L-58

水分比の異なる分散性媒質によるパルス反射応答 -TM 波入射の場合-Pulse Reflection Responses by Dispersion Media with Different Moisture Ratio

-The Case of TM Wave-

○吉瀬康平¹, 尾崎亮介², 山崎恆樹² Kouhei Kichise¹, Ryosuke Ozaki², Tsuneki Yamasaki²

Abstract: In recent paper, we have analyzed the pulse responses from dispersion media with different moisture ratio by using the Fast Inversion of Laplace Transform method (FILT) for TE case. In this paper, we have examined an influence of pulse responses for TM case compared with TE case, and investigated the different of center frequency fixed normalized depth.

1. はじめに

地中レーダ探査^[1]は非破壊^[2]で地中の対象物体(空洞 や金属物体)を探査できることから,地雷探査,遺跡調 査,道路工事などの現場で広く利用され,特に災害時 にも使われるため必要不可欠な技術である.

著者らは、先に厚み*d*₁,*d*₂をもつ水分比の異なる分 散性媒質中に完全導体板を埋設した構造の反射応答を FILT 法を用いて解析し、TE 波入射した場合のパルス 応答の影響を検討した^{[4]-[6]}.

本文では、先に検討してきた構造^[4-6]において、TM 波(磁界が z 方向のみ)入射した場合のパルス応答の影 響を検討する.

2. 解析法

本文で検討する構造をFig.1に示す.Fig.1では領域 S_1 を真空媒質 ε_0 ,領域 S_2, S_3 が分散性媒質である.なお, $x = d_1 + d_2$ の位置に完全導体板を埋設した構造である. 分散性媒質の誘電率 $\varepsilon_1(s), \varepsilon_2(s)$ は一般に周波数の関数 になるので Selmeier の三項式に媒質中の水分を考慮し て配向分極の項を用いて次式の通り表現する.

$$\frac{\varepsilon_l(s)}{\varepsilon_0} = 1 + \sum_{i=1}^3 \frac{\Omega_i^2}{s^2 + g_i s + \omega_i^2} + \frac{\tau_0}{1 + s\tau}, (l = 1, 2)$$
(1)

但し、l=1,2の場合は水分比の異なる分散性媒質を パラメータ $(\Omega_i, g_i, \omega_i, \tau, \tau_0)$ で表現する^[5].

入射する磁界は z 成分のみをもつ平面パルスを垂直 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.

1:日大理工・学部・電気 2:日大理工・教員・電気





$$x = 0: \tilde{H}_{z}^{(1)} = \tilde{H}_{z}^{(2)}, \ \tilde{E}_{y}^{(1)} = \tilde{E}_{y}^{(2)}$$
(4)

$$x = d_1: \tilde{H}_z^{(2)} = \tilde{H}_z^{(3)}, \tilde{E}_y^{(2)} = \tilde{E}_y^{(3)}$$
(5)

$$x = d_1 + d_2 : \tilde{E}_y^{(3)} = 0 \tag{6}$$

各領域 *S*₁, *S*₂, *S*₃ での電磁界を式(4)-(6)の境界条件に代入して整理すると、次式を得る.

$$R(s) = \frac{\Gamma_1 \left(1 - \Gamma_2 e^{-2k_2 d_2} \right) + \left(\Gamma_2 - e^{-2k_2 d_2} \right) e^{-2k_1 d_1}}{\left(\Gamma_2 e^{-2k_2 d_2} - 1 \right) + \Gamma_1 \left(e^{-2k_2 d_2} - \Gamma_2 \right) e^{-2k_1 d_1}} H_0^{(i)}$$
(7)

担し、

$$k_0 \triangleq s\sqrt{\varepsilon_0\mu_0} = s/c, k_1 \triangleq s\sqrt{\varepsilon_1(s)\mu_0}, k_2 \triangleq s\sqrt{\varepsilon_2(s)\mu_0}$$

