

安価な GNSS 信号受信システムを用いた土壌水分推定手法の開発

Development of soil moisture estimation method using inexpensive GNSS signal reception system

○齊藤忠臣¹⁾・門田直哉^{2) 3)}・上田侑輝⁴⁾・藤巻晴行⁵⁾・猪迫耕二¹⁾・登尾 浩助⁶⁾・森 也寸志⁷⁾

○Tadaomi Saito¹⁾, Naoya Kadota^{2) 3)}, Yuki Ueda⁴⁾, Haruyuki Fujimaki⁵⁾,

Koji Inosako¹⁾, Kosuke Noborio⁶⁾ and Yasushi Mori⁷⁾

1. はじめに

土壌水分は多分野において重要なパラメータの一つであるものの、空間変動性が高いため、実用性の高い「面」での測定手法の開発が求められている。Larson ら (2008) は GPS 衛星から飛来する電波を用いて土壌水分を推定する GNSS-IR (Interferometric-Reflectometry) という手法を提案した。GNSS-IR とは、GNSS 受信機に到達する衛星からの直接波と間接波 (地表面反射波) の複合信号 (マルチパス) データを解析することで、土壌水分を推定する手法である。通常、GNSS-IR に関する研究では、高精度・高価な GNSS 信号受信システムが用いられているが、本手法を市販の安価なパーツを組み合わせたシステムに適用できれば、途上国を含む世界中での普及が見込める。そこで本研究では、圃場に安価な GNSS 信号受信システムを設置し、得られるマルチパスデータの解析から土壌水分を推定する手法を開発することを目的とした。

2. 研究方法

2.1 圃場観測：鳥取大学農学部附属フィールドサイエンスセンターの台形圃場 (縦 33 m, 横 38 m, 21.5 m) で観測を行った

(Fig.1)。圃場中央付近にアンテナ高 1.655 m の GNSS 信号受信システムを 2 台設置した。GNSS 信号受信システムは、いずれも数千円で購入可能な GNSS 受信機 (GU-902MGG-USB, YIC 社) やマイクロコンピュータ (Raspberry Pi 3 Model A+, ラズベリーパイ財団) を組み合わせたものである。Python3.9.6 を用いて作成したソフトウェアを通じてデータを取得・保存し、Wi-Fi ルーターを通じてデータをサーバーにアップロード可能となっている。なお、本システムで得られるデータは NMEA フォーマットであり、データが全て整数値となっている。また、静電容量式の誘電率水分計である 5TM (METER 社) 6 本を、GNSS 信号の電波の浸透深度に近い表層 2.5 cm に設置した。6 本のセンサから得られる土壌の体積含水率の平均値を圃場の土壌水分量 (θ , $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) として、解析結果との比較に利用した。

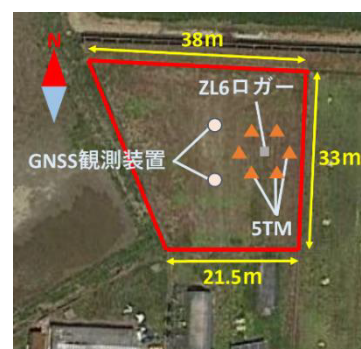


Fig.1 観測圃場・機器
Observation field and equipment

2.2 受信信号の解析方法：受信システムから得られる各種衛星データの中から、マルチパスの指標である信号対雑音比 (SNR) や衛星仰角等のデータを抽出して解析を行った。初めに、時間と仰角の多項近似式を基に、整数値で出力される仰角を平滑化 (以降 E_{dp} と表記) し、高精度化した。次に、SNR 波形を明瞭にするため、 E_{dp} との関係を利用したトレンド除去を行った。その後、間接波の影響が強く波形の明瞭な仰角 8~18 度の範囲で、得られた SNR (SNR_r) と E_{dp} の関係を非線形最小二乗法によって式 (1) に当てはめた。

¹⁾鳥取大学農学部, Faculty of Agriculture, Tottori Univ., ²⁾ University of Guelph, ³⁾鳥取大学, Graduate School of Sustainability Science, Tottori Univ., ⁴⁾鳥取県庁, Tottori Prefectural Government, ⁵⁾鳥取大学乾燥地研究センター, Arid Land Research Center, Tottori Univ., ⁶⁾明治大学農学部, Meiji Univ., ⁷⁾岡山大学環境生命科学研究科, Okayama Univ. キーワード: GPS, 広域土壌水分, マルチパス

