J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 163, p.29 ～ 38 (2026)

非破壊・非侵襲計測特集
論　文
Original Paper

GNSS 干渉反射法を利用した安価な面的土壌水分推定システムの開発

門田直哉 [1]· 齊藤忠臣 [2]· 猪迫耕二 [2]· 登尾浩助 [3]· 藤巻晴行 [4]· 森也寸志 [5]

Development of a low-cost areal soil moisture estimation system using GNSS Interferometric Reflectometry

Naoya KADOTA[1], Tadaomi SAITO[2], Koji INOSAKO[2], Kosuke NOBORIO[3], Haruyuki FUJIMAKI[4] and Yasushi MORI[5]

Abstract: GNSS Interferometric Reflectometry (GNSS-IR) is a technique that estimates areal surface soil moisture at the field scale by analyzing interference between direct and ground-reflected GNSS signals received by near-surface antennas. In recent years, low-cost GNSS antennas and receivers have become increasingly widespread, and their application to GNSS-IR has been desired. However, low-cost receiving systems face challenges such as low data accuracy and limitations in the available satellites and frequency bands. In this study, we developed a low-cost GNSS-IR system using an L1-band GPS antenna, receiver, and Raspberry Pi microcomputer, with a total cost of approximately ¥ 10,000. Field observations were conducted using this low-cost receiving system to evaluate the accuracy of soil moisture estimation and the observation coverage provided by the tracked satellites. As a result, the calculated Fresnel zones of GPS signals captured by the system covered most of the field area, excluding approximately 60° in the northern direction where satellite flyovers were absent. From the Signal-to-Noise Ratio (SNR) interference patterns, we extracted three variables, phase offset (φ_o), signal amplitude (A_s), and effective reflector depth (H_{dep}) — and compared them with in-situ volumetric water content (θ_m) obtained using dielectric probes. The correlation coefficients between θ_m and φ_o, A_s, and H_{dep} were $r = 0.79, -0.43$, and -0.63, respectively. Restricting the analysis to signals from azimuths of 120 – 240°, where the influence of nearby buildings was expected to be smaller, the correlations improved to $r = 0.78$ (φ_o), -0.75 (A_s), and -0.82 (H_{dep}). Soil moisture estimates based on φ_o yielded an RMSE of 0.03 m^3 m^{-3}. These results suggest that surface soil moisture can be estimated using this low-cost GNSS-IR system, despite limitations such as the restriction to single-band L1 signals and NMEA format output. Limiting the analysis to unobstructed azimuths improved the correlations, suggesting that careful selection of satellite signal directions can improve retrieval performance.
Key Words : GNSS-IR, soil water content, smart agriculture, GPS (Global Positioning System), gnssrefl

1. はじめに

表層土壌の水分は農業 · 気象 · 防災等の分野において諸現象に関わる重要なパラメータである．これらの現象の解明や課題解決のため，表層土壌水分量の変動を非破壊かつ定量的に評価する様々な手法が提案されてきた．中でも，Topp et al.（1980）による Time Domain Reflectometry（TDR）法をはじめとする誘電率水分計は，土壌に挿入したプローブからの電磁波の応答を元に土壌の誘電率を介して水分量を決定する手法であり，現在において最も普及が進んでいる手法となっている．しかし，土壌水分は空間変動性を有するため，測定範囲がプローブ周囲の範囲に限られる誘電率水分計から得られた値が広い空間を代表する値として利用できるかについては常に議論の対象となってきた．

近年，スマート農業の発展により圃場スケールでの面的土壌水分データの必要性が増している．表層土壌水分量の面的観測手法の代表的なものとしては，地球観測衛星からの合成開口レーダによるマイクロ波リモートセンシングが挙げられる（開發, 2017）．この手法は全球スケールでの土壌水分観測を可能とする一方で，取得可能なデータの時間 · 空間解像度が低い特徴がある．また，地上における面的な土壌水分観測手法として開発が進んでいる宇宙線土壌水分観測システム（COsmic-ray Soil

[1]School of Environmental Sciences, University of Guelph, 50 Stone Road East Guelph, Ontario, N1G 2W1 Canada.
[2]Faculty of Agriculture, Tottori University, 4-101 Koyama-Minami Tottori 680-8553, Japan. Corresponding Author: 齊藤忠臣, 鳥取大学農学部, tadaomi@tottori-u.ac.jp
[3]Organization for the Strategic Coordination of Research and Intellectual Properties (Ikuta), Meiji University, 1-1-1 Higashimita, Tama-ku, Kawasaki-shi, Kanagawa 214-8571, Japan.
[4]Arid Land Research Center, Tottori University, 1390 Hamasaka, Tottori 680-0001, Japan.
[5]Graduate School of Environmental, Life, Natural Science and Technology, Okayama University, 1-1-1 Tsushima-naka, Kita-ku, Okayama 700-8530, Japan.
2025 年 9 月 19 日受稿　2026 年 4 月 29 日受理

Moisture Observing System: COSMOS）は，宇宙から飛来する中性子が水素原子に吸収される特性を生かし，地表面近傍における中性子数を測定することで，測定機器の周囲半径約 300 m 程度における地表面土壌水分量を測定する技術である（Zreda et al., 2012）．COSMOS は国際的な土壌水分測定網の構築に利用されるなど，優れた面的土壌水分観測手法である一方で，観測には高価な機材を必要とする．また，広い測定範囲を持つがゆえに，日本のように小規模圃場が多数細分化されている地域においては，測定範囲が対象としたい圃場区画のサイズを上回ることも多く，圃場区画単位の土壌水分を測定する用途には必ずしも適さない．

このような中，圃場スケール（半径数 ～ 数十 m）での表層土壌水分の観測を可能とする手法として，全地球航法衛星システム（Global Satellite Navigation System, GNSS）の信号波を利用する GNSS 反射法（GNSS- Reflectometry：GNSS-R）が注目されている（Edokossi et al., 2020; Euriques et al., 2021）．GNSS は GPS, GLONASS, Galileo といった衛星群から構成されるが，これらの衛星が発信する電波を測位用受信機が受信する際には，直接波だけでなく海面・地表面・人工物等からの反射波（間接波）も受信される．GNSS-R はこの反射波の影響を解析することで，反射面における土壌水分を含む様々な環境要素を推定する手法である．GNSS-R は地上局・船舶・航空機等の様々な受信機に適用可能であるが，中でも固定の地上局に適用され，解析パラメータに信号品質の評価に用いられる信号対雑音比（Signal-to-Noise Ratio: SNR) を利用する GNSS 干渉反射法（GNSS-Interferometric Reflectometry: GNSS-IR）は，近年特に注目を集め研究の進捗が目覚ましい手法である．

