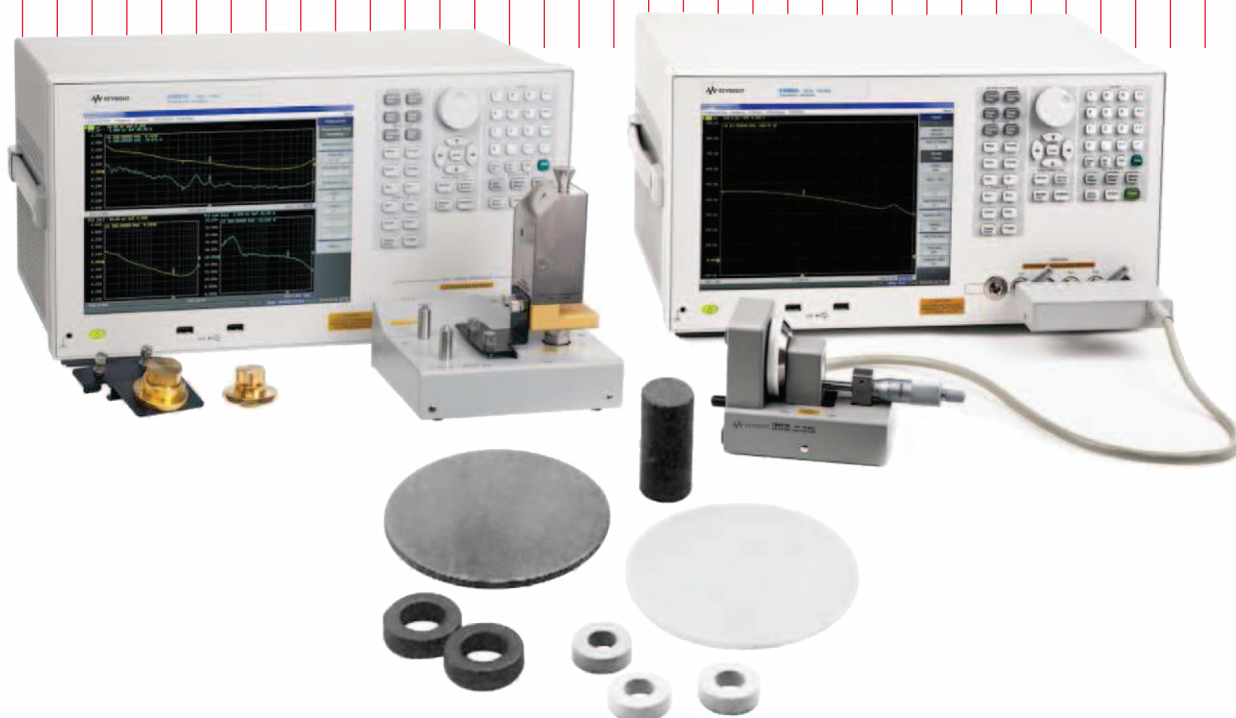


Keysight Technologies

# LCRメータおよびインピーダンス・アナライザを用いた誘電率／透磁率の測定ソリューション

Application Note



# LCRメータおよびインピーダンス・アナライザを用いた誘電率／透磁率の測定ソリューション

## Application Note 1369-1

1. はじめに .....	3
2. 誘電率評価 .....	4
2.1. 誘電率の定義 .....	4
2.2. 平行板測定法 .....	5
2.3. 誘電率測定システム .....	8
2.4. 16451B誘電体テストフィクスチャを使用した測定システム .....	8
2.5. 16453A誘電体テストフィクスチャを使用した測定システム .....	13
3. 透磁率の評価 .....	17
3.1. 透磁率の定義 .....	17
3.2. インダクタンス測定法 .....	17
3.3. 透磁率測定システム .....	18
3.4. 16454A磁性材料テストフィクスチャを使用した測定システム .....	18
4. まとめ .....	20
付録 .....	21
A. 液体の誘電率の評価 .....	21
A.1. 16452A液体テストフィクスチャを使用した測定システム .....	21
A.1.1. 主な利点 .....	21
A.1.2. 適合するMUT .....	21
A.1.3. 構造 .....	21
A.1.4. 主な仕様 .....	22
A.1.5. 操作方法 .....	23
A.1.6. 注意事項 .....	23
参考資料 .....	24

## 1. はじめに

近年、電子機器のテクノロジーが飛躍的に進化し、電子部品の材料特性が回路の動作に及ぼす影響が大きくなっています。例えば、デジタル(メディア)機器で採用が増えている大容量の積層セラミックコンデンサ(MLCC)の製造では $\kappa$ (誘電率)が高い材料を使用する必要があります。また、材料を選択する前に周波数応答や温度応答といったさまざまな電気性能の評価を行う必要があります。

電子機器以外の分野でも材料の電気特性の評価が一般的に行われるようになっていきます。これは、固体や液体などの材料の組成や化学的変異を知るために、電気特性の応答を性能パラメータとして使用できるからです。

材料評価測定システムは、3つの主要要素から構成されます。1つめは高精度の測定器、2つめは被試験材料を保持するテストフィクスチャ、3つめは誘電率や透磁率などの基本的な材料パラメータを計算して表示するソフトウェアです。誘電率と透磁率の測定方法としては現在さまざまなものが存在します(表1参照)。このアプリケーションノートでは主にインピーダンス測定テクノロジーを使用する方法について説明します。この方法には以下のような利点があります。

- ・ 20 Hz ~ 1 GHzの広い周波数レンジ
- ・ 高い測定精度
- ・ 測定準備(材料の加工や測定のセットアップ)が簡単

最初にセクション2で誘電率に関する測定方法、システム、ソリューションを紹介し、次にセクション3で透磁率を扱います。その後、付録で抵抗率測定システムと液体の誘電率測定システムに関して説明します。

表1. 誘電率および透磁率パラメータの測定技術と測定方法

測定パラメータ	測定テクノロジー	測定方法
誘電率	インピーダンス解析	平行板
	ネットワーク解析	反射波
		Sパラメータ
		キャパティ
		フリースペース
透磁率	インピーダンス解析	インダクタンス
	ネットワーク解析	反射波
		Sパラメータ
		キャパティ

## 2. 誘電率評価

### 2.1. 誘電率の定義

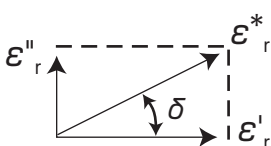
誘電率は材料と電界の相互作用を表します。主な式を図1に示します。誘電定数( $\kappa$ )は、複素比誘電率( $\epsilon_r^*$ )、すなわち複素誘電率( $\epsilon^*$ )と自由空間の誘電率( $\epsilon_0$ )との比です。複素比誘電率の実数部( $\epsilon_r'$ )は、外部電界のエネルギーがどれだけ材料内に蓄えられるかを表し、固体でも液体でもほとんどの材料で $\epsilon_r' > 1$ です。複素比誘電率の虚数部( $\epsilon_r''$ )は損失係数と呼ばれ、材料による外部電界の消費(損失)を示します。 $\epsilon_r''$ は常に $>0$ で、通常は $\epsilon_r'$ よりはるかに小さくなります。損失係数には誘電損失と伝導率の両方の影響が含まれます。

図1のように、複素誘電率を単純なベクトルで表すと、実数部と虚数部の位相差は $90^\circ$ になります。ベクトル和と実数軸( $\epsilon_r'$ )の間の角度のタンジェント( $\tan \delta$ )は誘電正接と呼ばれ、通常は材料の相対的な損失を表すために用いられます。技

術文献では、通常「誘電定数」のことを単に「誘電率」と呼びます。このアプリケーションノートでは「誘電率」を誘電定数の意味で使用します。

$$K^* = \epsilon_r^* = \frac{\epsilon^*}{\epsilon_0} = \epsilon_r' - j \epsilon_r'' = \left( \frac{\epsilon'}{\epsilon_0} \right) - j \left( \frac{\epsilon''}{\epsilon_0} \right)$$

(実数部)      (虚数部)



$$\tan \delta = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} \quad \begin{matrix} \text{(虚数部)} \\ \text{(実数部)} \end{matrix}$$

$$\tan \delta = D \text{ (損失係数)}$$

$K^* =$  誘導定数  
 $\epsilon_r^* =$  複素比誘導率  
 $\epsilon_0 =$  真空の誘導率  $\left( \frac{1}{36\pi} \times 10^{-9} \text{ [F/m]} \right)$

図1. 複素比誘電率( $\epsilon_r^*$ )の定義

## 2.2. 平行板による誘電率測定法

インピーダンス測定器を使用して誘電率を測定する場合は、平行板法が一般的に用いられます。平行板法の概要を図2に示します。

平行板法はASTM D150では3端子法と呼ばれていて、2つの電極の間に薄いシート材料または液体材料を挟むことでキャパシタを形成します(注記：以下の部分では、固体／液体を問わず被試験材料のことを「MUT」と表記します)。測定した容量は誘電率の計算に用いられます。実際のテストセットアップでは、2つの電極は誘電材料を挟むテストフィクスチャに組み込まれています。インピーダンス測定器によって容量(C)や損失(D)のベクトル成分を測定し、ソフトウェアプログラムによって誘電率や誘電正接を計算します。

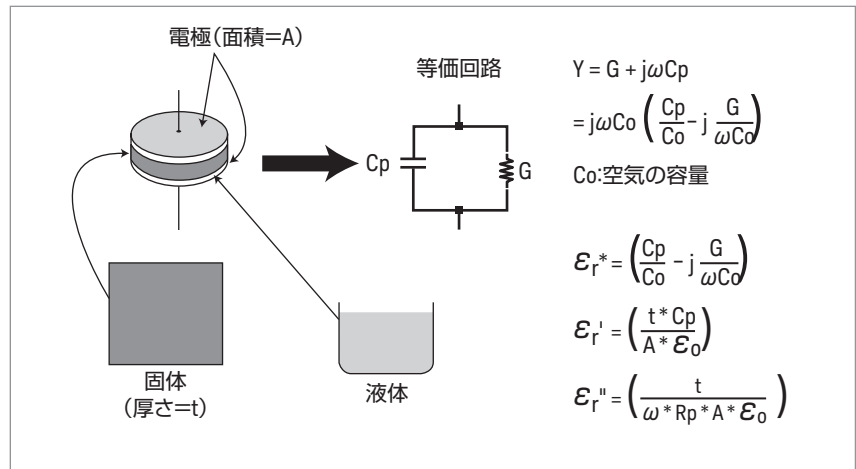


図2. 平行板法

図3は実際の測定で電界が発生する様子です。2つの電極の間の誘電材料を単に測定した場合は、電極の端部に浮遊容量(エッジ容量)が生じ、容量の測定値は誘電材料の容量よりも大きくなります。電流は誘電材料とエッジキャパシタの両方を通して流れるため、エッジ容量は測定誤差の原因となります。

