

分散性媒質によるパルス応答
-クラマースクロニツヒの関係を用いた場合-
Pulse Responses from Dispersion Medium
-Case of the Kramers-Krohig relation -

○杉崎直哉¹, 尾崎亮介², 山崎恆樹²
 *Naoya Sugizaki, Ryosuke Ozaki, Tsuneki Yamasaki

Abstract: In this paper, we analyzed the pulse responses from dispersion medium, and investigated the complex dielectric constants by using the Kramers-Krohig relation. Numerical results are given for the pulse responses by influence of center frequency using the both Fast Inversion of Laplace Transform (FILT) method and the parameter found from frequency characteristics

1. はじめに

近年、遺跡調査や地雷探査技術の研究が活発に行われている。遺跡調査や地雷探査などはその対象物体を非破壊で探査することが必要となる^[6]。探査技術の中でも比較的浅い場所の探査方法として地中レーダ技術が期待されているので、地中レーダの分解能を向上する研究が活発に行われている^[7]。

本文では、分散性媒質の複素誘電率をクラマース・クロニツヒの関係より実験値との有用性を検討した。また、分散性媒質中に導体板を埋没したモデルの反射応答を FILT(Fast Inversion of Laplace Transform)法^[9]を用いて解析し、パラメータの精度の違いによるパルス応答の変化を検討した。

2. 解析法

本文で検討するのは Fig.1 で示した様に $x > 0$ が真空、 $0 \leq x \leq d$ が分散性媒質、 $x = d$ に完全導体板の構造である。ここで、分散性媒質の誘電率は一般に周波数の関数となるので、 $\epsilon(s)$ の関数として定義をする。誘電率 $\epsilon(s)$ は電子分極を Selmeier の三項式で表し、パラメータ $(\Omega_i, g_i, \omega_i)_{i=1,3}, (\tau_0, \tau)$ を決定した。しかし、それだけでは文献[4]の実験値に満足するのが困難であったため、水分による損失を考慮し次式とした^[1,2]。

$$\frac{\epsilon(s)}{\epsilon_0} = 1 + \sum_{i=1}^3 \frac{\Omega_i^2}{s^2 + g_i s + \omega_i^2} + \frac{\tau_0}{1 + s\tau} \quad (1)$$

式(1)において $s = j\omega$ として、 $\epsilon(j\omega)$ の実数部 $\epsilon'_r(j\omega)$ と虚数部 $\epsilon''_r(j\omega)$ を次式で定義する。

$$\epsilon(j\omega) / \epsilon_0 = \epsilon'_r(\omega) - j\epsilon''_r(\omega) \quad (2)$$

式(2)の実数部と虚数部をクラマース・クロニツヒの関係^[8]に適応させると次式となり、次式を解析して実験値の有用性を検討する。

$$\epsilon'_r(\omega) := 1 + \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \frac{\omega' \epsilon''_r(\omega')}{\omega'^2 - \omega^2} \cdot d\omega' \quad (3)$$

$$\epsilon''_r(\omega) := -\frac{2\omega}{\pi} \int_0^\infty \frac{\epsilon'_r(\omega')}{\omega'^2 - \omega^2} \cdot d\omega' \quad (4)$$

次に、この媒質に電界が z 成分のみをもつ平面電磁波 E_z を垂直に入射した場合の反射応答を検討する。入射波は次式の直流成分を含まない全波パルスとする。

$$e_0^{(i)}(t) = [u(t) - u(t - t_w)] \sin(\omega_0 t) \quad (5)$$

但し、 t_w : パルス幅、 ω_0 : 入射波の中心角周波数である。式(5)を Laplace 変換した時の像関数 $E_0^{(i)}(s)$ は次式

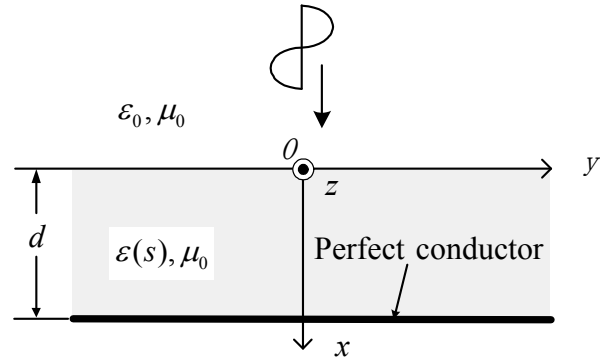


Fig.1 structure and coordinate system

となる。

$$E_0^{(i)}(s) = \frac{\omega_0}{s^2 + \omega_0^2} (1 - e^{-st_w}) \quad (6)$$

$x = 0, d$ での境界条件より、反射波の像関数は次式となる^[5]。

$$E_z^{(r)}(S) = -\frac{R(S) + e^{-2SD\Gamma(S)}}{1 + R(S)e^{-2SD\Gamma(S)}} E_z^{(i)}(S) \quad (7)$$

