

岩盤の不飽和領域を対象とした 1次元誘電率分布の推定手法の開発

○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
東京工業大学 正会員 廣瀬 壮一

1. はじめに

現在，放射性廃棄物を安全に処分する手段として，放射能レベルが十分小さくなるまで，地中深くの坑道で保存する地層処分が提案されている¹⁾．地層処分は放射性廃棄物を地表表面から隔離し，我々の生活圏が放射性廃棄物によって侵されることを防ぐことができる．その一方で，処分場の建設時，多数の坑道が掘削され，地下水の流動に変化が生じ，放射性廃棄物が大きく拡散することが懸念されている．この問題に適切に対応するためには，坑道周辺の岩盤中における含水状態を広範囲に把握することが必要である．

岩盤中の含水状態の推定においては，岩盤中の誘電率を計測し，誘電率と飽和度の関係から，含水状態を推定する方法が一般的である．岩盤中の誘電率を計測する手法として，FDR-V法²⁾を代表とする接触型の計測法が挙げられる．このような接触型の計測では，プローブを接触させた位置における誘電率しか計測できず，広範囲に渡る岩盤の含水状態の把握をするためには多くの時間と労力が必要となる．

このような背景を踏まえ，本研究では，岩盤の広域的な誘電率分布を容易に推定する手法の開発を目的とする．提案する手法は，地下坑道の岩盤壁面から電磁波を入射させ，得られる反射波の時刻歴データを利用して，誘電率分布を推定するというものである．今回提案する手法では，アンセンテッドカルマンフィルタに多層構造における反射波の計算を組み合わせ，誘電率分布の推定を行う．

2. 提案する推定手法

(1) アンセンテッドカルマンフィルタ

今回提案する手法では，誘電率分布の推定アルゴリズムとして，アンセンテッドカルマンフィルタを用いる³⁾．アンセンテッドカルマンフィルタでは，以下に示す状態空間表現を用いる．

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{H}(\mathbf{x}(k)) + \mathbf{w}(k) \quad (1)$$

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{x}(k) \quad (2)$$

ここで，式(1)は非線形変換 $\mathbf{H}(\cdot)$ を含む観測方程式，式(2)は状態量推定のための状態方程式である．また， k ($= 0, 1, 2, \dots$) は推定における反復回数を表し， $\mathbf{y}(k)$ は観測量ベクトル， $\mathbf{x}(k)$ は未知の状態量ベクトルを表す．さらに，

$\mathbf{w}(k)$ は観測ノイズを表し，平均値がゼロの正規性白色雑音とする．

(2) 対象とする問題と多層構造における反射波の計算

本研究では，対象とする岩盤を，図1(a)に示すように，乾燥領域，乾燥状態から飽和状態へと含水状態が滑らかに変化する不飽和領域，飽和領域の三つの領域からなると仮定し，坑道壁面から電磁波を入射する問題を考える．図1(a)の赤枠で囲まれた不飽和領域を比誘電率分布の推定範囲とし，その層の厚さを $H[\text{m}]$ とする．不飽和領域の比誘電率分布が図1(b)に示すように与えられるとき，図1(c)に示すような推定範囲に分布する代表点における比誘電率の値を，推定する状態量ベクトル $\mathbf{x}(k)$ の成分とする．また，観測量ベクトル $\mathbf{y}(k)$ として，坑道壁面から入射した電磁波の反射波の時刻歴データを用いる．

比誘電率の代表値である状態量ベクトル $\mathbf{x}(k)$ を用いて，反射波の時刻歴である観測量ベクトル $\mathbf{y}(k)$ の計算を行うために，まず，図1(c)の比誘電率の代表値から，代表値間の比誘電率が不明な部分を補間することで，図1(d)に示すような比誘電率分布を仮定する．比誘電率分布が滑らかに変化する領域の反射波の計算は複雑となるため，本研

