

交互に異なる分散性媒質の電磁パルス応答

Electromagnetic Pulse Responses from Alternately Different the Dispersion Media

○賀川智弘¹, 尾崎亮介², 山崎恒樹²*Tomohiro Kagawa¹, Ryosuke Ozaki², Tsuneki Yamasaki²

Abstract: In recent papers, we have analyzed the pulse responses from dispersion media with different moisture ratio by using the Fast Inversion of Laplace Transform method(FILT). We derived the reflection coefficients of different dispersive media alternately and examined the effect of medium interaction from pulse response analysis.

1. はじめに

地中レーダ^[1]は、非破壊^[2]で地中に存在する物体を探索できる技術として知られている。特に、地雷探査や災害時に利用されるため必要不可欠な技術である。一方、一般的な地下構造は、深さ方向に様々な分散性媒質で構成されているものと考えられる。著者らは先に、分散性媒質の間に空気層を導入した問題の定式化を行い、空気層の厚みによる影響を検討してきた^[3]。

本文では、交互に異なる分散性媒質の反射係数を導出し、FILT 法^[4]を用いて媒質の相互作用の影響をパルス応答から検討する。加えて、いずれかの層に空気層を配置した場合の影響についても検討した。

2. 解析法

本文で検討する構造を Fig.1 に示す。Fig.1 は $x < 0$ が真空、 $0 \leq x < d$ の領域は 4 層の分散性媒質 (誘電率 $\varepsilon_1 \sim \varepsilon_4$) で、各厚みを $d_1 \sim d_4$ とする。 $x = d$ の位置に完全導体板を埋没した構造とする。ここで、入射波は電界の z 成分のみをもつ平面波を垂直に入射し、 $x = 0$ での入射パルスは直流成分を含まない次式とした^[3]。

$$e_0^{(i)}(t) = [u(t) - u(t - t_w)] \sin(2\pi t / t_w), \quad (1)$$

但し、 t_w は入射パルスのパルス幅 ($t_w := 1/f_0$) である。

式(1)の Laplace 変換は、次式となる^[3]。

$$E_0^{(i)}(s) = \frac{2\pi / t_w}{s^2 + (2\pi / t_w)^2} (1 - \exp(-st_w)), \quad (2)$$

領域 $S_1 \sim S_5$ の電磁界は次式で表現できる。

$$E_z^{(1)}(s) = E_z^{(i)}(s) + E_z^{(r)}(s) = E_0^{(i)}(s)e^{-k_0 x} + R(s)e^{k_0 x} \quad (3)$$

$$E_z^{(n+1)}(s) = A_n e^{-k_n x} + B_n e^{k_n x}, \quad (n=1 \sim 4) \quad (4)$$

$$H_y^{(j)}(s) = \frac{1}{s\mu_0} \frac{\partial E_z^{(j)}(s)}{\partial x}, \quad (j=1 \sim 5) \quad (5)$$

但し、各領域の波数は、

$$k_0 := s\sqrt{\varepsilon_0\mu_0} = s/c, \quad k_n := k_0\sqrt{\varepsilon_n/\varepsilon_0}, \quad (n=1 \sim 4),$$

である。ここで、 A_n, B_n は境界条件によって求まる未知定数である。又、電磁界の時間因子は、 $\exp(st)$ とし て省略した。

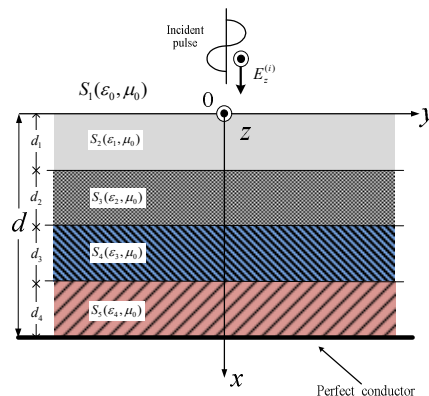


Fig.1 Structure and coordinate system

一般に分散性媒質の解析は、媒質定数が周波数の関数となる。分散性媒質の誘電率 $\varepsilon_L(s)$ を Selmeier の 3 項式と土壌含有水分による損失の影響を考慮し次式を用いる^[5]。

$$\frac{\varepsilon_L(s)}{\varepsilon_0} = 1 + \sum_{l=1}^3 \frac{\Omega_{l,L}^2}{s^2 + g_{l,L}s + \omega_{l,L}^2} + \frac{\tau_{0,L}}{1 + s\tau_L}, \quad (L=1 \sim 2) \quad (6)$$

但し、式(6)の $(\Omega_{l,L}, g_{l,L}, \omega_{l,L})_{l=1 \sim 3}, (\tau_{0,L}, \tau_L)$ は文献[5]で求めた値を利用する。式(3)-(5)を用いて、 $x=0, d_1, d_1+d_2, d_1+d_2+d_3, d$ での境界条件より $x=0$ での、反射係数は、

$$R(s) = -\frac{(Q_{1a} + Q_{1b}) + (Q_{3a} + Q_{3b})}{(Q_{2a} + Q_{2b}) + (Q_{4a} + Q_{4b})}, \quad (7)$$

