

インピーダンス測定の手引き
How to Measure Impedance

第01版

はじめに

インピーダンス測定器を使用する際に必要となる各種設定や注意点をまとめています。

インピーダンス測定の手引

1	精度の良い測定のために.....	4
-1	測定条件の最適化.....	4
(1)	周波数.....	4
(2)	信号レベル.....	4
(3)	測定スピード.....	5
(4)	測定レンジ.....	5
(5)	DC バイアス.....	6
-2	レベル依存性素子の測定.....	6
(1)	電圧依存性.....	6
(2)	電流依存性.....	7
-3	補正.....	8
(1)	OPEN・SHORT 補正.....	8
	OPEN 補正を行う際の注意点.....	9
	SHORT 補正を行う際の注意点.....	10
	OPEN・SHORT 補正の限界.....	10
(2)	LOAD 補正.....	11
(3)	ケーブル長補正.....	11
-4	測定端子構造.....	12
(1)	2 端子接続.....	12
(2)	4 端子接続.....	13
(3)	5 端子接続.....	13
(4)	4 端子対接続.....	14
-5	接触抵抗の影響.....	14
(1)	2 端子測定の場合の誤差例.....	15
(2)	4 端子測定の場合の誤差例.....	16
(3)	コンタクトチェック機能について.....	16
2	測定ケーブルなどを自作する場合の注意点.....	17
-1	ケーブルについて.....	17
(1)	ケーブルの選定方法.....	17
(2)	ノイズの影響を受けにくいケーブルの加工方法.....	17
(3)	先端を 2 端子構造のケーブルに加工する場合の留意点.....	18

-2	スキャナ作製について.....	19
-3	DC バイアス電圧印加回路.....	20
	(1) R_{HC} 、 C_{HC} 、 R_{HP} 、 C_{HP} について.....	20
	(2) R_B の選び方.....	21
	(3) 設計例.....	21
-4	DC バイアス電流印加回路.....	23
	(1) R_{HC} 、 C_{HC} 、 R_{HP} 、 C_{HP} について.....	23
	(2) チョークコイルについて.....	24
	(3) 接続方法の注意点.....	25
3	FAQ.....	26
-1	測定周波数はどのように決めたら良いですか?.....	26
	(1) 部品の周波数特性を見たい場合.....	26
	(2) 部品が正常か確認する場合.....	26
-2	測定信号レベルはどのように決めたら良いですか?.....	26
	(1) 部品のレベル依存性を見たい場合.....	26
	(2) 部品が正常か確認する場合.....	26
-3	測定レンジはどのように決めたら良いですか?.....	26
	(1) AUTO レンジ.....	26
	(2) HOLD レンジ.....	27
-4	測定スピード、アベレージについて教えてください。.....	27
-5	直列等価回路、並列等価回路のどちらを選択すれば良いでしょうか?.....	27
-6	測定パラメータの R_{DC} と R_s 、 R_p は違うのでしょうか?.....	28
-7	接地された DUT は測定できますか?.....	28
-8	ダイオードの端子間容量値の測定方法を教えてください。.....	29
-9	同軸ケーブルの特性インピーダンスの測定方法を教えてください。.....	29
-10	インピーダンス測定器の確度計算について教えてください。.....	30
-11	公称値通りの測定値が得られません。.....	30
-12	測定条件を揃えても、インピーダンス測定器によって測定値が異なります。.....	30
-13	交流インピーダンスと直流抵抗は同時に測定しているのですか?.....	31
-14	4 端子開放状態で測定値がばらつきます。.....	31
-15	低インピーダンス測定時に測定値のばらつきが大きい。.....	31
-16	直流抵抗の測定値がばらつきます。.....	31
-17	コイルの直流抵抗測定値がおかしい。.....	32
-18	測定場所によりコイル測定時のインダクタンス値が異なる。.....	32
-19	複数台使用すると測定値に誤差が生じます。.....	33
	(1) DUT の距離、測定ケーブルの距離を離す。シールドする。.....	33

(2) 測定のタイミングをずらす.....	33
(3) 測定周波数をずらす.....	33
4 上手く測定できないときは.....	34
-1 測定値が安定しない、ばらつく.....	34
-2 OPEN・SHORT 補正できない.....	34
-3 測定値がおかしい.....	35
改訂履歴	36

1 精度の良い測定のために

インピーダンスを精度よく測定するためには、いくつかのコツがあります。さらにインピーダンスの精度にはかたより（真値に対する正確度）とばらつき（測定値の安定度）という2つの性質があり、それぞれで考慮しなければならない要素が異なります。

-1 測定条件の最適化

インピーダンスを精度よく測定するために重要な要素は、測定条件の最適化です。以下にインピーダンス測定器を使用する際に必要となる測定条件を紹介します。

(1) 周波数

インピーダンス測定器にとって最も基本的な測定条件が周波数です。現実的にはすべての電子部品に周波数依存性が存在し、周波数によってインピーダンス値は変化します。そしてインピーダンス測定器の測定精度は、周波数やインピーダンス値に応じて変化します。

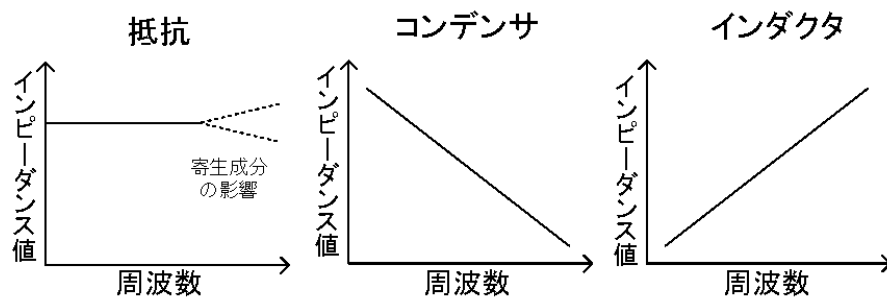


図 1. 代表的な電子部品の周波数依存性¹

(2) 信号レベル

インピーダンス測定器は測定端子から出力される交流信号を測定対象物（DUT：Device Under Test）に印加します。印加する信号レベルは、DUT に応じて適切に設定します。一般的に信号レベルを大きくしたほうが測定値のばらつきは小さくなりますが、印加する測定信号によって DUT に電氣的破壊が生じないかを把握しておく必要があります。

多くのインピーダンス測定器では、測定信号レベルは測定端子の開放電圧で規定されます。これは図 2 の開放端子電圧（V）に相当します。この場合、DUT に印加される電圧はインピーダンス測定器に内蔵されている信号源の出力抵抗に影響されます。

一方、測定信号レベルによってインピーダンス値が変化する電子部品もあります。コンデンサ（特にセラミックコンデンサ）は DUT 端子間の電圧に、インダクタは DUT を流れる電流に応じて測定値が変化します。これらの依存性を評価するには、DUT 端子間の電圧を一定にする定電圧(CV：Constant Voltage)モードや、DUT に流れる電流

¹ 正確にはコンデンサ・インダクタも寄生成分の影響から、より複雑な周波数依存性を持ちます。

を一定に設定する定電流 (CC: Constant Current) モードを使用する必要があります。加えてこれらの素子は測定信号 (AC) だけでなく、バイアス信号 (DC) の影響も考慮する必要があります。

参照 : 1 -1 (5) DC バイアス

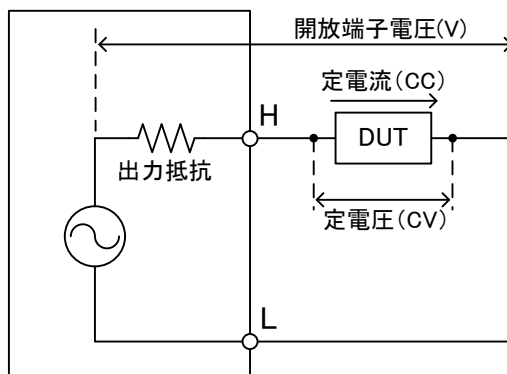


図 2. モードによる測定信号レベルの違い

(3) 測定スピード

測定値のばらつきと測定時間はトレードオフの関係にあります。多くのインピーダンス測定器は、何種類かの測定スピードを選択できます。

測定スピードを遅くすることで測定値のばらつきは小さくなります。適切な測定スピードは、要求される精度と測定時間を考慮して決定する必要があります。図 3 に測定スピードと、測定値のばらつきの関係を示します。

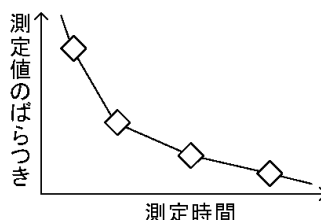


図 3. 測定時間とばらつきの関係

(4) 測定レンジ

測定レンジはインピーダンス測定器に限らず、あらゆる測定器において測定値のばらつきを左右する重要な要素です。測定レンジは DUT のインピーダンス値に応じて選択します。

未知の電子部品を測定する場合は AUTO レンジ機能を使用することをおすすめします。AUTO レンジ機能によって測定インピーダンスに応じた適切なレンジが自動で選択されます。

測定する電子部品のインピーダンス値を把握している場合には、HOLD レンジ機能で適切なレンジを選択します。HOLD レンジ使用時は AUTO レンジ使用時と比較して測定時間が短縮されます。

(5) DC バイアス

DUTに印加される DC バイアスの影響によって、測定値に変化が生じることがあります。図 4 に示す例のようにレベル依存性のあるコンデンサであれば DC バイアス電圧によって静電容量値の変化が生じ、インダクタであれば DC バイアス電流によってインダクタンス値の変化が生じます。DC バイアス依存性を評価するためには、インピーダンス測定器に備わった DC バイアス重畳機能を使用するか、外付けの DC バイアスユニットを使用する必要があります。HIOKI では DC 電圧用バイアスユニットと DC 電流用バイアスユニットを提供しています。

