

論文

1GHz までの誘電特性測定における精度向上のための手法検討

時田 幸一*¹⁾ 重松 宏志*¹⁾ 小林 丈士*¹⁾

Examination of a Higher Accuracy Method for Measuring the Dielectric Properties of Materials to 1 GHz

Kouichi Tokita*¹⁾, Hiroshi Shigematsu*¹⁾, Takeshi Kobayashi*¹⁾

Permittivity and dielectric loss tangents are important physical quantities for dielectric materials. Measuring those quantities and their frequency dependences is absolutely essential for product development. Recently, it is becoming increasingly important to measure them in not only kHz and MHz but also in the GHz frequency range.

We have established a method for measuring dielectric properties (i.e. permittivity and dielectric loss tangent) of dielectric materials to 1 GHz using general-purpose impedance measuring equipment. In general use, it is difficult to evaluate accurately dielectric properties for low loss dielectric materials using them. In order to improve the accuracy of the measurement, we try some technical methods. Then it was found that the accuracy of the permittivity and the loss tangent are improved by those methods.

キーワード：誘電率, 誘電正接

Keywords : Permittivity, Loss tangent

1. まえがき

誘電率(ϵ_r)及び誘電正接($\tan \delta$)は、絶縁物の特性を示す重要な物理量の一つであり、様々な製品開発(回路基板, コンデンサ, アンテナ保護材等)において、使用する電気材料の誘電特性測定は不可欠である。JISに規定されている従来の測定法に加え、近年1GHzまでの周波数帯では、インピーダンスアナライザ等本来回路部品や素子の測定を行う汎用機器と、材料測定用の治具を組み合わせた測定も一般的となっている。しかしながら現状JIS等では、インピーダンスアナライザを用いた材料測定方法は明確に規定されていない。また全ての周波数範囲で高精度測定を行うことは簡単ではなく、低周波数域での測定精度の低下や、誘電正接が小さい試料の測定が困難であるなどの問題がある。

本研究では、電極形成や高誘電率試料によるロード補正等手法の検討を行い、どの程度測定精度に改善が見られるかを検証した⁽¹⁾。

2. インピーダンスマテリアルアナライザを用いた誘電特性測定

2.1 測定原理 誘電特性の測定方法は複数有り、周波数や試料形状、用途に合わせて最適な方法を選択することが必要である。測定方法は、大別すると「容量法」、「Sパラメーター法・反射波法」、「共振法」の3つに分けられるが、周波数が1GHz以下では主に容量法が用いられる⁽²⁾。容量法

は、測定試料を2枚の電極の間に挟んでコンデンサを形成し、静電容量や複素インピーダンスを測定して誘電率・誘電正接を計算する。インピーダンスマテリアルアナライザは材料測定用治具と組み合わせることで、容量法による誘電特性測定が可能となる。本研究では、アジレント・テクノロジー製のインピーダンスマテリアルアナライザ(E4991A)と、材料測定用治具(16453A)を使用した(図1)。このシステムでの測定可能周波数範囲は1MHzから1GHzである⁽³⁾⁽⁴⁾。

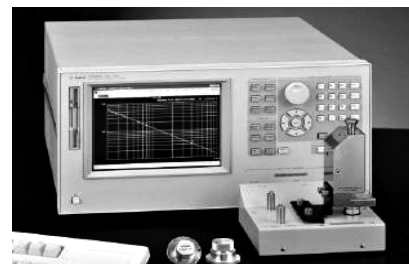


図1. インピーダンスマテリアルアナライザと材料測定用治具

2.2 測定の利点と問題点 インピーダンスマテリアルアナライザを用いた誘電特性測定においては、板状又はシート状の試料であれば比較的容易に測定できること、周波数掃引によって誘電特性の周波数依存性が効率的に取得できること、が利点として挙げられる。しかし一方では、測定精度の周波数依存性が大きく、100MHz以下の周波数で測定精度が低くなりやすい。また、誘電正接が0.01より小さい低損失試料の測定が困難であるといった問題点がある。図2及び図3は、樹脂やセラミック等複数種類の試料を測

