

HIOKI

インピーダンス（LCR）測定の基礎および応用

日置電機株式会社
プロダクトマネジメント部
原野正幸
harano@hioki.co.jp



インピーダンス（LCR）測定の基礎および応用

HIOKI

目次

1. 基礎編（約50分間）
2. 質疑応答（約5分間）

～休憩（約10分間）～

3. 応用編（約50分間）
4. 質疑応答（約5分間）

インピーダンス（LCR）測定の基礎および応用

HIOKI

目次

1. 基礎編（約50分間）
2. 質疑応答（約5分間）

～休憩（約10分間）～

3. 応用編（約50分間）
4. 質疑応答（約5分間）

インピーダンス（LCR）測定の基礎および応用

HIOKI

基礎編

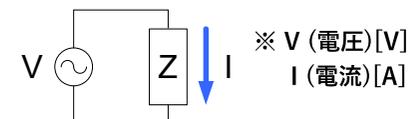
1. インピーダンスの前提知識
2. 測定方法（測定原理）
3. 測定ケーブルの接続方法
4. LCRメータの測定条件の決め方
5. 複合素子の測定と等価回路モード
6. 計測時の留意点および対処例

基礎編

1. インピーダンスの前提知識
2. 測定方法 (測定原理)
3. 測定ケーブルの接続方法
4. LCRメータの測定条件の決め方
5. 複合素子の測定と等価回路モード
6. 計測時の留意点および対処例

インピーダンスとは？

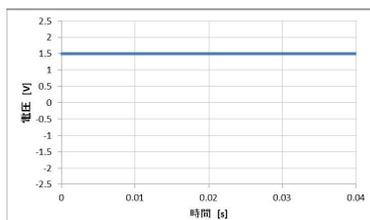
- ◆ Z (インピーダンス) 単位: Ω (オーム)
交流電流の流れにくさを示す量
- ◆ 直流回路では、抵抗(R)が電流を妨げる働きをする。
- ◆ 交流回路では、抵抗(R)のほかに、コイル (インダクタ、L) やコンデンサ (キャパシタ、C)も電流を妨げる働きをする。
コイルとコンデンサが電流を妨げる働きは、交流の周波数の影響を受ける。
- ◆ これらの影響を考慮したものがインピーダンスとなる。



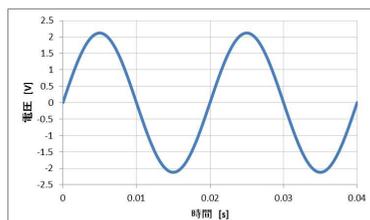
直流と交流

直流: 向き (極性) が時間によって変化しない

交流: 向き (極性) が周期的に変化する → 直流と異なる特性あり



直流 (バッテリーのイメージ)



交流 (商用電源のイメージ)



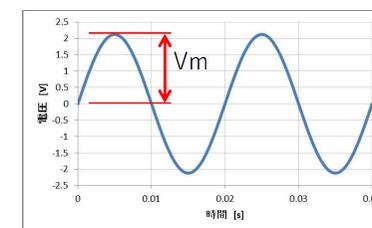
交流の大きさ

通常は実効値を用いて表す

(実効値・・・直流と同じ仕事量をする交流値)

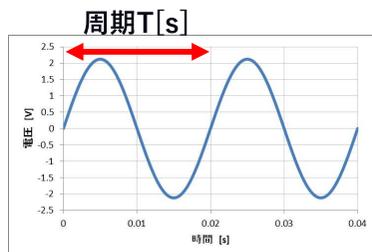
最大値と実効値には次の関係がある。

$$V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \quad (V_{rms}: \text{実効値} \quad V_m: \text{最大値})$$



周波数

周期 T [s]の逆数で、量記号 f 、単位は[Hz]
 \Rightarrow 周波数 f [Hz] = $1/T$



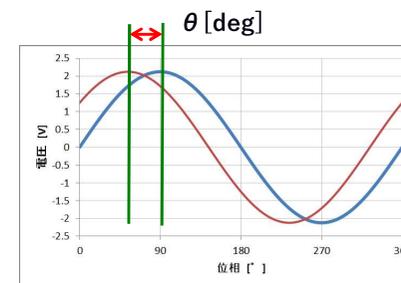
周波数が高い \rightarrow 波の変化が速い

周波数が低い \rightarrow 波の変化がゆっくり

位相

同じ周波数の2つの交流波形がある場合に、その間の時間的なずれを表す。(電圧波形と電流波形のズレ)

