

## 920 MHz 帯電波による土壌水分量推定を目指した 地中地上間の伝搬減衰量と土壌水分量との関係性の調査

A study on the relationship between soil moisture content and under-ground-to-ground radio propagation attenuation for estimating the soil moisture content using 920 MHz band waves

岡本 真美† 小林 真† 新 浩一† 西 正博†

† 広島市立大学院情報科学研究科

### 1 はじめに

豪雨に伴った土砂災害被害によって生じる人的被害を軽減するためには、土砂災害前兆現象を検知して早期避難を促す必要がある。これまでに、土砂災害前兆現象として土壌水分量の上昇が、誘電率型土壌水分量センサによって観測されている [1]。しかしながら、誘電率型土壌水分量センサは高価で金属部が腐食するという課題がある。そこで私たちは、土壌水分量の上昇にともなって電波の減衰量が增大すること [2] に着目して、920 MHz 帯無線端末間通信の受信電力による面的土壌水分量推定手法の実現を目指している。本研究では、920 MHz 帯の地中-地上間電波の受信電力と土壌水分量を測定して、地中-地上間の伝搬減衰量と土壌の体積含水率の関係について評価した。

### 2 測定方法

地中-地上間電波減衰量と土壌水分量との関係を明らかにするために、広島市立大学のグラウンドに無線端末と土壌水分量センサを設置して測定を行った。地中に送信端末、地上に受信端末を複数台設置して、920 MHz 帯電波の受信電力を測定した。図 1 に本研究で行った実験の構成を示す。実験機器は送信端末、受信端末、土壌水分量センサから構成される。

地中深さ 0.5 m に送信端末を設置して、高さ 0.1 m に受信端末を設置した。受信端末は送信端末の真上から水平方向に 0 m, 3.75 m, 7.5 m に設置した。このとき、アンテナの方向は地面と水平のように設置した。送信端末は、陸上競技の走り幅跳びピットに使用される土の中に設置した。

無線端末には、intarplan 社製の IM920s 無線モジュールと、屋外用モノポールアンテナを用いた。送受信に用いる周波数は 922.4 MHz、送信電力は 10 dBm とした。屋外用モノポールアンテナの最大利得は 3 dBi、防水防塵性能は IP67 である。無線端末の制御装置には Raspberry Pi を用いた。受信端末で 5 秒ごとに 5 分間測定した受信電力の中央値を観測した。

土壌水分量センサには、Delta-T Devices 社製の Profile Probe typePR2 を用いた。Profile Probe typePR2 の測定方法は、ADR 法 (Amplitude Domain Reflectometry) [3] を用いて、測定値は電圧値が出力される。深さ 0.1 m, 0.2 m, 0.3 m, 0.4 m の土壌水分量を測定することができる。土壌水分量センサは 5 分ごとに電圧値の瞬時値を観測した。

### 3 測定結果

#### 3.1 減衰量の算出

電波減衰量と体積含水率を比較するために観測した受信電力に基づいて、電波減衰量  $P_L(d, \theta)$  [dB] を求めた。この時、伝搬距離が  $d$  [m]、体積含水率が  $\theta$  [%] である。減衰量の算出方法は以下の通りである。

$$P_L(d, \theta) = P_{tx} + G_r + G_t - P_{rx} \quad (1)$$

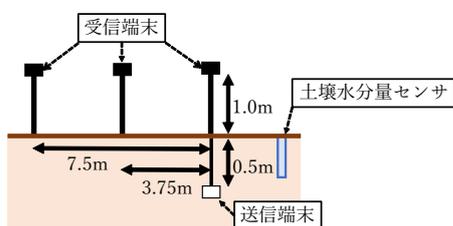


図 1: システム構成

ここで、送信電力を  $P_{tx}$  [dBm]、受信電力を  $P_{rx}$  [dBm]、送受信端末のアンテナ利得を  $G_t$  [dBi]、 $G_r$  [dBi] とする。本研究では  $P_{tx} = 10$  [dBm]、 $G_t = 3$  [dBi]、 $G_r = 3$  [dBi]、 $P_r$  を測定した受信電力値とした。

#### 3.2 体積含水率の算出

電波減衰量  $P_L(d, \theta)$  [dB] と体積含水率  $\theta$  [%] を比較するために観測した土壌水分量センサの電圧値  $V$  [V] に基づいて、体積含水率  $\theta$  [%] を求めた。

土壌水分量センサの電圧値  $V$  [V] と比誘電率  $\epsilon$  の関係は、比誘電率の平方根  $\sqrt{\epsilon}$  が以下の 5 次多項式で表されることが知られている [4]。

$$\sqrt{\epsilon} = 1 + 6.19V - 9.72V^2 + 24.35V^3 - 30.8V^4 + 14.73V^5 \quad (2)$$

