

自由空間における反射係数を利用した複素比誘電率の測定

林 達郎^{*1)}, 高井 伸一郎^{*2)}

Measurement of Relative Permittivity using Reflection Coefficient in Free Space

HAYASHI Tatsuro^{*1)}, TAKAI Shinichiro^{*2)}

GHz 帯における材料の複素比誘電率 ϵ_γ や複素比透磁率 μ_γ の測定には、試料面における S パラメータを測定し、ここから計算モデルを用いて算出する方法が用いられている。S パラメータの測定には同軸導波管法や自由空間法などが用いられるが、同軸導波管法は試料を小型精密加工して治具内に挿入する必要があるため性質上適さない材料も多い。一方、自由空間法は作製しやすい大型の平板試料で測定が行えるが、透過係数が必要となる場合には試料を回り込む電波を遮蔽する環境が必要となり、測定系が大掛かりとなる。本研究では自由空間に設置した 1 アンテナによる簡単な測定系で、大型の平板試料の反射係数のみを測定した値から材料の ϵ_γ 算出を試みた。アクリル樹脂とモルタルを対象に測定を行なったところ、狭帯域ながら ϵ_γ の測定が行えることを確認した。

1. 緒言

筆者らは土木建築の分野で汎用性が高いモルタルに電波吸収特性を付与する研究を行っている。電波吸収体の設計には、材料の定数として複素比誘電率 ϵ_γ や複素比透磁率 μ_γ が用いられるが、多くの場合は未知であるため、測定が必要である。

GHz 帯における材料の ϵ_γ や μ_γ の測定には、まず試料面における S パラメータ(電波の反射や透過の係数)を測定し、ここから計算モデルを用いて算出する方法が一般的である。S パラメータの測定には同軸導波管法や自由空間法などが用いられるが、同軸導波管法は試料を小型精密加工して治具内に挿入する必要があるため、構造が不均一な材料やモルタルのように加工性が低い材料には不向きである。一方、自由空間法は作製しやすい大型の平板試料で S パラメータの測定が行えるが、透過係数が必要となる計算モデルを用いる場合は、測定に際し試料の周囲から回り込む電波を遮蔽するシールドボックスなどの環境が必要となり、測定系が大掛かりとなる。

本研究では、できるだけ簡易な測定系で材料の ϵ_γ を測定することを目指し、自由空間に設置した 1 アンテナで大型の平板試料の反射係数のみを測定した値から ϵ_γ の算出を試みた。アクリル樹脂とモルタルなどを対象に測定を行なったところ、狭帯域ながら ϵ_γ の測定が行えることを確認したので事例を以下に示す。

2. 測定原理

2.1 反射係数から ϵ_γ の算出

本研究では TEM モードの同軸導波管で利用される計算モデルを自由空間に応用した。

同軸導波管などに試料が挿入されたときの S パラメータから ϵ_γ や μ_γ を求める計算モデルは種々¹⁾²⁾提案されている。これらを自由空間に応用することを想定したとき、透過係数が必要になる場合にはアンテナが 2 台必要で、さらに試料周囲からの回り込みを防ぐ環境が必要となる。そこで、アンテナ 1 台で測定できる反射係数のみを用いて ϵ_γ の算出を行う計算モデルに着目した。

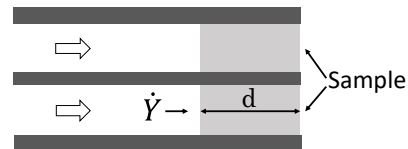


図 1 開放端に設置した試料

図 1 のように厚み d の誘電体試料を同軸導波管の開放端に設置したとき、左から右方向へ進行する電波の波長 λ に対して試料の厚み d が十分に薄ければ、試料表面の反射係数から求まるアドミタンス \hat{Y} は近似的に次のように示される。

$$\hat{Y} = j\hat{Y}_0\epsilon_\gamma\frac{2\pi d}{\lambda} = j\hat{Y}_0(\epsilon_\gamma' - j\epsilon_\gamma'')\frac{2\pi d}{\lambda}$$

*1) I o T 推進グループ (現 機械・計測・エネルギーグループ) , *2)村本建設株式会社

これより, アドミタンス \dot{Y} が求まれば周波数ごとの ϵ_{γ} が算出できる.

