

7. レーダー雨量を用いたリアルタイム表層崩壊危険度評価に向けた基礎的検討

Fundamental Study on Real-Time Shallow Landslide Hazard Assessment Using Radar Rainfall Data

○山下隼, 岩田直樹, 勝部浩志 (中電技術コンサルタント), 西山哲 (岡山大学),
大菅崇之 (ベルテクスコーポレーション), 藤木三智成 (国際航業), 今西将文 (ウエスコ)

1. はじめに

近年, 地球温暖化に伴う気候変動の影響により, 我が国における降雨は短時間に集中する傾向を強めており, 記録的な豪雨や線状降水帯の形成による降雨災害が各地で頻発している. 特に, 表層崩壊や土石流などの土砂災害は突発的に発生し, 人的被害やライフラインの寸断をもたらすため, その危険度を的確に評価し, 迅速に警戒・避難情報を発信することが強く求められている. こうした背景の下, レーダー雨量計測技術は大きく進展しており, 近年ではCバンドやXバンドMPレーダーを用いた高解像度かつ高頻度の観測データが整備されつつある. これにより, 局所的な集中豪雨の把握が可能となり, 従来のアメダス等の地上観測点を補完する重要な役割を果たしている.

現在, 砂防分野においては, 気象庁や自治体が発表する大雨警報・土砂災害警戒情報が住民避難や防災対応の基盤となっている. また, 道路管理においても, 豪雨時には道路斜面崩壊の危険度を考慮した通行規制が実施されている. しかし, 現状の運用は降雨実績や経験則に基づくことが多く, リアルタイム性や局所的な降雨強度の反映が十分でない場合がある. このことは, 過大な規制による社会的損失や, 逆に規制の遅れによる被害拡大といった課題につながっている. このため, レーダー雨量データを活用し, リアルタイムに表層崩壊危険度を評価できる手法の構築は, 住民の安全確保や道路ネットワークの信頼性向上に向けて極めて重要である.

そこで本研究では, 無限長斜面モデルに降雨に伴う地下水位変動を組み込み, 斜面の表層崩壊危険度を時系列的に評価する手法を用いた. 対象は岡山県で過去に斜面崩壊が発生した事例とし, DEMや既往調査結果をもとに地盤条件を設定して, レーダー雨量データを入力とし, 斜面の表層崩壊危険度および崩壊発生時刻を面的に評価した. また, 降雨イベントや表層の土層厚などの条件の違いが崩壊危険度評価に及ぼす影響についても整理を行った.

2. 検討手法

降雨に伴う表層崩壊危険度評価は, 無限長斜面モデルにその地点の降雨量と等しい地下水位 (定常状態) を仮定して安定計算を行う方法¹⁾が提案されており, 斜面崩壊の危険箇所をある程度抽出できることが報告されている. 無限長斜面モデルの安全率は次式で計算される (図-1 参照).

$$F_s(t) = \frac{c + (\gamma_d D \cos^2 I - h(t) \gamma_w \cos^2 I) \tan \phi}{\gamma_d D \cos I \sin I} \quad (1)$$

ここで, $F_s(t)$ は安全率であり, $F_s(t) \leq 1$ で崩壊となる. また, c は土の粘着力 [kN/m^2], ϕ は土の内部摩擦角 [$^\circ$], γ_d は土層の単位体積重量 [kN/m^3], γ_w は水の単位体積重量 [kN/m^3], D は土層厚 [m], I は斜面勾配, $h(t)$ は時刻 t における地下水深 [m] を示す.