エッジ容量から生じる測定誤差を解消するにはガード電極を使用します。ガード電極が端部の電界を吸収するため、電極間の容量の測定値は誘電材料に流れた電流のみによるものになります。これにより正確な測定が可能になります。主電極とガード電極が併用されている場合、その主電極はガード付き主電極と呼ばれます。

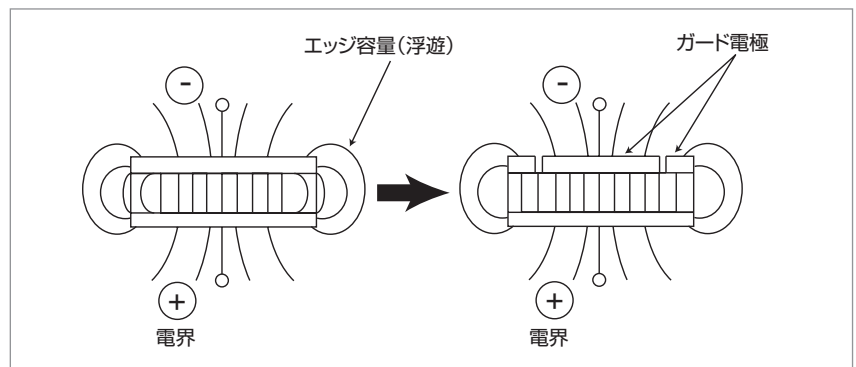


図3. ガード電極の効果

## 電極接触法：

この方法はMUTに直接接触している電極の容量を測定することによって誘電率を求めます(図4参照)。誘電率と誘電正接は、以下の式で計算されます。

$C_p$  : MUTの等価並列容量 [F]  
 $D$  : 損失係数 (測定値)  
 $t_m$  : MUTの平均の厚さ [m]  
 $A$  : 主電極の表面積 [m<sup>2</sup>]  
 $d$  : 主電極の直径 [m]  
 $\epsilon_0$  : 真空の誘電率 =  $8.854 \times 10^{-12}$  [F/m]

式：

$$\epsilon_r = \frac{t_m \times C_p}{A \times \epsilon_0} = \frac{t_m \times C_p}{\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 \times \epsilon_0}$$

$\tan \delta = D$

電極接触法は材料の加工が不要で測定の操作も簡単なため、この方法は最も広く用いられています。ただし、この方法を使用する場合は、空気層とその影響を考慮しないと大きい測定誤差が生じる可能性があります。

MUTを電極に直接接触させるとMUTと電極との間に空気層が生じます。MUTの両面をどれだけ平坦かつ平行に加工しても空気層の形成を避けることはできません。

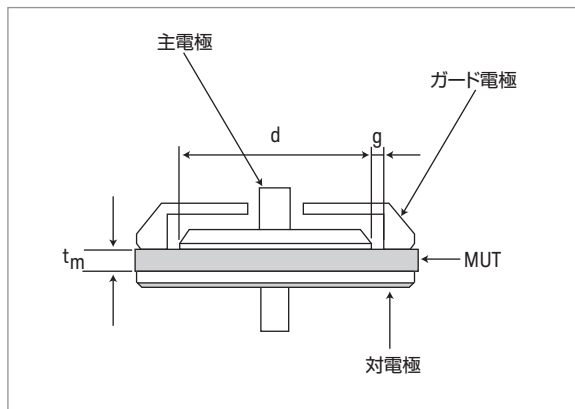


図4. 電極接触法

空気層があると測定容量が誘電材料と空気層の容量を直列接続したものとなり、測定誤差が生じます。空気層の厚さと測定誤差の関係は図5の式で表されます。

測定誤差はMUTの比誘電率( $\epsilon_r$ )、MUTの厚さ( $t_m$ )、空気層の厚さ( $t_a$ )の関数で、計算すると表2のようになります。材料が薄いほど、また、 $\kappa$  (誘電率)が高いほど影響も大きいことがわかります。

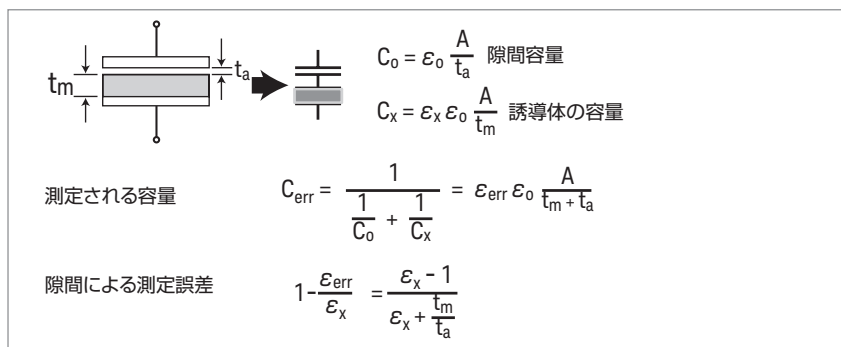


図5. 空気層の効果

表2. 空気層から生じる測定誤差

$t_a / t_m$	2	5	10	20	50	100
0.001	0.1 %	0.4 %	1 %	2 %	5 %	9 %
0.005	0.5 %	2 %	4 %	9 %	20 %	33 %
0.01	1 %	4 %	8 %	16 %	33 %	50 %
0.05	5 %	16 %	30 %	48 %	70 %	83 %
0.1	8 %	27 %	45 %	63 %	82 %	90 %

この空気層の影響を排除するには誘電材料の表面に薄膜電極を形成します。

材料を準備して薄膜電極を形成する作業が必要になりますが、最も正確な測定を実行できます。

電極非接触法

この方法は電極接触法の利点を活かし、欠点を改善した方法です。この方法では、薄膜電極を使用せずに空気層の影響を解消できます。MUTを入れた場合と入れない場合の2回の容量測定の結果から誘電率を求めます(図6)。

理論的には電極の間隔(tg)をMUTの厚さ(tm)よりもわずかに大きくする必要があります。つまり、空気層(tg-tm)はMUTの厚さ(tm)に比べて非常に小さい値でなければいけません。測定を正しく実行するにはこの要件が満たされる必要があります。2回の容量測定を実行しその結果から誘電率を計算します。計算式を右に示します。

- C<sub>s1</sub> :     MUTを挿入しない状態の容量 [F]
- C<sub>s2</sub> :     MUTを挿入した状態の容量 [F]
- D<sub>1</sub> :     MUTを挿入しない状態の損失係数
- D<sub>2</sub> :     MUTを挿入した状態の損失係数
- t<sub>g</sub> :     主電極／ガード電極と対電極の間隔 [m]
- t<sub>m</sub> :     MUTの平均の厚さ [m]

式：

$$\epsilon_r' = \frac{1}{1 - \left(1 - \frac{C_{s1}}{C_{s2}}\right) \times \frac{t_g}{t_m}}$$
$$\tan \delta = D_2 + \epsilon_r' \times (D_2 - D_1) \times \left(\frac{t_g}{t_m} - 1\right) \quad (\delta \ll 1)$$

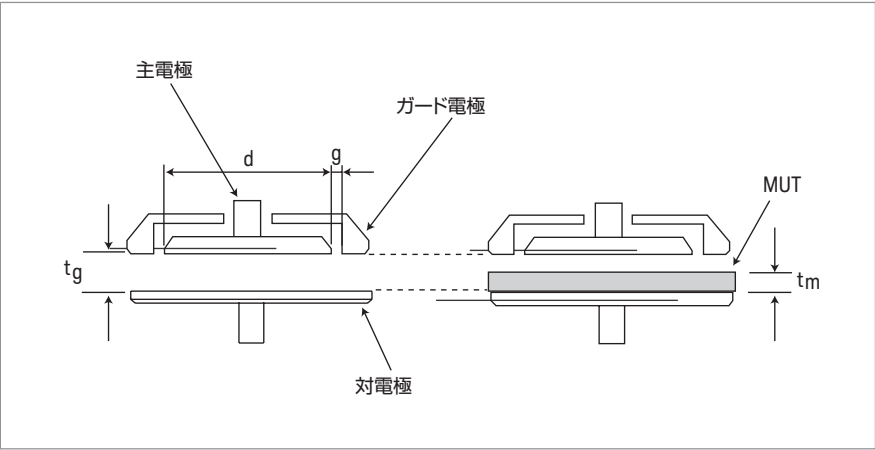


図6. 電極非接触法

表3. 平行板測定法の比較			
方法	電極接触 (薄膜電極なし)	非接触電極	電極接触 (薄膜電極あり)
確度	低	中	高
適合するMUT	表面が平らで滑らかな固体材料	表面が平らで滑らかな固体材料	薄膜電極の形成が必要
操作	1回の測定	2回の測定	1回の測定