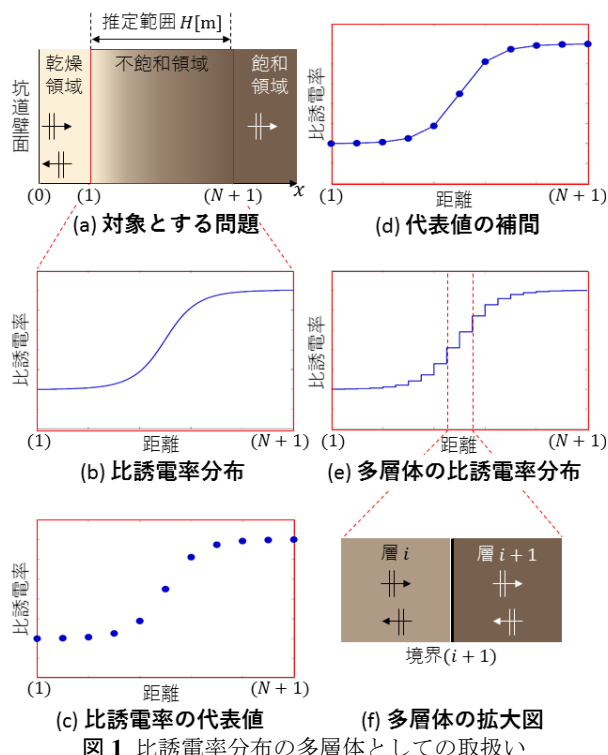


図1 比誘電率分布の多層体としての取扱い

究では、図 1 (e) に示すように、補間された比誘電率分布を比誘電率分布が様な層によって構成される多層構造によって表現し、各層の境界で起こる波の反射・透過を考え、反射波の計算を行う。ここで、対象とする岩盤について、図 1 (a) に示すように、坑道壁面を境界 (0) とし、乾燥領域と不飽和領域の境界を境界 (1)、不飽和領域と飽和領域の境界を境界 ($N+1$) とする。また、推定範囲である不飽和領域を N 個の層によって構成されるものとし、図 1 (f) に示すように、層 i と層 $i+1$ の境界を境界 ($i+1$) とする ($i=1, 2, \dots, N-1$)。ある周波数 f を考え、境界 (1) から不飽和領域に垂直に入射する波の振幅および不飽和領域による反射波の振幅を、それぞれ $\tilde{u}^{\text{in}}$ および $\tilde{u}^{\text{ref}}$ とすると、 $\tilde{u}^{\text{in}}$ と $\tilde{u}^{\text{ref}}$ には次の関係式が成り立つ。

$$\tilde{u}^{\text{ref}}(f) = \frac{B_{12} + r_{-}^{(1)} B_{22}}{r_{-}^{(1)} B_{12} + B_{22}} \tilde{u}^{\text{in}}(f) \quad (3)$$

ここで、 $r_{-}^{(i)}$ および $t_{-}^{(i)}$ は、境界 (i) において、 x 軸の負方向に伝搬する入射する電磁波の反射係数および透過係数を示す。また、 B_{ij} は以下に示す行列 $\mathbf{B}$ の成分である。

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{bmatrix} = \mathbf{A}^{(2)} \mathbf{A}^{(3)} \dots \mathbf{A}^{(N+1)} \quad (4)$$

さらに、式 (4) の行列 $\mathbf{A}^{(i)}$ ($i=1, 2, \dots, N$) は次式で表される。

$$\mathbf{A}^{(i+1)} = \frac{1}{t_{-}^{(i+1)}} \begin{bmatrix} \exp(ik^i h^i) & r_{-}^{(i+1)} \exp(ik^i h^i) \\ r_{-}^{(i+1)} \exp(-ik^i h^i) & \exp(-ik^i h^i) \end{bmatrix} \quad (5)$$

