

異なる土性・圃場における  
安価な GNSS 信号受信システムを用いた表層土壌水分推定  
Surface soil moisture estimation using inexpensive GNSS signal reception system in  
different soil types and fields

○小谷豪大\*・齊藤忠臣\*\*・門田直哉\*\*\*・大丸弘朗\*・猪迫耕二\*\*・藤巻晴行\*\*\*\*

○Godai Kodani\*,Tadaomi Saito\*\*,Naoya Kadota\*\*\*,Hiroaki Daimaru\*,  
Koji Inosako\*\*,Haruyuki Fujimaki\*\*\*\*

## 1. はじめに

土壌水分は主要な環境要素の一つであり、空間変動性が高いパラメータである。近年実用性の高い「面」での測定手法として GNSS-IR (GNSS Interferometric-Reflectometry) が注目されている。GNSS-IR は、GNSS 信号受信機に届く直接波と地表反射波の干渉成分を含むマルチパス信号の SNR (Signal to Noise Ratio) から、反射面の環境要素を推定する技術である。従来の研究では高精度・高価な受信システムが用いられてきたが、安価な市販パーツによる受信システムへの適用が可能になれば、途上国を含む世界中での利用が期待される。本研究では、自作の安価な信号受信システムを適用し、得られたデータの解析から表層土壌水分の推定を試みた。さらに、土性や圃場条件の違いに加え、複数台の受信システムやアンテナの設置向きの違いが解析結果に与える影響についても検証した。

## 2. 観測方法

観測は、乾燥地研究センター内にある砂地圃場 (100×40 m, 以下 ALRC) と、鳥取大学農学部附属フィールドサイエンスセンターの壤土圃場 (台形: 縦 33 m, 横 38 m, 21.5 m, 以下 FSC) の、土性・広さ・周辺環境が異なる 2 圃場で実施した。各圃場の中央付近に、安価な GNSS アンテナとマイクロコンピュータ (Raspberry Pi 3 Model A+) を組み合わせた信号受信システムを 2 機 (1 号機・2 号機) 設置し、アンテナ高さは ALRC で 1.8 m, FSC で 1.2 m とした。なお、ALRC の 2 号機ではアンテナ上面を横 (南) 向きにして設置した。データは Python で作成したソフトウェアを用いて取得・保存し、Wi-Fi 経由でサーバーに送信した。また、各圃場には深さ 3.5 cm に複数の誘電率水分計を設置し、GNSS データの解析結果との比較用に体積含水率  $\theta$  を取得した。

## 3. 解析方法

本研究では、取得した GNSS データのうち GPS 衛星 32 機の L1 および L2 信号を用いて解析を行った。解析にはオープンソースソフトウェア gssrefl を用いた。まず、マルチパスの指標である SNR, 衛星の仰角・方位角等を抽出し、マルチパスの影響が大きい低仰角 (5–30 度) の衛星データに限定した。その後、SNR 値を線形スケールに変換した上で、直接信号成分のトレンドを除去した。このトレンド除去後の SNR ( $SNR_r$ ) と仰角の波形関係に対し、周期性の解析手法である Lomb-Scargle-Periodogram を適応し

---

\* 鳥取大学大学院, Graduate School of Sustainability Science, Tottori University, \*\*鳥取大学農学部, Faculty of Agriculture, Tottori University, \*\*\*ゲルフ大学, University of Guelph, \*\*\*\*鳥取大学乾燥地研究センター, Arid Land Research Center, Tottori Univ. キーワード: GPS 衛星, マルチパス, リモートセンシング

て卓越周波数 ( $f_m$ ) を導出した．そして導出した  $f_m$  と GNSS 信号の波長  $\lambda$  から解析期間中の有効反射体高さ  $H_r$  を算出した．算出された  $H_r$  のうちピークの不明瞭な  $f_m$  から得られたデータを除外した上で，式 (1) に  $H_r$  を代入し，線形最小二乗法を用いて  $SNR_r$  と衛星仰角  $E_{dp}$  の関係を当てはめた．

$$SNR_r = A \cos \left( \frac{4\pi H_r}{\lambda} \sin E_{dp} + \varphi \right) \quad (1)$$

