

非破壊型土中水分深度分布計測装置開発と 斜面危険度評価

荒木 功平¹

¹徳山工業高等専門学校 土木建築工学科

地球温暖化等の大規模な気候変動に伴う大雨や短時間強雨の頻発化が指摘されるようになり久しい。また、それに伴う土砂災害の頻発化、激甚化のリスク増加も懸念されている。

本研究では、第1に、土中水分量のリアルタイム測定によって土砂災害を予測する装置の開発を目指している。第2に、山口県内で土砂災害の発生件数が多い岩国市において雨の降り方と災害発生件数の関係性に注目している。そして、人工衛星により観測された土壌水分データを用いて斜面の崩壊危険度についてGISによって広域的に評価を行っている。

キーワード：アンテナ，Sパラメータ，土中水分量，比誘電率，マイクロ波，崩壊確率

1. はじめに

近年、地球温暖化等の気候変動による大雨の頻度増加が指摘されている。それに伴い、大雨を起因とする土砂災害が全国各地で頻発している。平成24年～令和3年における全国の年平均土砂災害発生件数は1,450件であり、平成14年～平成23年の発生件数の1,105件と比較して約1.3倍の増加をみせている¹⁾。気候変動の影響に伴い、土砂災害の頻発化と激甚化が顕著になっている。時々刻々と変化し、不確実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。そのためには、広範囲の土中水分量をリアルタイムで確認できる必要がある。近年JAXAを中心として、人工衛星により観測された広域的な土壌水分データを無料で閲覧・入手することが可能になりつつある²⁾。

本研究では、第一に、土中水分量のリアルタイム測定によって土砂災害を予測する装置の開発を目指している。土を層として分割し、それぞれの層の比誘電率を変化させることによる、様々な土中水分の分布における解析についてまとめる。解析結果として得られる「周波数ごとのSパラメータの土中水分量による変化」を考察する。第二に、山口県岩国市において雨の降り方と土砂災害の発生件数の関係について一考察を行っている。また、人工衛星による土壌水分データを用いることで、時々刻々と変化していく斜面の崩壊危険度を広域的に評価する手法（GISによるマッピング）について研究する。

2. 土中水分深度分布計測装置に関する実験的研究

従来の土中水分計測器には、「測定できる範囲が限定されること」、「測定をするための準備、測定自体に時間がかかること」といったデメリットがある。

そのため現在、設置が容易で、広範囲・リアルタイムで測定が可能な、土中水分量の計測から土砂災害の発生を予測し、被害を縮小させることを目的とした「マイクロ波を用いた土中水分深度分布計測装置」の開発に取り組んでいる。マイクロ波を用いた土中水分計測の先行研究として、虫明、仲江川らのマイクロ波による表層に絞った土壌水分計測の研究³⁾などがある。「土中水分深度分布計測装置」は、送受信のアンテナから、土中に対して放射する「マイクロ波」を利用して、土中の水分量による反射波の変化を読み取ることで、土中の水分量を計測する装置である。周波数を変化させて、マイクロ波の放射形を調整することで、正確で広範囲な測定を実現する。

(1) 実験方法

アンテナの設計・解析には、Keysight Technologies 社製電磁界シミュレーターソフト「EMPro」を用いた。アンテナの形状は、背面同軸給電方式のパッチアンテナを採用する（図-1(a)）。設計するアンテナにおけるプリント基板の特性パラメータを図-1(b)に示す。

また、解析を行う土の範囲を有限とし、200×200×H500 (mm)とした。土の水分量の変化からSパラメータ・放射波の形状の変化を解析するため、土を高さ100 mm 毎に分割し、それぞれの比誘電率を調整することで様々なケースの水分量における解析を行う。今回は、乾燥した土の比誘電率を5、水分を含んだ湿潤土を50として、2の

5乗 (=32) 通りの解析を行い、周波数の変化に伴う Sパラメータの推移を評価する。周波数帯域は、0 GHz～10 GHzで0.2 GHz毎の51ポイントで解析する。