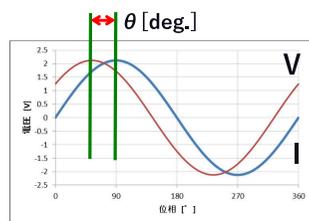
LCRメータでは、量記号 θ 単位に[°]または[deg.]を用いるのが一般的である。



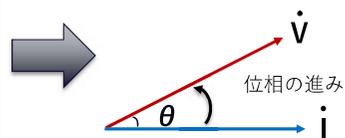
交流のベクトル表示

周波数が同じ正弦波交流の大きさや、位相関係を表すにはベクトル表示を用います。電圧 (V) が電流 (I) に対して θ [deg.] だけ進んでいたときは以下の図のようになります。

ベクトル表示を用いる時はVやIにベクトル量を示すドットを付けます。



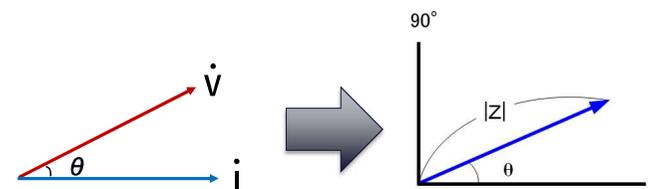
ベクトル表示すると



インピーダンスのベクトル表示

インピーダンスの計算

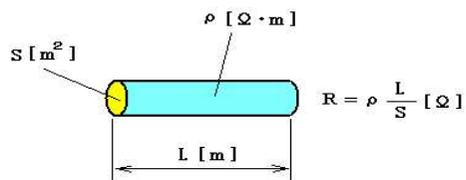
$$\dot{Z} = \frac{\dot{V}}{I} = \frac{|V| \angle \theta_v}{|I| \angle \theta_i} = \frac{|V|}{|I|} \angle (\theta_v - \theta_i) = |Z| \angle \theta$$



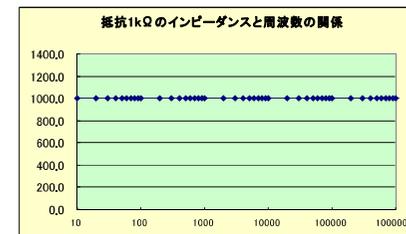
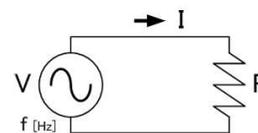
抵抗とは

R (レジスタンス) 単位: Ω (オーム)
電流の流れにくさを示す量
基本的には、電圧や周波数には依存しない

S:面積 L:距離 ρ:抵抗率



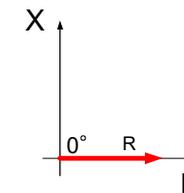
抵抗のみの回路



抵抗のみの回路では、
電流Iと電圧Vの間に
位相差は生じない。

両者の間には
次の関係がある。

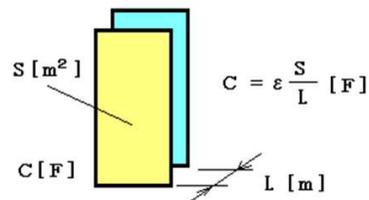
$$R = \frac{V}{I}$$



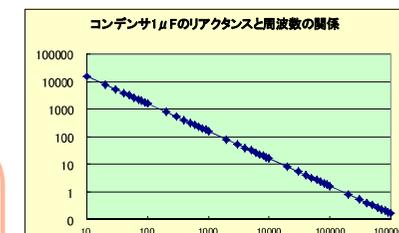
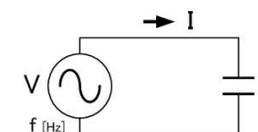
コンデンサとは

C (キャパシタンス) 単位: F (ファラッド)
絶縁物を挟んだ導電物のペアからなる部品。
電荷を溜める性質がある。
高い周波数の電流を通しやすい性質をもつ。

S:面積 L:距離 ε:誘電率



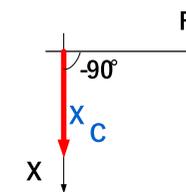
コンデンサのみの回路



コンデンサのみの回路では、
電流Iに対して
電圧Vが90°遅れる。

なお、コンデンサには交流電流の
流れを妨げる作用があり、
容量リアクタンス X_C [Ω]で表す。

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} [\Omega]$$

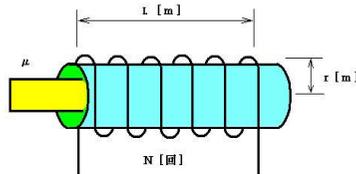


コイル (インダクタ) とは

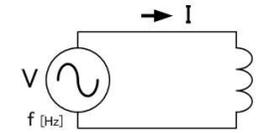
L (インダクタンス) 単位: H (ヘンリー)
導線を巻いた部品で、電流を流すと磁界を造る。
高い周波数の電流を通しにくい性質がある。