 $n_1(s) \triangleq \sqrt{\varepsilon_1(s)/\varepsilon_0}, n_2(s) \triangleq \sqrt{\varepsilon_2(s)/\varepsilon_0},$
 $D_1 \triangleq d_1/(ct_w), D_2 \triangleq d_2/(ct_w), D \triangleq d/(ct_w), D \triangleq D_1 + D_2,$
 $\Gamma_1(s) \triangleq \frac{1-n_1(s)}{1+n_1(s)}, \Gamma_2(s) \triangleq \frac{1-n_2(s)/n_1(s)}{1+n_2(s)/n_1(s)},$
である.
また、文献[4,5]で示した $\varepsilon_1(s) = \varepsilon_2(s)$ のTM 波入射に対す
る反射係数は次式で求まる.
 $R(s) = \frac{n_1(s) - \beta(s)}{n_1(s) + \beta(s)}$ (8)
ただし、 $\beta(s) \triangleq (1-e^{-2k_1d})/(1+e^{-2k_1d})$ である.
3. 数値解析
Fig.2 は式(7)の正当性を確認するため式(8)を直接計

算した場合と、式(7)に条件 $\varepsilon_1(s) = \varepsilon_2(s)$ とした場合の 結果を数値的に比較したものである. Fig.2 から両者の 結果は一致していることわかる.以上から式(7)の正当 性を得られた.以下では、式(7)を使ってパルス応答を 検討するが,はじめに式(8)を TE 波と比較する.

Fig.3 は Fig.2 の条件で TM パルスを入射した場合の 反射応答を示した.また,比較として文献[4,5]のTE波 の結果を破線で示した. Fig.2 から, TM 波の結果は TE 波の結果に対して位相が反転した結果となっているこ とがわかる.

Fig.4 は, $\varepsilon_1(s) \neq \varepsilon_2(s)$ の場合で $D_1 = D_2 = 0.25$ とした 時の領域S,が水分比5%の媒質,領域S,が水分比10% の媒質であるときの中心周波数 foの違いによる反射 応答を示したものである. Fig.4 から次の事がわかる. (1)0≤T≤1での反射パルスは土壌表面での応答で周波 数による違いが表れないためほぼ一致していることが わかる.

(2)1≤T≤2の反射パルスは, ε₁(s) と ε₂(s)の媒質境界で の応答であり、誘電率差が小さいので反射パルスは小 さくなっていることが考えられる. これについては, 今後詳細に検討する.

(3)2≤T≤4の反射パルスは、導体での応答であり、土 壌表面での反射パルスの振幅と同程度となっているこ とがわかる.またT ≅2付近のパルスが中心周波数によ って立ち上がりが異なっているのは、水分比によって 誘電率分布が異なるためと考えられる.

Fig.5 は, Fig.4 と同じ条件で領域S, が水分比 10%の 媒質, 領域S, が水分比 5%の媒質であるときの中心周 波数 foの違いによる反射応答を示したものである.

Fig.5 を Fig.4 と比較すると、分布を逆にしても反射 パルス応答は Fig.4 と同じ傾向がみられることがわか る.これは、厚さD₁, D, が薄いため、誘電率分布を反 対にしてもパルス応答の影響はあまり生じないと考え られる.

4. まとめ

本文では、水分比の異なる分散性媒質中に完全導体 板を埋設したモデルに TM 波を入射した時のパルス応 答を解析し、(1) $\varepsilon_1(s) = \varepsilon_2(s)$ 、(2) $\varepsilon_1(s) \neq \varepsilon_2(s)$ 、の場合 について検討した. その結果として, (1)の場合, TE 波 と比較すると位相が反転する結果のみであった. (2)に ついては、厚みを一定とした時の中心周波数の違いは 導体板からの反射パルスに違いがみられた. この影響 を今後さらに検討していく予定である.

5. 参考文献

[1]R.Persico: 「Introduction To Ground Penetrating Radar」, Wiley, 2014. [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]西本, 上野, 永吉: 電学研資, EMT-05-17, pp.21-25, 2005. [4]杉崎, 尾崎, 山崎: 日大理工学術講演会, L-36, pp.1037-1038, 2012. [5]R. Ozaki, N, Sugizaki, and T. Yamasaki:IEICE Trans. Electron., vol.E95-C, no.1, pp.45-49, 2014.

[6] 谷仲, 尾崎, 山崎: 日大理工学術講演会, L-29, pp.983-984, 2013.



Fig.2 Pulse responses for $\varepsilon_1(s) = \varepsilon_2(s)$



Fig.3 Pulse responses for $\varepsilon_1(s) = \varepsilon_2(s)$



Fig.4 Pulse responses for 5%-10% case of $\varepsilon_1(s) \neq \varepsilon_2(s)$



Fig.5 Pulse responses for 10%-5% case of $\varepsilon_1(s) \neq \varepsilon_2(s)$