

SAR 衛星土壌水分データを用いた広域的な斜面危険度のマッピング

徳山工業高等専門学校 学生会員 ○岩田 夏樹
 徳山工業高等専門学校 正会員 荒木 功平

1. はじめに

近年、地球温暖化等の気候変動の影響により大雨の頻度増加が指摘されるようになってきている。年平均土砂災害発生件数は1,106件(昭和57年～令和3年)¹⁾であり、特に、令和3年8月豪雨では33府県にわたり、448件に及ぶ土砂災害が発生し、直近10年の同月における平均土砂災害発生件数(177件)を大幅に上回ることになった。気候変動に伴う大雨の頻度増加に伴い、土砂災害の被害が甚大化し、多くの人的被害につながっている。時々刻々と変化し、不確定性を有する急傾斜地の健全度を適切に把握し・管理し、地域に発信・周知していく手法を構築していくことが強く求められている。これにより、EBPM(証拠に基づく政策立案)が可能になり、減災や避難の迅速化につながることが期待される。

その一方で、昨今では合成開口レーダー(SAR)を搭載した人工衛星(以下、SAR衛星と称する)の発展や活用により、計測機器等を使用しなくても広域的な土壌水分データをweb上で誰でも無料で閲覧・入手することが可能になってきている²⁾。

本研究では、SAR衛星により観測された土壌水分データを用いて、時々刻々と変化していく急斜面地の危険指標(安全率、斜面崩壊確率)を広域的に評価する手法(GISによるマッピング)について研究している。また、GISにより斜面勾配区分図を作成し、斜面崩壊密度分布図との比較をおこない、一考察をおこなう。

2. SAR衛星土壌水分データと降水量、斜面崩壊密度分布と地質

図-1にJAXAが広島県呉市におけるweb上でオープン化している土壌水分データと²⁾降水量(気象庁アメダスデータ³⁾)の推移(令和3年8月豪雨時)を示す。図-1から、日降水量およそ150mmを記録した2021年8月14日の2日後の8月16日において土壌水分が約30%まで増加している。このように、大雨の降った1日後から2日後にかけて土壌水分が顕著な増加を示すことがわかる。

また、図-2に広島県呉市及びその周辺地域における斜面崩壊の密度分布図⁴⁾、図-3に同地域における地質図⁵⁾を示す。図-2と図-3の比較をおこなうと、呉花崗岩が分布している範囲において概ね斜面崩壊密度が大きくなっていることがわかる。

衛星による土壌水分の観測は1～2日でおこなわれるため、未観測期間が存在するが、観測値から土質特性を浸透流解析により逆解析をおこなうことにより、未観測期間の土壌水分データを補完することができると考えられる。

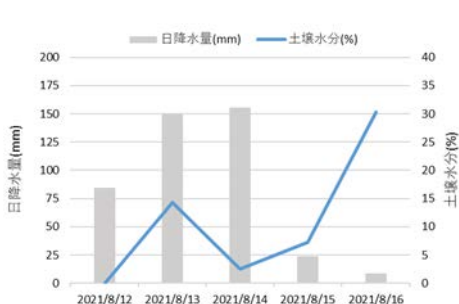
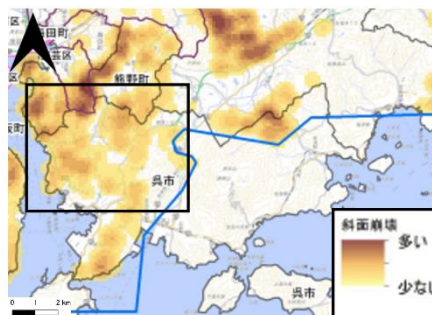
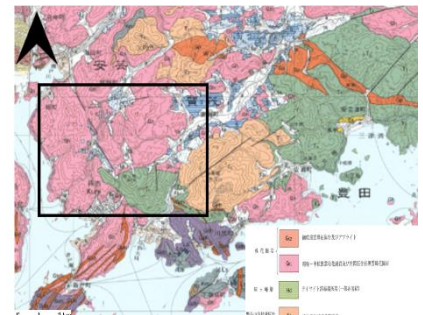


