

フリースペース法を用いた誘電率の測定

坪井 瑞輝*¹

【要 旨】

近年、5G 通信や車載レーダーなどミリ波帯における電磁波の利用が活発に進められており、それに伴ってミリ波帯域での材料の誘電率測定の需要が増加している。当センターでもフリースペース法を用いてSパラメータを測定し誘電率を計算できるシステムを導入しているが、ソフトウェアが採用している計算手法の制約上、対応できる試料の厚みに制限があった。本研究では誘電率計算について複数の計算手法を用いて行い、厚み制限の緩和を試みた。

1. はじめに

5G 通信や車載レーダーによる自動運転等、ミリ波帯域の電磁波利用が増加している。それに伴いミリ波帯域における誘電体材料や電磁波吸収帯材料の開発が活況となっており、当センターでもミリ波帯域に対応した、フリースペース法による材料特性測定システムの利用が増加している。

当センターで導入しているシステムは図1のようにアンテナ、誘電体レンズ、試料ホルダーの構成となっており、Port1、Port2のアンテナはベクトルネットワークアナライザーに接続され、反射電磁波がS11、透過電磁波がS21として測定される。試料の誘電率はこの反射波、透過波の強

度と位相から計算により求めることができ、当センターでは周波数18GHzから110GHzの測定に対応している。

Sパラメータから試料の誘電率を求める計算手法は複数提案されており、例えば、Nicholson-Ross-Weir法(NRW法)¹⁾、NIST Iterative conversion法、New Non-Iterative Conversion法、Short circuit line法等¹⁾がある。

当センターのフリースペース法測定システムでは、Sパラメータの測定値をシステムに付属のソフトウェアで処理することにより行っているが、誘電率が算出可能な試料の厚みは、試料内波長の1/2未満に制限されている。例えば周波数100GHzの波長は真空中では3.0mm、誘電率10の試料中ではその $1/\sqrt{10}$ の0.95mmとなり、試料の厚みはその1/2の0.47mmが最大となる。これはかなり厳しい制限であり、誘電率が高い材料では薄いフィルム状の試料でないと測定できない。測定に供する試料は作成の簡易さや、取り扱いの簡便さ等の事情により1mm～3mm程度の厚みで作成されていることが多く、誘電率測定を断念せざるを得ない場合も多かった。

このソフトウェア内部での計算にはNRW法が使用されている。NRW法では反射波・透過波の強度と位相の値を誘電率の算出に用いるが、この位相

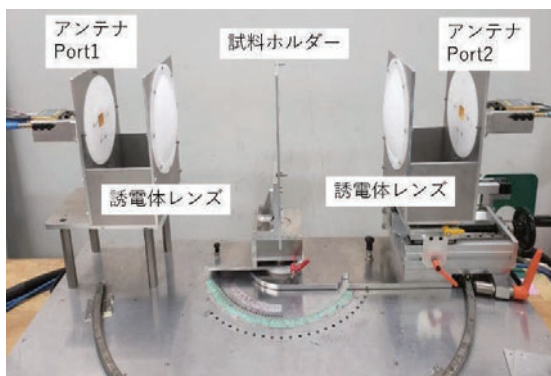


図1 フリースペース法測定システム

* 1 応用技術課 副主査

の値は 2π を超えることもあり得る。例えば空气中を伝搬する波長 λ の電磁波について考えた場合、原点から距離 $\lambda/4$ の点での位相差は $\pi/2$ となり、距離が $5\lambda/4$ の点での位相差は $5\pi/2$ となる。しかし、ネットワークアナライザーの測定値では位相差は $0 \sim 2\pi$ の間でしか検出されないため、 $5\pi/2$ の位相差は $\pi/2$ と測定される。このように本来の位相差と、測定値として現れる位相差が異なることが誘電率計算の際に問題となる。このことから試料の厚さについて制限があった。

もっとも位相差が 2π より大きくなる事のみが誘電率の計算ができなくなる原因であるならば、試料の最大厚さは λ と等しくなるはずであるが、既設のシステムでは仕様上も実際の計算でも $\lambda/2$ が最大となっていた。これについてはソフトウェア内部の NRW 法の計算における、複素数計算の仕様に原因があるものと推測している。本研究において既設のシステムを用いずに行った NRW 法の計算では、試料の厚さが λ より小さいならば、誘電率は以下に記述する補正を行わなくても求めることができた。