GNSS 衛星から送信される信号波は，地表面で反射する際に土壌の誘電率や粗度，信号の浸透深度に応じて影響を受ける（Georgiadou and Kleusberg, 1988; Kavak et al., 1996）．間接波の地表面反射率と信号浸透深度の変化は，間接波の受信機への信号強度や到達時間を変動させる．このときに受信機で得られる SNR 値には，直接波と遅延して到達する間接波の重ね合わせにより周期的な波形が現れる．この波形は SNR 干渉波（SNR Interferogram）と呼ばれ，間接波の影響が強くなる衛星の低仰角域において明瞭である．GNSS-IR ではこの SNR 干渉波形を解析することで反射点における土壌水分量を推定する．Zavorotny et al.（2010）は SNR 干渉波に土壌水分が及ぼす影響を物理モデルとして示した．Larson et al.（2010）はこのモデルを元に，均平な地表面で反射した間接波によって発生する SNR 干渉波（SNR_{r}）は，以下の式（1）で近似できることを示した．

$$SNR_{\mathrm{r}} = A\cos\left(\frac{4\pi H}{\lambda}\sin E + \varphi\right) \tag{1}$$

ここで，A は振幅，H は電波反射地点からアンテナ位相中心までの高さ（Reflector Height: 反射体高さ）（m），E は衛星仰角（度），λ は GNSS 信号波長（m），φ は位相である．A，H，φ は信号反射面の様々な環境要素に影響を受けるが，特に φ については表層土壌水分の変動との間に高い相関が見られることが示されている（Chew et al., 2014）．また，GNSS-IR による測定範囲については，設置するアンテナ高さによって変更可能であるため，対象とする圃場区画サイズに応じた面的土壌水分量の取得が期待できる．

GNSS-IR による土壌水分の推定法は 2010 年代から確立が進み，当初は地殻変動観測等に用いられる高価・高精度の GNSS 受信機が利用され，地殻観測用受信機網を利用した土壌水分の観測ネットワーク構築の試みなどもされてきた（Larson, 2016）．一方，近年は低価格帯の GNSS 受信機の開発・普及が急速に進んでおり，これを用いた GNSS-IR の研究も始まっている（Martín et al., 2020）．中でも，機能を絞った最安価帯のアンテナ・受信機については，千円 ～ 数千円程度から購入可能である．加えて，受信機を制御するための PC についても，Arduino，Raspberry Pi といったマイクロコンピュータが広く普及しており，これらの組み合わせにより極めて安価な GNSS-IR のためのシステムの構築が可能な状況となっている．

このような安価な受信システムは新たな格安面的土壌水分センサとなる可能性を秘める一方，その実現には検証すべき課題も多い．第一の課題はデータの精度の問題である．これまでの GNSS-IR に関する研究で多く使われてきた地殻変動観測用などの GNSS 受信機では，SNR データを含む GNSS データを実数値で出力する RINEX（受信機独立交換）フォーマットが使用されている．しかし，一般的に安価な受信機では NMEA 0183（全米海洋電子機器協会）フォーマットが使用されており，解析に利用する SNR や衛星仰角・方位角などが整数値として出力される．このため，波形解析に精度で劣る SNR 値を用いる必要があるほか，衛星仰角・方位角の高精度化についても検討する必要がある．第二の課題は GNSS の信号周波数帯の問題である．GNSS 衛星は民生利用可能な 3 種類の周波数帯（L1, L2, L5）の信号を地上に向けて送信している．このうち，L2 信号は L1 信号より SNR の精度が高いとされ，これまでの GNSS-IR の研究で頻繁に利用されてきた（Larson et al., 2010）．また，Tabibi et al.（2015）は L2 信号と L5 信号を用いた結果として，L5 の方が土壌水分の推定精度が若干高かったことを報告している．一方で，最安価な GNSS アンテナ・受信機では L1 信号のみが受信可能で，L2，L5 信号が受信できない場合が多い．L1 信号は SNR の精度が低いとされるものの，低コスト化やシステムの普及を考慮すると，L1 信号の実用性を検証することが重要な課題である．第三の課題は測定の時間・空間分解能についてである．GNSS-IR は，衛星軌道から発信されるマイクロ波を利用する点で合成開口レーダと高い類似性を持ち，同様に宇宙空間か

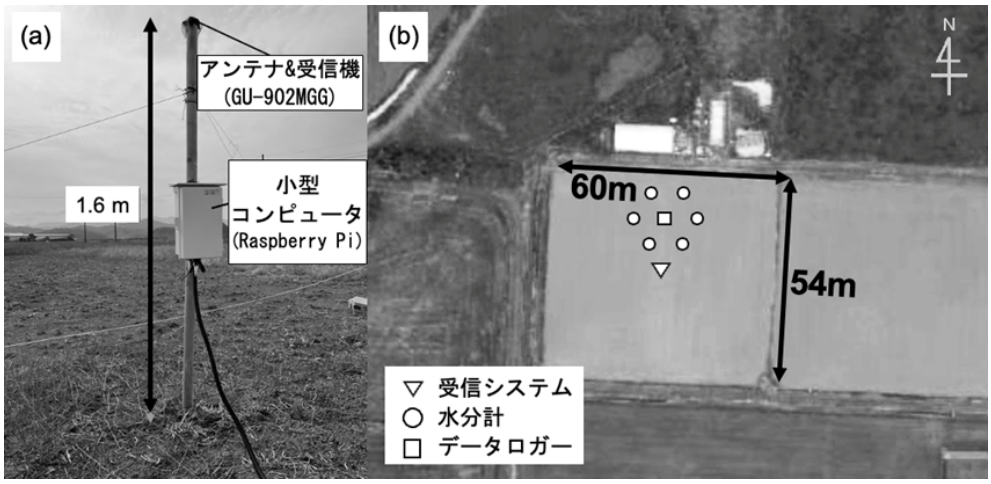


Fig. 1 受信システムと観測圃場の様子．(a) 受信システムの構成と設置，(b) 観測区の範囲と機器の設置．国土地理院「地理院地図」（2026 年 2 月 26 日閲覧）を基に筆者作成.
System configuration and field setup of the GNSS signal receiving system. (a) System components and configuration; (b) Observation plot layout and equipment placement. The aerial photograph in panel (b) was obtained from the Geospatial Information Authority of Japan (retrieved February 26, 2026).