図-1 降水量～土壌水分の推移

図-2 斜面崩壊密度分布⁴⁾図-3 地質図⁵⁾

キーワード SAR, 土壌水分, 斜面崩壊, 崩壊確率, 安全率, GIS

連絡先 〒745-8585 山口県周南市学園台 徳山工業高等専門学校環境建設工学専攻

TEL 083429-6328

3. 斜面勾配の作成および一考察

国土地理院の基盤地図情報⁶⁾より図郭番号513234(図-2, 図-3における黒枠に相当)での斜面勾配区分図(5mメッシュ)をGISにより作成した。その結果を図-4に示す。斜面勾配が30度以上の急傾斜地を着色している。図-4から、この範囲には急傾斜地が多く点在していることがわかる。また、図-2(黒枠内)と比較すると、斜面崩壊密度分布と斜面勾配の大小が必ずしも対応していないことがわかる。対応していない部分は、斜面勾配の大小が混在することによって、崩壊密度が平均的に小さくなっているためと考えられる。

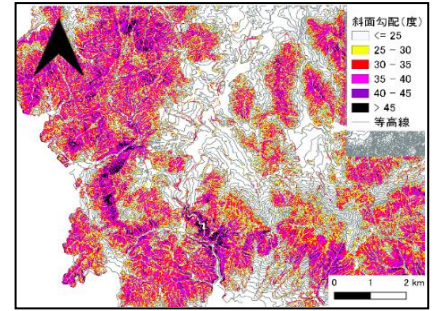


図-4 解析箇所斜面勾配分布図

4. 土壌水分の変化に伴う斜面崩壊危険度の算出方法

松尾⁷⁾の方式を用い、図-5に示すような粘着力 c ~飽和度 S_r 関係を考える。鬼塚⁸⁾や松尾・上野⁹⁾の実験事実によれば、土質によらず粘着力はある飽和度でピーク値(以下、最大粘着力 c_{max})を示す。松尾は最大粘着力における飽和度(以下、変曲飽和度 S_{ri})と最適飽和度 S_{ropt} の差 ΔS_{ropt} について平均粒径 D_{50} と式(1)の強い負の相関があることを明らかにした。種々の土質について初期間隙比 e_0 、最小間隙比 e_{min} と変曲飽和度関係の直線回帰式(2)を導き、最大粘着力は均等係数 U_c を導入して近似的に式(3)で表した。粘着力と最大粘着力の比~変曲飽和度と飽和度の関係を調べ、平均的に見て式(4)の直線関係を見出した。体積含水率 θ (%)と飽和度は式(5)の関係、湿潤単位体積重量 γ_t は乾燥単位体積重量 γ_d 、水の単位体積重量 γ_w を用い式(6)の関係がある。表層すべり型斜面崩壊のように、表層厚さに対してすべり長さが長い崩壊に対しては、図-6のような斜面モデルを対象にした無限斜面法により、斜面安定解析をおこなう。

ここで、斜面安定解析(無限斜面法)¹⁰⁾における安全率 F_s が1となる粘着力 c_f を求め、粘着力を変数 c として、粘着力のばらつきを考慮した正規分布 $f(c)$ (平均 μ_c 、標準偏差 σ_c 式(7))、図-7を導入する。 c が c_f より小さい確率を式(8)から求め崩壊確率 P_f とし、斜面崩壊危険度を評価する。

また、安全率については、不飽和状態における安全率 F_s は式(9)を用い、飽和状態における安全率は式(10)により求め、粘着力 μ_c と湿潤単位体積重量 γ_t の土中水分依存性を評価する。

$$\Delta S_{ropt} = -0.7909 D_{50} + 37.86 \quad (1), \quad S_{ri} = -100e_0 + (S_{ropt} - \Delta S_{ropt} + 100e_{min}) \quad (2),$$

$$c_{max} = 0.103 (0.0086)^{e_0 D_{50}} U_c \quad (3), \quad \mu_c = \{1.0 - 0.018 (S_r - S_{ri})\} c_{max} \quad (4),$$

$$S_r = \{ (1 + e_0) / e_0 \} \theta \quad (5), \quad \gamma_t = \gamma_d + (\theta / 100) \gamma_w \quad (6),$$

$$\sigma_c = 0.182 c_{max} \quad (7), \quad P_f = \int_{-\infty}^{c_f} f(c) dc \quad (8),$$

i) $S_r < 100$ の場合

ii) $S_r = 100$ の場合

$$F_s = \frac{\tau_f}{\tau} = \frac{\mu_c + \gamma_t z \cos^2 i \tan \phi}{\gamma_t z \cos i \sin i} \quad (9), \quad F_s = \frac{\tau_f}{\tau} = \frac{\mu_c + \gamma_{sub} z \cos^2 i \tan \phi}{\gamma_{sat} z \cos i \sin i} \quad (10)$$