## 2.3. 誘電率測定システム

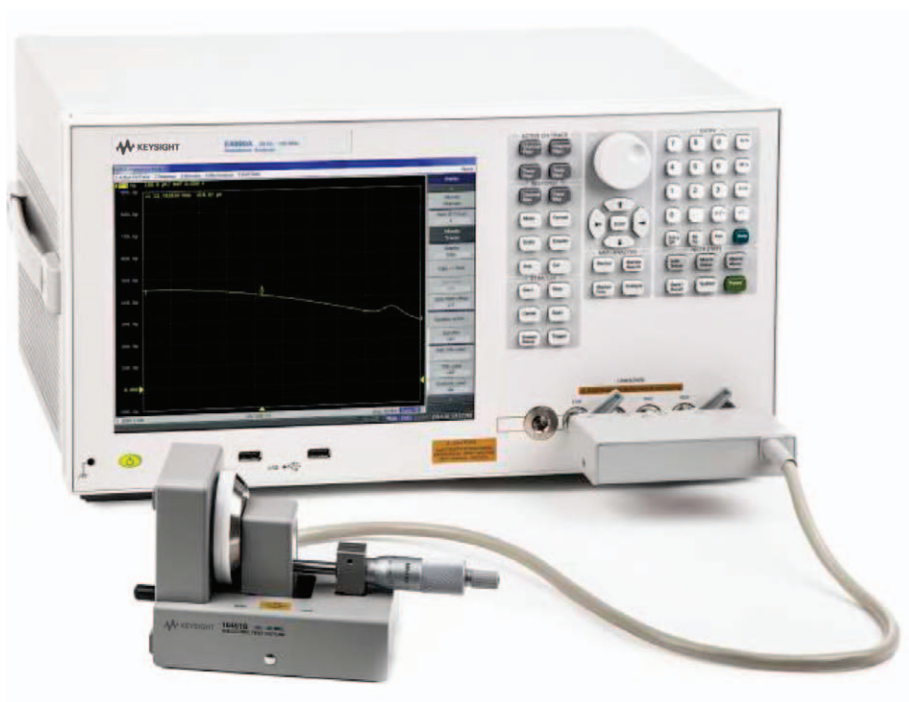
ここでは、平行板法を使用する2つの測定システムについて説明します。1つめは16451B誘電体テストフィクスチャで、30 MHzまでの固体材料の測定が可能です。2つめは16453A誘電材料テストフィクスチャで、1 GHzまでの固体材料の測定が可能です。このアプリケーションノートでは測定システムの詳細を以下の項目に従って記述します。

- 1) 主な利点
- 2) 適合するMUT
- 3) 構造
- 4) 主な仕様
- 5) 操作方法
- 6) 注意事項
- 7) サンプル測定

## 2.4. 16451B誘電体テストフィクスチャを使用した測定システム

### 2.4.1. 主な利点

- ・ 30 MHzまでの周波数レンジで高精度測定が可能
- ・ 電極接触法と電極非接触法、さまざまなMUTサイズに対応できる4種類の電極(A～D)
- ・ エッジ容量の影響を排除するためのガード電極
- ・ アタッチメントによる容易なOPEN/SHORT補正
- ・ 4端子対構成のインピーダンス測定器で使用可能



対応測定器：E4990A、4294A、4285A、E4980A、4263B、4268A、4288A、E4981A



2.4.2. 適合するMUT

適合する誘電材料は表面が滑らかで厚さが一定の固体材料です。測定可能な誘電材料のサイズは測定方法と使用する電極のタイプによって決まります。電極Aと電極Bは薄膜電極を形成しない電極接触法で用いられます。電極Cと電極Dは薄膜電極を形成する電極接触法で用いられます。電極非接触法には電極Aと電極Bを使用します。この方法では誘電材料を数mmの厚さに処理することをお勧めします。

電極Aと電極B、電極Cと電極Dは直径が異なります。電極Aと電極Cは大きいサイズのMUTに、電極Bと電極Dは小さいサイズのMUTに使用します。各電極に適合するMUTサイズを表4と表5に示します。各電極の寸法は図7～図10に示すとおりです。

表4. 電極Aと電極Bに適合するMUTサイズ			
電極タイプ	材料の直径	材料の厚さ	電極の直径
A	40 mm ～ 56 mm	t ≤ 10 mm	38 mm
B	10 mm ～ 56 mm	t ≤ 10 mm	5 mm

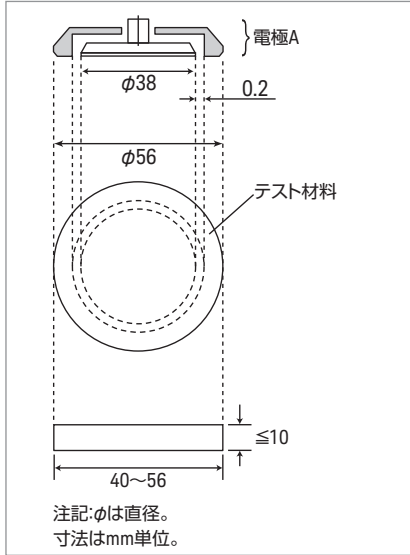


図7. 電極Aの寸法

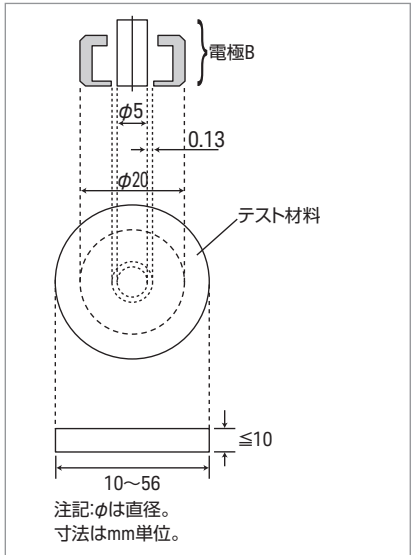


図8. 電極Bの寸法

表5. 電極Cと電極Dに適合するMUTサイズ			
電極タイプ	材料の直径	材料の厚さ	電極の直径*
C	56 mm	t ≤ 10 mm	5 ～ 50 mm
D	20 mm ～ 56 mm	t ≤ 10 mm	5 ～ 14 mm

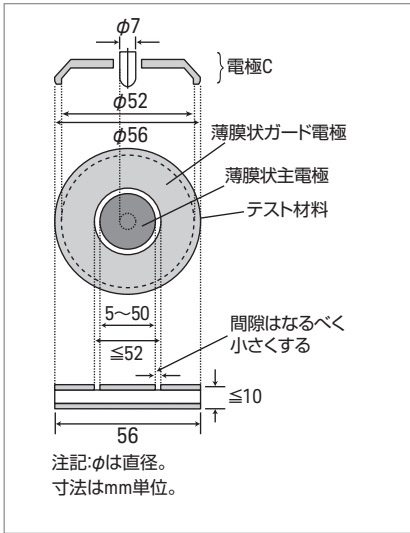


図9. 電極Cの寸法

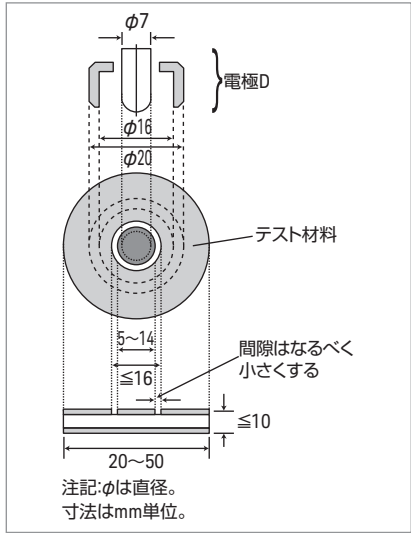


図10. 電極Dの寸法

### 2.4.3. 構造

エッジ容量から生じる測定誤差を除去するために3端子構成(ガード端子を含む)を使用します。16451Bの構造を図11に示します。

16451Bの電極は以下から構成されています。

1. 対電極：測定器のHigh端子に接続
2. 主電極：測定器のLow端子に接続
3. ガード電極：測定器のガード端子 (BNCコネクタの外皮)に接続

主電極の周囲のガード電極が電極端部の電界を吸収して、正確な誘電率測定を実現します。

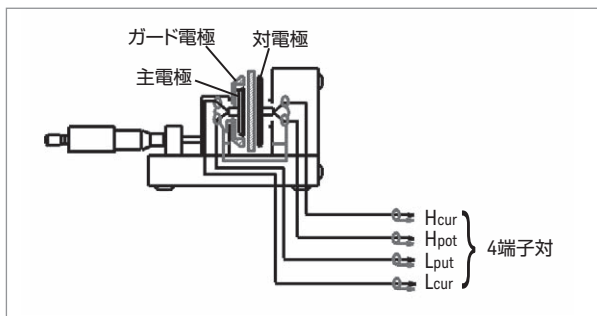


図11. 16451Bの構造

### 2.4.4. 主な仕様

表6. 16451Bの主な仕様

周波数	≤ 30 MHz
最大電圧	± 42 V
動作温度	0 °C ~ 55 °C
端子構成	4端子対、BNC
ケーブル長	1 m
補正	OPEN/SHORT*

表6に主な仕様を、図12と13にKeysight 4294Aを使用した場合の測定精度を示します。測定精度に関する詳細は『インピーダンス測定アクセサリ・ガイド』（カタログ番号5965-4792JA）をご参照ください。

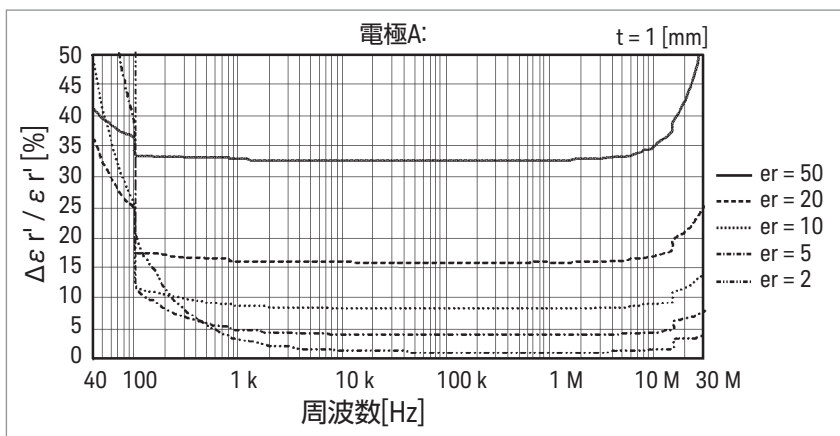


図12. 誘電率測定精度(補足データ)

