

UKFを用いた1次元誘電率分布の推定手法の開発と 電磁波レーダー実験による検証

○東京工業大学 学生会員 黒澤 航
東京工業大学 正会員 古川 陽
サンコーコンサルタント(株) 今井 博

東京工業大学大学院 学生会員 高木 勘多
東京工業大学 正会員 廣瀬 壮一
サンコーコンサルタント(株) 山中 義彰

1. はじめに

現在、放射性廃棄物の処分方法として、深層処分が提案されている¹⁾。処分場の建設では岩盤に多数の坑道が掘削される。その際に坑道の壁面から湧水が発生し、飽和状態にあった岩盤中における地下水の流入と流出のバランスが崩れ、不飽和領域が生じる。不飽和領域の存在は地下水の流動挙動に影響を与えるため、漏出した放射性廃棄物が想定外の拡散をすることが懸念されている。従って、坑道周辺の岩盤中における含水状態や、地下水の流動を把握する必要がある。

含水状態を表す物理量として、飽和度が挙げられる。岩盤中の飽和度は、誘電率から推定できるため、電磁波の伝搬特性を用いて誘電率を求めることで、岩盤の含水状態を把握することが可能である。しかし、FDR-V法²⁾に代表される従来の推定手法は、局所的な計測が多く、岩盤の広域的な含水状態を把握することは困難である。

この様な背景を踏まえ、著者らは、地盤・岩盤中の1次元誘電率分布を推定する手法を開発してきた³⁾。現在、本研究では、開発手法の実問題への適用に向けた前段階として、電磁波レーダー実験による土層の1次元誘電率分布の推定を行った。本稿では、その実験の概要と開発手法による推定結果を示す。

2. 推定手法

(1) 状態量推定のためのアンセンテッドカルマンフィルタ

本研究では、誘電率分布の推定にアンセンテッドカルマンフィルタ(以下、UKFと呼ぶ)を用いる。UKFは非線形カルマンフィルタの一種であり、誤差を含む非線形システムの観測量 y_k から未知の状態量 x_k を推定することができる。本研究では、以下に示す状態量推定のための式を用いる。

$$y_k = h(x_k) + v_k \quad (1)$$

$$x_{k+1} = x_k \quad (2)$$

式(1)は観測方程式、式(2)は状態方程式と呼ぶ。本来、 k は離散時間のステップを表すが、状態量推定では、計算の反復回数に対応する。また、 v_k は平均値0かつガウス分布に従う観測雑音を表すベクトル、 $h(\cdot)$ は非線形変換を表す。