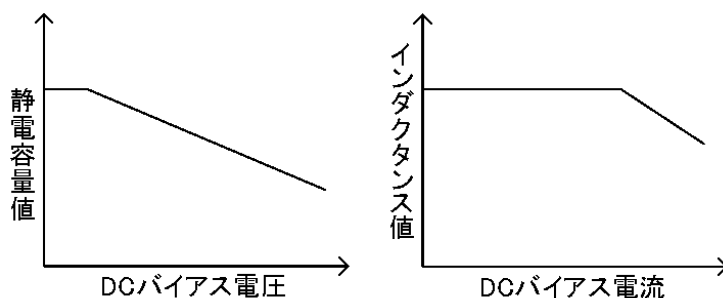


図 4. DC バイアスによる影響例

-2 レベル依存性素子の測定

信号レベルに応じて特性が変化する素子の測定では、測定値の再現性を高めるために素子の特性をよく理解しておく必要があります。

また測定信号レベルが一定であっても、コンデンサやコイルは周波数によってインピーダンス値が変化するため、周波数を変化させると DUT に印加される電圧や流れる電流も変化します。レベル依存性を測定するには、測定信号レベル(開放端子電圧)ではなく、実際に DUT に印加されている電圧や電流を確認する必要があります。

(1) 電圧依存性

セラミックコンデンサの中でも高誘電率のものは影響を受けやすく、電圧を印加すると実効的な静電容量が変化します。近年、セラミックコンデンサの小型化が進行していますが、小型化と高容量を両立するためには高誘電率の材料を使う必要があり、電圧依存性が特に強くなります。

高誘電率系セラミックコンデンサの測定を行う際に考慮しなければいけない点について記述します。コンデンサに DC 電圧を印加した際の実効的な静電容量を DC バイアス特性、AC 電圧を印加した際は AC 電圧特性と呼び、この変化量は素子によって異なります。コンデンサに直流電圧を印加する DC バイアス特性については、図 4 に示すように印加される DC バイアス電圧が大きくなると実効的な静電容量が低下します。印加電圧を変化させた際に静電容量の変化量が小さい素子は電圧依存性が良好である

と言えます。データシートに記載されているコンデンサの静電容量値は直流印加電圧が 0V における交流測定の規定であり、定格電圧は印加可能な最大電圧です。定格電圧内であっても、その付近においては静電容量が大きく減少することを考慮する必要があります。

同一のコンデンサを測定しても測定器によって静電容量が異なる場合があります。この原因の多くは設定電圧を同じにしても、実際の印加電圧が異なっていることに起因します。

図 2 のように、実際に DUT に印加される信号レベルは、設定した信号源の出力電圧を DUT のインピーダンスと測定器の持つ出力抵抗で分圧された値となります。測定周波数が f の際に DUT に印加される電圧 V_{DUT} は、出力抵抗を R_o 、DUT の静電容量値を C 、信号源の電圧を V_o とすると、以下の式で表せます。

$$V_{DUT} = \frac{1}{R_o + \frac{1}{j \cdot 2\pi f C}} \times V_o$$

コンデンサは静電容量が大きいほどインピーダンスが小さくなり、測定器の出力抵抗との分圧による電圧降下の影響が大きくなります。電圧依存性の影響を把握するためには、DUT にかかる信号レベルをモニタする必要があります。最近ではインピーダンス測定器に測定レベルをモニタする機能が付いたものがあります²。これによりマルチメータ等の外部機器によりモニタする必要がなくなります。

(2) 電流依存性

インダクタは信号電流に依存して測定値が変化します。インダクタに流れる信号電流を大きくしていくとインダクタンス値が小さくなります。許容電流を超えるとインダクタは破損してしまいますので、誤ったインピーダンス測定器の使い方をしないように注意が必要です。一般的にインダクタは、図 4 に示すように重畳される DC バイアス電流が大きくなると実効的なインダクタンス値が低下します。

インピーダンス測定器の多くは、測定信号レベルを測定端子間の開放電圧で規定しています。この際 DUT に流れる電流値はインピーダンス測定器本体の出力抵抗によって異なりますので、異なる測定器で同じ出力電圧に設定した場合であっても、信号電流が異なることがあります。これを避けるためには DUT に流れる電流を一定に設定する CC 測定モードを使用するのが最適です。

² 2017 年 11 月現在 HIOKI から発売中の LCR メータ、インピーダンスアナライザには全て搭載されています。

測定周波数が f の際に DUT に流れる電流 I_{DUT} は、出力抵抗を R_o 、DUT のインダクタンス値を L 、信号源の電圧を V_o とすると、以下の式で表せます。

$$I_{DUT} = \frac{V_o}{R_o + j \cdot 2\pi f L}$$

インダクタは固有の抵抗値を持った線材を巻くことによって構成されているため、直流抵抗を有します。巻線型コイルは、電流が流れると電線の抵抗による損失で発熱し、熱によってインダクタンス値が変化します。直流電流の場合はこの抵抗による発熱のみですが、交流電流の場合は電線の表皮効果と磁性材料の損失といった他の要因による発熱が追加されます。これらの特性がインダクタの損失抵抗となります。この損失抵抗は、インダクタの性能の良さを示す要素である、Q 値 (Quality Factor) に関係があります。

Q 値はインダクタの損失抵抗の小ささを示しており、Q 値が大きいほど純粋なインダクタであると言えます。Q 値は、測定周波数を f 、DUT のインダクタンス値を L 、損失抵抗を R とすると、以下の式で表せます。

$$Q = \frac{2\pi f L}{R}$$

以前は Q メータという専用の測定器が知られていましたが、現在はインピーダンス測定器で測定することができます。

-3 補正

インピーダンス測定器の測定精度は同軸コネクタ先端において規定されています。しかし、さまざまな形状の DUT を直接同軸コネクタにつなぐことはできないため、通常、DUT と同軸コネクタはテストフィクスチャやケーブルを介して接続されます。DUT のインピーダンスを正確に測定するためには、フィクスチャの残留インピーダンスやケーブルの影響を取り除く必要があり、インピーダンス測定器には以下の補正機能が搭載されています。

- OPEN・SHORT 補正
- LOAD 補正
- ケーブル長補正

(1) OPEN・SHORT 補正

OPEN・SHORT 補正機能は、テストフィクスチャの残留分によって生じる誤差を取り除く機能です。

テストフィクスチャの等価回路について、DUT に対して直列に配置されるインピーダンスを Z_s 、DUT に対して並列に配置されるアドミタンスを Y_o とし、DUT と測定器の間に図 5 のように入るものと仮定します。

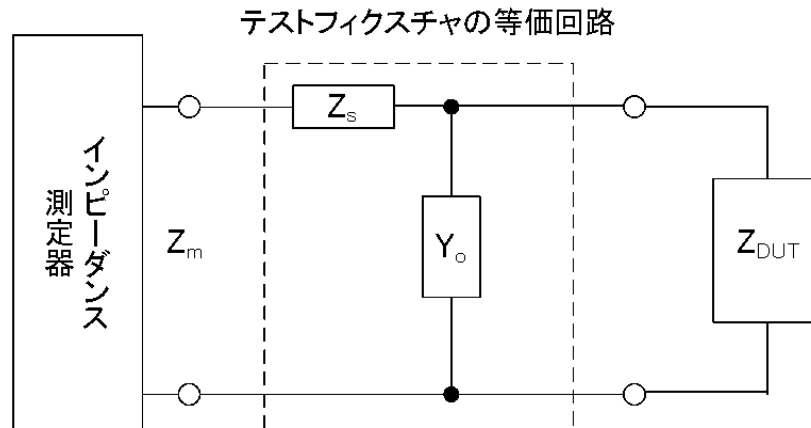


図 5. テストフィクスチャの等価回路

DUT のインピーダンスの真値を Z_{DUT} 、測定器の測定端子で計測されるインピーダンスを Z_m とすると

$$Z_{DUT} = \frac{Z_m - Z_s}{1 - Y_o(Z_m - Z_s)} \quad \dots (1.3.1)$$

と表せます。

OPEN・SHORT 補正を行うことで、 Z_{DUT} をオープンにしたときの $Z_m (= Z_{om})$ 、 Z_{DUT} をショートしたときの $Z_m (= Z_{sm})$ が求められます。 Z_{om} 、 Z_{sm} は以下の式で表せます。

$$Z_{om} = Z_s + \frac{1}{Y_o} \quad \dots (1.3.2)$$

$$Z_{sm} = Z_s$$

インピーダンス測定器では、(1.3.1)式と(1.3.2)式から得られる以下の計算式によって測定値を演算します。

$$Z_{DUT} = \frac{(Z_{om} - Z_{sm})(Z_m - Z_{sm})}{Z_{om} - Z_m}$$

OPEN・SHORT 補正を行う際は、次の点に注意して下さい。

OPEN 補正を行う際の注意点

- 測定器のウォームアップ後に実施する
- 測定端子間距離を実際に測定するときの距離に合わせて補正を実施する
- 高インピーダンス測定となるためノイズの影響に注意する
- ノイズの影響で補正エラーが出てしまう場合は、ガーディングを行う

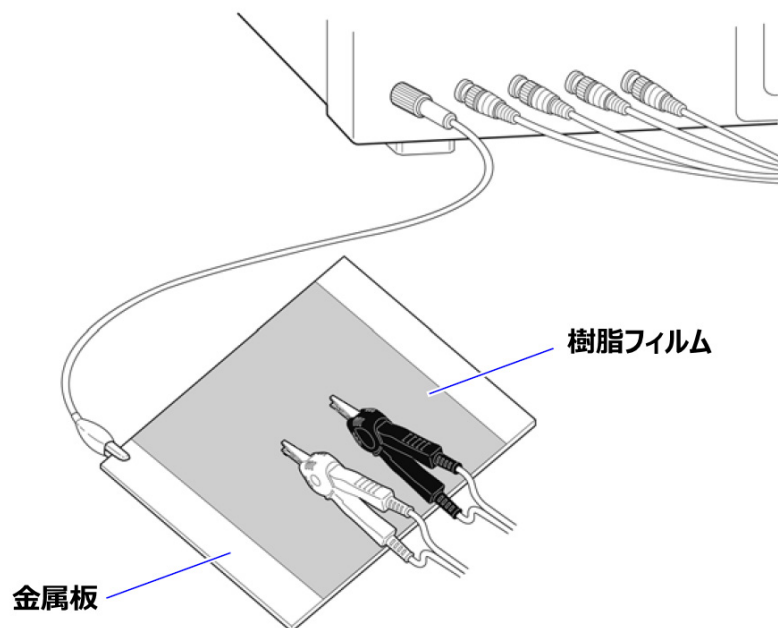


図 6. ガーディングの例

SHORT 補正を行う際の注意点

- 測定器のウォームアップ後に実施する
- 測定端子同士を直接接続する、または短絡部品を使用する
- 短絡部品は残留インピーダンスが小さいものを使用する
- ケーブルの引き回しを測定時と合わせる

