J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 163, p.17 ～ 28 (2026)

GNSS 反射法を用いた土壌水分および環境要素のモニタリング

齊藤忠臣 [1]· 門田直哉 [2]· 猪迫耕二 [1]

Monitoring of soil moisture and environmental parameters using GNSS reflectometry

Tadaomi SAITO[1], Naoya KADOTA[2] and Koji INOSAKO[1]

Abstract: Global Navigation Satellite System Reflectometry (GNSS-R), which utilizes satellite signals from GNSS orbiting the Earth for positioning, has attracted attention as a method for monitoring environmental parameters. GNSS-R is considered capable of estimating ocean surface wind speed, wave height, sea level and ice sheets, as well as soil moisture, vegetation, and snow depth on land, by analyzing the signals reflected off the Earth's surface, among the satellite signals (electromagnetic waves) transmitted by GNSS. Receivers and platforms available for GNSS-R cover a wide variety of types, including not only ground stations but also ships at sea, airborne platforms such as balloons, aircraft, and UAVs (unmanned aerial vehicles), as well as satellites in orbit. The first part of this paper presented an overview of GNSS-R, covering available platforms, antenna mounting configurations, analysis techniques and its key characteristics. In the latter part of this paper, we focused on GNSS Interferometric Reflectometry (GNSS-IR), a specific form of GNSS-R that has seen remarkable research progress in recent years, particularly for estimating soil moisture using this technique. GNSS-IR is a method that uses the signal-to-noise ratio (SNR) as the analytical parameter and is highly scalable due to its applicability to GNSS base stations used for standard static positioning. In this paper, we outlined the principles and features of GNSS-IR, discussed its temporal and spatial resolution in measurements, the analysis methods, software used and the accuracy of soil moisture estimation. Finally, we discussed the current challenges and future prospects of this technique.

Key Words : surface soil moisture, GNSS Interferometric Reflectometry, GPS (Global Positioning System), gnssrefl

1. はじめに

土壌水分は地表の環境要素の中で最も重要な要素の一つであり，水資源 · 水循環，陸域生態系，気候システム，防災，農業といった，多岐にわたる分野で重要なパラメータとなっている．近年，誘電率水分計を中心としたセンサ類の開発 · 普及に伴い，土壌水分の非破壊かつ高時間分解能でのモニタリングが可能となった．しかし，土壌水分は降雨，微地形，土壌の不均一性の影響を受け，空間変動性が高いことが知られており，センサにより「点」で測定されたデータを対象域全域の代表値として扱うことについては，常に議論の対象とされてきた．一方，土壌水分を「面（広域）」で推定する手法として，リモートセンシングの技術も発展してきた．現在までに地球観測衛星からの光学 · 赤外線 · 熱赤外線や，合成開口レーダー（Synthetic Aperture Radar: SAR）による観測を元に，広域の土壌水分分布を推定するための研究が進められている（開發, 2017）．中でも欧州宇宙機関（ESA）による土壌水分 · 海洋塩分衛星（SMOS）や，米航空宇宙局（NASA）の土壌水分アクティブ · パッシブ衛星（SMAP）といった専用の衛星ミッションは，SAR を用いての全球スケールでの土壌水分マッピングを可能としている (Kerr et al., 2001; Entekhabi et al., 2010)．また，地上から土壌水分を「面」で測定する観測機器として，宇宙線土壌水分観測システム（COsmic-ray Soil Moisture Observing System: COSMOS）や地中レーダー（Ground Penetrating Radar: GPR）といった技術の開発 · 普及も進んでいる．COSMOS は宇宙より飛来する二次宇宙線である高速中性子が水素原子に吸収されるという特徴を生かし，地表面近傍の中性子数を測定することにより，半径約 300 m の表層土壌水分量を推定するシステムである（Zreda et al., 2008）．GPR は地中に照射した電磁波の反射特性から地中の構造を探査する技術として広く普及しており，深さ方向を含む面的な土壌水分分布の推定にも利用されている（Oikawa and Saito, 2024）．しかし，地球観測衛星を用いたリモートセンシングから得られる土壌水分データは，一般的に時間的 · 空間的解像度が低いという問題があり，また COSMOS や GPR といったシステムは，導入に際し高額な設備投資が必要となる．近年，スマート農業の普及と共に，特に圃場スケールでの土壌水分データに対する需要が高まっており，安価かつ高時間分解能での面的な土壌水分モニタリング手法の開発が望まれている．

[1]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
[2]School of Environmental Sciences, University of Guelph, 50 Stone Road East Guelph, Ontario, N1G 2W1, Canada.
2025 年 9 月 19 日受稿　2026 年 4 月 16 日受理

このような中，GPS（Global Positioning System）を含む全球測位衛星システム（Global Navigation Satellite System: GNSS）の衛星信号を利用して，土壌水分を含む環境要素をモニタリングする「GNSS 反射法（GNSS-reflectometry: GNSS-R）」が注目されている．GNSS-R は本来測位のために地球を周回する多数の GNSS 衛星群が照射する衛星信号（電磁波）のうち，地上 · 海上での反射波を解析 · 利用することで，反射面における環境要素を推定する手法である．GNSS-R は，用いる信号受信器の種類（例えば地上局，船舶 · 航空機）や設置形態（単体 · 複数，向き），また解析方法（理論 · 経験モデル）により細分化され，それぞれの観測可能項目も，海上の波動 · 風速，地上での土壌水分，植生，水位，積雪等，多岐にわたる．本稿では，この GNSS-R 全般の様々な形態や解析手法，測定項目，特徴等を紹介した上で，その一形態として近年特に研究の進捗が著しい GNSS 干渉反射法（GNSS-Interferometric Reflectometry: GNSS-IR）と，これを用いた土壌水分の推定について詳述し，その可能性や将来展望について論説する．

2. GNSS 反射法（ GNSS-R ）

2.1 GNSS 衛星および衛星信号

GNSS-R に先立ち，GNSS 衛星および衛星信号の特徴について説明する．GNSS は全球での位置 · 時間情報を提供することを目的とした衛星システムであり，主要な GNSS には GPS（米国），GLONASS（ロシア），Galileo（EU），BeiDou（中国），QZSS（みちびき：日本），NavIC（インド）が挙げられる．運用状況によって増減するものの，2024 年現在では約 130 機の GNSS 衛星が運用されており，新たなミッションの追加により今後とも増加していくことが予想されている．GNSS 衛星が利用する軌道にはいくつかの種類があり，全球をカバーし地球を約 12 時間で一周する中高度地球軌道（GPS，GLONASS，Galileo など）や，特定の地域を集中的 · 持続的にカバーする静止軌道（BeiDou と QZSS の一部），傾斜地球静止トランスファー軌道（BeiDou, NavIC），準天頂軌道（QZSS）がある．

GNSS 衛星の信号には，大気の影響と信号の減衰が少ない L バンド（1-2 GHz）の周波数帯が主に使用されている．各システム間で一部互換性を持ちつつも若干異なる周波数が使用されており，例えば GPS の場合，L1 帯：1.575 GHz，L2 帯: 1.227 GHz，L5 帯: 1.176 GHz の 3 種となっている．また，GNSS 衛星の信号は電波が伝搬する方向に向かって時計回りに回転する右旋円偏波（Right-Hand Circular Polarization: RHCP）として送信されており，左旋円偏波（Left-Hand Circular Polarization: LHCP）は基本的に海面 · 地表面 · 人工物等からの反射信号として受信される．

