

土砂災害に対するリアルタイムハザードシステム 構築への取り組み

CHALLENGE FOR DEVELOPING A REAL-TIME HAZARD SYSTEM TO FORECAST SEDIMENT-RELATED DISASTERS

鳥居 宣之¹・沖村 孝²・鏡原 聖史³・窪田 安打⁴・笠原 拓造⁵

Nobuyuki TORII, Takashi OKIMURA, Satoshi KAGAMIHARA,

Yasu'uchi KUBOTA and Takuzo KASAHARA

¹神戸市立工業高等専門学校 都市工学科 (〒651-2194 兵庫県神戸市西区学園東町 8-3)

E-mail: torii@kobe-kosen.ac.jp

²一般財団法人 建設工学研究所 (〒657-0011 兵庫県神戸市灘区鶴甲 1-3-10)

E-mail: okimura@kensetsuk.or.jp

³大日本ダイヤコンサルタント株式会社 神戸支店 (〒651-0085 兵庫県神戸市中央区八幡通 3-2-5)

E-mail: kagamihara_satoshi@dcne.co.jp

⁴応用地質株式会社 関西事務所 (〒532-0021 大阪府大阪市淀川区田川北 2-4-66)

E-mail: kubota-yasuuchi@oyonet.oyo.co.jp

⁵国際航業株式会社 西日本国土環境保全部 (〒532-0003 大阪府大阪市淀川区宮原 4-5-41)

E-mail: takuzo_kasahara@kk-grp.jp

Key Words: surface failure, infinite slope stability analysis, warning and evacuation

1. はじめに

兵庫県と(一財)建設工学研究所は、警戒避難活動に資するため、共同で土砂災害警戒区域毎の危険度をリアルタイムで予測する「箇所別土砂災害危険度予測システム」(以下、「システム」という)の構築を平成22年度(2010年度)より進めている¹⁾(図-1参照)。現在、土砂災害に対する警戒避難情報としては「土砂災害警戒情報」及び「土砂災害警戒情報を補足する情報」が全国的に普及している。これらの情報は、比較的広域の情報(最小単位は約1kmメッシュ)であり、行政の避難指示の判断や報道による注意喚起等に広く利用され、一般への浸透もはかられてきている。それらに対し、本システムは「あなたの家の裏の斜面・溪流が危ない」というピンポイントの情報であり、住民が避難行動を意思決定する際に利用する情報と位置づけられる。本論文は、(一財)建設工学研究所が

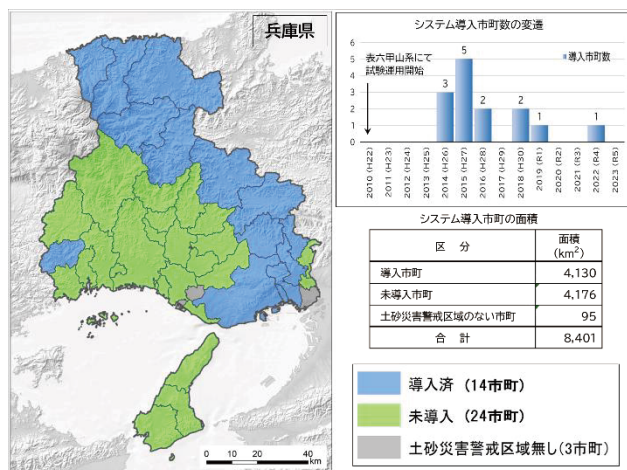


図-1 システムの導入状況(2024年時点)

主催するリアルタイムハザードワーキングに筆者らが参画し、これまでの検証で抽出された課題やその対応について検討した結果を紹介するものである。

2. システムの概要

土砂災害警戒情報の作成に用いる基準 (CL) は、崩壊の発生・非発生で分類して発生条件を求める統計的な手法であるのに対し、本システムは、数値地形モデルを用いた斜面安定解析による力学的な手法で発生条件を求めるのが特徴である。

(1) システムの提供情報 (画面)

10m セルと土砂災害警戒区域 (急傾斜地の崩壊および土石流) 毎の危険度を、実況で危険 (赤色) と1時間後に危険 (橙色)、2時間後に危険 (黄色) の情報として約 1/10,000~1/25,000 の地形図や航空写真に重ねて表示する (図-2 参照)。また、小学校区等の避難単位等で危険度を集約した情報等、市町の要望に応じてカスタマイズしている。なお、画面の更新間隔は10分である。

