) radar and C-band radars to estimate the risk of shallow landslides. Although rainfall data derived from the UY radar were underestimated compared with the rain gauge data 20-30 km further from the radar site, the correlation coefficient between two measurement methods was high. According to this comparison, we divided the UY radar data into a moving average within a 2.5 km mesh and ratio of rainfall to the moving average. The moving average was then corrected by the C-band radar information and combined with the ratios. The root mean-square error, mean error, and correlation coefficients significantly improved with the combined rainfall data. The risk of shallow landslides was accurately estimated using the soil water index calculated with a tank model and the combined hourly rainfall data for an area where shallow landslides have occurred.

キーワード：表層崩壊, X バンド MP レーダー, 減災, C バンドレーダー, タンクモデル

Key words: shallow landslide, X-band multi-parameter radar, disaster reduction, C-band radar, tank model

¹ 日本工営株式会社

Nippon Koei Co., LTD

² 山梨大学 総合研究部

University of Yamanashi, Graduate Faculty of
Interdisciplinary Research

³ 神戸大学 都市安全研究センター

Kobe University, Research Center for Urban Safety and
Security

⁴ 国立研究開発法人 情報通信研究機構

National Institute of Information and Communications
Technology

⁵ 一般財団法人 河川情報センター

Foundation of River & Basin Integrated Communications

⁶ 京都大学 大学院工学研究科

Kyoto University, Graduate School of Engineering and
Faculty of Engineering

本論文に対する討議は 2019 年 5 月末日まで受け付ける。

1. はじめに

山梨県は土砂災害(斜面崩壊・土石流・地すべり)が発生しやすい地域であり、ハード対策のみでは安全を十分に確保できない現状である。そのため山梨県県土整備部は甲府地方気象台と連携してソフト対策の整備を精力的に進めており、その1つとして「山梨県土砂災害警戒情報システム」を構築している¹⁾。このシステムでは気象庁のCバンドレーダー(空間解像度1km)の降雨情報を用いており、それ以上詳細な土砂災害危険度情報を提供できない。土石流を引き起こす表層崩壊の空間規模は数百m²以下であり、どの溪流が危険かを判断し住民の早期避難に役立てるためには、より空間解像度の高い危険度推定が望まれる。

これらの課題を補うために注目されるのがXバンドの気象レーダーである。XバンドレーダーはCバンドレーダーに比べ、細かい降雨情報が取得可能という利点を持つが、強い降雨域背後の降雨が過小評価される弱点があったため、定量的な活用は困難であった。しかし、近年その弱点を補強したXバンドMP(Multi Parameter)レーダーが開発され、減災への活用を目指して複数のXバンドMPレーダーを用いたネットワークが都市部を中心に全国的に構築されつつある。

そのようなXバンドMPレーダーを活用した土砂災害危険度推定が望まれる。しかし、従来のXバンドレーダーと比較して大きく改善されたものの、XバンドMPレーダーにおいても依然としてレーダーサイトから見て強雨域の後方で電波が減衰する傾向が残っている。そのため、複数サイトのレーダーで相互補完して利用することが一般的である^{2,3)}。近年国土交通省XRAIN等でXバンドMPレーダーの台数は増加しているものの、単一のXバンドMPレーダーでしか観測を行っていない地域は山地域を中心に多く残っている。特に山梨県は甲府盆地という山地域に囲まれた独特の地形より、レーダービームの遮断等により十分な精度を見込めず、XバンドMPレーダーによる定量的な降雨量推定には未だ多くの課題が残る^{4,5)}。

そのようなXバンドMPレーダーの弱点を、

従来のCバンドレーダーと合成することにより補う技術が近年提案されている。加藤ら⁶⁾は防災科学技術研究所のXバンドMPレーダー情報を用いて気象庁の全国合成レーダーGPVを補正し両者を合成する手法を開発し、降水ナウキャストへ活用した。牛山ら⁷⁾は、国土交通省水管理・国土保全局のXバンドMPレーダーから得られる偏波間位相差変化率を用いてCバンドレーダーによる雨量推定式の係数を求め、両者を合成する手法を提案した。気象庁は2014年8月より、Cバンドレーダーと国土交通省水管理・国土保全局のXバンドMPレーダー、及び雨量計観測データ等を活用した高解像度降水ナウキャストの提供を開始している⁸⁾。

従来の合成方法では、XバンドMPレーダーの降雨減衰が大きな領域については、まず別なXバンドMPレーダーの情報を用いて補完を行い、それでもCバンドレーダー降雨量の値の方が大きい場合はCバンドレーダーの推定値のみを用いる手法が主流である(例えば加藤ら⁶⁾、牛山ら⁷⁾、気象庁⁸⁾など)。土砂災害をもたらすような大雨時で単一のXバンドMPレーダーでしかカバーできていない場合には、実質的にCバンドレーダーの降雨量推定結果情報しか降雨量推定に生かされない領域が拡大することになる。しかし、降雨減衰の影響で降雨量推定値そのものは過小評価していても、降雨の空間的な強弱の情報についてはXバンドMPレーダーの情報を活用できる可能性がある。

以上を踏まえて本研究では、単一のXバンドMPレーダーから可能な限り降雨量空間分布の情報を引き出したうえでCバンドレーダー情報と合成し、山梨県における土砂災害発生危険度推定に活用する手法を検討する。

具体的には図1に示すように、まず既往研究で指摘された山地域における単一のXバンドMPレーダー降雨量推定値について、雨量計と比較した詳細な誤差特性を把握し、Cバンドレーダーとの合成手法を検討する。

次に、実際に山梨県で土砂災害が発生した事例を対象にXバンドMPレーダーとCバンドレー

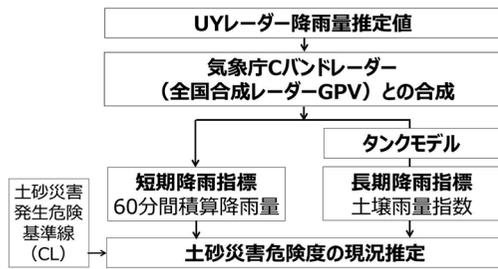


図1 本研究で提案する土砂災害危険度現況推定の流れ

ダーを合成した降雨量を用いた土砂災害危険度現況推定を行い、その信頼性を検討する。

2. 使用するレーダー降雨強度プロダクトの概要

2.1 UYレーダーによる降雨強度推定値

本研究では山梨大学が運用するXバンドMPレーダー（以下UYレーダーと呼ぶ）⁹⁾を活用する。観測の範囲と解像度は、覆域64 km, ビーム方向の空間分解能150 m, 駆動速度方位角最大3 rpm, 仰角最大6 deg/secである。通常のアンテナ走査は0~360degで特定仰角を周期的に走査する、PPI (Plan Position Indicator) 観測を行っている。仰角は、2009年5月20日14:18JST (Japan Standard time; 日本標準時) から2010年7月2日10:00JSTまでは15仰角(0.5, 1.0, 1.8, 2.5, 3.6, 4.8, 6.6, 8.8, 11.5, 15.2, 19.7, 25.6, 32.6, 38.2, 44.8°) 6分毎のボリュームスキャンを行っており、2010年7月2日10:05JSTから2010年8月25日15:15JSTまでは12仰角(0.5, 1.0, 1.8, 2.5, 3.6, 4.8, 6.6, 8.8, 11.5, 15.2, 19.7, 25.6°) 5分毎のボリュームスキャン、2010年8月25日15:55JSTから現在までは12仰角(1.0, 1.8, 2.5, 3.6, 4.8, 6.6, 8.8, 11.5, 15.2, 19.7, 25.6, 32.6°) 5分毎のボリュームスキャンを行っている。

UYレーダーによる降雨強度推定⁹⁾では、まず水平偏波と垂直偏波の受信信号の相関係数である ρ_{HV} (偏波間相関係数)によりエラー値の抽出が行われる。 ρ_{HV} について異常値が検出された場合は、降雨強度 R は定義されない。また ρ_{HV} が0より大きく0.5以下である場合、降雨強度 R は0とみな