μ : 透磁率 r : コイルの半径 L : コイル長
 λ : 係数 N : 巻数

$$L = \lambda \frac{\mu \pi r^2 N^2}{l} \text{ [H]}$$



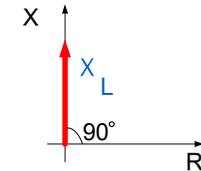
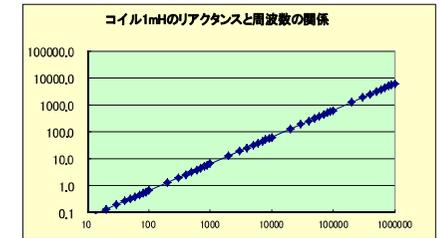
コイル (インダクタ) のみの回路



コイルのみの回路では、
電流Iに対して
電圧Vが90°進む。

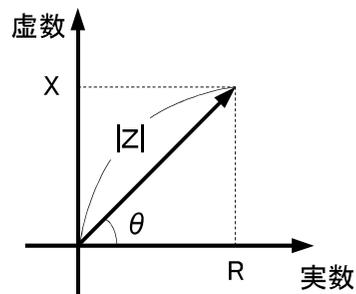
なお、コイルには交流電流の
流れを妨げる作用があり、
誘導リアクタンス X_L [Ω]で表す。

$$X_L = 2\pi f L \text{ [}\Omega\text{]}$$



インダクタンスとキャパシタンスの導出

インダクタンスLやキャパシタンスCなどの値は
インピーダンスZと θ から計算によって求められる。



- $L = X / (2\pi f)$
 $= Z \cdot \sin \theta / (2\pi f)$
- $C = 1 / (2\pi f \cdot X)$
 $= 1 / (2\pi f \cdot Z \cdot \sin \theta)$
- $R = Z \cdot \cos \theta$

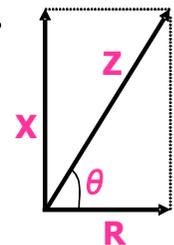
パラメータ QとDについて

- Q (Quality factor) はインダクタの純度を表す値です。

- QはリアクタンスZと抵抗Rの比になります。
Qの値が高いほど、抵抗成分が小さく
純粋なインダクタです。

$$Q = \frac{X}{R}$$

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



- コンデンサでは損失係数D (D=1/Q) が測定されます。

インピーダンスについて (まとめ)

	位相差 θ	リアクタンス X	Z 、 θ からの 計算式
抵抗 R	なし	$0[\Omega]$	$Z \cdot \cos \theta$
コンデンサ C	I に対し V が 90° 遅れる	$X_C = \frac{1}{2\pi f C} [\Omega]$	$1 / (2\pi f \cdot Z \cdot \sin \theta)$
コイル L	I に対し V が 90° 進む	$X_L = 2\pi f L [\Omega]$	$Z \cdot \sin \theta / (2\pi f)$

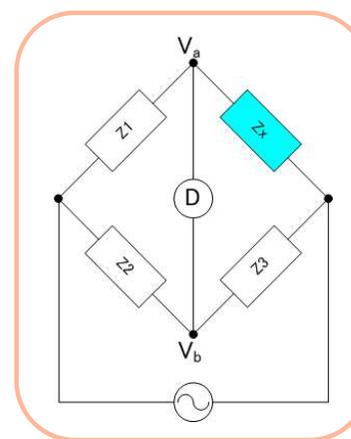
基礎編

1. インピーダンスの前提知識
2. 測定方法 (測定原理)
3. 測定ケーブルの接続方法
4. LCRメータの測定条件の決め方
5. 複合素子の測定と等価回路モード
6. 計測時の留意点および対処例

測定方法 (測定原理)