(2) 危険度予測モデル

このシステムは、図-3 に示すように沖村ら^{2), 3)}が提案している数値地形モデル (DEM) を用いた表層崩壊危険度予測モデル (以下、「予測モデル」という) を用いている。予測モデルは、表層土の崩壊を対象として10m格子間隔で数値モデル化し、降雨に伴う表土層内の地下水位の上昇を飽和横流れ浸透流解析により求める。水収支の連続の条件として各セルの X 方向の水の増分、Y 方向の水の増分、さらにセル内に降ってきた雨の増分を評価する手法であり、地表面から地下水面までの不飽和浸透流を考慮しない条件でダルシー則により解析する。

次に無限長斜面安定解析では、地下水位の上昇

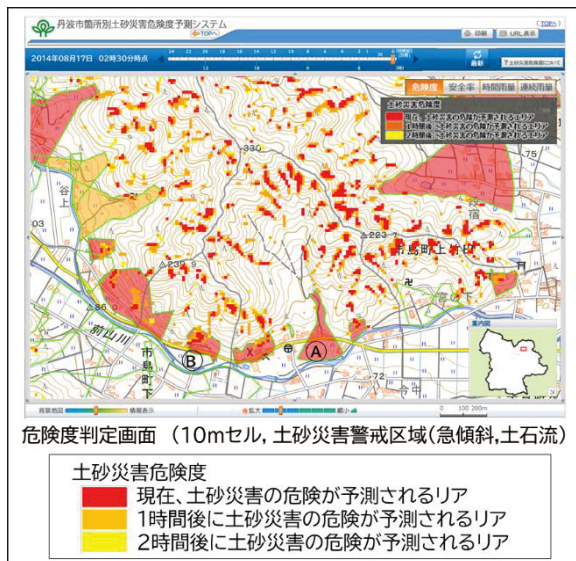


図-2 システム画面例

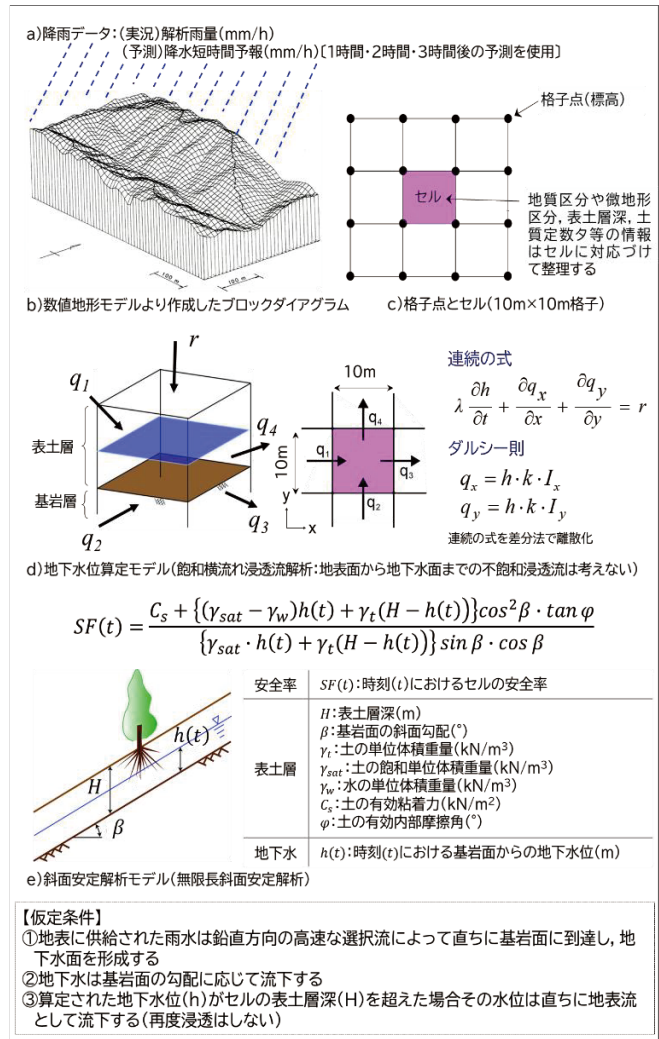


図-3 表層崩壊危険度予測モデルの概念図^{2), 3)}

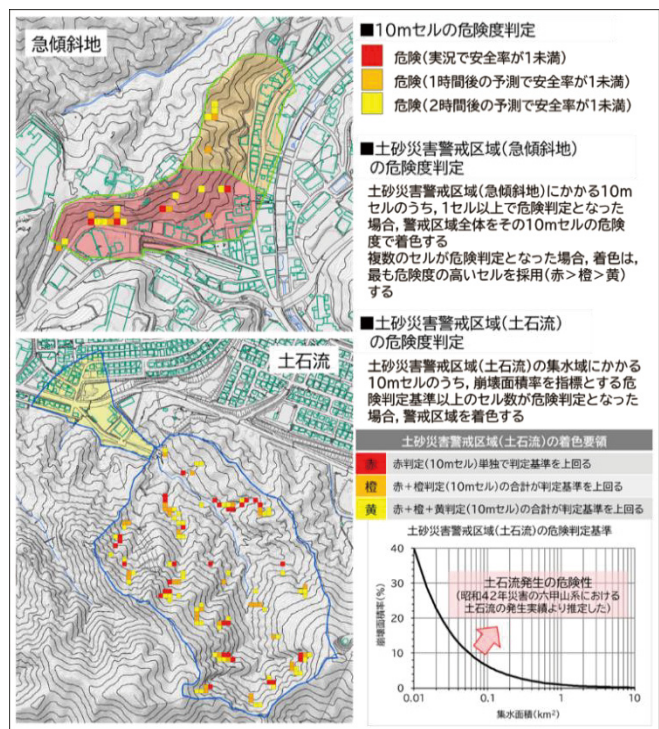


図-4 土砂災害警戒区域の判定方法

に伴う単位体積重量の増加，間隙水圧の上昇（有効応力の低下）を求め，セルの安全率を算定する。