す。これは一般的な降雨の場合 ρ_{HV} の値は0.98程度、不揃いな粒子や融解層においても0.8程度の値をとるので、0.5以下の場合には雨が降っていないこととみなすことができるからである。これら以外の ρ_{HV} が0.5以上の場合、真木ら¹⁰⁾, Maki et al.¹¹⁾, Bringi and Chandrasekar¹²⁾に基づき各偏波パラメータ (反射因子 Z_H , 反射因子差 Z_{DR} , 伝播位相差変化率 K_{DP}) から降雨強度が推定される⁹⁾。本研究では以下の式で求められる $R(Z_H)$, $R(K_{DP})$ を用いて降雨強度推定を行った。

$$R(Z_H) = a_1(t) Z_H^{a_2(t)} \tag{1}$$

$$a_1(t, \theta) = 3.35 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-4} t \tag{2}$$

$$a_2(t, \theta) = 0.639 - 9.00 \times 10^{-4} t \tag{3}$$

$$R(K_{DP}) = b_1(t, \theta) K_{DP}^{b_2(t, \theta)} \tag{4}$$

$$b_1(t, \theta) = 19.8 + 2.64 \times 10^{-2} \theta + 1.73 \times 10^{-3} \theta^2 + 1.09 \times 10^{-4} \theta^3 - 0.012 t \tag{5}$$

$$b_2(t, \theta) = 0.814 + 5.00 \times 10^{-4} t \tag{6}$$

ただし、 θ はレーダーの仰角(度)、 t は気温(°C)であり、本研究では $t=20$ °Cと仮定した。式(1)における Z_H の単位は mm^6/m^3 、式(4)における K_{DP} の単位は度/kmである。

$R(Z_H)$ では強い雨を過小評価し、 $R(K_{DP})$ では弱い雨の際に非現実的な強雨がまばらに推定されることが知られている(例えば土屋ら³⁾)。そのため本研究では弱い雨($K_{DP} \leq 0.3$ または $5\text{dBZ} \leq Z_H < 30\text{dBZ}$)では $R(Z_H)$ を、強い雨($K_{DP} > 0.3$ かつ $Z_H > 30\text{dBZ}$)では $R(K_{DP})$ を用いたコンポジットデータを使用した。

本研究では、直交座標系に変換された三次元降雨強度データより、それぞれの水平グリッドについて降雨強度データを切り出して二次元データを作成した。直交座標系に変換された三次元降雨強度データの水平解像度は約500 m (経度方向0.005529度, 緯度方向0.004492度), 鉛直方向解像

度は500 mである。レーダーの捉えるエコーは上空のものであり、地上雨量計の観測している地上データとは異なる。雨滴は雲内で雲粒を併合して成長したり地表付近で蒸発したりするため、高度によって降雨強度に差がある。地上での降雨強度により近付けるためには、より低い高度のデータを取得する必要がある一方で、山地域における地表付近の降雨強度データには除去しきれなかったグラウンドクラッター等の影響が含まれている可能性がある。それを踏まえて、本研究では以下のように三次元降雨強度データから二次元データを切り出し、1回のボリュームスキャン中は降雨強度が一定と仮定して10分積算降雨量を推定した。

1. 高度が2250 mで Z_H が10dBZを超え、降雨強度推定値が未定義値でなければその降雨強度を取りだす。

2. 値が決まらない場合は高度2750 m, 3250 m, 3750 m, 4250 mで Z_H が10dBZを超え、降雨強度推定値が未定義値でない最大の降雨強度を採用する。

3. 値が決まらない場合は未定義値を記録する。

例えば土屋ら³⁾は「 Z_H が10dBZにおける降雨強度を、標準的な雨滴定数を用いてZ-R関係式により計算した場合、約0.15 mm/hrとなる」としており、10dBZ以上の Z_H を採用することで、気象庁解析雨量の最小単位である0.1 mm/hrに相当する降雨を捉えることができると期待できる。

2.2 気象庁全国合成レーダー GPV

本研究ではCバンドレーダーによる降雨強度推定値として、気象庁全国合成レーダー GPV (Grid Point Value; 格子点値) を用いる。このデータは気象庁が保有する全国20台の気象レーダーで観測した反射因子より推定した空間解像度約1 km (経度方向0.0125度, 緯度方向0.00833度), 10分毎の降雨強度 (mm/hr) を提供したものである。最低高度面 (山地域以外は、ほぼ2 km) の降雨強度推定値について、10分前の AMeDAS による地上雨量計観測値を用いて補正している⁶⁾。補正に際しては気象庁解析雨量と異なり山梨県などの自治体が保有する雨量計は用いられていない。

本研究では10分間の降雨強度は一定と仮定して、10分毎の降雨強度から10分積算降雨量を算出した。

2.3 地上雨量計と比較したUYレーダーによる降雨強度推定値の特徴

図2に解析対象範囲、レーダーサイトの位置、レーダーサイトから半径64 kmの覆域を示す。また、図3にレーダーサイトと本研究で使用した AMeDAS 観測点の位置を示す。村上⁵⁾が検討の対象とした2010年7月2日から12月31日までの間に甲府地方気象台で5 mm/hr以上の降雨が観測された日及び山梨県内で土石流災害が発生した日 (18降雨イベント) のうち、県内のすべての AMeDAS 観測点で0.5 mm以上の10分降雨量が18回 (のべ3時間) 以上観測された日を検討対象とした。これは、にわか雨のような土砂災害につながりにくい降雨を除外するためである。その結果、12降雨イベント (2010年7月9日, 8月9日, 9月8日, 9月16日, 9月23日, 9月28日, 10月9日, 10月30日, 10月31日, 11月1日, 12月3日, 12月22日) を対象に雨量計 (AMeDASと山梨県雨量観測データ) とUYレーダーによる降雨量推定

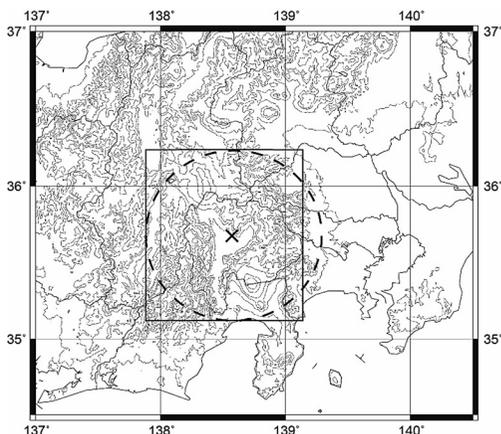


図2 解析対象範囲 (実線の四角で示す領域), レーダーサイトの位置 (×印で示す場所), レーダーサイトから半径64 kmの観測領域 (破線の丸で示す領域). 海岸線と標高100 m, 500 m, 800 m, 1000 m, 1500 m, 2000 mの等高線を細実線で, 県境を太実線で示す。

値とを比較した。

アメダス観測所における12降雨イベントでの平均二乗誤差 (RMSE)・相関係数・平均誤差 (ME)・60分積算降雨量の平均値を, UY レーダーからの距離・地点標高と合わせて表1にまとめる。RMSE・相関係数・MEを算出するには UY レーダーによる降雨量推定値, AMeDASともに前60分積算降雨量を求めて比較した。表1より, 韮崎, 八町山, 古関では RMSE が小さく積算降雨量を精度よく観測できているが, 山中, 南部では RMSE の値, 及び60分積算降雨量平均値に対する

RMSE の比が大きく積算降雨量の誤差が大きい。ME を比較したところ, RMSE が非常に小さい韮崎を除いて全体的に過小評価傾向が見られ, 特に山中, 南部においては過小評価傾向が著しい。

UY レーダーから同程度の距離に位置する切石と河口湖 (20~30 km), 南部と山中 (30 km 以上) を比較すると, 地点標高の高い河口湖・山中で RMSE が大きく, 地点標高の低い切石・南部で RMSE が小さくなっている。このため, UY レーダーから距離が遠い山岳部において特に大きな誤差が生じている。

一方で相関係数についてはレーダーサイトから遠い切石, 河口湖, 山中, 南部でも0.65~0.85程度の値が保たれており, 降雨の相対的な強弱については UY レーダーによる推定値と地上雨量計とでよく一致していることがわかる。

さらに, 図4に山梨県雨量観測所での誤差評価結果を加えて同様に UY レーダーからの距離と12の降雨イベントでの RMSE の平均値との関係を示した。横軸は UY レーダーからの距離, 縦軸は RMSE 平均値である。アメダス観測所に山梨県雨量観測所も加えた多事例解析に基づく, レーダーサイトからの距離と誤差の関係については, レーダーサイトからの距離が20 km を過ぎた付近から RMSE の平均値が大きくなり, 30 km を過ぎた付近ではさらに誤差が大きい雨量観測地点が見られた。