2.2 GNSS-R の概要と土壌水分測定における位置づけ

GNSS 受信器が受信する信号には，GNSS 衛星群から受信機へと直接到達する「直接波」だけでなく，海面 · 地表面 · 人工物等からの「反射波（マルチパス）」が含まれる．GNSS 衛星の電波は，反射面との相互作用の後，その特性（振幅，位相，偏波，周波数）を変化させる（Roussel et al., 2016）．この反射波を解析 · 利用することで，反射面における環境要素を推定する手法が GNSS-R である．具体的には，受信機から得られるマルチパス信号を元に，「直接 · 反射波の経路長の差」，「ドップラーシフト」，「搬送波の位相」，「電力比」，「信号対雑音比（Signal to Noise Ratio: SNR）」といった解析パラメータが得られ，反射面における粗度 · 誘電特性 · 高度情報といった情報を介して多様な環境要素が測定可能とされている．なお，GNSS-R の呼称は，年代（例えば GPS が主流の時期は GPS-R）や後述する受信器の形態の細分化等に応じて文献により異なる場合もあるが，本稿ではこの技術の総称を GNSS-R と呼称する．

GNSS-R により計測可能な環境要素は多岐にわたるが，土壌水分を対象とする場合，その測定原理は既存の誘電率水分計や GPR と本質的に同一である．すなわち，いずれの技術においても，水分の多寡により土壌の誘電特性が変化することを利用し，発振された電磁波の応答から水分を推定するというものである．ただし，誘電率水分計や GPR が自ら電波を発振する「アクティブ」センサであることに対し，GNSS-R は電波の発振部を既存の GNSS 衛星とし，センサ部（受信機）としては「パッシブ」のシステムとなっている．つまり，GNSS-R は装置として通常高価となる電波の発振部分を必要とせず，受信機のみによるセンシングが可能であり，安価なシステムの構築を可能としている．

また，GNSS-R は合成開口レーダー（SAR）とも高い類似性を有している．先述した NASA による衛星ミッションの SMAP では土壌水分推定にアクティブ · パッシブの両方式が採用されているが，アクティブ方式で使用されている電波の周波数帯は，GNSS 衛星の周波数帯と同じ L バンドである．したがって，SAR が衛星軌道上から L バンド電波を照射しその反射波から土壌水分の推定を行うのであれば，GNSS 衛星が測位のために照射する L バンド電波の反射波を用いても土壌水分の推定が可能ということとなる．SMAP はレーダーの送信機と受信機が同じプラットフォーム上にあり，1 機の衛星が全球をカバーできるシステムとなっているが，その分ある一地点で得られるデータの時間的 · 空間的解像度は必然的に低くなる．一方 GNSS-R の場合，1 台の受信機が常時複数の GNSS 衛星を同時捕捉するため，受信機は多方角からの反射波が到達するマルチスタティックレーダーとみなすことができる（Jia and Pei, 2018）．したがって，GNSS-R は SAR と比較して受信機に対する電波の反射点において土壌水分を高時間 · 空間分解能で推定できることとなる．なお，電波の浸透深度は主にその周波数および土壌水分に依存するが，L バンド電波の土壌水分への影響範囲は概ね深さ 5 cm 程度にとどまっており，

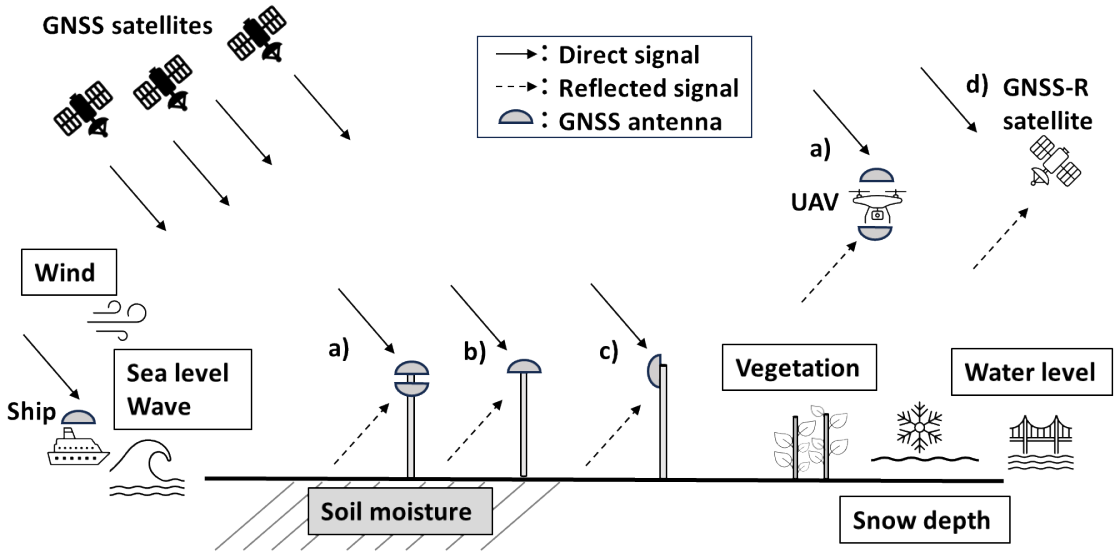


Fig. 1 GNSS-R に利用できる受信機 · プラットフォームの種類，測定項目およびアンテナの設置方法.
Types of receivers and platforms available for GNSS-R, measurement targets, and antenna mounting configurations.

SAR と GNSS-R は共に表層の土壌水分を推定する手法である点に留意が必要である（Edokossi et al., 2020）．以上のように，GNSS-R は既存の面的水分計測センサよりも安価で，衛星ミッションよりも高解像度でのデータ取得が期待できる手法といえる．

2.3 GNSS-R に利用されるプラットフォームと測定手法 · 測定項目

GNSS-R に利用可能な受信機 · プラットフォームは，地上局のみならず海上の船舶，空中の気球 · 航空機 ·UAV（無人航空機），軌道上の衛星まで多岐にわたる（Fig. 1）．具体的な測定項目としては，海上の風速 · 波浪（例えば Komjathy et al., 2004），電離層（Katzberg and Garrison, 1996），潮位 · 氷床（Strandberg et al., 2017），地上の土壌水分（Larson et al., 2008a），植生（Zhang et al., 2017），積雪深（Zhou et al., 2019），河川 · 湖沼水位（Karegar et al., 2022）などが挙げられる．また，解析手法も各種プラットフォームや測定項目，さらには後述するアンテナの設置方法に応じて様々に異なっており，現在までに反射面の特性を解析するための多様な理論モデル，半経験モデル，経験モデルが提唱されている．また，GNSS-R による計測範囲は主に地上からのアンテナの高さの関数として定義されており，アンテナ高度が上がるほど広範囲からの反射波を得て計測範囲が広がることとなる．