らの飛来物（電磁波 · 宇宙線中性子）を地上部で捕捉して利用するという点において COSMOS とも類似性を有している．1 基の衛星が全球をカバーする合成開口レーダと比べ，1 か所の対象地に飛来する多数の GNSS 衛星を利用可能な GNSS-IR は測定の時間 · 空間分解能が高い手法である．しかし，COSMOS が常時全方位から飛来する中性子を利用できるのに対し，GNSS-IR はアンテナ · 受信機に捕捉された衛星の軌道方向からの信号反射域からのみデータを取得するため，COSMOS よりも測定の時間 · 空間分解能が劣る．安価な受信システムを使って「面的」な水分推定を行うためには，全方位から飛来する衛星を捕捉し解析に利用する必要があるが，捕捉される衛星の種類 · 数等はアンテナ · 受信機の性能や仕様に依存する．さらに，測定領域はアンテナを設置する地点の緯度経度や衛星の軌道，アンテナ高さにも影響を受けるため，これらも含めた検討を行う必要がある．以上のような背景を踏まえ，本研究では GNSS-IR を利用した安価な面的土壌水分量推定システムの開発を行った．最安価帯のアンテナ · 受信機と，小型コンピュータおよび制御プログラムを組み合わせた総額 1 万円程度で構成可能な GNSS-IR 専用の受信システムを作成し，これを用いた圃場での土壌水分量観測と水分量推定精度の評価を行った．また，本システムにより捕捉された衛星の軌道とその信号の地表面反射域を解析することにより，本システムによる測定領域が，対象となる観測域を面的にカバーしうるかの検討を行った．

2. 研究方法

2.1 GNSS-IR のための受信システムの開発 · 作製

市販で安価なパーツを利用して，GNSS 衛星測位情報を取得 · 保存する装置（以下受信システム）を作製した．システムは，主に信号を受信するためのアンテナ · 受信機と受信機の制御および観測データの取得 · 保存 · 送信のための小型コンピュータで構成される（Fig. 1a）．GNSS 受信機には，パッチアンテナを内蔵し USB 接続が可能な GU-902MGG（YIC 社, 市販価格 3500 円程度）を用いた．この受信機では，安価な受信機で幅広く利用されている NMEA 0183 version 4.10 フォーマットで，GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou の 4 つの GNSS 衛星群の L1 帯域における信号を取得できる．受信機と接続する安価な小型コンピュータには Raspberry Pi 3A+（ラズベリーパイ財団，市販価格 4500 円程度）を用いた．コンピュータの Linux 系システム（Raspberry Pi OS）上で動作するプログラム（Python 3.9 言語で記述）によって，1）受信機の制御，2）観測データの取得 · 保存，3）無線 LAN を通じた 1 日 1 回のデータのクラウドサーバ上へのアップロード，を行った．システムには，その他にも防水ボックスや USB ハブなどが含まれるが，総計でも 1 万円程度で構成可能（無線 LAN ルーターを除く）であり，水分測定システムとしては非常に安価といえる．また，本研究ではデータの欠測を避けるため装置への電源供給に 100 V の商用電源を用いたが，本装置は消費電力も 1.5 W 程度と小さく，太陽光パネルでの稼働が十分に可能であることを確認している．

2.2 圃場における観測

作製した受信システムを用いて，鳥取大学フィールドサイエンスセンター圃場（35°30’52”N, 134°09’53”E）にて観測を行った（Fig. 1b）．観測区の土性は砂質埴壌土であり，観測区のサイズは 50 m × 46 m とした．圃場内部はほぼ均平で，周囲は開けているが，北東方面に信号の障害となりうる地形 · 人工物（鳥取大学湖山キャンパ

ス）があった．既往研究によれば，植生は地表面の粗度および誘電特性を変化させ，GNSS-IR 法による表層物性の推定結果に影響を及ぼすと報告されている（Nievinski and Larson, 2014）．本研究では土壌水分の観測を目的としているため，観測期間中は定期的に実験圃場内の除草を行い，可能な限り裸地を維持した．

観測区中央部に Fig. 1 の通り機器を設置した．信号への影響が少ないと思われる木製の杭の上に GNSS アンテナを設置し，GNSS 信号の観測を行った．アンテナ高さは 1.6 m とした．圃場の表層土壌の水分量の観測のため，静電容量法を採用した 5TM 誘電率土壌水分計 6 本およびデータロガー ZL6（いずれも METER 社）を設置した．各水分計はデータロガーから 3 m 離して放射状に設置し，10 分ごとに計測を行った．また，GNSS 衛星が発する L バンド周波数帯における土壌への電波浸透深度は，土壌体積含水率が 10 % 以上の場合 5 cm 未満とされているため，水分計の設置深度は 3.5 cm とした（Ha, 2018）．なお，6 本の水分計の内の 1 本については出力値が極端に低い傾向にあったため，本研究の解析からは除外することとした．結果として，5 本の水分計から得られる体積含水率の平均値を圃場の体積含水率（θ_m: m^3 m^{-3}）とし，GNSS-IR の解析における比較対象とした．また，本研究では水分計に対する個別校正は実施せず，メーカーが提供する標準校正式を用いて体積含水率へ換算した．さらに測定値のばらつきを把握するため，5 本の水分計の測定値の標準偏差（SD）を算出し，結果に併記した。

2.3 解析

GNSS 信号受信システムで取得した衛星観測データより，SNR（信号対雑音比），衛星仰角 · 方位角，時刻のデータを抽出して解析を行った．なお，受信システムでは GPS，Galileo, GLONASS, BeiDou の衛星情報を取得したが，本研究においては GPS 衛星（32 基）から得られる情報のみを利用した．また，仰角と方位角については後述する再計算により高精度化した値を解析に用いた．本研究においては，1）GNSS-IR を用いた場合の水分測定範囲，2）GNSS-IR を用いた土壌水分量推定の精度検証の 2 項目について調査した．解析期間は，降雪の無い期間である 2022 年 9 月 19 日から 12 月 8 日までの 81 日間とした．

2.3.1 土壌水分測定範囲の検討

GNSS-IR での土壌水分の測定位置は，GNSS 間接波の地表面反射点であると仮定される．この反射点の位置は，GNSS 衛星と受信機の相対的な位置関係に加えて，信号波の散乱を考慮した楕円形状のフレネルゾーンによって近似される．フレネルゾーンの長辺長 a（m）と短辺長 b（m）はそれぞれ式（2），式（3）で表せる（Larson et al., 2010）．

$$a = \frac{\sqrt{\lambda h \sin E}}{(\sin E)^2} \tag{2}$$

$$b = \frac{\sqrt{\lambda h \sin E}}{\sin E} \tag{3}$$

λ は GNSS 信号波長（m），E は衛星仰角（度），h はアンテナ高（m）である．また，フレネルゾーンの中心点からアンテナまでの距離 D（m）はアンテナ · フレネルゾーン中心点 · 衛星の位置関係から，三角比を用いて導出した幾何学的な関係式（4）で求めることができる．

$$D = \frac{h}{\tan E} \tag{4}$$

本受信システムによる GNSS-IR の土壌水分測定範囲を明らかにするため，2022 年 9 月 19 日を例として，この日の 24 時間に受信システムに捕捉された全 GPS 衛星のフレネルゾーンを求めた．式（2）–（4）に GPS L1 信号の $\lambda = 0.19029$ m，解析に用いた衛星仰角の範囲 E（後述），アンテナ高 $h = 1.6$ m を代入して捕捉した各衛星のフレネルゾーンを求め，それぞれの衛星の飛来した方位角を元に国土地理院空中写真図上の観測区の地図にフレネルゾーンの広がりを描写した．なお，GPS 衛星は約 12 時間の周回周期を持つため，衛星の飛来方向と時刻は毎日わずかにずれながらもほぼ同じであり，フレネルゾーンの広がりについても同様である．