10mセル毎の危険度（安全率1未満を危険判定とする）を用いて，**図-4**の要領で土砂災害警戒区域（急傾斜地，土石流）の危険度を判定する。土石流の判定については，この崩壊面積率を用いる手法の他，土石流の流動機構を反映した地表面流の発生に起因する溪床堆積土砂流動型土石流の判定手法⁴⁾を一部の市町で検討している。

3. システムの精度検証と課題

システムの構築後，リアルタイムでの運用期間中に比較的規模の大きな土砂災害がある程度集中的に発生した事例は未だ経験していないが，瀬戸内側から日本海側まで連続するエリアでシステムの導入・運用が進んだことや過去の豪雨（災害発生降雨）を用いての再現計算による検証，毎年の大雨警報や土砂災害警戒情報が発表される規模の降雨（災害非発生降雨）の経験は蓄積されてきた。

(1) 過去の豪雨（災害発生降雨）の再現検証

平成26年（2014年）8月豪雨に伴い神戸市（主に六甲山系）で発生した崩壊事例について整理した。再現計算による検証は，当時の雨量情報（気象庁解析雨量：1kmメッシュ，30分更新の1時間雨量強度）をシステムに入力しシミュレーションを行うものである。予測結果（安全率<1となる10mセル）と実際の崩壊地（空中写真判読による崩壊地，10×10m以上の規模を対象）を対比させ，**図-5**の要領で精度を評価した。評価結果は**図-6**及び**表-1**，**表-2**に，土砂災害警戒情報の基準（以下，「CL」という）の超過判定と比較できるかたちで整理した。比較結果から，以下の課題を抽出した。