GNSS-R の最初のコンセプトは Martin-Neira（1993）による海面標高の推定手法として提案され，徐々に対象を海洋から地上へと広げつつ，2000 年代後半から急速に発展してきた．GNSS-R のためのアンテナの設置方法についても様々な検討がなされ，現在までに大別して a）複数アンテナ，b）天頂単アンテナ，c）水平単アンテナといった方式が提案されている（Fig.1）．GNSS は測位を目的としたシステムであるため，通常アンテナは上面（一般的にはドーム状の形状）を天頂に向けて設置される．これにより測位に対するノイズである反射波は主にアンテナの下面から受信されることとなる．したがってアンテナ下面には反射波の除去 · 軽減を目的としたグランドプレーンやチョークリングと呼ばれる金属板や同心円状の金属リングが使用されることが一般的である．複数アンテナ方式（Fig. 1 a）は GNSS-R において最初に提案されたアンテナ構成であり，天頂方向に加えて天底方向にもアンテナを設置することで，下方からの明瞭な反射波を捕捉することを目的としている．先述の通り GNSS 衛星信号は右旋円偏波（RHCP）であるが，特に衛星仰角が高い場合，反射時に RHCP に加え左旋円偏波（LHCP）の成分が発生しやすくなる（Katzberg et al., 2006）．したがって，複数アンテナ方式においては，天頂方向に RHCP アンテナ，天底方向に LHCP アンテナを設置し，高仰角の衛星データを利用することにより，直接波と反射波の明確な分離が期待される．例えば Ichikawa et al.（2019）はこのアンテナ構成を UAV に搭載し，高仰角衛星データを用いて衛星から両アンテナへ信号が到達するまでの経路差を算出し，湖面の標高データを推定している．さらに，複数アンテナ方式としては 2 アンテナに加え天底方向に RHCP アンテナを追加した構成（Egido et al., 2012）や，天頂 · 天底それぞれに水平偏波 · 垂直偏波アンテナを設置する構成も提案されている（Ceraldi et al., 2003）．

天頂単アンテナ方式（Fig. 1 b）による GNSS-R は後発的な手法ではあるが，現状最も高い普及の可能性を秘めている．これは，この方式による GNSS-R が通常の定点測位に用いられる GNSS 基地局全てに適用できる可能性があるためである．解析手法等に応じて，GNSS Interference Pattern Technique（GNSS-

IPT: Rodriguez-Alvarez et al., 2011），GNSS Interferometric Reflectometry（GNSS-IR: Larson, 2016），SNR-based GNSS reflectometry（Löfgren and Haas, 2014）といった異なる名称の手法が提案されているが，これらは解析パラメータに SNR を用いる手法となっている．この中でも最も研究の発展が著しい GNSS-IR については，次章以降で詳細に解説する．

水平単アンテナ方式（Fig. 1 c）は，天頂単アンテナ方式とアンテナの設置方向が 90° 異なる方式であるが，基本的な解析のアプローチ自体は天頂単アンテナ方式と同様である．先述の通り GNSS アンテナは通常下面からの反射波を減らす構造となっているため，水平単アンテナ方式ではアンテナ上面をあえて反射面の方向に向けることにより，反射波の影響をより強めることを目的としている．例えば，Karegar et al.（2022）は GNSS-IR を用いた河川水位の推定において，天頂単アンテナを水平単アンテナ方式に切り替えたことにより，水位の推定精度が向上したことを報告している．ただし，水平方式においてはアンテナの底部方向からの反射波を得にくいこととなるため，観測対象をアンテナ上面方向に絞った指向性のある方式であることに留意する必要がある．

2.4 衛星ミッションによる GNSS-R

GNSS-R の中でも最も特殊なプラットフォームを利用するものとして衛星ミッションによる GNSS-R が挙げられる（Fig. 1d）．衛星ミッションによる GNSS-R では，GNSS 受信機を搭載した小型 · 軽量の衛星を低軌道に投入し，反射信号の位相 · 強度やドップラーシフトから得られる遅延ドップラーマップ（Delay Doppler Map: DDM）を解析することにより，海洋 · 地上の環境要素のモニタリングを行う．既存の観測衛星と比較して，GNSS-R のための衛星は電波の発信が不要のため小型 · 小予算でのミッション実施が可能であり，雲 · 降雨や明暗による影響が少なく，マルチスタティックレーダーとして広域のデータを取得できるといったメリットがある．

2003 年にサリー · サテライト · テクノロジー（Surrey Satellite Technology Ltd. : SSTL）により打ち上げられた地球観測衛星 UK-DMC（United Kingdom Disaster Monitoring Constellation）において，陸地表面からの GPS 反射信号が検出され，また信号が海面の粗度の変化に応答し，これにより宇宙から地表や海洋表面の風速等を推定できる可能性が示された（Gleason, 2006: Clarizia et al., 2008）．これを受けて 2014 年に SSTL が GNSS-R を含む技術デモンストレーション衛星 TDS-1（TechDemoSat-1）を打ち上げ，海上の風速 · 氷床，地上の土壌水分等の観測が実施されている（Chew et al., 2016a）．また，2016 年には NASA が 8 機の小型衛星で構成される CYGNSS（Cyclone GNSS）を打ち上げ，熱帯サイクロンの強度，発生 · 発達，中心付近の高頻度風速の観測を行っている．我が国においても，2017 年に株式会社ウェザーニューズおよび株式会社アクセルスペースが世界で 3 例目となる気象 · 海象観測衛星 WNISAT-1R を軌道に投入し，日本製として初めて GNSS-R のデータおよび DDM の取得に成功している．さらに，欧州宇宙機関（ESA）と SSTL は 2025 年の投入を目指す新たなミッションとして，土壌水分，永久凍土の凍結 · 融解，氾濫 · 湿地面積，森林バイオマス，海上での風速，海氷面積の観測を目標とした HydroGNSS ミッションを計画しており，今後とも衛星ミッションによる GNSS-R による多様な環境要素の観測の発展が期待されている．

3. GNSS 干渉反射法（ GNSS-IR）と土壌水分推定

3.1 GNSS-IR の概要と特徴

GNSS-IR は GNSS-R の中でも単アンテナの構成で SNR（信号対雑音比）を解析パラメータとする手法である．先述の通り，この手法は特殊なプラットフォームや追加のアンテナ設置等を必要とせず，通常の定点測位に用いられる GNSS 基地局に適用できる点で拡張性に優れている．これに伴い近年の研究事例も多く，物理 · 理論モデルや経験 · 逆解析モデルが発達し，さらに解析用のソフトウェアの開発 · 公開も進んでいる．一方で本手法の適用にはいくつかの制限があり，主なものとして 1）一つの衛星から一つの解析データを得るために数時間程度を要するため移動するプラットフォームには適用不可能，2）低仰角の衛星データを利用するため周辺に障害物がない場所でのみ適用可能，といったものが挙げられる．GNSS-IR で測定可能な項目には，土壌水分，植生の高さ · バイオマス，積雪深などがあるが，本稿では特に GNSS-IR による土壌水分推定に焦点を当て，その理論 · 現状 · 展望について述べる．

3.2 信号対雑音比（SNR）と GNSS-IR の観測時間 · 空間

SNR は受信された搬送波位相の強さとこれに含まれる雑音の強さ（またはそのスペクトル密度）の比率を正規化したものである．SNR は本来様々な通信技術においてその通信の品質を評価するための指標であり，多くの場合デシベル（dB）またはデシベル · ヘルツ（dB-Hz）の対数スケールで表現される．SNR データを含む GNSS のデータのフォーマットには RINEX（受信機独立交換）と NMEA 0183（全米海洋電子機器協会）の 2 種のフォーマットがある．RINEX フォーマットは一般的に地殻変動観測用などの高価 · 高精度な GNSS 受信機に用いられ，SNR データは実数値で取得される．NMEA フォーマットは携帯型のナビゲーションシステムや USB 接続の安価な受信機に用いられることが多く，通常 SNR は整数値で取得される．どちらのデータフォーマットから得られた SNR も GNSS-IR に利用できるが，NMEA で得られた SNR は整数値であるが故に精度が劣ることとなる．

GNSS 衛星信号の SNR においては，衛星の軌道移動に伴い伝搬遅延と直接信号と反射信号の位相差が変化

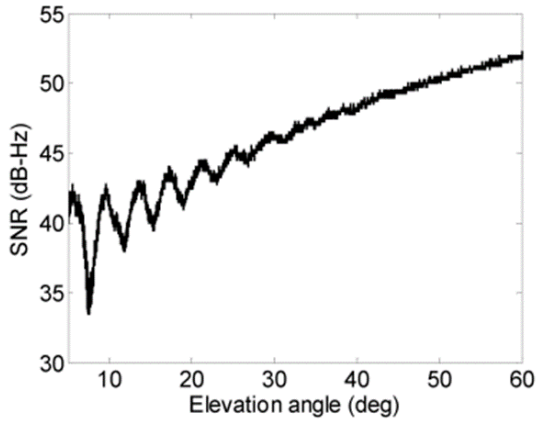


Fig. 2 典型的な衛星仰角と SNR の関係（GPS 衛星 PRN13 番から取得：Zavorotny et al. 2010 を改変）．低仰角で明瞭な波形が見られる．
Typical relationship between satellite elevation angle and SNR (data from GPS satellite PRN13; modified from Zavorotny et al., 2010). Clear interference patterns can be observed at low elevation angles.

