

# GNSS-IRによる土壌誘電率の計測

## Measurement of soil relative permittivity using GNSS-IR

小林 大樹<sup>1</sup>・青木 伸輔<sup>2</sup>・佐藤 直人<sup>3</sup>・登尾 浩助<sup>3</sup>

<sup>1</sup>NTT アクセスサービスシステム研究所・<sup>2</sup>香川大学農学部・<sup>3</sup>明治大学農学部

### 要旨(Abstract) :

これまでの GNSS-IR (Global Navigation Satellite Systems -Interferometric Reflectometry)による土壌水分計測は、土壌状態の変化に応じた電磁波の反射状態の差を相対的に捉えるに留まっていた。そこで、本研究では、TDR (Time Domain Reflectometry)の原理を応用して、GNSS-IR により土壌誘電率を計測した。土性により変化する真の電磁波浸透深さと GNSS-IR で計測した見かけの電磁波浸透深さから土壌誘電率を計測することができることがわかった。

キーワード : 土壌水分、GNSS-IR、比誘電率、浸透深さ、誘電正接

Key words: Soil moisture, GNSS-IR, Relative permittivity, Penetration depth, Loss tangent

### 1. 背景と目的

GNSS-IRによる土壌水分量計測は、プローブや導線が不要な非接触計測手法であり、トラクターなどを利用した農作業を妨げないことから、スマート農業に適した計測手法である。これまでの GNSS-IRによる土壌水分量計測は、地表面で電磁波が反射することを仮定し、SNR(signal-noise ratio)を式(1)に回帰して得られた変数から土壌水分量を推定していた(Larson et al., 2010)。

$$SNR = A \cos\left(\frac{4\pi H_a}{\lambda} \sin E + \phi\right) \quad (1)$$

ここで  $A$  は振幅、 $H_a$  は GNSS アンテナから有効反射面までの高さ(cm)、 $\lambda$  は波長(L1バンドでは 19.0 cm, L2バンドでは 24.4 cm)、 $E$  は GNSS の仰角(rad)、 $\phi$  は位相 (rad)であり、 $\phi$  と体積含水率  $\theta$  に相関があると報告されている。しかし、マイクロ波で計測可能な電気特性は  $\theta$  ではなく比誘電率  $\epsilon'_s$  であり、 $\epsilon'_s$  と  $\theta$  の関係は土性ごとに異なる。よって、 $\epsilon'_s$  を直接計測しなければ、様々な土性に応じた  $\theta$  を計測することができない。そこで、GNSS-IR により土壌誘電率を計測する理論の提案と実験による検証することを目的に研究した。

### 2. 理論と実験方法

電磁波の有効反射面は地表面ではなく、地中に存在すると考え、図1に示す電磁波の経路を仮定した。このとき、土中を通過するマルチパス波は土壌誘電率に応じて伝搬速度が低下するため、アンテナ上において検出される見かけの浸透深さ  $D_a$  は、真の浸透深さ  $D$  よりも大きくなる。よって、TDR の計測原理にしたがって式(2)の通り  $\epsilon'_s$  を計測することができる。

$$\epsilon'_s \approx \left(\frac{H_a - h_{ant}}{D}\right)^2 = \left(\frac{D_a}{D}\right)^2 \quad (2)$$

ここで、 $H_a$  はアンテナから有効反射面までの

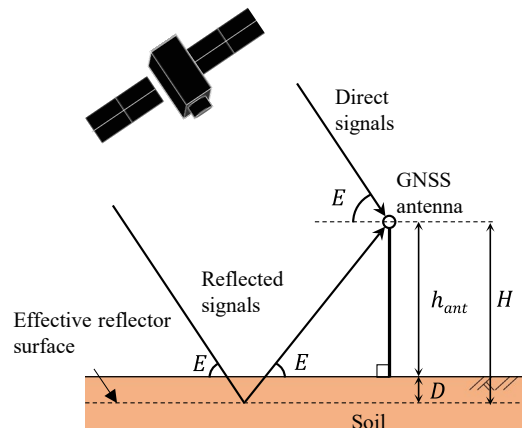


図1 仮定した電磁波の経路  
(Kobayashi et al., 2024)