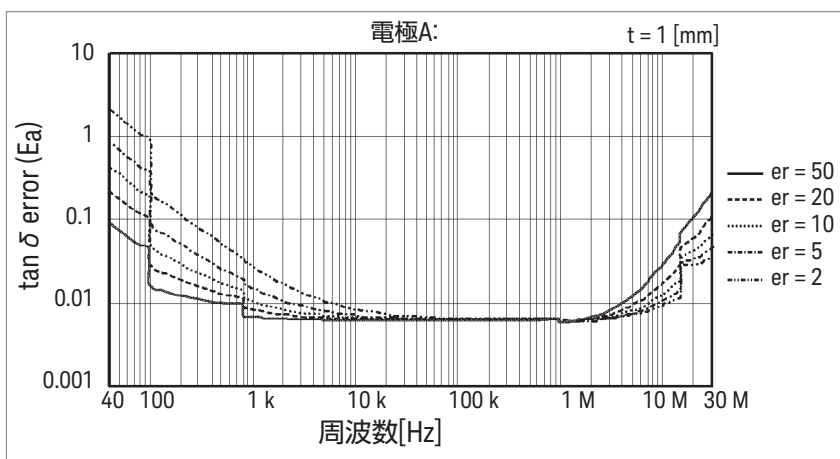


図13. 誘電正接測定精度(補足データ)

\* 4285Aまたは4294Aを5 MHz以上で使用する場合はOPEN/SHORT補正に加えてLOAD補正も実行する必要があります。詳細についてはセクション2.4.5「操作方法」を参照してください。

### 2.4.5. 操作方法

図14に16451Bを用いて誘電率測定を行う場合のフローチャートを示します。フローチャートの各ステップを以下で説明します。

ステップ1. 誘電材料の準備：MUTを適切なサイズに加工します。図7～図10を参考にしてください。薄膜電極による電極接触法を使用する場合は、薄膜電極をMUT表面に形成します。

ステップ2. 使用電極の装着：適切な電極を選択し16451Bに装着します。

ステップ3. 16451Bの接続：測定器のUNKNOWN端子に16451Bを接続します。

ステップ4. ケーブル長補正：測定器のケーブル長補正機能を1 mに設定します。設定手順については、測定器の操作マニュアルを参照してください。

ステップ5. 平行度調整のための補正：付属のアタッチメントを使用して指定された周波数でOPEN/SHORT補正を実行します。これは主電極と対電極の平行度を調整する前に実行する必要があります。

ステップ6. 平行度の調整：測定性能の向上のために主電極と対電極を互いに平行に調整するメカニズムが用意されています。この調整を行うことにより、電極接触法では空気層を最小に、電極非接触法では空気層の厚さを均一にできます。調整手順は16451Bの操作マニュアルに記載されています。

ステップ7. 測定条件の設定：周波数やテスト電圧レベルなどの測定条件を測定器に設定します。設定手順については測定器の操作マニュアルを参照してください。

ステップ8. 16451Bの残留インピーダンスの補正：付属のアタッチメントを使用して、ステップ7で設定した測定条件でOPEN/SHORT補正を実行します。

Keysight 4285Aまたは4294Aを5 MHz以上で使用する場合は、LORD補正も実行する必要があります。これは、高周波測定ではOPEN/SHORT補正で除去できない残留インピーダンスが無視できなくなるためです。

16451Bの周波数応答を補正するために、100 kHzでの測定値を基準値として高周波でLORD補正を実行します。電極間に何も挿入しない空気層によって形成される空気コンデンサを16451BのLOADデバイスとして使用します。表7は推奨容量値で、電極間の空気層の高さを調整して得られます。空気コンデンサは周波数依存性も損失もなく、フラットな応答を示すと仮定されています。G(損失係数)は0と仮定されているため100 kHzの容量値(Cp)のみをLORD補正に使用します。

ステップ9. MUTの挿入：電極の間にMUTを挿入します。

ステップ10. Cp-D測定：容量(Cp)と損失係数(D)を測定します。電極非接触法を使用する場合は、MUTがある状態とない状態で、2回、Cp-D測定を実行します。

ステップ11. 誘電率の算出：セクション2.2で説明した適切な式を使用して誘電率を計算します。

4294Aを測定器として使用する場合は、上記の手順を実行するサンプルIBASICプログラムが付属しています。サンプルプログラムは4294Aの操作マニュアルに付属するフロッピーディスクに収録されています。

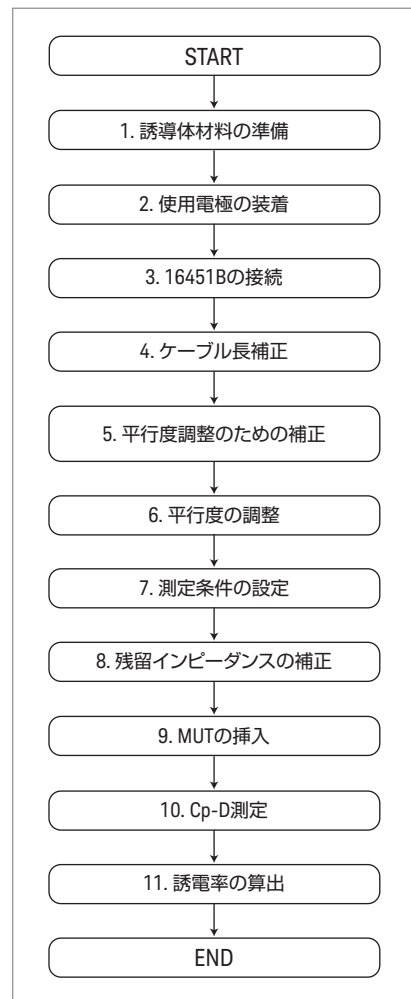


図14. 16451Bによる測定手順のフローチャート

表7. ロード値	
電極	推奨容量*
A	50 pF ± 0.5 pF
B	5 pF ± 0.05 pF
C, D	1.5 pF ± 0.05 pF

\* 100 kHzでのCpの実測値

## 2.4.6. 注意事項

前述のように、MUTと電極の間に生じる空気層の影響を減らすには、薄膜電極による電極接触法を使用するのが実用的です(セクション2.2を参照)。16451Bには、この方法に使用する電極Cと電極Dが付属しています。

被試験材料が圧力によって変形する場合は厚さを一定にできないため、電極接触法には適しません。電極非接触法を使用する必要があります。

電極非接触法を使用する場合は、電極の間隔 $t_g$ は広くてもMUTの厚さの10 %増しにおさえる必要があります。薄膜材料の場合、電極の間隔を材料の厚さの10 %にするのは非常に困難なので、厚さが数ミリメートル以上の材料にのみこの方法をお勧めします。

16451Bのマイクロメータは電極非接触法において正確な間隙を作るために設けられています。しかし、このマイクロメータのスケールはガード電極と対電極が平行なことが前提で、電極接触法ではMUTの厚さを正確に測定できません。MUTの厚さの測定には別のマイクロメータを使用することをお勧めします。

## 2.4.7. サンプル測定

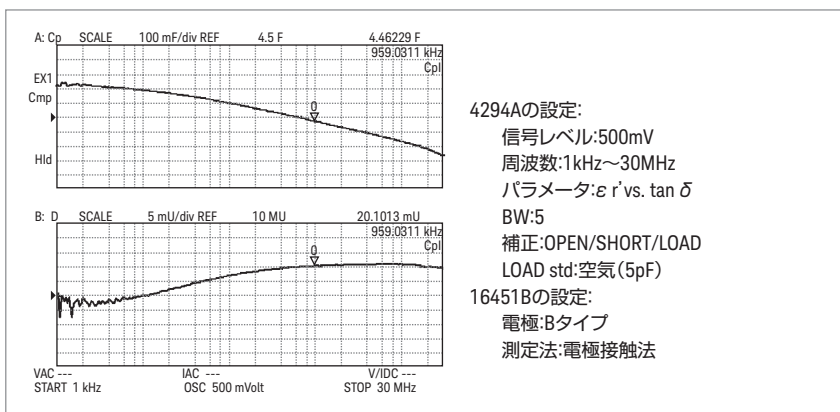


図15. プリント回路基板の周波数応答

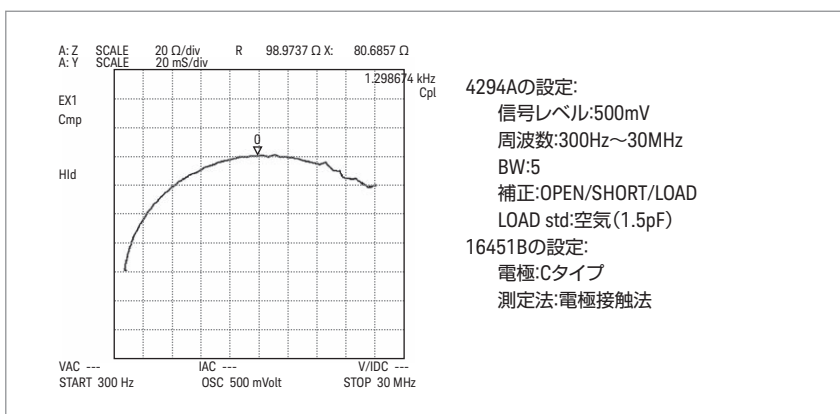


図16. セラミック材料のCole-Coleプロット

## 2.5. 16453A誘電材料 テストフィクスチャを 使用した測定システム

### 2.5.1. 主な利点

- ・ E4991A/Bを使用した1 MHz～1 GHzの広い周波数レンジ
- ・ E4991A/Bのオプション002(材料測定ソフトウェア)内蔵ファームウェアによるエッジ容量効果の解消
- ・ OPEN/SHORT/LOAD補正
- ・ E4991A/Bのオプション002(材料測定ソフトウェア)内蔵ファームウェアによる複素誘電率の表示
- ・  $-55^{\circ}\text{C}$ ～ $+150^{\circ}\text{C}$ の温度特性測定 (E4991A/Bオプション002およびオプション007使用時)



対応測定器：E4991A/B(オプション002付き)

### 2.5.2. 適合するMUT

適合する誘電材料は表面が滑らかで厚さが一定の固体材料です。適合するMUTサイズを図17に示します。

### 2.5.3. 構造

16453Aの構造を図18に示します。上部電極にはばねが内蔵されていてMUTを電極間に固定する役割を果たします。ばねの圧力も調整できます。

16451Bと異なり、16453Aにはガード電極は装備されていません。これは、高周波ではガード電極は残留インピーダンスを増やし、周波数特性を悪化させるだけだからです。エッジ容量の影響を軽減するために、E4991A/Bオプション002(材料測定)ファームウェアではシミュレーション結果に基づく補正機能を使用できます。