(2) 実験結果・考察

図-2(a)に全層が乾燥した土のケース 1 通り、図-2(b)に地上から最も近い湿潤土が 5 層目のケース 1 通り、図-2(c)に同じく 4 層目の場合のケース 2 通り、図-2(d)3 層目の場合のケース 4 通り、図-2(e)に同じく 2 層目の場合のケース 8 通りのうち 4 通り、図-2(f)に同じく 1 層目の場合のケース 16通りのうち4通りの Sパラメータの推移を示す。

図-2 から、複数のケースがある 2 層目～4 層目の解析においては約 5 GHz 以降で、1 層目の解析においては約 6 GHz 以降で Sパラメータの推移が重なっていることが分かる。(c)~(f)を比較して、各層の重なっている部分の Sパラメータの推移にも違いが出るのがわかった。このことから土中の水分量の分布は、マイクロ波の周波数を変化させることにより得られる、Sパラメータの推移で確認できることがわかった。

また、全層乾燥している場合と 2 層目～5 層目の約 1.5 GHz までの推移はほとんど同じであり、1 層目だけ異なる推移になった。この結果は、マイクロ波を放射するパッチ部分に地面が接触していることで、パッチ部分のインピーダンスが変化したことが原因であると考えられる。本研究の最終形態である装置は、土中にマイクロ波を放射することで水分量を計測する。その点から、地表によるマイクロ波の反射を避けるために地表面に接触する形で解析を行った。しかし、実際には地表から雨がしみこんでいき、次第に地中へと流れていく。そうすると、降雨の初期段階で(f)のような結果が得られるが、そこで変化したパッチのインピーダンスがその後の解析に影響を及ぼす可能性がある。アンテナの設置位置を地表からはなす形をとれば、パッチ部分のインピーダンスの変化を防ぐことができ、他のケースの推移・ピーク時の周波数をとることができる。と考える。