UKFを用いた推定では、図1に示すように「予測」と「更新」の手順を N 回繰り返す。なお、「予測」における事前

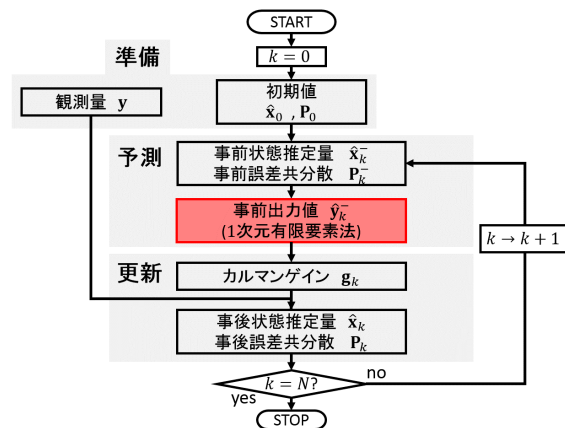


図1 アンセンテッドカルマンフィルタによる推定のフロー

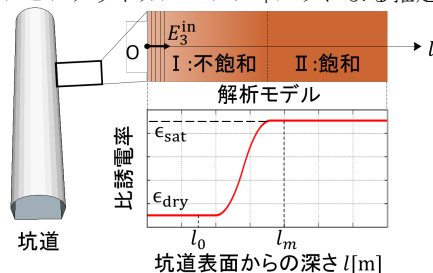


図2 対象とする問題の解析モデル

出力値 $\hat{y}_k^-$ の計算において、非線形変換の計算が必要となるが、本研究では、この計算に1次元有限要素法を用いる。

(2) 対象とする問題と非線形システムの対応

本研究では、図2に示す坑道周辺の岩盤モデルに対して、坑道の壁面上の点Oから岩盤へ入射波 E_3^{in} を入射させ、反射波を観測したと仮定する。入射波 E_3^{in} にはTE波を用いる。坑道壁面から岩盤の深さ方向に l 軸を取り、この軸に沿った1次元誘電率分布 $\epsilon(l)$ を推定する。 $l_0 \leq l < l_m$ の範囲における $\epsilon(l)$ を m 個の要素 $\epsilon_i(l)$ ($i = 1, 2, \dots, m$)の和からなると考え、エルミート補間法を用いて表現する。本研究では、エルミート補間に用いる補間点を図3に示すように ϵ_i ($i = 0, 1, \dots, m$)とする。また、図3に示すように補間点のまわりに補助点 $i - \frac{1}{2}$ ($i = 1, 2, \dots, m$)を設定し、その点 $i - \frac{1}{2}$ における比誘電率を $\epsilon_{i-\frac{1}{2}}$ とする。両端の補助点及び補間点の座標値は、 $\epsilon_0 = \epsilon_{1-\frac{1}{2}} = \epsilon_{\text{dry}}$, $\epsilon_m = \epsilon_{m-\frac{1}{2}} = \epsilon_{\text{sat}}$ に固定する。 ϵ_{dry} , ϵ_{sat} はそれぞれ乾燥、飽和状態における比誘電率である。 ϵ_i , ϵ'_i は、 $\epsilon_{i-\frac{1}{2}}$, $\epsilon_{i+\frac{1}{2}}$ からそれぞれ

$$\epsilon_i = \frac{\epsilon_{i-\frac{1}{2}} + \epsilon_{i+\frac{1}{2}}}{2}, \epsilon'_i = \frac{\epsilon_{i+\frac{1}{2}} - \epsilon_{i-\frac{1}{2}}}{\Delta l} \quad (3)$$

と求める。状態量 x_k を補助点に対応させ、

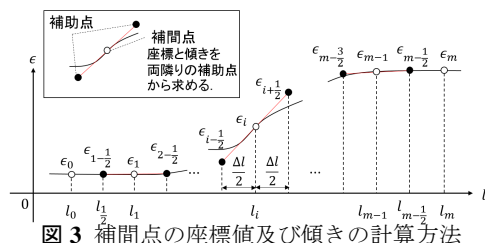


図3 補間点の座標値及び傾きの計算方法

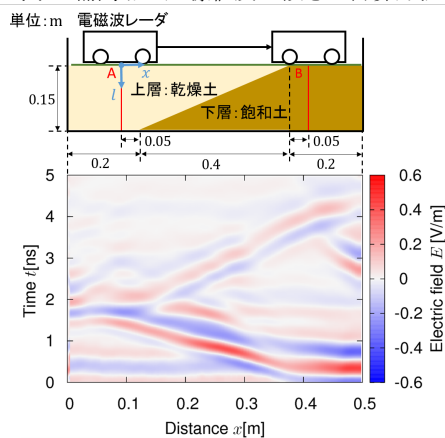


図4 実験に用いる土層と反射波の観測結果

$$\mathbf{x}_k = \left\{ \epsilon_{2-\frac{1}{2}}, \dots, \epsilon_{i-\frac{1}{2}}, \dots, \epsilon_{m-\frac{3}{2}} \right\}^T \quad (4)$$

と構成する. ここで, $\{\}^T$ は転置を表す. 観測量 $\mathbf{y}_k$ は, 観測される反射波の時刻暦データの離散値 $O(t_i)$ ($i = 0, 1, 2, \dots, p$) を用いて, 以下の式 (5) により構成する.

$$\mathbf{y}_k = \left\{ O(t_0), O(t_1), \dots, O(t_i), \dots, O(t_p) \right\}^T \quad (5)$$

以上の対応により, UKF を用いて誘電率分布を推定する.

3. 電磁波レーダー実験

電磁波レーダー実験は, 図4に示すように乾燥土 ($\epsilon_{\text{dry}} = 3.96$) 及び飽和土 ($\epsilon_{\text{sat}} = 26.79$) によって構成される土層に対して実施した. ただし, 乾燥土と飽和土の境界にはラップフィルムを敷き, 飽和土から乾燥土への間隙水の流入を防ぐようにした. 土層の表面において, 点 A-B 間を電磁波レーダーにより走査し, 反射波を観測する. 点 A を原点として走査方向に x 軸, 土層の深さ方向に l 軸をとる. $x = 0.15, 0.20, 0.25, 0.30$ [m] における l 軸方向の 1 次元誘電率分布を, それぞれ D, E, F 及び G とし, 推定の対象とした. なお, 本稿に示す推定では, 反復回数は $N = 300$ としている.