内田ら²⁾は, 簡易な現地調査による地形, 地質条件などの場の条件と, 流域内の水文仮定を考慮

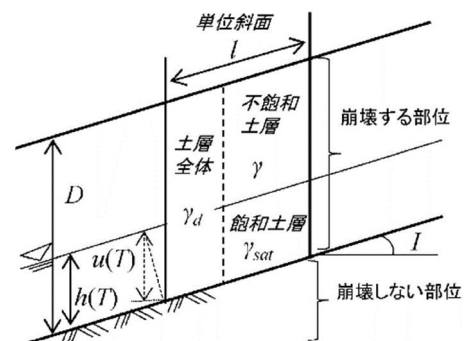


図-1 斜面モデル断面の概念図²⁾

して細かな単位で表層崩壊発生危険度を面的に評価する手法（H-SLIDER 法）を提案している．しかし H-SLIDER 法は，流域内が一定降雨強度条件下で地下水位が定常状態であると仮定したものであり，降雨に伴う地下水位の変化が考慮されていないため崩壊危険度のポテンシャル評価に留まっている．これに対して秋山ら³⁾は，Rosso et al.⁴⁾が提案する一定降雨強度条件下の降雨継続に伴う地下水位の上昇を算定する手法を H-SLIDER 法に取り入れて，降雨データに基づく崩壊危険度と崩壊発生時刻の算定方法（idH-SLIDER 法）を提案している．ここで，不飽和領域を考慮した定常降雨に対する地下水深は，Rosso et al.⁴⁾が提案する次式で算定される．

$$h(t) = \frac{ar_s(t)}{D \sin I} \left[1 - \exp \left(-\frac{1+e}{e-eS_r} \frac{K \sin I}{a} t_s \right) \right] + h_0 \exp \left(-\frac{1+e}{e-eS_r} \frac{K \sin I}{a} t_s \right) \quad (2)$$

ここで， a は単位幅当たりの集水面積[m²/m]， $r_s(t)$ は時刻 t における降雨強度[m/s]， K は透水係数[m/s]， e は間隙比， S_r は飽和度， t_s は継続時間[s]， h_0 は計算初期の地下水位[m]を示す．

式(2)において $h_0=0.0$ とした $h(t)$ を式(1)に代入し， $F_s(t)=1.0$ として継続時間 $t[s]$ に対する崩壊発生限界降雨強度 $R_c(t)[m/s]$ は次式のようになる．

$$R_c(t) = \frac{K_s \sin I \{c(1+e) + \gamma_w D \cos I (G_s + eS_r)(\cos I \tan \phi - \sin I)\}}{a\gamma_w \cos I \{(1+eS_r) \cos I \tan \phi + (e-eS_r) \sin I\} \left[1 - \exp \left(-\frac{1+e}{e-eS_r} \frac{K_s \sin I}{a} t \right) \right]} \quad (3)$$

降雨データに基づく崩壊危険度と崩壊発生時刻の算定には，事前に継続時間 t を 0 から十分に長い時間（本研究では 0～48 時間を 1 時間刻み）に変化させて式(3)により各斜面の崩壊発生限界降雨強度 $R_c(t_n)$ を算定しておく．次に，降雨イベントを対象にある時刻 T_1 から過去 t_n 時間の平均降雨強度 $r(T_1, t_n)$ を， T_1 から過去 t_n 時間前までの累積降雨量を t_n 時間で割って求める．降雨イベントに応じて時刻 T_1 を順次進めて，継続時間を 1～48 時間で 1 時間刻みに順次変化させた t_n 時間平均降雨強度 $r(T_1, t_n)$ と限界降雨強度 $R_c(t_n)$ を逐次比較して，ひとつでも $r(T_1, t_n)$ が $R_c(t)$ を上回った場合に時刻 T_1 で崩壊が発生したと判定する．

3. 対象地点の概要

岡山県で降雨による土石流や斜面崩壊が発生している地点を対象とする．ただし，本検討では現地調査を行っておらず，表層の土層厚や地盤の強度や透水係数等の地盤物性値は既往文献をもとに設定することから，既往文献で数多くの検討がなされている花崗岩地帯のマサ土斜面を対象とした．

岡山県の南部には花崗岩地帯が分布しており，**図-2** に示す岡山県倉敷市～玉野市周辺を対象とした．**図-2** に示す赤丸は過去に土石流災害が発生した地点で，青丸はがけ崩れが発生した地点である．マークの付番，例えば H23-13 は，災害発生年度 H23 と発生場所を組み合わせた番号である．倉敷市南部の沿岸沿いや玉野市では青丸のがけ崩れが主体であるが，倉敷市の水島インターチェンジ（水島 IC）周辺では赤丸の土石流が多数分布している．水島 IC 周辺の土石流の発生状況を見ると，H23 で付番された 2011 年 9 月 1～3 日の台風 12 号通過に伴う豪雨による土砂災害が 8 か所で発生している．一方，2018 年 7 月 5～7 日の活発な梅雨前線による豪雨で堤防の決壊などの甚大な浸水被害や多数の土砂災害などが発生した降雨イベントでは，水島 IC の西側 1 ヶ所でしか発生していない．