2.3.2 土壌水分量の推定に関する解析

解析においては，オープンソースの GNSS 干渉反射波解析ソフトウェアである ‘gnssrefl’ を利用した（Larson, 2024）．また，入力データフォーマットの変換や gnssrefl 出力値の整理には，Python で新たに記述したプログラムを用いた．まず，NMEA フォーマットにおける個々の衛星の仰角 · 方位角の値は整数値で出力されるため，正確性に欠ける．そこで，International GNSS Service（IGS）が公開している精密暦を用いて再計算を行い，より精密な衛星仰角 · 方位角を解析に利用した（Männel et al., 2020）．なお，IGS の精密暦は観測から 3 – 9 時間後に公開されるため，精密暦を用いて軌道の再計算を行う場合，GNSS-IR 法の解析には 3 – 9 時間程度の遅延が生じることとなる．続いて，マルチパスの影響が大きくなる低仰角の衛星データを抽出した．Chew et al.（2016）によれば，一般に衛星仰角 5 度から 30 度の範囲において解析に適した SNR 干渉波形が観測されるとされており，他研究においてもこの閾値が用いられていることが多い（Martín et al., 2020）．本研究では，仰角 5 度のデータを用いた場合，測定範囲が圃場区画外にまで及ぶと考えられたため，7 度から 30 度の範囲の衛星データを抽出して解析した．また，本研究では上昇中（衛星仰角が増加している状態）および下降中の衛星のいずれも解析対象とした．GNSS-IR では上昇中と下降中のどちらの場合も低仰角域で同様の干渉波形が得られる．そこで本研究では，gnssrefl の処理手順に従い，下降経路については仰角の時間変化を反転させて上昇中の軌道と同じ向きの干渉

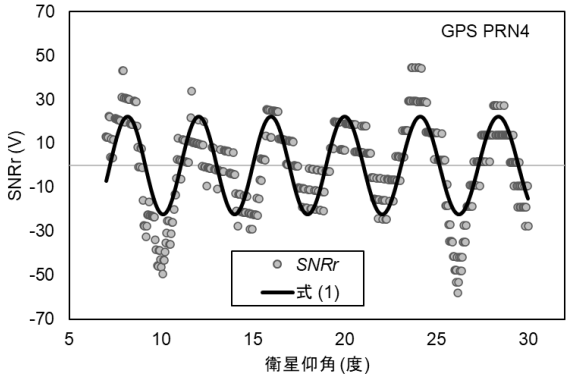


Fig. 2 SNR_r と衛星仰角の関係（SNR 干渉波形）および式（1）による当てはめ．GPS PRN（衛星番号）4 の昇起中の一例.
Relationship between SNR_r and satellite elevation angle (SNR interferogram), fitted by Equation (1): example for GPS PRN 4 during its ascending pass.

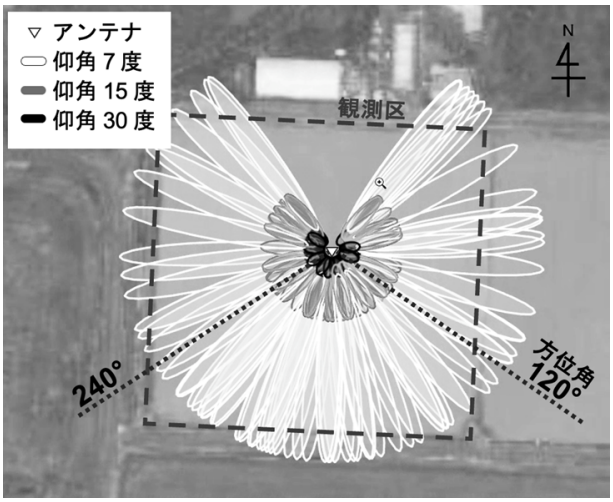


Fig. 3 2022 年 9 月 19 日に捕捉された全 GPS 衛星のフレネルゾーンの範囲．国土地理院「地理院地図」（2026 年 2 月 26 日閲覧）を基に筆者作成.
Fresnel zone extents of all GPS satellites captured on 16 September 2022. The aerial photograph was obtained from the Geospatial Information Authority of Japan (retrieved February 26, 2026).

波形に変換した．その上で上昇 · 下降中を区別せずに両データを解析に用いた．

圃場における観測によって得られる SNR データには，解析に用いるマルチパス由来の干渉波形以外にも上昇 · 下降のトレンドがある．このトレンドを除去し波形を明瞭化するため，対数スケールの SNR（dB）を線形スケール（V）に変換した後，SNR と仰角の関係を 2 次多項式で近似して元の SNR 値から差し引き，補正後の SNR 値（SNR_r）を得た．次に SNR_r に対して，Lomb-Scargle ピリオドグラム法を用いて周期性解析を行い，ピーク周波数を導出した（Lomb, 1976; Scargle, 1982）．この際，波形が不明瞭なデータを解析過程から除外するため，ピーク信号対雑音比（Peak Signal to Noise Ratio: *PSNR*）を用いて波形の明瞭性を確認した．*PSNR* は対象とするデータのピーク周波数における振幅を，全解析期間における振幅の平均で除算することで求められるもので，本研究では既往研究に倣って *PSNR* が 3.5 以上の明瞭な波形のみを解析に用いた．

続いて，周期性解析を用いて導出したピーク周波数と式（5）を用いて反射体高さを導出した．

$$H_{\mathrm{eff}} = \frac{1}{2} f_{\mathrm{m}} \lambda \tag{5}$$

ここで，H_{eff} は有効反射体高さ（m），f_{m} はピーク周波数，$\lambda = 0.19029$ m である．次に，SNR_r を非線形最小二乗法によって式（1）に当てはめた（Fig. 2）．この際 H には式（5）より得られた H_{eff} を用いた．当てはめには Levenberg-Marquardt 法を用い，フィッティングパラメータは振幅 A と位相 φ（deg）とした．