- ブリッジ法
- I-V法
- 自動平衡ブリッジ法
- RF I-V法

ブリッジ法



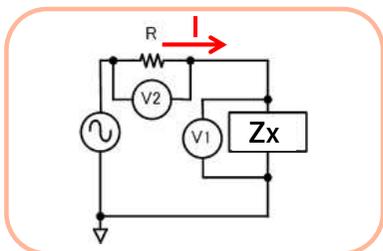
- 検流計Dに電流が流れないように $Z1 \sim Z3$ を調整する。

$$V_a = V_b \rightarrow \frac{Z_x}{Z_1} = \frac{Z_3}{Z_2}$$

- 未知のインピーダンス Z_x は次式で求められる。

$$Z_x = \frac{Z_1}{Z_2} Z_3$$

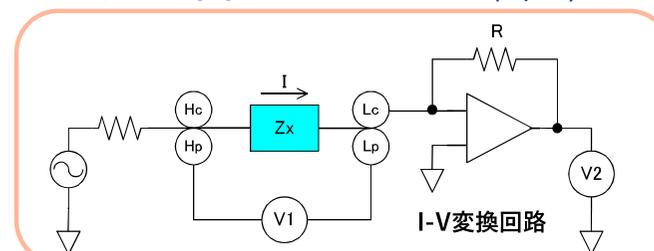
I-V法



- 測定された電圧と電流からインピーダンスを求める
- 電流は既知の抵抗Rの両端電圧を測定し、計算で求める

$$Z_x = \frac{V1}{I} = V1 \frac{R}{V2}$$

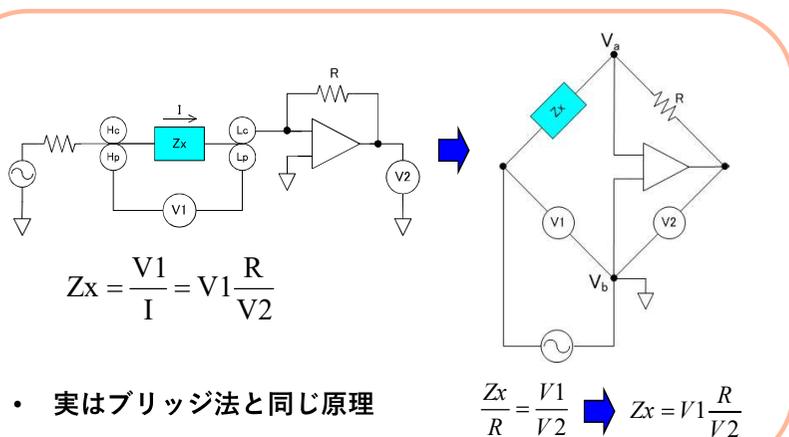
自動平衡ブリッジ法 (1/3)



- I-V変換回路はLc端子が0V (平衡) になるように動作する。
- 被測定物Zxの両端の電圧V1とZxに流れる電流Iを検出する。

$$Z_x = \frac{V1}{I} = V1 \frac{R}{V2}$$

自動平衡ブリッジ法 (2/3)



- 実はブリッジ法と同じ原理

$$\frac{Z_x}{R} = \frac{V1}{V2} \Rightarrow Z_x = V1 \frac{R}{V2}$$

自動平衡ブリッジ法 (3/3)

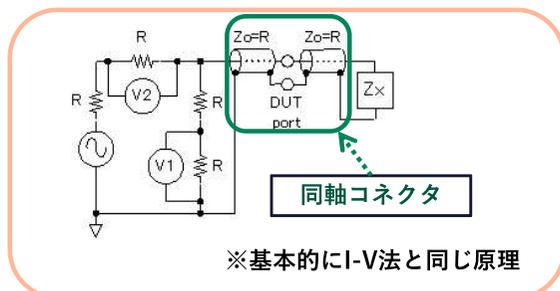
長所

- 広い周波数をカバー (1mHz~100MHz)
- インピーダンス測定範囲が広い

短所

- 高周波数までカバーできない
- 数MHzを超える周波数では、複雑なI-V変換回路が必要となる

RF-IV法 (1/2)



- 被測定物 Z_x の両端の電圧 $V1$ と、 Z_x に流れる電流（電流検出抵抗の両端電圧 $V2$ ）を測定する
- 高周波同軸の特性インピーダンスに整合した回路と高周波同軸コネクタの使用により、高周波インピーダンス測定が可能

RF-IV法 (2/2)

長所

- 高精度（1%程度）かつ高周波数で広いインピーダンス測定レンジで測定可能。
（ネットワークアナライザと比較して）

短所

- 測定周波数帯域がテストヘッド内のトランスによって制限されるので広帯域化が難しい。

測定方法（測定原理）（まとめ）

測定方法	長所	短所
ブリッジ法	高精度（0.1%程度）	高速化に不向き
I-V法	接地された試料でも測定可能	インピーダンスの大きさに応じて電圧計の影響を受ける
自動平衡ブリッジ法 ※多くのLCRメータで採用	広い周波数をカバー（1mHz~100MHz） インピーダンス測定範囲が広い	数MHzを超える周波数では、複雑なI-V変換回路が必要 100MHzを超える高周波数までカバーできない
RF I-V法 ※高周波LCRメータで採用	ネットワークアナライザと比較して、高精度（1%程度）かつ高周波数で広いインピーダンス測定レンジで測定可能	測定周波数帯域がテストヘッド内のトランスによって制限されるので広帯域化が難しい

