

(1) 構造材料近傍に配置したアンテナの指向性変化を利用した複素誘電率推定に関する研究

菊地 溪太¹・渡部 宏法¹・武田 茂樹²・鹿子嶋 憲一³・梅比良 正弘⁴

¹ 非会員 茨城大学大学院理工学研究科博士前期課程 (〒316-8511 茨城県日立市中成沢町 4-12-1)

² 正会員 茨城大学教授 工学部 (〒316-8511 茨城県日立市中成沢町 4-12-1)

E-mail: shigeki.takeda.tmkyou@vc.ibaraki.ac.jp

³ 非会員 茨城大学名誉教授 (〒316-8511 茨城県日立市中成沢町 4-12-1)

E-mail: kenichi.kagosima.em21@vc.ibaraki.ac.jp

⁴ 非会員 茨城大学教授 工学部 (〒316-8511 茨城県日立市中成沢町 4-12-1)

E-mail: masahiro.umehira.dr@vc.ibaraki.ac.jp

センサ無線端末が埋め込まれる物体の媒質定数である複素誘電率を取得することは、無線機のアンテナを設計する際に非常に重要である。さらに、インフラ設備や建物の構造材料の誘電率などを測定することは、構造物の診断においても有効である。本論文では、モノポールアンテナ近傍のグランド板上に測定対象物を設置した際のアンテナ指向性変化を利用して、測定対象物の複素誘電率を推定する手法について提案する。推定精度の確認を目的に、提案手法によって推定された紙の複素誘電率は、共振器測定値と良く一致することを確認した。これにより、提案法の妥当性が確認できたため、複素誘電率が測定しにくいと考えられる、砂、水、及び煉瓦の複素誘電率を推定し、これらの結果についても報告する。

Key Words: complex permittivity measurement, radiation pattern, monopole antenna

1. まえがき

近年、IoT (The Internet of Things) デバイス数の増加のために、低消費電力、低コスト、拡張性の高いサービスエリアに対する需要が高まっている。そのため、省電力広域ネットワーク (LPWA : Low Power Wide Area) 技術が拡大しており、センサ無線端末はコンクリート、液体、土壌、木材など様々な物体に取り付けたり、埋め込んだりして使用されることが予測される¹⁾。そのため、構造材料などの媒質定数である複素誘電率を取得することは、無線機のアンテナを設計する際に非常に重要である。また、インフラ設備や建物の構造材料の誘電率などを測定することは、構造物の診断においても有効である²⁾。

本論文では、モノポールアンテナ近傍のグランド板上に測定対象物を設置した際のアンテナ指向性変化を利用して、構造材料の複素誘電率を推定する手法を提案する。提案法は既存のアンテナ指向測定装置、電磁界解析ソフト、モノポールアンテナを用いて推定を行うことができる。電磁界解析ソフトには、FDTD (Finite-Difference Time-Domain)法を用いた EEM-FDM ver. 3.0³⁾を使用しているが、フリーの FDTD ソフト³⁾でも推定可能である。本論文で

提案する手法は、先にも述べたように、測定対象物体の近傍にアンテナを配置し、その指向性変化を利用して複素誘電率を測定する。つまり、提案法はモノポールアンテナのグランド板上に測定対象物を置くだけで良いため、他の複素誘電率測定法では測定しにくい、様々な形状のコンクリート片、砂、液体、木材、石材 (例えば楕円形状の自然石なども含む) の複素誘電率測定が可能である。但し、電磁界解析においてモデル化でき、また実測においてモノポールアンテナのグランド板上に設置できる寸法及び重量である必要はある。さらに、指向性変化を生じさせる程度の大きさである必要もある。これらの条件が満足される材料であれば、形状及び大きさを問わず、材料の複素誘電率の測定が可能である。

これまでに、アンテナ特性変化を使用して、複素誘電率を推定する手法が提案されている⁴⁾。この手法では、測定したい材料を用いてパッチアンテナを作成し、そのインピーダンス整合特性の実測値と、複素誘電率をパラメトリックに変更した場合の解析値集合との比較から、材料の複素誘電率を推定する手法である。しかし、構造材料はパッチアンテナに求められる材料形状に加工できないものもあるため、様々な種類の構造材料の複素誘電