ここまでの解析において導出した，$A, H_{\mathrm{eff}}, \varphi$ はいずれも地表面の粗度や誘電率の変化に影響を受けるパラメータとされている．衛星軌道ごとに期間中の結果値をまとめ，Chew et al.（2016）に倣って以下の基準化を行うことでこれらのパラメータの相対的な変動を求めた．まず，A については上位 20 % の平均値を基準値とし，A を基準値で除算することで A の最大値が 1 付近となるように標準化し，これを A_{s} とした．H_{eff} は全期間中の最低値を基準とし，これを H_{eff} から差し引くことで土壌に対する電波の浸透深度（H_{dep}）を導出した．φ については，解析期間中の φ の値の小さいものから 15 % の平均値を基準値とし，φ から基準値を引くことで位相のずれ（Phase offset: φ_{o}）に変換した．

これらの基準化された A_{s}，H_{dep}，φ_{o} を日平均化し，それぞれについて誘電率水分計の日平均値（θ_{m}）との相関を調べた．両者間の相関式を作成した上で，最も良い相関が得られた結果について，その相関式を用いて土壌体積含水率の推定値（θ_{e}）を導出した．θ_{e} と圃場の実測値 θ_{m}（単位はいずれも $\mathrm{m^3\ m^{-3}}$）を比較し，両者間の二乗平均平方根誤差（Root-Mean-Square Error: RMSE）を求めた．以上の解析を，圃場に全方位から飛来する全 GPS 衛星信号に対して行った．加えて，北東側に位置する建物による信号への影響が懸念されたため，南側（方位角 120 – 240 度）から飛来する衛星信号に限定した解析も行った．

3. 結果と考察

3.1 GNSS-IR による土壌水分測定範囲

2022 年 9 月 19 日の 24 時間に本受信システムが捕捉した GPS 衛星から得られた信号波に GNSS-IR を適用した場合のフレネルゾーンを Fig. 3 に示す．フレネルゾーンはアンテナ設置位置を中心に観測区の大部分を覆っており，特に低仰角の反射波の影響範囲が広いことがわかる．特筆すべき点として，北側に測定の出来ない範囲が

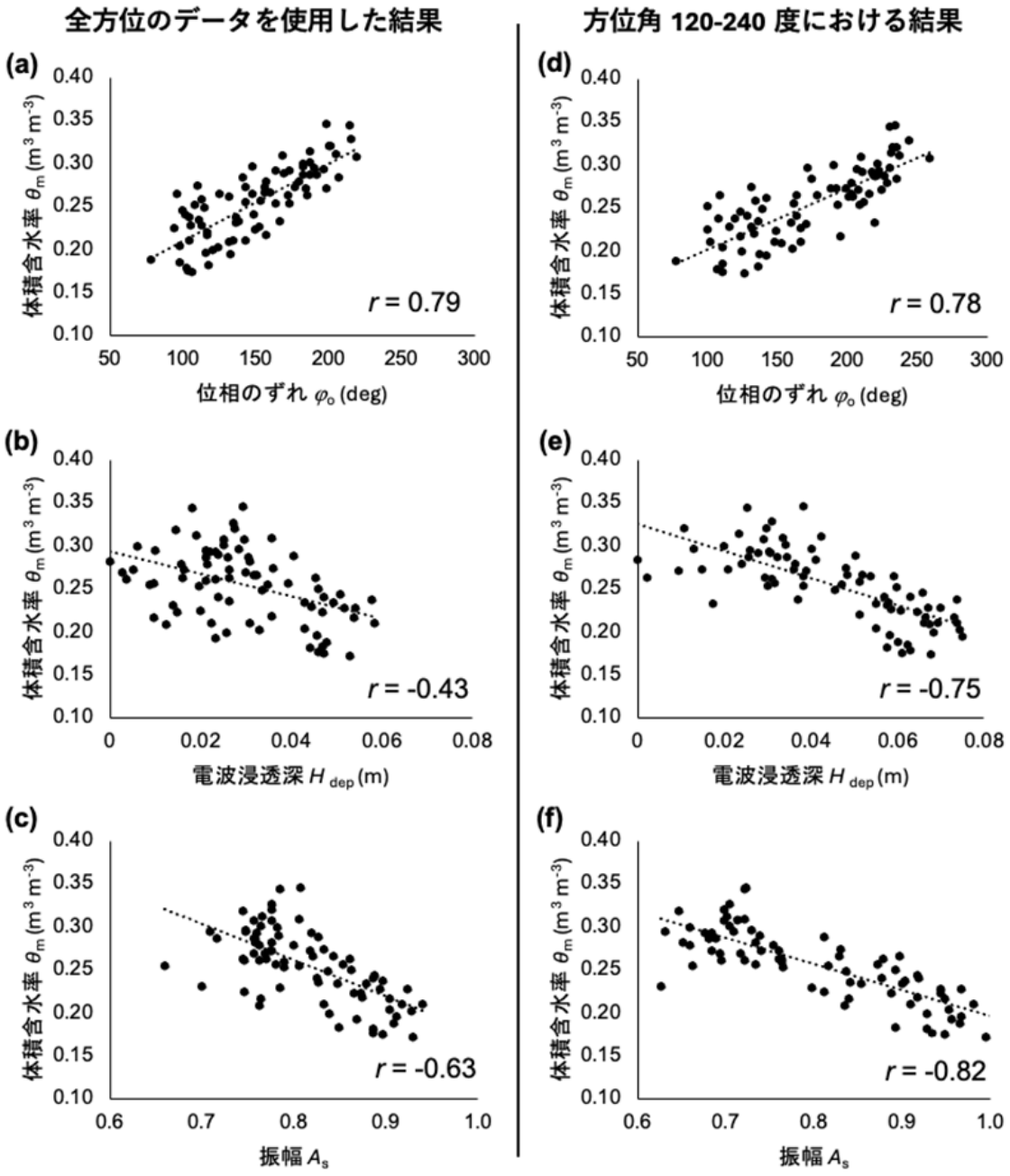


Fig. 4 位相のずれ φ_o，電波の浸透深度 H_{dep}，振幅 A_s と実測の土壌水分 θ_m の関係.
Relationships between GNSS-IR-derived parameters (phase offset φ_o, penetration depth H_{dep} and amplitude A_s) and measured soil moisture θ_m.