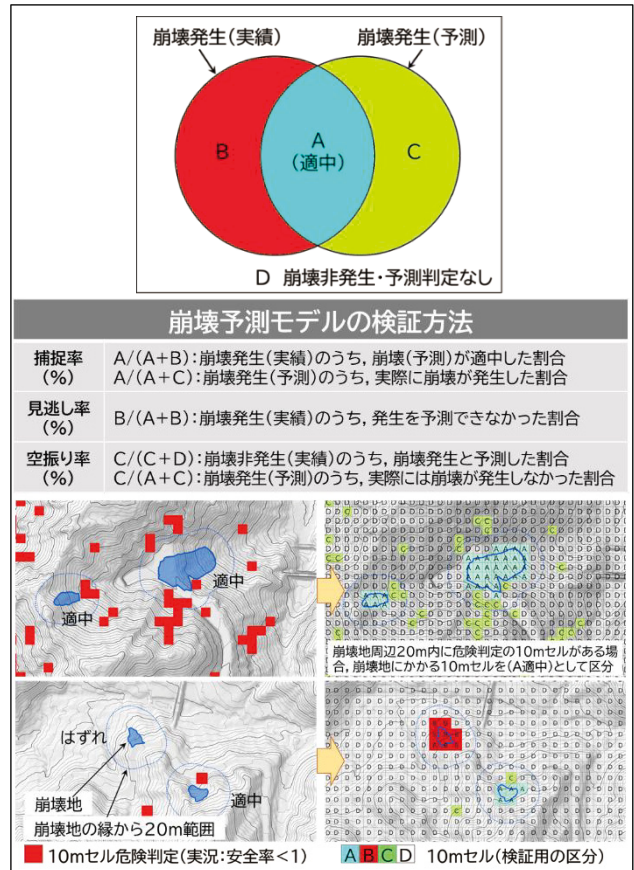


図-5 検証方法（イメージ概念図，A/B/C/Dのセル区分）

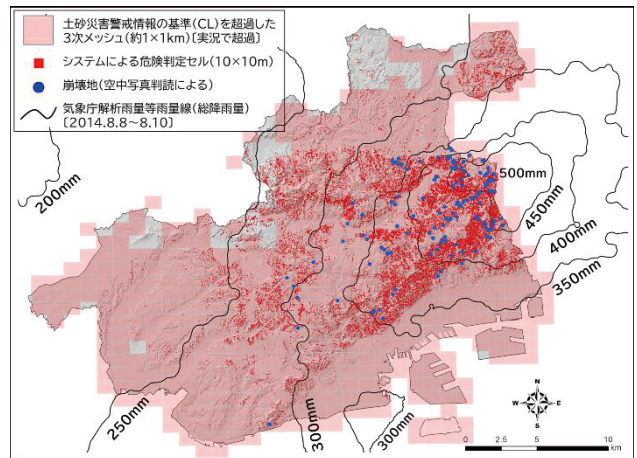


図-6 平成26年(2014年)8月豪雨の判定事例(神戸市)

表-1 平成26年(2014年)8月豪雨の検証事例(神戸市)10mセル単位の評価

判定手法	10mセルの判定数					捕捉率(%)	見逃し率(%)	空振り率(%)
	A	B	C	D	合計			
本システム	786	310	90,821	5,695,267	5,787,184	A/(A+B) 71.7 A/(A+C) 0.9	B/(A+B) 28.3	C/(C+D) 1.6 C/(A+C) 99.1

表-2 平成26年(2014年)8月豪雨の検証事例(神戸市)土砂災害警戒区域(急傾斜地)単位の評価

判定手法	土砂災害警戒区域(急傾斜地)の判定箇所数					捕捉率(%)	見逃し率(%)	空振り率(%)
	A	B	C	D	合計			
土砂災害警戒情報の基準(CL)	5	0	1,772	62	1,839	A/(A+B) 100 A/(A+C) 0.3	B/(A+B) 0	C/(C+D) 96.6 C/(A+C) 99.7
本システム	4	1	320	1,514	1,839	A/(A+B) 80 A/(A+C) 1.2	B/(A+B) 20	C/(C+D) 17.4 C/(A+C) 98.8

見逃し:1箇所 空振り:CLの約5分の1

a) 見逃し判定がある (課題 1)

CLは崩壊地すべてを捕捉 (捕捉率 100%) しているが、システムの捕捉率は 71.7%であった (参考: 今回の 10m セルによる集計に対し、崩壊地の箇所数では捕捉率 68% = $A/(A+B) = 82 \text{箇所} / (82+38 \text{箇所})$ とやや低下する。規模の大きな崩壊の方が小さい崩壊よりも予測しやすいことが理由と考えられる)。

b) 空振り判定が多い (課題 2)

CLと比較し、空振り判定は 5分の1と抑えられている (表-2 参照)。しかし、雨の降り始めにおいて、崩壊非発生段階で危険判定セルが出現している (図-7 参照)。土砂災害警戒情報の発表前に空振り判定が多く出現するのは、運用において信頼性の低下につながる懸念される。