ここに、 τ_f : すべりに抵抗するせん断強さ、 τ : すべりを起こそうとするせん断応力、 z : 表層の厚さ(m)、 i : 傾斜角、 ϕ : 内部摩擦角、 γ_{sat} : 飽和単位体積重量 (kN/m³)、 γ_{sub} : 水中単位体積重量 (kN/m³)

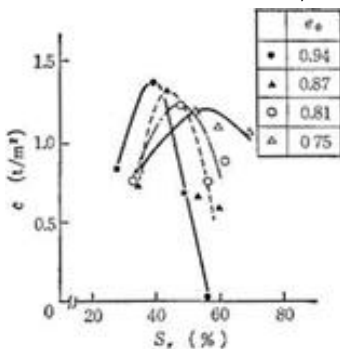


図-5 粘着力~飽和度関係⁷⁾

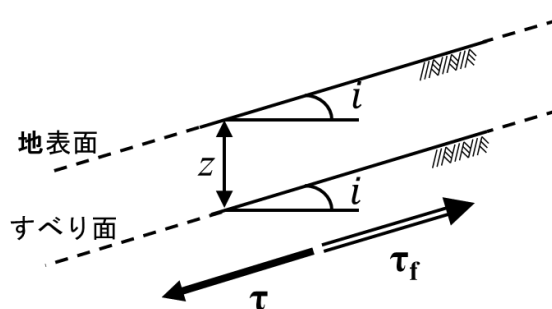


図-6 無限斜面法におけるモデル斜面

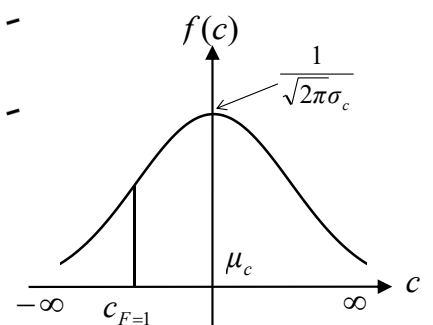


図-7 正規分布

5. 安全率と崩壊確率の比較・考察

斜面勾配の変化に伴う安全率，斜面崩壊確率を斜面勾配 5 度～60 度まで解析をおこなった．図-8,9 に斜面勾配と安全率，斜面崩壊確率の関係を示す．

図-8 の斜面勾配と安全率の関係では，斜面勾配が 0 度～20 度の範囲で安全率が大きく低下している．また，斜面勾配 20 度で安全率が 1 未満を示し，斜面勾配 30 度を超えると収束する傾向を示した．図-9 の斜面勾配と斜面崩壊確率の関係では，斜面勾配 10 度以上になることで斜面崩壊確率が顕著な上昇する傾向を示す．斜面勾配が 30 度以上の急傾斜地においては，安全率より斜面崩壊確率の方がより鋭敏な反応を示すと考える．つまり，急斜面地における斜面の健全度を評価する際には，斜面崩壊確率による評価をおこなうのが適していると考えられる．