生じているが，これは GPS 衛星の軌道が北極側を通らない 55 度の軌道傾斜角を取るためである．フレネルゾーンの分布（Fig. 3）から，本研究における受信システムの水分測定範囲を概算するために，式（2），（4）に実験・解析で用いた h，E，λ を代入して，フレネルゾーンの長辺半径 a とアンテナからフレネルゾーン中心までの距離 D を算出すると，アンテナに最も近いフレネルゾーン端点 $D-a$ の最小値は約 1.5 m，最も遠い端点 $D+a$ の最大値は約 38 m であった．これらそれぞれを内側半径および外側半径とするドーナツ状の領域を本研究の水分測定範囲と仮定し，さらに北側の衛星軌道が通らない範囲（60 度と仮定）を除外して測定範囲を概算すると，本解析条件では約 3773 m^2 の範囲で土壌水分を推定できることが分かった．なお，より軌道傾斜角の高い GLONASS（64.8 度）等の信号を利用した場合，この測定不可範囲を縮小できる可能性がある．また，測定範囲の外径についてもアンテナ高を高く設定することで理論上拡大可能である．

3.2 GNSS-IR を用いた土壌水分推定

2022 年 9 月 19 日から 12 月 8 日（DoY262-342）における全 GPS 衛星から得られた位相のずれ φ_o，電波の浸透深度 H_{dep}，振幅 A_s と実測の土壌水分 θ_m の間の相関を Fig. 4(a) – (c) に示す．また，解析する方位角を 120 – 240 度に絞った結果を Fig. 4(d) – (f) に示す．まず，全方

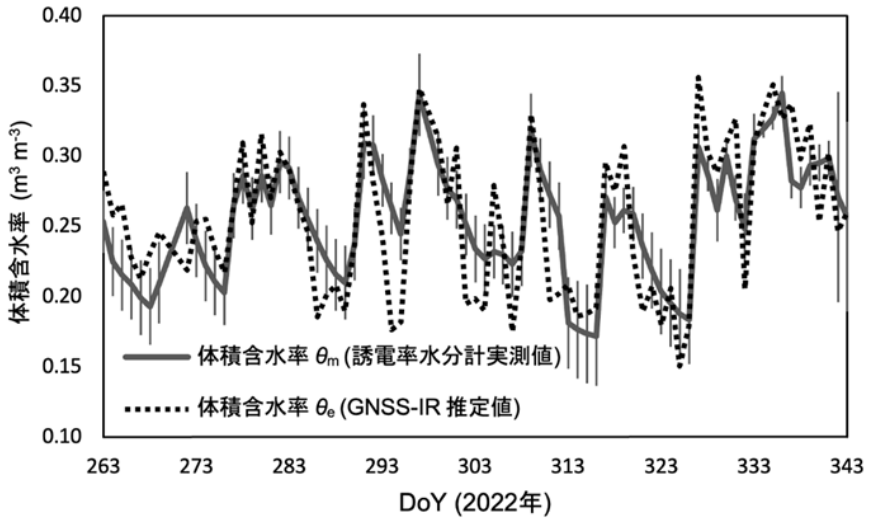


Fig. 5 本システムを用いた GNSS-IR から推定された体積含水率と実測の体積含水率の日変動．推定には全方位の位相のずれ（式（6））を使用．エラーバーは水分計 5 本の測定値の標準偏差を示す．
Diurnal variations of volumetric water content estimated from GNSS-IR using this system and of measured volumetric water content; estimation used the phase offset of GPS signals from all directions (Equation (6)). Error bars indicate the standard deviation of measurements from five soil moisture sensors.

位を解析した Fig. 4(a) – (c) に注目すると，解析により得られた位相のずれ (a) , 電波浸透深 (b)，振幅 (c) はそれぞれ土壌水分と相関を示した．位相のずれ (a) は強い正の相関で相関係数は $r = 0.79$，電波浸透深 (b) は弱い負の相関で相関係数は $r = -0.43$，振幅 (c) は負の相関で相関係数は $r = -0.63$ であった．

φ_o と θ_m の相関については，既往研究においても高い相関が見られており（Larson et al., 2010），Fig. 4(b) , Fig. 4(c) と比べても最も高い相関を示した．本研究では φ_o と θ_m は正の相関を示したが，これは土壌水分の増加に伴って土壌の複素誘電率が増大すると，地表面の複素反射係数の位相が変化し，それに応じて反射波の位相遅延が大きくなったためと考えられる（Zavorotny et al., 2010）．電波浸透深 H_{dep} と θ_m の負の相関については，土壌水分量の増加により電波の浸透深が小さくなるためであり，この傾向は理論モデルとも合致する（Chew et al., 2014）．しかし，解析期間中の H_{dep} の変動は 0 – 0.06 m 程度と小さく，地表面標高の変動により誤差が生じやすいため，φ_o ほど強い相関を示さなかったと考えられる．同様に，振幅 A_s についても土壌水分 θ_m との間に負の相関が認められたものの，φ_o と比較して顕著なものではなかった．A_s は GNSS 直接波に対する反射波の干渉量を表しており，地表面が均平で粗度や植生の影響が無視できる場合，A_s は主に地表面における電波反射係数によって規定される．一方で実際の圃場条件では反射波は必ずしも鏡面反射に限られず，土壌水分に伴う地表面の電磁特性の変化に加えて，表面粗度や微地形による鏡面反射／拡散散乱の割合，含水率の鉛直分布やアンテナの受信特性などの影響を受けやすい．そのため，既往研究でも A_s と土壌水分の関係は条件依存であり，その相関の正負の傾向は一意に定まりにくいことが報告されている (Chew et al., 2014)．さらに，植生は反射波の減衰 · 散乱を通じて A_s を低下させ，土壌水分との見かけ上の負の相関を強め得る（Chew et al., 2015; 2016）．本観測期間中は可能な限り裸地を維持するよう定期的な除草や除草剤の散布を行ったが，植生を完全に取り除くことは難しく，得られた A_s には植生の影響が含まれた可能性がある．以上より，本研究で見られた A_s と θ_m の負の相関は，土壌誘電率の変化による反射特性の変化に加えて，散乱条件や偏波 · 植生の影響が重畳した結果として現れたと考えられる．

続いて，用いる衛星信号を方位角 120 – 240 度（Fig. 3 参照）から飛来するものに限定して解析した結果（Fig. 4(d) – (f)）について述べる．これは圃場北東方向から飛来する信号については，建物 · 地形等の影響を受けていることが懸念されたためである．位相のずれ Fig. 4(d) は強い正の相関を示し相関係数は $r = 0.78$，電波浸透深 Fig. 4(e) と振幅 Fig. 4(f) はいずれも強い負の相関で相関係数はそれぞれ $r = -0.75, -0.82$ となった．位相のずれ φ_o と θ_m の相関には大きな変化がないものの，電波浸透深度 H_{dep} と振幅 A_s の土壌水分との相関が向上した．このように解析対象とする方位角を限定することによって GNSS-IR による土壌水分の推定精度が向上できる可能性が示唆された．