事業名 平成22年度, 23年度 基盤研究

*¹⁾ 電子半導体技術グループ

定し、誘電率及び誘電正接の相対誤差を示したものである。使用した測定試料を表1に示す。方法はマニュアルに記載されている基本的な手法（以下：通常測定）で行った。主な測定条件を表2に示す。各試料に対して5回測定を行い、平均値に対する値の標準偏差($\Delta \epsilon_r$, $\Delta \tan \delta$)を求め、各周波数における相対誤差($\Delta \epsilon_r / \epsilon_r$, $\Delta \tan \delta / \tan \delta$)を計算した。図2及び図3では、誘電率・誘電正接共に周波数が低くなると相対誤差が大きくなる傾向が見られる。図2に示した誘電率の相対誤差を見ると、比較的誤差の小さいテフロン (PTFE) でも、2桁の精度が期待できる範囲（相対誤差1%以内）は10MHz以上の範囲に限られる。誘電正接では、相対誤差が5%以内に収まるのは100MHzから1GHzの周波数帯のみであり、さらにフェノール樹脂やガラスエポキシなど、誘電正接が0.01より大きい高損失な試料に限られる事がわかった。

表1. 測定試料一覧

試料名	種類	寸法(mm)	厚さ(mm)
フェノール (布ベーク)	樹脂	40×70	1.024
フェノール (紙ベーク)	樹脂	40×70	0.996
ガラスエポキシ	樹脂	40×70	1.024
アクリル	樹脂	40×70	1.042
ポリプロピレン (PP)	樹脂	40×70	0.972
ポリエチレン (PE)	樹脂	40×70	1.060
テフロン (PTFE)	樹脂	40×70	1.004
アルミナ 99.5	セラミック	40×70	0.908
ジルコニア	セラミック	40×70	1.028
石英ガラス	ガラス	40×100	1.116

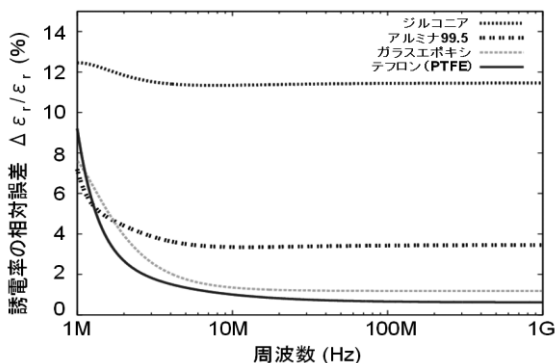


図2. 通常測定における誘電率の相対誤差

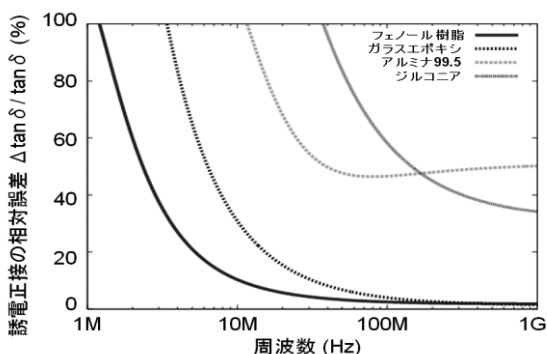


図3. 通常測定における誘電正接の相対誤差

3. 測定における誤差要因

今回の測定において生じた誤差の要因としては、主に以下が考えられる。

(1) 低周波数域における容量性インピーダンスの増加
2.1で述べたように、インピーダンスマテリアルアナライザは、容量法によって試料に印加する電圧と流れる電流を計測してインピーダンスを求め、誘電率・誘電正接を得る。絶縁物である測定試料はコンデンサと見なすことができ、その容量性インピーダンスは周波数の逆数に比例するため、低周波数ではインピーダンスが大きくなる。通常インピーダンスアナライザは、特性インピーダンスである50Ω付近で一番測定精度が高いが、試料の容量性インピーダンスが増加すると測定電流が小さくなり、低周波数域での測定精度が低下する。

(2) 試料と電極との接触面積のロス
今回使用した治具はバネを内蔵し、上下の電極で測定試料をはさむ構造になっている。測定試料を電極で挟む場合、通常は試料表面の凹凸や歪みによって少なからず電極との間に空気層が形成される。空気層は電極と試料の接触面積のロスと見ることもでき、誤差の要因となる。

(3) 場所による試料自体の性質のばらつき
一枚の試料でも、場所によって試料自体の持つ誘電特性が異なり、試料の異なる場所を測定すると全く違う誘電率・誘電正接の値が得られる場合がある。こうした場所によるばらつきは主にセラミックに見られ、複数回の測定から試料の誘電率・誘電正接を求める場合には、誤差の要因となる。