基礎編

- インピーダンスの前提知識
- 測定方法（測定原理）
- 測定ケーブルの接続方法
- LCRメータの測定条件の決め方
- 複合素子の測定と等価回路モード
- 計測時の留意点および対処例

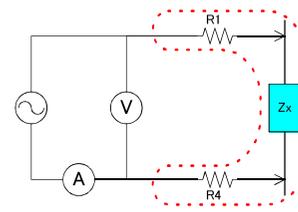
測定ケーブルの接続方法

- 2端子法
- 4端子法
- 5端子法
- 4端子対法

2端子法

【2端子法】

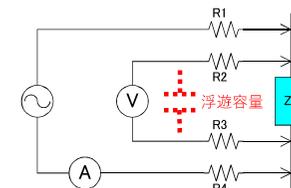
- 測定値は $Z_x + R_1 + R_4$
- R_1, R_4 :
ケーブル抵抗や接触抵抗
- Z_x が低インピーダンスの時は誤差大



4端子法

【4端子法】

- 電圧計はインピーダンス大
- 測定値は Z_x
- Z_x が低インピーダンスの時に有効
- ケーブル間浮遊容量の影響を受ける可能性あり

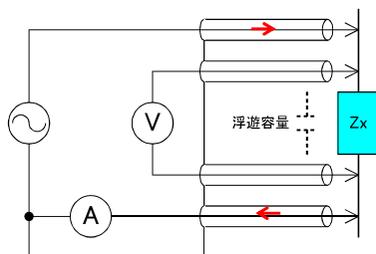


5端子法

シールドケーブルを使用

浮遊容量の影響を低減し、低インピーダンスから高インピーダンスまで測定誤差を低減できる

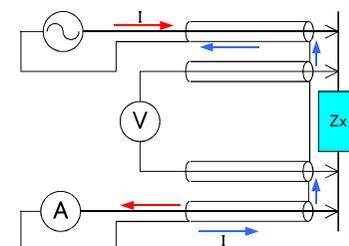
ただし、測定電流による磁界の影響は避けられない



4端子対法

ケーブルのシールドを利用して
電流の往路と復路を重ねる

測定電流によって生じる磁界の影響を低減し、
低インピーダンスから高インピーダンスまで、
誤差を低減した測定が可能



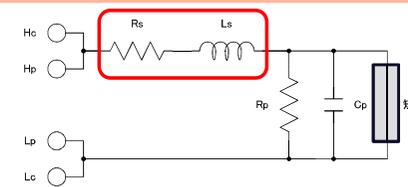
測定ケーブルの接続方法 (まとめ)

接続方法	長所	短所
2端子法	簡単・安価	ケーブル抵抗、接触抵抗が含まれるため低インピーダンス測定では不向き
4端子法	ケーブル抵抗、接触抵抗の影響を受けない	ケーブル間の浮遊容量の影響を受ける
5端子法	浮遊容量の影響を低減 低インピーダンスから高インピーダンスまで測定誤差を低減	測定電流による磁界の影響を受ける ※電流経路のケーブル同士を寄り線にすることで影響を低減可能
4端子対法 ※LCRメータは一般的に4端子対構造	測定電流によって生じる磁界の影響を低減 低インピーダンスから高インピーダンスまで測定誤差を低減	ケーブルのシールドを接続しリターン経路を作る必要がある

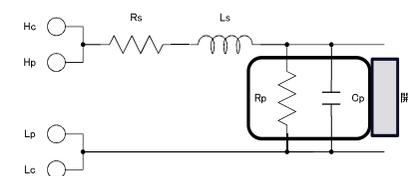
残留インピーダンスの補正

ショート補正・オープン補正により、ケーブルのインピーダンスやプローブ間の浮遊容量を補正できる

ショート補正
(インピーダンスがゼロ)



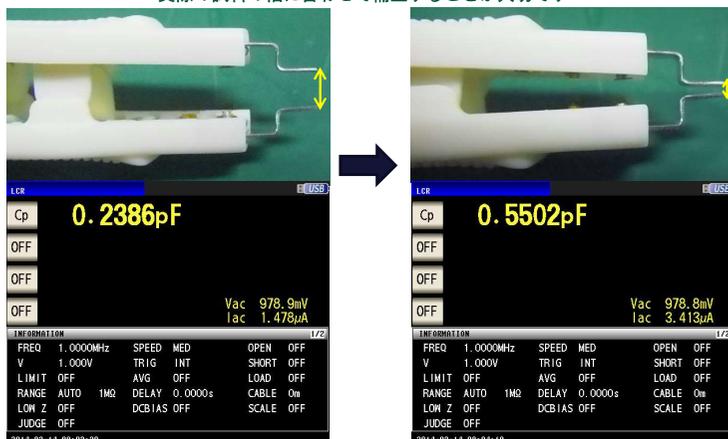
オープン補正
(インピーダンスが∞)