そこで，**図-2** の白枠で囲った 2011 年 9 月 1～3 日の豪雨で 3 か所の土石流が発生した倉敷市の斜面を解析領域に選定し，降雨による表層崩壊危険度の評価を行った．

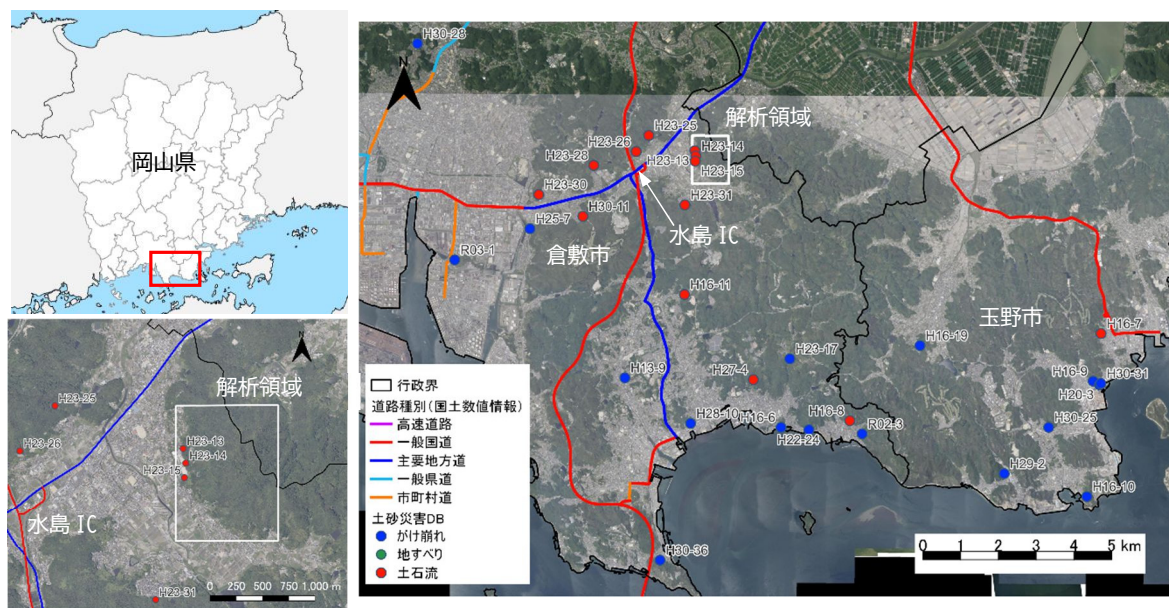


図-2 対象地点の位置図と土砂災害発生状況

4. 検討条件

(1) 降雨条件

対象とした降雨イベントは、土石流が発生した 2011 年 9 月 1 日～3 日と、土石流が発生しなかった 2018 年 7 月 5 日～7 日とした。降雨量データは、1km メッシュ分解能の解析雨量で、30 分ごとに出力されている時間雨量を採用した。それぞれの降雨イベントの時間雨量の変化と累積雨量を図-3 に示す。2011 年 9 月の降雨イベントでは、最大時間雨量は 9 月 3 日 13:00 の 30mm/h、累積雨量は 235mm となっており、解析領域内の地点 H23-13～15 では、9 月 3 日 14:00 に土石流が発生している。一方、2018 年 7 月の降雨イベントは、最大時間雨量は 7 月 6 日 22:00 の 29mm/h、累積雨量は 305mm と 2011 年 9 月の降雨イベントよりも累積雨量は多いが、解析対象領域内で土石流は発生していない。

