

分散性媒質内部に空洞を考慮したパルス応答の過渡解析

Transient Analysis of Pulse Responses in Dispersion Media with Air Layer

○星陽介¹, 尾崎亮介², 山崎恒樹²*Yosuke Hoshi¹, Ryosuke Ozaki², Tsuneki Yamasaki²

Abstract: In recent papers, we analyzed the pulse responses from dispersion media with different moisture ratio by using the Fast Inversion of Laplace Transform method(FILT). We analyzed the pulse responses in dispersion media with air layer for TE case, and investigated an influence for both depth of air layer and setting of air layer.

1. はじめに

地中探査レーダ^[1]は、非破壊^[2]で地中に存在する金属(地雷)や非金属(誘電体)を探索できる技術として知られている。特に、都市部には、下水道管、電力・通信ケーブルなどが複雑に埋設されているので地下構造を精度良く探索するためには埋設物の位置や形状を把握することが必須条件で分解能向上が必要不可欠な技術である。

本文では、先に検討してきた分散性媒質間に空気層(空洞)を導入し^[3,4]、パルス応答の影響を検討する。また空気層の影響を調べるために空気層の厚みを変化した場合の影響についても検討した。

2. 解析方法

本文で検討する構造を Fig.1 に示す。Fig.1 は領域 S_1 を真空媒質 ϵ_0 、領域 S_2, S_4 を分散性媒質($\epsilon_1 = \epsilon_1(s)$, $\epsilon_3 = \epsilon_2(s)$)と領域 S_3 に空洞($\epsilon_2 = \epsilon_0$)を導入した構造とする。なお、 $x = d$ の位置に完全導体板を埋設した構造である。ここで、分散性媒質の誘電率 $\epsilon_1(s), \epsilon_2(s)$ は一般に周波数の関数で媒質の比誘電率を Selmeier の 3 項式に水分を考慮した配向分極の項を追加し、 $l = 1, 2$ で領域 S_2 と S_4 の分散性媒質を表現する^[3]。

$$\frac{\epsilon_l(s)}{\epsilon_0} = 1 + \sum_{i=1}^3 \frac{\Omega_{l,i}^2}{s^2 + g_{l,i}s + \omega_{l,i}^2} + \frac{\tau_{0,l}}{1 + s\tau_l}, \quad (l=1,2) \quad (1)$$

本文では、入射電界は 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^[3,4]。

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

但し、 t_w はパルス幅である。周波数領域を解析する為、式(2)を Laplace 変換すると

$$E_0^{(i)}(s) = \frac{2\pi/t_w}{s^2 + (2\pi/t_w)^2} (1 - \exp(-st_w)), \quad (3)$$

を得る^[3,4]。領域 $S_1 \sim S_4$ の電磁界は次式で表現できる。

$$E_z^{(1)}(s) = E_0^{(i)}(s)e^{-k_0(s)x} + R(s)e^{k_0(s)x}, \quad (4)$$

$$E_z^{(2)}(s) = A_1 e^{-k_1(s)x} + B_1 e^{k_1(s)x}, \quad (5)$$

$$E_z^{(3)}(s) = A_2 e^{-k_2(s)x} + B_2 e^{k_2(s)x}, \quad (6)$$

$$E_z^{(4)}(s) = A_3 e^{-k_3(s)x} + B_3 e^{k_3(s)x}, \quad (7)$$

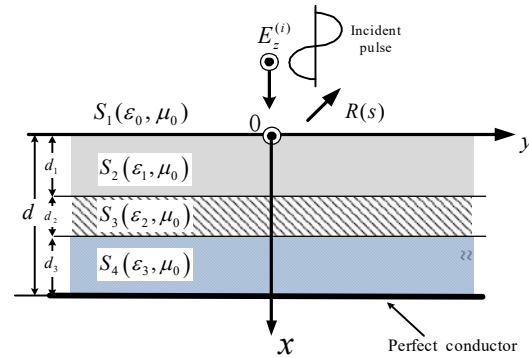


Fig.1 Structure and coordinate system

$$H_y^{(j)}(s) = \frac{1}{s\mu_0} \frac{\partial E_z^{(j)}(s)}{\partial x}, \quad (j=1 \sim 4), \quad (8)$$

