

Bode 100 – アプリケーションノート

Bode 100 を用いたインピーダンス測定



By Tobias Schuster; Florian Hämmerle

© 2020 by OMICRON Lab – V1.2

Visit www.omicron-lab.com for more information.

Contact support@omicron-lab.com for technical support.

目次

1	はじめに.....	3
1.1	受動部品のインピーダンス.....	3
1.2	インピーダンス — リアクタンス — 抵抗.....	4
1.3	周波数に対するインピーダンス.....	5
1.4	結果表示形式.....	8
1.4.1	固定周波数測定.....	8
1.4.2	周波数掃引測定.....	8
1.4.3	インダクタの測定例.....	9
1.4.4	キャパシタ測定例.....	11
2	インピーダンス測定技術.....	12
2.1	適切な測定セットアップの選択.....	12
2.2	測定セットアップの詳細説明.....	14
2.2.1	One-Port(1ポート)測定.....	14
2.2.2	インピーダンスアダプタ.....	15
2.2.3	Shunt-Thru(シャント・スルー).....	17
2.2.4	シリーズ抵抗を用いた拡張 Shunt-Thru.....	19
2.2.5	Series-Thru(シリーズスルー).....	21
2.2.6	電圧／電流ゲイン.....	22
2.2.7	外部ブリッジ／外部カプラのセットアップ.....	23
3	信頼できる測定を行うために.....	24
3.1	測定の検証.....	24
3.2	ノイズの低減.....	25
3.3	校正の実行.....	25
4	まとめ.....	26

Note: Bode100の基本的な設定、調整および校正方法についてはBode100のユーザマニュアルを参照してください。以下よりダウンロードできます：

<https://www.omicron-lab.com/downloads/vector-network-analysis/bode-100/>

Note: 本アプリケーションノートに記載されている測定は、全てBode Analyzer Suite V3.12で行われています。本ドキュメントに記載されている測定はV3.23またはそれ以降のバージョンで行ってください。最新のバージョンは以下よりダウンロードできます：

<https://www.omicron-lab.com/downloads/vector-network-analysis/bode-100/>

1 はじめに

本アプリケーションノートでは、Bode 100 を用いたインピーダンス測定において、適切な測定手法をどのように選択するか、また測定結果をどのように改善できるかについて解説します。

インピーダンス測定を行う前に、以下のパラメータについて事前に検討することを推奨します：

1. 被測定デバイス(DUT)の想定インピーダンスはいくらか？
2. 関心のある周波数範囲はどこか？
3. DUT をどのようにして Bode 100 に接続できるか？

測定手法の詳細に入る前に、次の章では受動部品およびインピーダンスデータに関する基礎事項について説明します。経験のある方は、11 ページ以降の「インピーダンス測定(Impedance Measurement)」の章へ直接進むことも可能です。

1.1 受動部品のインピーダンス

理論上、インダクタやコンデンサは純粋なリアクタンス素子であり、抵抗成分を示さないため損失は存在しません。しかし実際の回路では、寄生成分(パラジティクス)が受動部品の特性に大きな影響を与え、特に高周波領域においてその影響が顕著になります。以下に、受動部品における周波数依存の寄生成分が生じる主な要因を示します。

インダクタ:

- 導線には抵抗成分が存在し、近接効果および表皮効果により、その抵抗値は周波数に依存します。
- 巻線間には電界が形成され、その結果として寄生容量が生じ、インダクタンスとともに並列共振回路を構成します。
- コア材は理想的な無損失体ではないため、高周波域では交流損失が発生し、この損失によって並列共振が減衰します。

キャパシタ:

- 電極板は有限の導電率を持つ金属で構成されているため、抵抗損失が発生し、その損失は周波数に依存する場合があります。
- 金属箔の巻回構造によってインダクタンスが生じ、このインダクタンスが静電容量とともに直列共振回路を形成する事があります。
- 絶縁体/誘電体材料は理想的な無損失体ではなく、特に低周波域において誘電正接(損失正接)による損失が発生することがあります。

1.2 インピーダンス — リアクタンス — 抵抗

インピーダンスを測定する際には、インピーダンス Z が複素数であり、実数成分(抵抗 R) と虚数成分(リアクタンス X) から構成されていることを考慮する必要があります。

$$Z = R + jX \quad (1)$$

実数成分は、エネルギーが熱として消費されることによって生じるオーム損失に対応します。虚数成分はリアクタンスと呼ばれ、容量性または誘導性のいずれかの性質を持ちます。誘導性の場合、リアクタンス X_L は次式で求められます。

$$X_L = \omega \cdot L = 2\pi f \cdot L \quad (2)$$

容量性の場合、リアクタンス X_C は次の式によって求められます。

$$X_C = \frac{-1}{\omega \cdot C} = \frac{-1}{2\pi f \cdot C} \quad (3)$$

次の図は、誘導性インピーダンス Z_L および容量性インピーダンス Z_C を、複素平面上に示したものです。x 軸は実数成分、y 軸は虚数成分を表しています。

誘導性の場合と容量性の場合の主な違いは、位相角 ϕ にあります。誘導性の場合、位相は正となり、一方で容量性インピーダンスでは位相は負になります。抵抗成分 R がゼロ(すなわち損失がない)という理想的な条件では、誘導性の場合の位相角は $+90^\circ$ 、容量性の場合 -90° となります。

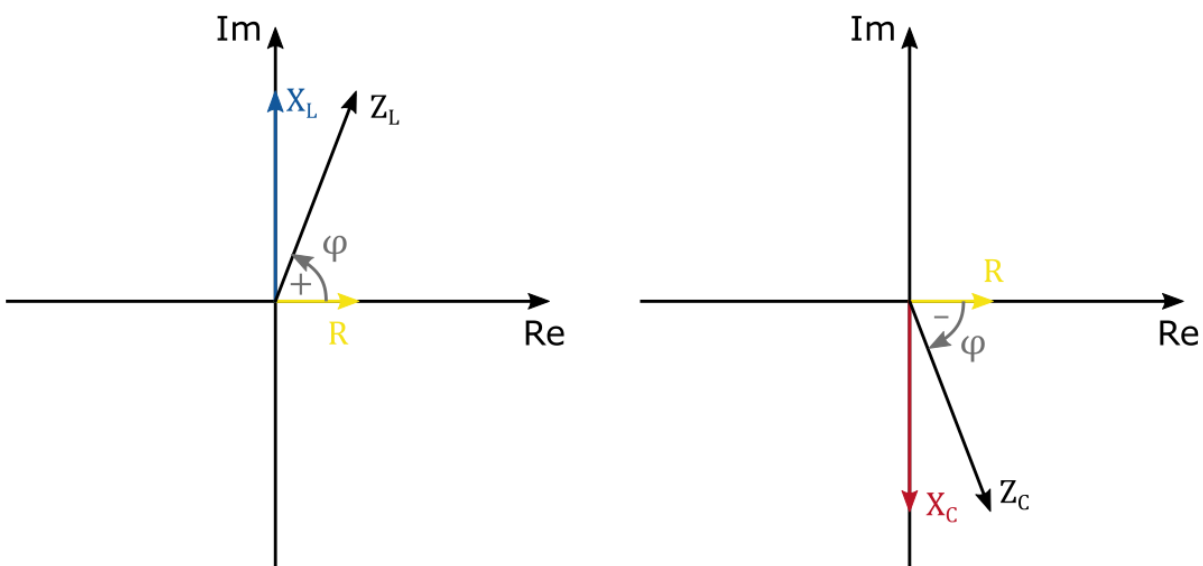


Figure 1: 誘導性インピーダンスと容量性インピーダンス

1.3 周波数に対するインピーダンス

容量性および誘導性リアクタンスの式を見ると、リアクタンスはインダクタンス L や静電容量 C だけでなく、周波数 f にも依存していることが明確に分かります。

ここではまず、インピーダンスは純粋なリアクタンス成分のみから構成されており、抵抗成分は存在しないものと仮定します。

誘導性の場合、インピーダンスは周波数の上昇とともに増加し、容量性の場合には周波数が高くなるにつれてインピーダンスは減少します。この挙動を示したものが次の図 2 であり、 $10\ \mu\text{F}$ のコンデンサ(赤)と $10\ \mu\text{H}$ のインダクタ(青)のインピーダンスの大きさを両対数スケールでプロットしています。

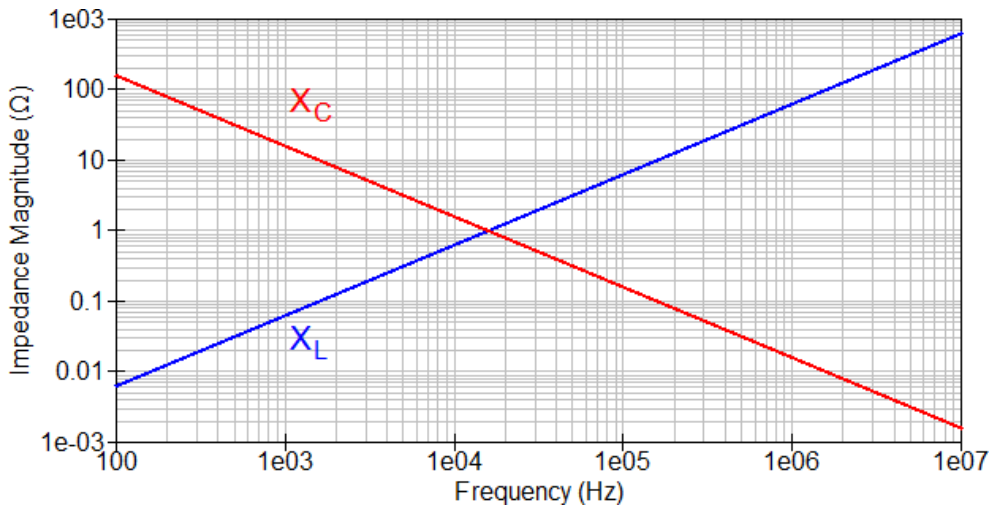


Figure 2: インダクタンスおよびキャパシタンスのインピーダンスの周波数依存性

実際の回路では、常にゼロではない抵抗損失が存在します。インダクタおよびコンデンサの両方に $100\ \text{m}\Omega$ の直列抵抗を付加すると、下図に示すように周波数特性が変化します。:

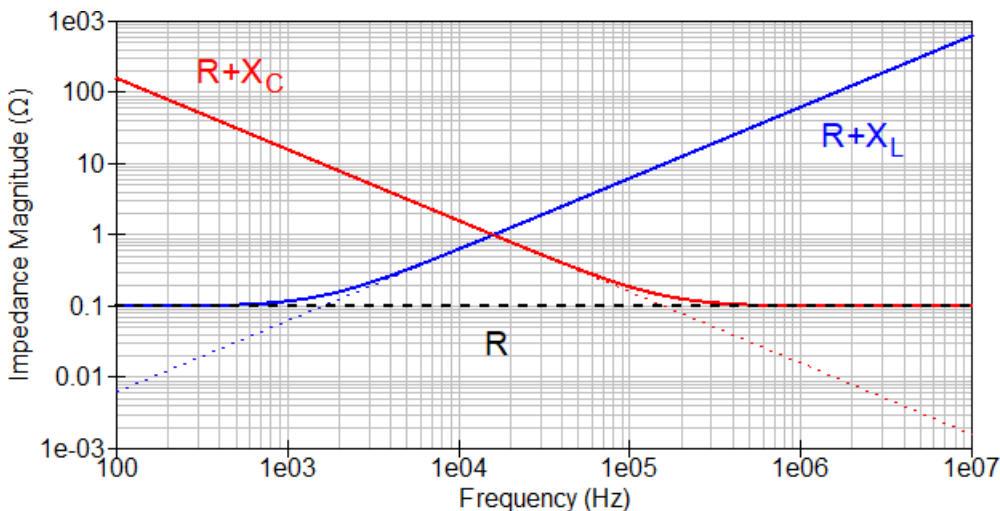


Figure 3: 抵抗成分を含むインダクタンスおよびキャパシタンスの周波数特性

上図から、インピーダンススペクトルにおける「誘導性の傾き」および「容量性の傾き」を確認することができます。純粋なインダクタンスの場合、インピーダンスは傾き $+1$ の直線として増加します(周波数が 10 倍になると、インピーダンスも 10 倍になります)。一方、純粋なコンデンサの場合、傾き -1 、すなわち $-20\ \text{dB/decade}$ の直線として減少します。これらの特性は、より複雑なインピーダンススペクトルを理解する

際の助けとなります。

最後に、実際のインダクタやコンデンサは、インダクタンスや静電容量に抵抗成分を加えただけの単純な構成ではありません。冒頭で述べたように、インダクタには寄生容量が存在し、またコンデンサには寄生インダクタンスが存在します。ここでは、各素子に 100 nF および 100 nH の寄生成分を追加した場合を考えます。その結果得られる周波数特性を下図に示します。:

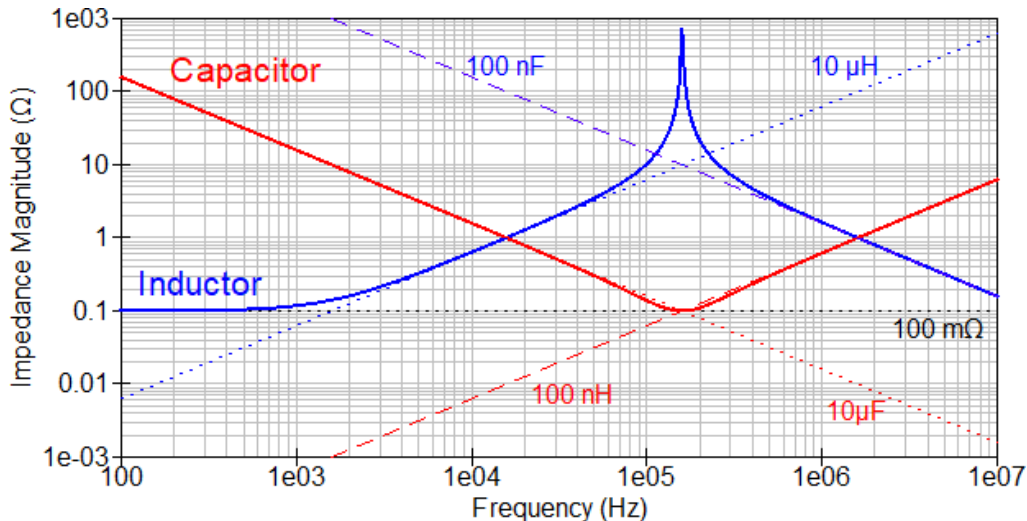


Figure 4: 周波数に対するコンデンサおよびインダクタのインピーダンス (Impedance Magnitude)

赤色の曲線はコンデンサを示しており、直列減衰を伴う直列共振回路としての挙動を表しています。青色の曲線はインダクタを示しており、低周波域では直列抵抗に相当する抵抗成分を持ち、高周波域では寄生容量によって生じる並列共振を示しています。

これらの曲線の各領域は、インピーダンスの位相を見ることによっても識別することができます。下の図 5 では、インダクタのインピーダンス位相を青色で、コンデンサの位相を赤色で示しています。インダクタ(青)は、低周波域では抵抗的な振る舞い(0°)から始まり、周波数が高くなるにつれて純粋な誘導性($+90^\circ$)へと近づいていきます。自己共振周波数を超えると、寄生容量が支配的となるため、位相は容量性(-90°)となります。一方、コンデンサ(赤)は -90° の容量性の挙動から始まり、自己共振点で 0° に達し、その後、寄生インダクタンスが支配的となる共振周波数以上では、誘導性($+90^\circ$)の挙動へと変化します。

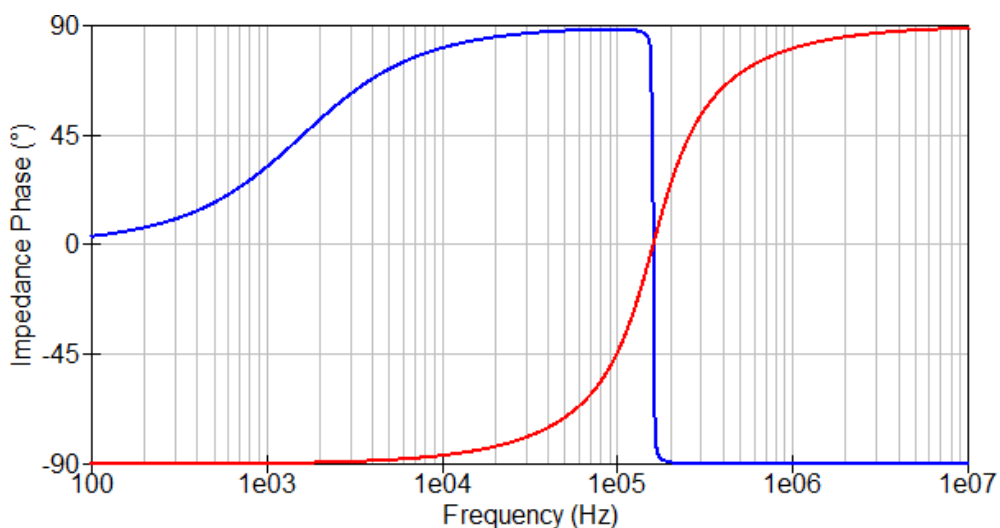


Figure 5: Capacitor & Inductor versus frequency (Impedance Phase)

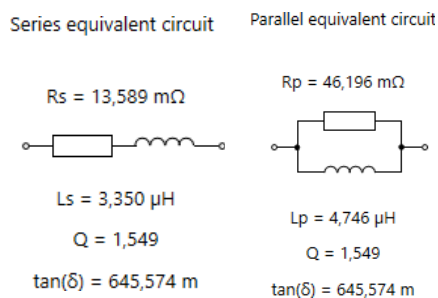
1.4 結果表示形式

インピーダンスおよびアドミタンスは複素数として表されるため、その結果を直感的に理解することが必ずしも容易ではありません。Bode Analyzer Suite には、インピーダンス測定データの解釈を容易にするための、いくつかの結果表示形式が用意されています。

1.4.1 固定周波数測定

Bode Analyzer Suite では、固定周波数測定設定を用いることで、特定の 1つの周波数におけるインピーダンス測定を行うことができます。 

この連続波(CW:Continuous Wave)測定モードでは、測定されたインピーダンスまたはアドミタンスを、下図に示すような単純な直列または並列の等価回路モデルへ直接変換することが可能です。



直列等価回路におけるパラメータ R_s および L_s または C_s に加えて、並列等価回路のパラメータ (R_p および L_p または C_p) も表示されます。Bode Analyzer Suite では、インピーダンスの位相が正の場合はインダクタンス (L_s 、 L_p) が表示され、位相が負の場合は静電容量 (C_s 、 C_p) が表示されます。

1.4.2 周波数掃引測定

周波数掃引測定では、インピーダンスの位相が周波数に応じて変化するため、寄生成分の影響を受ける実際の被測定デバイス(DUT)の複雑な挙動を、単純な直列等価回路モデルや並列等価回路モデルだけで表すことはできません。コンデンサおよびインダクタに対する非常に簡単な等価回路モデルを、下の図 6 に示します。



Figure 6: 単純な等価回路モデル

これらの比較的単純なモデルには 4つのパラメータが含まれており、測定データから手動で導出することが可能です。また、カーブフィッティング手法や数値最適化手法を用いることで、パラメータ同定を支援することもできます。現時点では、Bode Analyzer Suite において等価回路モデルを導出するためには、手動によるパラメータ同定プロセスが必要となります。なお、 L_s 、 R_s 、 C_s または L_p 、 R_p 、 C_p のデータは、インピーダンス測定結果を解釈し、パラメータを導出するうえで有用です。

1.4.3 インダクタの測定例

以下では、巻線方式の異なる 4 種類の 100 μ H インダクタについて測定を行った。:

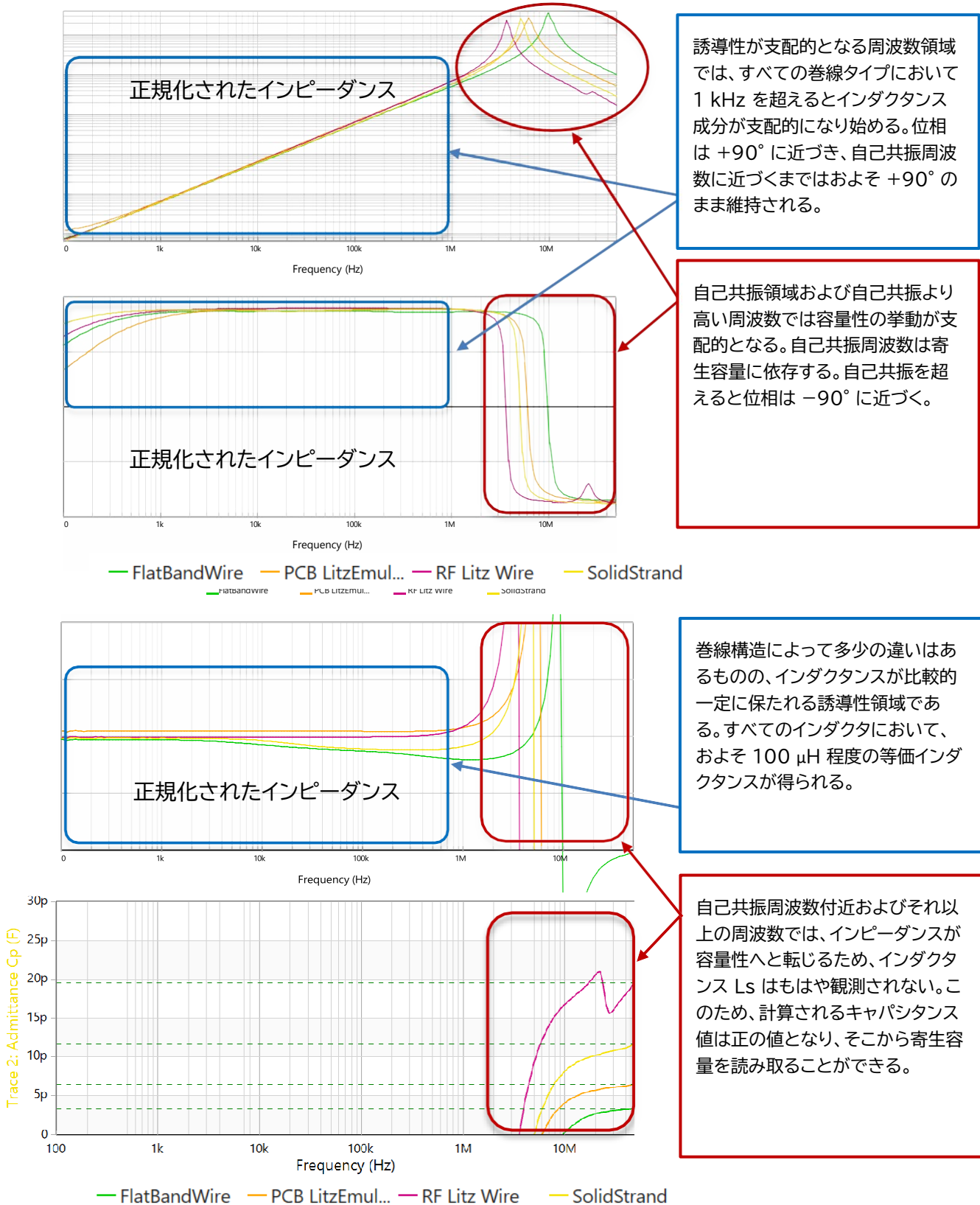


Figure 7: 100 μ H インダクタにおける 4 種類の巻線方式のインピーダンス特性

インダクタの損失を評価するうえで重要な指標となるのが直列抵抗 R_s である。以下の図は、周波数に対する測定された R_s の値を示している。1 MHz を超える領域では、自己共振周波数付近の影響を強く受ける点に注意が必要である。

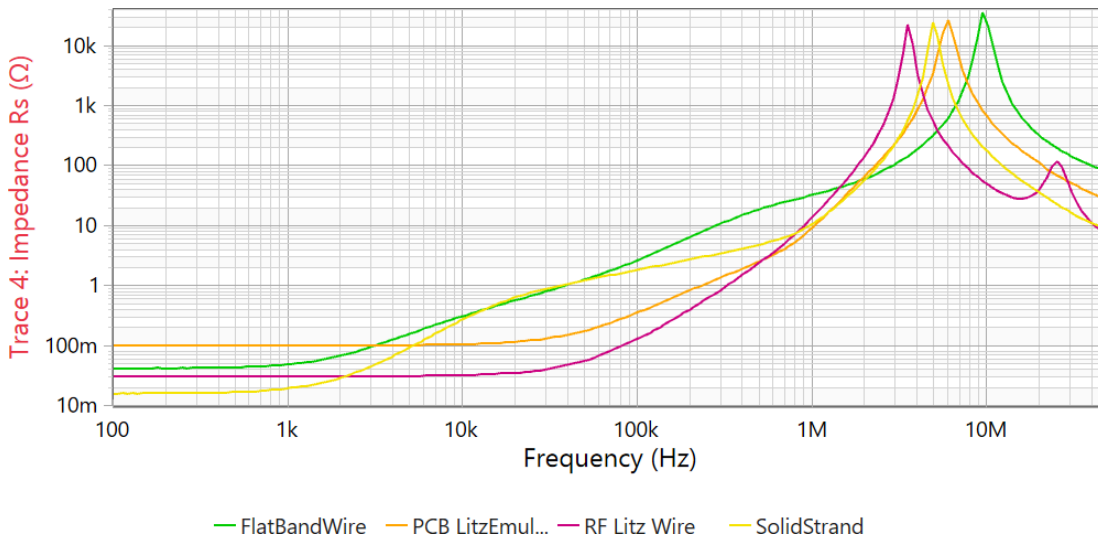


Figure 8: 異なる線材タイプにおける交流抵抗の周波数特性

1 kHz 以下の周波数では、交流抵抗は直流抵抗と等しく、周波数に対して一定の値を示すことから確認できる。1 kHz から 30 kHz の範囲では、表皮効果および近接効果により抵抗が上昇し始める。特にフラットワイヤとソリッド線の巻線では、周波数とともに抵抗が早い段階から増加する傾向が見られる。一方、RF リッツ線および PCB 巻線構造では、約 30 kHz までは交流抵抗がほぼ一定に保たれている。以下の表は、100 Hz における交流抵抗と 250 kHz における抵抗を比較したものである。

Cursor name	Frequency (Hz)	FlatBandWire (Ω)	PCB LitzEmulation (Ω)	RF Litz Wire (Ω)	SolidStrand (Ω)
Cursor 1	100	0,04	0,10	0,03	0,02
Cursor 2	250000	8,17	1,05	0,57	3,01

フラットバンド線材は、DC 抵抗が約 40 mΩしかないにもかかわらず、250 kHz における交流抵抗が 8 Ω に達している点は非常に驚くべき結果である。これは、周波数を 100 Hz から 250 kHz に上げた場合、AC 電流による損失が 200 倍に増加することを意味している。

RF リッツ線は最も良好な特性を示しており、約 30 mΩ の DC 抵抗が、250 kHz では 20 倍の 570 mΩ 程度に増加するにとどまっている。

なお、これらの測定は小信号条件で実施されている。大信号アプリケーションでは、さらなる磁気飽和の影響により損失が一層増加する可能性がある点に注意が必要である。

注: このインダクタの詳細および実際の測定の様子については、以下のウェビナー録画をご参照ください:

<https://youtu.be/T2OqewIUL3M?t=2754>

1.4.4 キャパシタ測定例

前節で示したインダクタに加えて、以下では 7 種類の 10 μF コンデンサを測定し、インピーダンスの大きさ、直列容量 C_s および直列インダクタンス L_s に基づいて結果を解析する。

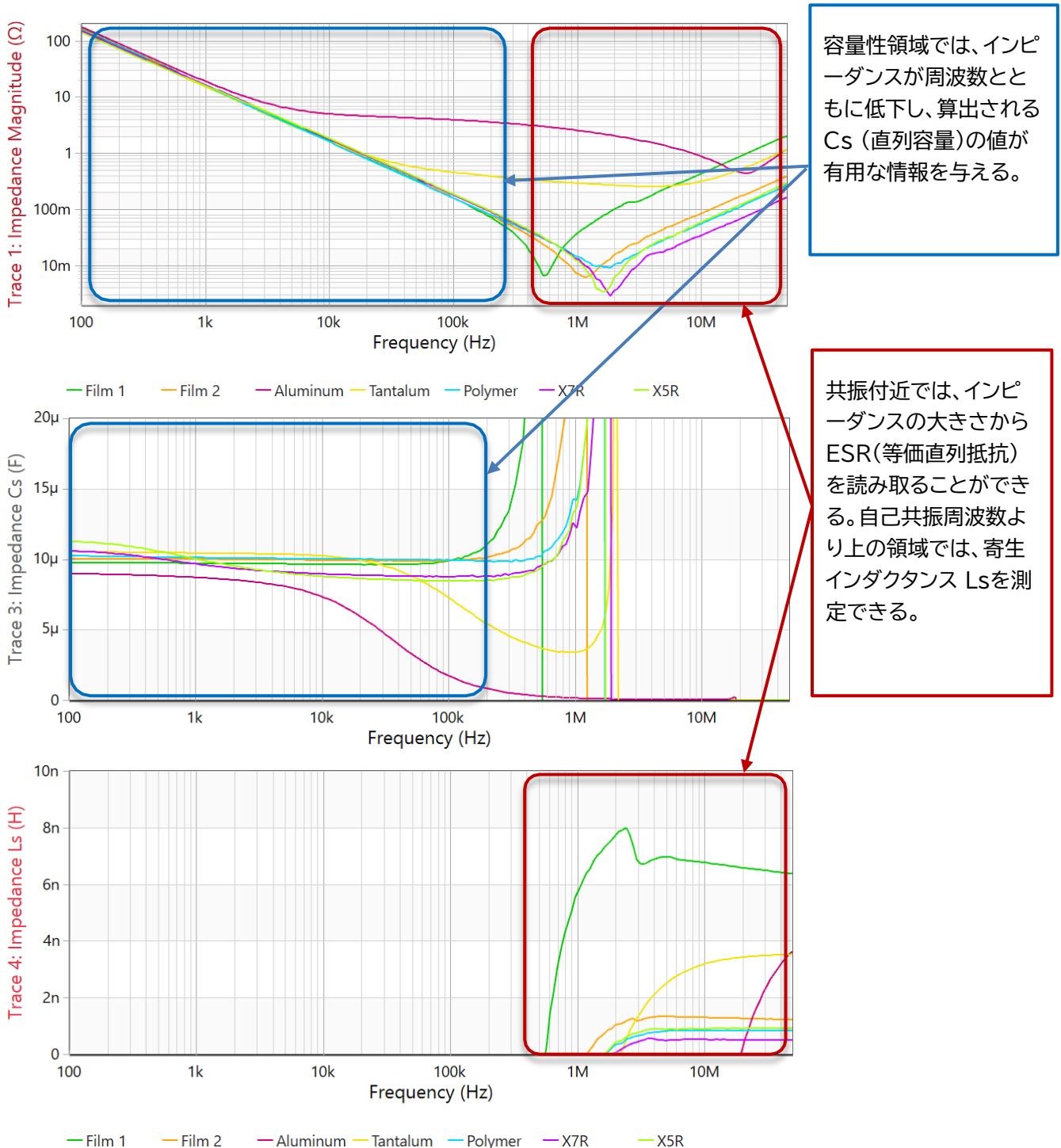


Figure 9: 7 種類の 10 μF コンデンサのインピーダンス特性

注: この測定の実演については、当社のウェビナー録画をご参照ください。:

<https://youtu.be/T2OqewIUL3M?t=1813>

2 インピーダンス測定技術

Bode 100 は、以下の 7 種類のインピーダンス測定方式を提供しています:

- 1ポート反射法(1ポート測定方式)—13ページの2.2.1参照
- インピーダンスアダプタ(3ポート測定方式)—14ページの2.2.2参照
- シャント・スルー法(2ポート測定方式)—16ページの2.2.3参照
- 直列抵抗付き拡張シャント・スルー法(2ポート測定方式)—18ページの2.2.4参照
- シリーズ・スルー法(2ポート測定方式)—20ページの2.2.5参照
- 電圧-電流ゲイン法(3ポート測定方式)—21ページの2.2.6参照
- 外部ブリッジ/外部カプラ(3ポート測定方式)—22ページの2.2.7参照

多様なインピーダンス測定方式が提供されていることで、高い柔軟性が得られる一方、測定手法の選択が複雑になる場合もあります。以下では、各測定方式とその利点・欠点を示し、お客様のアプリケーションに最適な測定方法を選択するための参考となる情報を提供します。

2.1 適切な測定セットアップの選択

最も重要な選択基準は、被測定デバイス(DUT)のインピーダンスの大きさです。また、インピーダンスの大きさは周波数によって変化する点にも注意してください(「1. はじめに」参照)。

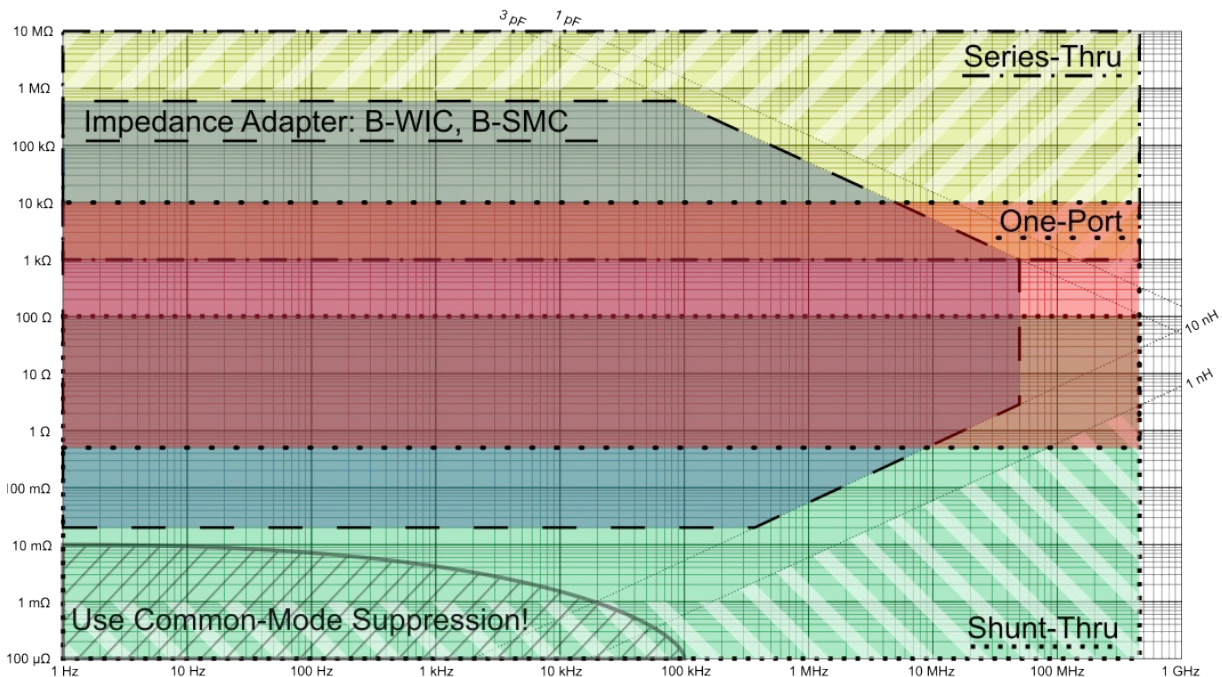


Figure 10: インピーダンス範囲チャート

Figure 10は、各測定方式が推奨されるインピーダンス範囲を示している。

0.5 pF および 1 nH の限界線に注意してください。これは、0.5 pF や 1 nH 未満を測定できないという意味ではありませんが、これらの極端な値に近づく場合には特に注意が必要です。特にオープンおよびショートのカリブレーションを行う際、カリブレーション用の素子自体が、測定対象に近い寄生要素(パラジティクス)を持つ可能性があります。たとえば、BNC スルーコネクタは 1 pF 程度の容量を持つことがあります。

ショートバーは容易に 1 nH 程度のインダクタンスを持つことがあります。極めて小さな容量値やインダクタンス値を測定する際には、これらの寄生素素を考慮する必要があります。

測定方法を選択する際のヒント

Impedance Adapter(インピーダンスアダプタ)法

この方式は、最も広いインピーダンス範囲と周波数範囲をカバーします。DUTをB-WICまたは B-SMCのコンポーネントテスト治具に接続できる場合、常に良い出発点となります。

•One-Port(1ポート)測定

同軸構造のみで構成され、周波数の制限がなく、最も手軽に開始できる測定方法です。ただし、高インピーダンスおよび低インピーダンス領域での感度が制限されるため、mΩ や MΩ といった範囲の測定には適していません。

•Shunt-Thru(シャント・スルー)法

シャント抵抗やセラミックコンデンサの ESR など、接触抵抗が測定誤差に影響するような極低インピーダンス測定に適します。4 線式接続により、接触抵抗の影響を排除できます。

•Series-Thru(シリーズ・スルー)法

数百 kΩ を超える高インピーダンス値を測定する場合に適しており、高インピーダンス領域で最も高い感度を持ちます。

DUTのインピーダンスが広い周波数範囲で大きく変化する場合があります。例として、容量が 2.2 nF の高 Q セラミックコンデンサを考えます。

100 Hz のリアクタンス: $X_c = 1/2\pi fc = 723k\Omega \rightarrow$ 約 1 MΩ に相当する高インピーダンス

自己共振周波数付近: インピーダンスは ESR のみに支配され、数 mΩ 程度となることもあります。

このように、測定対象のインピーダンスが周波数により極端に変化する場合、目的の測定内容に応じて複数の測定セットアップを使い分ける必要があります。

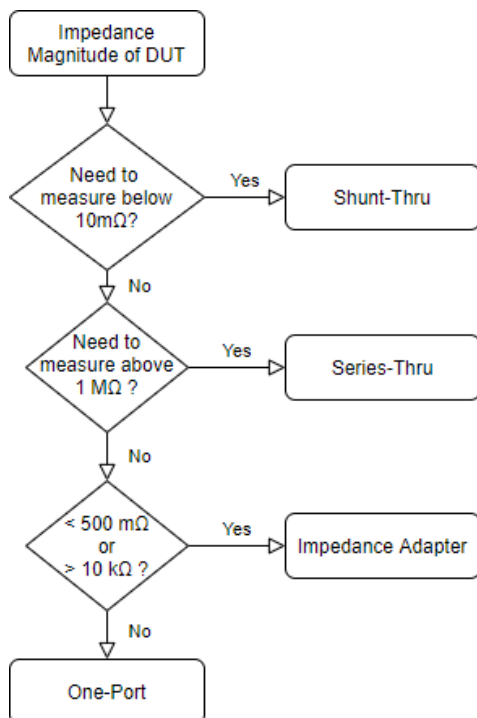


Figure 11: 最適な測定セットアップを選択する

以下では、さまざまな測定セットアップの詳細と例について説明します。

2.2 測定セットアップの詳細説明

2.2.1 One-Port(1ポート)測定

Bode 100 は、出力ポートでインピーダンス／反射を直接測定できます。内部の 50 Ω ソースインピーダンスを利用して、出力に接続されたインピーダンスを導き出します。DUT(被測定デバイス)は、下図に示すように出力に直接接続する必要があります。:

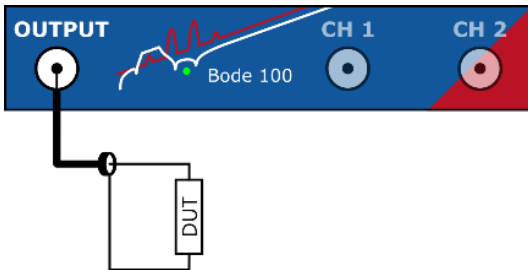


Figure 12: One-Port 測定セットアップ

本測定における最適な測定範囲は、およそ 0.5 Ω ~ 10 kΩ です。入念に Open / Short / Load 校正(可能であれば User-Range 校正)を行うことで、測定可能なインピーダンス範囲をさらに低インピーダンス側および高インピーダンス側へ拡張できます。

なお、この接続は 2 線式であり、接触抵抗による誤差の影響を受ける点に注意してください。さらに、DUT の一端は BNC シールドを介して Bode 100 の筐体(GND)に接続されることにも留意してください。

接続例:

最も単純な接続方法は、DUT を直接 BNC プラグにハンダ付けし、Bode 100 の出力または BNC ケーブルに接続する方法です。

なお、0.5 m の RG58 同軸ケーブルには、およそ 45 pF の寄生容量および約 150 nH の寄生インダクタンスが存在します。ケーブルの影響を除去するには、ケーブル末端で校正を行うことができます。詳細については、24 ページ以降の「Perform a Calibration(校正の実行)」の章を参照してください。