現状では、上記の要因に基づく誤差を完全に分離して評価することや、測定器の限界感度そのものを向上させることは事実上無理である。しかしながら、次章で述べる測定手法の工夫により、上記の要因に対して精度向上の余地はある。本研究ではあくまでも実測値を元に、汎用機器を用いた測定においてベストな手法を選定する。

4. 測定及び結果

4.1 信号電圧調整とアベレージ機能の使用
2.2の通常測定では、信号電圧が100mVに設定されている。今回は信号電圧を最大値である500mVに設定し、さらにアベレージ機能を組み合わせて測定精度の比較を行った。アベレージ機能には、各周波数ポイントで平均を取りながら周波数方向に掃引する「Point Average」と、周波数掃引を行うごとにデータを積算して平均を取る「Sweep Average」の2種類があり、それぞれ回数を設定できる。測定試料は標準試料としても使われるテフロン (PTFE) を使用し、周波数範囲は通常測定と同様に1MHzから1GHzとした。

通常測定との誘電率の相対誤差の比較を図4に示す。通常設定（信号電圧100mV, Point Average 1回, Sweep Average 8回）では1MHzにおける誘電率の相対誤差は10%近くあったが、信号電圧調整500mV, Point Average 16回, Sweep

Average 8 回の設定にすると、特に 10MHz 以下の低周波数での相対誤差を小さくすることに成功した。これは、信号電圧を上げることで測定電流が増加し、インピーダンス及び誘電率の測定精度が向上したと考えることができる。原理的にはアベレージの回数を増やせば精度は上がるが、一方で測定時間も長くなる。実際の測定では、測定時間との兼ね合いで現実的なアベレージ回数を選択が必要となる。

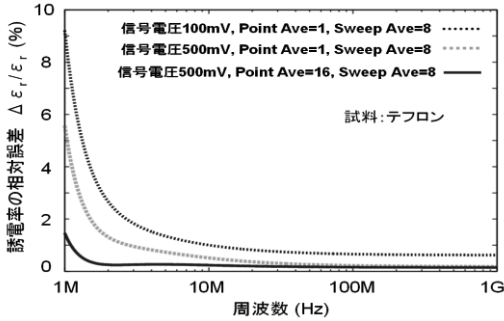
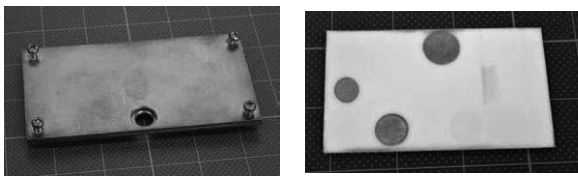


図4. 信号電圧調整・アベレージ機能使用による相対誤差の変化

4.2 スパッタリングによる電極形成 3(2)で述べた試料と電極の接触面積のロスを抑えるため、測定試料表面に電極形成を行った。一般に JIS では、金属はくをワセリンで試料に装着する方法などが記載されている。しかし今回使用する測定治具 16453A は上部電極直径 10mm, 下部電極直径 7mm と小さいことから、スパッタリングによる電極形成を行った。上部/下部電極と同じ大きさ、同じ位置に電極を形成するよう、図5(a)に示す様な治具を作成して使用した。図5(b)はテフロンの表面に電極を形成した例である。



(a) 電極形成用治具 (b) 電極形成例 (テフロン)
図5. 電極形成用治具と電極の形成例

複数の試料に対して電極形成/非形成による誘電率・誘電正接の精度を比較したところ、電極形成による劇的な精度の改善は見られなかった。一例として、アクリルの測定結果を図6及び図7に示す。誘電率では電極形成時の方が相対誤差は小さい(図6)が、誘電正接では逆に電極形成時の相対誤差が大きくなっている周波数帯がある(図7)。

しかしながら、試料によっては電極形成が有効と思われる結果も得られた。図8はセラミックであるアルミナ 99.5 の誘電率の測定結果である。電極形成を行ったことで、全ての周波数帯において誘電率が 15%程度高めにしている。これは電極非形成時には試料表面の凹凸によって接触面積のロスがあり、誘電率を低く測定していたためと思われる。この結果から、電極形成は接触面積のロスを補正する効果があり、特にセラミックのような硬い試料の誘電率測定には非常に有効であると言える。ただしスパッタリングによる電極形成では、試料に 100℃程度の熱がかかるため、熱に