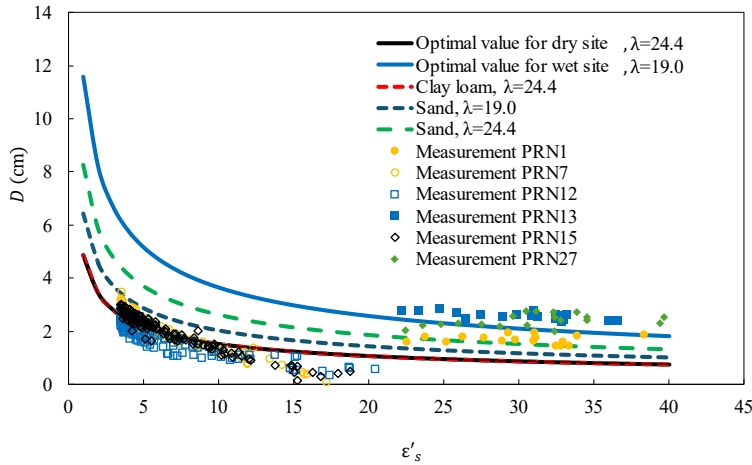


図2 真の電磁波浸透深さ $D$ に関する理論値と実験値 (Kobayashi et al., 2024)

距離、 $h_{ant}$ はアンテナから地表面までの距離である。さらに、 $D$ は式(3)の通り土壌の比誘電率における虚部 $\epsilon''_s$ または誘電正接 $\tan \delta$ で表すことができる。

$$D = \frac{\lambda}{4\pi\sqrt{\epsilon''_s}} = \frac{\lambda}{4\pi\sqrt{\epsilon'_s \tan \delta}} \quad (3)$$

$\lambda$ および $\theta$ に応じた $\tan \delta$ は Cihlar and Ulaby (1974)などで報告されている土性ごとの値を用いることで、 $D$ を求めることができる。

これまでの研究は $\theta < 0.35 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ の乾燥土壌に限られていた。そこで、本研究ではこれより湿潤な土壌に対しても追加で実験をすることで、広い体積含水率および異なる土性に対して、提案する理論による土壌誘電率を評価した。

### 3. 結果と考察

まず、 $D$ に関する理論値計算と実験値を図2に示す。理論は Cihlar and Ulaby (1974)の値および実験値から最小二乗法により逆算した最適な $\tan \delta$ を式(3)に代入して求めた。乾燥領域では、 $\epsilon'_s$ が増加するに従い $D$ は小さくなるが、湿潤領域では $\epsilon'_s$ が増加しても $D$ は一定になる。また、土性に応じて $\epsilon'_s$ と $D$ の関係は異なることが示された。

次に、図2で求めた最適な $\tan \delta$ から求めた $D$ および、式(1)のSNRから得た $H_a$ を式(2)に代入

することで $\epsilon'_{GNSS}$ を求め、TDRで計測した $\epsilon'_s$ と比較した(図3)。湿潤土壌は高い相関を示した。一方で乾燥土壌は $\epsilon'_s > 10$ の値で相関が低くなったが、 $\epsilon'_s < 10$ の範囲では相関があった。これは、 $\epsilon'_s > 10$ の範囲は $D$ が小さく、土壌を電磁波が通過する際の遅延の影響を受けにくいことが原因と考えられる。湿潤土壌の $\tan \delta$ は Cihlar and Ulaby (1974)とは乖離が大きかった。湿潤土壌が関東ロームであり特殊な誘電特性を有していた

可能性がある。現場で簡易に $\tan \delta$ を計測する手法があれば、検証が可能であったが、適切な手法が存在しなかった。リモートセンシングによる土壌誘電率の測定の発展に向けては、 $\tan \delta$ の現場測定法が今後の課題である。

#### 参考文献

- Cihlar J, Ulaby FT (1974) Dielectric properties of soils as a function of moisture content. Remote Sensing Laboratory RSL Technical Report 177
- Kobayashi D et al. (2024) Estimation of relative permittivity for measuring soil texture-dependent water content by GNSS-IR, GPS Solutions,28,210
- Larson KM et al. (2010) GPS Multipath and Its Relation to Near-Surface Soil Moisture Content. IEEE J Sel Top Appl Earth Obs Remote Sens 3:91-99.

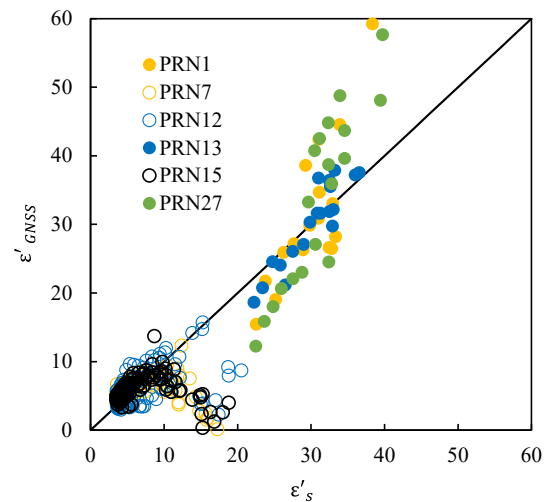


図3 GNSSで計測した誘電率 $\epsilon'_{GNSS}$ とTDRで計測した $\epsilon'_s$ との関係 (Kobayashi et al., 2024)