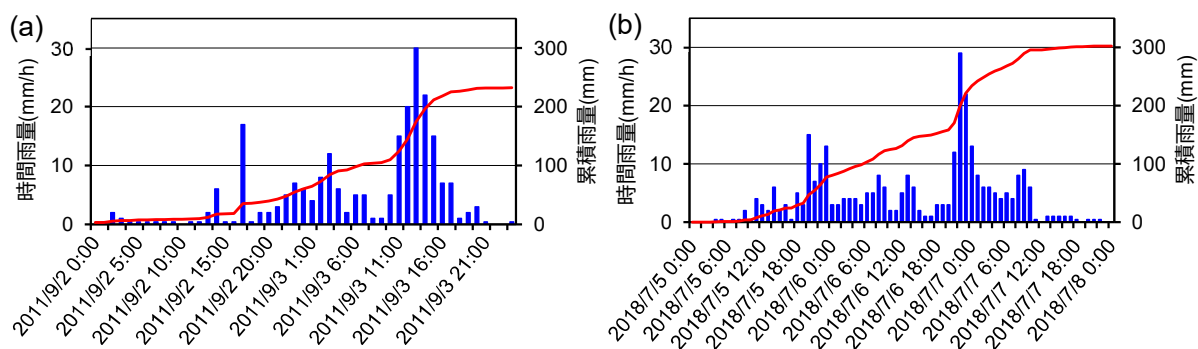


図-3 対象とした降雨イベントの時間雨量の変化と累積雨量，(a) 2011 年 9 月，(b) 2018 年 7 月

(2) 地形および地盤条件

土層厚や地盤定数は、本検討では現地調査を行っていないため、地盤物性値は既往文献^{2),5)}をもとに表-1 に示す値を設定した。土層厚は、沖村ら⁹⁾の事例を参考に図-4 に示す斜面勾配の関数（土層モデル①）を用いて、10m グリッド DEM を用いて D-Infinity Flow Direction 法⁶⁾により算定した地表の斜面勾配より設定する。一方、集水面積は、地表面標高（DEM）ではなく、基岩標高より算定する。このため、10m グリッド DEM から土層厚を引いた基岩標高データを用いて、D-Infinity Flow Direction 法⁶⁾により集水面積の算定を行った。

また、表層の土層厚の違いによる影響を検討するために、土層厚を土層モデル①より 20～30cm 程度薄くしたケース（土層モデル②）と、土層モデル②の斜面勾配 45° 以下の土層厚を非常に薄くしたケース（土層モデル③）を設定した。

表-1 崩壊発生予測に用いた地盤物性

粘着力 c (kN/m ²)	5.0
内部摩擦角 ϕ (°)	30.0
土層の飽和単位体積重量 γ_s (kN/m ³)	19.0
土層の不飽和単位体積重量 γ_t (kN/m ³)	17.0
水の単位体積重量 γ_w (kN/m ³)	9.8
飽和透水係数 K_s (m/s)	0.00056
飽和度 S_r	0.90
間隙比 e	0.90
土粒子比重 G_s	2.70
降雨浸透率	0.65

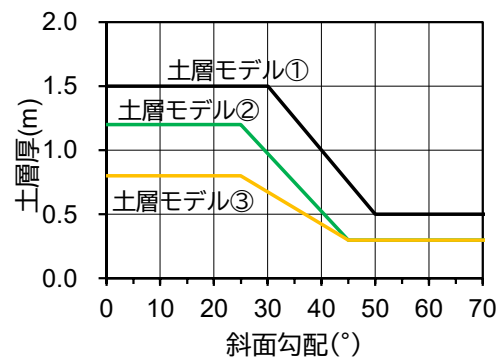


図-4 斜面勾配と土層厚の関係

5. 崩壊発生予測解析結果

(1) 2011 年 9 月降雨イベント時の評価

10m メッシュで分割した斜面メッシュ毎に、時刻 T_1 において 1～48 時間の継続時間 t_n を仮定した平均降雨強度 $r(T_1, t_n)$ と限界降雨強度 $R_c(t_n)$ を比較し、降雨強度比 $IR (=R_c(t_n)/r(T_1, t_n))$ により崩壊危険度を評価する。ここで、降雨強度比がどこかひとつの継続時間でも 1.0 以下になると崩壊が発生したと判断する。

図-5 は最小降雨強度比 IR_{min} が 1.5 以下のメッシュ分布を色分けして示す。 $IR_{min} \leq 1.0$ の赤く着色された崩壊発生箇所は、溪流の 1 次谷や溪床に分布するが、溪流 H23-13～15 の崩壊発生箇所が他の溪流より決して多いわけではない。また、溪流 H23-13～15 の崩壊発生箇所は、流域面積の 4.2～6.0% となっている。