よって劣化や変質が起こる試料には注意が必要である。

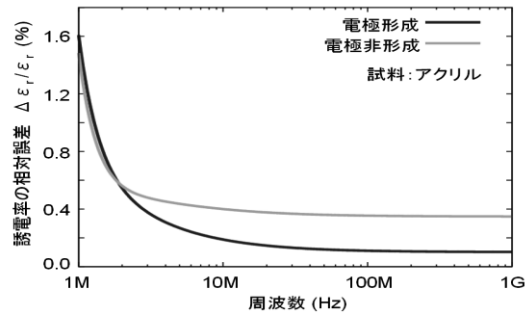


図6. 電極形成/非形成における誘電率の相対誤差

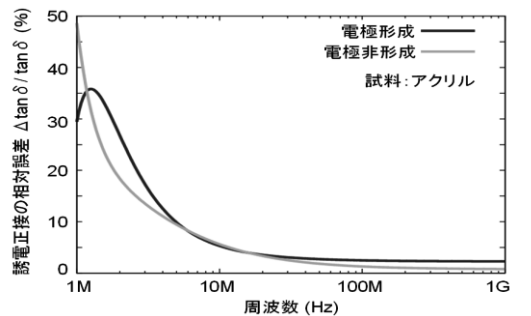


図7. 電極形成/非形成における誘電正接の相対誤差

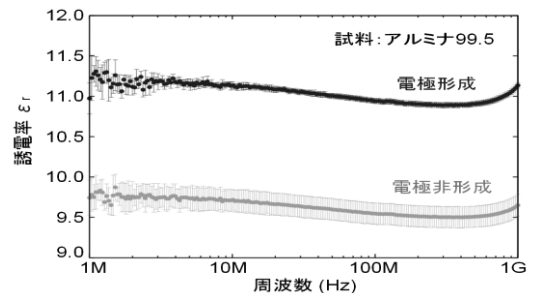


図8. 電極形成/非形成における誘電率の比較

4.3 高誘電率試料を用いたロード補正 一般に測定前には、誤差要因となる測定器及び治具の残留インピーダンスを取り除くため、オープン/ショート/ロード補正を行う。通常ロード補正では、誘電特性が既知の標準試料としてテフロン(誘電率 2.1, 誘電正接 < 0.0001) が用いられる。しかし低周波数ではインピーダンス増加のため測定精度が低くなる。これはテフロンも例外ではなく、低周波数では精度の低い校正データとなってしまう。そこでテフロンより高誘電率の材料でロード補正をする事で、低周波数でのインピーダンス増加を抑え、より精度の高いロード補正が可能となれば、測定精度向上が期待できる。

今回は高誘電率かつ低損失で、周波数特性も安定したセラミックであるサファイヤをロード補正用の試料に用いた。まずテフロンを標準試料として一度サファイヤの誘電特性を測定し、得られた値(誘電率 11.6 及び誘電正接 0)を「サファイヤを使ったロード補正」に用いるという 2 段階の補正を行った。なお 1GHz 付近では共振の影響によりサファイヤの特性が正確に測定できなかったため、周波数範囲は 1MHz から 100MHz とした。

ロード補正用試料にテフロンとサファイヤを用いた場合の比較例を図9, 図10に示す。エラーは5回の測定から求めた標準偏差である。サファイヤを用いたロード補正により, 20MHz以下での測定精度の改善が見られた。即ち高誘電率の材料を使ってロード補正を行うことで, 低周波数域での測定精度改善が期待できる結果となった。しかしながら一方では, テフロンでロード補正した場合とサファイヤでロード補正した場合で, 誘電率・誘電正接の絶対値が大きくずれる例も見られた。これは2段階の補正によるエラーの積算や, 3(3)で述べたサファイヤの場所による性質の違いが原因と考えられる。またセラミックであるサファイヤはテフロンに比べると硬く, 測定の際わずかな歪み等で電極との接触面積のロスを生じやすいため, こうした効果が測定結果に影響していると考えられる。サファイヤを用いたロード補正では, 絶対値の評価において課題が残ることから, 測定の際はサファイヤでロード補正した結果と, テフロンでロード補正した結果が一致していることを十分確認する必要がある。

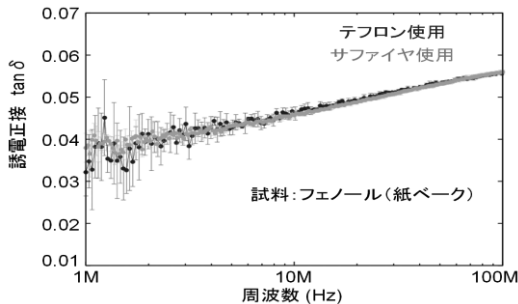


図9. 標準試料にテフロンとサファイヤを用いた場合の比較 (誘電正接)