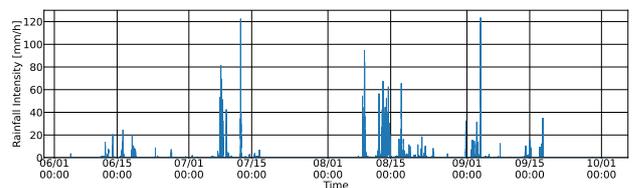
また、比誘電率  $\epsilon$  から体積含水率  $\theta$  [%] の算出には、土質等に影響されない普遍的な式として Topp が提案した以下の式を用いた [5]。

$$\theta = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2} \epsilon - 5.5 \times 10^{-4} \epsilon^2 + 4.3 \times 10^{-6} \epsilon^3 \quad (3)$$

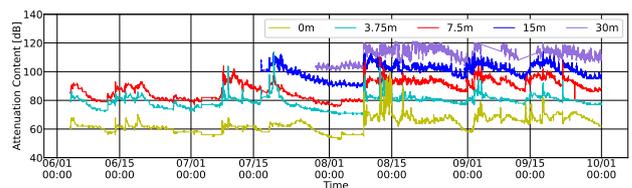
#### 3.3 時系列的な変化

図 2(a), (b), (c) に 2021/06/04~2021/09/30 における降雨強度、電波減衰量および体積含水率をそれぞれ示す。降雨強度は、Yahoo! Japan が提供している Web API [6] を利用して、測定地点である広島市立大学グラウンド付近の情報を取得した。

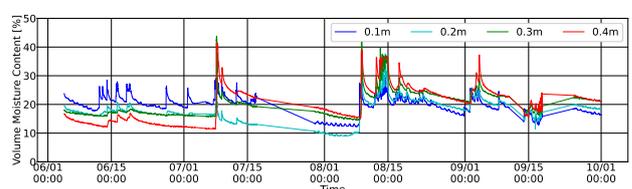
本稿で示した期間の中で、2021/07/03 15:00~2021/07/05 17:00 では減衰量を欠測した。また、2021/07/18 00:00~2021/07/28 00:00、2021/09/18 00:00~2021/09/24 00:00 では体積含水率を欠測した。