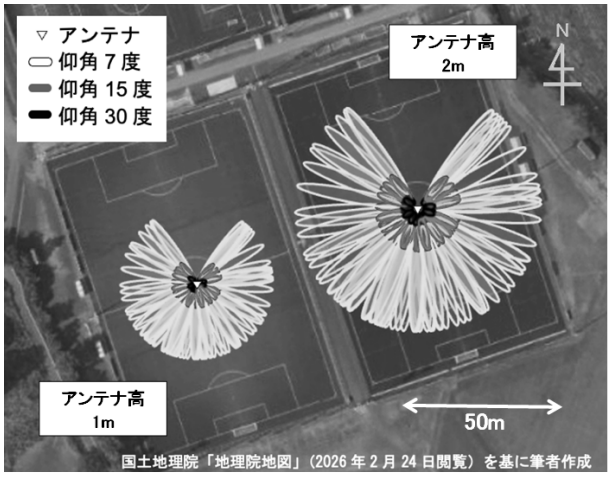


Fig. 3 日本の関東地方で 1 日に捕捉される GPS 衛星のフレネルゾーン．L1 帯信号の衛星仰角 8-30° のデータを利用し，アンテナ高さを 1 m，2 m とした場合．
Fresnel zones of GPS satellites captured in a single day over the Kanto region of Japan. Data from L1 signals with satellite elevation angles of 8–30°, assuming antenna heights of 1 m and 2 m.

し，波形の足し合わせにより周期的な干渉パターン（波形）が現れる（Fig. 2）．GNSS-IR ではこの干渉波形を解析することにより，土壌水分を含む反射面の特性を評価する．SNR は各衛星の周波数帯（例えば L1，L2，L5 帯）毎に得られる．Fig. 2 の通り，この干渉反射波は衛星が地平から出現する際（低仰角）に明瞭であり，衛星が地平に沈む際にも同様である．したがって，GNSS-IR では低仰角の SNR データのみを解析に利用することとなる．例えば GPS 衛星の場合，先述のとおり約 12 時間で一周する中高度地球軌道であり，一つの衛星につき 1 日に 1 回はアンテナに捕捉される機会が生じるため，それぞれの衛星の出現 · 没の際の数時間のデータが解析に利用できることとなる．

GNSS-IR において地上に設置されたアンテナのカバーエリアはフレネルゾーンで近似できる．フレネルゾーンの中でも電波に対する影響の強い第一フレネルゾーンは，アンテナの水平線上からの衛星の仰角と方位角，電波の波長，アンテナ高さによって決まる．例えば日本の関東地方で 1 日に捕捉される GPS 衛星を用いた場合，Fig. 3 の条件でアンテナ高さを 1 m と 2 m としてフレネルゾーンを描写すると，それぞれのフレネルゾーンの半径は最大で 20 m，40 m 程度となり，アンテナ高さ 2 m の場合にはサッカーグラウンドの横幅を概ねカバーできる範囲に広がることがわかる．なお，北天方向には GPS 衛星が存在せずフレネルゾーンも無いため，GPS 衛星を利用した GNSS-IR ではアンテナの北側（南半球では南側）以外の範囲がモニタリングされることとなる．

以上をまとめると，GNSS-IR によるモニタリングの時間頻度は，捕捉した各衛星の出現 · 没（低仰角）のタイミングとなり，モニタリングの空間分布は主にアンテナ高さと衛星の方位角によって定まる楕円形状となる．すなわち，解析に利用される（捕捉される）衛星の数が多いほど，モニタリングの時間 · 空間密度が増すこととなり，十分な数の衛星が利用できると，GNSS-IR はアンテナを中心としたフレネルゾーンを外周とする円状（北もしくは南側を除く）をモニタリングする面的な推定手法となる．なお，低仰角の衛星から数時間かけて得られる衛星データが解析に利用されるため，先述の通り 1）移動するプラットフォームには適用不可能，2）周辺に障害物がない場所でのみ適用可能，といった制限があることとなる．

3.3 SNR モデリングと解析ソフトウェア

GNSS-IR のための SNR のモデリングには，基本的に物理 · 理論モデルと逆解析モデル · 経験モデルの 2 つのアプローチがある．物理 · 理論的モデルの詳細については，Zavorotny et al.（2010），Nievinski and Larson（2014a），Nievinski and Larson（2014b）などに詳しい．物理 · 理論的モデルでは，信号 · アンテナ · 反射面における円偏波成分やコヒーレンス（鏡面反射 / 散乱）を考慮した電気力学モデルを構築し，例えば土壌であれば反射面を連続成層媒質として扱う複素誘電率混合モデルとして表現して，マルチパスの影響で SNR の干渉反射波形に生じる変調をモデル化する．通常このアプローチは反射面での物性を推定するためではなく，信号の種類 · 強度，アンテナ高さ，表面の粗度 · 材質，アンテナの種類 · 方向といった要素が，SNR の干渉反射波形にどのように影響し得るのかをシミュレーションする手段として用いられる（Fig. 4）．例えば Fig. 4 より，土壌水分の違いにより SNR の干渉反射波形の波長 · 振幅 · 位相が理論上変化しうることがわかる．

一方，逆解析モデル · 経験モデル（例えば Nievinski and Larson, 2014c）は，実際の GNSS 受信機で得られた観測データを用いて，最小二乗法や統計的アプローチを通じ

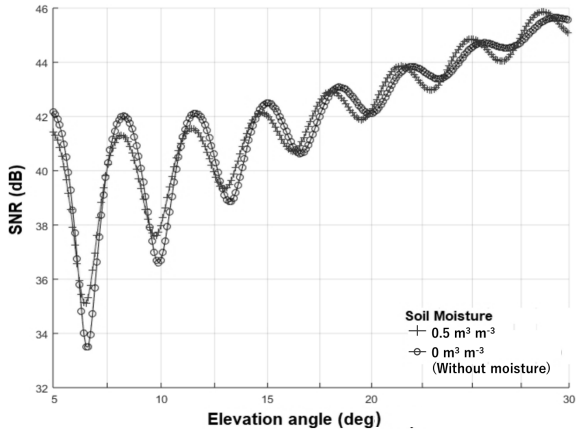


Fig. 4　Euriques et al.（2021）のシミュレーションによる衛星仰角と SNR の関係（図を一部改変）.
Simulated relationship between satellite elevation angle and SNR, based on Euriques et al. (2021) (partially modified).