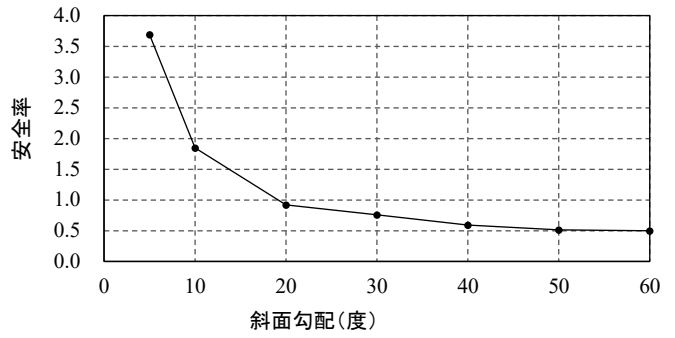


図-8 斜面勾配～安全率関係

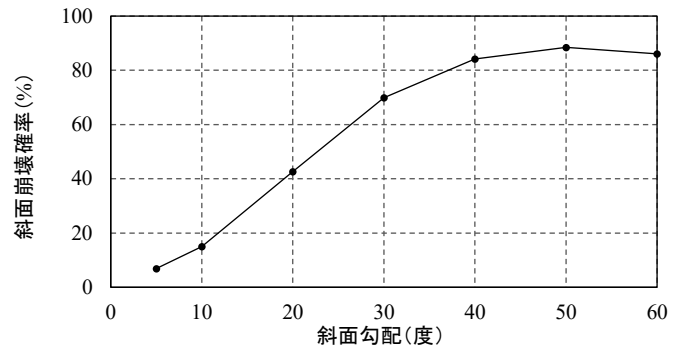


図-9 斜面勾配～斜面崩壊確率関係

6. SAR 衛星土壌水分データを用いた斜面危険度のマッピング

SAR 衛星土壌水分データを活用することで，日々変化していく斜面崩壊危険度(安全率，斜面崩壊確率)を広域的に評価(GIS によりマッピング)することができる．本研究では，まき土のようなシルト質砂を想定し，松尾の代表値⁷⁾(土質パラメータを表-1 に示す)を用いて解析する．降雨に伴う斜面崩壊の多くは表層すべり(表層厚さ平均約 1.1m¹¹⁾の平面すべり)であることが知られている．表層厚さを 1.1m，内部摩擦角 25 度¹²⁾として斜面崩壊危険度を解析する．

表-1 松尾の代表値⁷⁾

土質パラメータ	記号	値
初期間隙比	e_0	0.940
土粒子の密度 (Mg/m ³)	ρ_s	2.62
最適含水比	w_{opt}	15.9
最大乾燥密度 (Mg/m ³)	ρ_{dmax}	1.77
平均粒径 (mm)	D_{50}	0.420
均等係数	U_c	65.0

図-10 に安全率の解析結果，図-11 に崩壊確率の解析結果を示す．図-11 (a) ～ (c) をみると，崩壊確率に大きな変化はみられないことがわかる．これは図-11 (a) ～ (c) において安全率が 1.5 以上の値を示していることと対応していると考えられる．安全率が 1.5 以上の領域では崩壊確率に大きな影響を与えないことがわかる．また一方で，図-10 (d)，図-11 (d) を比較することにより，安全率が 1.5 未満になると崩壊確率が増加を始めることがわかる．特に，安全率が 1 付近の危険域においては崩壊確率が顕著な上昇をみせ，反応が鋭敏になっている．言い換えると，崩壊危険性(安全率 1 付近の危険域での斜面の健全度)を評価する際には，崩壊確率が安全率より適していると考えられることができる．