降雨による減衰に加えて, レーダー観測精度へ

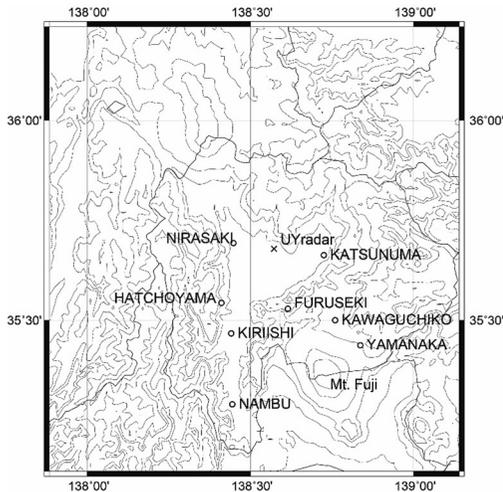


図3 本研究で使用する AMeDAS 観測点 (○印で示す場所) とレーダーサイトの位置 (×印で示す場所)。

表1 2010年の12降雨イベントについて平均した各 AMeDAS 観測所における UY レーダー降雨量推定値の誤差

	韮崎	勝沼	八町山	古関	切石	河口湖	山中	南部
UY レーダーからの距離 [km]	10.5	12.9	20.2	17.1	26.0	25.3	34.9	44.8
地点標高 [m]	341	394	930	552	226	860	992	141
RMSE 平均値 [mm]	1.52	2.62	1.81	1.80	2.19	2.84	6.95	5.19
相関係数平均値	0.90	0.83	0.93	0.86	0.84	0.66	0.65	0.74
ME 平均値 [mm]	0.1	-1.8	-0.7	-0.8	-0.6	-0.1	-5.7	-4.0
60分積算降雨量平均値 [mm]	3.3	3.5	3.9	4.0	4.3	4.0	6.9	6.2

及ぼす影響としてレーダーが観測するビーム高度が挙げられる(図5)。レーダー観測においては、地形反射を避けるために上空に向けてビームを走査する。特に山梨県では甲府盆地内からのレーダー観測においては、周囲の山岳による遮蔽を避けるためにレーダービーム高度は必然的に高くなってしまいうため、上空と地上付近での降雨量の違いの影響を受ける可能性がある。加えて、遠方ではレーダービーム幅が広がり、ビーム充填率の不足による精度低下が懸念される(吉野¹³⁾, Shakti P.C. and Maki¹⁴⁾など)。

以上から、UYレーダー降雨量推定値はレーダーからの距離が遠くなるほど誤差が大きくなる傾向があり、山岳部において特に誤差が大きいことが分かった。これを克服するためにはUYレーダー以外の情報との合成が必要と考えられる。

気象庁全国合成レーダー GPV について、アメダス観測所における ME を、12降雨イベントで平均した値を表2に示す。MEを算出するには気象庁全国合成レーダー GPV, AMeDAS ともに前60分積算降雨量を求めて比較した。表2より、UYレーダーからの距離が30 km 以遠の観測点(山中, 南部)でも ME が0に近く、UYレーダー降

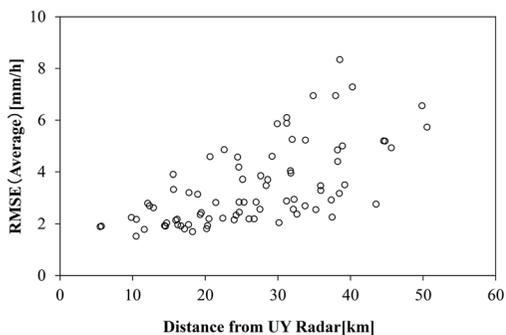


図4 2010年の12降雨イベントに基づくUYレーダーからの距離とRMSEの関係

雨量推定値に見られた降水量の過小評価傾向が気象庁全国合成レーダー GPV では見られないことがわかる。これは図5に示すように、盆地底から観測を行うUYレーダーと比べて、盆地の周囲から観測を行う気象庁のCバンドレーダーを使用して作成される気象庁全国合成レーダー GPV では観測高度が低く抑えられるためと考えられる。

3. 本研究で提案する降雨量合成手法と土砂災害危険度推定手法

3.1 UYレーダー降雨量とCバンドレーダーとの合成手法

2.3節を踏まえて、気象庁全国合成レーダー GPV を合成することによりUYレーダー降雨量推定値における全体的な過小評価傾向の改善を試みる。本研究で提案するUYレーダーと気象庁全国合成レーダー GPV との合成手法の流れを図6に示す。この手法は以下に述べる2つの特徴を持っている。

1つ目の特徴は、XバンドMPレーダーのきめ細かい降雨の相対的な強弱の情報を補正に生かすことにある。2.3節の解析から、UYレーダーは降雨量を全体的に過小評価しているものの、レーダーから遠い地点でも相関係数が高く、相対的

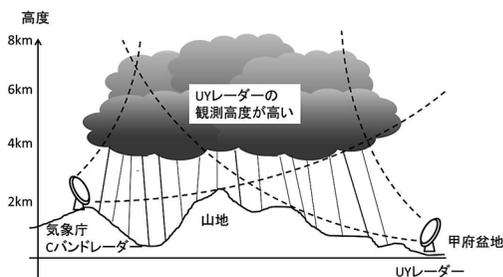


図5 レーダー観測高度についての模式図

表2 2010年の12降雨イベントについて平均した各 AMeDAS 観測所における気象庁全国合成レーダー GPV の平均誤差 (ME)

	韮崎	勝沼	八町山	古関	切石	河口湖	山中	南部
ME 平均値 [mm]	0.4	1.0	0.2	0.6	0.4	1.3	-1.5	-0.6

な降雨の強弱をよく捉えていることが分かった。そこで、UY レーダー、気象庁全国合成レーダー GPV とともに 2.5 km (UY レーダー 25 グリッド) で降雨量を移動平均し、それぞれのグリッドにおける移動平均に対する降雨量比を算出する。

それによって UY レーダーから 30 km 以上離れた地域では、移動平均により表現されるメソβスケールの現象(メソ対流系規模)による降雨量について、気象庁全国合成レーダー GPV の値に入れ替わる。一方、メソγスケールの現象(個々の積乱雲など)でもたらされる、移動平均値に対する降雨量比については UY レーダーの各グリッドの情報が維持される。各グリッドで設定される移動平均の領域で気象庁全国合成レーダー GPV の降雨量移動平均値と UY レーダーの降雨量移動平均値を算出し、各グリッドにおける移動平均値に対する降雨量比を、

$$\begin{aligned} & \text{UY レーダー移動平均値に対する降雨量比} \\ & = \text{各メッシュの UY レーダー降雨量推定値} \\ & \quad / \text{UY レーダー移動平均値} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} & \text{気象庁全国合成レーダー GPV 移動平均値に} \\ & \text{対する降雨量比} \\ & = \text{各メッシュの気象庁全国合成レーダー GPV} \\ & \quad / \text{気象庁全国合成レーダー GPV 移動平均値} \end{aligned} \quad (8)$$

として算出する。

なお、気象庁全国合成レーダー GPV は 1 km

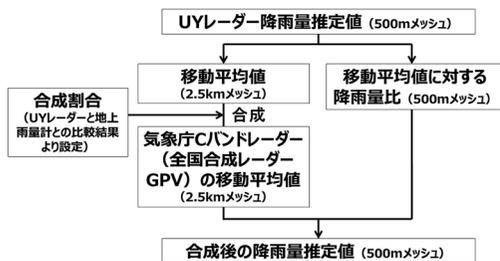


図 6 UY レーダーと気象庁 C バンドレーダー (全国合成レーダー GPV) との合成手法の流れ

メッシュ情報であるため、最近隣法によって UY レーダーと同様の 500 m メッシュに変換し、その値を用いて 2.5 km の移動平均値を作成した。

2 目の特徴は、レーダーからの距離に基づき合成割合を設定し、UY レーダーと気象庁全国合成レーダー GPV の 2.5 km 降雨量移動平均値を重み付け平均して合成することである。