次のような場合、OPEN・SHORT 補正を再度行ってください。

- フィクスチャ、ケーブルを変更したとき
残留インピーダンス、残留アドミタンスが変化しています。
- インピーダンス測定器の測定条件を変更したとき
測定条件を変更したことで、補正が無効になる場合があります。

OPEN・SHORT 補正の限界

伝送線路、複数の素子を組み合わせた回路など、インピーダンス測定器と DUT の間に入るフィクスチャ、ケーブルの等価回路が図 5 の回路よりも明らかに複雑である場合、OPEN・SHORT 補正を実施してもフィクスチャ、ケーブルの影響を取り除くことはできません。

(2) LOAD 補正

DUT と測定器の間に複雑な回路が接続され、OPEN・SHORT 補正を実施しても、回路の影響が取り除けない場合に、測定値と基準値を合わせこむ方法として LOAD 補正が有効です。LOAD 補正の手順は、正確に値が分かっている部品を測定し補正係数を求めます。実測値に対して補正係数を適用することで、測定値が得られます。

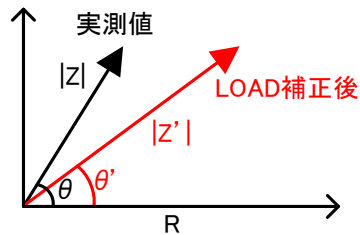


図 7. LOAD 補正のイメージ

(3) ケーブル長補正

ケーブル長補正は、同軸ケーブルの伝送特性によって生じる誤差を補正する機能です。

測定器と DUT の間のケーブル延長により、DUT に印加される信号の振幅と位相に誤差が生じます。測定周波数が高くなるほど顕著になり、それによりインピーダンス測定値にも誤差が生じます。

HIOKI のインピーダンス測定器は、以下に示す同軸ケーブルによって工場出荷時に調整されています。同軸ケーブルを延長する場合は、以下を満たすケーブルを使用し、測定器の設定もその長さに合わせたケーブル長設定を選択してください。

- 特性インピーダンスが50Ωの同軸ケーブルを使用してください。
(1.5D-2V など)
- IM35xx シリーズ、350x シリーズではケーブルの静電容量値が以下の値になるように長さを調整してください。

本体のケーブル長設定 1m	111pF/本
本体のケーブル長設定 2m	215pF/本
本体のケーブル長設定 4m	424pF/本

-4 測定端子構造

インピーダンス測定器で測定を行うには、プローブやフィクスチャを介して DUT に接触させる必要があります。多くのインピーダンス測定器³には測定端子が 4 つあり、プローブやフィクスチャの構造、測定対象の形状によって DUT への接続方法が変わります。

測定値のばらつき要因や誤差要因を把握し、DUT に応じた適切な接続方法を選択することが精度よくインピーダンス測定を行う上で重要です。

(1) 2 端子接続

2 端子接続は図 8 に示すように、もっとも簡易的な接続方法です。

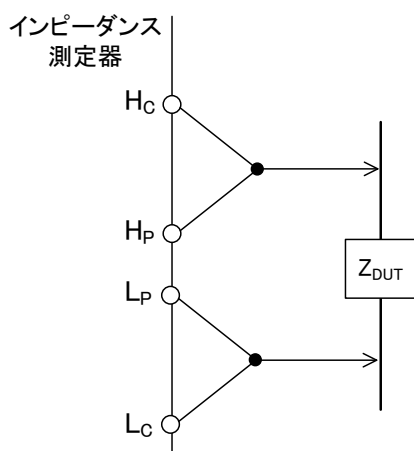


図 8. 2 端子接続

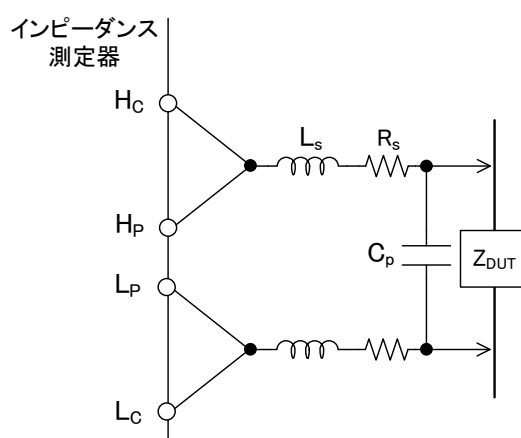


図 9. 2 端子接続の誤差要因

実際の 2 端子接続では、図 9 に示す寄生成分が誤差要因となります。インピーダンス測定器が測定するインピーダンスは、 L_s 、 R_s 、 C_p 、 Z_{DUT} の合成インピーダンスです。よって 2 端子接続は、図 9 の誤差要因の影響を受けにくい数 kHz 以下の周波数で、かつ、DUT のインピーダンスが 50Ω から $10k\Omega$ 程度の測定にお使いいただけます。インピーダンス値と誤差要因の関係については、表 1 を参考にしてください。

表 1. 2 端子接続の誤差要因とその影響

誤差要因		影響
L_s	ケーブル、プローブの寄生インダクタンス	高周波、低インピーダンス測定時に影響大
R_s	ケーブルの寄生抵抗、プローブの接触抵抗	$Z_{DUT} \gg R_s$ でないときに影響あり
C_p	ケーブル、プローブ間の寄生容量	高周波、高インピーダンス測定時に影響大

³ 測定方式に自動平衡ブリッジ法を採用している製品。HIOKI の製品では、IM35xx シリーズ、35xx シリーズが該当します。

(2) 4 端子接続

図 10 に示すような 4 端子接続では、インピーダンス測定器の電流信号経路と電圧信号経路が独立しています。電圧検出回路の入力インピーダンスが高い周波数帯域（1MHz 以下）では接触抵抗の影響を受けにくいため、低インピーダンス測定が可能です。一方で図 11 に示すように各ケーブル間に存在する寄生容量が、高インピーダンス測定時に誤差要因となります。

4 端子接続は DUT のインピーダンスが $100\text{m}\Omega$ から $10\text{k}\Omega$ 程度の範囲でお使いいただけます。

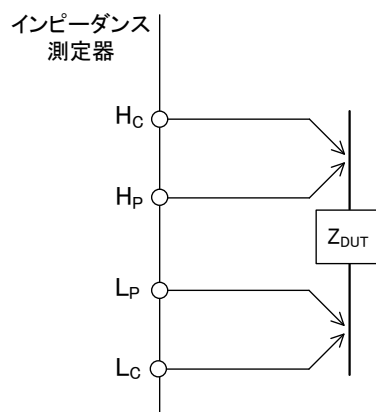


図 10. 4 端子接続

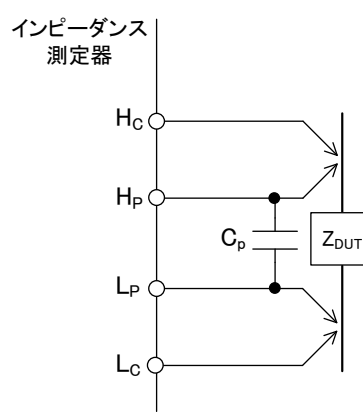


図 11. 4 端子接続の誤差要因

(3) 5 端子接続

4 端子接続では各ケーブル間に寄生容量が存在するため、特に高インピーダンス測定時には図 12 のように、同軸ケーブルを使用するなどのシールド処理で寄生容量の影響を軽減する必要があります。このような接続を 5 端子接続と呼びます。

5 端子接続は DUT のインピーダンスが $100\text{m}\Omega$ から $10\text{M}\Omega$ 程度の範囲でお使いいただけます。

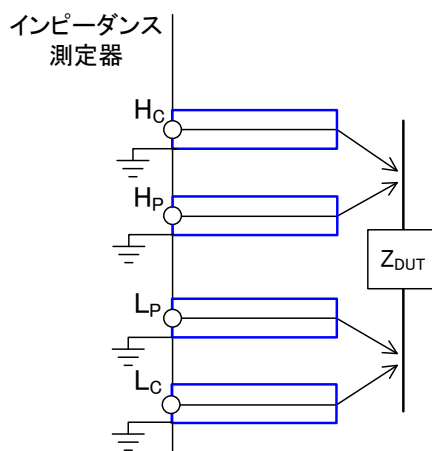


図 12. 5 端子接続

(4) 4 端子対接続

5 端子接続でもすべての誤差要因を除去できるわけではありません。低インピーダンス測定の際には、測定信号として大きな電流が DUT やケーブルに流れます。その結果、ケーブル間の誘導結合により誤差成分が発生してしまいます。

図 13 に示すような 4 端子対接続では、DUT を流れる電流とシールドに流れる電流が同じ大きさで逆向きに流れます。測定信号により発生する磁束と、シールドに流れる電流により発生する磁束が打ち消しあい、ケーブル間の誘導結合を防ぎます。4 端子対接続は 5 端子接続よりも低インピーダンスを精度よく測定できます。

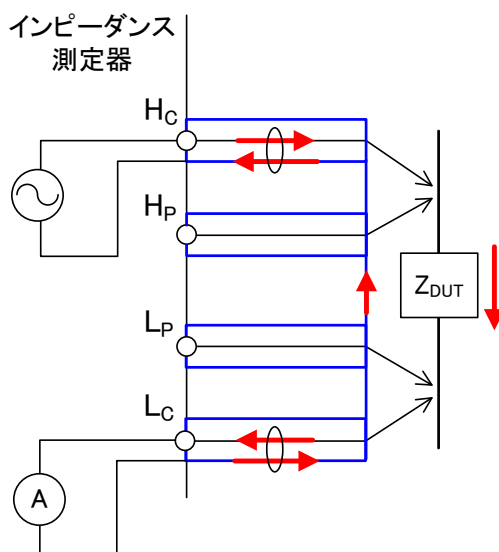


図 13. 4 端子対接続

-5 接触抵抗の影響

接触抵抗は、インピーダンス測定器とフィクスチャ間や、フィクスチャと DUT 間に生じる抵抗のことを指します。接触抵抗は、電極の摩耗や、プローブの断線、接触圧不足などさまざまな要因で発生します。インピーダンス測定において、このような接触抵抗は、測定誤差の要因となるためできる限り小さくする必要があります。