Figure 13: One-Port -DUTをBNCへ半田付け

ハンダ付けができない場合は、THT コンポーネント用に BNC から 4 mm バナナプラグへのアダプターを使用できます。



Figure 14: One-Port -BNCアダプターへ接続

先述のとおり、1ポート測定は小さなインピーダンス値や非常に高いインピーダンス値に対して感度が制限されます。この制限を克服するのがインピーダンスアダプタを用いた測定セットアップです。

2.2.2 インピーダンスアダプタ

「Impedance Adapter」モードは、B-WIC または B-SMC のコンポーネントテストフィクスチャと併用してインピーダンスを測定するために使用されます。

以下の図は、接続構成および簡略化された測定原理を示しています。

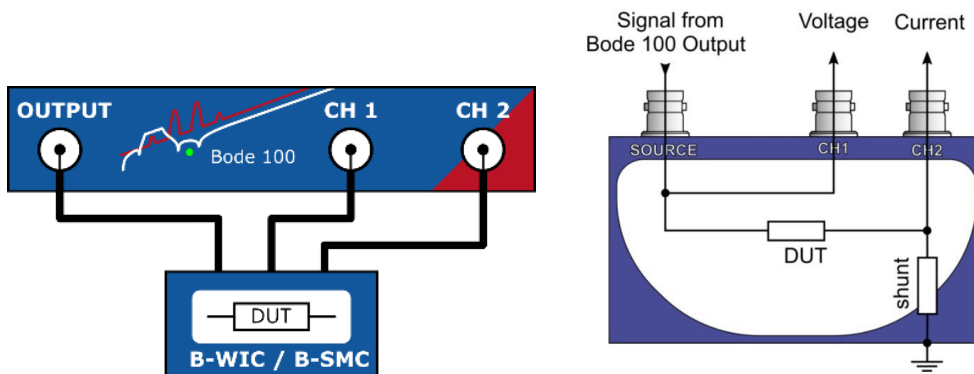


Figure 15: インピーダンスアダプタによる測定セットアップおよび測定原理

インピーダンスアダプタを用いた測定では、Bode 100 の両方の入力チャンネルを使用するため、1ポート測定よりも広い測定範囲を提供します。最適な測定範囲は、およそ $20 \text{ m}\Omega \sim 600 \text{ k}\Omega$ です。B-WIC および B-SMC にはケルビン接続が搭載されていないため、下限の $20 \text{ m}\Omega$ は推奨値となります。金メッキ接点により接触抵抗は低く抑えられていますが、それでも容易に $1 \text{ m}\Omega$ 程度に達する可能性があります。

また、DUT は GND に接続してはいけません(接続するとシャント抵抗がバイパスされてしまうため)。さらに、テストフィクスチャの寄生成分を除去するため、Open / Short / Load 校正を必ず実施する必要があります。

B-WIC および B-SMC は物理的に大きな部品向けには設計されていない点に注意してください。リード線を長くすると寄生容量が増加し、誤差の原因となる可能性があります(図16参照)。物理的に大きい部品を測定する場合は、1ポート測定を使用してください。

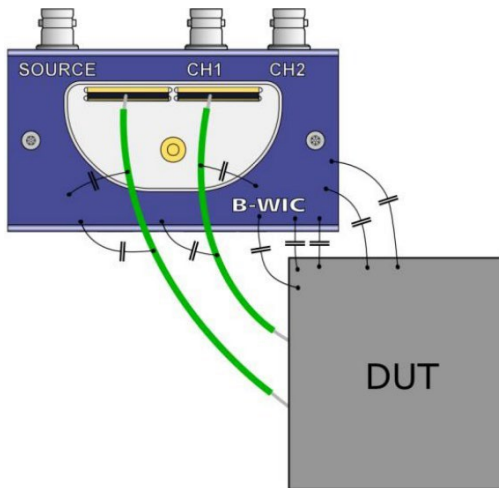


Figure 16: GND への寄生容量

測定セットアップの例:

次の写真は、THT コンデンサおよび SMD コンデンサを、それぞれ B-WIC と B-SMC を使用して測定した典型的な測定セットアップを示しています。

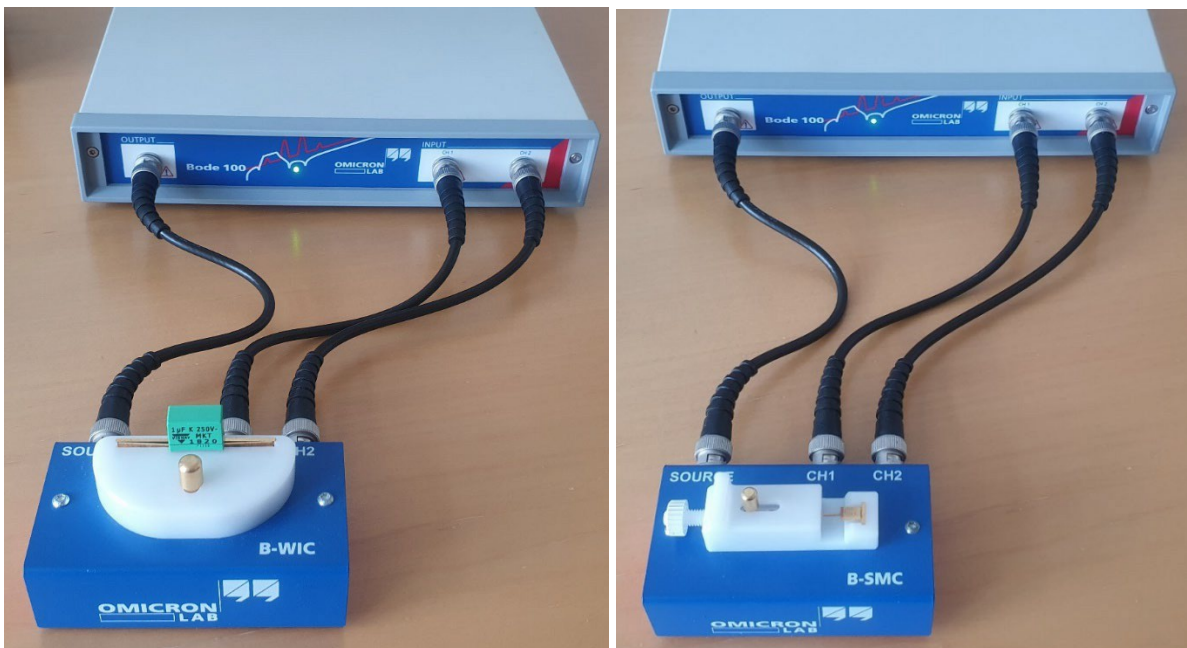


Figure 17: インピーダンスアダプタ – セットアップ例

B-WIC および B-SMC を使用した測定に関する詳細情報については、以下の URL から入手できるユーザーマニュアルを参照してください:

<https://www.omicron-lab.com/products/vector-network-analysis/accessories/impedance-test-fixtures-b-wic-b-smc/>

2.2.3 Shunt-Thru(シャント・スルー)

非常に低いインピーダンスを測定する場合、Shunt-Thru(シャント・スルー)方式が最適な方法となります。Shunt-Thru 測定ではケルビン接続を擬似的に実現します。信号源が DUT に電流を流し、CH2 が DUT における電圧降下を測定します。以下の図はその接続構成を示しています。

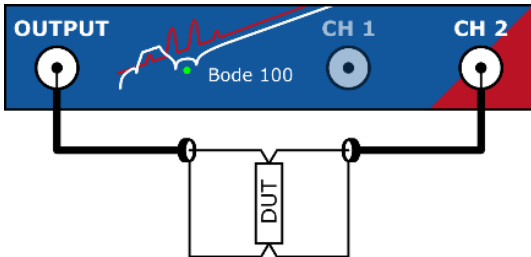


Figure 18: Shunt-Thru (シャント・スルー)測定セットアップ

Shunt-Thru 測定は S21 測定であり、次の式を用いてインピーダンスに変換されます:

$$Z = 25\Omega \frac{S_{21}}{1 - S_{21}}$$

測定は、Thru 校正(基礎となる S21 測定の校正)を実施するか、あるいは完全なインピーダンス校正(Open / Short / Load)を行うことで校正できます。

最適な測定範囲は、およそ1mΩ～100Ωです。慎重に行えば、100μΩ未満から数kΩまでのインピーダンス測定も可能です。また、DUT の一端はケーブルシールドを介して GND に接続される点に注意してください。

グラウンドループ誤差

Bode 100 では、信号源と入力チャンネルのグラウンドが内部で接続されているため、グラウンドループが形成されます。このグラウンドループにより、電流が信号源へ戻らず CH2 の GND に流れてしまうことがあり、これが系統的な誤差を引き起こします。低周波数で小さなインピーダンスを測定する場合、このグラウンドループ誤差はより大きくなります。以下の図は典型的な誤差の例を示しています:

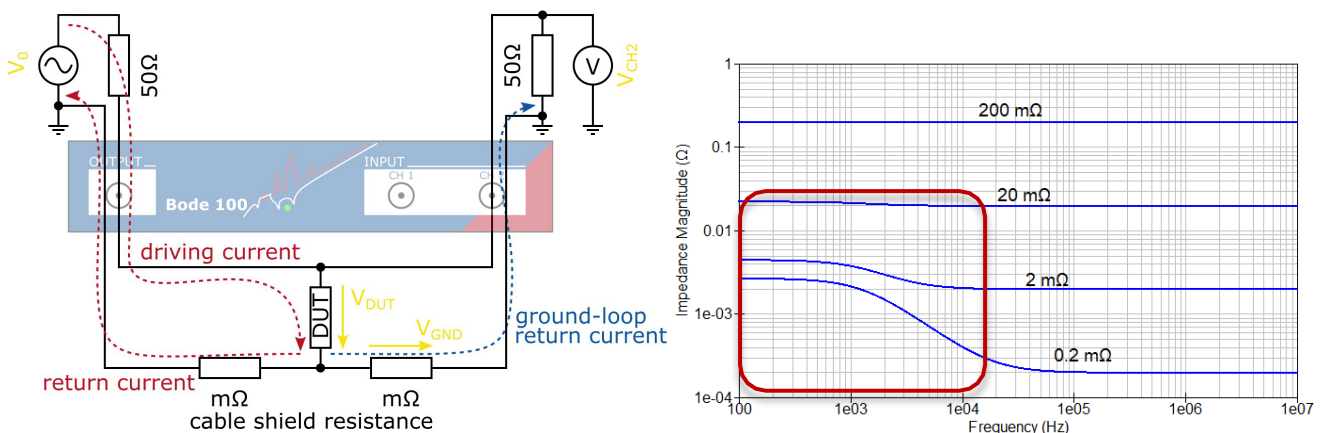


Figure 19: グラウンドループ誤差とインピーダンス測定への典型的な影響

インピーダンス値が $20\text{m}\Omega$ 未満で、およそ 10 kHz 以下の周波数を測定する必要がある場合、B-LCM のようなコモンモードチョーク、または PicotestJ2113A のような差動アンプを使用してグラウンドループ誤差を抑制することができます。