率測定には対応できない欠点を有する。

本論文では、まず複素誘電率の測定精度を確認するために、測定しやすく、さらに重ねることによって任意の厚さの形状を製作できる紙束を測定材料として選択する。紙の複素誘電率は、空洞共振法(@1GHz)⁹⁾で取得する。その結果、提案手法によって推定された紙の複素誘電率は、共振器測定値と良く一致した。これにより、提案法の妥当性が確認できたため、構造材料として、複素誘電率が測定しにくいと考えられる、砂、水、及び煉瓦の複素誘電率を推定し、これらの結果についても報告する。

2. 推定の手順

提案法による媒質の複素誘電率推定手順を図-1に示す。はじめに、測定系において、モノポールアンテナを測定対象物の近傍に設置したモデルを作成し、ネットワークアナライザを用いて伝送係数 S_{21} の角度特性を測定して指向性を得る。この時、媒質の比誘電率 ϵ_r 及び誘電正接 $\tan\delta$ は未知である。次に、測定で得た指向性がどのような ϵ_r 及び $\tan\delta$ の組み合わせで得られたかを調べるために、電磁界解析において、測定系と同じ解析環境を再現し、媒質の ϵ_r 及び $\tan\delta$ を変化させて何パターンものアンテナ指向性を得る。最終的に、指向性の実測値と解析値を評価関数を用いて比較し、その値が最小になった際の解析における媒質の ϵ_r 及び $\tan\delta$ の組み合わせを推定値として得る。

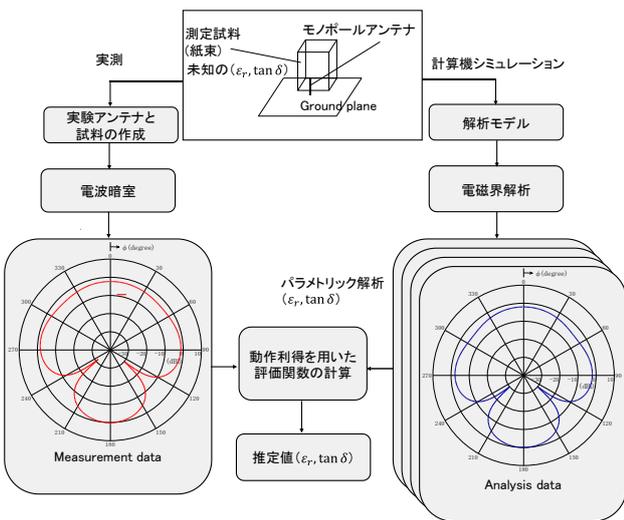


図-1 指向性測定に基づく複素誘電率推定手順

3. 指向性の測定

(1) 測定環境

モノポールアンテナを使用した際の、測定モデルの概

要及び寸法を図-2に示す。使用したモノポールアンテナの素子長は1/4波長と等しく、入力インピーダンスは1GHzにおいて $46.5+j11.6\Omega$ である。また、この時のVSWRは1.33であり、1GHzにおけるアンテナ特性としては十分である。アンテナ利得は、解析による水平面内(x-y面内)におけるモノポールアンテナの利得である -1.03dBi とした。

指向性測定システムを図-3に示す。測定周波数は1GHzである。指向性測定の実験は電波暗室で行い、ネットワークアナライザを用いてポート1に直線偏波の送信アンテナを接続し、ポート2に受信アンテナであるモノポールアンテナを接続した。そして回転台を 1° 刻みで1周(360°)回転させた時の伝送係数 $S_{21}(\phi)$ を測定し、動作利得の実測値 $D_E(\phi)$ を求めた。モノポールアンテナの実測値 $D_E(\phi)$ を求める式を(1)に示す。

$$D_E(\phi) = S_{21}(\phi) - S_{21}(\phi)_{max} - 1.03 \text{ [dBi]} \quad (1)$$

ここで、 $S_{21}(\phi)$ は水平面(x-y面)における伝送係数(測定対象物がグラウンド板上に置かれている場合)、 $S_{21}(\phi)_{max}$ は自由空間(測定対象物がグラウンド板上に置かれていない場合)でのモノポールアンテナの水平面(x-y面)における伝送係数の最大値である。