図 14 に接触抵抗が影響する箇所を示します。図中の R_{xx} は接触抵抗、 C_{xx} はケーブル容量を表しています。接続方法 (2 端子測定、4 端子測定) によっても影響量が異なります。

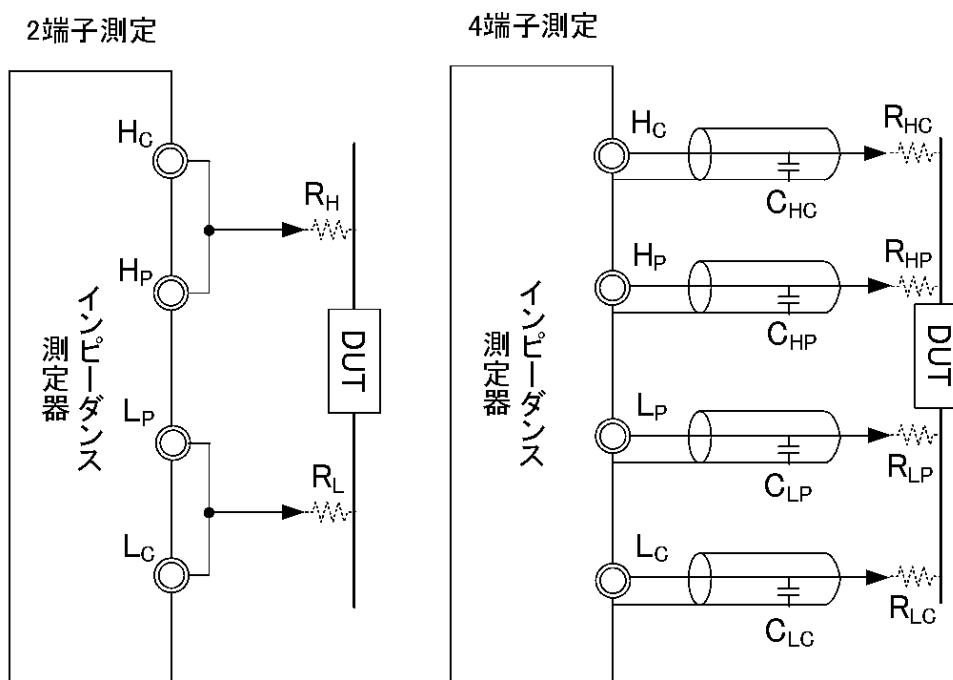


図 14. 各接続方法における接触抵抗の影響箇所

- 2端子測定は、接触抵抗 R_H 、 R_L が DUT に対して直列に入ります。
- 4端子測定はどの端子に接触抵抗が入るかによって影響量が異なります。
- R_{HC} 、 R_{LC} は、DUT に加わる信号レベルを低下させます。
- R_{HP} は、 C_{HP} とローパスフィルタを形成するため電圧検出に誤差が生じます。
- R_{HP} と R_{LP} は、電圧検出回路の同相信号除去比 (CMRR: Common Mode Rejection Ratio) を悪化させるため電圧検出に誤差が生じます。
- R_{LC} に測定電流が流れ、 L_p 端子電圧を上げてしまうため、電圧検出回路の CMRR が十分大きくないとき、検出電圧に誤差が生じます。

(1) 2端子測定の場合の誤差例

DUT の等価直列抵抗を R 、静電容量値を C 、測定周波数を f とすると R_s と D は以下のように計算できます。

$$R_s(\text{ESR}) = (R)_{\text{真値}} + (R_H + R_L)_{\text{誤差}}$$

$$D = \frac{R}{X} = \frac{(R + R_H + R_L)}{\frac{1}{2\pi f C}} = (R \cdot 2\pi f C)_{\text{真値}} + (R_H \cdot 2\pi f C + R_L \cdot 2\pi f C)_{\text{誤差}}$$

(2) 4端子測定の場合の誤差例

R_{HP} と C_{HP} による誤差は、電圧検出の誤差となり、以下のように計算できます。

$$\begin{array}{l} \text{測定誤差} \\ \text{位相誤差} \end{array} \quad \begin{array}{l} \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi f \cdot C_{HP} \cdot R_{HP})^2}} - 1 \\ \tan^{-1}(-2\pi f \cdot C_{HP} \cdot R_{HP}) \end{array}$$

(3) コンタクトチェック機能について

インピーダンス測定器にはコンタクトチェック機能を搭載したモデルがあります。コンタクトチェック機能は接触抵抗を検出する機能で、接触抵抗による検査不良を低減するために有効です。

2 測定ケーブルなどを自作する場合の注意点

-1 ケーブルについて

ケーブルを自作する際の注意点について説明します。

(1) ケーブルの選定方法

- 特性インピーダンスが 50Ω の同軸ケーブルを使用してください(1.5D-2V など)
- IM35xx シリーズ、350x シリーズでは、以下の静電容量値になるようケーブルの長さを調整してください⁴。

本体のケーブル長設定 1m	111pF/本
本体のケーブル長設定 2m	215pF/本
本体のケーブル長設定 4m	424pF/本

(2) ノイズの影響を受けにくいケーブルの加工方法

外来ノイズの影響を受けにくくするために、以下のことに留意してください。

- 図 15 のように、4 端子対構造にしてください。
- 各シールドはできるだけ DUT の近くで接続し、芯線がむき出しになる箇所が短くなるようにしてください。
- ケーブルにノイズが侵入しにくいよう L_c 端子と H_c 端子のケーブルとをツイスト(撚る)してください。同様に L_p 端子のケーブルと H_p 端子のケーブルとをそれぞれツイストしてください。

⁴ HIOKI のインピーダンス測定器は工場出荷時にケーブル長に合わせた調整をしています。同軸ケーブルの芯線-シールド間の静電容量値が工場での調整で使用したケーブルと異なると、測定誤差を生じます。

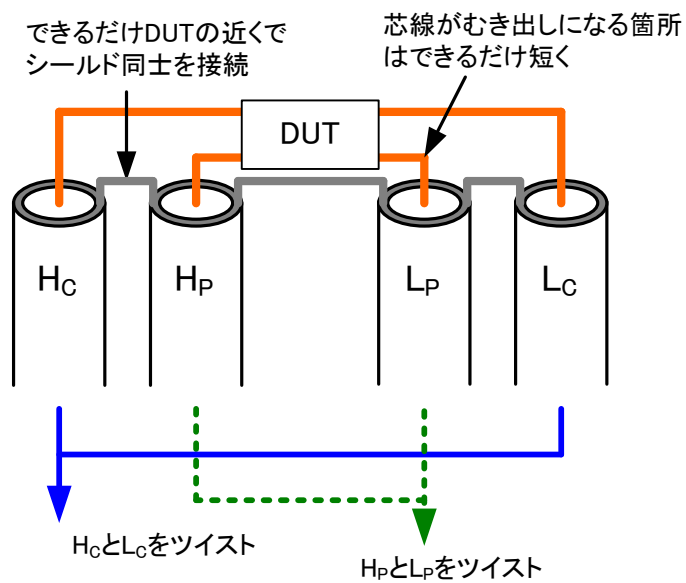


図 15. ノイズの影響を受けにくいケーブルの加工方法

(3) 先端を2端子構造のケーブルに加工する場合の留意点

- OPEN・SHORT 補正をプローブの先端で行ってください。
- 接触抵抗の影響を受けます(低インピーダンスの測定には向きません)。

-2 スキャナ作製について

4端子対構造を維持できるようにスキャナを作製してください。詳細を図 16 に示します。

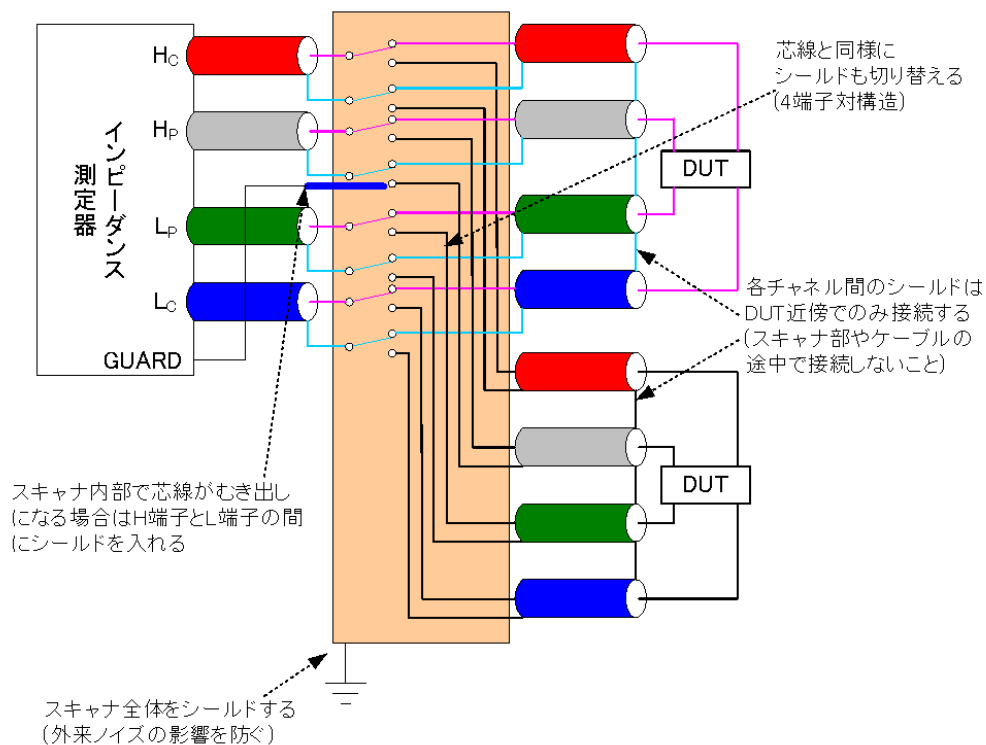


図 16. スキャナ作成時の留意点

- DUT に接触するプローブの先端で OPEN・SHORT 補正をしてください。
- スキャナ内部で使用するスイッチは、先端をショートさせた場合の最大電流を考慮して選定してください。
- 絶縁抵抗計などと組み合わせて使用する場合、DUT を十分に放電させてからインピーダンス測定器に切り替えてください。残留電荷によってインピーダンス測定器が破損するおそれがあります (残留電荷保護機能は繰り返しの印加に耐えられません)。