2.2 自由空間への応用

2.1を自由空間に応用するため, 図2に示す構造の試料台を準備した. 試料台の上に短絡端である金属板を設置, ここからアンテナ側に近づき電界最大となる開放端付近に試料を設置するため, 低誘電率の樹脂スペーサーを設置した. その上に設置する試料単体のアドミタンス \dot{Y} は, 試料表面の反射係数から求まるアドミタンス \dot{Y}_1 から, スペーサーのみを設置したときのアドミタンス \dot{Y}_2 を差分して求めた.

$$\dot{Y} = \dot{Y}_1 - \dot{Y}_2$$

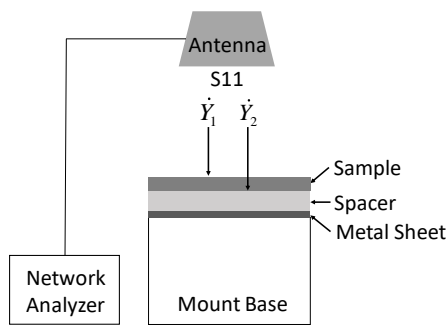


図2 反射係数の測定

3. 実験方法

3.1 測定方法

試料を図2に示す試料台上のスペーサーに重ねて設置して得られた試料単体のアドミタンス \dot{Y} から ϵ_{γ} を算出した. 測定対象周波数は1~8GHzで, 使用したアンテナはダブルリジッドガイドホーンアンテナ Schwarzbeck 製 9120Dである. なお, 試料を開放端付近に設置するためのスペーサーとして厚み17mm, 10mm, 5mmの3種類の発泡樹脂を使用した.

3.2 ϵ_{γ} が既知の材料の測定

測定精度を予め確認するため, ϵ_{γ} の値が既知であるアクリル樹脂の測定を行った. アクリル樹脂の代表的な $|\epsilon_{\gamma}|$ を表1に示す.

表1 アクリル樹脂の比誘電率³⁾

Frequency	$ \epsilon_{\gamma} $
1kHz	3.5~4.0
1MHz	3.0~3.5
1GHz	2.58

1GHz以上の実数部の値は周波数分散が少ないものと仮定し, 本研究では表中1GHzの値2.58を1~8GHzの代表的な値として代用した. また, 通常のアクリル樹脂は絶縁体であるため, 導電性の影響を受ける虚数部は0として取り扱った. 測定に用いた試料の寸法は300×300mmで, 厚みが2mmの平板シートである.

3.3 ϵ_{γ} が未知の材料の測定

ϵ_{γ} が未知の材料としてモルタルの測定を行った. 使用したモルタルはセメントに普通ポルトランドセメントを, また細骨材に0.6mmふるいを通したものを使用した. モルタルの配合は水セメント比W/Cが60%, 砂セメント比S/Cは2.56である. 試料の寸法は300×300mmで, 厚みが2mmの平板形状に作製した. なお, 測定に際し試料を一般的な気乾状態に近づけるため, 予め室温が約20°C, 湿度40~50%の環境で2週間保管した.

3.4 測定結果の検証

ϵ_{γ} が未知の材料の測定結果の妥当性を検証するため, 同一試料を対象に全く異なる測定法で得られた ϵ_{γ} と比較検討を行った. 比較対象とした測定法は2台のアンテナと試料設置用シールドボックス⁴⁾を用いて測定した試料の透過係数から, 伝送線理論に基づく逆推定問題として近似計算で ϵ_{γ} を求めたものである.

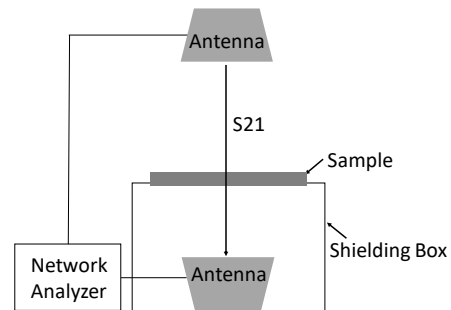


図3 透過係数の測定

4. 結果および考察

4.1 ϵ_{γ} が既知の材料の測定結果

アクリル樹脂を対象に ϵ_{γ} の測定を行なった結果を図4に示す. 1アンテナの簡易な環境で測定した結果は実数部が約2.5で虚数部が0付近を示す平坦部と, スペーサーの厚みごとに異なる特定周波数帯に急変部がみられる. この急変部は, 既知の代表値との比較で顕著な差として認められることから, 今回の測定法に起因する誤差と考えられる.