て物理 · 理論的モデルのパラメータフィッティングや最適化 · 妥当性検討を行うものである．中でも，Zavorotny et al.（2010）の物理モデルを元に SNR 干渉反射波形を簡易な正弦波で当てはめる経験的モデル（例えば Larson et al., 2010）は，解析ソフトウェア「gnssrefl」として広く普及し，反射面での様々な物性の推定に利用されており，以下でその内容を詳述する．

gnssrefl（Larson. 2024）は GNSS-IR のためのオープンソースソフトウェアパッケージで，多くの研究者により現在も改良が進められており，土壌水分を始め，積雪深，植生（バイオマス · 草丈），水位（湖沼 · 河川 · 潮位）の推定に利用されている．このソフトウェアでは SNR の干渉反射波形を以下の式（1）で当てはめるが，SNR には干渉波形以外にもトレンド（例えば衛星の出現の際には上昇トレンド：Figs. 2，4 を参照）があるため，波形明瞭化のためにこのトレンドを除去した SNR_{r} を解析に用いる．

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

ここで，A は振幅（トレンド除去のための線形化により単位は V V^{-1}），H は電波反射地点からアンテナ位相中心までの高さ（反射体高さ: m），E は衛星仰角（deg），λ は GNSS 信号波長（m），φ は位相オフセット（deg）である．このうち A，H，φ が反射面の物性に影響を受けるフィッティングパラメータであり，H は干渉波形の周波数を定めるパラメータともなっている．すなわち，既知の λ および一連の衛星観測データから得られる SNR_{r} と E のデータセットを用いて，波の形状を決める三要素である振幅（A），周波数（H），位相（φ）をフィッティングすることとなる．厳密には，まず Lomb-Scargle ピリオドグラム法を用いた周期性解析を通じて H を定め，その後 Levenberg-Marquardt 法を用いた非線形最小二乗法によって振幅 A と位相 φ をフィッティングする．例えば土壌水分を例とすると，これらのパラメータ A，H，φ と土壌水分の関係性を評価し，両者間に良好な相関が見出せた場合，この相関式に A，H，φ を代入することで土壌水分が推定できることとなる．

gnssrefl では解析に用いる GNSS 衛星の種類 · 周波数帯 · 解析範囲（方位角および仰角）等を設定した上でデータを解析し，結果として期間中に捕捉された全衛星の出現 · 没毎にパラメータ A，H，φ が 1 セットずつ出力される．その上で，最終的な出力結果として，各日に得られたパラメータの日平均データ，すなわち解析全方位から得られた A，H，φ の日平均値を得ることができ，これにより対象領域の面的な環境要素の推定が可能となる．なお，パラメータ H は反射体高さという物理的な意味を持つが，A と φ はソフト内の後処理で解析期間中のデータをもとに正規化 · 基準化された相対値として出力される（Chew et al., 2016b）．他にも，ユーザーの設定した閾値を元に不明瞭な波形のデータを除外するといった処理もされている．これらの基準化や設定の詳細についてはソフトに付属されるマニュアルを参照されたい．

3.4 反射体高さ · 振幅 · 位相を用いた土壌水分の推定

干渉反射波形の反射体高さ H は，既知のアンテナの設置高さと反射面の高さとの差であり，反射面の高さが直接的に変化する積雪深や草丈の推定に利用される．土壌水分においても，水分の上昇に伴い電波の土壌への浸透深度が浅くなることから，土壌の体積含水率 θ（$\mathrm{m^3\ m^{-3}}$）と H との間に負の相関が見出されることがある．しかし，例えば Chew et al.（2014）のシミュレーションの結果では，表層 5 cm の θ を 0 ～ 0.5 $\mathrm{m^3\ m^{-3}}$ まで変化させた際の H の変化量は 3.3 cm と小さく，H は水分を推定する指標としては感度が低い可能性がある．

振幅 A は水分や粗度の影響を受けるため，植生の推定に利用されることが多い（Chew et al., 2015; Chew et al., 2016b）．A と θ の間には条件により正 · 負両方の相関が見出されることがあり，理論的には非線形性を示す可能性がある（Chew et al., 2014）．Fig. 4 を見ても，低仰角では $\theta = 0\ \mathrm{m^3\ m^{-3}}$ の方が A は大きいが，高仰角ではその傾向が逆転しているなど，その応答は複雑である．

位相オフセット φ は通常 θ を推定するために最も良い指標とされており，理論的にも両者間の線形性が高いことが示されている．ただし，φ は前節で述べた通り解析期間中のデータをもとに正規化 · 基準化された相対値となっているため，ある条件で得られた φ と θ の相関式（推定式）が異なる条件に適用できない可能性がある点に留意する必要がある．

3.5 GNSS-IR を用いた土壌水分計測の実例と推定精度

Larson et al.（2008a）および Larson et al.（2008b）は GNSS-IR による土壌水分推定の先駆け的存在である．これらの研究では GPS 衛星の RINEX フォーマットデータが用いられ，いくつかの選択された衛星を用いた土壌水分の推定がされた．Larson et al.（2008a）では，衛星仰角 15° ～ 30° の範囲の L2 信号が使われ，推定の精度評

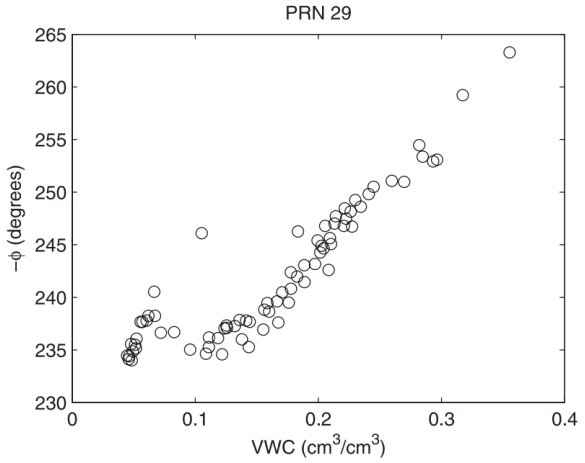


Fig. 5　GNSS-IR を用いた土壌水分推定研究における初期の成果（Larson et al., 2008b：図を一部改変）．GPS 衛星（衛星番号 29）から得られた φ と深さ 2.5cm に設置された誘電率水分計から得られた土壌の体積含水率の間に相関が確認された．
Early results from soil moisture estimation using GNSS-IR (Larson et al., 2008b: partially modified). A correlation was observed between the interferometric phase (φ) derived from GPS satellite PRN29 and volumetric soil moisture measured by a dielectric sensor installed at a depth of 2.5 cm.

価には数値計算から得られた θ の値が利用されている．Larson et al.（2008b）では L2 の改良版である L2C 信号の仰角 10° ～ 30° のデータが利用され，精度評価には TDR センサが利用されている（Fig. 5）．これらの研究に倣い，当初は高価 · 高精度な受信機から得られる RINEX フォーマットデータの利用が研究の主流であったが，近年では安価な受信機の普及に伴い NMEA フォーマットを利用する研究も進んでいる（例えば Kadota et al., 2026）．また，当初はほぼ全ての研究で GPS 衛星のみが利用されていたが，GPS に加えて中国の BeiDou（Yang et al., 2019）やロシアの GLONASS，EU の Galileo（Martín et al., 2020）を利用した研究も行われている．同様に，周波数帯についても新しい形式の L5 信号が利用されたり（例えば Tabibi et al., 2015），衛星数についても限られた衛星だけではなく，捕捉された全ての衛星を利用する研究も進んでいる．アンテナ高さについては，観測対象の領域に応じて 2 m 前後に設置されることが多いが，Zhang et al.,（2018）はいくつかの衛星に限定した上で，高さ 29.4 m に設置したアンテナを用いて土壌水分を推定している．解析に用いられる衛星仰角については，干渉反射波形が明瞭な 5° ～ 30° 程度の利用が最も多いが，得られた波形の明瞭さや観測対象の領域に応じて変更されることもある．