最後に，全方位を解析した際に最も相関が高かった位相のずれと実測土壌水分量の相関式を元に土壌水分の推定を行った．Fig. 4(a) の水分と φ_o の相関式は以下の式で表され，この式に解析より得られた φ_o を代入することにより推定土壌水分量 θ_e が得られる．

$$\theta_e = 0.0009\varphi_o + 0.1179 \tag{6}$$

Fig. 5 に全解析期間中の土壌水分量推定値 θ_e と実測値 θ_m の推移を示す．まず，実測値 θ_m の推移とその標準偏差（SD）に注目すると，5 本の水分計の SD は基本的に $\pm 0.02\ m^3m^{-3}$ 程度で推移しており，特に乾燥に伴い θ_m が $0.2\ m^3m^{-3}$ を下回る際には $\pm 0.03\ m^3m^{-3}$ 程度のばらつきを示している．このような中，推定値 θ_e は全期間を通じて概ね θ_m の SD の範囲で推移しており，θ_m の変動を比較的良好に再現したといえる．期間中における θ_e と θ_m の RMSE は $0.03\ m^3\ m^{-3}$ であり，実測値のばらつきを考慮しても，本受信システムを用いた GNSS-IR により比較的良い精度で土壌水分量が推定できたと考えられる．

土壌の乾燥過程において θ_e が θ_m よりも急激に低下する傾向が時折見られたが，この挙動は GNSS-IR と誘電率水分計の観測深度の違いと乾燥過程における鉛直水分分布の不均一性が影響した可能性が考えられる．前述のように土壌水分量の増加により電波の浸透深は小さくなり，GNSS-IR による観測量は地表面近傍の浅い土層の水分状態に強く感度を持つようになる．一方，降雨後の乾燥過程では最表層が蒸発により急速に乾燥するのに対し，誘電率水分計が設置されている深さ数 cm の土層はより緩やかに乾燥する．そのため，GNSS-IR による推定値 θ_e は乾燥の進んだ表層の状態を強く反映し，より深い層の情報を含む誘電率水分計測定値 θ_m と比べて急激に低下したものと解釈できる．本研究では，Fig. 4(a) に示すように，位相のずれ φ_o と誘電率水分計で測定した体積含水率 θ_m の関係から回帰式（6）を求め，GNSS-IR の有効観測深における水分状態を θ_m で代表させている．そのため，降雨直後など鉛直方向の水分分布が比較的一様な条件では φ_o– θ_m 間の関係が良好に成り立つ一方，乾燥過程のように表層と誘電率水分計の測定深さの間で大きな鉛直勾配が発達すると，誘電率水分計の測定値と GNSS-IR が感度を持つ地表面浅層の平均値の間に乖離が生じ，式（6）による換算値 θ_e が θ_m を過小評価する一因となっている可能性がある．以上より，安価な GNSS 受信システムを用いた GNSS 干渉反射法により面的な表層土壌水分の日平均の土壌水分を推定できることが示されたが，乾燥過程では θ_e が過小評価される可能性も示唆された．

4. まとめ

本研究では，圃場スケール（数 ～ 数十 m）の現場土壌水分測定法となりうる GNSS 干渉反射法について，市販の安価な部品を組み合わせた GNSS 受信システムを作製し，国内の圃場において水分測定範囲の検討と水分推定精度の評価を行った．結果として，GPS 衛星群を利用した場合，衛星の飛来しない北側約 60 度を除く扇形の範囲において，比較的良い精度で土壌水分（深さ 0–5 cm）の日変動を推定可能であることがわかった．解析より得られた位相のずれ φ_o，電波の浸透深度 H_{dep}，振幅 A_s は実測の土壌水分 θ_m とそれぞれ相関を示したが，最も高い相関を示したのは φ_o であった．また，障害物の無い方位角から得られたデータを利用することで，これらの相関が向上する可能性が示された．

一方で GNSS 干渉反射法にはいくつかの課題も残る．GNSS 信号波の土壌に対する有効浸透深は土壌水分量に依存して変化するため，推定値は一定深度の含水率ではなく水分条件に応じた表層平均を反映する可能性がある．また，土壌の誘電 · 損失特性は土壌水分量に加えて粒径組成，粘土鉱物，電気伝導度等により変化することから，異なる土性への適用には，経験的アプローチだけでなく誘電率推定に基づく物理モデルベースのアプローチとの融合も効果的と考えられる（Kobayashi et al., 2024）．さらに，植生，積雪や地表面粗度は反射波の減衰 · 散乱を通じて推定精度に影響し得るため，その定量化と補正手法の整備が望まれる．加えて，アンテナ高を高くすることで一般に観測範囲は拡大するとされるが，アンテナ高の変化は干渉波形の周期および反射領域に影響を及ぼし，推定精度に影響し得る．そのため，複数のアンテナ高条件で比較観測を行い，最適な設置高さを検討することが今後の課題である．

本研究の成果より，NMEA フォーマット（出力が整数値）で L1 信号のみが利用可能な安価なアンテナ · 受信機を用いた場合でも GNSS-IR により表層土壌水分を面的に推定できることが示されたが，今後は L2 信号も取得できる中価格帯のアンテナ · 受信機や，RINEX フォーマット（出力が実数値）で L5 信号も取得可能な高価 · 高精度な受信機を利用した GNSS-IR との比較が望まれる．さらに，本研究では GPS 衛星 32 機からの情報のみを用いて解析を行ったが，現在は GPS 以外にも，Galileo，GLONASS，BeiDou，QZSS 等の GNSS 衛星が 100 機程度運用されている．各衛星の軌道と低仰角のデータを利用する GNSS-IR の特徴を踏まえ，利用可能な衛星を選抜し解析に追加することで，GNSS-IR の時間 · 空間解像度の向上が期待される．

また，本受信システムで取得したデータの解析から得られた振幅 A_s は植生の影響を受けると報告されており，反射体高さ H_{eff} は信号の反射した高さを意味することから，水位 · 積雪深 · 草高の推定に利用可能である．本システムと GNSS-IR を用いた水位 · 積雪 · 植生情報の推定は，新しい安価な面的環境モニタリング手法として期待される．またこれと同時に，積雪 · 植生といった環境要素が GNSS-IR を用いた土壌水分推定の精度に与える影響は大きく，その定量的評価と補正手法の開発が望まれる．

謝辞

本研究の遂行にあたり，足立 望氏，上田侑輝氏，山田千翔氏に多大なご助力を頂いた．また，鳥取大学技術部 · 生物生産管理部門の岩下雅子氏，梅寶貴之氏，加納由紀

子氏，佐藤 健氏，乾燥地研究センター・上山逸彦氏に支援を頂いた．本研究は鳥取大学乾燥地研究センター共同研究（課題番号 No. 04B2016，06B2011，08B2013），鳥取大学国際乾燥地研究教育機構，2018 年度農業農村工学会戦略的研究支援，JSPS 科研費（23K17386, 24H00057, 26K01842）の助成を受けた．ここに記して謝意を示す．

引用文献

Chew, C., Small, E.E. and Larson, K.M. (2016): An algorithm for soil moisture estimation using GPS-interferometric reflectometry for bare and vegetated soil. GPS Solutions, 20(3): 525–537, doi:10.1007/s10291-015-0462-4.

