摂動法を用いた TE_{101} モード 矩形空洞共振器による 複素誘電率測定の実誤差検討

非会員 橋 本 修 (青山学院大学理工学部, 東京都)
非会員 稲 上 浩 史 (青山学院大学理工学部, 東京都)
非会員 西 澤 振一郎 (青山学院大学理工学部, 東京都)

A Study on Errors of Measurement for Complex Permittivity
by Perturbation Method using TE_{101} Mode Rectangular Cavity Resonator

HASHIMOTO Osamu, Non-member, INAGAMI Hirofumi, Non-member, NISHIZAWA Shinichiro,
Non-member (College of Science and Engineering, Aoyama Gakuin University, Tokyo, 157-8572 Japan)

The rectangular cavity resonator method based on the perturbation method, is a popular method for measuring the complex permittivity and the complex permeability by using the perturbation formula. It is assumed here that the electromagnetic field in the resonator has no change distribution before and after we have inserted the sample. It is, however, well known that the measurement error increases, when a sample with large size, high complex permittivity and high complex permeability is chosen. In this paper, we calculate the quality factor using finite difference time domain (FDTD) method on condition that a square rod sample is inserted into the TE_{101} mode rectangular cavity resonator. Consequently, the measurement error included in the imaginary part of the complex permittivity was estimated quantitatively by the perturbation formula under the variation of the size and complex permittivity of the sample.

キーワード：摂動法、矩形空洞共振器、複素誘電率、測定誤差

1. はじめに

摂動法を用いた矩形空洞共振器法による複素誘電率や複素透磁率の測定法は、その簡便性から幅広く一般的に使用されている⁽¹⁾。しかし、この方法においては、試料挿入前後における矩形空洞共振器内の電磁界が等しいとの仮定、すなわち、「摂動公式」から試料の複素誘電率や複素透磁率を測定するが、試料の寸法や複素誘電率、複素透磁率が大きくなると、この仮定が成り立たなくなるため、測定結果に大きな誤差が含まれることが知られている⁽²⁾。この種の測定誤差に対して、我々は3次元の電磁界解析手法として有効なFDTD(Finite Difference Time Domain)法⁽³⁾を用いて、共振周波数を計算し、複素誘電率の実部に含まれる測定誤差に対する検討を行った⁽⁴⁾。

そこで、本論文では、同様にFDTD法を用いて、2GHz帯用の TE_{101} モード矩形空洞共振器に着目し、1) その内部に断面が方形の棒状試料を挿入した場合のQ値の計算を行い、2) 上記摂動公式を用いた複素誘電率測定において、特に虚部に含まれる測定誤差を定量的に推定した。

2. 解析手法

一般的に使用される TE_{101} モードの矩形空洞共振器内に複素比誘電率 $\epsilon_r = \epsilon'_r - j\epsilon''_r$ の棒状試料を挿入した場合、複素比誘電率の虚部 ϵ''_r を求める摂動公式は、次式のように与えられる⁽⁵⁾。

$$\epsilon''_r = \frac{1}{2\alpha_e} \left(\frac{1}{Q_L} - \frac{1}{Q_0} \right) \frac{V}{\Delta V} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、

Q_0 ：試料を挿入しないときのQ値
 Q_L ：試料を挿入したときのQ値
 V ：共振器の体積
 ΔV ：試料の体積

また、 α_e はモード(ここでは、 TE_{101} モード)や試料形状(ここでは、断面が方形の棒状試料)で決まる定数であり、2.0で与えられる。

このような摂動公式を用いる測定に含まれる ϵ''_r の測定誤差を検討するために、本解析では、まず図1に示すような共振周波数2.45GHzの共振器(大きさ：86.54745mm × 43.273725mm × 86.54745mm)内を、セルの大きさ

図2 共振周波数の計算結果の一例 ($\epsilon_r=2-j0$ の場合)
Fig. 2. Calculated values of resonance frequency for $\epsilon_r=2-j0$.

図3 試料非挿入時の Q 値 (Q_0) の収束性
Fig. 3. Convergence of quality factor Q_0 for no sample.

果、試料の大きさに対して図2のように精度良く共振周波数の変化が観察できた。そして、以下の Q 値を計算する場合には、このようにして求めた共振周波数の連続波を励振に用いた。

このようにして計算した共振周波数を励振源として、図1中の A 点に励振し、Q 値を計算した。図3に計算の一例として、計算周期に対する試料非挿入時の Q 値 (Q_0) を示す。この図より、FDTD で計算した Q_0 は周期を重ねるほど理論値に近い値に収束していくことがわかる。すなわち、1000 周期程度で FDTD 法で求めた $Q_0 (=16069.5)$ と理論的に求めた $Q_0 (=16200.2)$ を比較すると、その誤差は 0.8% 程度となり、本解析法が Q 値計算に有効であることが確認できた。そして、以後の Q 値の計算は 1000 周期として行った。

以上のような解析法による、各試料に対する Q 値 (Q_L) の計算結果の一例を図4に示す。そして、本解析ではこれらの値を (1) 式に代入し、 ϵ_r'' の計算を行い、その測定誤差について検討した。

図5は、(6) 式を用いて求めた各試料 ($\epsilon_r=2$ の場合) に対する ϵ_r'' の測定誤差の計算結果である。この結果、 $\epsilon_r''=0.05$ 程

図4 Q 値 (Q_L) の計算結果の一例 ($\epsilon_r=2$ の場合)
Fig. 4. Calculated values of quality factor Q_L for $\epsilon_r=2-j0$.

