

電磁波の反射特性を利用した坑道周辺の飽和度分布の推定

○東京工業大学大学院 学生会員 高木 勤多
 東京工業大学大学院 正会員 古川 陽
 東京工業大学大学院 正会員 廣瀬 壮一

1. はじめに

原子力発電所で発生する放射性廃棄物の処理方法として、深層処分が提案されている。処分場の建設では、岩盤に多数の坑道が掘削され、坑道周辺において不飽和領域の発生が予想される。不飽和領域により、地下水の流動挙動の変化等、廃棄物の管理に影響を及ぼすことが懸念されている¹⁾。そのため、坑道周辺の含水状態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ことが知られている。そのため、電磁波の伝搬特性を利用して、岩盤中の誘電率を求め、飽和度を推定することができる。その代表として FDR-V 法²⁾ が挙げられる。FDR-V 法では、岩盤に差し込んだプローブに電磁波を入射させ、プローブ先端部での反射係数を測定し、誘電率を求める。しかし、FDR-V 法の誘電率の計測範囲は岩盤とプローブの接触面のみであり、広範囲に及ぶ誘電率の分布を把握するのは困難である。

そこで、本研究では、電磁波の反射特性から岩盤内部の飽和度の 1 次元分布を推定する方法を開発する。具体的には、飽和度が深さ方向に変化する領域に電磁波を入射させ、観測される反射波の周波数特性から誘電率分布を求める。さらに、誘電率と飽和度の関係式を用いて、飽和度を算出する。推定アルゴリズムはアンセンテッドカルマンフィルタとし、電磁波の伝搬解析には有限要素法を用いる。本稿では、提案手法の検証として、数値シミュレーションによって得られた観測値を用いた推定結果を示す。

2. 解析手法

(1) アンセンテッドカルマンフィルタ

本研究では、誘電率分布の推定手法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、誤差を含む観測値から状態量を推定することができる。UKFでは、以下に示す状態空間表現を用いて、状態量の推定を行う³⁾。

$$y_k = h(x_k) + w_k \tag{1}$$

$$x_{k+1} = x_k \tag{2}$$

式(1)は観測方程式、式(2)は状態方程式と呼ばれる。ただし、これらの式において、 y_k は観測量ベクトル、 x_k は

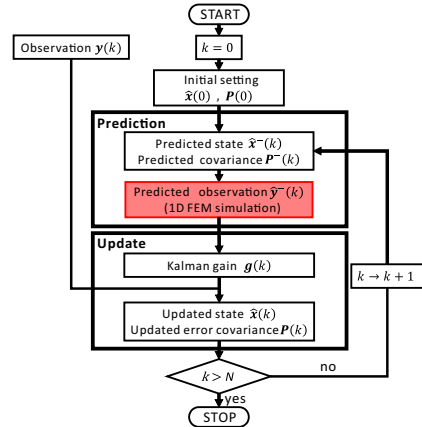


図1 アンセンテッドカルマンフィルタによる推定のフロー

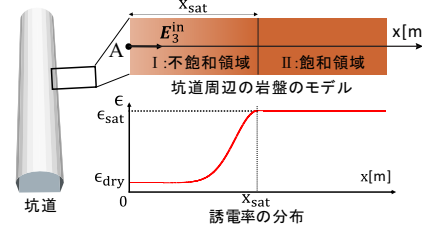


図2 対象とする問題の解析モデル

状態量ベクトル、 w_k は観測雑音を表す。また、 $h(\cdot)$ はシステムを表す非線形関数であり、 k は推定における反復回数を表す。

UKFを用いた推定のフローを図1に示す。UKFでは、「予測」と「更新」の手順を N 回繰り返すことで推定を行う。「予測」では、1ステップ前の状態推定値 \hat{x}_{k-1} と事後誤差共分散 P_{k-1} からシグマポイントを用いたサンプリングによって状態予測値 \hat{x}_k^- 、事前誤差共分散 P_k^- 、および事前出力値 \hat{y}_k^- を求める。「更新」では、カルマンゲイン g_k と観測量ベクトル y_k を用いて、 \hat{x}_k^- 、 P_k^- の補正し、状態推定値 \hat{x}_k および事後誤差共分散 P_k を計算する。

(2) 対象とする問題

本研究で想定する解析モデルを図2に示す。本研究では、この解析モデルに対して、坑道の壁面から電磁波を入射させ、観測される反射波から誘電率および飽和度を推定する。坑道壁面から岩盤に向かって x_1 軸を設定することで、この軸に沿った誘電率および飽和度の 1 次元分布を考える。このとき、入射波には電界が入射面に対して垂直な成分 E_3 のみをもつ TE 波を用いる。岩盤は、不飽和領域 ($0 \leq x \leq x_{sat}$) と飽和領域 ($x_{sat} < x$) によって構成されると仮定し、それぞれの領域における誘電率分布を以下の式で与える。

$$\epsilon(x) = \begin{cases} (\epsilon_{\text{sat}} - \epsilon_{\text{dry}})e^{-C^2(x_{\text{sat}}-x)^2} + \epsilon_{\text{dry}} & : 0 \leq x \leq x_{\text{sat}} \\ \epsilon_{\text{sat}} & : x_{\text{sat}} < x \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 ϵ_{dry} および ϵ_{sat} は、それぞれ乾燥、飽和状態における岩盤の誘電率を表す。また、 x_{sat} は坑道壁面から飽和領域までの距離、 C は誘電率分布の形状を決めるための定数である。定数 C は誘電率の変化の緩急を表し、その値が大きいほど変化は急激となる。以上の問題設定より、誘電率分布は x_{sat} および C により決定される。そこで、想定する問題にアンセンテッドカルマンフィルタを適用することで、これら2つの状態量を推定する方法を考える。

