

## 地中レーダを用いた土壌水分動態解析 Application of Ground Penetrating Radar to Analyze Soil Water Dynamics

○斎藤広隆  
SAITO Hirotaka

### 1. はじめに

不飽和地盤中の水分動態，なかでも，浸透現象のような不飽和地盤中の水分移動現象を非破壊かつ非侵襲で直接測定することは，地盤中の物質移動係数の推定に欠かすことができず，農豪土木のみならず地盤工学あるいは地球科学において長年の研究課題の一つとなっている。

不飽和地盤中の水分量を原位置で測定する方法としては，地盤の電気特性の一つである比誘電率が水分量の関数となることを利用した方法が一般的である。たとえば地盤中の水分量を測定する際に，誘電率水分センサーがよく用いられる。しかしこれらセンサーは非破壊・非侵襲な手法ではなく，センサーを設置した地点の局所的な水分量の測定には適しているものの，広域の水分動態や浸潤時の浸潤前線の連続的な追跡などには不向きである。

近年，物理探査技術の農業土木分野や地盤工学分野への応用が進み，電磁波を用いる地中レーダ（GPR または Ground Penetrating Radar）による不飽和地盤中の水分量やその動態の測定がおこなわれてきた。GPR には，坑井間 GPR，地表型（地表面接触型，非接触型）GPR など様々な種類が存在するが，多くは送信アンテナより高周波の電磁波を放射し，反射・屈折などして地盤内を伝播してきた電磁波を受信で捉え，地盤構造などを可視化する。これまで，送信・受信アンテナそれぞれ一つから構成され高周波のパルス電磁波を用いる地表型 GPR が，その使いやすさなどから普及してきた。ここでは，GPR による土壌水分推定についてその原理と，近年応用が進んでいるアレイアンテナ GPR による浸潤前線位置推定について述べる。

### 2. 地中レーダによる土壌水分推定

地表型 GPR を使って，体積含水率を推定するための基本的な考え方は，土の比誘電率から導出するというものである。そのためには，送信アンテナから照射された電磁波が，反射面で反射し，受信アンテナに到達する時間から電磁波速度を求め，比誘電率を求める必要がある。反射波以外には，送信アンテナと受信アンテナ間の地表面下数 cm を伝播する直接波や屈折波が用いられてきた。

地表型 GPR による探査で通常用いられる送信アンテナと受信アンテナの間隔を一定に保つコモンオフセット測定では，反射面の深度を知っておかなければ電磁波速度を決定する事ができない。従って，反射面位置までの深さがあらかじめ分かっているような特殊なケース以外では電磁波速度を求める事は不可能である。一方アンテナ間隔を変化させながら測定するマルチオフセット測定では，反射面までの深さが未知であっても，電磁波速度

---

\*東京農工大学大学院農学研究院 Institute of Agriculture, Tokyo Univ. of Ag. and Tech.

キーワード：土壌水分，地中レーダ，浸潤

を直接決定する事ができる。マルチオフセット測定には、送受信アンテナの中心点位置を同一に維持しながら、アンテナ間隔を広げて測定するコモンミッドポイント (CMP) 法などの計測方法がある。一方で、マルチオフセット測定は測定に非常に手間 (時間) がかかるなどの欠点も指摘されている。

### 3. アレイアンテナ地中レーダ

近年、複数の送受信アンテナから構成され、一つの計測器で送受信アンテナの組合せを切り替え、効率よくかつ高速に三次元データを取得できる GPR が注目を浴びている。このような GPR はアンテナを一列に配置した構造となっているため、アレイアンテナ GPR (以降略してアレイ GPR) とよばれている。アレイ GPR の多くは、これまで、社会インフラの点検・保守などに使われてきたが、不飽和地盤中の水分動態の評価への応用は限られてきた。アレイ GPR のアンテナ切り替え速度は早く、マルチオフセット測定が非常に短時間で可能となる。したがって、これまでの GPR では不向きとされてきた動的現象に対するマルチオフセット測定が可能となる。

著者らは、アレイ GPR の一応用例として、浸潤過程の可視化および定量化に取り組んできた (Iwasaki et al., 2016)。著者らの用いたアレイ GPR では 1.5 秒ごとに CMP データおよびコモンオフセットデータ (COG) が得られた。すなわち、1.5 秒ごとの速度解析および電磁波速度構造の推定が可能となった。著者らの砂丘砂を用いた浸潤実験において、推定した電磁波速度構造から、各時間における浸潤前線の位置を連続的に推定でき、また、推定した浸潤前線の深さは、別途土壌水分センサーを用いて推定した深さとよく一致した。参考までに、図 1 に浸潤開始後 0, 30, 60 分後に得られた CMP および COG を示す。

### 4. おわりに

今後アレイ GPR によるマルチオフセット計測の活用が土壌水分マップの作成などに広がる事が期待される。アレイ GPR を用いることで、既知の反射面がない場合に用いられる直達波に頼ることなく、三次元的な土壌水分分布を作成が期待できる。

参考文献 Iwasaki, T., Kuroda, S., Saito, H., Tobe, Y., Szuki, K., Fujimaki, H., & Inoue, M. (2016). Monitoring Infiltration Process Seamlessly Using Array Ground Penetrating Radar. *Agricultural and Environmental Letters*, 1, 160002.

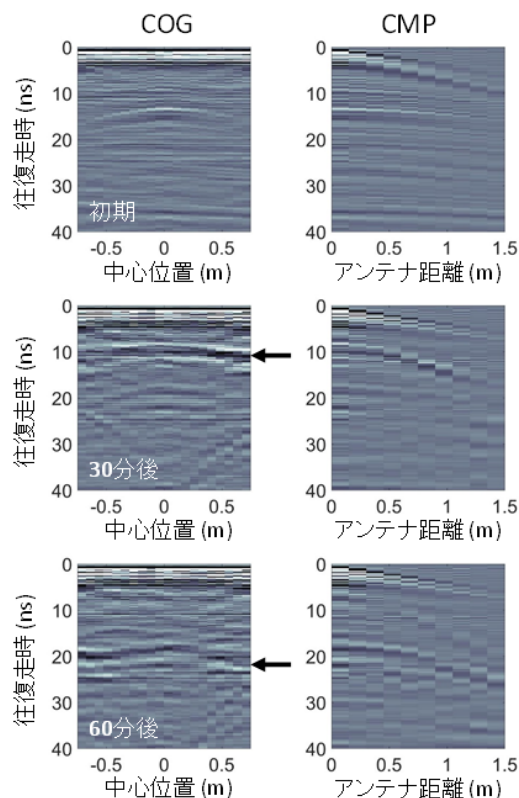


図1 浸潤開始後0, 30, および60分後のCOGおよびCMPのレーダグラム (Iwasakiら, Fig. 3を修正)。