Chew, C.C., Small, E.E., Larson, K.M. and Zavorotny, V.U. (2014): Effects of near-surface soil moisture on GPS SNR data: development of a retrieval algorithm for soil moisture. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 52(1): 537–543, doi:10.1109/TGRS.2013.2242332.

Chew, C.C., Small, E.E., Larson, K.M. and Zavorotny, V.U. (2015): Vegetation sensing using GPS-interferometric reflectometry: theoretical effects of canopy parameters on Signal-to-Noise ratio data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 53(5): 2755–2764, doi:10.1109/TGRS.2014.2364513.

Edokossi, K., Calabia, A., Jin, S. and Molina, I. (2020): GNSS-reflectometry and remote sensing of soil moisture: A review of measurement techniques, methods, and applications. Remote Sensing, 12: 2–26, doi:10.3390/rs12040614.

Euriques, J.F., Krueger, C.P., Machado, W.C., Sapucci, L.F. and Geremia-Nievinski, F. (2021): Soil moisture estimation with GNSS reflectometry: a conceptual review. Revista Brasileira de Cartografia, 73: 413– 434, doi:10.14393/rbcv73n2-55033.

Georgiadou, P.Y. and Kleusberg, A. (1988): On carrier signal multipath effects in relative GPS positioning. Manuscripta Geodaetica 13(3): 172–179, doi:10.1007/BF03655245.

Ha, M.C. (2018): Evolution of soil moisture and analysis of fluvial altimetry using GNSS-R. Climatology. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2018. English.

開發一郎 (2017): 地球観測衛星の地中水観測. 地下水学会誌, 59: 3–9, doi:10.5917/jagh.59.3.

Kavak, A., Xu, G. and Vogel, W.J. (1996): GPS multipath fade measurements to determine L-band ground reflectivity properties. Proceedings of the Twentieth NASA Propagation.

Kobayashi, D., Aoki, S., Sato, N., Maruo, Y., Kodaira, S. and Noborio, K. (2024): Estimation of relative permittivity for measuring soil texture-dependent water content by GNSS-IR. GPS Solutions, 28: 210, doi:10.1007/s10291-024-01747-y.

Larson, K.M. (2016): GPS interferometric reflectometry: applications to surface soil moisture, snow depth, and vegetation water content in the western United States. WIREs Water, 3(6): 775–787, doi:10.1002/wat2.1167.

Larson, K.M. (2024): Gnssrefl: an open source software package in python for GNSS interferometric reflectometry applications. GPS Solutions, 28(4): 165, doi:10.1007/s10291-024-01694-8.

Larson, K.M., Braun, J.J., Small, E.E., Zavorotny, V.U., Gutmann, E.D. and Bilich, A.L. (2010): GPS multipath and its relation to near-surface soil moisture content. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 3(1): 91–99, doi:10.1109/JSTARS.2009.2033612.

Lomb, N.R. (1976): Least-squares frequency analysis of unequally spaced data. Astrophysics and Space Science, 39(2): 447–462, doi:10.1007/BF00648343.

Männel, B., Brandt, A., Nischan, T., Brack, A., Sakic, P. and Bradke, M. (2020): GFZ rapid product series for the IGS, doi:10.5880/GFZ.1.1.2020.003.

Martín, A., Ibáñez, S., Baixauli, C., Blanc, S. and Anquela, A.B. (2020): Multi-constellation GNSS interferometric reflectometry with mass-market sensors as a solution for soil moisture monitoring. Hydrology and Earth System Sciences, 24(7): 3573–3582, doi:10.5194/hess-24-3573-2020.

Nievinski, F.G. and Larson, K.M. (2014): Forward modeling of GPS multipath for near-surface reflectometry and positioning applications. GPS Solutions, 18(2): 309–322, doi:10.1007/s10291-013-0331-y.

Scargle, J.D. (1982): Studies in astronomical time series analysis. II — Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data. The Astrophysical Journal, 263: 835, doi:10.1086/160554.

Tabibi, S., Nievinski, F.G., Van Dam, T. and Monico, J.F.G. (2015): Assessment of modernized GPS L5 SNR for ground-based multipath reflectometry applications. Advances in Space Research, 55(4): 1104–1116, doi:10.1016/j.asr.2014.11.019.

Topp, G.C., Davis, J.L. and Annan, A.P. (1980): Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. Water Resources Research, 16(3): 574–582, doi:10.1029/WR016i003p00574.

Zavorotny, V.U., Larson, K.M., Braun, J.J., Small, E.E. and Gutmann. E.D. (2010): A physical model for GPS multipath caused by land reflections: Toward bare soil moisture retrievals. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 3(1): 100–110, doi:10.1109/JSTARS.2009.2033608.

Zreda, M., Shuttleworth, W.J., Zeng, X., Zweck, C., Desilets, D., Franz, T. and Rosolem, R. (2012): COSMOS: the COsmic-ray Soil Moisture Observing System. Hydrology Earth System Sciences, 16(11): 4079–4099, doi:10.5194/hess-16-4079-2012.

This article is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

How to cite this article: KADOTA, N., SAITO, T., INOSAKO, K., NOBORIO, K., FUJIMAKI, H. and MORI, Y. (2026): Development of a low-cost areal soil moisture estimation system using GNSS Interferometric Reflectometry. J. Jpn. Soc. Soil Phys., 163: 29–38, doi:10.34467/jssoilphysics.163.0_29. (in Japanese with English abstract)

要　　旨

GNSS 干渉反射法（GNSS-IR）は GNSS 受信機に到達する直接波と地表反射波の干渉特性を解析し圃場スケールでの表層土壌水分の面的な推定を可能とする手法である．本研究では市販最安価帯のアンテナ・受信機とマイクロコンピュータを組み合わせた計一万円程度の受信システムを構築し，国内の圃場において GNSS-IR による水分測定範囲の検討と水分推定精度の評価を行った．結果として，GPS 衛星の L1 信号を利用した場合，本システムにより衛星の飛来しない北側約 60 度を除く範囲の表層水分の推定が可能であることがわかった．また，干渉反射波形解析から得られた位相のずれ，振幅，反射体高さと実測土壌水分量の間にはそれぞれ相関がみられ，解析に用いる衛星の方位角を限定することで相関が向上する傾向がみられた．最も高い相関を示した位相のずれの回帰式を用いることにより，現場の土壌水分を比較的良い精度（RMSE $= 0.03$ m^3 m^{-3}）で推定できた．

キーワード：GNSS-IR，体積含水率，スマート農業，GPS（Global Positioning System），gnssrefl