-3 DC バイアス電圧印加回路

主にコンデンサの電圧依存性評価に使用される DC バイアス電圧印加回路の作製方法について説明します。図 17 に DC バイアス電圧印加回路を示します。

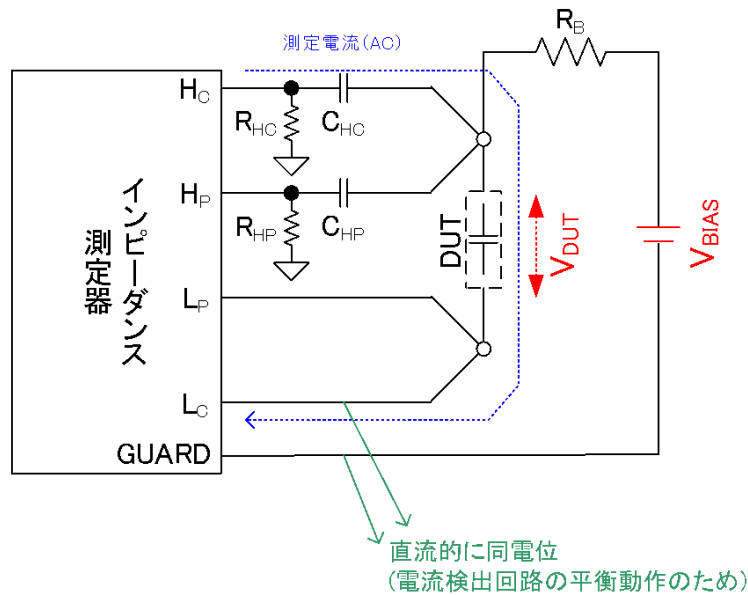


図 17. DC バイアス電圧印加回路

- DUT を測定ケーブル、プローブ、またはフィクスタチャに接続してから、直流電圧源の出力を徐々に上げて所定の直流バイアス電圧に設定して下さい。また、DUT を外す場合は、直流電圧源の電圧を徐々に下げて DUT への直流バイアス電圧をゼロにしてから外して下さい。

(1) R_{HC} 、 C_{HC} 、 R_{HP} 、 C_{HP} について

- 直流電圧がインピーダンス測定器本体へ流入することを防止する目的で設置します。RC フィルタを設置せずにインピーダンス測定器に外部電圧を印加すると本体を破損するおそれがあります⁵。
- 測定電流(交流)を DUT に十分流せるように、測定周波数において数 Ω 程度となるような C_{HC} を選んで下さい。コンデンサの耐圧が直流バイアス電圧よりも十分に高いことを確認して下さい。
- R_{HC} は、 C_{HC} に溜まった電荷からインピーダンス測定器本体を保護するために、10k Ω から 100k Ω 程度の抵抗を選んで下さい。

⁵ IM3536 などを実装されている残留電荷保護機能は、コンデンサに充電された電荷からインピーダンス測定器を保護するものです。直流電源のように常時印加される電圧を防ぐことはできません。

- R_{HP} は、電圧検出回路の入力インピーダンスを高く保つため $10\text{k}\Omega$ 程度の抵抗を選んで下さい。
- R_{HP} と C_{HP} による RC フィルタのカットオフ周波数が測定信号周波数の 100 分の 1 程度になるように C_{HP} を選んでください。RC フィルタのカットオフ周波数 f_c は以下の式で与えられます。

$$f_c = \frac{1}{2\pi CR} \text{ [Hz]}$$

コンデンサの耐圧が直流バイアス電圧よりも十分に高いことを確認して下さい。

- バイアス電圧印加後、測定値が安定するまでに時間がかかります。DUT の静電容量値を C_{DUT} とすると、測定値が安定するのに必要な時間 t は以下の式で与えられます。

$$t = 5 \times (R_* \cdot C_* + R_B \cdot C_{DUT}) \text{ [s]}$$

$R_* \cdot C_*$ は $R_B \cdot C_{HC}$ か $R_{HP} \cdot C_{HP}$ のうち大きいものを選択

(2) R_B の選び方

R_B はインピーダンス測定器に内蔵されている出力抵抗⁶の 10 倍程度の大きさを目安に選定して下さい。また、 V_{BIAS} は DUT の直流抵抗と R_B で分圧される⁷ため、 R_B は DUT の直流抵抗よりも十分に小さくしなければいけません。

R_B は充電されていないコンデンサに対する電流制限抵抗でもあります。充電時の消費電力に対して定格電力に余裕のある抵抗を選定して下さい（DUT、 C_{HC} 、 C_{HP} のコンデンサが充電されるまでの間に、最大で V_{BIAS}/R_B の電流が流れます）。

(3) 設計例

例として以下の条件における DC バイアス電圧印加回路を設計します。

表 2. DC バイアス電圧回路の設計例（条件）

DUT	1.0 μF
測定周波数	1 kHz
DC バイアス電圧	10 V
インピーダンス測定器の出力抵抗	100 Ω

- ① C_{HC} を決定します。1 kHz におけるインピーダンス値を数 Ω 程度にするために、 $C_{HC} = 47\mu\text{F}$ とします。1 kHz における $47\mu\text{F}$ のインピーダンス値は約 3.39Ω です。DC バイアス電圧が 10V なので、25V 以上の耐圧品を選びます。

⁶ インピーダンス測定器の仕様を確認して下さい。

⁷ L_c 端子と GUARD 端子は直流的に同電位となります。これは、電流検出回路の平衡動作によるものです。

- ② R_{HC} は10k Ω とします。
- ③ R_{HP} は10k Ω とします。
- ④ C_{HP} を決定します。測定周波数 1 kHz の 100 分の 1 である 10 Hz を RC フィルタの cutoff 周波数とすると $C_{HP} \approx 1.6\mu\text{F}$ となります。
ここでは、入手しやすい定数である $C_{HP} = 2.2\mu\text{F}$ とします。Cutoff 周波数は約 7.23Hz となります。
DC バイアス電圧が 10V なので、25V 以上の耐圧品を選びます。
- ⑤ R_B を決定します。インピーダンス測定器の出力抵抗の 10 倍である 1k Ω とします。
- ⑥ R_B で生じる V_{BIAS} の分圧について確認します。
一般的なコンデンサの絶縁抵抗は、おおよそ数 100M Ω 以上とされています。選定した 1k Ω はコンデンサの絶縁抵抗に対して十分小さいと考えられますので $V_{DUT} \approx V_{BIAS}$ とみなすことが出来ます。
- ⑦ R_B に求められる定格電力を把握します。消費される最大⁸の電力は

$$P = \frac{(V_{BIAS})^2}{R_B} = \frac{10^2}{1 \times 10^3} = 100 \text{ mW}$$

となります。余裕を持って 250mW 以上の定格品を選定します⁹。

したがって、以下の部品を選定することが出来ます。

表 3. DC バイアス電圧回路の設計例（選定部品）

パラメータ	選定部品
C_{HC}	47 μF （耐圧 25V 以上）
R_{HC}	10k Ω
C_{HP}	2.2 μF （耐圧 25V 以上）
R_{HP}	10k Ω
R_B	1k Ω （定格電力 250mW 以上）

DC バイアス電圧を印加してから測定値が安定するまでには時間がかかります。上記の設計例では、必要な安定時間 t は

$$t = 5 \times \{(1 \times 10^3) \cdot (47 \times 10^{-6}) + (1 \times 10^3) \cdot (0.1 \times 10^{-6})\} \approx 0.24 \text{ 秒}$$

となります。

⁸ 式中で求めた直流電流は、コンデンサの充電が完了するまで流れます。常時流れ続けるわけではありません。

⁹ 実際の測定では抵抗の発熱などを確認して下さい。

-4 DC バイアス電流印加回路

主にインダクタの電流依存性評価に使用される DC バイアス電流印加回路の作製方法について説明します。図 18 に DC バイアス電流印加回路を示します。

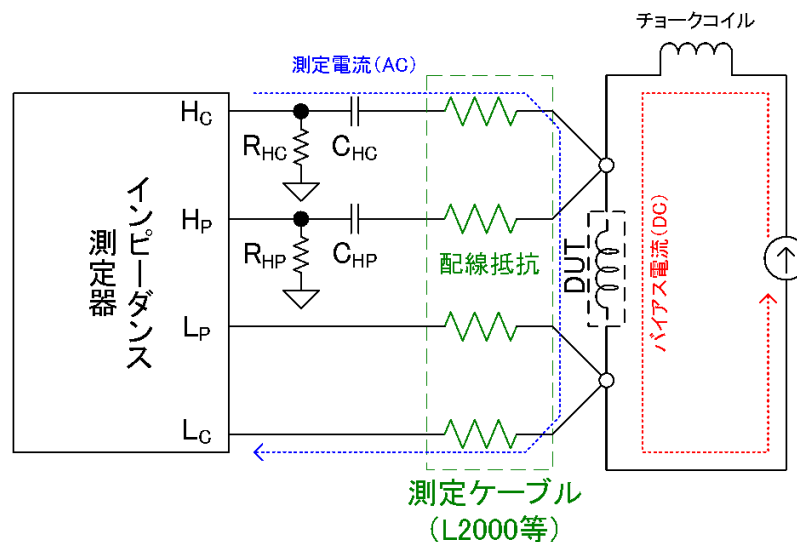


図 18. DC バイアス電流印加回路

- DUT を測定ケーブル、プローブ、またはフィクスタチャに接続してから、直流電流源の出力を徐々に上げて所定の DC バイアス電流に設定して下さい。また、DUT を外す場合は、直流電流源の出力を徐々に下げて DUT への直流電流バイアスをゼロにしてから外して下さい。
- 測定ケーブル、プローブ、フィクスタチャ、DUT、直流電流源の接続時は各極性に注意してください。
- 直流電流源は接地から絶縁されたものを使用してください。接地された直流電流源を使用すると正確なインピーダンス測定はできません。

(1) R_{HC} 、 C_{HC} 、 R_{HP} 、 C_{HP} について

- 直流電流がインピーダンス測定器本体に流入することを防止する目的で設置します。RC フィルタを設置せずにインピーダンス測定器に外部電流を印加すると本体を破損するおそれがあります。
- 測定電流を十分に流すため、測定周波数において数 Ω 程度のインピーダンスとなるような C_{HC} を選定します。この時、コンデンサの耐圧に注意してください。