また、測定誤差の最大の原因である残留インピーダンスはOPEN/SHORT補正では完全には除去できないため、LOAD補正用にPTFEが付属しています。

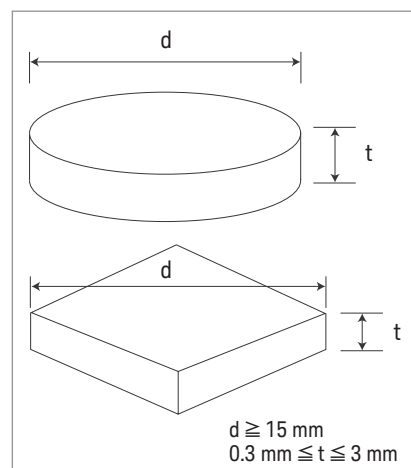


図17. 適合するMUTサイズ

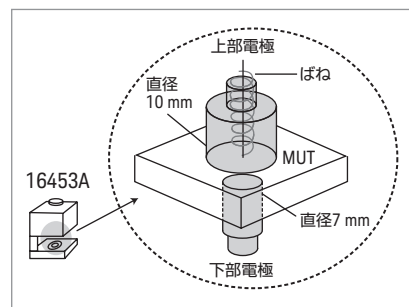


図18. 16453Aの構造



- ・ 温度応答評価のためには、E4991A/Bオプション007温度特性テストキットが必要です。オプション007には、高精度を維持するための耐熱ケーブルと、恒温槽制御およびデータ解析のためのプログラムが付属しています。

### 2.5.4. 主な仕様

表8. 16453Aの主な仕様

周波数	1 MHz ~ 1 GHz
最大電圧	±42 V
動作温度	-55 °C ~ +150 °C *
端子構成	7 mm
補正	OPEN/SHORT/LOAD

\* オプションE4991A-002およびE4991A-007を装備したE4991Aで実行する必要があります。

主な仕様を表8に示します。図19と図20にE4991Aを使用した場合の測定精度を示します。測定精度の詳細は測定器に付属する操作マニュアルに記載されています。

### 2.5.5. 操作方法

図21に16453AとE4991A/Bを用いて誘電率測定を行う場合のフローチャートを示します。フローチャートの各ステップを以下で説明します。詳細については『E4991Aインストール／クイックスタートガイド』を参照してください。



図21. 16453Aによる測定手順のフローチャート

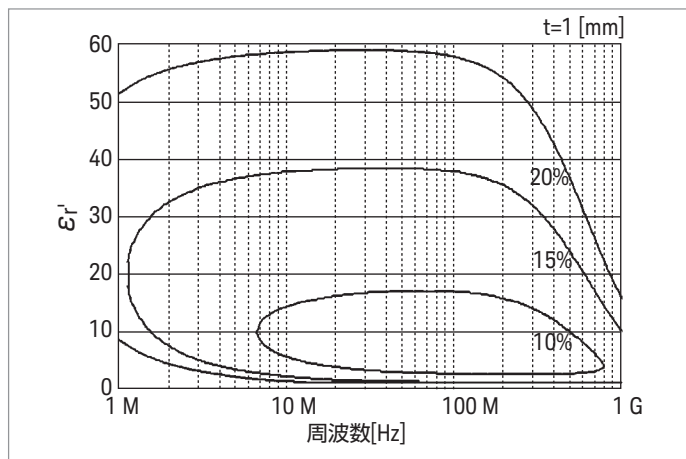


図19. 誘電率測定の精度(補足データ)

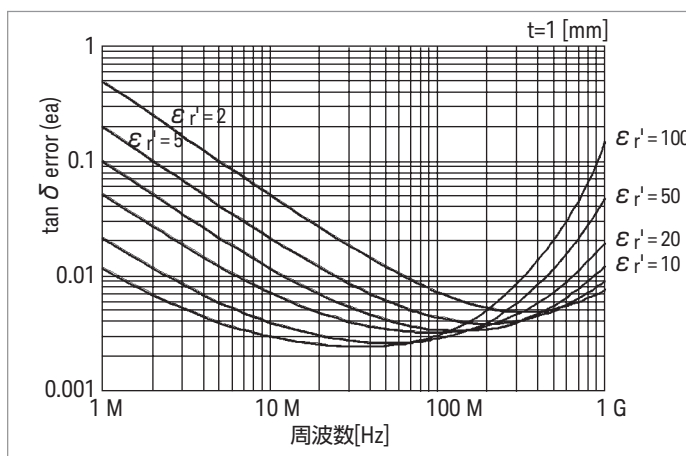


図20. 誘電正接測定の精度(補足データ)

ステップ1. 測定モードの選択：E4991AのUtilityメニューで誘電率測定を選択します。

ステップ2. MUTの厚さの入力：MUTの厚さをE4991Aに入力します。厚さはマイクロメータで測定します。

ステップ3. E4991Aの測定条件の設定：周波数、テスト電圧レベル、測定パラメータなどの測定条件を測定器に設定します。

ステップ4. 16453Aの接続：E4991Aの7 mm端子に16453Aを接続します。

ステップ5. ロードの厚さの入力：補正の前に、付属のロード(PTFEボード)の厚さをE4991Aに入力します。

ステップ6. 測定面の校正：OPEN/SHORT/LOAD校正を実行します。

ステップ7. MUTの挿入：電極の間にMUTを挿入します。

ステップ8. MUTの測定：測定結果がディスプレイに表示されます。マーカ機能を使用してデータを解析できます。



## 2.5.6. 注意事項

前の測定システムと同様に、MUTと電極の間に生じる空気層が測定誤差の最大の原因になります。材料が薄いほど、誘電率が高いほどこの影響を受けやすくなります。表面が粗い材料(図22)も空気層の影響を受ける可能性があります。

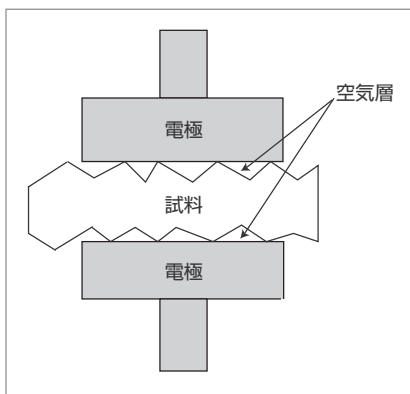


図22. 表面が粗い誘電材料

MUTと電極との間に生じる空気層をなくすために薄膜電極を誘電材料の表面に形成する手法があります。この手法を図23と図24に示します。16453Aに正確にフィットする形状とサイズの電極を、導電性の高い銀ペーストまたは銀焼き付けにより誘電材料表面に形成します。MUTは図23のような形状にし、これに誘電材料よりも薄い薄膜電極を形成します。この場合、16453Aの電極と精密に接触させるためにMUT上の薄膜電極の正確な位置決めがきわめて重要です(図24)。このプロセスにより正確で信頼性の高い測定が実現できます。

さらに、厚さが100  $\mu\text{m}$ 程度の非常に薄いMUTを測定する場合は、3枚～4枚のMUTを重ねて測定して空気層を減らすことにより測定精度を向上させる方法があります。ただし、MUTの表面が滑らかで圧力により変形しないことが前提です。

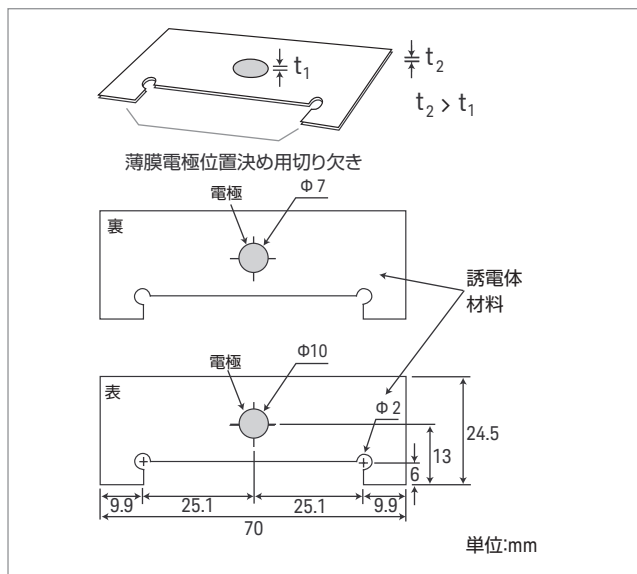


図23. 形成する薄膜電極の形状

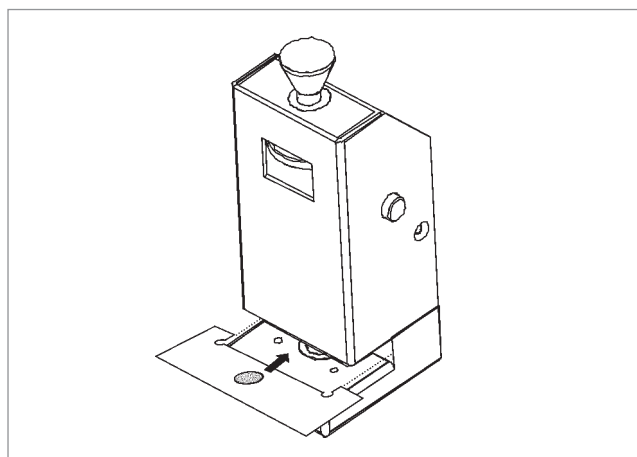


図24. MUT上の薄膜電極の位置決め

もう1つ注意すべき点として上部電極のばね圧力の調整メカニズムがあります。MUTと電極の間の空気層を最小化するためにはばねの圧力をできるだけ大きくすることをお勧めしますが、圧力が大きすぎてMUTが変形すると厚さが変化するため正しい測定が行えません。安定した測定を実現するにはMUTが変形しないレベルにばねの圧力を設定する必要があります。