となる。式(7)を式(3)の反射波に代入し、FILT 法^[4]により時間領域での応答を求める。但し、

$$Q_{1a} := \Gamma_4 e^{-2k_3 d_3} (e^{-2k_1 d_1 - 2k_2 d_2} + \Gamma_3 \Gamma_2 e^{-2k_1 d_1} + \Gamma_2 \Gamma_1 e^{-2k_2 d_2} + \Gamma_3 \Gamma_1),$$

$$Q_{1b} := \Gamma_3 e^{-2k_1 d_1 - 2k_2 d_2} + \Gamma_2 e^{-2k_1 d_1} + \Gamma_3 \Gamma_2 \Gamma_1 e^{-2k_2 d_2} + \Gamma_1,$$

$$Q_{2a} := \Gamma_4 e^{-2k_3 d_3} (\Gamma_1 e^{-2k_1 d_1 - 2k_2 d_2} + \Gamma_3 \Gamma_2 \Gamma_1 e^{-2k_1 d_1} + \Gamma_2 e^{-2k_2 d_2} + \Gamma_3),$$

$$Q_{2b} := \Gamma_3 \Gamma_1 e^{-2k_1 d_1 - 2k_2 d_2} + \Gamma_2 \Gamma_1 e^{-2k_1 d_1} + \Gamma_3 \Gamma_2 e^{-2k_2 d_2} + 1,$$

$$Q_{3a} := e^{-2k_3 d_3 - 2k_4 d_4} (e^{-2k_1 d_1 - 2k_2 d_2} + \Gamma_3 \Gamma_2 e^{-2k_1 d_1} + \Gamma_2 \Gamma_1 e^{-2k_2 d_2} + \Gamma_3 \Gamma_1),$$

$$Q_{3b} := \Gamma_4 e^{-2k_4 d_4} (\Gamma_3 e^{-2k_1 d_1 - 2k_2 d_2} + \Gamma_2 e^{-2k_1 d_1} + \Gamma_3 \Gamma_2 \Gamma_1 e^{-2k_2 d_2} + \Gamma_1),$$

$$Q_{4a} := e^{-2k_3 d_3 - 2k_4 d_4} (\Gamma_1 e^{-2k_1 d_1 - 2k_2 d_2} + \Gamma_3 \Gamma_2 \Gamma_1 e^{-2k_1 d_1} + \Gamma_2 e^{-2k_2 d_2} + \Gamma_3),$$

$$Q_{4b} := \Gamma_4 e^{-2k_4 d_4} (\Gamma_3 \Gamma_1 e^{-2k_1 d_1 - 2k_2 d_2} + \Gamma_2 \Gamma_1 e^{-2k_1 d_1} + \Gamma_3 \Gamma_2 e^{-2k_2 d_2} + 1),$$

$$\Gamma_1 := \frac{1 - k_0/k_1}{1 + k_0/k_1}, \Gamma_2 := \frac{1 - k_1/k_2}{1 + k_1/k_2}, \Gamma_3 := \frac{1 - k_2/k_3}{1 + k_2/k_3}, \Gamma_4 := \frac{1 - k_3/k_4}{1 + k_3/k_4},$$

である。

3. 数値解析

本文の構造 Parameter は、中心周波数 $f_0=1$ GHz, $\epsilon_1 = \epsilon_1(s)[5\%]$, $\epsilon_4 = \epsilon_2(s)[10\%]$ である.

Fig.2(a)は、導出した式(7)を用いて、 $D_2 = D_3 = 0.05$ の条件で、分散性媒質間に空気層を配置した場合の結果①を示した. なお、図中の青プロットは前論文^[3]の結果である. ②の結果は、領域 S_3, S_4 の誘電率を $\epsilon_2 / \epsilon_0 = \epsilon_3 / \epsilon_0 = 1.5$ とした場合で、③の結果は、空気層を2つの層に分け、 $\epsilon_2 / \epsilon_0 = 1$, $\epsilon_3 / \epsilon_0 = 2$ とした場合である. さらに比較のため、 $D_4 = 100$ として①の条件で導体の効果がない結果も図中に示した. Fig.2(a)より次の事がわかる.

- (1) ①の結果と前論文^[3]の結果はよく一致していることがわかるので式(7)の正当性を示すことができた.
- (2) ④の結果より、導体板がないと、 $T \approx 3.0$ 以降でゼロに収束している様子が確認できる.
- (3) ②と③を比較すると、③の方が②より早く立ち上がっていることがわかる.

次に Fig.2(b)は、Fig.2(a)の差分応答を示したものである. Fig.2(b)より、応答波形の傾向はほぼ同じであるが、位相差に影響していることがわかる. すなわち、位相差がわかれば誘電率の大きさを把握できると考えられる.