参照 : 2 -3(3) 設計例

- R_{HC} は、 C_{HC} に溜まった電荷からインピーダンス測定器本体を保護するために、10k Ω から 100k Ω 程度の抵抗を選定して下さい。

- R_{HP} は、電圧検出回路の入力インピーダンスを高く保つため10k Ω 程度の抵抗を選んで下さい。
- R_{HP} と C_{HP} による RC フィルタのカットオフ周波数が測定信号の 100 分の 1 程度になるような C_{HP} を選んでください。 参照 : 2 -3(3) 設計例
- バイアス電流印加後、測定値が安定するまでに時間がかかります。測定値が安定するのに必要な時間 t は以下の式で与えられます。

$$t = 5 \times (R_{HP} \cdot C_{HP}) \text{ [s]}$$

ただし、使用する直流電流源の出力電流が設定値になるまでにはある程度の時間がかかるため、上記の安定時間 t と合わせて考慮する必要があります。

(2) チョークコイルについて

- 測定しているのは図 19 に示す合成インピーダンスです。チョークコイル+直流電流源のインピーダンスの影響を受けにくくするために、チョークコイルのインピーダンス値は DUT のインピーダンス値よりも十分に大きくしてください。

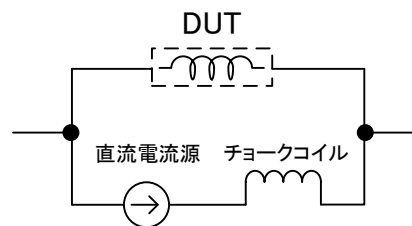


図 19. DC バイアス印加回路と DUT の合成インピーダンス

ただし、インダクタンス値が DUT より大きくても、低周波数で使用する場合は直流抵抗が支配的となり測定誤差が増大します。

- 電流定格が DC バイアス電流以上のものを選んでください。
- 自己共振周波数が測定信号よりも十分に高いものを選んでください。

(3) 接続方法の注意点

- HIOKI の 4 端子プローブ L2000 の電流定格は $1A_{peak}$ です。DC バイアス電流が 1A を超える場合は、バイアス電流が流れない接続方法にしてください。

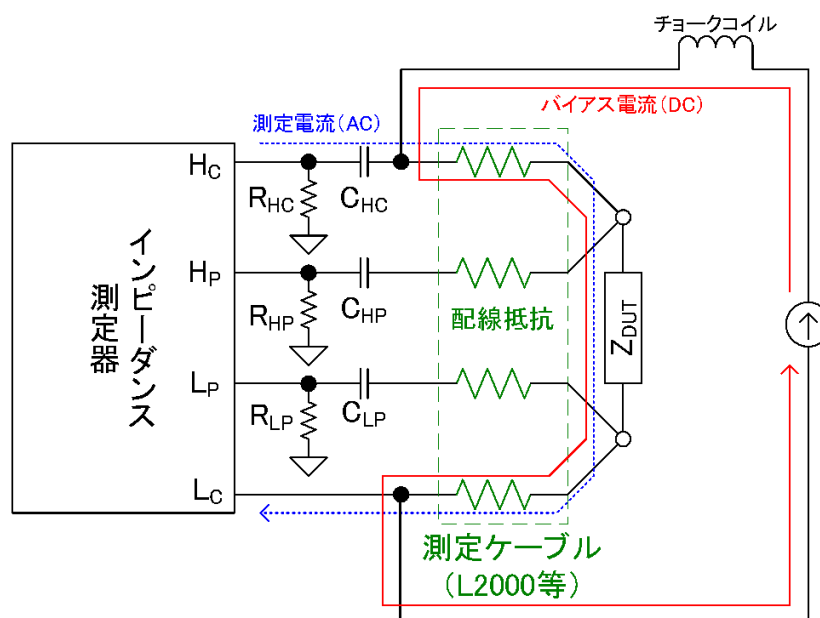


図 20. 配線抵抗の影響を受ける接続方法

図 20 のような接続では

- バイアス電流で L2000 のケーブルが発熱、破損する危険があります。
- 配線抵抗にバイアス電流が流れることで L_p 端子に直流電圧が発生し、内部の保護回路が動作することで測定誤差が増大するおそれがあります。配線抵抗の影響を受けてしまう接続となる場合には、図 20 のように L_p 端子にも RC フィルタを設置して下さい。

3 FAQ

よくある質問と回答を記載します。

-1 測定周波数はどのように決めたら良いですか？

(1) 部品の周波数特性を見たい場合

使用部品が特定の周波数でどのような特性であるかを確認する場合は、その周波数を選択して測定してください。例えば、バイパスコンデンサとして使用しているコンデンサの高周波数の特性を見たい場合などです。

(2) 部品が正常か確認する場合

製造元が規定している測定周波数に合わせて測定してください。例えば、電解コンデンサなどは 120Hz で静電容量値が規定されています。測定周波数により部品の特性は異なるため、高周波数で測定してしまうと公称値とは異なる可能性があります。

-2 測定信号レベルはどのように決めたら良いですか？

(1) 部品のレベル依存性を見たい場合

使用部品が特定の信号レベルでどのような特性であるかを確認する場合は、信号レベルを CV モードまたは CC モードに設定にして測定してください。例えば、高誘電率タイプの積層セラミックコンデンサは電圧依存性があるため信号レベルや DC バイアス電圧により静電容量が変化します。また、コア材入りのコイルは電流依存性があるため信号レベルや DC バイアス電流によりインダクタンス値が変化します。

参照：1 -2 レベル依存性素子の測定

(2) 部品が正常か確認する場合

測定信号レベルにより部品の特性は異なります。製造元が規定している信号レベルに合わせて測定してください。信号レベルが一致していない場合は、製造元が規定しているインダクタンス値の誤差範囲から外れる場合があります。

-3 測定レンジはどのように決めたら良いですか？

(1) AUTO レンジ

未知のインピーダンスを測定する場合は AUTO レンジが便利です。ただし、AUTO レンジの場合は適切なレンジに移動するまで時間がかかるため測定時間が長くなります。

コンデンサやコイルの周波数特性を測定する場合には、測定周波数に応じて DUT のインピーダンス値が変化するため AUTO レンジで測定して下さい。

(2) HOLD レンジ

適切なレンジに固定することでレンジ移動がなくなるため高速に測定できます。各レンジの確度保証範囲はインピーダンス測定器ごとに規定されていますので取扱説明書をご覧ください。なお、測定レンジはインピーダンス値で決まっており、静電容量値 (C) やインダクタンス値 (L) では決まりません。コンデンサやコイルを測定する場合は、インピーダンス値 (Z) によってレンジを決めてください。

-4 測定スピード、アベレージについて教えてください。

測定スピード設定により、測定時間（積分時間）が変わります。測定スピードを遅くすると測定時間が長くなる代わりに測定値が安定し、また測定確度も良くなります。アベレージ機能は、測定値を設定した回数分平均することで同様の効果があります。

-5 直列等価回路、並列等価回路のどちらを選択すれば良いでしょうか？

インピーダンス測定器側では、測定対象がどちらの回路モードなのかを判断することができませんので、誤差を低減するためには正しい等価回路モードを選択する必要があります。一般的に、大容量のコンデンサや低インダクタンスなどの低インピーダンス素子（約 100Ω 以下）を測定する場合には直列等価回路モードが用いられ、低容量のコンデンサや高インダクタンスなどの高インピーダンス素子（約 $10k\Omega$ 以上）を測定する場合は、並列等価回路モードが用いられます。 $100\Omega \sim 10k\Omega$ のインピーダンスなど等価回路モードが不明な場合は、部品製造元に確認をしてください。

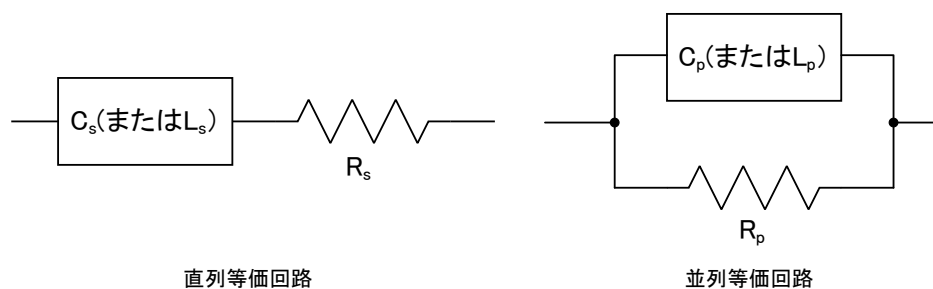


図 21. 直列等価回路と並列等価回路

-6 測定パラメータの R_{DC} と R_s 、 R_p は違うのでしょうか？

R_{DC} は直流信号を印加して測定する直流抵抗です。 R_s 、 R_p は交流インピーダンスの実数成分で $R_s = Z \times \cos\theta$ 、 $R_p = \frac{1}{Y \cos(-\theta)}$ で表され、 R_{DC} 値とは異なる測定パラメータです。

例えば、コイルの損失には銅損、鉄損があり、それぞれ、 R_s 、 R_p として表します。 R_s 値は配線抵抗や表皮効果による損失、 R_p 値はヒステリシス損や渦電流損などの損失であり、 R_{DC} 値とは異なります。

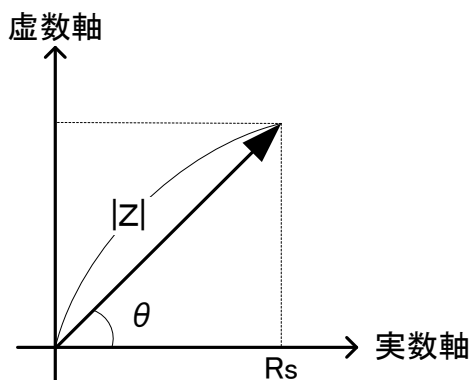


図 22. 複素平面でのインピーダンスと R_s の関係

-7 接地された DUT は測定できますか？

インピーダンス測定器では接地された DUT を測定することはできません。DUT に流れる電流が接地に漏れ、誤差が大きくなるためです。また、インピーダンス測定器に供給される電源からの漏れ電流により感電する危険があるため、測定器本体を接地せずに使用してはいけません。