(a) 降雨強度



(b) 減衰量



(c) 体積含水率

図 2: 測定結果

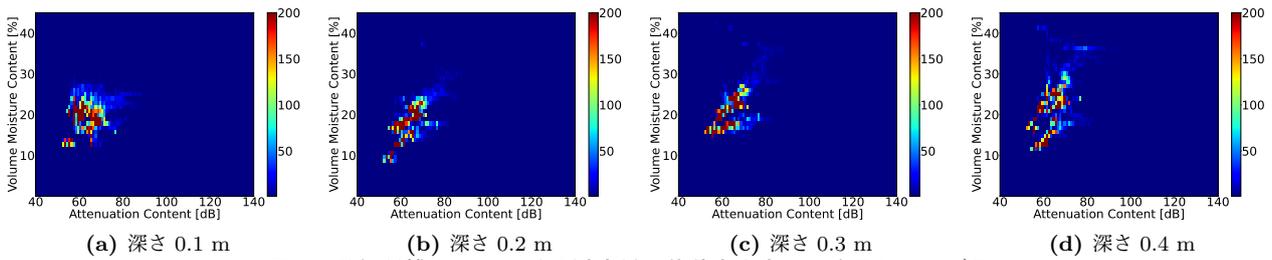


図 3: 受信距離 0 m における減衰量と体積含水率の 2 次元ヒストグラム

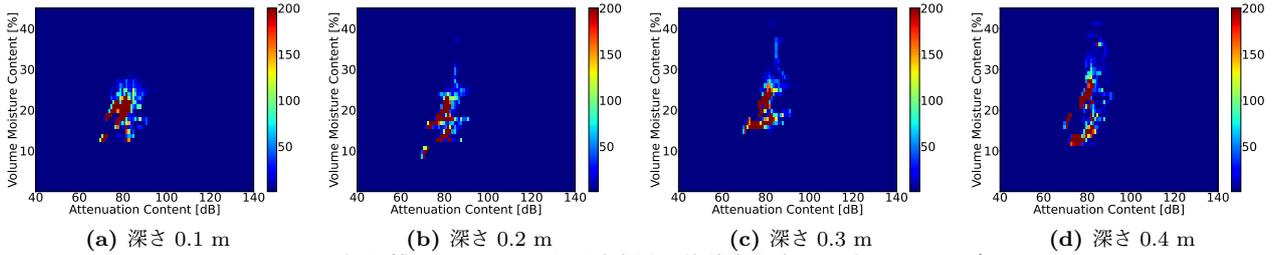


図 4: 受信距離 3.75 m における減衰量と体積含水率の 2 次元ヒストグラム

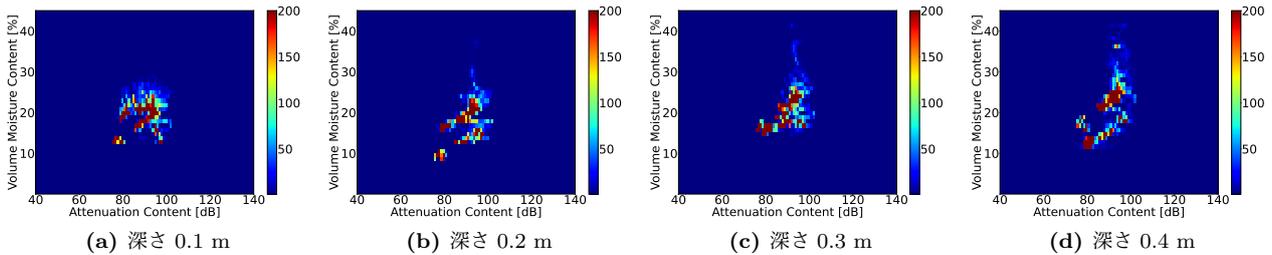


図 5: 受信距離 7.5 m における減衰量と体積含水率の 2 次元ヒストグラム

2021/08/13, 14 の 2 日間に広島市内で土砂災害が発生するほどの降水があった。このとき、測定地点の降雨強度も 80 mm/h 以上の値を示している。継続した降雨が発生すると体積含水率が大きくなり、減衰量が大きくなることが確認できる。土壌水分量が増加すると、減衰量が増加していることが分かる。

### 3.4 減衰量と体積含水率の比較

減衰量と体積含水率の関係を調査するため 2 次元ヒストグラムを作成した。水平方向の距離が異なる受信端末における減衰量毎に、異なる深さの体積含水率に対して 2 次元ヒストグラムを作成した。図 3 に受信距離 0 m, 図 4 に受信距離 3.75 m, 図 5 に受信距離 7.5 m の 2 次元ヒストグラムを示す。横軸は減衰量で 1 dB 間隔の格子、縦軸は体積含水率 1 % の格子である。

図 3(a), 図 4(a), 図 5(a) から、深さ 0.1 m の浅い箇所の体積含水率と、減衰量との間には相関が低いことが確認できる。一方、深さが 0.2 m 以上における体積含水率と、減衰量との間には相関が高くなった。

減衰量と体積含水率の間の関係について定量的に評価するために相関係数を求めた。表 1 に相関係数を算出した結果を示す。相関係数から、全ての組合せで正の値を示していることから正の相関がみられることが分かる。ただし、深さ 0.1 m における体積含水率と、水平方向の距離が 0 m, 7.5 m における減衰量とは、相関係数 0.3 以下となったことが分かる。その他の組合せでは、ある程度の相関があるといえる。この

結果から、減衰量と体積含水率の関係として土壌水分量が高いとき減衰量も大きくなる傾向が考えられる。

また、全ての組合せで 2 次元ヒストグラムのデータが 2 つの領域に分布していることが確認できる。この原因については、現在要因を検討中である。

### 4 おわりに

920 MHz 帯の地中-地上間電波と土壌水分量センサによる測定をして、減衰量と体積含水率の関係性を評価した。評価結果から、深さ 0.2 m 以下の体積含水率と減衰量の間には正の相関が見られた。今後は、連続的な測定を継続しながら減衰量と体積含水率の関係から、体積含水率を推定する式を検討して、920 MHz 帯電波を利用した土壌水分量推定システムの構築を目指す予定である。

謝辞本研究の一部は総務省 SCOPE 社会展開指向型 19168001, JSPS 科研費 17K06437, 19K24352, 20K19787 のもとに行った。

参考文献 [1] 植上他, “降雨量, 不飽和浸透挙動, 変位量の観測結果に基づく降雨時表層すべり型崩壊過程の検証,” 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol.68, No.3, pp.508-525, 2012. [2] S.-U. Yoon, et al., “A Radio Propagation Model for Wireless Underground Sensor Networks,” Proceedings of IEEE Globecom’11. [3] 中島他, “ADR 法による土壌水分量の測定とキャリブレーション,” 地下学会誌, Vol.40, No.4, pp.509-519, 1998. [4] J. Miller, et al., “From drought to flood: Catchment responses revealed using novel soil water probes,” Hydrological processes, 1997. [5] G.C. Topp, et al., “Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines,” Water resources research, 1980. [6] Yahoo Japan, “気象情報 API”, (2021/12/1 閲覧).<https://developer.yahoo.co.jp/webapi/map/openlocalplatform/v1/weather.html>

表 1: 減衰量と体積含水率についての相関係数

		土壌水分量センサの深さ			
		0.1 m	0.2 m	0.3 m	0.4 m
受信距離	0 m	0.2	0.72	0.68	0.59
	3.75 m	0.50	0.56	0.55	0.54
	7.5 m	0.27	0.51	0.60	0.65