Fig.3(a)は、Fig.2(a)と同じ条件で $D_2 = D_3 = 0.25$, 領域 S_2, S_4 と領域 S_3, S_5 が等しい分散性媒質とし、領域 S_3 から S_5 に空気層の配置を変えた場合の応答を示したものである. Fig.3(a)より空気層の配置を変えると、応答の現れる時間が異なっている事がわかる. この空気層の応答を明確にするため、差分波形から検討する.

Fig.3(b)は、Fig.3(a)の差分応答を示したものである. Fig.3(b)より応答波形が現れる時間によって、空気層の位置情報を推定することができる.

4. まとめ

本文では、交互に異なる分散性媒質の反射係数を導出し、分散性媒質と空気層の相互作用の影響をパルス応答から検討した. その結果、分散性媒質の反射応答から空気層の位置情報を把握することができた. 今後は、深さ方向に周期性を有する場合について検討する予定である.

5. 参考文献

- [1] H.M.Jol : Ground Penetrating Rader-Theory and Applications, Elsevier, 2009.
- [2] 特集「遺跡探査に利用されている電気技術」,vol.125, No.3, pp.173-176, 2005.
- [3] 星, 尾崎, 山崎: 日大理工学術, L-63, pp.1026-1027, 2016.
- [4] 細野 : BASIC による高速ラプラス変換, 1984.
- [5] R.Ozaki, N.Sugizaki and T.Yamasaki: IEICE Trans.Electron., vol.E97-C, No.1, pp.45-49, 2014.

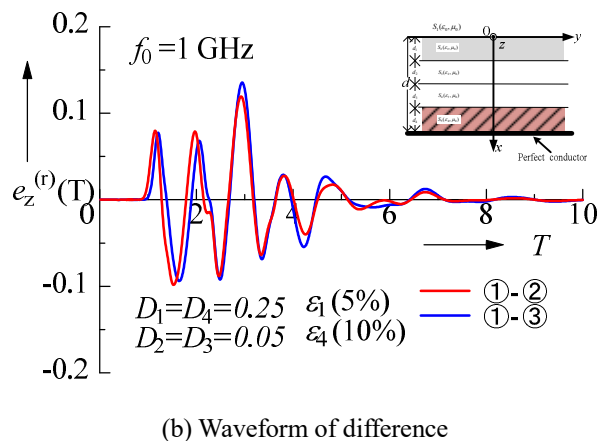
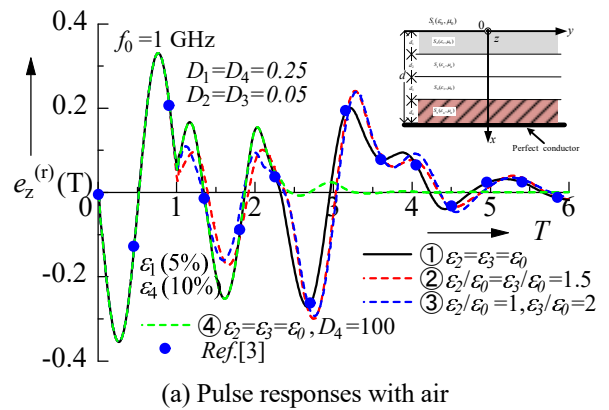


Fig.2 Pulse responses by companson of various medium

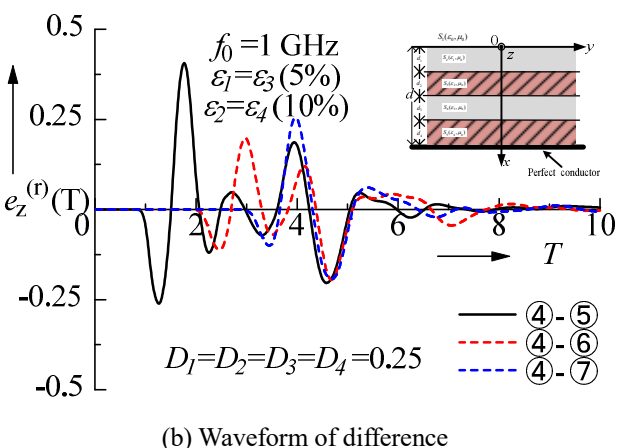
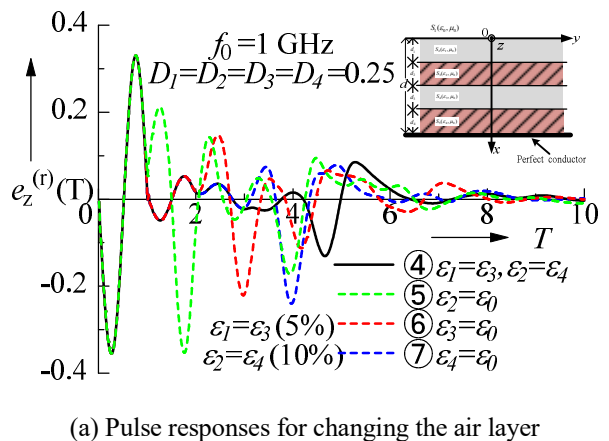


Fig.3 Pulse responses from alternately different