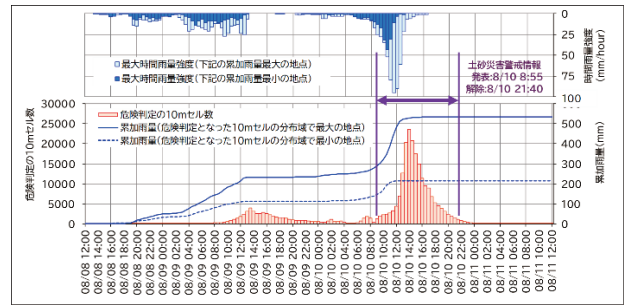


図-7 平成 26 年 (2014 年) 8 月豪雨の検証事例 [危険判定の 10m セル数の時系列 (神戸市)]

(2) 災害非発生降雨の検証

前項の課題 2 について、他地域でも確認できる事象なのか、令和 3 年 (2021 年) 8 月の災害非発生降雨の判定状況を整理した。全 12 システムについて降り始めからの累加雨量が 150mm となる時点の崩壊判定セル数を整理したところ、ある程度空振り判定がみられ、全システム共通の課題であることがわかった (図-12 参照)。また、各地域の比較より以下の課題を抽出した。

a) 空振り判定の出現状況 (システムの精度) に地域差がみられる (課題 3)

特に日本海側や県の中央で空振り判定の多い市町がある。また、参考として過去の豪雨 (災害発生降雨) の再現検証結果 (図-13 参照) をみると、災害非発生降雨ほど顕著ではないが、空振り判定に地域差がみられた。