必ずケーブルを
実際の測定時と
同様の状態にして
補正を実行して
ください。

オープン補正の電極間隔

電極間隔の違いで0.3pFも浮遊容量の違いが生じる例
実際の試料の幅に合わせて補正することが大切です



基礎編

1. インピーダンスの前提知識
2. 測定方法 (測定原理)
3. 測定ケーブルの接続方法
4. LCRメータの測定条件の決め方
5. 複合素子の測定と等価回路モード
6. 計測時の留意点および対処例

測定条件の設定 (1/7)

測定周波数の選択、測定信号レベルの選択

1. メーカーが規定している条件に合わせる
2. 実回路での動作条件に合わせる

部品によっては測定条件によって測定結果が変わるものもある
→ 条件を揃えることが重要

測定条件の設定 (2/7)

JIS C5101でコンデンサの測定条件が決まっています

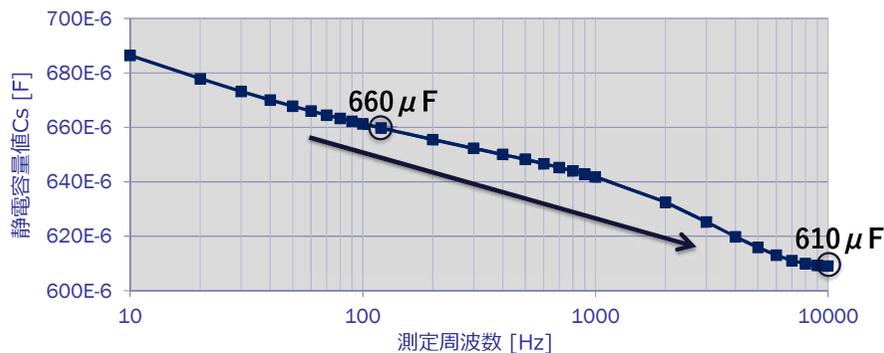
コンデンサの種類	容量範囲	測定周波数	HIOKI対応機種
電解コンデンサを除くコンデンサ	1000pF以下	100kHz, 1MHz, 10MHz (1MHz基準)	3506-10
	1000pFを超え10μF以下	1kHz又は10kHz (1kHz基準)	3504-40 3504-50 3504-60
	10μFを超えるもの	50Hz(60Hz)又は100Hz(120Hz)	
電解コンデンサ	-	100Hz~120Hz	3511-50 IM3523

【参考】
ニチコン株式会社様
アルミニウム電解コンデンサ
データシートより

仕様	
項目	
カテゴリ温度範囲	-55~+105°C
定格電圧範囲	4~50V
定格静電容量範囲	0.1~1500μF
定格静電容量許容差	±20% (120Hz, 20°C)

測定条件の設定 (3/7)

公称容量680μF電解コンデンサの周波数特性



測定条件の設定 (4/7)

JIS C5101-22 表面実装用固定磁器コンデンサ種類2 (高誘電率系)

定格静電容量	定格電圧	測定周波数	測定電圧
$C \leq 100\text{pF}$	全て	1MHz	$1.0 \pm 0.2\text{Vrms}$
$100\text{pF} < C \leq 10\mu\text{F}$	6.3Vを超える	1kHz	$1.0 \pm 0.2\text{Vrms}$
	6.3V以下	1kHz	$0.5 \pm 0.2\text{Vrms}$
$C > 10\mu\text{F}$	全て	100Hz又は120Hz	$0.5 \pm 0.2\text{Vrms}$

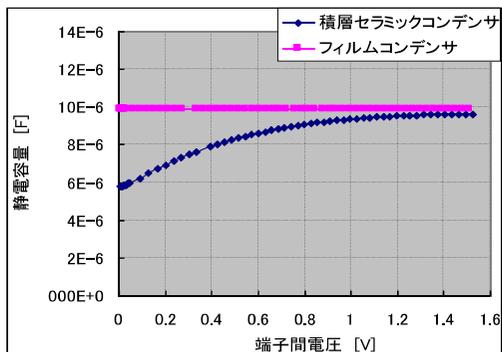
測定条件

公称静電容量	測定周波数	測定電圧
*1 $C \leq 10\mu\text{F}$ (10V以上)	$1 \pm 0.1\text{kHz}$	$1.0 \pm 0.2\text{Vrms}$
$C \leq 10\mu\text{F}$ (6.3V以下)	$1 \pm 0.1\text{kHz}$	$0.5 \pm 0.1\text{Vrms}$
$C > 10\mu\text{F}$	$120 \pm 24\text{Hz}$	$0.5 \pm 0.1\text{Vrms}$