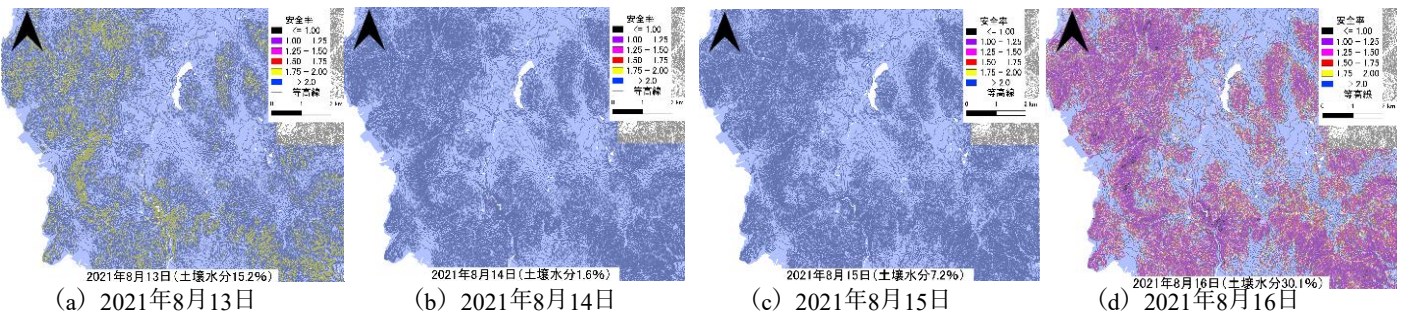


図-10 安全率分布

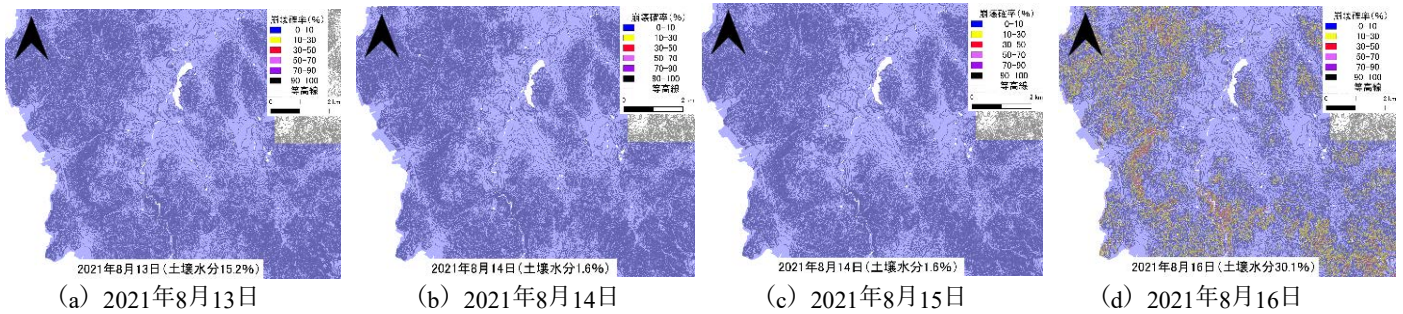


図-11 斜面崩壊確率分布

7. おわりに

本研究では、日々変化する急傾斜地の健全度を広域的に把握・管理（GISによりマッピング）するシステムの構築に向けて、SAR衛星土壌水分データを用い、斜面の危険指標（安全率、崩壊確率）を研究した。

第一に、降水量とSAR衛星により観測された土壌水分の推移について令和3年8月豪雨時のデータを用いて検討した。斜面崩壊密度分布図と斜面勾配分布図の比較をすることで、斜面崩壊密度と斜面勾配の関連性について考察した。

第二に、SAR衛星土壌水分データと松尾の代表値⁷⁾を用いて、斜面の健全度をGISによりマッピング・評価をおこない、斜面崩壊確率による評価が安全率1付近の危険域で鋭敏な反応を示していることがわかった。また、斜面勾配と安全率、斜面崩壊確率の関係性についても解析をおこなうことで、斜面勾配30度以上の急斜面地においては、斜面崩壊確率の方が安全率より鋭敏な反応を示すことができると考える。

今後、SAR衛星の未観測期間の土壌水分データを浸透流解析等で補完する手法が開発されれば、時間単位での危険指標の評価が可能になると考えられる。また、天気予報等による降水量の予測から土壌水分の変化を予測し、斜面崩壊確率を求め、斜面崩壊の発生時刻・発生規模を予知する手法を確立していく必要性も高まってくると思われる。

謝辞：本研究はJSPS科研費21K04263、中国建設弘済会技術開発支援事業、徳山高専テクノ・アカデミア事業（研究シーズブラッシュアップ）の助成を受けました。また、徳山工業高等専門学校の上俊二特命教授、桑嶋啓治准教授、福田靖技術長等関係各位にご指導いただきました。ここに深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省：令和3年の土砂災害，<https://www.mlit.go.jp/river/sabo/jirei/r3dosha/r3doshasaigai.pdf>，（2023年3月26日閲覧）
- 2) JAXA：Jaxa's Public-health Monitor and Analysis Platform，<https://www.jpmap-jaxa.jp/jpmap/jp/>，（2023年3月26日閲覧）
- 3) 国土交通省：気象庁 過去の気象データ，<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>，（2023年3月26日閲覧）
- 4) 広島大学：平成30年7月豪雨による広島県の斜面崩壊分布図（第一報），
http://www.ajg.or.jp/disaster/files/files/201807_report001.pdf，（2023年3月26日閲覧）
- 5) 産総研：地質図 Navi，<https://gbank.gsj.jp/geonavi/>，（2023年3月26日閲覧）
- 6) 国土地理院：地理院地図，<https://www.gsi.go.jp/>，（2023年3月26日閲覧）
- 7) 松尾稔：地盤工学—信頼性設計の理念と実際—，技報堂出版株式会社，pp.232-235，1984。
- 8) 鬼塚克忠：締固めた不飽和土の間ゲキ圧と力学的性状に関する実験的研究，九州大学学位申請論文，1973。
- 9) 松尾稔，上野誠：斜面崩壊防止のための信頼性設計に関する研究，土木学会報告集，No.276，pp.77-87，1978。
- 10) 浅田穂乃果，荒木功平：土中水分連動型斜面崩壊危険指標の開発と地理的評価に関する一考察，第11回土砂災害に関するシンポジウム論文集，pp65-70，2022。
- 11) 小山内信智，富田陽子，秋山一弥，松下智祥：かけ崩れ災害の実態，国土技術政策総合研究所資料第530号，p75，2009。
- 12) 山口県周南土木建築事務所：平成22年度土砂災害警戒区域等に係る基礎調査業務委託第5工区（周南市久米）報告書，pp.1_1 - 4_4，2011。