## 2.5.7. サンプル測定

図25にE4991Aと16453Aを使用したBT樹脂の周波数特性の測定結果を示します。

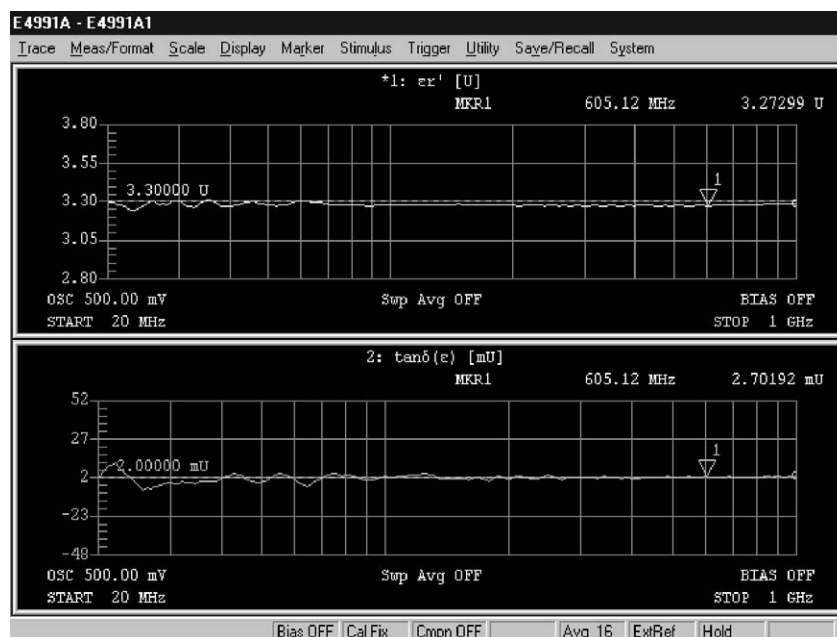


図25. BT樹脂の周波数応答



### 3. 透磁率の評価

#### 3.1. 透磁率の定義

透磁率は材料と磁界の相互作用を表し、誘導磁場Bと印加磁界Hの比で表されます。複素比透磁率( $\mu^*$ )はエネルギー蓄積量を表す実数部( $\mu'$ )とエネルギー損失量を表す虚数部( $\mu''$ )から構成されます。これはまた、図26に示すように、真空の透磁率( $\mu_0$ )と複素透磁率( $\mu^*$ )との比として表すこともできます。

磁性材料の損失の度合いは損失係数 $\tan \delta$ で表されます。 $\tan \delta$ は、( $\mu''$ )と( $\mu'$ )の比です。技術文献では「複素比透磁率」のことを単に「透磁率」と呼びます。このアプリケーションノートでは「透磁率」という用語を複素比透磁率の意味で使用します。

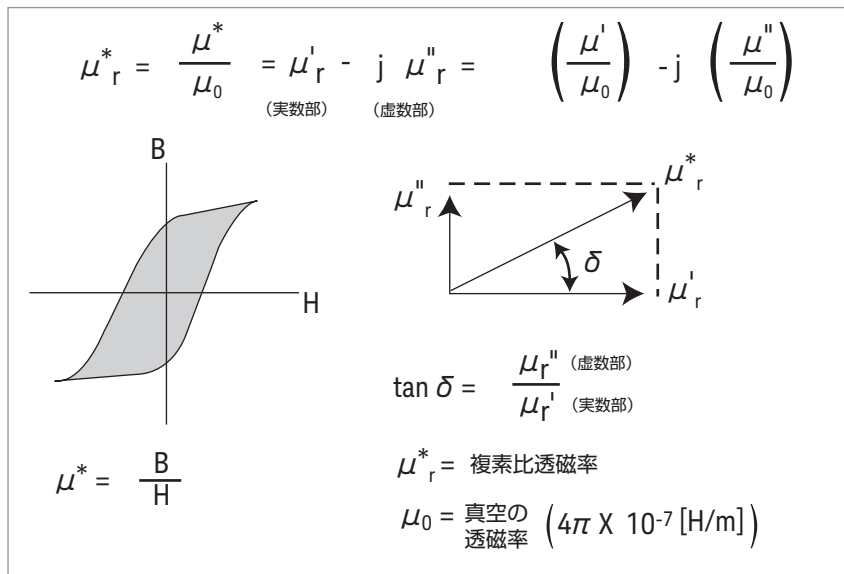


図26. 複素透磁率( $\mu^*$ )の定義

#### 3.2. インダクタンス測定法

一般に、トロイダルなど閉磁路磁芯コイルの自己インダクタンスから求められる比透磁率は実効透磁率と呼ばれます。従来の実効透磁率の測定では、コアにワイヤを巻き付けてその両端のインダクタンス値を評価します。このタイプの測定は通常、インピーダンス測定器を用いて行われます。実効透磁率はインダクタンスの測定結果から以下の式で算出されます。

$$\mu'_e = \frac{\ell L_{eff}}{\mu_0 N^2 A}$$

$$\mu''_e = \frac{\ell (R_{eff} - R_w)}{\mu_0 N^2 \omega A}$$

- $R_{eff}$  : 巻線抵抗を含む磁芯損失の等価抵抗
- $L_{eff}$  : トロイダルコイルのインダクタンス
- $R_w$  : 巻線の抵抗
- $L_w$  : 空芯コイルのインダクタンス
- $N$  : 巻き数
- $\ell$  : トロイダルコアの平均磁路長 [m]
- $A$  : トロイダルコアの断面積 [ $\text{m}^2$ ]
- $\omega$  :  $2\pi f$  (周波数)
- $\mu_0$  :  $4\pi \times 10^{-7} \text{ [H/m]}$

印加する磁界と測定を行うヒステリシス曲線の位置によって、透磁率は初透磁率や最大透磁率といった種類に分けられます。磁性材料を扱う産業アプリケーションでは低いパワーレベルを使用することが多いため、一般的にメーカーで使用されているのは初透磁率です。\*

このアプリケーションノートではインダクタンス測定法で得られる実効透磁率と初透磁率を主に扱います。

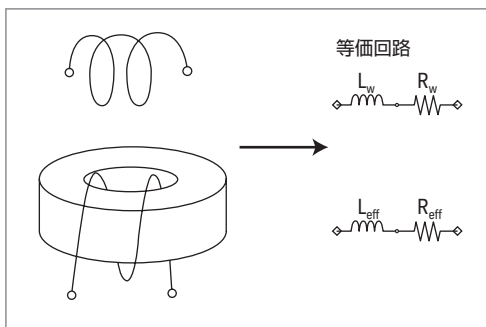


図27. 実効透磁率の測定方法

\* メーカーによっては、高いパワーレベルで使用される磁性材料にも初透磁率を使用することがあります。

### 3.3. 透磁率測定システム

次のセクションでは16454A磁性材料テストフィクスチャを使用した透磁率測定システムを紹介します。

### 3.4. 16454A磁性材料テストフィクスチャを使用した測定システム

#### 3.4.1. 主な利点

- ・ 1 kHz ～ 1 GHzの広い周波数レンジ
- ・ トロイドにワイヤを巻き付ける必要がない簡単な測定
- ・ MUTサイズに応じて2種類の異なるフィクスチャセンブリを提供
- ・ E4991A/B(オプション002材料測定ソフトウェア)または4294A(IBASICプログラム)による複素透磁率の表示
- ・ -55 °C ～ +150 °Cの温度特性測定が可能(E4991A/Bオプション002および007使用時)

対応測定器：E4991A/B(オプション002)\*、4294A/E4990A+42942A

#### 3.4.2. 適合するMUT

適合する磁性材料はトロイダルコア形状のものだけです。適合するMUTサイズを図28に示します。

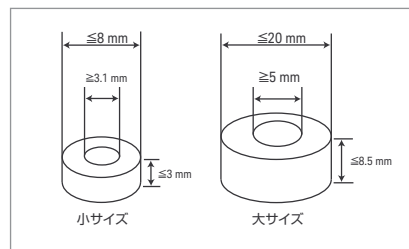


図28. 適合するMUTサイズ

#### 3.4.3. 構造

16454Aの構造と測定の概念を図29に示します。トロイダルコアを16454Aに挿入すると、磁束漏れのない理想的な構造の1回巻きのインダクタが形成されます。透磁率はトロイダルコアとフィクスチャのインダクタンスから算出されます。



\* 温度応答評価には、E4991A/Bオプション007が必要です。オプション007には、高精度を維持するための耐熱ケーブルと恒温槽制御およびデータ解析のためのプログラムが付属しています。4294Aには高温テストヘッドはありません。

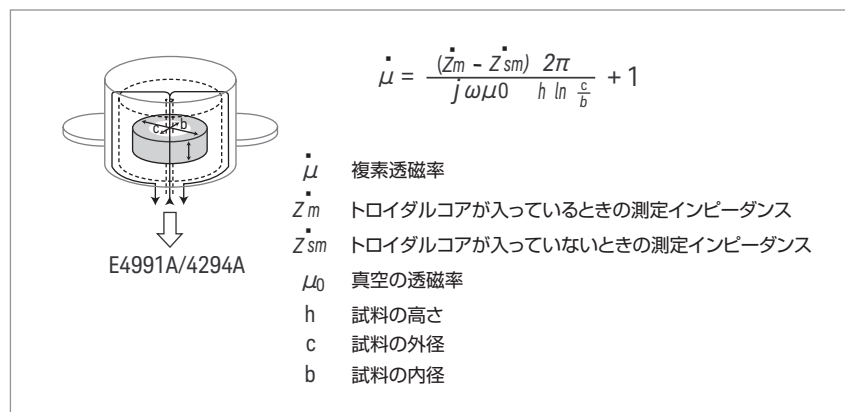


図29. 16454Aの構造と測定の概念

3.4.4. 主な仕様

表9. 16454Aの主な仕様	
周波数	1 kHz ～ 1 GHz
最大DCバイアス電流	±500 mA
動作温度	−55 °C ～ +150 °C
端子構成	7 mm
補正	SHORT

16454Aの主な仕様を上表9に示します。  
図30と 図31にE4991Aまたは4294Aを使用した場合の測定精度を示します。

3.4.5. 操作方法

図32に16454Aを用いて透磁率測定を行う場合のフローチャートを示します。フローチャートの各ステップを以下で説明します。

ステップ1. 測定器の校正：E4991A/Bを使用する場合は7 mm端子で校正を行います。E4990A/4294Aを使用する場合は、42942Aの7 mm端子でSETUPを実行します。