スペーサーの厚みが17mmのとき, スペーサーの上面が開放端になる波長 λ は $\lambda/4=17\text{mm}$ から逆算して68mmで

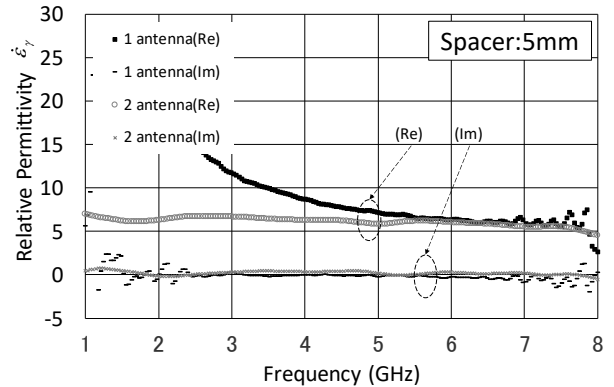
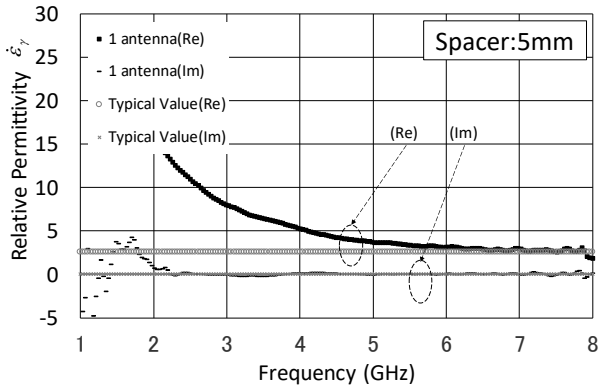
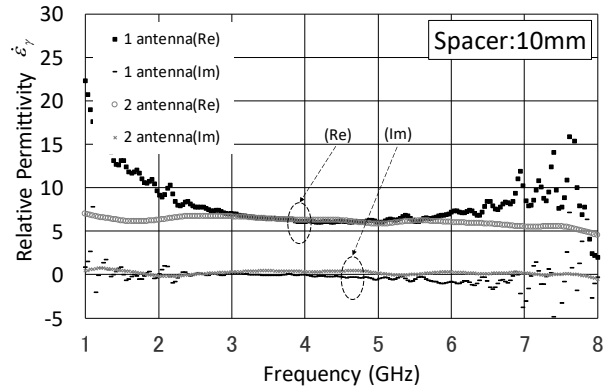
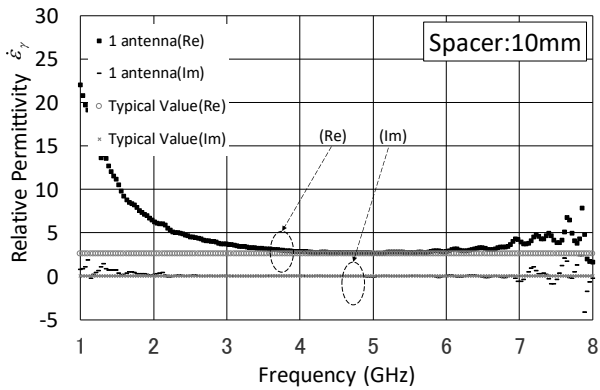
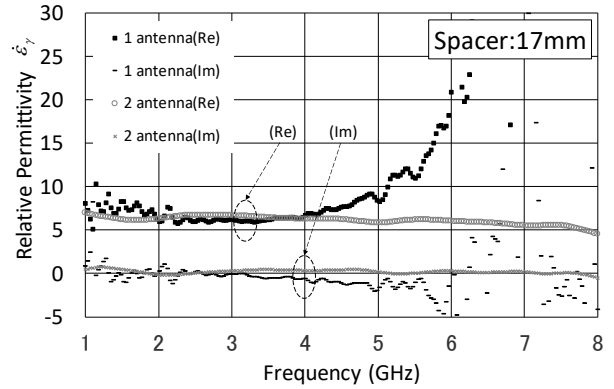
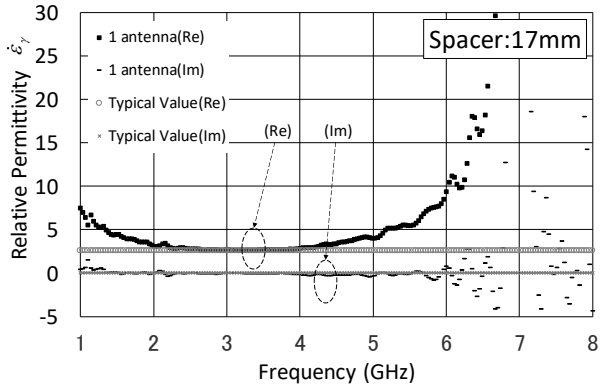