NRW 法について位相が 2π を超える場合には、測定された位相に $2\pi \times n$ (n は整数) を加える補正を行うことで誘電率を正しく算出できる。 n の値はおおよそその誘電率が分かっているれば求めることができる。本研究では NRW 法において位相差を補正して誘電率の計算を行い、また同時に透過率のみを用いて誘電率を求める Transmission-Only 法(TO法)²⁾によっても誘電率を計算し、結果を比較した。

2. 測定試料

計算結果の妥当性を検討するために、誘電率が既知の試料について測定を行った。測定試料として比誘電率 2.04 の Poly tetra fluoro ethylene (PTFE)、比誘電率 8~10 のアルミナ³⁾及び比誘

電率 1 の空気を採用し、試料の厚さはそれぞれ 1mm と 5mm のものを用意して測定を行った。

3. 測定方法

図2に示す配置で試料を設置し、フリースペース法による S パラメータの測定を行った。

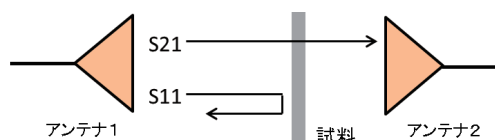


図2 フリースペース法による S パラメータ測定

4. 測定結果

まず、従来のシステムで各試料の比誘電率を計算した結果を図3に示す。

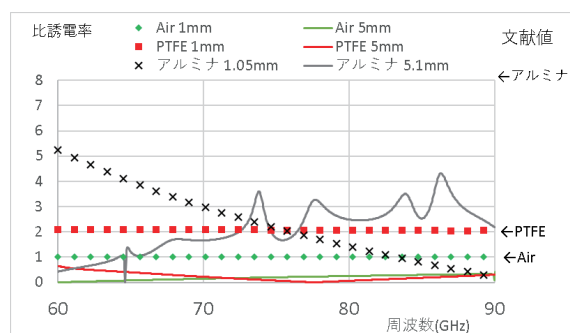


図3 既設のシステムによる比誘電率の計算値

空気の厚さ 1mm、PTFE の厚さ 1mm では文献値と同じ比誘電率が得られている。これらの試料では、周波数 90GHz での試料内半波長はそれぞれ 1.7mm と 1.2mm であり、試料の厚みより大きいため誘電率の算出が可能となる条件を満たしている。一方厚さ 1mm のアルミナの場合、試料内半波長はアルミナの比誘電率を 9 と仮定すると 0.56mm となり、試料厚さ 1mm より小さくなる。このため、誘電率の計算が正しく行われておらず、周波数によっては比誘電率が 1 以下となる異常な値となっている。また、試料厚さ 5mm ではいずれの