最終的には、それら二つの特徴を併せて

$$\begin{aligned} & \text{合成降雨量} \\ & = \{ \text{合成割合} \\ & \quad \times \text{気象庁全国合成レーダー GPV 移動平均値} \\ & \quad + (1 - \text{合成割合}) \\ & \quad \times \text{UY レーダー移動平均値} \\ & \quad \times \text{UY レーダー移動平均値に対する UY} \\ & \quad \text{レーダーの降雨量比} \end{aligned} \quad (9)$$

として、降雨量の合成を行う。

UY レーダーからの距離 20 km と 30 km を閾値とし、3 つの区間を設定した。UY レーダーからの距離 20 km までは UY レーダーの降雨量推定値を信頼し、30 km 以上の地点では気象庁全国合成レーダー GPV を活用する形で合成を行う。20 km から 30 km は遷移区間として、合成割合を一次関数的に変化させた。

合成割合を面的に表現したのが図 7 である。図中の等高線は標高を表し、カラーシェードは合成割合を表した。なお、地形、住宅などの問題から UY レーダーの観測を行っておらずエコーが空白となっている地域、及び UY レーダーによる降雨量推定値が未定義値であるメッシュに関しては気象庁全国合成レーダー GPV の値をそのまま使用する。

3.2 土砂災害危険度現況推定手法

土砂災害危険度の判定にはスネークライン図を利用する。スネークラインとは、縦軸に短期降雨指標として 60 分間積算降雨量、横軸に長期降雨指標として土壌雨量指数をとり、一定時間ごとにプロットしていったものである。このスネークラインの推移から土砂災害の起こりやすさを判定す

る。

土壌雨量指数とは、降雨の土壌中への貯留量をタンクモデル¹⁵⁾を用いて数値化したものである。本研究では気象庁と同様に3段直列タンクモデルを用い、3段のタンクの水位の合計を用いて土壌雨量指数を計算した^{16,17)}。

また、山梨県県土整備部砂防課と甲府地方気象台は、60分間積算降雨量、土壌雨量指数の2つの指標に基づき、地域ごと(約5kmメッシュ)に土砂災害発生危険基準線(Critical Line:以下CL)を設定し、土砂災害発生危険度の目安として利用している。

山梨県でのCLの設定値は、県全域における災害発生とRBFN(Radial Basis Function Network;放射基底関数ネットワーク)¹⁸⁾出力値の特徴を踏まえて、CL設定対象災害の発生した市町村については市町村内の土砂災害発生下限レベル(RBFN出力値=0.2~0.4)、土砂災害発生事例のない市町村については土砂災害頻発レベル(RBFN出力値=0.2)としている。本研究においても、現在山梨県土砂災害警戒情報システムで用いられているCLの値を使用する。

なお、山梨県においては、2011年3月11日の東

北太平洋沖地震と3月15日の富士宮市付近の地震により、中央市、忍野村、富士河口湖町、山中湖村にて暫定基準(7割)を適用していた。したがって、暫定基準適用対象に該当する市町村内のメッシュに対しては暫定基準を適用した。

土砂災害危険度推定の対象としたのは、2011年台風第15号の通過に伴う山梨県内の土砂災害である。図8に9月21日15時の地上天気図を示す。台風第15号は、9月13日21時に日本の南で発生し、非常に強い勢力で21日14時頃に静岡県浜松市付近に上陸し、その後速度を増して北東へ進み、山梨県、埼玉県、群馬県、茨城県、福島県を通過した。静岡県静岡市葵区梅ヶ原では19日9時から21日24時までの総降雨量554.0mmを観測するなど、東海地方や関東甲信越を中心に断続的に激しい雨となった。この台風の影響で、山梨県では多くのアメダス観測点にて日降雨量200mm以上となっており、特にアメダス山中観測点では日降雨量388.0mmを観測した¹⁹⁾。

山梨県では報告を受けた砂防関連の災害を、「災害報告書」として年度ごとに紙媒体でまとめている。この災害報告書によると、この台風第15号に伴い山梨県内では床下浸水が21棟、床上浸水が6棟、土砂災害が37件発生した²⁰⁾。本研究ではその

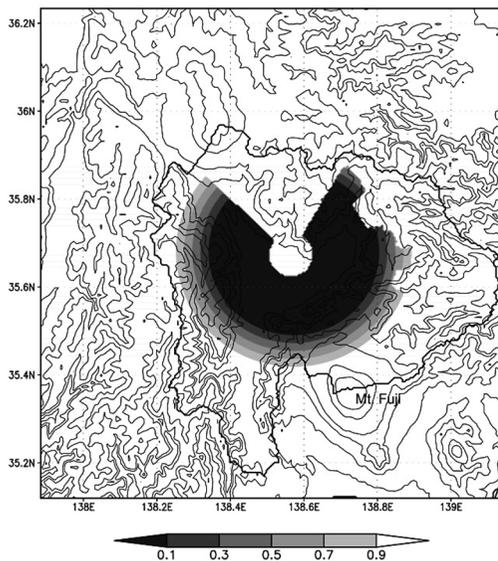


図7 合成割合の空間分布

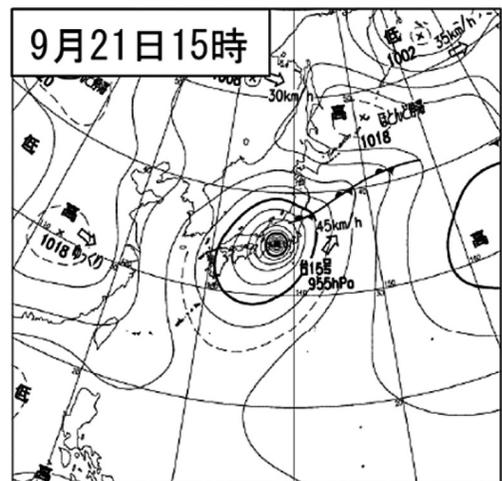


図8 2011年9月21日15時(日本標準時)の地上天気図¹⁹⁾

内「表層崩壊によって引き起こされる土石流及び斜面崩壊」を土砂災害危険度の推定対象とした。

なお、斜面崩壊においては、崩壊土砂量が200 m³以下の小規模過ぎる崩壊は推定対象外とする。これは、国土技術政策総合研究所によるがけ崩れ災害の実態調査結果²¹⁾において、降雨に伴う土砂崩壊1ヶ所あたりの建物被害が1戸以上となる崩壊土砂量がおおよそ200 m³以上であることに基づいている。

表3に対象災害、図9に対象災害の分布を示す。図9中の丸印は土石流を示し、三角印はがけ崩れを示す。

4. 降雨量合成結果とそれを用いた土砂災害危険度現況推定結果の検討

4.1 合成前後の降雨量推定値を比較した検討

合成後の降雨量と地上雨量計による観測値を10分毎の前60分間積算降雨量で比較し、RMSEと相関係数を算出した。使用した地上雨量計は、アメダスと山梨県独自の地上雨量計を合わせた計97地点である。内、UYレーダーからの距離が20 km未満の雨量計は28地点、20 km以上30 km未満の雨量計は28地点、30 km以上の雨量計は41地点であった。合成前のUYレーダー降雨量推定値についても同様にRMSEと相関係数を算出し、

合成後の降雨量でRMSEが0.5 mm以上、相関係数が0.05以上向上している地点を「改善された」、RMSEが0.5 mm以上、相関係数が0.05以上悪化した点を「悪化した」と定義し、「改善された」地点、「悪化した」地点、「それ以外」の地点を集計して精度検証を行った。山梨県が設置している地上雨量計の測定精度が1 mmであることから、今回RMSEの判断基準を0.5 mmとした。比較に用い