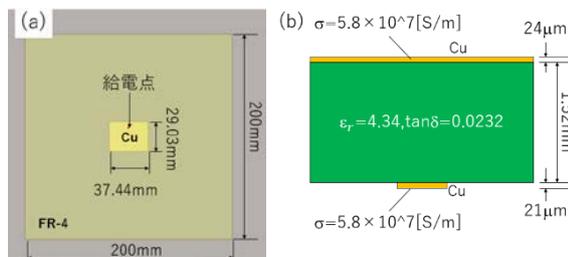


図-1. (a)アンテナの設計図
(b)基板パラメータ

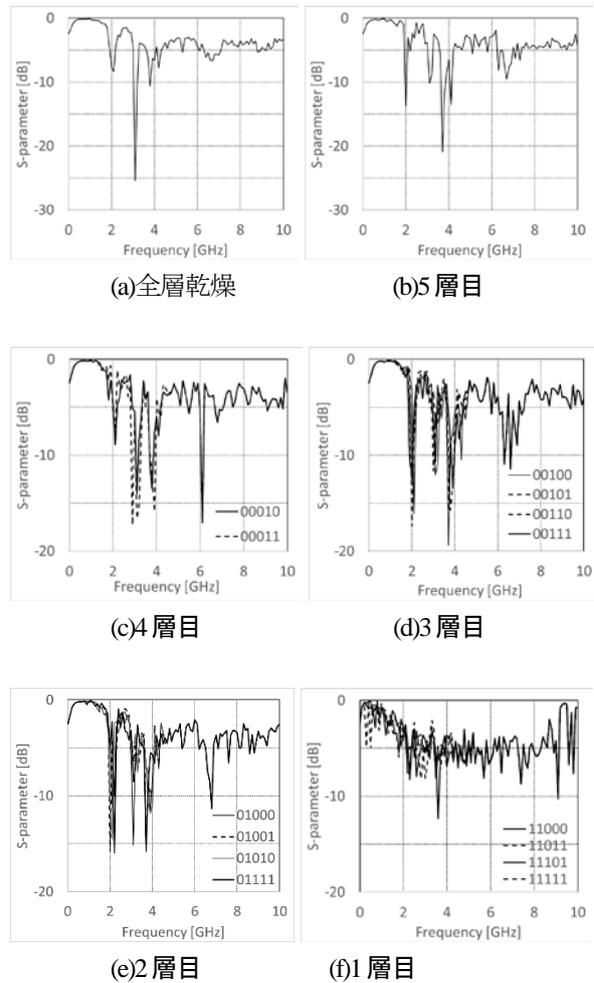


図-2. 周波数変化に伴う Sパラメータの推移

3. 斜面危険度評価に関する研究

図-3に地域発信型土砂災害予知システムの構想を示す。予知フェーズとして、天気予報から地中の土中水分変動予知を行い、それを用いることで斜面崩壊を予知していくことを目指している。予知フェーズに対応して、それぞれの検証フェーズを設けることで解析の妥当性を評価していく。

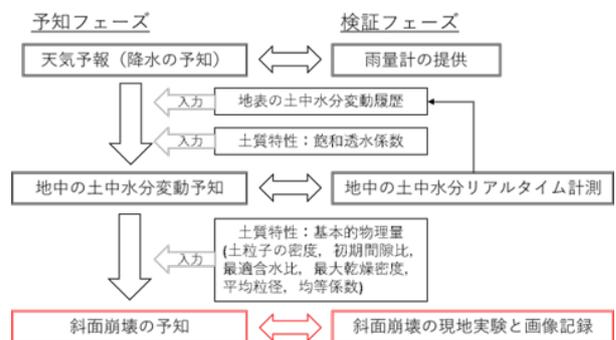


図-3. 地域発信型土砂災害予知システムの構想

本研究では、入力データである土壌水分を、人工衛星によって観測された土壌水分データ²⁾を用いる。土壌水分に対応した広域的な斜面の危険度（斜面崩壊危険度）をGISによりマッピングすることで評価する。また、本研究で使用する土壌水分データを観測している人工衛星の仕様等については表-1に示す通りである

表-1 人工衛星の仕様

測定	センサ	単位	格子サイズ
夜間	AMSR-E AMSR-2	Vol%	約 25km

4. 土壌水分の変動に伴う斜面崩壊危険度の算出

鬼塚⁴⁾や松尾・上野⁵⁾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⁶⁾は最大粘着力における飽和度（以下、変曲飽和度 S_i ）と最適飽和度 S_{opt} の差 ΔS_{opt} 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。

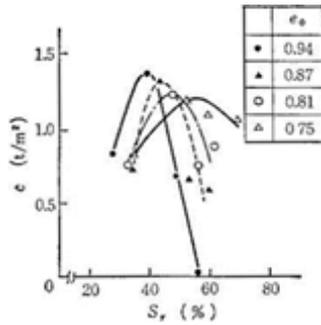


図-4. 粘着力～飽和度関係の例（シルト質砂）⁶⁾

$$\Delta S_{opt} = -79.09D_{50} + 37.86 \quad (1)$$

松尾の方式を用い、図-4に示すような粘着力 μc ～飽和度 S_r 関係を考える。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)で表している。

$$S_i = -100e_0 + (S_{opt} - \Delta S_{opt} + 100e_{min}) \quad (2)$$

$$c_{max} = 0.103(0.0086)^{e_0} D_{50} U_c \quad (3)$$

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。

$$\mu c = \{1.0 - 0.018(S_r - S_i)\} c_{max} \quad (4)$$

$$S_r = \{(1+e_0)/e_0\} \theta \quad (5)$$

$$\gamma_t = \gamma_d + (\theta/100) \gamma_w \quad (6)$$

ここで、無限斜面法による斜面安定解析における安全率 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、正規分布 $f(c)$ （平均 μc 、標準偏差 σc （式(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。

$$\sigma c = 0.182 c_{max} \quad (7)$$

$$P_f = \int_{-\infty}^{c_F} f(c) dc \quad (8)$$

5. 斜面勾配区分図と斜面崩壊確率分布図

図-5に、国土地理院の基盤地図情報⁷⁾を用いて、GISによって作成した山口県岩国市周辺地域（図郭番号513211）における斜面勾配区分図（5mメッシュ）を示す。

図-6に、同範囲における斜面崩壊確率分布図を示す。なお、斜面崩壊確率の算出時の土壌水分値は、平成30年7月豪雨時に人工衛星が観測したピーク時の37.03%（平成30年7月7日）を用いている。さらに、各図には過去の災害発生点（山口県提供データ、平成25年～令和4年）についても併せて示している。