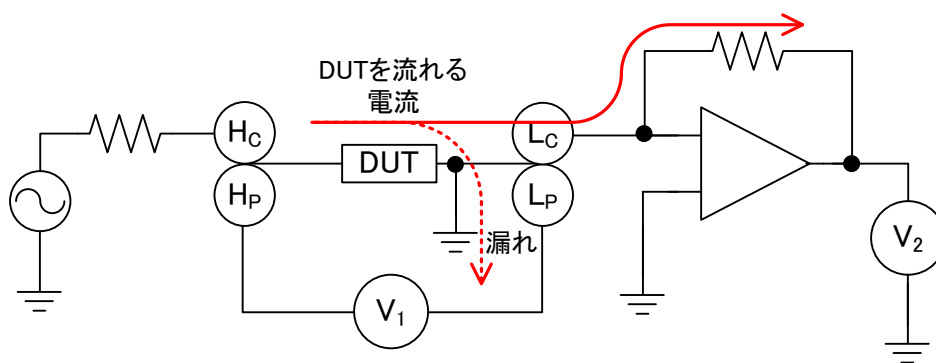
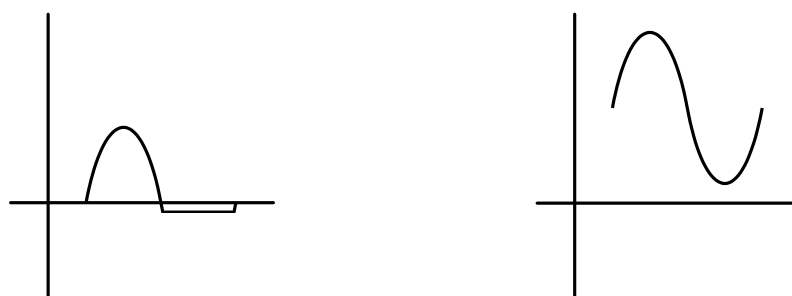


図 23. DUT を接地したときの電流経路

-8 ダイオードの端子間容量値の測定方法を教えてください。

ダイオードには極性があります。順方向に交流信号を印加するとダイオードは ON し、逆方向に印加するとダイオードは OFF します。そのため交流信号に歪が生じ端子間容量を正しく測定できません。正確に測定するためには DC バイアス電圧印加機能を使用し、常に逆方向の信号が印加されるようにします。ダイオードは常に OFF 状態となりますので端子間容量値の測定ができます。

DC バイアス電圧印加機能を備えた製品として IM3533 (-01)、IM3536、IM3570、IM3590 があります。また、外付けの DC バイアスユニット 9268 (-10) との組み合わせも可能です。



DC バイアス電圧印加なし

DC バイアス電圧印加あり

図 24. DC バイアス機能を使用したダイオード測定

-9 同軸ケーブルの特性インピーダンスの測定方法を教えてください。

特性インピーダンス Z は $Z = \sqrt{Z_o \times Z_s}$ で計算します。 Z_o は同軸ケーブル先端を開放したときのインピーダンス、 Z_s は先端を短絡したときのインピーダンスです。なお、安定した測定をするためには、インピーダンス測定器への接続は図 25 のように外部導体を H_C 端子および H_P 端子に、内部導体を L_C 端子および L_P 端子にそれぞれ接続します。これは、インピーダンス測定器の L_C 端子はノイズの影響を受けやすいため、内部導体を外部導体でシールドしノイズの影響を避けるためです。

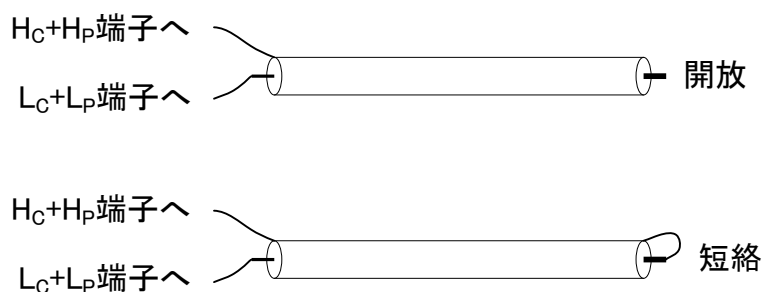


図 25. 同軸ケーブルのインピーダンス測定

-10 インピーダンス測定器の確度計算について教えてください。

インピーダンス測定器の確度はインピーダンス Z と位相差 θ で規定されています。他の測定パラメータの確度は、この Z 、 θ の確度をもとに計算します。例えばコイルのインダクタンス L_s 値は $L_s = \frac{Z \times \sin \theta}{2\pi f}$ で算出できますが（ f は周波数）、この式に Z 、 θ の確度から求めた Z 、 θ の取り得る数値を入力することで、 L_s の取り得る値（確度）を算出することができます。

なお、計算方法の詳細は、各インピーダンス測定器の取扱説明書をご覧ください。また、弊社ホームページから「LCR サンプルアプリケーション」をダウンロードして頂きますと、確度を自動計算できます。

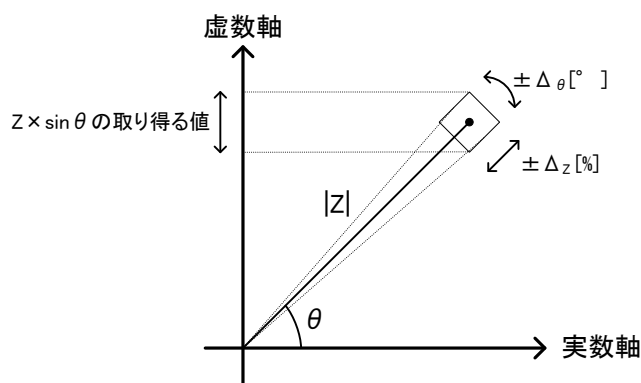


図 26. インピーダンス測定器の確度計算

-11 公称値通りの測定値が得られません。

測定条件が異なると測定値が異なる可能性がありますので、部品メーカーの測定条件（測定周波数、信号レベル）と合わせて測定する必要があります。例えば、高誘電率タイプの積層セラミックコンデンサは電圧依存性の大きな部品です。また、コア材入りのコイルの場合、コア材の透磁率が電流依存性をもつため、インダクタンス値が測定電流値により変化します。コンデンサは JIS C5101 で、測定周波数、測定信号レベルが規定されています。コイルの場合はこのような規格がありませんので製造元にご確認ください。

-12 測定条件を揃えても、インピーダンス測定器によって測定値が異なります。

DUT のインピーダンス値が測定信号レベルの違いにより変わっている可能性があります。原因はインピーダンス測定器の出力抵抗（ 10Ω 、 100Ω など）の違いです。同じ交流信号レベルに設定していても、出力抵抗が異なると DUT に流れる電流、または DUT に印加される電圧が異なる場合があるためです。出力抵抗の値は、インピーダンス測定器の仕様を確認して下さい。

-13 交流インピーダンスと直流抵抗は同時に測定しているのですか？

IM35xx では、交流インピーダンスと直流抵抗の両方を測定することができます。直流抵抗測定をする場合には表示パラメータに R_{DC} を追加します。まず、交流インピーダンスを測定し、その後続けて直流抵抗を測定しています。

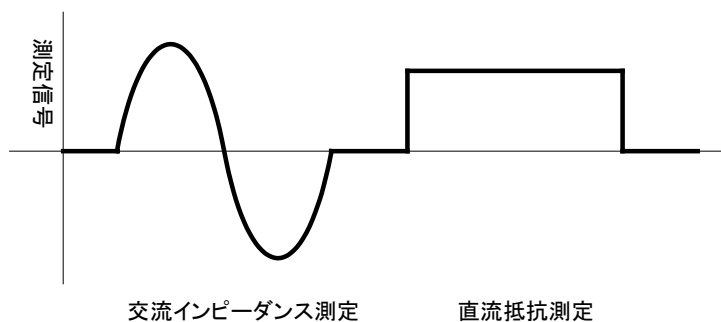


図 27. 交流測定と直流測定の時系列関係

-14 4端子開放状態で測定値がばらつきます。

4つの測定端子が開放された状態では、測定値はばらつき、場合によっては測定レンジも定まりませんが、インピーダンス測定器として正常な状態です。電圧検出信号と電流検出信号レベルが小さく、また、数値が不安定な状態でインピーダンス値を計算しているためです。テストフィクスチャや測定プローブを接続し、 H_C 端子と H_P 端子、 L_C 端子と L_P 端子が短絡されると測定値は安定します。

-15 低インピーダンス測定時に測定値のばらつきが大きい。

テストフィクスチャ、測定プローブには2端子構造のものがあります。2端子構造のプローブは接触抵抗の影響を受けるため、DUTのインピーダンスが低い場合には、測定値が安定しないおそれがあります。接触抵抗は不安定であり接触圧力などにより変化するためです。

-16 直流抵抗の測定値がばらつきます。

IM35xx シリーズの直流抵抗測定には、積分時間を電源周波数の周期に同期させることで電源ノイズを除去する機能^{10 11}があります。測定の前に電源周波数(50Hz/60Hz)を設定してください。特に高インピーダンス測定時に効果があります。

¹⁰ IM3570 には本機能はありません。

¹¹ IM3536 の測定スピード FAST 設定時には、本機能は有効になりません。

-17 コイルの直流抵抗測定値がおかしい。

インピーダンス測定器の直流抵抗測定では、測定誤差を減らすために発生電圧を ON/OFF させて本体内部のオフセット電圧をキャンセルしています (DC アジャスト機能)。コイルへの印加電圧が切り替わる時、出力抵抗やコイルの等価直列抵抗およびインダクタンスによる過渡現象が生じます。測定に過渡現象が含まれてしまうと正確な測定ができないため、直流測定の際は過渡現象の影響を受けないように十分に長いディレイ時間を設定してください。ディレイ時間の名称や測定のタイミングは機種によって異なりますので、各機種の取扱説明書をご覧ください。適切なディレイ時間がわからない場合、まずはできるだけ長いディレイ時間を設定し、その時の測定値が変化しない範囲でディレイ時間を徐々に短くしていきます。