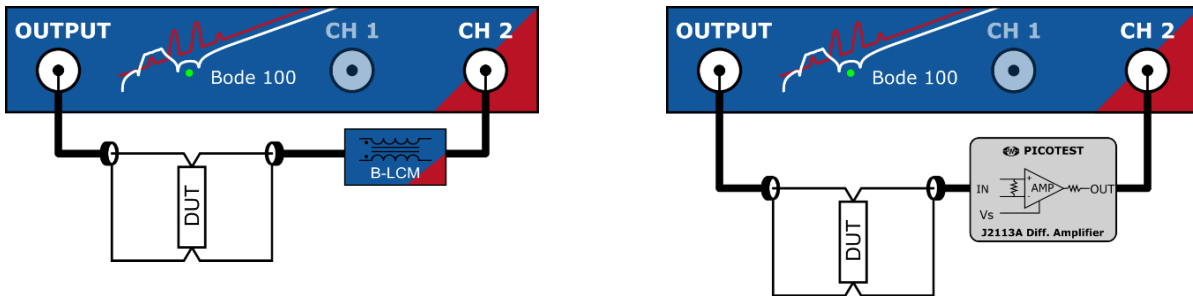


Figure 20: コモンモードチョークまたは差動アンプを使用したグラウンドループ誤差の抑制

以下の図は、 $2\text{m}\Omega$ の抵抗を、コモンモードチョークの有無で測定した結果を示しています。低周波数でインピーダンスが上昇している様子が明確に確認できます。コモンモードチョークを挿入することで、グラウンドループ電流が抑制され、測定誤差が低減されます。ただし、非常に低い周波数(この例では 10 Hz 未満)では、チョークは DC では動作しないため、誤差は依然として発生します。Picotest製の J2113A などのアクティブ・アイソレータであれば、DC まで動作させることが可能です。

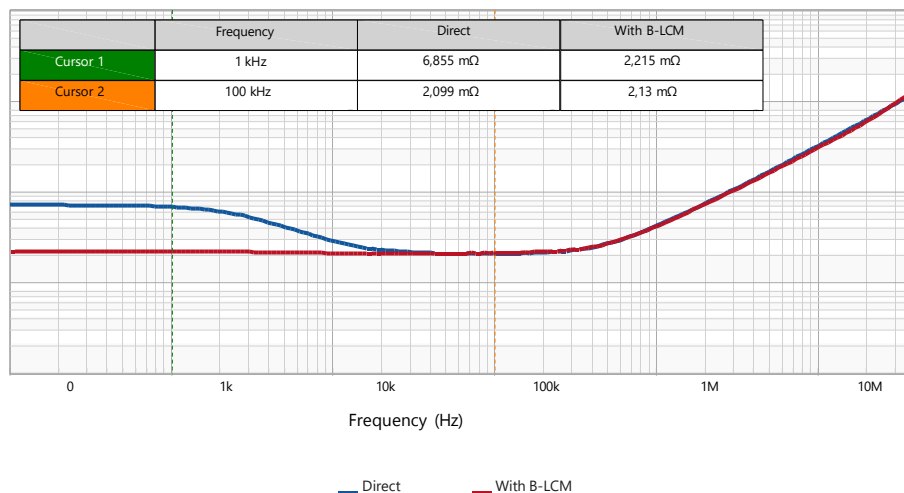


Figure 21: $2\text{m}\Omega$ の抵抗(DUT)におけるグラウンドループ誤差の測定例

$1\text{m}\Omega$ 以下の非常に低いインピーダンスを測定する場合、信号対雑音比(S/N 比)を向上させるためにアンプを使用することが推奨されます。B-AMP12 を使用することで、Bode100 の信号源出力を 13 dBm から 25 dBm へ増幅することができます。

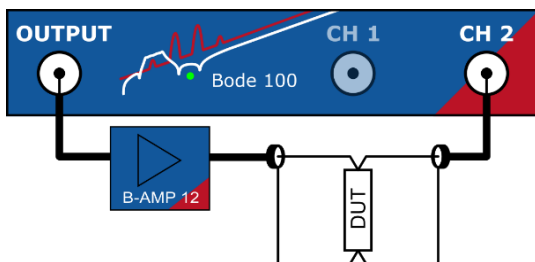


Figure 22: B-AMP12アンプを用いたShunt-Thru測定

Shunt-Thru (シャント・スルー)の接続例

以下の図は、Shunt-Thru 測定の典型的な応用例を示しています。

左側の写真では、DUT(インダクタ)が B-AMP 12 によって駆動され、B-LCM がグラウンドループを抑制するために使用されています。この構成により、低周波において低損失インダクタでも特性を測定できます。

右側の画像は、DUT をハンダ付けするための典型的なテストフィクスチャを示しています。PCB 上に取り付けする方法、または 2 つの BNC コネクタ間に直接実装する方法のどちらも使用できます。

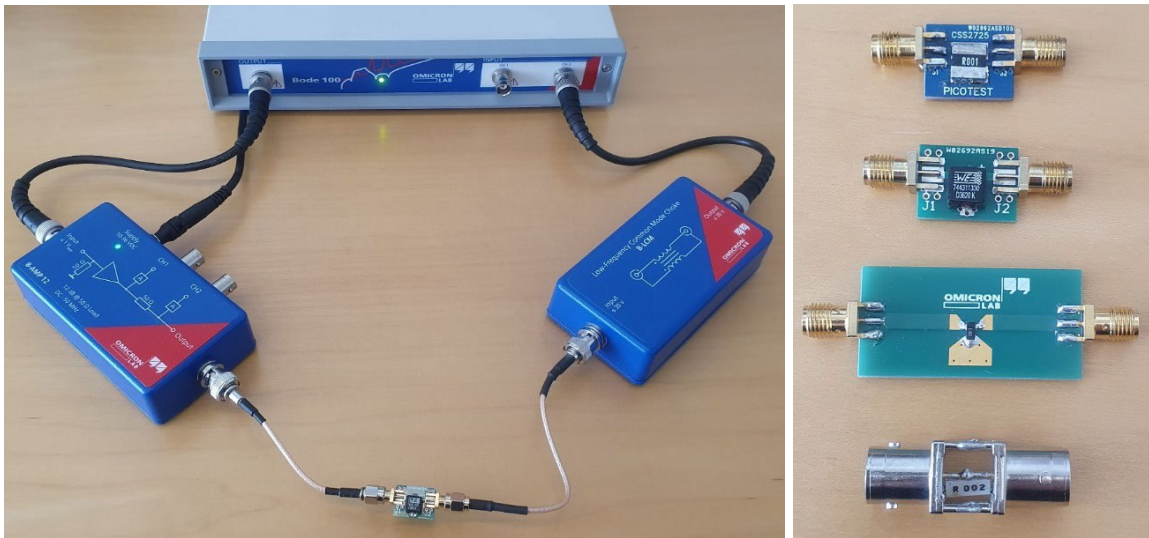


Figure 23: Shunt-Thru (シャント・スルー)測定例と DUT

Shunt-Thru (シャント・スルー)測定の詳細については、ユーザーマニュアルを参照するか、以下のインピーダンス関連ウェビナーをご覧ください: <https://youtu.be/T2OqewIUL3M?t=3381>

2.2.4 シリーズ抵抗を用いた拡張 Shunt-Thru

標準的な Shunt-Thru (シャント・スルー)測定に加えて、Bode 100 では拡張版 Shunt-Thru 法を用いてインピーダンスを測定することができます。追加されるシリーズ抵抗により、推奨される測定範囲がより高いインピーダンス領域へとシフトします。

さらに、シリーズ抵抗 R_s によって DC 電圧が分圧されるため、アクティブデバイスや帯電しているデバイスを測定する際に、これらの抵抗が Bode 100 を保護する役割も果たします。以下の図に、測定セットアップを示します。

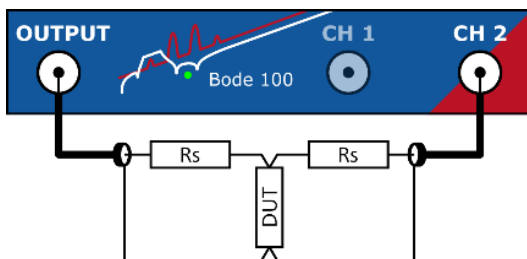


Figure 24: Shunt-Thru (シャント・スルー)測定セットアップ

最適なインピーダンス範囲は、シリーズ抵抗の値によって決まります。シリーズ抵抗が $R_s=200\ \Omega$ の場合、最適な測定範囲は $5\text{m}\Omega\sim 1\text{k}\Omega$ です。 $R_s=499\ \Omega$ の抵抗を使用した場合、最適範囲は $11\text{m}\Omega\sim 2.5\text{k}\Omega$ となります。

通常の Shunt-Thru 測定と同様に、DUT の一端は Bode 100 の筐体を介して GND に接続されるため、Shunt-Thru 測定と同様のグラウンドループ誤差の影響を受けます。

また、このセットアップでは、少なくとも Thru 校正を実施する必要があります。

測定例:

次の写真は、Picotest製のPITK01ボードを使用した拡張 Shunt-Thru測定セットアップを示しています。

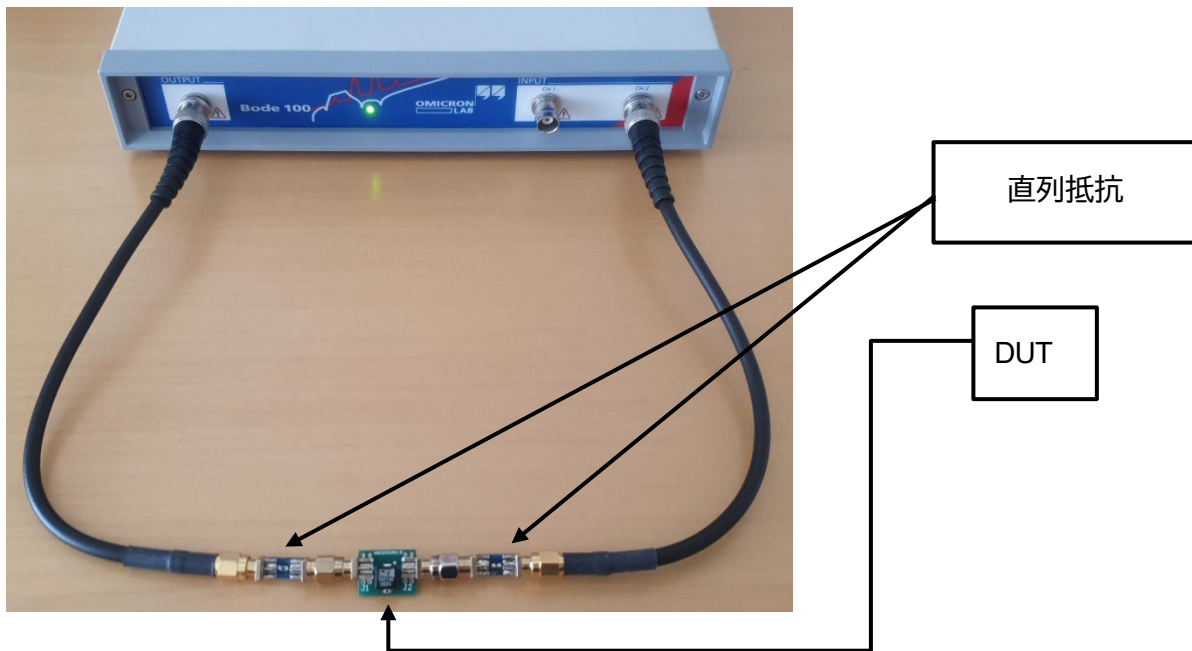


Figure 25: シリーズ抵抗を用いたShunt-Thru測定例

2.2.5 Series-Thru(シリーズスルー)

高いインピーダンス値が主な関心対象となる場合、Series-Thru セットアップが最適な方法です。以下の図は、その測定セットアップを示しています。

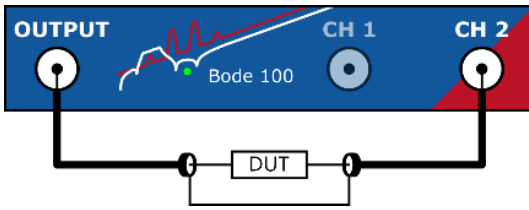


Figure 26: Series-Thru 測定セットアップ

最適なインピーダンス範囲は、およそ1kΩ~1 MΩ以上です。注意深く行えば、100 MΩ まで測定することも可能です。

DUT を GND に接続してはならない点に注意してください。

この測定セットアップは、Thru 校正、または Open / Short / Load によるインピーダンス校正のいずれでも校正が可能です。Bode 100 は S21 パラメータを測定し、以下の式を用いてインピーダンスを計算します。

$$Z = 100 \Omega \cdot \frac{1 - S_{21}}{S_{21}}$$

測定例

次の写真は、Bode 100 の出力信号を最大 25 dBm まで増幅するために B-AMP 12 を使用した Series-Thru 測定セットアップを示しています。これにより、測定可能なインピーダンス範囲をさらに拡張できます。

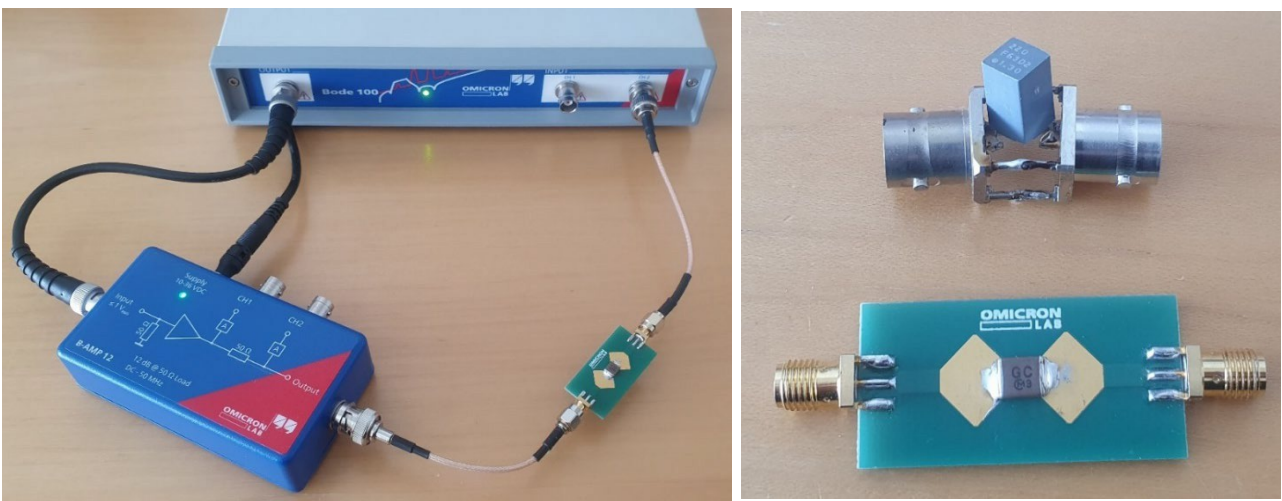


Figure 27: Series-Thru 測定例

2.2.6 電圧／電流ゲイン

電圧／電流設定では、電圧を電流で割ることでインピーダンスを測定します。電流信号は Bode 100 の CH1 に、電圧信号は CH2 に入力する必要があります。測定されるゲインは、そのままインピーダンスに相当します。

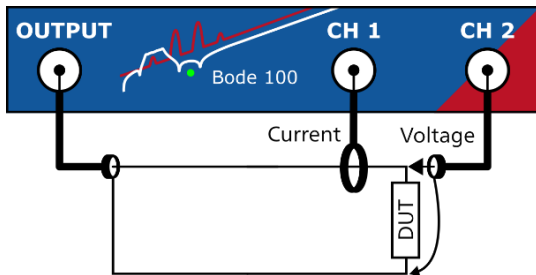


Figure 28: 電圧／電流ゲイン測定セットアップ

この測定セットアップは多くの用途に対応しており、測定可能なインピーダンス範囲は、プローブの感度や交流信号の振幅などに依存します。

測定は スルー(Thru)校正 または Open / Short / Load のいずれかで校正できます。

このセットアップの用途

電圧／電流ゲイン測定セットアップは、以下のようなアクティブ回路のインピーダンス測定に頻繁に使用されます：

- DC/DC コンバータの入力インピーダンス
- 電圧レギュレータの出力インピーダンス

また、以下のようなPicotest社製デバイスと併用できる柔軟性があります：

- Picotest J2111A 電流インジェクタ
- Picotest J2120A または J2121A ラインインジェクタ。

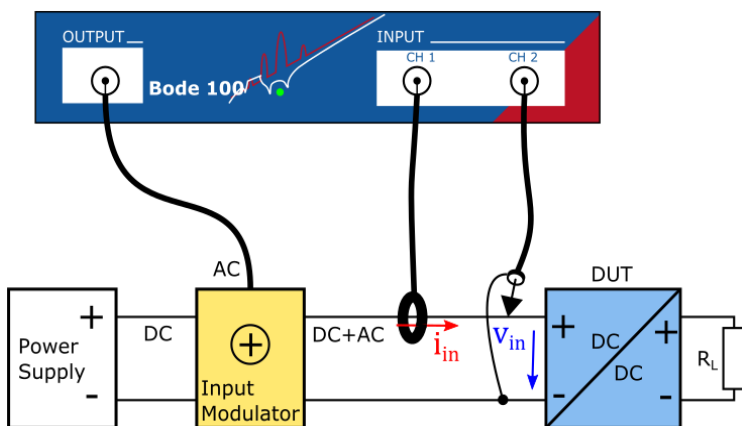


Figure 29: 電圧／電流ゲインの例

この測定セットアップの詳細およびその使用方法については、入力インピーダンス測定 または 出力インピーダンス測定 に関する対応するアプリケーションノートを www.omicron-lab.com にて参照してください。

2.2.7 外部ブリッジ／外部カプラのセットアップ

アンプや自作のインピーダンスブリッジを使用する場合、以下の 2つの測定方法により、次の図に示すように Bode 100 の 3つのポートすべてを用いてインピーダンスを測定できます。:

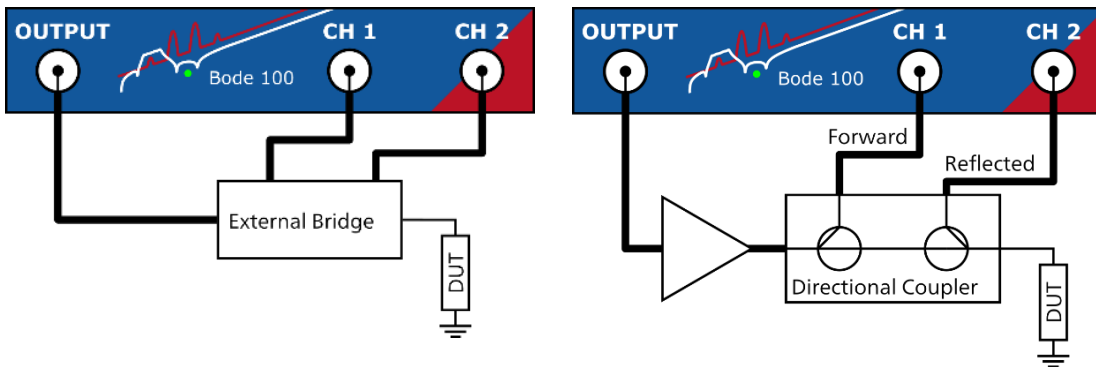


Figure 30: 外部ブリッジ／カプラ測定セットアップ

最適なインピーダンス範囲は固定ではなく、カプラ／ブリッジの指向性や、DUT(被試験デバイス)のインピーダンス変化に対する感度といったさまざまな要因に依存します。

任意のカプラ／ブリッジを使用してインピーダンスを測定できるようにするためには、Open / Short / Load で校正を行う必要があります。

このセットアップの用途

外部カプラまたは外部ブリッジのセットアップは、B-AMP12を使用した直接インピーダンス測定や下図のようなカスタムブリッジを使用する場合に最適です。

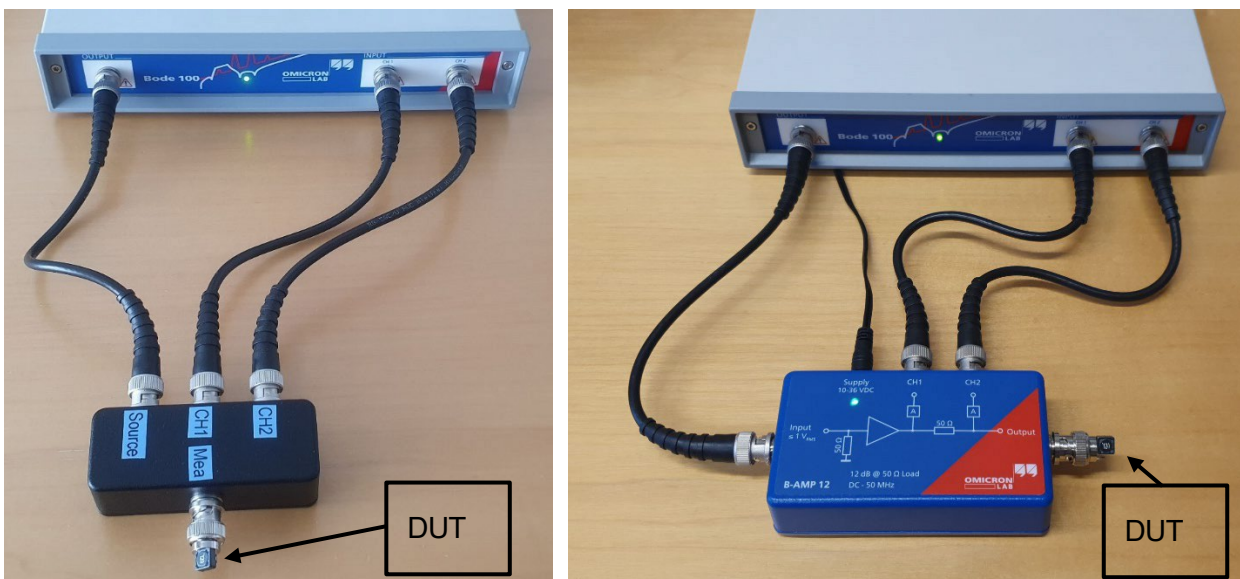


Figure 31: 外部ブリッジ／カプラ測定の例

B-AMP12ユーザーマニュアル または www.omicron-lab.com で入手可能な アプリケーションノート を参照してください。

3 信頼できる測定を行うために

測定を行う際には必ず「結果はどれくらい正確なのか？」という疑問が生じます。特に高周波領域でのインピーダンス測定では、この質問に答えるのは容易ではありません。インピーダンスの測定結果はさまざまな要因に依存し、主なものは以下のとおりです。

- 信号／ノイズ比・・・結果は安定しているか、ノイズにより乱されていないか？
- 測定セットアップの線形性・・・選択したセットアップに非線形素子(電圧依存性コンデンサ、インダクタ／トランスなど)が含まれていないか？
- 基準点(校正)校正は行われたか？・・・使用した校正標準器の精度はどうか？
- Bode 100 の線形性・・・信号が限界値に達していなければ、通常は問題にならない。

以下では、測定結果への信頼性を高めるためのいくつかのヒントを紹介します。

3.1 測定の検証

最も簡単な検証方法は、よく分かっている部品を測定することです。

例えば、Load 校正に使用した抵抗とは異なる値の単純な抵抗を測定します。SMD の薄膜抵抗(約 100 Ω)は、周波数応答が非常にフラットで、数百 MHz まで抵抗性の挙動を示します。

さらに良い方法は、2 種類の既知の値の抵抗を測定することです。(例:校正に 100 Ω を使用した場合測定対象として 68 Ω と 220 Ω を選ぶ)これにより、3つすべてのインピーダンス校正点に関する情報が得られます。

理想的には、DUT(被試験デバイス)のインピーダンスに近い既知の部品を測定することです。ただし DUT のインピーダンスが周波数によって変化する場合は、この方法が難しいこともあります。

検証用の DUT の例

- 約 100 Ω の SMD 抵抗(数百 MHz まで抵抗性の挙動を維持)

※ただし以下に注意:

- 小容量の抵抗は寄生インダクタンスが大きく、高周波で支配的になる。
- 大容量の抵抗は寄生容量が大きく、高周波で支配的になる。
- COG または NP0 コンデンサは広帯域で非常に線形。
- フィルムコンデンサは周波数に対して非常に線形だが、セラミックチップコンデンサより自己共振周波数が低い傾向がある。

線形性の確認

線形性を簡易チェックするには、励振信号レベルを変化させて測定結果を比較します。

- 結果は、ノイズの増減を除いて 本質的に変化しないのが正常
- 信号レベルを下げるとノイズが増える可能性がある

3.2 ノイズの低減

精度の高い測定結果を得るためには、測定値がノイズに埋もれてはなりません。測定結果のノイズを抑えるためにできることはいくつかあります。

- 可能な限り高い励振信号レベルを使用して、最良の信号／ノイズ比を得る。
- 特定の周波数で信号を低減する必要がある場合は、シェイプレベル(周波数に応じた可変励振レベル)を使用する。
これは、DUT が特定の周波数で高電圧レベルやスルーレートに敏感な場合に必要となる。
- 過負荷を起こさない範囲で最も小さなアッテネータを選択する。
- ノイズ除去を改善するために、受信帯域幅を低く設定する。
測定時間は長くなるが、スイープポイント数を減らすことでスイープ時間を抑えることも可能。
- シールドケーブルや同軸ケーブルを使用して、測定セットアップを改善する。
- 可能な限りケーブルを短くする。
- スイープ平均化(sweep-sweep averaging)を使用してノイズを低減する。

3.3 校正の実行

テストセットアップやケーブルの影響を補正したい場合には、キャリブレーション(校正)を行うことができます。Bode 100 には、ユーザーレンジ(User-range)キャリブレーションとフルレンジ(Full-range)キャリブレーション2種類のキャリブレーション方式が用意されています。以下では、それぞれの違いについて説明します。

ユーザーレンジ(User-Range)キャリブレーション vs フルレンジ(Full-Range)キャリブレーション

ユーザー範囲(User-range)キャリブレーションを実行すると、現在設定されているスイープ周波数とまったく同じ周波数で補正値が測定されます。

その利点は、補間を行う必要がないことです。一方欠点は、スイープ周波数を変更すると補正係数が失われてしまう点です。

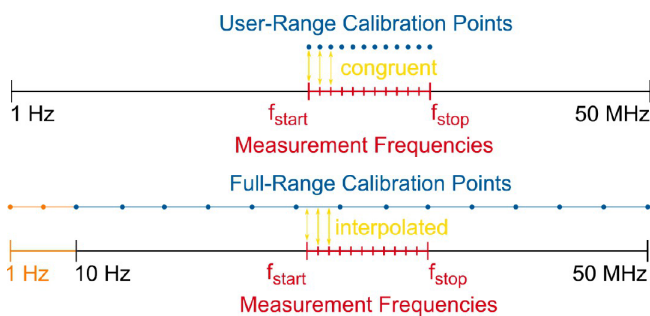


Figure 32: ユーザー範囲キャリブレーションとフル範囲キャリブレーション

これに対してフル範囲(Full-range)キャリブレーションは、10Hz～50MHzの全周波数範囲にわたって、あらかじめ定義された複数の周波数ポイントで校正用標準器を測定します。そして、それらの周波数の間を補間することで補正係数を算出します。

フル範囲キャリブレーションの利点はスイープ周波数を変更してもキャリブレーション結果が保持されることです。欠点は急激に変化する周波数応答(例:共振など)には補正が追従しにくい事です。

4 まとめ

Bode 100 は、直接法および間接法を含む 7 種類のインピーダンス測定手法を備えており、1 Hz から 50 MHz までの広い周波数範囲において、mΩ から MΩ レンジのインピーダンス測定が可能です。

最も簡単な測定方法としては、ワンポート測定およびインピーダンスアダプタ方式があります。これらの「簡易的な」測定手法で十分な精度が得られない場合（例えば、 $\mu\Omega$ や mΩ オーダーのインピーダンスを測定する場合など）でも、多様なインピーダンス測定方式を活用することで、用途に最適な測定構成を選択することができます。

キャリブレーションおよび補正機能を用いることで、アンプやアッテネータを含む測定系全体の影響を補償することが可能です。

さらに、専用の測定モードを使用することにより、スイッチング電源や電力供給ネットワーク(PDN)などのアクティブデバイスのインピーダンス測定も行うことができます。

各アプリケーションの詳細については、以下の OMICRON Lab のアプリケーションノート一覧をご参照ください。<https://www.omicron-lab.com/applications/vector-network-analysis/application-notes>



OMICRON Lab は、電子工学分野に携わる 研究者、技術者、教育関係者といった専門家向けに、スマートな計測ソリューションを提供することに特化した OMICRON electronics の事業部門です。計測作業を簡素化することで、お客様が本来の業務により多くの時間を割けるよう支援しています。

OMICRON Lab は 2006 年に設立され、現在では 40か国以上のお客様に製品とサービスを提供しています。アメリカ、ヨーロッパ、東アジアに拠点を構え、さらに国際的な販売代理店ネットワークを通じて、迅速かつ卓越したカスタマーサポートを実現しています。

OMICRON Lab の製品は、市場において最適な価格対価比(コストパフォーマンス)で提供される高品質を特長としています。高い信頼性と使いやすさにより、トラブルのない運用を可能にします。また、顧客との密接な関係と 25年以上にわたる社内での専門技術の蓄積により、現場のニーズに即した革新的な製品開発を実現しています。

製造元
OMICRON electronics GmbH

販売元
岩崎通信機株式会社

info@omicron-lab.com • www.omicron-lab.com

Smart Measurement Solutions®