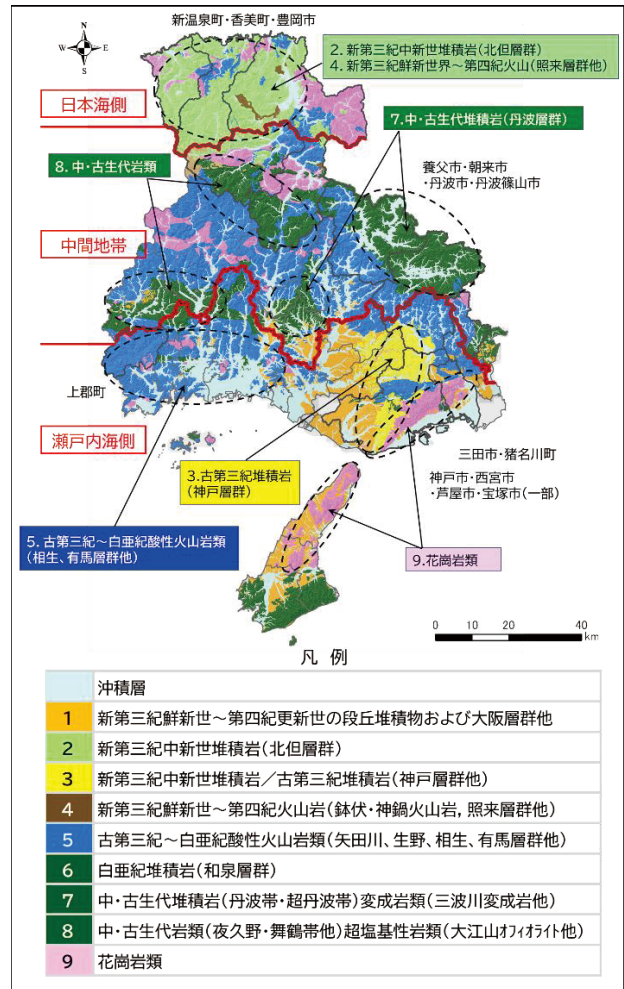


図-8 兵庫県の地質区分 (兵庫県砂防課⁵⁾) に追記

4. 精度向上への取り組み

前章の 3 つの課題に対し、課題 1 については、捕捉できなかった原因が、現地調査等により、①宅地

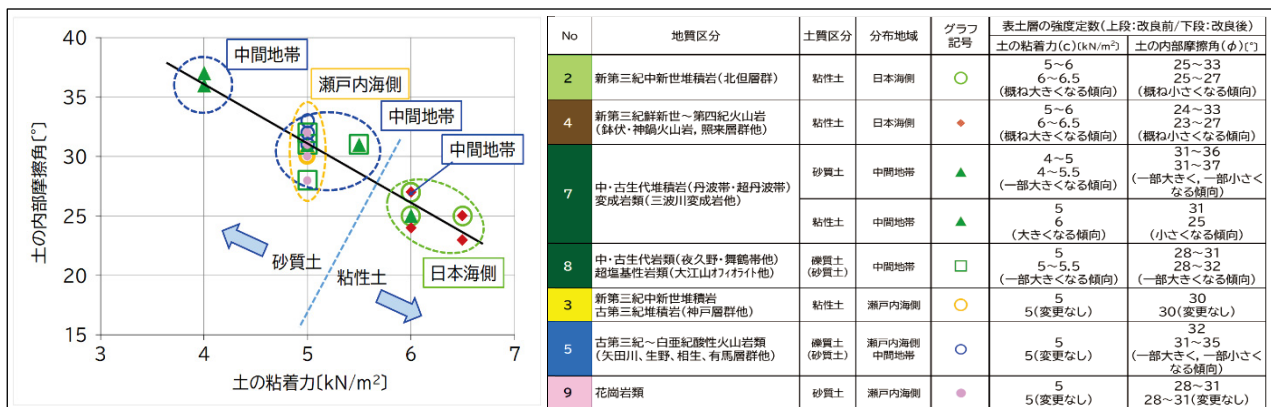


図-9 表土層の強度定数 (c, phi) の関係図 (改良後)

や道路からの排水流入による崩壊（非自然斜面の崩壊）、②溪岸侵食に起因する崩壊、③断層沿いの破碎帯や崖錐堆積物等で生じた崩壊であった。人工的な要因が考えられるものや溪流の洗堀に起因するものについては、当システムの予測モデルでは判定が困難な事象であることから見直しの検討対象外とした。断層沿いの崩壊については、新たな地域分類や地盤条件の設定見直しにより捕捉できる可能性があるため、今後の検討課題とした。今回は、システムの信頼性低下につながる課題2と課題3について、まずは精度の地域差の原因を把握し対策を講じた後、各システムに共通する降雨初期の空振り判定の低減を検討した。

(1) 地盤定数 (c・φ) の見直し

現地調査の結果、日本海側の新第三紀中新世堆積岩（北但層群）、第三紀鮮新世～第四紀火山（照来層群他）、および中・古生代堆積岩（丹波帯）は、瀬戸内海側の砂質土からなる表土層に対し粘性土のものが多く分布することがわかった（各地質の分布は図-8参照）。これより、粘着力 c とそれに対応した内部摩擦角 φ について、粒度試験成果を参考に感度分析による検証計算から最適値を検討した（図-9参照）。

(2) 地下水位の予測パラメータの改良

災害発生降雨の再現計算及び災害非発生降雨の検証結果から、多くの空振り判定が山腹斜面の山腰部（集水地形）で生じることを特定した（図-10参照）。この結果から、図-11の田村⁶⁾による微地形区分に対して、谷頭凹地内の非恒常水路を新たに「上部谷壁水路（5'-1）」と定義した。現地の状況より、当該地域は地下水の流入と流出の繰り返しにより細粒分が流失していると推測し、周辺斜面の表土層より透水性を高く設定した。上部谷壁水路は、1mDEMより作成した詳細な水系網図を用いて地形判読や検証結果から、地形や地質の違いを考慮し、地域ごとに集水面積約1,000～4,000m²を上流端とする範囲を設定した。

(3) 改良の効果

この改良の効果を災害非発生降雨と災害発生降雨による再現計算で確認した。少雨時の空振り判定は、100km²あたり最大561セル（丹波市）あったものが、すべての市町で50セル以下となり、地域差も解消された（図-12参照）。また、災害発生降雨においても、捕捉率（=A/(A+B)）は約70～80%を維持したまま、空振り判定を半減することができた（図-13参照）。この改良により災害発生降雨の空振り判定の地域差についても、上郡町を除いてほぼ同程度となった（上郡町は、近年、大きな出水事例はなく、検証災害とし

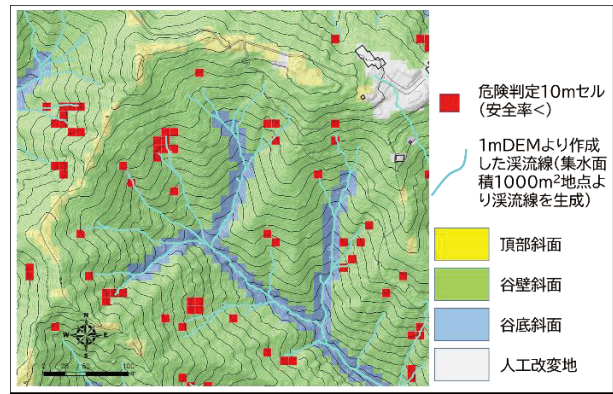


図-10 平成26年(2014年)8月豪雨の判定状況(神戸市)