図 4 アクリル樹脂の測定結果

図 5 モルタルの測定結果

ある。このとき周波数は 4.4GHz 付近であるためこれより波長が長い、即ち低い周波数帯において試料が開放端付近に位置し、測定精度が得られたと考えられる。同様にして、スペーサーの厚みが 10mm のときにスペーサー上面が開放端になる周波数は 7.5GHz 付近、スペーサーの厚みが 5mm のときにスペーサー上面が開放端になる周波数は 15GHz 付近であるため、それぞれそれより低い周波数帯で一定の測定精度が得られたと考えられる。

一方、周波数が 1GHz 付近では試料寸法が 1 波長程度となることに加え、スペーサーが薄い場合には、短絡端となる金属板に試料全体が近づくため、測定誤差が急激に増大したものと推察される。

これより、スペーサーの厚み調整により、試料が開放端

付近にある場合に ϵ_γ の測定が可能であることが確認できる。

4.2 ϵ_γ が未知の材料の測定結果

モルタルを対象に ϵ_γ の測定を行なった結果を図 5 に示す。1 アンテナの簡易な環境で測定した結果は、実数部が約 7 で虚数部が 0 付近を示す平坦部と、スペーサーの厚みごとに異なる特定周波数帯に急変部がみられる。この急変部は、2 アンテナの測定法による結果との比較でも顕著な差として認められることから、4.1 と同様に今回の測定法に起因する誤差と考えられる。

スペーサーが各厚みの際に、少ない誤差で測定が可能となる周波数帯についても、4.1 と類似の傾向が得られてお

り, 気乾状態のモルタルの ϵ_r は実数部が約7で, 虚数部がほぼ0であることがわかる.

5. 結言

簡易な測定系で材料の ϵ_r を測定することを目指し, 自由空間に設置した1アンテナで大型の平板試料の反射係数のみを測定した値から ϵ_r の算出を試みた.

結果として, 試料を開放端となる付近に配置するためのスペーサーの調整と組み合わせにより, 狭帯域ながら特定の波数帯において ϵ_r の測定が行えることが確認できた.

今後は, 試料の厚みがさらに増加した場合に発生する誤差について実験検討を進めるとともに, より大きな ϵ_r をもつ材料への対応や1~8GHzの周波数帯内で顕著な周波数分散特性を示す材料の場合にスペーサーによる誤差との分離可能性について検討を行う必要がある.

この方法を用いれば, モルタルのように薄型に成型が困難な材料でも, 原料をスペーサー上部に塗布することで形状を保持したまま ϵ_r の測定が行える利便性があることから, 引き続き測定精度の向上のため研究を進めたい.

6. 謝辞

本研究の実施にあたり, 摂南大学理工学部都市環境工学科の熊野研究室の皆様にご協力頂きました.

なお, 本研究で使用したアンテナ及びネットワークアナライザは, 公益財団法人 JKA の「機械工業振興補助事業」により導入, 設置したものである.

参考文献

- 1) 橋本修, “高周波領域における材料定数測定法”, pp139-140, 森北出版
- 2) 橋本修, “電波吸収体の技術と応用”, pp43-51, シーエムシー出版
- 3) 家田正之, 成田賢仁, 高橋清, 柳原光太郎, “電気・電子材料ハンドブック”, pp107, G7-1, 朝倉書店
- 4) 林達郎, 高井伸一郎, “モルタルの含水条件が電波吸収特性に与える影響について”, G7-1, 平成28年電気関係学会関西連合大会