図-7、8に斜面勾配、斜面崩壊確率と災害発生点との相関を示す。斜面勾配、崩壊確率の大きい範囲において過去に災害が発生していることから、解析手法の妥当性が見受けられる。しかし、一方で、斜面勾配や斜面崩壊確率の大小と災害発生点が一致していない箇所も数箇所見受けられる。

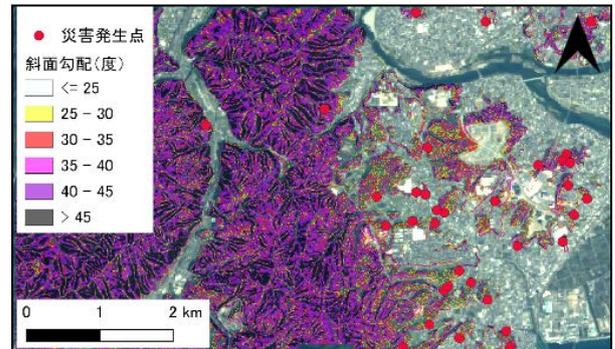


図-5. 斜面勾配区分図（図郭番号513211）

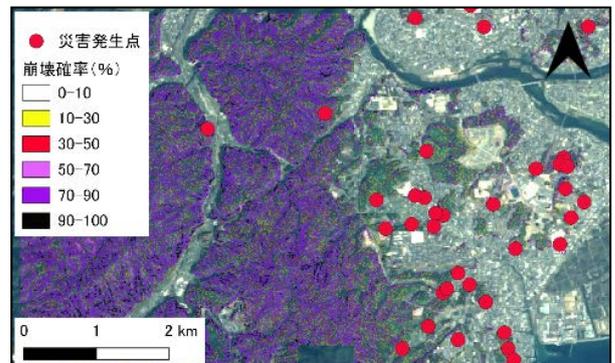


図-6. 斜面崩壊確率（図郭番号513211）

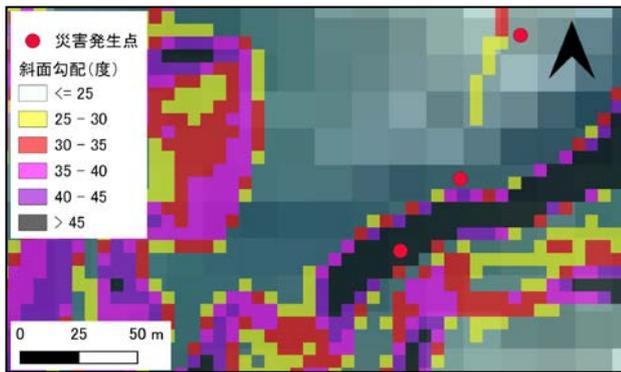


図-7. 斜面勾配と災害発生点

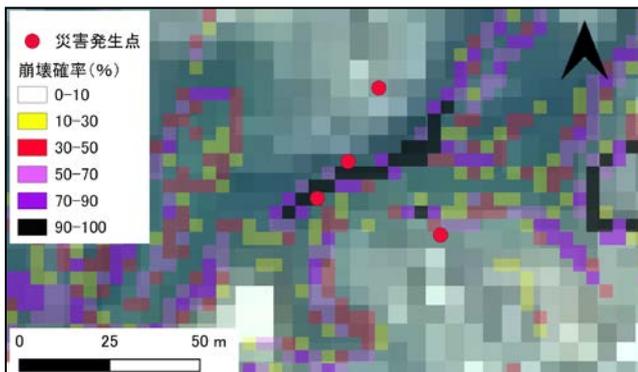


図-8. 斜面崩壊確率と災害発生点

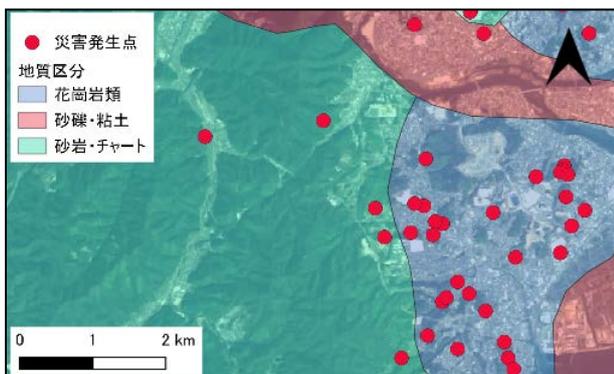


図-9. 地質区分と災害発生点

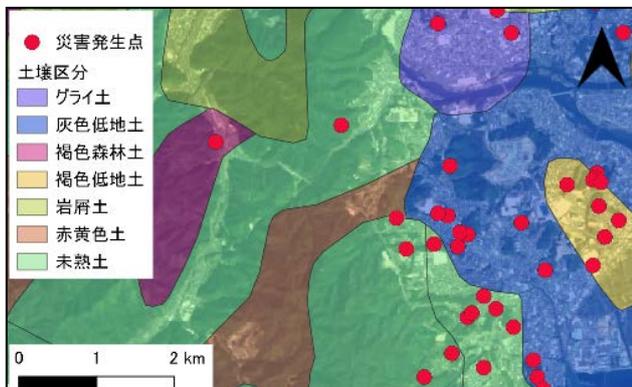


図-10. 土壌区分と災害発生点

図-9, 10に地質区分図, 土壌区分図と災害発生点との相関をそれぞれ示す。地質区分図と災害発生点を比較すると、花崗岩類が堆積している範囲において災害が多く発生していることが分かる。また、土壌区分図との比較をすると、災害発生点は概ね一定の範囲に点在しているものの土壌との相関が顕著にみられるほどではない。つまり、斜面崩壊の発生要因には斜面勾配の大小や土壌より地質の影響が大きいことが推察できる。

6. おわりに

パッチアンテナを用いて、土中水分分布の計測のシミュレーションに取り組んだ。Sパラメータの推移から土中水分量の分布をマイクロ波により確認できることがわかった。また、今回設計したアンテナでは、特に5GHz以降の周波数帯域におけるSパラメータが土中水分分布の判断材料になった。

アンテナのパッチ部分に触れている1層目の水分量増加に伴う比誘電率の変化は、Sパラメータの推移に大きな影響があることが分かった。