図5には, 観測量の初期値 ($k = 0$) 及び推定値 ($k = 300$) と, 電磁波レーダーによる観測データの比較を示す. この結果から, UKF によって観測データである反射波の波形に近づくように状態量の推定が行われ, 観測量そのものを概ね再現することができた. 一方で, 図6には, 推定された状態量 $\mathbf{x}_k$ から計算した誘電率分布 (実線) と, 観測された電磁波が伝搬したと予想される経路における誘電率分布 (点線) を示す. この結果から, 本手法では, ラップフィルムで間隙水の流動を防止した乾燥土と飽和土の境界を明確

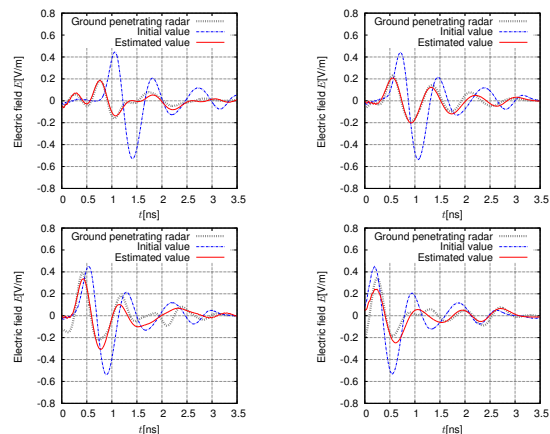


図5 初期値, 推定値における観測量及び走査による観測データ (左上: 誘電率分布 D, 右上: E, 左下: F, 右下: G)

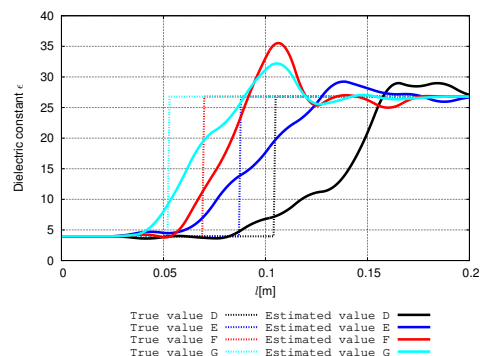


図6 予想される誘電率分布と推定した状態量に基づく誘電率分布の比較

には推定することができなかった. この原因のひとつとして, 数値シミュレーションにおいて電磁波の幾何拡散と土粒子, 水粒子への電磁波の吸収を考慮していないことが挙げられる.

4. おわりに

本稿では, UKF を用いた誘電率の 1 次元分布の推定手法を用いて, 土層の 1 次元誘電率分布の推定を行った. 本手法を用いることにより, 観測波形を概ね再現することができたが, 誘電率分布は, 予想される分布とは異なる結果が得られた. この原因として, 数値シミュレーションにおいて電磁波の減衰を無視していた点が挙げられる. このため, 今後は, 減衰の影響を考慮した推定手法の開発を行う予定である.

謝辞

本稿に示した電磁波レーダー実験において, 愛媛大学大学院生産環境工学専攻構造工学研究室・中畑和之教授および同研究室修士 2 年 (当時)・岸岡大樹氏の協力を得た. 記して謝意を表す.

参考文献

- 1) 藪内聡, 國丸貴紀, 岸敦康, 小松満: 水平坑道の掘削に伴う坑道周辺の間隙水圧・岩盤水分量モニタリング-幌延深地層研究所 140m 調査坑道での測定-, 土木学会論文集 C(地圏工学), Vol.67, No.4, pp.464-473, 2011.
- 2) 西垣誠, 小松満, 金萬鎭: FDR 法による土壌・地下水汚染のモニタリング手法に関する基礎的研究, 地下水学会誌, Vol.46, No.2, pp.145-157, 2004.
- 3) 高木勘多, 古川陽, 廣瀬壮一: 電磁波の反射特性を利用した坑道周辺の誘電率分布の推定, 土木学会年次学術講演会概要集 (CD-ROM), Vol.71, 原稿番号: CS8-013, 2016.