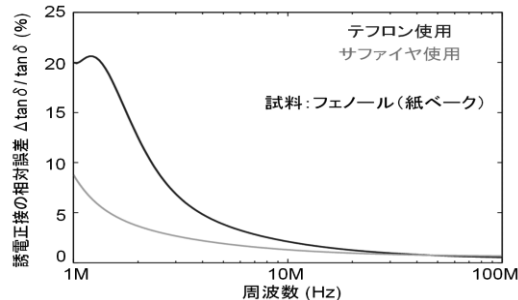


図10. 標準試料にテフロンとサファイヤを用いた場合の比較 (誘電正接の相対誤差)

5. まとめ

本研究では, 1GHzまでの誘電特性測定において, 汎用性を確保しつつ測定精度を高める手法の検討を行った。信号電圧を調整すると共にアベレージ機能を組み合わせ, 誘電率の高い標準試料をロード補正に用いることで, 低周波数域での測定精度の改善が見られた。スパッタリングによる電極形成は, 測定精度の大きな改善は見られなかったものの, セラミック等硬い試料に対して接触面積のロスを軽減する効果があり, 誘電率の正確な測定に有効であることがわかった。スパッタリングによる電極形成は, 熱によって

変形・劣化する試料には適用が困難であり, サファイヤを用いたロード補正は絶対値の評価に課題が残るため, より汎用的な手法の検討は今後も必要である。

表2に手法検討前(通常測定時)と手法検討後の測定条件の比較を示す。図11は誘電率を相対誤差1%以内, 誘電正接を相対誤差5%以内で測定できる範囲をそれぞれ概念的に示したものである。点線は手法検討前(通常測定時), 実線部分は手法検討後の測定可能範囲を表す。通常測定では上記の精度で測定できる範囲は非常に限られていたが, 手法検討により, 誘電率は1MHzから1GHzの範囲で相対誤差1%以内が期待できるようになった。また誘電正接が0.01より小さい低損失試料の測定も可能になり, 誘電正接が0.01より大きい高損失な試料に限れば, 1MHzから1GHzの範囲で誤差5%以内が期待できる結果が得られた。

表2. 手法検討前と後の測定条件の比較

測定条件	手法検討前 (通常測定)	手法検討後
周波数範囲	1MHz ~ 1GHz	1MHz ~ 1GHz*
信号電圧	100mV	500mV
Sweep Average	8	8
Point Average	1	16
電極形成/非形成	非形成	形成**
ロード補正用試料	テフロン	サファイヤ

* サファイヤを用いたロード補正の場合は1MHz ~ 100MHz

** サファイヤを用いたロード補正の場合は電極非形成

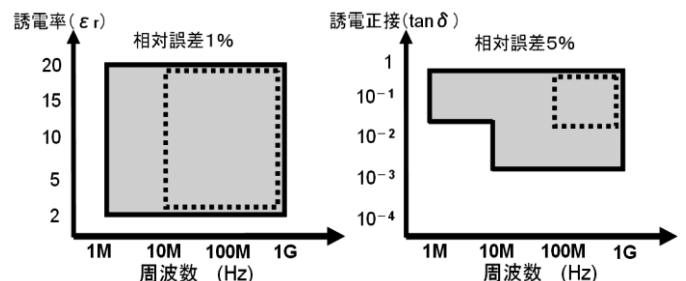


図11. 誘電率・誘電正接の測定可能範囲の比較

(点線部は通常測定時, 実線部は手法検討後)

(平成24年5月18日受付, 平成24年7月30日再受付)

文 献

- (1) 時田幸一, 重松宏志, 小林丈士: 「1GHzまでの誘電特性測定における精度向上のための手法検討」, 平成24年度電気学会全国大会, 2-007, (2012)
- (2) 戸高嘉彦, 小林禮夫: 「マイクロ波帯における基板材料の複素誘電率測定法」, 電気学会研究会資料, DEI, 誘電・絶縁材料研究会 2006(77), 1-6, (2006)
- (3) アジレントテクノロジー: 「誘電体測定の基礎」, アプリケーションノート, 5989-2589JAJ, 2005, (2005)
- (4) アジレントテクノロジー: 「インピーダンス測定技術を用いた誘電体, 磁性体材料測定」, アプリケーションノート, 1369-15980-2862JA, 2003, (2003)