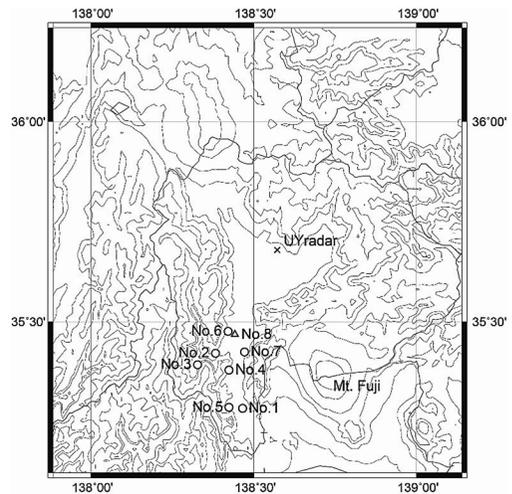


図9 本研究で対象とする対象災害の分布。丸印が土石流、三角印が大規模ながけ崩れを表す。災害番号は表3と対応している。

表3 本研究で対象とする土砂災害²²⁾

No	災害発生場所	発生時刻	現象の種類	被害状況	土砂量 [m ³]	UYレーダーからの距離 [km]	合成割合
1	南巨摩郡南部町内船	17:00	土石流	床上浸水1 床下浸水3	600	46.2	1.0
2	南巨摩郡早川町千須和	18:00	土石流	床上浸水1 床下浸水4	不明	34.3	1.0
3	南巨摩郡早川町雨畑	21:00	土石流	床上浸水1	不明	39.8	1.0
4	南巨摩郡身延町身延	13:00	土石流	なし	50,000	36.6	1.0
5	南巨摩郡南部町成島	15:00	土石流	一部損壊	10,000	46.0	1.0
6	南巨摩郡身延町久成	16:00	土石流	なし	1,000	26.9	0.69
7	南巨摩郡身延町湯の奥	16:00	土石流	なし	3,000	31.1	1.0
8	南巨摩郡身延町	15:00	がけ崩れ	一部損壊	250	36.3	1.0

た事例は2011年9月21日（台風15号に伴う降雨）である。

表4に合成後の降雨量とUYレーダー降雨量推定値とを比較した結果をまとめる。合成後でRMSEが改善された地点が76地点と、悪化した（3地点）及びそれ以外の地点（18地点）より著しく多かった。また、相関係数が改善された地点が35地点であり、悪化した地点（23地点）及びそれ以外の地点（39地点）とほぼ同等であった。特にRMSEについて多くの地点で改善している。

さらに、10分毎の前60分間積算降雨量を用いて算出した地上雨量計の観測値に対するMEについても検討を行った。合成後の降雨量におけるMEからUYレーダー降雨量推定値におけるMEを引いた値の平均値を表5に示す。ただし、UYレーダー降雨量推定値におけるMEによって地上雨量計を区分し、区分ごとに平均値を求めている。表5より、UYレーダー降雨量推定値で過小評価していた地点について、合成後の降雨量ではMEが0に近づき、過小評価傾向が軽減していることがわかる。このような過小評価傾向の改善が、表4におけるRMSEの改善につながったと考えられる。

表6に合成後の降雨量と気象庁全国合成レーダーGPVとを比較した結果をまとめる。合成後はRMSEについて改善された地点が23地点であり、UYレーダー降雨量推定値との比較、及び悪化した地点（26地点）と比べて少ない。これは本

表4 2011年9月21日を対象とした合成後の降雨量とUYレーダー降雨量推定値との比較

	改善された	悪化した	それ以外
RMSE	76地点	3地点	18地点
相関係数	35地点	23地点	39地点

表5 合成後の降雨量におけるMEからUYレーダー降雨量推定値におけるMEを引いた値の平均値。ただし、UYレーダー降雨量推定値におけるMEによって地上雨量計を区分し、区分ごとに平均値を求めている。

UYレーダー降雨量推定値におけるME	0.0～-10.0 mm	-10～-20 mm	-20～-30 mm	-30～-40 mm
地点数	27地点	37地点	13地点	4地点
差の平均値	+3.6mm	+10.6mm	+19.0mm	+26.7mm

研究で提案する合成手法において、2.5 km 移動平均値について、気象庁全国合成レーダーGPVから算出した値に入れ替えているためと考えられる。相関係数については改善した点が26地点と、UYレーダー降雨量推定値との比較と同程度であり、悪化した地点（8地点）よりも多かった。この結果は、本研究で提案した合成手法の特徴である、UYレーダーのきめ細かい降雨の相対的な強弱の情報が補正に活かされていることを示している。

4.2 土砂災害危険度現況推定結果の検討

図10に合成後の降雨量を2011年9月22日0時までの24時間積算した分布を示す。図中の等高線は標高を表し、カラーシェードは24時間積算降雨量を表している。図10より、山梨県南西部と富士山周

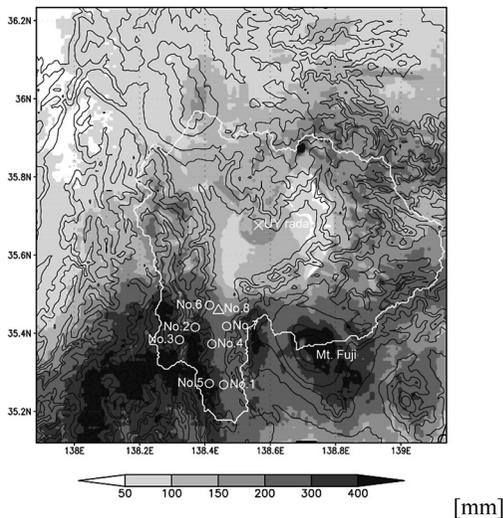


図10 2011年9月22日0時までの合成後の降雨量による24時間積算降雨量。災害番号は表3と対応している。

辺で降雨量が特に多いことが分かる。合成後の降雨量を入力値として、山梨県全域でタンクモデルによる土壌雨量指数の計算を2011年9月21日0時から24時間行った。なお、タンクモデルの初期水位として2011年8月1日から9月20日まで気象庁解析雨量を入力値として行った計算結果を用いた。

山梨県南巨摩郡身延町で土石流が2件発生した16JSTについて、土壌雨量指数計算結果を図11に示す。24時間積算雨量の分布と同様に、土壌雨量指数についても山梨県南西部と富士山周辺で特に高まっていたことが分かる。

山梨県全域の各グリッドで先に計算した土壌雨量指数と合成後の降雨量による60分積算雨量を用いてスネークライン図を作成し、2011年9月21日0時から24時間の土砂災害危険度の判定を行っ

表6 2011年9月21日を対象とした合成後の降雨量と気象庁全国合成レーダー GPV との比較

	改善された	悪化した	それ以外
RMSE	23地点	26地点	47地点
相関係数	22地点	8地点	66地点

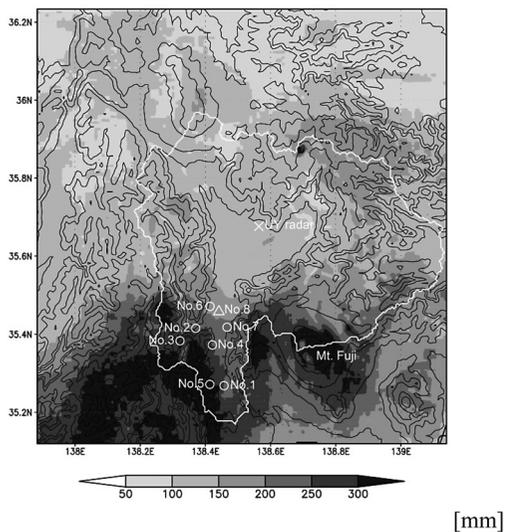


図11 2011年9月21日16JSTの土壌雨量指数計算結果。災害番号は表3と対応している。

た。

図12に災害が集中して発生した14JST～17JSTについて1時間ごとの土砂災害危険度推定結果を示す。対象とする時刻でスネークラインがCLを超過しているセル(危険と判定されたセル)を黒色で、超過していないセルを灰色で示す。白色は山梨県外のため危険度判定を行わないセルを示す。14JSTでは危険と判定された地域は富士山北麓のみであったが、災害No.5に示す土石流が富士山西側の山梨県南端付近で発生した。15JSTには多くの土砂災害が発生した富士山西側の山梨県南端付近でも土砂災害の危険度が高まっている。その後、台風が山梨県を通過した時刻である17JSTにはさらに危険と判定された地域が広がり、これをピークとして危険メッシュ数は徐々に減少した。

さらに対象災害8件の災害発生グリッドにおいて作成したスネークライン図を図13に示す。図13では2011年9月21日0JSTから2011年9月22日0JSTまでの値を10分毎にプロットした。合成後の降雨量を黒の実線(+は災害発生時刻の値)で、気象庁全国合成レーダー GPV を黒の一点鎖線で、UYレーダー降雨量を灰色の太実線で示す。破線はCLを表す。図中の番号は表3の災害No.と対応している。