図5 ϵ_r'' の測定誤差の計算結果 ($\epsilon_r=2$ の場合)
Fig. 5. Calculated values of measurement error of ϵ_r'' for $\epsilon_r=2$.

図6 ϵ_r'' の測定誤差の計算結果 ($\epsilon_r=4$ の場合)
Fig. 6. Calculated values of measurement error of ϵ_r'' for $\epsilon_r=4$.

度では、試料の大きさが変化しても ϵ_r'' の測定誤差は極めて小さな範囲内にあり、 $L=10.06\text{mm}$ の場合でも -2% 程度であることがわかった。また、 $\epsilon_r''=0.1$ の場合には、 ϵ_r'' の測定誤差は試料の大きさとともに増加する傾向を示し始め、例え

ば $L=10.06\text{mm}$ の場合においては-12%程度となることがわかった。さらに、この測定誤差は、 $\epsilon_r''=0.2$ と大きくなると、急激に増加する傾向を示し、特に $\epsilon_r''=0.4$ 、 $L=10.06\text{mm}$ の場合には測定誤差は-70%程度にもなることもわかった。

また、図 6 は $\epsilon_r=4$ の場合における ϵ_r'' の測定誤差の計算結果である。この図と図 5 を比較すると、図 6 における測定誤差の方がやや大きい場合も存在するが、試料や ϵ_r'' が大きくなるほど測定誤差も大きくなる傾向はほとんど一致している様子が確認できた。

このようにこれらの結果から、測定試料の ϵ_r や大きさに対する ϵ_r'' に含まれる測定誤差を定量的に示すことができた。

4. ま と め

以上本論文では、まず、FDTD 法により矩形空洞共振器内の電磁界を計算し、それら電磁界を用いて Q 値を計算した。この結果、試料を挿入しない場合、FDTD で計算した Q_0 と理論的に求めた Q_0 の誤差は 1000 周期程度で 0.8% 程度となり、本解析法において Q 値計算が有効であることが確認できた。

次に、得られた Q 値から ϵ_r'' の測定誤差の推定を行った。この結果、 $\epsilon_r=2\sim 4$ の場合、挿入試料が大きくなるほど、また、 ϵ_r'' が大きくなるほど ϵ_r'' の測定誤差は大きくなる傾向を示し、特に $\epsilon_r''=0.4$ 、 $L=10.06\text{mm}$ の場合には測定誤差は-70%程度にもなることがわかった。

以上本論文において、挿入試料や ϵ_r の大きさに対して、 ϵ_r'' に含まれる測定誤差を定量的に推定することができた。

今後、本解析の有効性を確認するための実験的検討や複素透磁率測定における測定誤差の検討を行うことが課題である。

(平成 11 年 08 月 02 日受付, 同 12 年 01 月 04 日再受付)

文 献

- (1) 小笠原 直行: “空洞共振器の摂動を利用する ϵ , μ の分離測定,” 電学論, vol. 74, no. 795, pp. 1486-1492 (1954-12)
- (2) 清水 康敬 他: “電磁波の吸収と遮蔽”, pp. 523-527, 日経技術図書 (1989)
- (3) 橋本 修、阿部 琢美: “FDTD 時間領域差分法入門,” 森北出版 (1995)
- (4) 橋本 修、阿部 琢美: “FDTD 法による方型空洞共振器を用いた誘電率測定に関する一検討,” 信学論 (B-II) Vol. J79-B-II, No. 9, pp. 616-618 (1996-9)
- (5) 橋本 修: “マイクロ波・ミリ波帯における測定技術 ~その基礎から応用まで~, ” pp. 7-10, リアライズ社 (1998)
- (6) 阿部 琢美、船越 一就、橋本 修: “FDTD 法による TE_{101} 方型共振器を用いた誘電率測定に関する検討,” 信学技報, EMCJ95-31 (1995-9)

橋 本 修 (非会員) 昭 51 電通大・電気通信・応用電子工・

卒。昭 53 同大学院修士課程終了。同年 (株) 東芝入社。昭 56 防衛庁入庁。昭 61 東京工業大学大学院博士課程終了。平 3 青山学院大学助教授。平 9 青山学院大学教授。工学博士。主な著書に、「電波吸収体入門」(森北出版 1997)、「FDTD 時間領域差分法入門」(森北出版 1996)、「例題で学ぶ電気電子工学のための応用数学」(リアライズ社 1995) 等、応用電波工学、環境電磁工学、計測工学の研究に従事。電子情報通信学会、日本航空宇宙学会、映像情報メディア学会会員。

稲 上 浩 史 (非会員) 平 10 青学大・理工・電気電子工・卒。

現在、同大学院博士前期課程在学中。主として、FDTD 法による電磁界解析に従事。

西 澤 振一郎 (非会員) 平 7 青学大・理工・電気電子工・卒。

平 9 同大学院修士課程終了。現在、同大学院博士後期課程在学中。FDTD 法による電磁界解析、電磁波の人体影響やその防護に関する研究に従事。