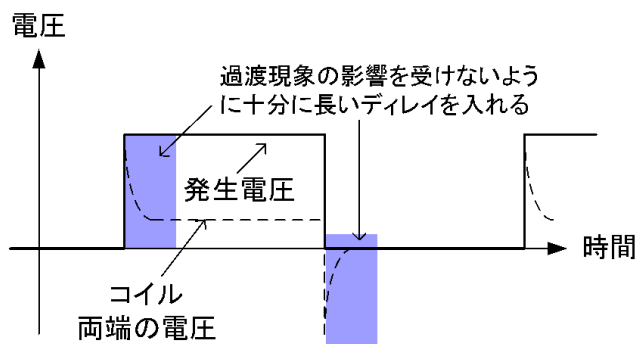


図 28. コイル測定時の過渡現象

-18 測定場所によりコイル測定時のインダクタンス値が異なる。

近くに導体があると、コイル測定時にインダクタンス値や Q 値に影響を与えます。これは、コイルからの漏れ磁束により導体に渦電流が生じ、それによる磁束が元の磁束を相殺するためです。なるべく導体をコイルから離して測定してください。なお、閉磁路型のコイルよりも開磁路型のコイルのほうが近接導体の影響を受けやすくなります。

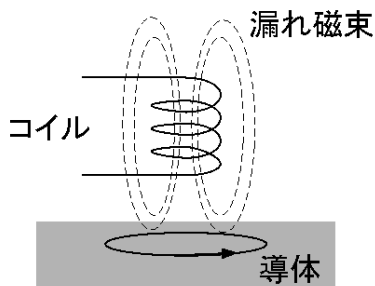


図 29. コイルの漏れ磁束による影響

-19 複数台使用すると測定値に誤差が生じます。

複数の DUT を近くに置いて、複数台のインピーダンス測定器で測定する場合には、お互いの干渉により測定誤差（測定値ずれ、ばらつき増大）が生じる場合があります。影響の程度は、距離、測定周波数、測定スピードなどにより変わります。干渉の影響を低減するためには、次の 3 つの対策が有効です。

(1) DUT の距離、測定ケーブルの距離を離す。シールドする。

近接する DUT の電圧による静電結合、または、DUT に流れる電流による電磁結合が原因です。結合を低減するために距離を離してください。また、静電結合が原因の場合には DUT 間にシールドを入れることも有効です。電磁結合が原因の場合は、測定ケーブルの $H_C \cdot L_C$ 端子同士のツイストで磁束を相殺する、 $H_P \cdot L_P$ 端子同士のツイストでループを小さくし磁束の影響を受けなくすることも有効です。

(2) 測定のタイミングをずらす

同時に複数測定する場合よりも、測定時間が長くなりますが、測定のタイミングをずらすことで干渉の影響を受けにくくなります。この時、トリガ同期機能を使用して、測定していないインピーダンス測定器の出力信号を OFF してください。

(3) 測定周波数をずらす

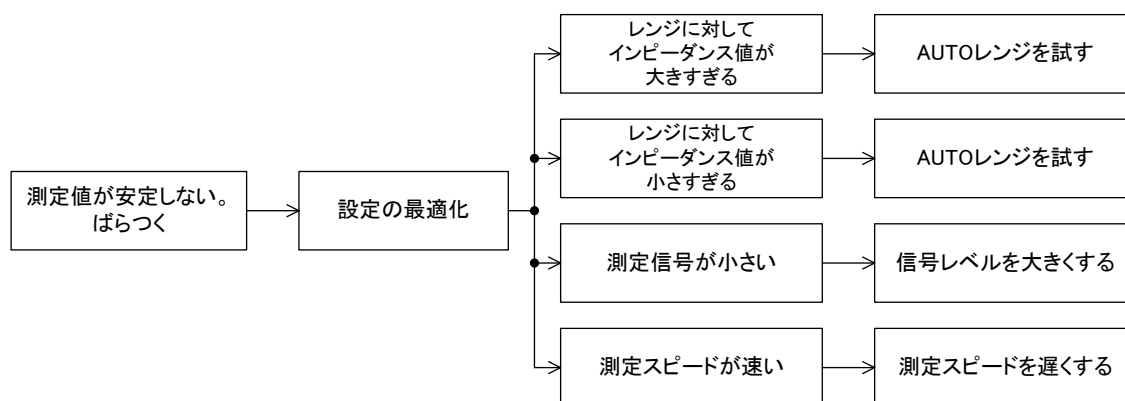
複数台のインピーダンス測定器の測定周波数が一致していると干渉の影響を受けやすくなります。測定周波数をずらすことで干渉の影響を受けにくくすることができます。これはインピーダンス測定器内で行われる同期検波演算により、測定周波数のみを抽出し測定しているためです。この効果は測定周波数、測定スピード、周波数の差により変わります。

4 上手く測定できないときは

「測定値が安定しない」「想定している測定値と違う」などうまく測定できないときは以下のチャートを参考にチェックしてください。

-1 測定値が安定しない、ばらつく

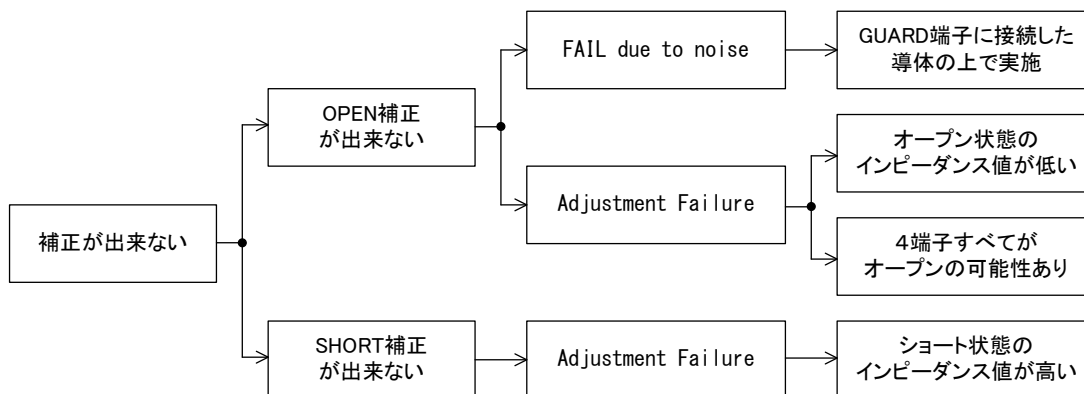
測定値がばらつき安定しない場合に、測定器の設定を最適にすることで改善されることがあります。



参照：1 -1. 測定条件の最適化

-2 OPEN・SHORT 補正できない

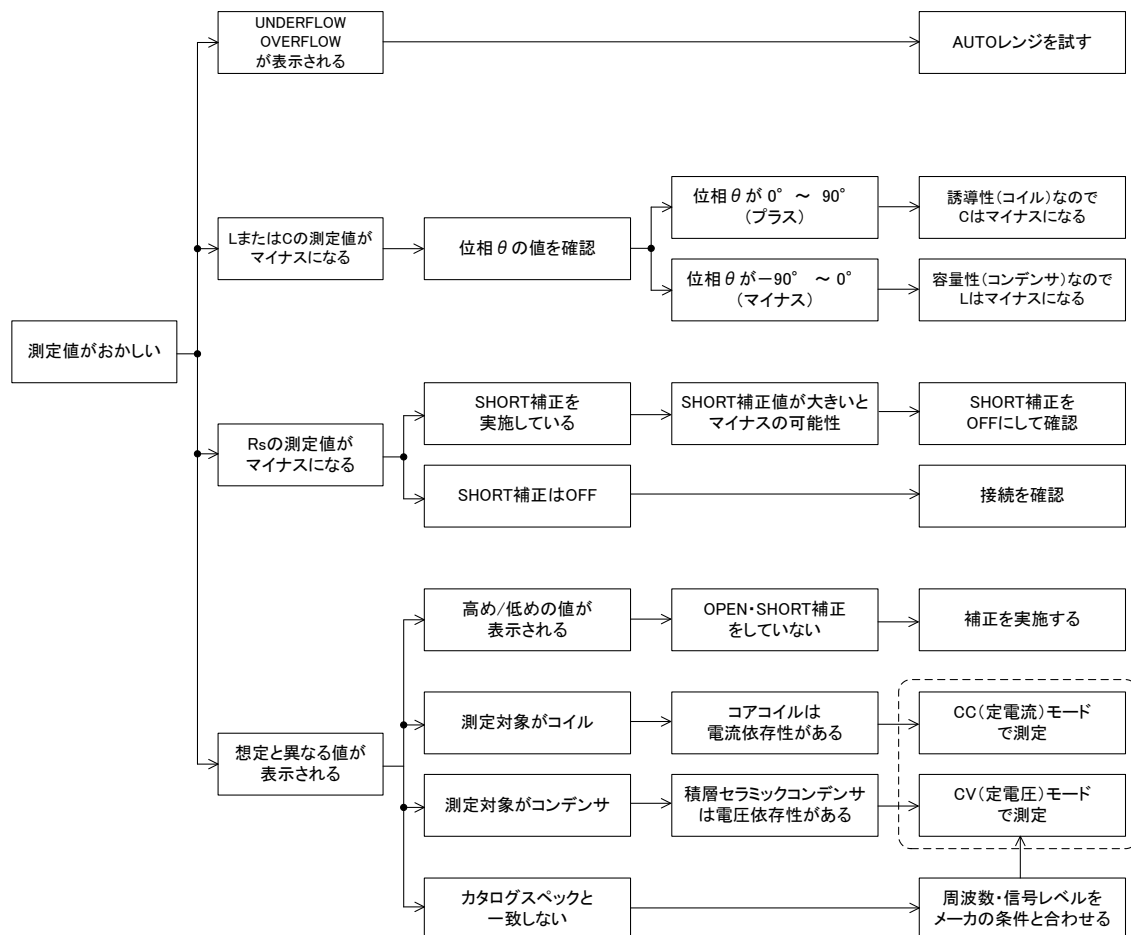
精度のよい測定を行うには、測定の前に適切な方法で OPEN・SHORT 補正が必要です。補正が完了しない場合には以下の点をチェックしてください。



参照：1 -3. 補正

-3 測定値がおかしい

想定していた結果と異なる測定値が得られたときは、測定器の設定だけでなく測定対象の特性も影響することがあります。



参照：1 -2. レベル依存性素子の測定

改訂履歴

版数	発行日	改訂履歴
01	2017年11月	初版発行