図13より、合成後の降雨量では全ての対象事例でスネークラインのピーク時にCLの超過が見られた。この内、災害No.5とNo.7については災害発生時刻前にスネークラインがCLを超過した。災害No.1, No.2, No.3では、CLを超過後のピークが災害発生時刻よりもかなり早く、災害No.4, No.6, No.8ではCLを超過後のピークが災害発生時刻よりも遅く現れた。

図13より、合成前のUYレーダーでは8地点全てにおいてCLを超過しておらず、合成後の降雨量で明らかに精度が向上していることがわかる。気象庁全国合成レーダー GPV では8地点すべてでCLを超過していたが、No.3, No.4, No.7では災害発生時刻付近の60分間積算降雨量及び土壌雨量指数が合成後の降雨量と比較して過小評価傾向にある。逆に、No.5, No.6では合成後の降雨量

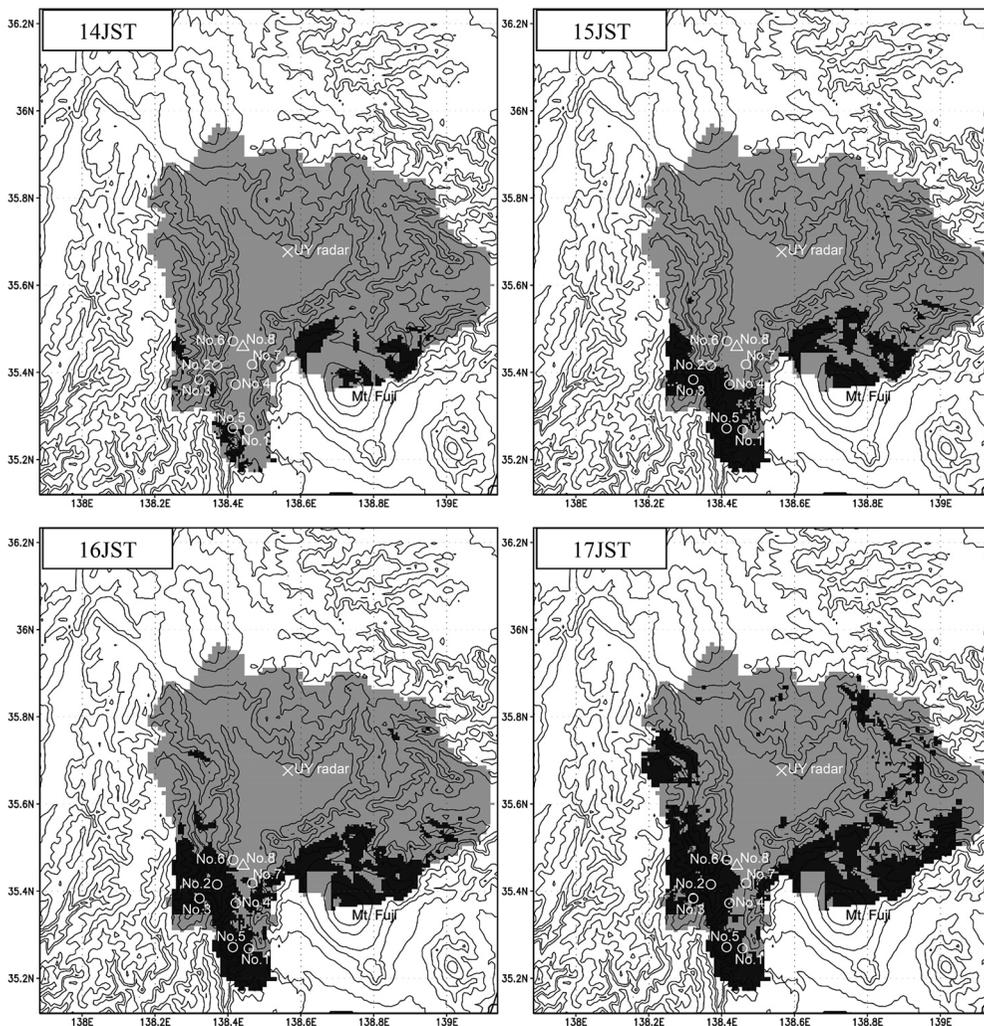


図12 土砂災害危険度判定分布。対象とする時刻でスネークラインがCLを超過しているセル（危険と判定されたセル）を黒色で、超過していないセルを灰色で示す。白色は山梨県外のため危険度判定を行わないセルを示す。災害番号は表3と対応している。

で気象庁全国合成レーダー GPV と比較して若干過小評価傾向にあった。

加えて、2.3節で検討対象とした12降雨イベントの内、富士山北麓（山中湖村）で土石流が発生した2010年9月10日を対象とし、合成後の降雨量を用いて10分毎にプロットしたスネークラインを図14に示す。この日は表3に示す8地点では土砂災害が発生していないが、スネークラインについてもCLを超過しておらず、合成後の降雨量を用

いた危険度判定が空振りとなっていない。

以上より、合成後の降雨量を用いた空間解像度の高い（空間解像度数百mの）土砂災害危険度現況推定が、Cバンドレーダーを用いた（空間解像度1～5kmの）既往手法と同程度の信頼性で可能となったと考えられる。