こういった一連の GNSS-IR による土壌水分の推定精度については，環境条件や利用する受信機 · 信号の種別，解析条件等により様々ではあるが，推定された θ と実測の（もしくは数値計算から得られた）θ との間には概ね相関係数（R）0.6 ～ 0.9 程度の関係が見出されることが多い．例えば Martín et al.（2020）が GPS，Galileo，GLONASS から推定した θ は，炉乾法での実測 θ との間で 0.72 ～ 0.84 の相関があり，高価 · 安価な受信機間では差が無かったことを報告している．Tabibi et al.（2015）は GPS L2C 信号と L5 信号から得られた φ と水分計での実測 θ との間にそれぞれ 0.83，0.89 の相関を見出している．Kadota et al.（2026）は安価なシステムから得られた NMEA フォーマットの GPS L1 信号から得た φ と実測 θ との間で 0.79 の相関を得ている．

4. GNSS-IR を用いた土壌水分計測の課題と展望

4.1 植生の影響

これまでで述べた通り，GNSS-IR は単体の GNSS 受信機を用いて表層土壌水分を面的に推定可能な手法として，今後とも発展していくものと思われる．しかし，システムとしての実用化に向けては，いくつかの検討課題が残されている．一つ目の課題は，土壌水分と植生との切り分けについてである．GNSS-IR から得られるパラメータ A，H，φ はそれぞれ土壌水分以外にも植生の影響を受ける．例えば Small et al.（2016）は，土壌水分推定において A を用いて植生の影響を取り除く複数のアルゴリズムを提案している．しかし，Zhang et al.（2017）によると，小麦畑において小麦が 1 波長（約 19 cm）より低い場合には土壌水分が推定できるものの，草丈が高くなると SNR の卓越周波数（H と相関）が変化し土壌水分の推定精度は著しく低下したと報告されている．同様に小谷ら（2024）も，裸地状態では φ と土壌水分間に高い相関が見られたものの，密に植栽されたダイズの成長と共に φ と土壌水分の相関が低下し，H は草丈の変化と連動したことを報告している．これらの報告にあるように，草丈がある程度大きくなると反射体高さ H がそれに応じ変動するということは，主たる反射波が植生の表面から得られていることを示し，密な植生が生育した環境下での土壌水分の推定は困難ということを意味している．ただし，どのような植生の高さ · 密度，形状 · 作付けパターン（畝の有無等）において植生の影響が卓越し，土壌水分との切り分けが困難となるかは，まだ十分な検討が進んでいない．この課題は GNSS-IR を用いた土壌水分推定の限界を知ると同時に，GNSS-IR を用いた植生情報の推定の可能性と限界を知る意味でも重要である．GNSS-IR を用いた植生情報の推定では他の衛星データとの組み合わせや物理モデルを利用したものもあり（例えば Humphrey and Frankenberg, 2023; Pan et al., 2020），このようなアプローチが土壌水分 · 植生推定の切り分けにも有用と考えられる．

4.2 土壌水分推定精度の評価と計測深度

GNSS-IR の土壌水分推定精度の評価手法も大きな検討課題の一つである．先述の通り θ の推定精度は相関係数で 0.6 ～ 0.9 程度との報告が多いが，この推定精度に含まれる誤差要因には，i）GNSS-IR 自体による推定誤

差，ii）土壌水分の空間変動性に起因する誤差，iii）評価に利用される誘電率水分計もしくは水分推定モデルに起因する誤差，が含まれている．GNSS-IR では，表層約 5 cm の広域の θ が推定されるが，この測定領域においてii）を考慮しつつ水分計等により正確な θ を決定することは容易ではない．GNSS-IR が主にリモートセンシング分野の研究者によって発展してきたこともあり，既往研究では誘電率水分計の設置深度 · 方法 · 数や水分推定モデルの妥当性の検討が十分にされておらず，誤差が手法自体以外に iii）によっても生じている可能性は高い．

また，土壌水分の計測深度の検討も重要な課題である．GNSS-IR を含む電磁波を利用した水分推定においては，電磁波の浸透深度，すなわち手法のセンシング領域が，周波数 · 土性 · 土壌水分に依存して変化する．GNSS の周波数帯における複素誘電率混合モデルによる理論上の電波浸透深度の周波数 · 土性 · 水分依存性のおおよその傾向は，① L1 帯に対し周波数の低い L2 帯は浸透深度が数 cm 程度深くなる，②水分の減少に伴い浸透深度が深くなり，特に θ が 0.1（$m^3\ m^{-3}$）以下で急激に深くなる，③粘土質土壌より砂質土壌において②の傾向が顕著である，といった形でまとめられる（Li et al., 2018）．中でも②の水分依存性については，現地の土壌水分変化に応じて手法の観測領域が随時変化することを意味しており，先述の iii）評価のための水分計の設置深度に起因する誤差が必然的に生じることを示唆している．なお，電波の浸透深度は電磁気学的には媒質の誘電損失に基づく減衰特性として定義される単一の深さを表現する量であるが，Zavorotny et al.（2010）が指摘するように，GNSS-IR で観測される干渉反射波の反射深さは，浅層土壌内の複数の深さからの寄与が深さ方向の重みを伴って重ね合わさった結果として表現される「見かけの反射深さ」である．したがって，電波の浸透深度と GNSS-IR が感度を有する代表的な深さとは必ずしも一対一に対応しない点にも注意が必要である．

上記のような状況を踏まえた上で，GNSS-IR による土壌水分推定精度の向上を目指すためには，従来の干渉反射波形の解析に加えて電磁気学に基づく物理モデルを利用するアプローチが効果的と考えられる．Li et al.（2023）は観測深度中の水分プロファイルを考慮可能な多層モデルを提案し，数値シミュレーションにより水分推定精度が向上することを示している．Jing et al.（2025）は直達波と反射波の振幅比を物理モデル（反射率 · 誘電特性）に結び付けて土壌水分を推定するアルゴリズムを提案している．Kobayashi et al.（2024）は GNSS-IR 観測値から電波の真の浸透深度と見かけの浸透深度を推定し，異なる土性に対応可能な土層の誘電率測定手法を提案している．このような物理モデルを用いる取り組みは，GNSS-IR の水分推定精度の向上のみならず，サイト固有の経験的関係に依存しない汎用性の向上や，手法の観測領域の明確化にも寄与するものであり，手法の実用化に向けてさらなる研究の発展が期待される．

4.3 既存の測位用の基地局への適用

GNSS-IR の最大の長所は，既存の測位用の基地局にそのまま適用可能な点である．現在，主に地殻変動の監視を目的として，国際的な IGS（International GNSS Service），アメリカの PBO（Plate Boundary Observatory），欧州の EPN（EUREF Permanent Network）といった様々な GNSS ネットワークシステムが世界中で展開されており，特に PBO については，GNSS-IR を適用した土壌水分，積雪深，植生モニタリングネットワークの構築が試みられている（Larson, 2016）．我が国においても国土地理院が管轄する電子基準点 · GNSS 連続観測システム（GNSS Earth Observation Network System: GEONET）が，他国と比べても高密度で全国 1300 ヶ所以上に設置されており，RINEX フォーマットでのリアルタイムデータが公開されている．特に狭小な土地が多く周辺に障害物が多い日本ではこれら全ての基準局に GNSS-IR を適用することは困難であるが，比較的開けた場所を選定していくことで，これらの基準局を GNSS-IR を用いた環境要素の観測ネットワークとできる可能性がある．例えば齊藤ら（2024）は北海道 · 東北地方の公園等に設置された電子基準点データに GNSS-IR を適用し，反射体高さ H が日積雪深の観測に利用できることを示している．