(3) 提案する飽和度の推定手法

本研究では、状態量ベクトル \mathbf{x}_k を坑道壁面から飽和領域までの距離 x_{sat} と誘電率分布の形状を表す定数 C を用いて、以下の様に構成する。

$$\mathbf{x}_k = \begin{Bmatrix} x_{\text{sat}} \\ C \end{Bmatrix} \quad (4)$$

また、観測量ベクトル \mathbf{y}_k は電磁波の反射特性を用いて表現する。電磁波の反射特性 $\tilde{Z}(f)$ は、以下の式で定義する。

$$\tilde{Z}(f) = \frac{\tilde{O}(f)}{\tilde{I}(f)} \quad (5)$$

ここで、 $\tilde{I}(f)$ および $\tilde{O}(f)$ は、坑道壁面への入射波 $I(t)$ と得られた観測記録 $O(t)$ のフーリエ変換を表す。観測量ベクトル \mathbf{y}_k は反射特性 $\tilde{Z}(f)$ の実部と虚部から、次式で構成される。

$$\mathbf{y}_k = \begin{Bmatrix} [\text{Re}[\tilde{Z}(f_0)], \text{Re}[\tilde{Z}(f_1)], \dots]^T \\ [\text{Im}[\tilde{Z}(f_0)], \text{Im}[\tilde{Z}(f_1)], \dots]^T \end{Bmatrix} \quad (6)$$

ここで、 $f_i (i = 0, 1, \dots)$ は周波数の離散値を表す。また、 Re および Im はそれぞれ複素数の実部および虚部を、 $[\]^T$ は転置を表す。なお、観測値 \mathbf{y}_k の計算には、有限要素法を用いる(図1赤枠部分参照)。上述した推定手法により、まず岩盤内部の誘電率の分布 $\epsilon(x)$ を推定し、その後、以下に示す誘電率と飽和度の関係式を用いて飽和度の空間分布 $S_r(x)$ を求める⁴⁾。

$$S_r(x) = \frac{\{\epsilon(x)\}^\alpha - \epsilon_{\text{dry}}^\alpha}{\epsilon_{\text{sat}}^\alpha - \epsilon_{\text{dry}}^\alpha} \quad (7)$$

ここで、 ϵ_{sat} 、 ϵ_{dry} はそれぞれ飽和、乾燥状態における媒質の誘電率、 α は現場でのキャリブレーションにより決定される定数 ($-1 < \alpha < 1, \alpha \neq 0$) である。

3. 数値解析例

提案手法を用いて、岩盤内部の誘電率および飽和度の分布を推定する。ただし、本稿で示す解析例は提案手法の検

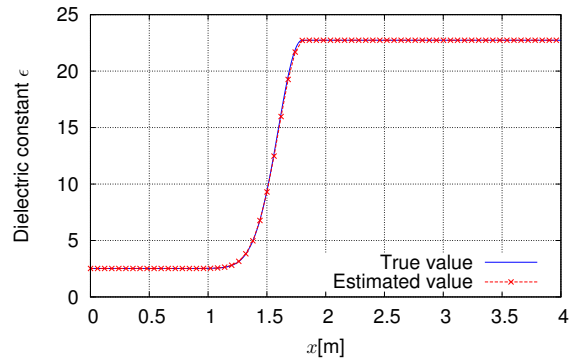


図3 比誘電率分布の真値と推定値

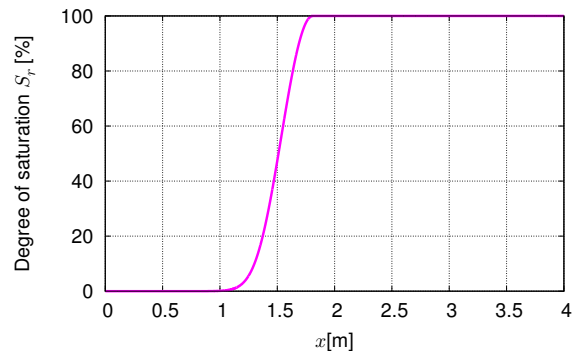


図4 誘電率分布の推定値から得られた飽和度の分布

証が目的であり、観測記録 $O(t)$ は有限要素法によって計算された値を用いる。状態量ベクトルの真値を $(x_{\text{sat}}, C) = (1.8, 12)$ 、初期値を $(x_{\text{sat}}, C) = (2.0, 10)$ 、反復回数 N は 200000 回とした。反復計算の結果、状態量ベクトルの推定値は $[x_{\text{sat}}, C]^T = \{1.808932, 11.51913\}$ となった。推定値から得られる比誘電率(媒質と真空中の誘電率の比)の分布を図3に示す。図3から、推定した比誘電率は真値と概ね一致した。また、得られた誘電率分布から飽和度分布を求めた結果は図4に示す通りである。

4. おわりに

坑道周辺岩盤の飽和度の1次元分布を、アンセンテッドカルマンフィルタと有限要素法を組み合わせた手法を用いて推定した。簡単な数値実験の結果から、岩盤内部の誘電率および飽和度の分布を概ね把握することができた。今後は、初期条件の設定方法と、反復計算の収束条件について検討する予定である。

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ー幌延深地層研究所 140m 調査坑道での測定ー, 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, 金萬鎰: 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) 西山清: カルマンフィルタ, 電子情報通信学会, 1群-5編-6章, 2011.
- 4) Robinson, D. A., Jones, S. B., Blonquist Jr., J. M., and Friedman, S. P.: A physically derived water content/permittivity calibration model for coarse-textured, Layered Soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.* Vol.69, pp.1372-1378, 2005.