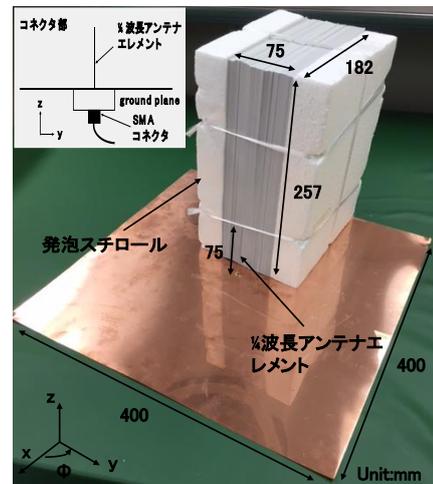


図-2 測定モデルの様子

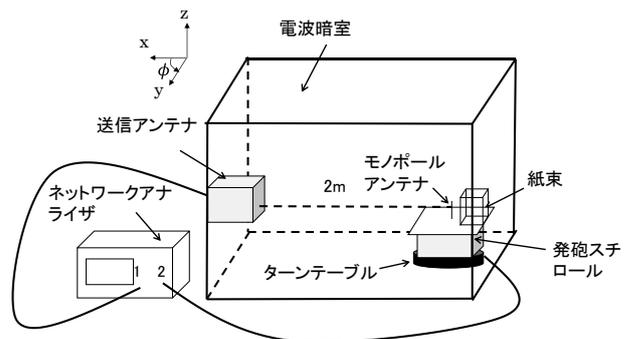


図-3 指向性測定システム

(2) 測定結果

水平面における伝送係数の測定結果を図-4に示す。アンテナの指向性は、 $\phi = 180^\circ$ 方向にメインローブを有する形となった。これらの測定値を用いて、式(1)より得られた水平面における測定値による指向性を図-5に示す。

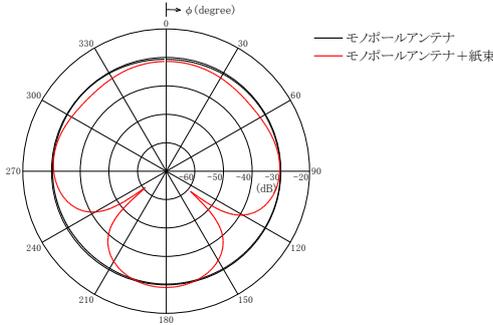


図-4 水平面における指向性の測定結果

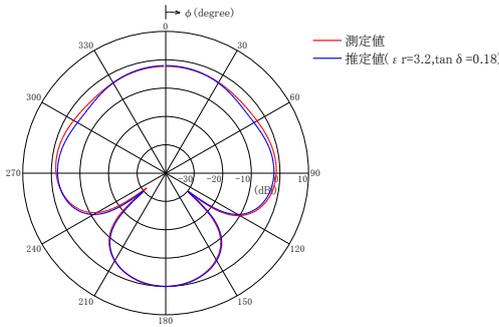


図-5 測定値と推定値の指向性比較

4. 指向性の解析及び複素誘電率の推定

ここでは、解析の環境や、指向性の測定値と解析値を比較する評価関数について検討し、複素誘電率の推定結果を従来法(空洞共振法)で得られた値と比較する。

(1) 解析環境

媒質の複素誘電率は、実部は誘電率となり、虚部は導電率と関係する値となる。また、導電率は実部と虚部の比による $\tan \delta$ で評価される。推定では、測定結果がどのような ϵ_r 、 $\tan \delta$ の組み合わせで得られたか調べるため、解析における紙束の ϵ_r 、 $\tan \delta$ をパラメトリックに変化させて指向性の解析を行った。実際に電磁界解析に入力するパラメータは ϵ_r 、 σ であるが、 σ に比べ $\tan \delta$ の方が値の振り分けが行ないやすいため、今回は ϵ_r 、 $\tan \delta$ をパラメトリックに変化させている。また、粗探索と精密探索の2段階の過程手順を踏むことで効率的な探索を実現している。