5. まとめ

本研究では山地域における単一のXバンドMP

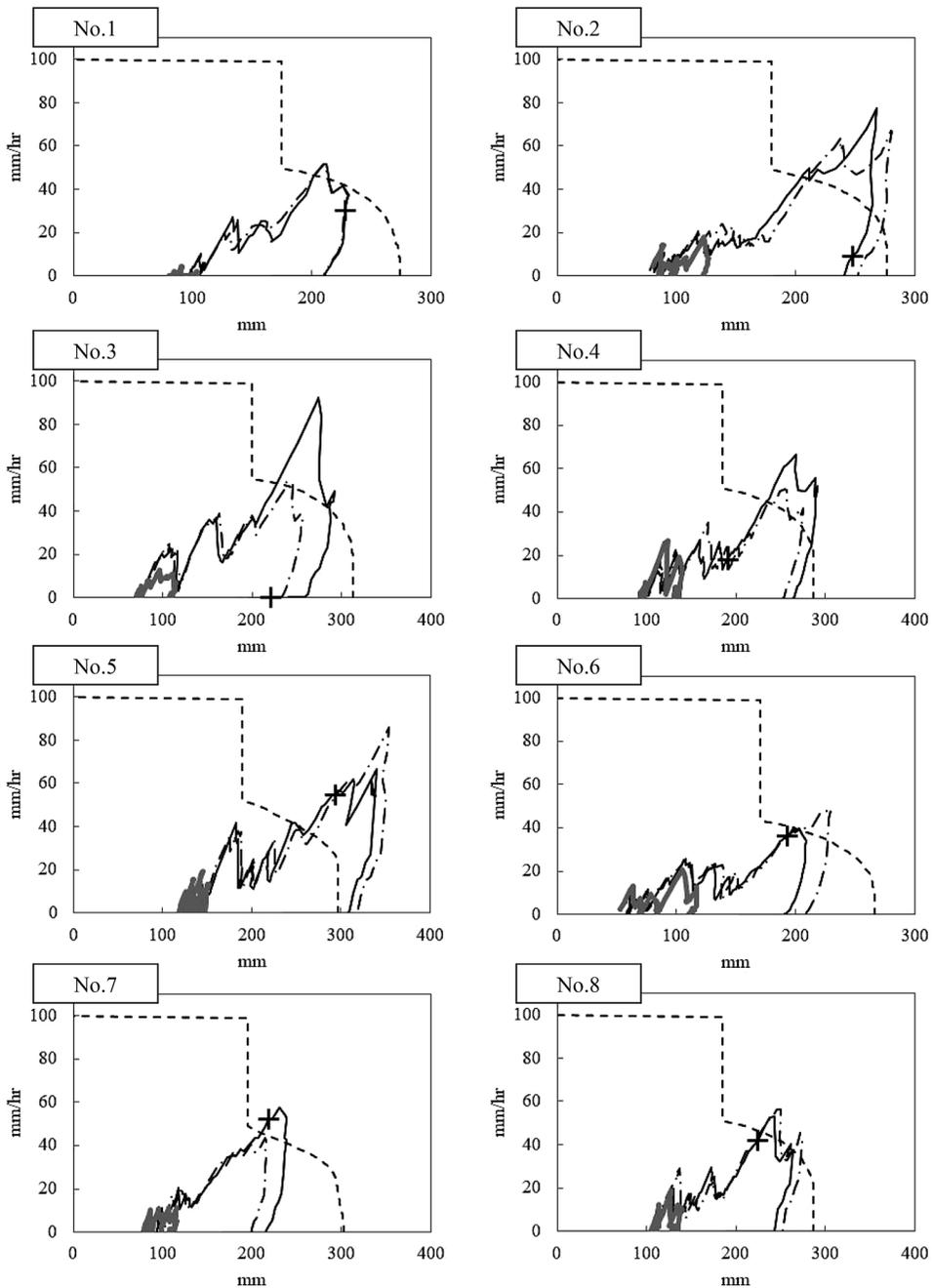


図13 災害発生地点におけるスネークライン図。2011年9月21日における合成後の降雨量を黒の実線 (+は災害発生時刻の値) で、気象庁全国合成レーダー GPV を黒の一点鎖線で、UY レーダー降雨量を灰色の太実線で示す。破線は CL を表す。災害番号は表 3、図 9 と対応している。

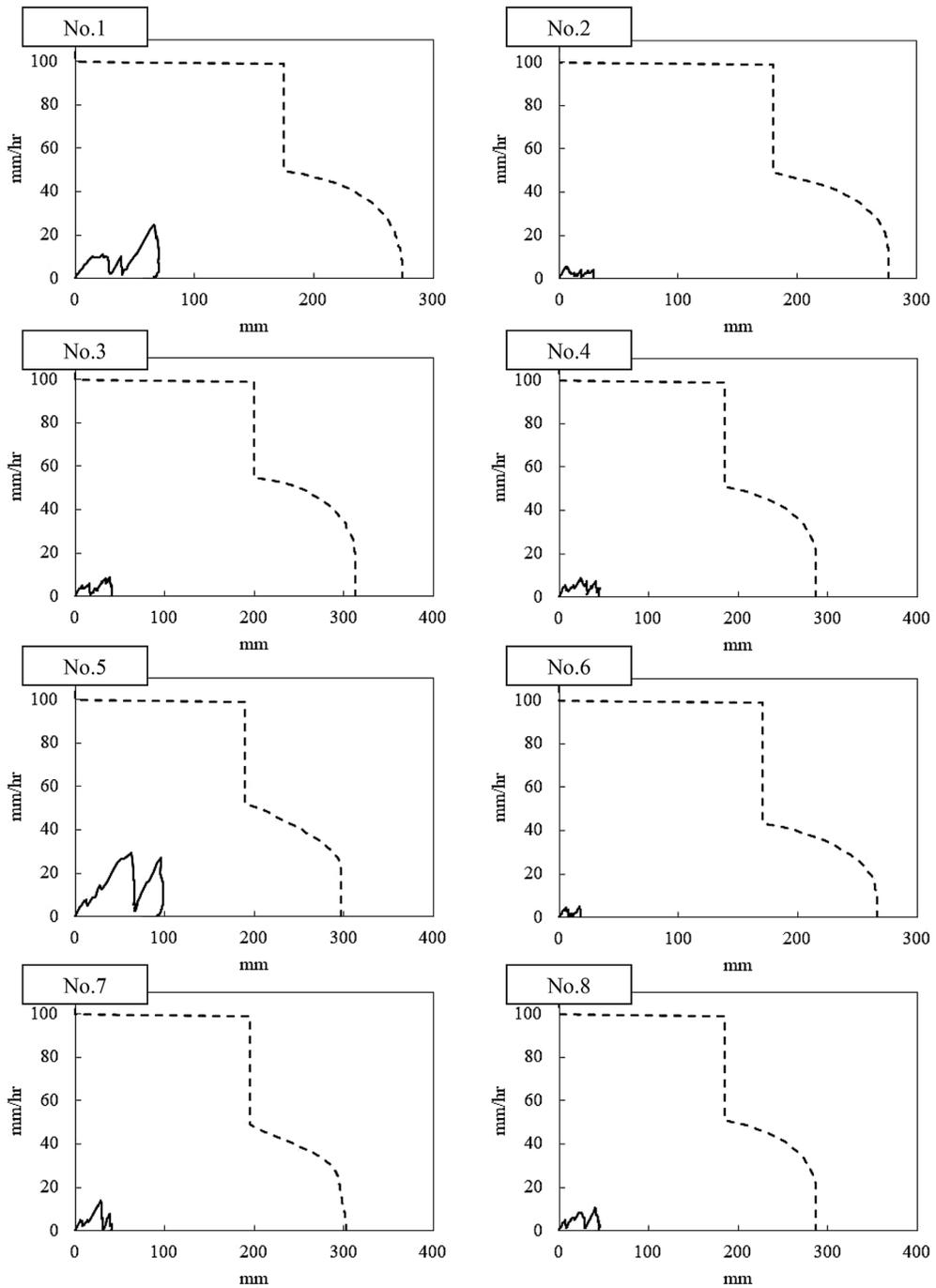


図14 2011年9月21日災害発生地点における2010年9月8日の合成後の降雨量によるスネークライン図。災害番号は表3、図9と対応している。

レーダー降雨量推定値とCバンドレーダーを併用し土砂災害危険度現況推定へ活用する手法を検討した。

本研究ではまず、UYレーダーによる降雨量推定と地上雨量計とを比較した誤差特性分析を行った。その結果、UYレーダーからの距離が遠くなくても相関係数の低下は少ないことから、遠方においても相対的な降雨の強弱は捉えられていると考えられた。一方で、UYレーダー推定値では距離に伴い降雨量推定値を過小評価する傾向が見られた。

そこで本研究では、UYレーダーの移動平均値に対するUYレーダーの降雨量比で表現されるきめ細かい降雨の相対的な強弱を活用し、移動平均値についてはCバンドレーダー情報(気象庁全国合成レーダーGPV)を合成することにより過小評価の傾向を改善する手法を提案した。2011年9月21日の台風に伴う降雨事例に本合成手法を適用し、合成後の降雨量について地上雨量計と比較し精度を検証したところ、合成前のUYレーダー推定値と比較して平均誤差及び平均二乗誤差が大きく改善していることが示された。また、気象庁全国合成レーダーGPVと比較しても相関係数について改善が見られた。

次に、合成後の降雨量を用いて60分間積算降雨量と土壌雨量指数を算出し、CLの情報と合わせて土砂災害危険度現況推定を行う手法を構築した。2011年9月21日台風第15号の事例で土砂災害危険度の現況推定を試みた結果、土砂災害の発生が集中した早川町、南部町、身延町における土壌雨量指数の高まりを表現することができた。また、対象災害とした8事例について、災害発生地点のスネークライン図を作成したところ、全事例でスネークラインのピーク時にはCLを超過し、危険と判定された。しかし、災害発生時刻よりも後にCLを超過する地点もみられた。合成前のUYレーダーでは8地点全てにおいてCLを超過しておらず、合成後の降雨量で明らかに精度が向上した。

一方、気象庁全国合成レーダーGPVでも8地点すべてでCLを超過しており、3地点について気象庁全国合成レーダーGPVで合成後の降雨量

と比較して被害発生時刻付近の60分間積算降雨量及び土壌雨量指数に過小評価傾向が見られた。逆に2地点では合成後の降雨量について気象庁全国合成レーダーGPVと比較して過小評価傾向が見られた。

以上より単一のXバンドMPレーダーから得られたきめ細かい降雨の相対的な強弱を生かしたうえで、移動平均値の過小評価についてはCバンドレーダーの情報で補った降雨量推定手法を構築することができた。また、降雨量推定結果を用いた空間解像度の高い(空間解像度数百mの)土砂災害危険度現況推定が、Cバンドレーダーを用いた(空間解像度1~5kmの)既往手法と同程度の信頼性で可能となった。