ステップ2. 16454Aの接続：測定器の7 mm端子に16454Aを接続します。E4991A/Bを使用する場合は透磁率測定モードを選択します。

ステップ3. 16454Aの残留インピーダンスの補正：MUTホルダだけを挿入しSHORT補正を実行します。

ステップ4. MUTのサイズの入力：MUTのサイズを測定器のメニューに入力します。サイズはマイクロメータで測定します。

ステップ5. MUTの挿入：MUTをホルダとともに16454Aに挿入します。

ステップ6. 測定条件の設定：周波数、テスト信号レベル、測定パラメータなどの測定条件を測定器に設定します。

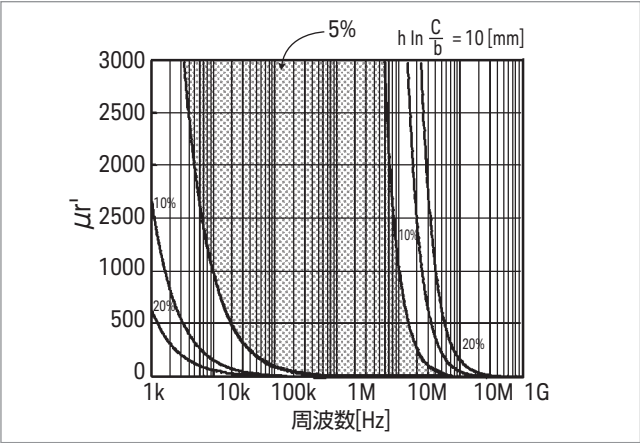


図30. 透磁率測定精度(補足データ)

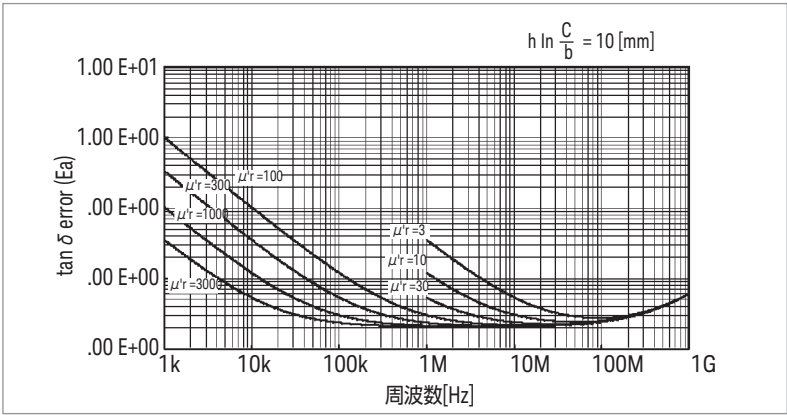


図31. 誘電正接測定精度(補足データ)

ステップ7. MUTの測定：測定結果がディスプレイに表示されます。マーカ機能を使用してデータを解析できます。

4294Aを16454Aとともに使用する場合は、上記の手順を実行するサンプルIBASICプログラムが4294Aの操作マニュアルに付属するフロッピーディスクに収録されています。E4991A/B（オプション002）を使用する場合は、内蔵ファームウェアに材料測定機能が標準装備されています。詳細についてはE4991A/Bの『操作マニュアル』を参照してください。



図32. 16454Aによる測定手順のフローチャート

### 3.4.6. 注意事項

誘電率が高い(10前後あるいはそれ以上)磁性材料を測定する場合は1 GHz近くの高い周波数では正確な測定を実行できません。透磁率はMUTとフィクスチャを合成したインダクタンス値から算出されますが、測定されたインピーダンスにはインダクタンスの他にわずかな容量が含まれます。磁性材料の誘電率が高い場合は、MUTとフィクスチャの間の空間を通じて電流が流れ、インダクタ(MUT)と並列なキャパシタが等価的に形成されます。このLC並列回路により特定の周波数でインピーダンス共振が生じます。誘電率が高いほど共振周波数は低くなり正確な測定が困難になります。

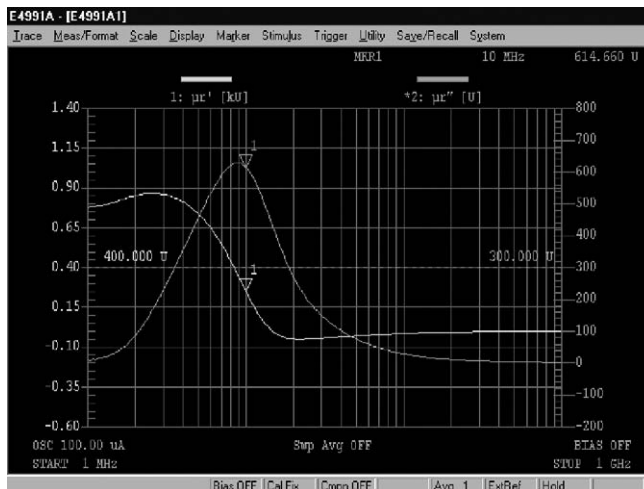


図33. MnZnフェライトコアの周波数応答

### 3.4.7. サンプル測定

図33はE4991Aと16454Aを用いたMnZnフェライトコアの周波数特性の結果です。

4294Aと16454Aを用いて低周波で測定したMnZnフェライトの周波数特性は図34に示します。

## 4. まとめ

このアプリケーションノートではインピーダンス測定法を使用した誘電率と透磁率の測定手法について説明しました。

テストフィクスチャの構造、適合するMUTサイズ、操作方法、注意事項についてもそれぞれ解説しました。測定のニーズと条件に最適な測定ソリューションを選択するためにこのアプリケーションノートをご参照ください。

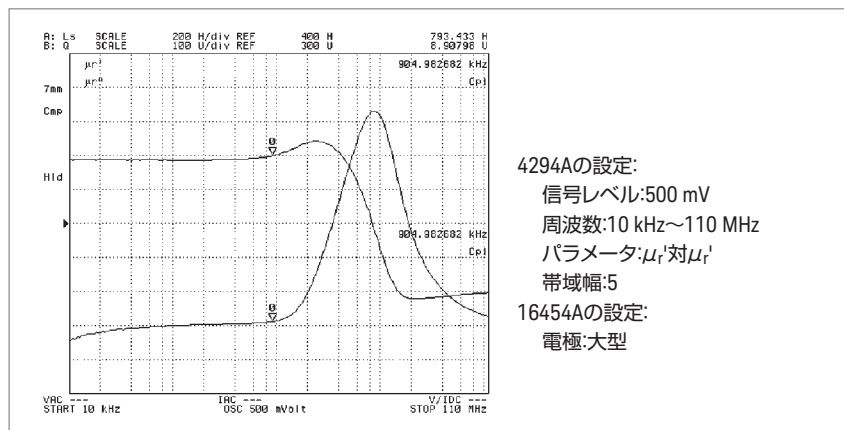


図34. MnZnフェライトコアの低周波応答

4294Aの設定:  
 信号レベル:500 mV  
 周波数:10 kHz~110 MHz  
 パラメータ: $\mu_r'$ 対 $\mu_r''$   
 帯域幅:5  
 16454Aの設定:  
 電極:大型

付録

A. 液体の誘電率の評価

誘電率測定は液体の特性の評価に用いられることがあります。誘電率測定は液体の物理的性質を変えず実行が比較的容易で時間もかからないため、さまざまな研究分野に用いられています。ここでは、液体を対象とした誘電率測定システムとして平行板法を使用する16452A液体テストフィクスチャを紹介します。

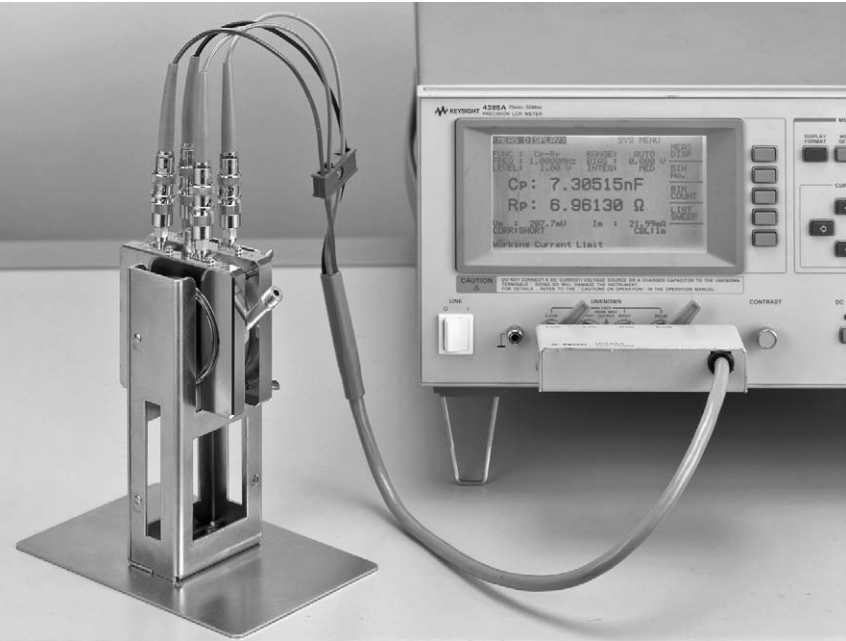
A.1. 16452A液体テストフィクスチャを使用した測定システム

A.1.1. 主な利点

- ・ 20 Hz ～ 30 MHzの広い周波数レンジ
- ・ プラスティック樹脂、油性化学物質などを測定可能
- ・ 少量のテスト液体で測定が可能なので、MUTを無駄に消費しない
- ・ -20 °C～+125 °Cの温度特性測定が可能
- ・ 4端子構成のインピーダンス測定器で使用可能

A.1.2. 適合するMUT

サンプル液体の容量は使用するスペーサによって異なります。スペーサは電極間の間隙を調整するものですが、空気容量も変更できます。表13に使用可能なスペーサと対応するサンプル液体容量を示します。