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

式(1)において λ はGNSS信号波長であり、フィッティングパラメータである A 、 H 、 φ はそれぞれ振幅、アンテナ高、位相のずれを表している。この中で、位相のずれ φ が土壌水分変動と関係のあるパラメータとされている。また、当てはめの精度を Maximal Information Coefficient (MIC) 相関を用いて評価した。

2.2 水分推定に適した衛星と解析条件の検討: 本受信システムでデータを取得できる衛星総数は72機であるが、それぞれの軌道や波形の形状・明瞭さによって、水分推定の解析に不適切なものも多く存在する。さらに、同一衛星から得られるデータであっても、解析に用いる緒条件や閾値が水分推定精度に影響を与える。そこで、用いる衛星データと解析条件を様々に変えながら、フィッティングされた位相のずれ φ と圃場の土壌水分(θ)の相関を調べ、水分推定に適した衛星と解析条件の検討を行った。なお、 θ については、水分の変動が比較的大きかった2021/11/1~12/23のデータを使用した。

3. 結果・考察

水分推定に適した衛星と解析条件の検討を行った結果、まず式(1)の当てはめ精度が高いデータを使用する必要があることがわかった。また、衛星軌道が上昇時と下降時のデータを分けて解析する必要があることがわかった。そこで、当てはめのMIC相関が0.9以上のデータを用い、上昇・下降データを分けたうえで、位相のずれ φ と水分 θ の間に強い相関($|R| \geq 0.7$)が見いだせた衛星をTable 1に示した。Table 1の通り、6つの衛星で位相のずれ φ と水分 θ の間に強い負の相関が見られた。中でも、衛星番号(PRN)8、12といった衛星は、精度が比較的高い上に、利用できたデータ数も多く、水分推定に適した衛星と言える。このPRN8における φ と θ の関係をFig.2に示す。図中の衛星毎の φ と θ の相関式に解析より得られた φ を代入することにより、土壌水分の推定値(θ_e , $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)が得られることとなる。そこで、Table 1の6つの衛星について、それぞれの相関式に φ を代入し推定された水分 θ_e と実測の θ を比較したものをFig.3に示す。結果より、 θ_e は実測の θ 変動を比較的高い精度で再現できており、本研究の条件下においては、Table 1の6つの衛星のマルチパス信号を解析することにより、表層土壌水分を比較的高い精度で推定できることが示された。

参考文献 Larson *et al.*, (2008): Use of GPS Receivers as a Soil Moisture Network for Water Cycle Studies. *Geophysical Research Letters*, 35

Table 1 強い相関を示した衛星
Strongly correlated satellites

衛星番号	軌道	相関係数	データ数
9	下降傾向	-0.70	32
12	下降傾向	-0.73	41
2	上昇傾向	-0.73	11
8	上昇傾向	-0.73	47
26	上昇傾向	-0.76	31
326	上昇傾向	-0.85	5

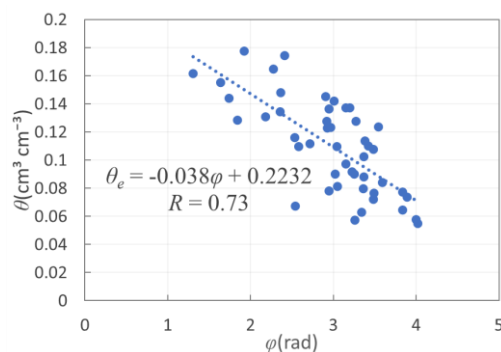


Fig.2 PRN8における φ と θ の関係
Relationship between φ and θ in PRN8

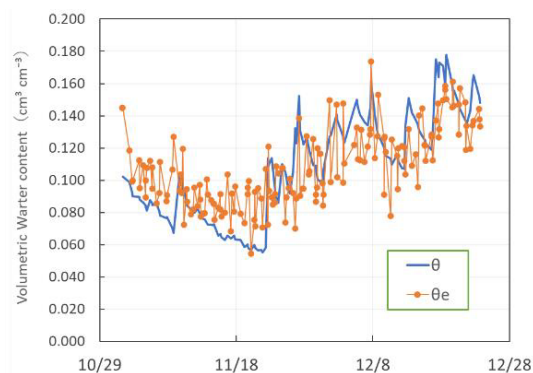


Fig.3 実測水分 θ と推定値 θ_e の比較
Comparison between of θ and θ_e