加えて，近年，主に農業機械の自動運転などを目的として圃場に GNSS 基地局が設置される機会が増えている．さらには，様々な計測機器やデータロガーにおいても，その設置位置や正確な計測時間の取得のため GNSS アンテナが内蔵されるケースが増えている．以上のような，他目的のために設置される GNSS 受信機への GNSS-IR の適用は，初期投資等無く土壌水分を含む環境要素の追加測定を実現できる可能性があり，今後とも更なる研究の進展が期待される．

4.4 安価な面的水分推定システムとして

近年，GNSS アンテナ · 受信機の普及と低価格化は目覚ましく，最安価なアンテナでは，GPS のみの対応で数百円，複数の GNSS 対応のものでも千円程度から購入可能である．アンテナと接続する受信機 · モジュールも低価格化が進み，さらに SNR 等のデータの収集 · 処理が可能なマイクロコンピュータ（Raspberry Pi 等）の普及も進んでいる．例えば Kadota et al.（2026）が土壌水分推定のために構築したシステムは総額 1 万円程度，Karegar et al.（2022）が河川の水位計測のために構成したシステムは 150 USD 程度で構成されている．これらのシステムは一般的な水分計や水位計と比べれば精度や応答性が劣るものの，非常に安価かつ非破壊 · 非接触で面的な推定が可能といった長所がある．

GNSS アンテナの価格 · 機能 · 内部構造は各製品によって様々であるが，基本的にアンテナは安価であればあるほど低機能であり，利用可能な衛星の種類や周波数帯が制限される．一方で，GNSS-IR においては，本来の測位を妨げる間接波の影響を受けやすい粗悪な製品の方が明瞭な干渉反射波を得られる可能性もある．2.3 に

て述べたアンテナの設置方向の検討をも含め，様々な製品を用いた事例研究を積み重ねることにより，GNSS-IR に適したアンテナおよび設置方法を選定し，安価な面的推定システムとしてパッケージ化していくことが期待される．

5. おわりに

本稿では，GNSS 衛星信号の反射面における変化を利用・解析して環境要素を推定する手法 GNSS-R と，その一形態として近年特に研究の進捗が著しい GNSS-IR について，特に土壌水分の推定に焦点を当てて手法を解説した．これまでに述べた通り，GNSS-R・GNSS-IR 共に，地上のみならず海洋も含めた様々な環境要素のモニタリングに適用可能であるが，国内においてはまだ一般的な認知度も低く，研究は盛んではない現状にある．

GNSS-R は本来測位システム用である GNSS 衛星信号を目的外である環境センシングに利用すること，さらには正確な測位を妨げる不要なノイズ情報（マルチパス信号）を利用すること，といった点を考えると，環境中の未利用資源・不要物を有効活用する技術という側面も有しているといえる．我が国においては国土全域をカバーする高密度な電子基準点データが公開されている事，また，今後とも圃場等に設置される GNSS 基地局が増え続ける事などを考慮し，これらを有効利用した GNSS-R・GNSS-IR による環境要素の観測が，様々な分野において期待される．本稿が我が国における今後の GNSS-R 研究の発展の一助となれば幸いである．

謝辞

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，JSPS 科研費 26K01842 の助成を受けた．ここに記して謝意を表す．

引用文献

Ceraldi, E., Franceschetti, G., Iodice, A., Riccio, D. and Ruello. G. (2003): On the use of the specular direction copolarised ratio for the retrieval of soil dielectric constant. IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, 7: 4144–4146, doi:10.1109/IGARSS.2003.1295443.

Chew, C., Shah, R., Zuffada, C., Hajj, G., Masters, D. and Mannucci, A.J. (2016a): Demonstrating soil moisture remote sensing with observations from the UK TechDemoSat-1 satellite mission. Geophysical Research Letters, 43(7): 3317–3324, doi:10.1002/2016GL068189.

Chew, C., Small, E.E. and Larson, K.M. (2016b): 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, 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.

Clarizia, M.P., Gommenginger, C., Gleason, S., Galdi, C. and Unwin, M. (2008): Global Navigation Satellite System-Reflectometry (GNSS-R) from the UK-DMC satellite for remote sensing of the ocean surface, in Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2008. IGARSS. IEEE International, 1: I-276–279, doi:10.1109/IGARSS.2008.4778847.

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.

Egido, A., Caparrini, M., Ruffini, G., Paloscia, S., Santi, E. and Guerriero, L. (2012): Global navigation satellite systems reflectometry as a remote sensing tool for agriculture. Remote Sensing, 4: 2356–2372, doi:10.3390/rs4082356.

Entekhabi, D., Njoku, E.G., O’ Neill, P.E.; Kellogg, K.H., Crow W.T., Edelstein, W.N., Entin, J.K., Goodman, S.D., Jackson, T.J., Johnson, J., Kimball, J, Piepmeier, J.R., Koster, R.D., Neil, M., Mcdonald, K.C., Moghaddam, M. Moran, S., Reichle, R., Shi, J.C., Spencer, M.W., Thurman, S.W., Tsang, L. and Van Zyl J. (2010): The soil moisture active passive (SMAP) mission. Proceedings of the IEEE, 98(5): 704–716, doi:10.1109/JPROC.2010.2043918.

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.

Gleason, S. (2006): Remote sensing of ocean, ice and land surfaces using bistatically scattered GNSS signals from low Earth orbit, PhD thesis, University of Surrey.

Humphrey, V. and Frankenberg, C. (2023): Continuous ground monitoring of vegetation optical depth and water content with GPS signals. Biogeosciences, 20: 1789–1811, doi:10.5194/bg-20-1789-2023.

Ichikawa, K., Ebinuma, T., Konda, M. and Yufu, K. (2019): Low-cost GNSS-R altimetry on a UAV for water-level measurements at arbitrary times and locations. Sensors,

19: 998, doi:10.3390/s19050998.

Jia, Y. and Pei, Y. (2018): Remote sensing in land applications by using GNSS-reflectometry. InTech. doi:10.5772/intechopen.72901.

Jing, L., Wang, N., Gao, F., Xu, T., Kong, Y., Wang, L. and Yang, L. (2025): A soil moisture retrieval algorithm on bare surface using GNSS-IR technique. Measurement, 249: 117095, doi:10.1016/j.measurement.2025.11709.

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.

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).

Karegar, M.A., Kusche, J., Geremia-Nievinski, F. and Larson, K.M. (2022): Raspberry Pi reflector (RPR): A low-cost water-level monitoring system based on GNSS interferometric reflectometry. Water Resources Research, 58: e2021WR031713, doi:10.1029/2021WR031713.

Katzberg, S.J. and Garrison, J.L. (1996): Utilizing GPS to determine ionospheric delay over the ocean. In NASA Technical Memorandum Volume 4750; NASA Langley Technical Report Server, VA, Hampton.

Katzberg, S.J., Torres, O., Grant, M.S. and Masters, D. (2006): Utilizing calibrated GPS reflected signals to estimate soil reflectivity and dielectric constant: Results from SMEX02. Remote Sensing of Environment, 100: 17–28, doi:10.1016/j.rse.2005.09.015.

Kerr, Y.H., Waldteufel, P., Wigneron, J.P., Martinuzzi, J.M., Font, J. and Berger, M. (2001): Soil moisture retrieval from space: the Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) Mission. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 39: 1729–1735, doi:10.1109/36.942551.

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.