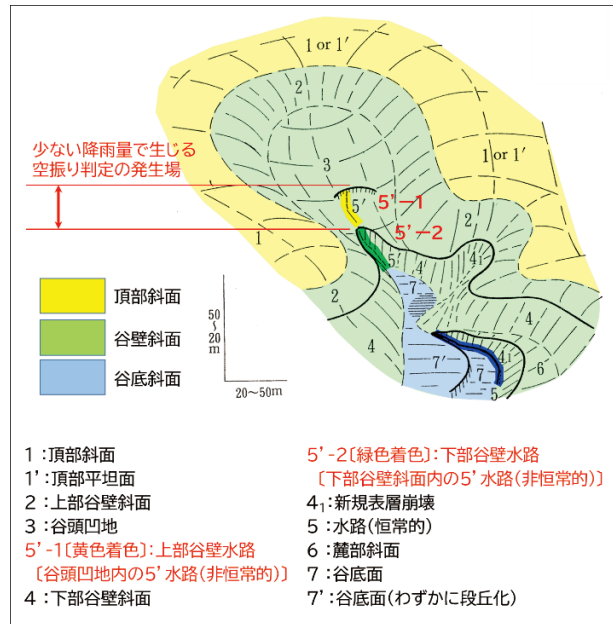


図-11 微地形区分の模式図(田村⁶⁾)に追記

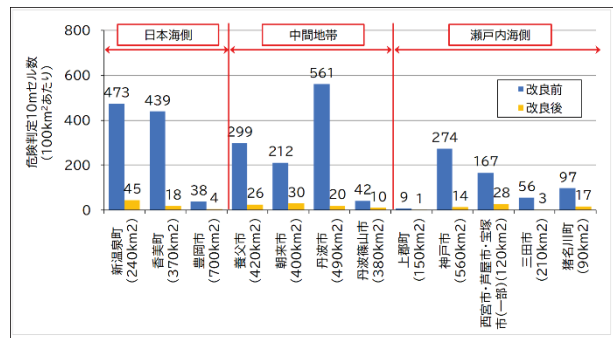


図-12 改良前後の判定数の比較(災害非発生降雨)

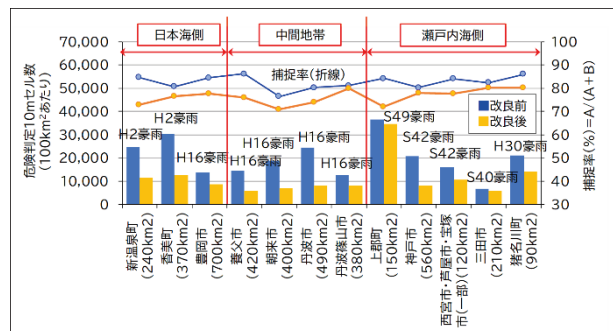


図-13 改良前後の判定の比較(災害発生降雨)

て昭和 49 年の雨を用いており、降雨の強度や分布の時間的変化が適切に検証に反映できていない可能性がある。

5. 今後の取組みについて

今回の一連の改良の取組みにおいては、10m セル単位で地盤強度や地下水の流れを調整することが可能な本システムの利点を生かすことで、空振り判定の低減や精度の地域差の解消ができることが確認できた。しかしながら、本システムは住民の警戒避難に活用できるシステムを目指しており、そのためには、情報の本質的な観点からすると、いわゆる見逃しは許されないこと、運用においてはより一層の空振り判定の低減が必要と考えられる。今後の取組みとして、今回の検証の過程で把握した下記について、引き続き検証、検討を進めていきたい。

(1) 判定時刻・判定継続時間の適性化

降雨の降り始めに出現する空振りに対し、雨が降り止んだ後においても危険判定が長く継続する傾向が確認された。これは、谷頭凹地等の集水地形等において、上流からの地下水が継続して流入するため、一旦、安全率が 1 未満となった以降もしばらくは安全率 1 未満の状態が継続するものである（図-14 参照）。今回の透水係数の調整で、谷頭凹地の地下水の流出が早まり、ある程度は解消されたが、まだ危険判定の長引くセルは多く存在する。今後、この地下水の流入状況により、安全率が 1 未満となった状態でも地下水の流入が減少傾向であれば危険判定を解除するなど、崩壊発生と地下水位の変化速度や安全率の変化速度とが関連付けられれば、安全率のみの判定（一軸評価）よりも確度の高い危険度判定（安全率と水位変化速度等の二軸評価）ができると考えられる。今後も検証を継続し、取り組んでいきたい。