溪流 H23-13 の上流端付近で $IR_{min} \leq 1.0$ となったメッシュについて、式(3)より求まる限界降雨強度 $R_c(t_n)$ と、9 月 3 日 12:00、13:00、14:00、15:30 における過去 t_n 時間の平均降雨強度 $r(T_1, t_n)$ を比較した事例を図-6 に示す。9 月 3 日 12:00 の段階では、いずれの継続時間における $r(12:00, t_n)$ も $R_c(t_n)$ よりも小さいため崩壊が発生していないと評価される。しかし、9 月 3 日 13:00 には、継続時間が 3 時間～4 時間の区間で $r(13:00, t_{3\sim4})$ が $R_c(t_{3\sim4})$ を僅かに超える ($IR_{min} < 1.0$) ことから、崩壊が発生したと判断する。9 月 3 日 14:00 には図-3 に示す時間降雨量のピークを超えることから、継続時間が 1

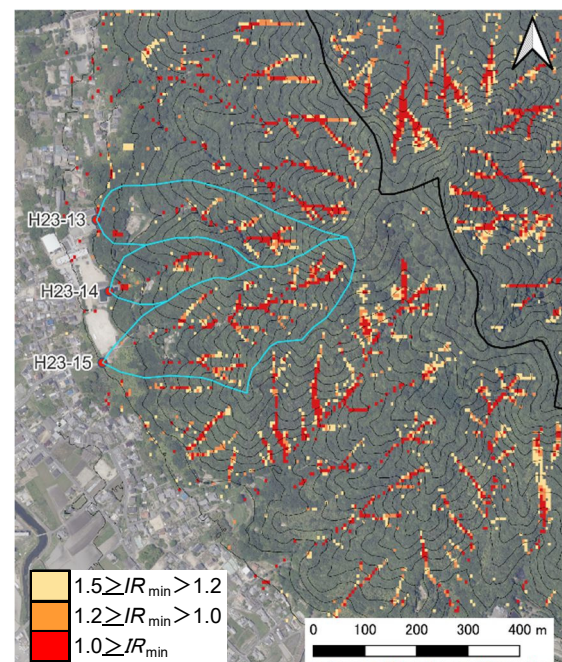


図-5 最小降雨強度比分布 (2011 年 9 月降雨)

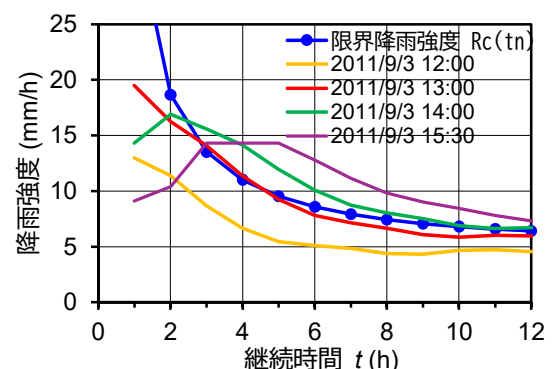


図-6 H23-13 流域の限界降雨強度と平均降雨強度の比較事例

時間の $r(14:00, t_1)$ は低下し始めるが、3 時間を超える継続時間の $r(14:00, t_n)$ は増加し、継続時間が 3 時間～9 時間の区間で $r(14:00, t_{3\sim9})$ が $R_c(t)$ を大きく超える。最終的には、9 月 3 日 15:30 に継続時間 5 時間の箇所では $IR_{\min}=0.67$ となる。

図-7 は、解析領域全体のメッシュについて、初めて $IR_{\min} \leq 1.0$ となった崩壊発生時刻と崩壊発生時の平均強度降雨の継続時間のヒストグラムを示す。崩壊発生時刻は 13:00～13:30 にピークがあり、実際の土石流発生時刻 14:00 と概ね対応した結果となっている。また崩壊発生時の平均強度降雨の継続時間は 3 時間程度が最も多くなっており、図-6 で示したと同様に、継続時間が 3 時間付近から $IR_{\min} \leq 1.0$ になり始めたことが分かる。