また、人工衛星によって観測される土壌水分データを用いることで、日々変化する斜面崩壊危険度をGISによって広域的に評価した。

本研究では、2種類の比誘電率で解析を行ったが、実際には土の種類・水分量によって多くの比誘電率を扱う必要がある。また、解析範囲を広げ、層の数を増やした解析、不規則・複雑な層構造での解析を行う必要もあるだろう。そのために、マイクロ波の周波数の範囲や抽出するデータ数、送受信アンテナの設計の最適化に取り組んでいく。また、人工衛星データの高精度化や土砂災害発生の要因を定量的に扱うことのできる斜面崩壊確率の解析手法の開発を行い、土砂災害予知システムの構築を目指していく。

参考文献

- 1) 国土交通省：令和三年の土砂災害、<http://www.mlit.go.jp/river/sabo/jirei/r3dosha/r3doshasaigai.pdf>, [アクセス日: 2024/03/15]
- 2) JAXA: Jaxa's Public-health Monitor and Analysis Platform, <https://www.jpmap-jaxa.jp/jpmap/>, [アクセス日: 2024/03/15]
- 3) 虫明功臣, 小池雅洋, 沖大幹, 仲江川敏之: 能動型マイクロ波リモートセンシングによる表層土壌水分計測 https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjshwr/1988/10/6/10_6_577/_pdf-char/ja/, [アクセス日: 2024/01/25]
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 国土交通省: 国土数値情報ダウンロードサイト, <https://nlftp.mlit.go.jp/kokjo/inspect/landclassification/land/5-1/prefecture35.html>, [アクセス日: 2024/03/15]