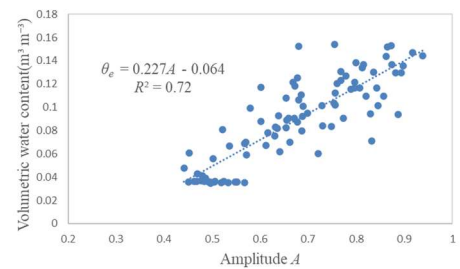
式 (1) において， $A$ ， $\varphi$  がフィッティングパラメータであり， $A$  が振幅， $\varphi$  は位相のずれを表している． $A$ ， $\varphi$  それぞれについて，解析期間中の最小値や中央値で基準化し，日平均化した．さらに，解析期間中の  $H_r$  を固定せずに， $H_r$  もフィッティングパラメータとして式 (1) に当てはめた際に得られる  $H_r$  の値を反射体高さ ( $H$ ) とし，これについても日平均化した．以上の解析により得られた  $A$ ， $\varphi$ ， $H$  と，水分センサから得られた体積含水率  $\theta$  の日平均値を比較し，両者の関係を調べた．なお解析期間は 2024 年 6 月 9 日～9 月 8 日であり，ALRC では前年 (2023 年) 同期間のデータも解析対象とした．

#### 4. 結果と考察

解析結果の一例として，2023 年の ALRC の 1 号機 L2 信号から得られたフィッティングパラメータ  $A$  と実測体積含水率  $\theta$  との関係を **Fig.1** に示す．両者の間には  $R^2=0.72$  の強い相関が認められた．図中の相関式に各データの  $A$  を代入することで推定体積含水率  $\theta_e$  を得ることができ，これと実測値  $\theta$  の比較を **Fig.2** に示す． $\theta_e$  は  $\theta$  と類似した変動を示し，水分変動を概ね良好に推定できた．また，同じ解析条件における  $\varphi$  と  $\theta$  の間に  $R^2 = 0.49$  の相関があり， $A$ ， $\varphi$  いずれでも推定が可能であった．

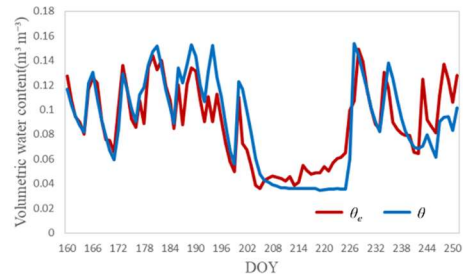
全解析条件における各フィッティングパラメータ  $A$ ， $\varphi$ ， $H$  と実測体積含水率  $\theta$  との決定係数を **Table.1** に示す．2023 年の ALRC と同様に，FSC の 1 号機・L2 信号から得られた  $A$  と  $\theta$  にも  $R^2 = 0.62$  の強い相関がみられ，土性や圃場条件が異なっても， $A$  を用いた土壌水分の推定の可能性が示された．

しかし，2024 年の ALRC では同期間・同システムの  $A$  と  $\theta$  の相関が  $R^2=0.07$  と大幅に低下し，年による違いがあった．また，FSC の 1 号機・2 号機の比較においても，各パラメータと  $\theta$  の相関に違いがみられ，アンテナ間の差異があることもわかった．干渉反射波の明瞭化を狙ってアンテナ設置向きを横に変更した ALRC の 2 号機では相関が見られず，有用性は確認できなかった．



**Fig.1 2023 年 ALRC1 号機 L2 信号  $A$  と  $\theta$  の関係**

Relationship between  $A$  and  $\theta$   
for ALRC Unit 1, L2 signal, 2023



**Fig.2  $\theta$  と  $\theta_e$  の比較**  
Comparison of  $\theta$  and  $\theta_e$

**Table.1  $\theta$  と各パラメータの決定係数**  
 $R^2$  between  $\theta$  and fitting parameters

			6/9～9/8		
			$A$	$\varphi$	$H$
ALRC	2023	1号機	L1	0.20	0.17
			L2	0.72	0.49
	2024	1号機	L1	0.22	0.08
			L2	0.07	0.30
		2号機 (アンテナ横)	L1	0.01	0.01
			L2	0.01	0.07
FSC	2024	1号機	L1	0.07	0.27
			L2	0.62	0.03
		2号機	L1	0.27	0.34
			L2	0.50	0.18