但し、 c は光速で、各領域の波数は、

$$k_0(s) \triangleq s\sqrt{\epsilon_0\mu_0} = s/c, \quad k_1(s) \triangleq s\sqrt{\epsilon_1\mu_0},$$

$$k_2(s) \triangleq s\sqrt{\epsilon_2\mu_0}, \quad k_3(s) \triangleq s\sqrt{\epsilon_3\mu_0},$$

である。

式(4)~(8)を境界条件($x = 0, d_1, d_1 + d_2, x = d$)に代入し

て整理すると、 $x = 0$ での反射係数は、

$$R(s) = \frac{f_1(\Gamma_1 + \Gamma_2 e^{-2k_1 d_1}) + f_2(\Gamma_1 \Gamma_2 e^{-2k_2 d_2} + e^{-2(k_2 d_2 + k_1 d_1)})}{f_1(1 + \Gamma_1 \Gamma_2 e^{-2k_1 d_1}) + f_2(\Gamma_2 e^{-2k_2 d_2} + \Gamma_1 e^{-2(k_2 d_2 + k_1 d_1)})}, \quad (9)$$

となる。但し、

$$f_1 \triangleq 1 - \Gamma_3 e^{-2k_3 d_3}, \quad f_2 \triangleq \Gamma_3 - e^{-2k_3 d_3}, \quad n_1 \triangleq \sqrt{\epsilon_1/\epsilon_0},$$

$$n_2 \triangleq \sqrt{\epsilon_2/\epsilon_0}, \quad n_3 \triangleq \sqrt{\epsilon_3/\epsilon_0},$$

$$D_1 \triangleq d_1/(ct_w), \quad D_2 \triangleq d_2/(ct_w), \quad D_3 \triangleq d_3/(ct_w),$$

$$D \triangleq D_1 + D_2 + D_3,$$

$$\Gamma_1 \triangleq \frac{1-n_1}{1+n_1}, \quad \Gamma_2 \triangleq \frac{1-n_2/n_1}{1+n_2/n_1}, \quad \Gamma_3 \triangleq \frac{1-n_3/n_2}{1+n_3/n_2},$$

である。

3. 数値結果

本文では、空洞以外の媒質の規格化した厚みを 0.25 一定として、FILT 法を用いて以下解析した^[5]。

Fig.2 は、先に検討してきた 2 層の分散性媒質($D_2 = 0.0$)の赤線の結果と、規格化した厚み $D_2 = 0.1$ とした場合のパルス応答を比較したものである。なお、図中の青プロットは前論文^[4]で用いた式により計算し

た結果である。Fig.2 より次の事がわかる。

- (1) $D_2 = 0.0$ の結果と前論文^[4]の結果は良く一致していることがわかる。
- (2) 空洞を設けると $1.0 \leq T < 2.6$ での応答は、2 層の場合に比べて反射振幅が大きくなっていることがわかる。
- (3) $T \geq 2$ 以上での応答は、空洞を設けると全厚みの差(導体板までの伝搬距離)により時間遅れが生じていることがわかる。

次に、Fig.3 は Fig.2 の条件で D_2 の値を変化した時のパルス応答を示したものである。Fig.3 より、空気層の厚みを大きくすると、 $T=2$ 付近の振幅はわずかに大きくなり、その後多重反射により減衰していく様子が確認できる。この影響を調べるため、Fig.3 と同じ条件で領域 S_2 と領域 S_4 の誘電率分布を反転した場合について次の図で検討する。

Fig.4 は、Fig.3 と同様に空洞の厚みを変化した場合のパルス応答を示した。Fig.4 より特性の傾向は Fig.3 と同じとなるが、振幅は小さくなっていることがわかる。これは入射側に大きな誘電率分布をもつ水分比 10% の媒質による影響であると考えられる。Fig.3 と Fig.4 についての詳細な検討は今後検討していく。

Fig.5 は、Fig.4 の空洞の位置を最下層(領域 S_4)に移動し、空洞の厚み($D_3 = 0.1$)を一定とした場合での分散性媒質の影響について検討する。図 5 中の黒線は領域 S_2 を水分比 10% 媒質^[3]、領域 S_3 を水分比 5% 媒質^[3]としたものである。一方、青線は黒線の誘電率分布(媒質定数)を反転した時の結果である。Fig.5 から次の事がわかる。