FDTD解析では、素子長は75mmと測定で用いたモノポールアンテナと同一の長さとした。アンテナの入力インピーダンスは $51.4-j31.3\Omega$ 、アンテナの利得は-1.03dBiである。

以上の環境の下、水平面内における動作利得の解析値 $D_S(\phi)$ を次式より求めた。

$$D_S(\phi) = D'_S(\phi) + 10 \log_{10} \tau \quad [dBi] \quad (2)$$

$D'_S(\phi)$ はx-y面のアンテナ利得の解析値である。また、 τ は電力伝送係数を表しており、次式より求められる。

$$\tau = \frac{4R_L R_a}{|Z_L + Z_a|^2} \quad (3)$$

Z_L は自由空間におけるアンテナの入力インピーダンスの複素共役 $Z_L = R_L + jX_L$ (自由空間における整合負荷)、 Z_a はアンテナの近傍に測定対象物を設置した際のアンテナの入力インピーダンス $Z_a = R_a + jX_a$ である。

(2) 評価関数の検討

実測による指向性と解析による指向性の一致度を評価する関数に平均二乗誤差(MSE)を用いる。ここで、角度分解能 $\Delta\phi$ はそれぞれ 1° とした。

$$MSE = \frac{1}{360} \sum_{n=0}^{359} (D_E(n\Delta\phi) - D_S(n\Delta\phi))^2 \quad (4)$$

ここで、 $D_E(n\Delta\phi)$ は実測による $n\Delta\phi$ 方向の動作利得のdB値であり、 $D_S(n\Delta\phi)$ は解析による $n\Delta\phi$ 方向の動作利得のdB値である。本手法は、式(4)が最小になる際の解析における媒質の複素誘電率を推定値として導出した。

1段階目の媒質定数の粗探索では、 ϵ_r は1~5までを0.5刻み、 $\tan \delta$ は0.01~0.26まで0.05刻みで変化させた。その結果、 $\epsilon_r = 3.0$ 、 $\tan \delta = 0.21$ で式(4)が最小となった。この結果を踏まえ、図-6に示す2段階目の媒質定数の精密探索は、 ϵ_r は2.6~3.8までを0.2刻み、 $\tan \delta$ は0.1~0.24までを0.02刻みで変化させた。その結果 $\epsilon_r = 3.2$ 、 $\tan \delta = 0.18$ で式(4)が最小になり、この値が推定値として得られた。

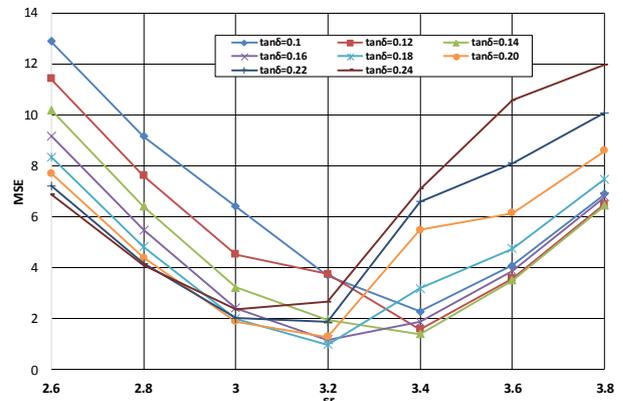


図-6 精密探索

(3) 複素誘電率の測定結果

提案法によって得られた推定値を検討するために、従来法の一つである空洞共振器⁵⁾を用いて紙(三菱 PPC 用紙 RE-N FSC 認証-MX)の複素誘電率測定を行った。測定値は 10 回測定した際の平均値をとり、 $\epsilon_r = 3.3$ 、 $\tan \delta = 0.16$ という値が得られた。