ここで、 i は虚数単位、 k^i は層 i における波数、 h^i は層 i の厚さである。式 (3)-(5) から、多層体の物性値と入射波の振幅を与えることで、反射波を得ることができる。なお、上述の計算は周波数領域で行うが、推定に用いる観測量ベクトル $\mathbf{y}(k)$ の成分は時間領域の値である。そのため、反射波 $\tilde{u}^{\text{ref}}$ をフーリエ逆変換することで、時間領域における反射波を得る。

最後に、数値計算において、不飽和領域を多層体と考える際の適切な層数の決定方法について説明する。本研究では、不飽和領域を 2^n 個の層 (n は自然数) に分割する。このとき、自然数 n を 1 から順に増やし反射波の計算を行い、 $n \geq 2$ において、層数の変化による反射波の変化が十分小さくなったとき、領域の分割数を 2^n に決定し、反射波の計算を終了する。

3. 数値実験による検証

提案する推定手法を検証するため、数値実験を行った。観測量ベクトルは、前節に示した方法を用いて数値的に計算し、観測ノイズは、その平均値を 0、分散を 1.0×10^{-6}

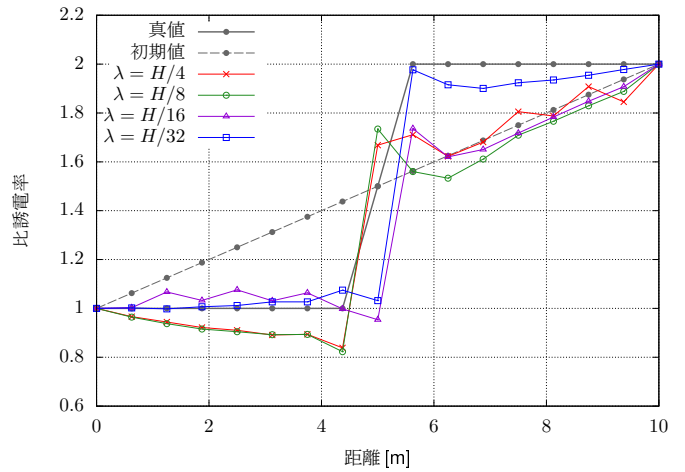


図 2 比誘電率分布の真値、初期値、推定値

とする正規性白色雑音とし、推定する比誘電率の代表値の数、すなわち状態量ベクトルの次数は 15 とし、推定範囲は $H = 10[\text{m}]$ とした。また、比誘電率の代表値の補間には、線形補間を用いた。なお、入射波 $u^{\text{in}}(t)$ は次式で与えた。

$$u^{\text{in}}(t) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left\{ 1 - \cos \left(2\pi \frac{v_{\text{dry}}}{\lambda} t \right) \right\} & : 0 \leq t \leq \lambda/v_{\text{dry}} \\ 0 & : t > \lambda/v_{\text{dry}} \end{cases} \quad (6)$$

ここで、 v_{dry} は乾燥状態における電磁波の速度、 λ は波長である。今回の数値実験では、入射波の波長を $\lambda = H/4, H/8, H/16, H/32$ として、波長の変化による推定値の違いを調べた。

推定結果として、図 2 には、比誘電率の代表値の真値、初期値、各波長での推定値に加え、それぞれの代表値を線形補間して得られる比誘電率分布を示す。図 2 に示すように、入射波の波長 λ に依存して推定結果が大きく異なり、特に $\lambda = H/32$ のとき、他の推定結果と比較して、真値に近い値が得られる結果となった。

4. おわりに

本研究では、岩盤に入射する電磁波に対する反射波の時刻歴データを用いて、岩盤中の比誘電率分布を推定する手法を提案した。提案手法では、推定にはアンセンテッドカルマンフィルタを用い、乾燥状態から飽和状態へと含水状態が滑らかに変化する不飽和領域を多層体で近似し、反射波の計算を行った。提案する推定手法を用いた数値実験により、入射波の波長が推定結果に影響を及ぼすことがわかった。

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, 金満鎗: 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) 足立修一, 丸田一郎: カルマンフィルタの基礎, 東京電機大学出版局, 2012.