【参考】
株式会社村田製作所様
チップ積層セラミックコンデンサ
データシートより

測定条件の設定 (5/7)

高誘電率系 (種類2) のセラミックコンデンサは
電圧依存性がある



測定条件の設定 (6/7)

コア入りのインダクタ (コイル) は
電流依存性があり、測定電流によってL値が異なる



コイルの1kHzと100kHzのレベル特性 (IM3570測定)

測定条件の設定 (7/7)

■電気的特性

□特性規格表

L (μH)	許容差	測定周波数 (kHz)	直流抵抗 (Ω)		定格電流 (A)*	
			max.	typ.	Idc1 max.	Idc2 typ.
1.3	±30%	100	0.022	0.019	2.56	4.32
1.8	±30%	100	0.028	0.023	2.22	3.88
2.7	±30%	100	0.033	0.028	1.82	3.53
3.3	±30%	100	0.037	0.032	1.74	3.26

【参考】
TDK株式会社様
電源回路用インダクタ
データシートより

データシートに測定信号レベルに関する記載が
ない場合はメーカーに確認する必要あり

※インダクタは記載がない場合が多い

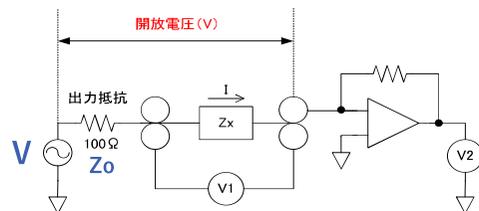
測定周波数、測定信号の大きさ (電圧、電流) といった測定条件に注意

測定信号レベルの設定 (1/3)

測定信号レベル設定は3種類ある

- 開放電圧設定 (V設定)
- 定電圧設定 (CV設定)
- 定電流設定 (CC設定)

測定信号レベルの設定 (2/3)



開放電圧設定 (V) : 開放電圧レベルを設定

※出力抵抗によって、印加される電圧・電流が異なります

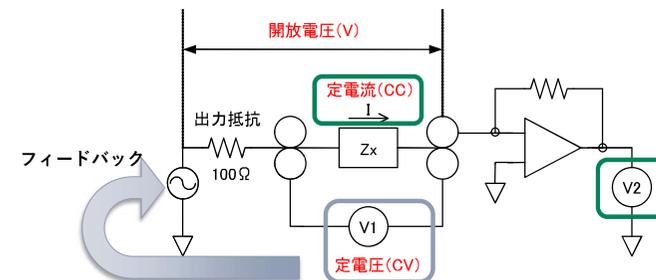
$$V1 = \frac{Zx}{Zo + Zx} V$$

計測器によって出力抵抗が異なる場合あり

→設定は同じでも実際に測定対象にかかる電圧、電流が異なることも!

⇒ そこで・・・

測定信号レベルの設定 (3/3)



定電圧設定 (CV) : 試料端子間の電圧レベルを設定

→高誘電率MLCCなど、電圧依存性のある素子を測定する場合

※ V1(電圧) が設定値になるように発生部をソフトウェアで制御

定電流設定 (CC) : 試料に流れる電流レベルを設定

→コア入りインダクタなど、電流依存性のある素子を測定する場合

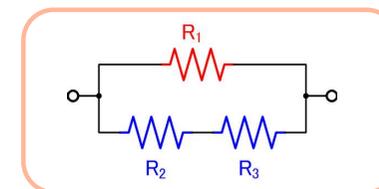
※ I(電流) が設定値になるように発生部をソフトウェアで制御

基礎編

1. インピーダンスの前提知識
2. 測定方法 (測定原理)
3. 測定ケーブルの接続方法
4. LCRメータの測定条件の決め方
5. 複合素子の測定と等価回路モード
6. 計測時の留意点および対処例

複合素子の測定 (1/5)

例えば、このような素子をLCRメータで測定すると



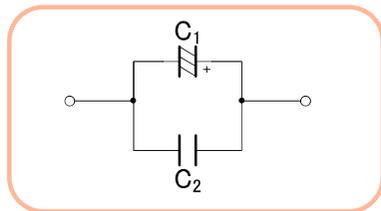
得られる測定値は $\frac{R_1 \times (R_2 + R_3)}{R_1 + (R_2 + R_3)}$

となる。

R1のみを分離して測定することはできない。

複合素子の測定 (2/5)