対応測定器：E4990A、4294A、4284A、E4980A

表13. スペーサと液体容量の関係				
サンプル液体容量	3.4 ml	3.8 ml	4.8 ml	6.8 ml
空気容量(液体が存在しない場合)	34.9 pF ±25 %	21.2 pF ±15 %	10.9 pF ±10 %	5.5 pF ±10 %
スペーサ厚さ	1.3 mm	1.5 mm	2 mm	3 mm

A.1.3. 構造

16452Aの構造を図40に示します。3つの液体注入口があり、注入、排出が簡単にできます。また、フィクスチャは容易に分解できるので電極の洗浄も簡単です。電極、スペーサ、液体注入口／排出口にはニッケル、Oリングにはフッ素ゴムが使用されています。

測定器への接続には1 mのケーブルが必要です。使用できるケーブルを表14に示します。

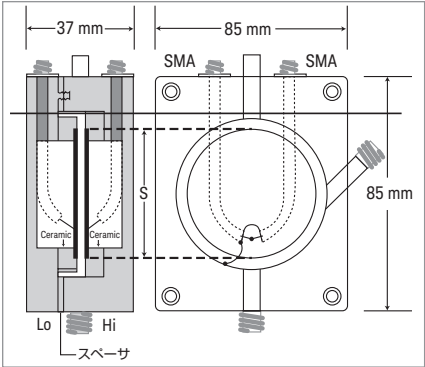


図40. 16452Aの構造

表14. 16452A用の1 mケーブル	
温度	パーツ番号
0 °C～55 °C	16048A
-20 °C～125 °C	16452-61601
-20 °C～125 °C	16048G (4294Aのみ)

A.1.4. 主な仕様

表15. 16452Aの主な仕様	
周波数	20 Hz ～ 30 MHz
最大電圧	±42 V
動作温度	−20 ℃～125 ℃
端子構成	4端子対、SMA
補正	SHORT

16452Aの主な仕様を表15に示します。  
測定誤差は以下の式で計算できます。

測定誤差 = A + B + C [%]

- 誤差A：表16を参照
- 誤差B： $\epsilon' = 1$ の場合。図41を参照
- 誤差C：測定器の誤差

表16. 誤差A	
スペーサ厚さ (mm)	B (%)
1.3	0.005 × MRP
1.5	0.006 × MRP
2.0	0.008 × MRP
3.0	0.020 × MRP

M.R.P.はMeasurement Relative Permittivity(実測比誘電率)

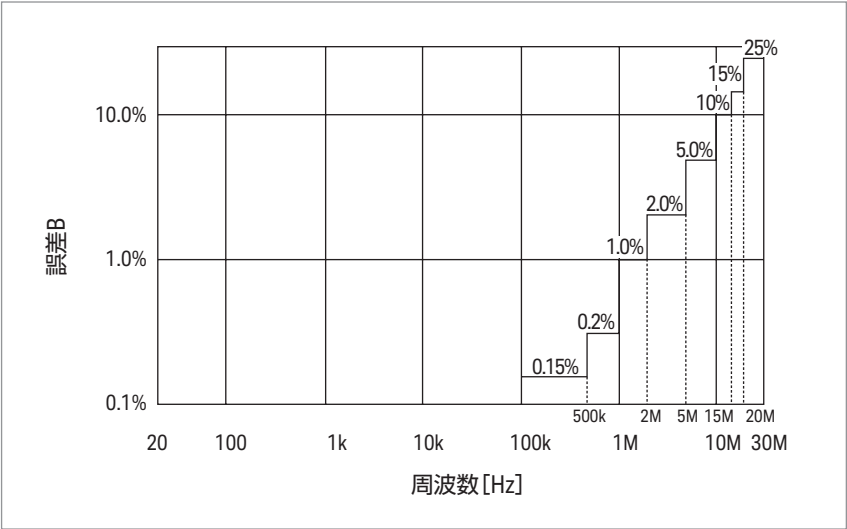


図41. 相対測定精度(補足データ)



### A.1.5. 操作方法

図42に16452Aを用いて液体の誘電率測定を行う場合のフローチャートを示します。フローチャートの各ステップを以下で説明します。

ステップ1. 16452Aのアセンブリとショートプレートの挿入：High電極とLow電極を取り付けながらショートプレートをその間に挿入します。次に、フィクスチャの端子にSMA-BNCアダプタを接続して液体排出口に蓋をし、16452Aを使用する準備を行います。

ステップ2. 16452Aの測定器への接続：動作温度と測定器に応じて適切な1 m ケーブルを選択します。測定器のUNKNOWN端子に16452Aを接続します。

ステップ3. ケーブル長の補正：測定器のケーブル長補正機能を1 mに設定します。設定手順については測定器の操作マニュアルを参照してください。

ステップ4. 16452Aのショート残留分のチェック：16452Aが正しくアセンブリされているかどうかを確認するため、ショートプレートを1 MHzで測定し値が決められた範囲内に収まるかどうかを確認します。この検証はSHORT補正の前に行います。詳細については16452Aに付属する『操作マニュアル』を参照してください。

ステップ5. 測定条件の設定：周波数やテスト電圧レベルなどの測定条件を測定器に設定します。測定パラメータはCp-Rpに設定する必要があります。設定手順については測定器の操作マニュアルを参照してください。

ステップ6. SHORT補正の実行：電極間にショート・プレートが挿入された状態で、SHORT補正を実行します。

ステップ7. 空気容量の測定：ショートプレートを取り除き、サンプル液体体積に応じて適切なスペーサを挿入します。電極間の空気容量がパラメータCp-Rpで測定されます。

ステップ8. 液体の注入：フィクスチャの注入口に液体を注入します。

ステップ9. 液体の測定：フィクスチャ内に液体を入れた状態でCp-Rp測定を実行します。

ステップ10. 誘電率の算出：誘電率と損失係数は次の式で計算されます。

$$\epsilon_r' = \frac{C_p}{C_0} \quad \epsilon_r'' = \frac{1}{\omega C_0 R_p}$$

C<sub>p</sub>： MUTの等価並列容量 [F]

C<sub>0</sub>： 空気の等価並列容量 [F]

R<sub>p</sub>： MUTの等価並列抵抗 [Ω]

ω： 2 π f(周波数)

ステップ11. 液体の排出：フィクスチャの排出口から液体を排出します。

### A.1.6. 注意事項

塩(Na<sup>+</sup> Cl<sup>-</sup>)やイオン溶液など、バルク伝導率を持つ液体は多くの場合測定できません。この種の液体では、電極の分極現象により容量測定を正しく実行できないためです。水などのバルク伝導率を持たない液体の低周波測定でも電極の分極は高い確率で発生します。

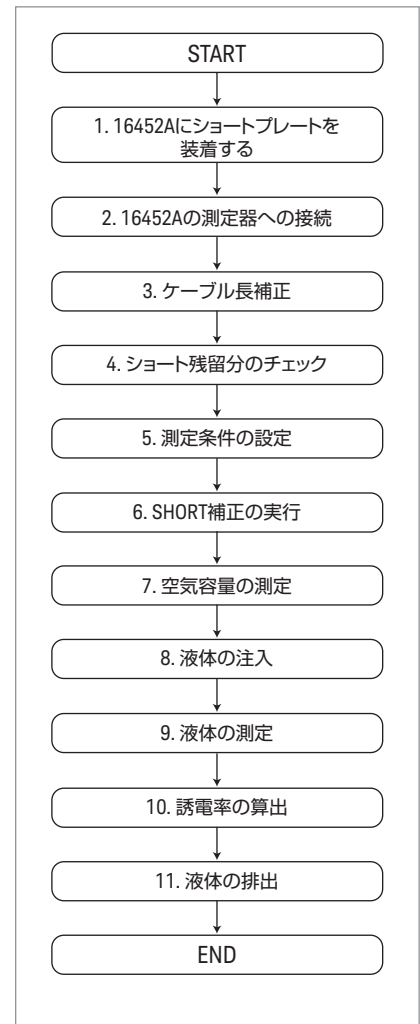


図42. 16452Aによる測定手順のフローチャート

## 参考資料

1. ASTM, 『Test methods for A-C loss characteristics and permittivity(dielectric constant)of solid electrical insulating materials』、ASTM Standard D 150、American Society for Testing and Materials
2. ASTM, 『Test methods for D-C resistance or conductance of insulating materials』、ASTM Standard D 257、American Society for Testing and Materials
3. Application Note 1297, 『Solutions for measuring permittivity and permeability』、Keysightカタログ番号5965-9430E
4. Application Note 380-1, 『Dielectric constant measurement of solid materials using the 16451B dielectric test fixture』、Keysightカタログ番号5950-2390
5. 『インピーダンス測定アクセサリ・ガイド』、Keysightカタログ番号5965-4792JA
6. 『Keysight 16451B Operation and Service Manual』、部品番号16451-90020
7. 『Keysight 16452A Operation and Service Manual』、部品番号16452-90000
8. 『Keysight 16454A Operation and Service Manual』、部品番号16454-90020



myKeysight

**myKeysight**

[www.keysight.co.jp/find/mykeysight](http://www.keysight.co.jp/find/mykeysight)  
ご使用製品の管理に必要な情報を即座に手に入れることができます。



[www.lxistandard.org](http://www.lxistandard.org)

LXIは、Webへのアクセスを可能にするイーサネットベースのテストシステム用インタフェースです。Keysightは、LXIコンソーシアムの設立メンバーです。



[www.keysight.com/quality](http://www.keysight.com/quality)

Keysight Technologies, Inc.  
DEKRA Certified ISO 9001:2008  
Quality Management System

契約販売店

[www.keysight.co.jp/find/channelpartners](http://www.keysight.co.jp/find/channelpartners)  
キーサイト契約販売店からご購入頂けます。  
お気軽にお問い合わせください。

このアプリケーションノートは以前のApplication Note 1369-1です。

## キーサイト・テクノロジー合同会社

本社 〒192-8550 東京都八王子市高倉町9-1

## 計測お客様窓口

受付時間 9:00-18:00 (土・日・祭日を除く)

TEL ☎ 0120-421-345 (042-656-7832)

FAX ☎ 0120-421-678 (042-656-7840)

Email [contact\\_japan@keysight.com](mailto:contact_japan@keysight.com)

ホームページ [www.keysight.co.jp](http://www.keysight.co.jp)

記載事項は変更になる場合があります。  
ご発注の際はご確認ください。