$$\Gamma(S) = \sqrt{\epsilon(S) / \epsilon_0} \quad (8)$$

$$R(S) = \{\Gamma(S) - 1\} / \{\Gamma(S) + 1\} \quad (9)$$

但し、 $S = s/\omega_0$, $D = \omega_0 d/c$, $T = \omega_0 t$ と規格化した。
 (c : 光速, $\omega_0 = 2\pi f_0$)

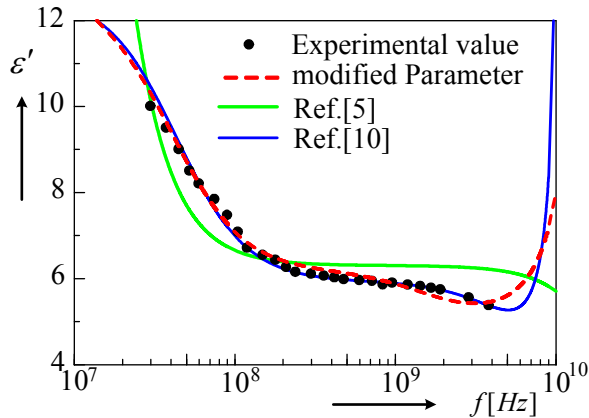
3. 数値結果

数値解析では式(2)の実数部 $\epsilon'_r(j\omega)$ を Fig.2(a)に示し、式(2)の虚数部を Fig.2(b)に示した。なお、Fig.2(b)の結果については式(4)を数値積分^[3]で計算したものである。但し、数値積分において積分範囲の上限値を $2\pi \times 10^{11}$ として計算した。Fig.2(a)においては、文献[5]の結果を緑線で示し、文献[11]の結果を青線で示す。さらにパラメータを修正し、精度を高めたものを赤線で示した。また、計算結果との比較のため文献[4]の実験値を●印で示した。

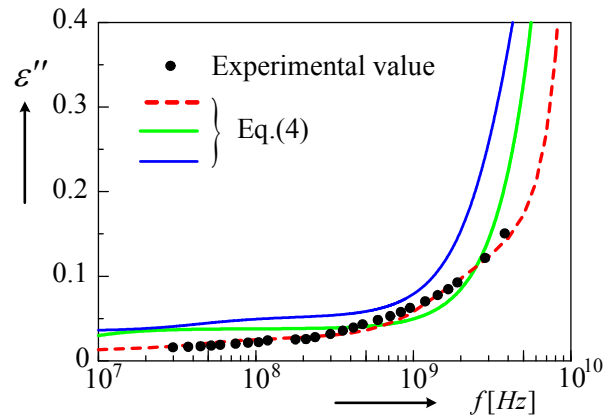
Fig.2(b)より、修正したパラメータを用いた結果が実験値に合っていることがわかる。

次に Fig.2 の3通りのパラメータを用いたときの反射応答を以下解析する。但し、導体板の規格化距離 $D = \pi$ 一定としてパルス応答の結果を Fig.3(a)~(c)に示す。Fig.3より以下のことがわかる。

1 : 日大理工・院 (前)・電気 2 : 日大理工・教員・電気



(a)The Real Part of a dielectric constants $\epsilon'_r(\omega)$



(b)Imaginary Part of a dielectric constants $\epsilon''_r(\omega)$

Fig.2 complex dielectric constants

(1) 分散性媒質の境界面からの反射パルスは $f_0 = 0.05, 1, 3$ [GHz] において若干の違いしか見られないが、 $f_0 = 0.05$ [GHz] の場合には、赤線の結果に違いがはっきり見ることができる。

(2-1) $f_0 = 0.05$ [GHz] の場合 ; Fig.3(a)中に示した拡大図より反射パルスの違いが表れているが Fig.2(b)より、赤線の虚数部が小さいことが確認できるので、応答の傾向が表れているのがわかる。

(2-2) $f_0 = 1$ [GHz] の場合 ; Fig.2(b)より虚数部が異なっているため、振幅に違いが表れていることがわかる。、緑線が、赤線と青線に比べ実数部に違いが表れているので反射パルスの遅れ時間に表れていると考えられる。