(2) 見逃しの低減

今回の検証で見逃し判定となった断層破碎帯や崖錐堆積物で発生した崩壊については、新たに地形区分を追加し、土質強度や透水係数との検討を進めたい。一方、豪雨時には人工的な要因の考えられるものや流水による侵食等、予測モデルで想定している崩壊現象と発生機構の異なる原因で崩壊するケースがある。これらの災害についても、運用上見逃しとまらないような仕組みの検討を進めたい。例えば、現在、土砂災害警戒区域 1 箇所毎に判定しているが、もう少し大きな判定単位（例えば連続する一連の斜面を判定ユニットとするなど）の検討を行うものである。今回検証した平成 26 年（2014 年）8 月豪雨の神戸市の事例において、危険判定の 10m セルと崩壊までの距離を整理すると、検索半径 50m で 90%以上

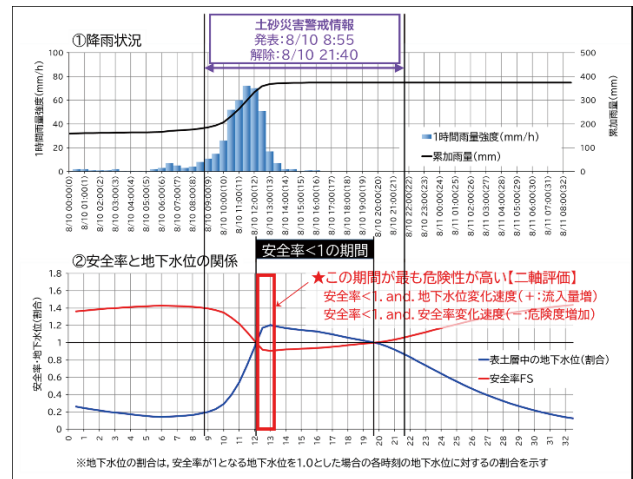


図-14 地下水位と安全率の時間変化
(平成 26 年(2014 年)8 月豪雨、崩壊非発生 10m セル)

の崩壊地を捕捉することがわかった。ただし、見逃しと空振りはトレードオフの関係となるため、空振り判定の一層の低減は、見逃しと同様に今後も取り組んでいく必要がある。

その他の取組みとして、市町ヒアリング等から、例えば、警戒避難解除のための巡視等への活用等、土砂災害警戒情報を補足する情報（CL 判定方式）や気象庁キキクルとの情報のすみ分け、リアルタイム以外の活用として、防災アセスメント調査や避難訓練等のシナリオ作成補助ツール、ハード対策における調査・対策の優先度検討等への活用等のニーズがある。これらの活用に関しても、精度が第一義であると考えられ、今後も予測モデルの精度向上へ取り組んでいきたい。

参考文献

- 1) 沖村孝, 鳥居宣之, 尾崎幸忠, 南部光広, 原口勝則: 豪雨による土砂災害を対象としたリアルタイムハザードシステムの構築, 砂防学会誌, Vol. 63, No. 6, pp. 4-12, 2011.
- 2) 沖村孝, 市川龍平: 数値地形モデルを用いた表層崩壊危険度の予測法, 土木学会論文集, No. 358/III-3, pp. 69-75, 1985.
- 3) 沖村孝, 市川龍平, 藤井郁也: 表土層内浸透水の集水モデルを用いた花崗岩表層崩壊発生位置の予知のための手法, 砂防学会誌, Vol. 37, No. 5, pp. 4-13, 1985.
- 4) 原口勝則, 沖村孝, 鳥居宣之, 鎗水正和, 中川渉, 鏡原聖史: 兵庫県箇所別土砂災害危険度予測システムの活用に向けた取り組みー土石流予測モデルの検証と改良についてー, 令和 3 年度砂防学会研究発表会概要集, P2-060, pp. 599-600, 2021.
- 5) 兵庫県砂防課: 土砂災害防止基礎調査マニュアル(案), 2005.
- 6) 田村俊和: 湿潤温帯丘陵地の地形と土壌, ペドロジスト, 31, pp. 135-146, 1987.

(2024. 5. 31 受付)