小谷豪大, 齊藤忠臣, 吹春やよい, 門田直哉, 猪迫耕二 (2024): 安価な GNSS 信号受信システムを用いた土壌水分 · 植生情報 · 積雪深の推定. 第 79 回農業農村工学会中国四国支部講演会講演要旨集, 22–24.

Komjathy, A., Armatys, M., Masters, D., Axelrad, P., Zavorotny, V. and Katzberg, S. (2004): Retrieval of ocean surface wind speed and wind direction using reflected GPS signals. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 21:515–526, doi:10.1175/1520-0426.

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. and Gutmann. E.D. (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/STARS.2009.2033612.

Larson, K.M., Small, E.E., Gutmann, E., Bilich, A.L., Axelrad, P. and Braun, J. (2008a): Using GPS multipath to measure soil moisture fluctuations: Initial results. GPS Solutions, 12: 173–177, doi:10.1007/s10291-007-0076-6.

Larson, K.M., Small, E.E., Gutmann, E.D, Bilich, A.L., Braun, J.J. and Zavorotny V.U. (2008b): Use of GPS receivers as a soil moisture network for water cycle studies. Geophysical Research Letters, 35: 1–5, doi:10.1029/2008gl036013.

Li, F., Peng, X., Chen, X., Liu, M. and Xu, L. (2018): Analysis of key issues on GNSS-R soil moisture retrieval based on different antenna patterns. Sensors, 18: 2498, doi:10.3390/s18082498.

Li, J., Hong, X., Wang, F., Yang, L. and Yang, D. (2023): Multilayer model in soil moisture content retrieval using GNSS interferometric reflectometry. Sensors, 23: 1949, doi:10.3390/s23041949.

Löfgren, J.S. and Haas, R. (2014): Sea level measurements using multi-frequency GPS and GLONASS observations. Eurasip Journal on Advances in Signal Processing, v. 2014, 2014: 50.

Martin-Neira, M. (1993): A Passive Reflectometry and Interferometry System (PARIS): application to ocean altimetry. European Space Agency Journal, 17: 331–355.

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. (2014a): 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.

Nievinski, F.G. and Larson, K.M. (2014b): Inverse modeling of GPS multipath for snow depth estimation–Part II: application and validation. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing GPS, 18: 473–481, doi:10.1109/tgrs.2013.2297688.

Nievinski, F.G. and Larson, K.M. (2014c): Inverse modeling of GPS multipath for snow depth estimation–Part I: Formulation and simulations. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 52: 6555–6563,

doi:10.1109/TGRS.2013.2297681.

Oikawa, K. and Saito, H. (2024): Current trends and issues of nondestructive visualization technology for soil water transfer process by surface ground penetrating radar. J. Jpn. Soc. Soil Phys., 158: 43–52, doi:10.34467/jssoilphysics.158.0_43 (in Japanese with English abstract).

Pan, Y., Ren, C., Liang, Y., Zhang, Z. and Shi, Y. (2020): Inversion of surface vegetation water content based on GNSS-IR and MODIS data fusion. Satellite Navigation, 1: 21, doi:10.1186/s43020-020-00021-z.

Rodriguez-Alvarez, N., Camps, A., Vall-Llossera, M., Bosch-Lluis, X., Monerris, A., Ramos-Perez, I., Valencia, E., Marchan-Hernandez, J.F., Martinez-Fernandez, J. and Baroncini-Turricchia, G. (2011): Land geophysical parameters retrieval using the interference pattern GNSS-R technique. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 49: 71–84, doi:10.1109/TGRS.2010.2049023.

Roussel, N., Frappart, F., Ramillien, G., Darrozes, J., Baup, F., Lestarquit, L. and Ha, M.C. (2016): Detection of soil moisture variations using GPS and GLONASS SNR data for elevation angles ranging from 2°to 70°. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and RemoteSensing, 9: 4781–4794, doi:10.1109/JSTARS.2016.2537847.

齊藤忠臣, 小谷豪大, 吹春やよい, 門田直哉, 猪迫耕二 (2024): GNSS 干渉反射法による電子基準点公開データを用いた積雪深の推定. 2024 年度土壌物理学会大会講演要旨集, 108–109.

Small, E.E., Larson, K.M., Chew, C.C., Dong, J. and Ochsner, T.E. (2016): Validation of GPS-IR soil moisture retrievals: Comparison of different algorithms to remove vegetation effects. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 9: 4759–4770, doi:10.1109/JSTARS.2015.2504527.

Strandberg, J., Hobiger, T. and Haas, R. (2017): Coastal sea ice detection using ground-based GNSS-R. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 14: 1552–1556, doi:10.1109/LGRS.2017.2722041.

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.

Yang, T., Wan, W., Chen, X., Chu, T., Qiao, Z., Liang, H., Wei. J., Wang, G. and Hong, Y. (2019): Land surface characterization using BeiDou signal-to-noise ratio observations. GPS Solutions, 23: 1–12, doi:10.1007/s10291-019-0824-4.

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.

Zhang, S., Calvet, J.C., Darrozes, J., Roussel, N., Frappart, F. and Bouhours, G. (2018): Deriving surface soil moisture from reflected GNSS signal observations from a grassland site in southwestern France. Hydrology and Earth System Sciences, 22: 1931–1946, doi:10.5194/hess-22-1931-2018.

Zhang, S., Roussel, N., Boniface, K., Ha, C.M., Frappart, F., Darrozes, J., Baup, F. and Calvet, J.C. (2017): Use of reflected GNSS SNR data to retrieve either soil moisture or vegetation height froma wheat crop. Hydrology and Earth System Sciences, 21:4767–4784, doi:10.5194/hess-21-4767-2017.

Zhou, W., Liu, L., Huang, L., Yao, Y., Chen, J. and Li, S. (2019): A new GPS SNR-based combination approach for land surface snow depth monitoring. Scientific Reports, 9:1–20, doi:10.1038/s41598-019-40456-2.

Zreda, M., Desilets, D., Ferré, T. and Scott, R. (2008): Measuring soil moisture content non-invasively at intermediate spatial scale using cosmic-ray neutrons. Geophysical Research Letters, 35, doi:10.1029/2008GL035655.

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: SAITO, T., KADOTA, N. and INOSAKO, K. (2026): Monitoring of soil moisture and environmental parameters using GNSS reflectometry. J. Jpn. Soc. Soil Phys., 163: 17–28, doi:10.34467/jssoilphysics.163.0_17. (in Japanese with English abstract)

要　　旨

近年，測位用に地球を周回する全球測位衛星システム（GNSS）の衛星信号を利用して，土壌水分を含む環境要素をモニタリングする GNSS 反射法（GNSS-R）が注目されている．GNSS-R は GNSS 衛星群が照射する衛星信号（電磁波）のうち，地上 · 海上での反射波を解析 · 利用することで，反射面における水分 · 植生 · 水位 · 積雪深等の環境要素を推定する手法である．本稿では，この GNSS-R 全般の様々な形態や解析手法，特徴等を紹介した上で，その一形態として近年特に研究の進捗が著しい GNSS 干渉反射法（GNSS-IR）と，これを用いた土壌水分の推定に焦点を当てる．GNSS-IR は信号対雑音比を解析パラメータとする手法であり，通常の定点測位に用いられる GNSS 基地局に適用できる点で拡張性に優れている．本稿では，GNSS-IR の概要と特徴，測定の時間 · 空間分解能，解析手法とソフトウェア，土壌水分の推定精度について紹介し，今後の課題と展望について論説する．

キーワード：表層土壌水分，GNSS 干渉反射法，GPS（Global Positioning System），gnssrefl