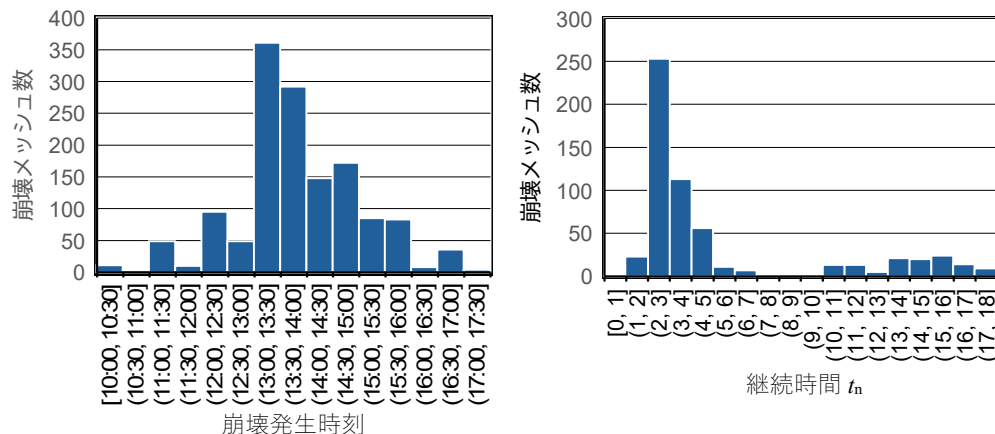


図-7 崩壊発生時刻と崩壊発生時の平均強度降雨の継続時間

(2) 降雨イベントの違いによる評価

図-8 は 2018 年 7 月 5 日～7 日の降雨イベントに対する $IR_{\min} \leq 1.5$ のメッシュ分布を示す。図-5 に示す 2011 年 9 月の降雨イベントと比較すると、 $IR_{\min} \leq 1.0$ の崩壊発生箇所は、同様に溪流の 1 次谷や溪床部に分布するが崩壊箇所は少ない。溪流 H23-13～15 では、崩壊発生箇所は流域面積の 3.2～4.7% であり、2011 年 9 月の降雨イベントより 10～20% 程度少なくなっている。

2 つの降雨イベントの違いによる崩壊面積率の差は顕著ではないが、累積降雨量が大きく、時間雨量が同程度の 2018 年 7 月の降雨イベントで土石流が発生していないことを評価できる可能性を示唆している。また、前述の 3 時間雨量が崩壊発生指標として最も影響が大きいことからわかるように、累積降雨量や時間雨量ではなく、地形・地質状況や降雨パターンの違いによって表層崩壊の発生・非発生が異なり、これを評価できる手法が重要であることを示している。

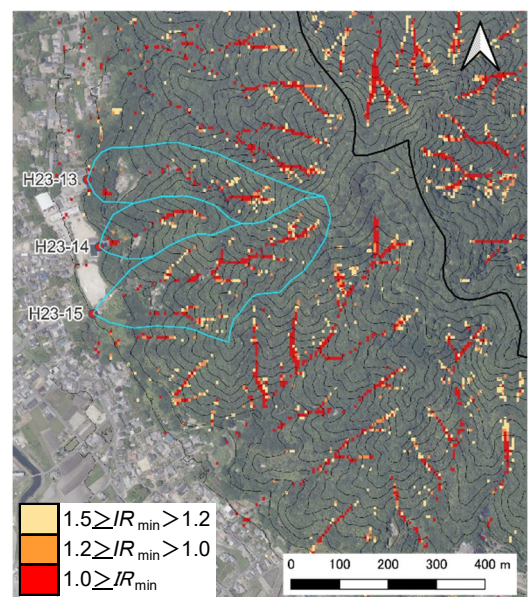


図-8 最小降雨強度比分布 (2018 年 7 月降雨)

(3) 表層の土層厚の違いによる影響検討

表層厚の違いが崩壊発生予測結果に与える影響を検討するために、上記の検討条件よりも土層厚が薄い 2 ケース（土層モデル②，③）について、2011 年 9 月の降雨イベントを対象に崩壊発生予測を行った。図-9 は土層モデル②，③の最小降雨強度比 IR_{\min} が 1.5 以下のメッシュ分布を示す。土層モデル①より 20～30cm 程度土層厚を薄くした土層モデル②では、1 次谷の崩壊箇所が少なく

なり、溪流 H23-13～15 の崩壊発生箇所は、流域面積の 4.2～6.0%から 3.6～4.8%に減少する。

一方、土層モデル②の斜面勾配 40° 以下の土層厚を薄くした土層モデル③の崩壊箇所は、土層厚②とほぼ同様の結果となる。なお、土層モデル②、③とも、崩壊箇所は溪床部が大半を占めている。溪床部は集水面積が大きいと雨水が集まり地下水位が上昇しやすいことや、本検討では、溪床部と 1 次谷斜面部で同一の地盤物性値を設定していることが原因と考えられる。一般的に溪床部は、通常の降雨等の影響により 1 次谷斜面部とは粒度分布が異なり、地盤の強度や透水係数が異なると考えられる。したがって、斜面部と溪床部で異なる地盤物性を設定することができれば、降雨イベントや土層厚の違いによる影響がより明瞭になる可能性があると考えられる。