提案法により得られた紙の複素誘電率の推定値と、空洞共振器によって得られた測定値を比較したものを表-1 に示し、推定値の際の指向性を図-5 に示す。表-1 から、提案法は共振器の測定値とよく一致することが確認できる。

表-1 推定結果の比較(@1GHz)

	ϵ_r	$\tan \delta$
測定値	3.3	0.16
推定値	3.2	0.18
誤差	0.1	0.02

(4) 構造材料の複素誘電率の推定結果

指向性に基づく媒質定数の推定値は、共振器測定で得られた値と良く一致し、提案法の妥当性を確認できた。そのため、従来法では測定が難しい砂、水、煉瓦の三種類を提案法で推定した。砂、水、煉瓦の測定の際の様子をそれぞれ図-7、図-8、図-9 に示す。また、その推定結果を表-2 に示す。

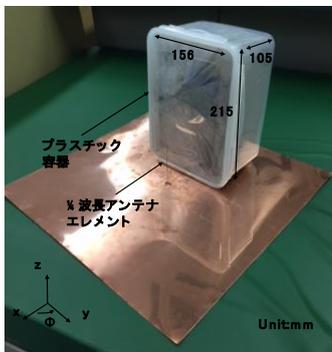


図-7 測定モデルの様子(砂)

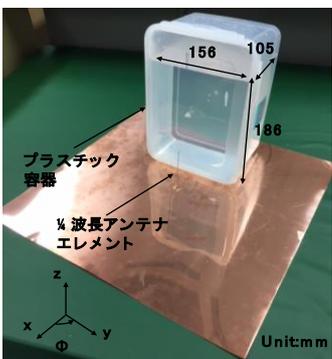


図-8 測定モデルの様子(水)

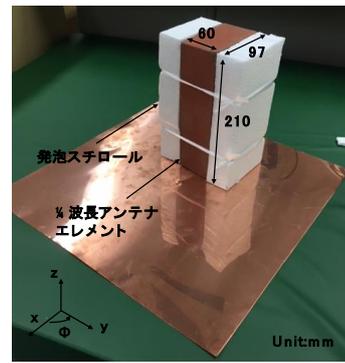


図-9 測定モデルの様子(煉瓦)

表-2 砂、水、煉瓦の推定結果(@1GHz)

	ϵ_r	$\tan \delta$
砂	2.9	0.014
水	80	0.02
煉瓦	4.5	0.01

5. むすび

本論文では、モノポールアンテナのグランド板上に複素誘電率を測定したい構造材料を設置した場合の、指向性変化を利用した複素誘電率推定手法について提案した。また 1GHz における紙の複素誘電率の推定結果を、従来方法である空洞共振器法で得られた値と比較した。その結果、提案法による推定値は空洞共振器法による測定値と良く一致し、提案法の妥当性を確認した。その後、空洞共振器では測定が難しい構造材料の複素誘電率の推定も行い、その結果を報告した。

参考文献

- 1) Capdevila, S. Roqueta, G. Guardiola, M. Jofre, L. Romeu, J. : Water infiltration detection in civil engineering structures using RFID, *Proceeding EuCAP*, pp.2505-2509, 2012.
- 2) 溝渕 利明, 林 大介, 須田 久美子, 横関 康祐 : 電磁波による鉄筋コンクリート中の塩分測定法の実構造物への適用性に関する検討, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.26, No.1, 2004.
- 3) 株式会社 EEM : 電磁界シミュレータ EEM, <<http://www.eem.co.jp>>, (入手 2018.6.14) .
- 4) Declercq, F. Couckuyt, I. Rogier, H. Dhaene, T. : Environmental high frequency characterization of fabrics based on a novel surrogate modelling antenna technique, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol.61, No.10, pp.5200 - 5213, 2013.
- 5) 株式会社 AET : 空洞共振器法による誘電率測定装置, <<http://www.aetjapan.com/index.php>>, (入手 2018.6.14) .