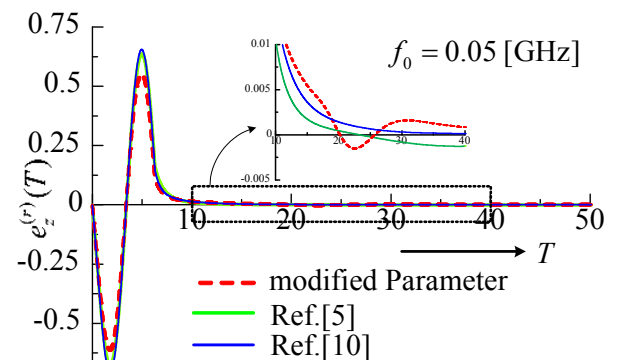
(2-3) $f_0 = 3$ [GHz] の場合 ; 赤線と緑線は虚数部がほぼ同値であるが実数部に違いが表れているため、赤と緑の振幅が同じとなるが、遅れ時間に違いが表れているのがわかる。青線のみ虚数部の違いが表れているため、振幅に表れていると考えられる。

4. まとめ

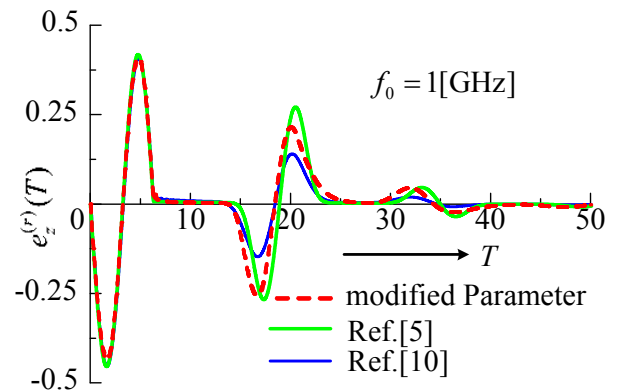
本文では、分散性媒質中の複素誘電率の実数部を実験値のパラメータに合うように選び、クラマースローニッチの関係により実数部から虚数部を導出した。その結果を使用して、分散性媒質中に導体板を埋設した時のパルス応答を FILT 法を用いて解析し、パラメータの違いによる影響を検討した。

5. 参考文献

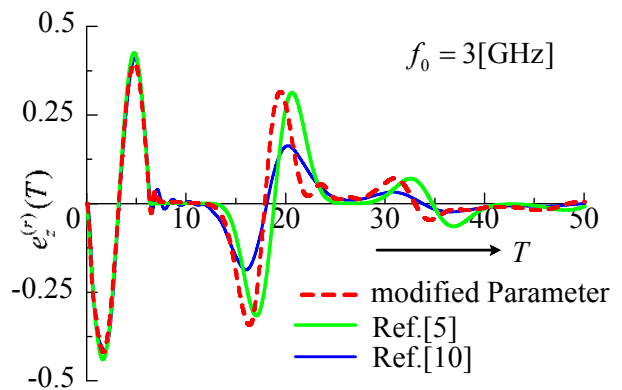
- [1]細野敏夫：電磁波工学の基礎，昭晃堂，pp.24-30, 1973.
- [2]細野敏夫：メタ電磁気学，森北出版，1999.
- [3]戸川隼人：数値計算法，コロナ社，pp.24-26, 1981.
- [4]Jackie E.HIPP：Soil Electromagnetic Parameters as Functions of Frequency，Soil Density and Soil Moisture, Proc . IEEE, Vol.62, No.1, pp.98-103, Jan., 1974.
- [5]尾崎，山崎，日向：日大理工学術講演会，L-42, pp.1078-1079, 2004.
- [6]電学誌，vol.125，no.3，pp.173-176, 2005.
- [7]西本，上野，永吉：電学研資，EMT-05-17, 2005.
- [8]井筒雅之：光波工学の基礎，コロナ社，pp.108-109, 2012.
- [9]細野敏夫：BASICによる高速ラプラス変換，共立出版，1984.
- [10]村上，尾崎，山崎：日大理工学術講演会，L-43, pp.1188-1189, 2007.



(a) center frequency $f_0 = 0.05$ [GHz]



(b) center frequency $f_0 = 1$ [GHz]



(c) center frequency $f_0 = 3$ [GHz]

Fig.3 pulse responses