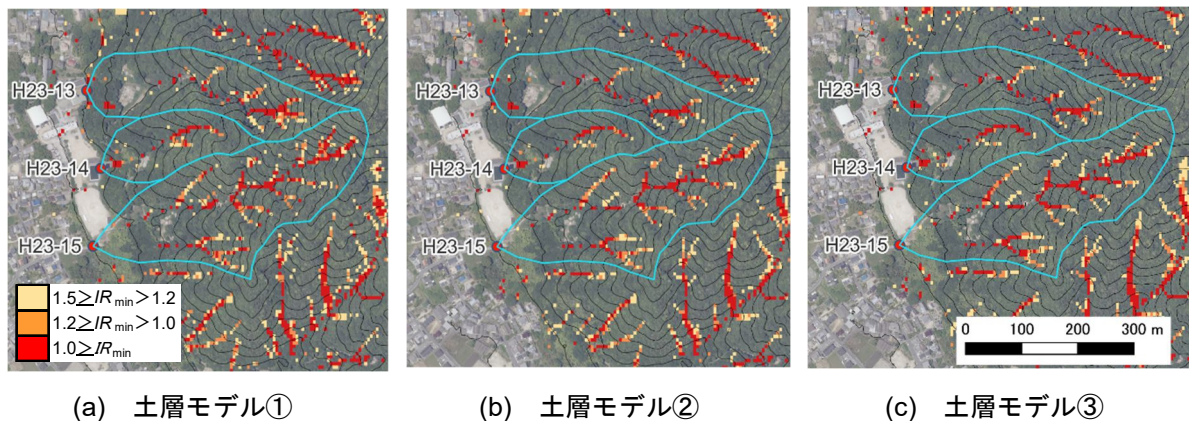


図-9 表層の土層厚の違いによる最小降雨強度比分布の比較 (2011 年 9 月降雨)

6. おわりに

レーダー雨量データと地形・地質条件などの場の条件を用いて、個別斜面の表層崩壊発生危険度および発生時刻を予測するために、岡山県南部のマサ土斜面で発生した土石流災害を対象に idH-SLIDER 法の適用性を検討した。その結果、降雨パターンの違いによる表層崩壊の発生・非発生の違いを評価でき、崩壊発生時刻も算定できる可能性があることが分かった。ただし、本検討は特定地区を対象としたものであることから、地質条件や降雨条件が異なる他の地域への適用性については今後の課題である。また、同一降雨イベントにおける周辺地域との相対的な比較も行っておらず、広範囲の面的な崩壊発生危険度の違いについても今後検討する必要がある。

謝辞：本研究は、岡山大学、中電技術コンサルタント、ベルテクスコーポレーション、国際航業、ウエスコの共同研究として実施した。また本研究の実施にあたり、貴重な資料をいただいた国土交通省中国地方整備局岡山国道事務所の各位に深く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 内田太郎・盛伸行・田村圭司・寺田秀樹・瀧口茂隆・亀江幸二：場の条件設定手法が表層崩壊発生箇所の予測に及ぼす影響，砂防学会誌，Vol.62，No.1，pp.23-31，2009.
- 3) 秋山怜子・木下篤彦・内田太郎・高原晃宙・石塚忠範：簡易な水文モデルを用いた崩壊発生時刻予測手法，砂防学会誌，Vol.68，No.2，pp.3-13，2015.
- 4) Rosso, R., Rulli, M. C. and Vannucchi, G.: A physically based model for the hydrologic control on shallow landsliding, *Water resources research*, Vol. 42, W06410, 2006.
- 5) 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マップシステムの構築，砂防学会誌，Vol.63，No.6，pp.4-12，2011.
- 6) 独立行政法人土木研究所土砂管理研究グループ火山・土石流チーム：表層崩壊に起因する土石流の発生危険度評価マニュアル(案)，土木研究所資料，第 4129 号，pp.24-28，2009.