試料も条件を満たさず、誘電率は正しく計算できていなかった。

次に、NRW 法において位相について補正した上で計算した、比誘電率と比透磁率の値を図4、5に示す。

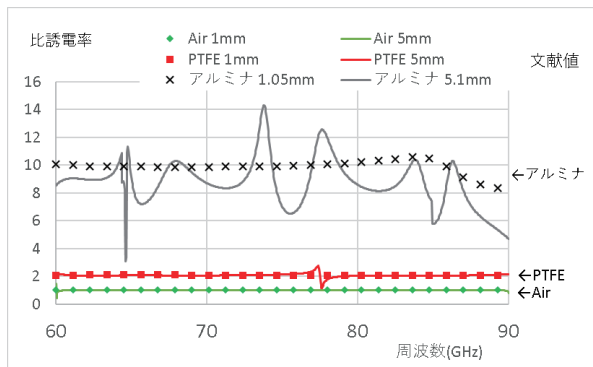


図4 位相を補正して計算した比誘電率

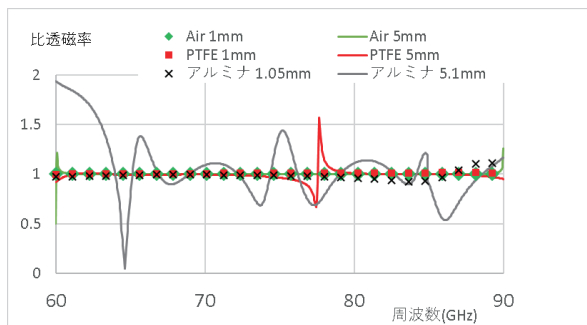


図5 位相を補正して計算した比透磁率

空気と PTFE の比誘電率については、厚みが 5 mm の場合でも文献値どおりの値が得られた。アルミナも厚みが 1 mm の場合では、文献値に近い比誘電率が得られた。一方で厚さ 5 mm のアルミナでは、比誘電率も比透磁率も周波数により大きく変動し、文献値から外れた値となった。厚さ 5 mm の PTFE の 78GHz 付近と、厚さ 1 mm のアルミナの 90GHz 付近でも比誘電率・比透磁率が変動している。この周波数付近では 2分の1 波長の整数倍と試料の電気的厚みが一致しており、反射率が極端に下がっているため位相が正しく測定できず、

比誘電率・比透磁率の値が算出できなかった。

次に、透過波 (S21) のみを用いた T0 法による誘電率の計算を行った。透過率のみで計算を行う場合、透磁率が既知である必要がある (もしくは誘電率が既知の材料の、透磁率を求めることができる)。今回測定に供した空気、PTFE、アルミナはいずれも非磁性体であるため比透磁率=1を既知として誘電率の計算を行った。結果を図6に示す。

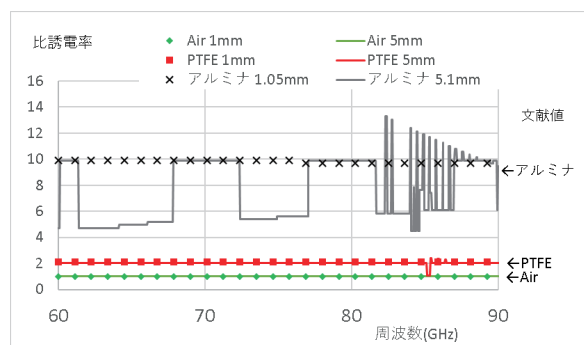


図6 透過率のみから求めた比誘電率

誘電率は空気、PTFE、厚さ 1 mm のアルミナの場合については、文献値に近い比誘電率を得られた。しかし、厚み 5 mm のアルミナでは正しい値が得られなかった。NRW 法 (図4) では厚み 5 mm の PTFE の 78GHz 付近や、厚み 1 mm のアルミナの 90GHz 付近で測定誤差が見られたが、本計算手法では計算に反射率を使用していないため発生しなかった。

5. まとめ

当センターの誘電率測定においては、これまで測定が可能な試料の電気的厚みに制限があり、厚い試料や、誘電率の高い試料について誘電率が測定出来ない場合があった。今回導入した計算手法により、これらの試料についても誘電率が計算できるようになった。

しかし現状でも誘電率を測定可能な試料の厚み

に限界があり、今回の測定では厚み5.1mmのアルミナの誘電率については、妥当な値を得ることはできなかった。

それでも、当センターで現在誘電率測定の需要がある試料は、比誘電率10以下で厚みが1mm程度のもが多く、これまで60GHz～90GHzでは、電気長(=試料厚さ×比誘電率の平方根)が約3mm(アルミナ、厚さ1mm)でも測定できない場合があったが、今回電気長7mm(PTFE厚さ5mm)程度でも測定できることが確認できており、誘電率の測定に対応できる試料は大幅に増えたといえる。

(参考文献)

- 1) "Measurement of Dielectric Material Properties" Application Note; Rohde & Schwarz; Munich, Germany, 2006.
- 2) F. F. Gonçalves, et al, "Free-Space Materials Characterization by Reflection and transmission Measurements using Frequency-by-Frequency and Multi-Frequency Algorithms" Electronics 2018, 7(10), 260
- 3) Characteristics of Kyocera Fine Ceramics; <https://www.kyocera.co.jp/prdct/fc/product/pdf/material.pdf>