Fig.5 より、 $1.0 \leq T \leq 2.5$ で媒質の違いを見ることができ、 $T=4$ 付近で空洞の影響がわずかに現れることがわかる。これについての詳細は今後検討予定である。

4. まとめ

本文では、分散性媒質中に空洞を設けた場合のパルス応答の影響を空気層の厚みと位置を変化した場合について検討した。その結果、空洞の位置と媒質の誘電率分布により反射パルスの振幅と時間遅れに影響することがわかった。今後は、空洞が媒質中に含まれてい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 Radar-Theory and Applications, Elsevier, 2009.
- [2] 特集「遺跡に利用されている電気技術」, vol.125, no.3, pp.173-176, 2005.
- [3] R.Ozaki, N.Sugizaki, and T.Yamasaki: IEICE Trans., Electron, vol.E97-C, no.1, pp.45-49, 2014.
- [4] 吉瀬, 尾崎, 山崎: 日大理工学術, L-58, pp.989-990, 2015.
- [5] 細野: BASIC による高速ラプラス変換, 1984.

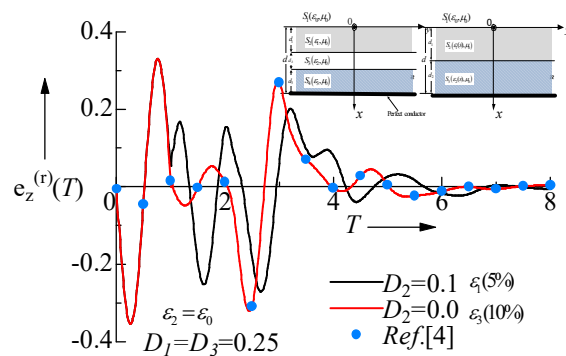


Fig.2 Pulse responses for case of $D_2 = 0.0$ and 0.1

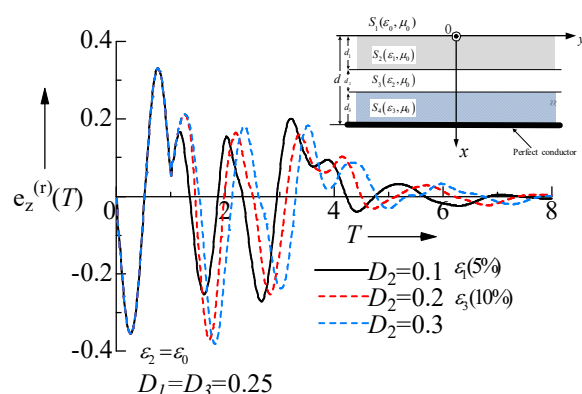


Fig.3 Pulse responses for changing the depth of air layer

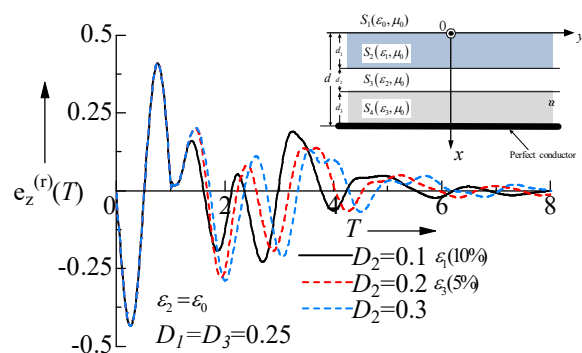


Fig.4 Pulse responses for changing the depth of air layer

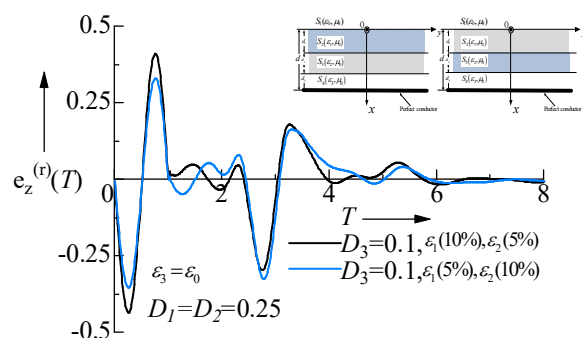


Fig.5 Pulse responses with air layer in deepest layer