一方土砂災害危険度推定の信頼性向上にあたって、さらなる降雨量推定値の定量的な改善が求められる。Shakti P.C. and Maki⁽⁴⁾が指摘する地形によるレーダービームの遮蔽についても補正が必要か検討を行う必要がある。また、鈴木ら⁽⁴⁾及び渡邊ら⁽²³⁾による山梨県内における降雨観測結果の検討では、層状性降雨や対流性降雨など降雨タイプによって観測精度に差があることが示されており、今後は降雨タイプによる観測精度の違いを考慮した合成手法の検討が必要と考えられる。さらに、土砂災害危険度推定手法についても、降雨流出モデルによる土壌水分量推定⁽²⁴⁾の導入など、さらなる改良が必要と考えられる。また、本研究で提案した手法が、複数のXバンドMPレーダーでカバーすることができない他の地域における土砂災害現況推定へ活用できるか検討していくことも必要である。

謝辞

本研究の実施に当たっては山梨大学大学院医学工学総合教育部鈴木秀輔氏、長谷川健太氏、State Polytechnic of Malang (インドネシア) Ratih Indri Hapsari 博士、神戸大学大学院工学研究科村上豪氏、京都大学 中北英一教授、山口弘誠准教授、山梨大学 舛谷敬一教授、坂本康教授、金子栄廣教授、新藤純子名誉教授、宮沢直季助教、山梨県砂防ボランティア協会 伊藤誠吉氏より多

くのご助言をいただきました。

本事業では山梨県県土整備部砂防課及び甲府地方気象台より土砂災害発生危険基準線データをご提供いただきました。加えて、山梨県県土整備部砂防課からは土砂災害報告についてもご提供いただきました。また、本事業では京都大学生存圏研究所が運営する生存圏データベースによって収集・配布されたデータ (<http://database.rish.kyoto-u.ac.jp>) を利用させていただきました。

さらに、山梨県県土整備部治水課とは山梨河川研究会等を通じ、本システムを流域管理へどのように活用していくべきか積極的な議論を行わせていただきました。

また、本研究は公益財団法人河川財団の河川基金・河川整備基金による助成、及び科研費 基盤研究(C) 15K06230, 若手研究(B) 24760390, 基盤研究(S) 15H05765, 基盤研究(S) 22226010の支援を受けました。また、科学技術人材育成費補助金, 山梨大学グローバルCOEプログラム, 名古屋大学HPC計算科学連携研究プロジェクト, 山梨大学 学内融合研究「地域の発達」からもご支援をいただきました。

ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 山梨県土砂災害警戒情報システム, <http://www3.pref.yamanashi.jp/dosya/warninfo.html>, 2018年2月23日閲覧。
- 2) 五道仁実・内藤正彦・土屋修一：XバンドMPレーダーのネットワーク観測による観測不能領域発生回避の効果, 水文・水資源学会2013年研究発表会要旨集, pp.278-279, 2013.
- 3) 土屋修一・川崎将生・五道仁実：降雨減衰補正と合成雨量作成手法の改良によるXRAIN観測雨量の精度向上, 土木学会論文集B1(水工学), 71(4), pp.I_457-I_462, 2015.
- 4) 鈴木秀輔・大石 哲・佐野哲也：X-バンド二重偏波レーダーを用いた山梨県内における降雨量推定に関する基礎的研究, 水文・水資源学会2010年度研究発表会要旨集, pp.216-217, 2010.
- 5) 村上 豪：降雨量推定精度にレーダーパラメーターが与える影響に関する研究, 神戸大学学士論文, 2011.
- 6) 加藤 敦・真木雅之・岩波 越・三隅良平・前坂 剛：Xバンドマルチパラメータレーダ情報と気象庁レーダ情報を用いた降水ナウキャスト, 水文・水資源学会誌, 22, 5, pp.372-385, 2009.
- 7) 牛山朋来・萬矢敦啓・深見和彦：X-band MPレーダーとC-bandレーダーを併用した降雨推定手法の開発, 土木学会論文集B1, 68, I_349-I_354, 2012.
- 8) 気象庁 技術開発推進本部 豪雨監視・予測技術開発部会 運動学的予測グループ：高解像度降水ナウキャストにおける降水の解析・予測技術について, 測候時報, 81, pp.55-76, 2014.
- 9) Sano, T., Oishi, S.: Activity Report on 2009 of X-band Dual-Polarimetric Doppler Radar of University of Yamanashi, Global COE Program Annual Report 2009: Evolution of Research and Education on Integrated River Basin Management in Asian Region, pp. 157-160, 2009.
- 10) 真木雅之・朴 相郡：高仰角観測時のXバンド偏波レーダ降雨強度推定式, 防災科学技術研究所研究報告, 73, pp.49-57, 2009.
- 11) Maki, M., Park, S.G. and Bringi, V.N.: Effect of Natural Variations in Rain Drop Size Distributions on Rain Rate Estimators of 3 cm Wavelength Polarimetric Radar, J. Meteor. Soc. Japan, 83, pp.871-893, 2005.
- 12) Bringi, V. N., and Chandrasekar, V.: Polarimetric Doppler Weather Radar – Principles and applications, Cambridge University Press, 636 pp., 2001.
- 13) 吉野文雄：レーダ水文学, 森北出版株式会社, 2002.
- 14) Shakti P.C., Maki, M.: Application of a modified digital elevation model method to correct radar reflectivity of X-band dual-polarization radars in mountainous regions, Hydrological Research Letters, 8(2), pp.77-83, 2014.
- 15) 菅原正巳：流出解析法, 共立出版(水文学講座7), 257 p., 1971.
- 16) 込原秀一：土砂災害警戒情報の発表開始について, 気象業務の窓, pp.43-45, 2006.
- 17) 気象庁：土壌雨量指数, 気象庁ホームページ, <http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/bosai/dojoshisu.html>, 2018年1月1日閲覧。
- 18) 倉本和正・鉄賀博己・東 寛和・荒川雅生・中山弘隆・古川浩平：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, 672 (VI-50), pp.117-132, 2001.
- 19) 東京管区気象台: 平成23年台風第15号に関する気象速報, 2011.
- 20) 山梨県国土整備部砂防課: 平成23年度災害報告(台風第15号関係).
- 21) 国土交通省国土技術政策総合研究所: 国土技術政策総合研究所資料 がけ崩れ災害の実態, 国総研資料, 第530号, p.203, 2009.
- 22) 山梨県国土整備部砂防課・国際航業株式会社: 平成23年度 土砂災害情報相互通報システム整備事業費 土砂災害警戒情報システム等検討業務委託報告書, 2012.
- 23) 渡邊彩花・相馬一義・末次忠司・佐野哲也・大石 哲・柿澤一弘・石平 博: 山岳域における Xバンド MP レーダーの定量的活用に向けた地上雨量計との比較解析, 水文・水資源学会2013年研究発表会要旨集, pp.116-117, 2013.
- 24) 三隅良平・小口 高・真木雅之・岩波 越: 分布型流出モデルを用いた表層崩壊危険域のリアルタイム予測, 自然災害科学, 23-3, pp.415-432, 2004.
- (投稿受理:平成30年3月10日
訂正稿受理:平成30年9月19日)

要 旨

本研究では, 土砂災害が多発する一方で単一の Xバンド MP レーダー (UY レーダー) でしか観測できない山地域が広い山梨県を対象に, Xバンド MP レーダーと Cバンドレーダーを併用した空間解像度の細かい土砂災害危険度推定手法を構築する。UY レーダーによる降水量推定値と AMeDAS の雨量計による観測値を比較したところ, レーダーサイトから20~30 km よりも遠方では推定値において過小評価傾向が見られたが, 相関係数については高く, 降水の相対的な強弱についてはよく一致していた。それに基づき, UY レーダーによる降水量推定値について2.5 km 移動平均値と移動平均に対する降雨量比を求め, 2.5 km 移動平均値について Cバンドレーダー (気象庁全国合成レーダー GPV) と合成する手法を提案した。合成前後の降水量について雨量計による観測値と比較したところ, 過小評価傾向が合成後に大きく改善した。さらに, 2011年9月21日台風第15号を対象に合成後の降水量を用いて60分間積算降雨量と土壌雨量指数 (3段タンクモデルの水位の合計) を算出し, 土砂災害発生基準線と併用して土砂災害危険度推定を行った。その結果, 対象とした8つの土砂災害すべてにおいてスネークラインのピーク時には CL を超過し危険と判定された。