同様に、このような素子をLCRメータで測定すると



得られる測定値は

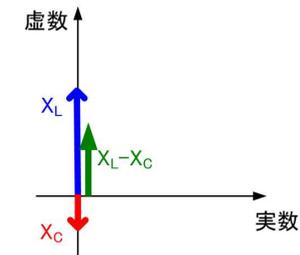
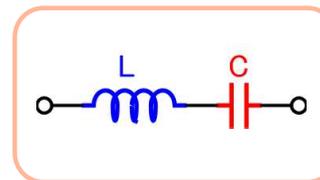
$$C_1 + C_2$$

となる。

C1のみを分離して測定することはできない。

複合素子の測定 (3/5)

では、このような素子をLCRメータで測定すると



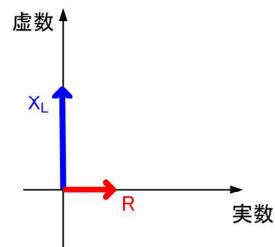
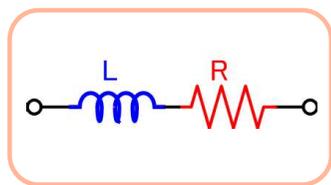
測定値は $X_L - X_C$

(X_L : Lのリアクタンス X_C : Cのリアクタンス)

どちらも虚数成分のため、 X_L と X_C を分離して測定することはできない。

複合素子の測定 (4/5)

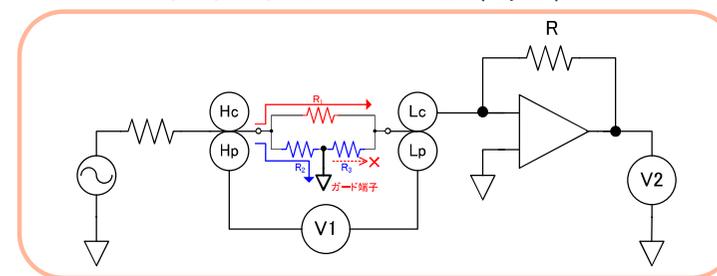
このような素子の場合は



LとRは分離して測定することができる。

Lは虚数成分、Rは実数成分のため分離できる。

複合素子の測定 (5/5)



図のようにガード端子を接続すると R_1 が測定可能になる

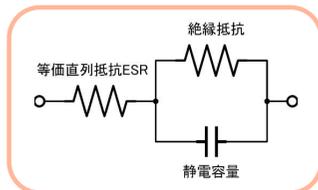
R_2 電流はガード端子に吸収される

R_3 電流は流れない

※ $R_1 \gg R_2$ 、 $R_2 \doteq 0$ の場合、測定精度は向上しない

等価回路 (1/3)

一般的なコンデンサの等価回路は以下の通りです



等価直列抵抗：電解質、電極などの抵抗
(インピーダンス小)

絶縁抵抗：漏れ電流による抵抗
(インピーダンス大)

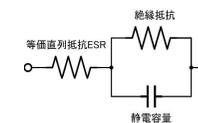
等価直列抵抗と静電容量を分離して、あるいは
絶縁抵抗と静電容量を分離して、測定することができる。

等価直列抵抗と絶縁抵抗を分離して測定することはできない。

※直列抵抗と絶縁抵抗のどちらの影響が大きいかで測定方法が変わる

等価回路 (2/3)

等価回路の選び方

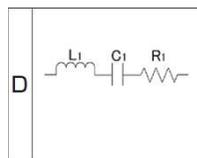
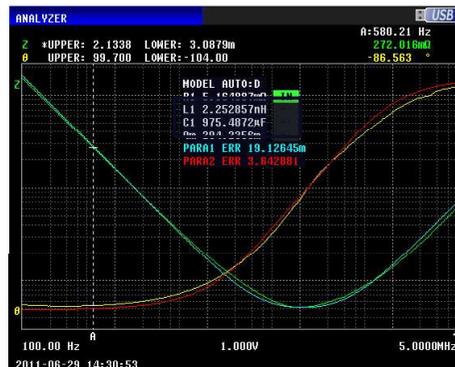


コンデンサ 静電容量	コンデンサの インピーダンス	測定値に影響が 大きい成分	影響を考慮した 等価回路
大	小	等価直列抵抗	 直列等価回路
小	大	絶縁抵抗	 並列等価回路

測定したい対象 (コンデンサ) に対して影響が大きい成分が考慮されている
等価回路を選択しましょう
周波数によって影響する要素が変わる場合もあります。

等価回路 (3/3)

測定周波数をスイープし、等価回路解析機能を使えば
各パラメータを分離して測定することができる



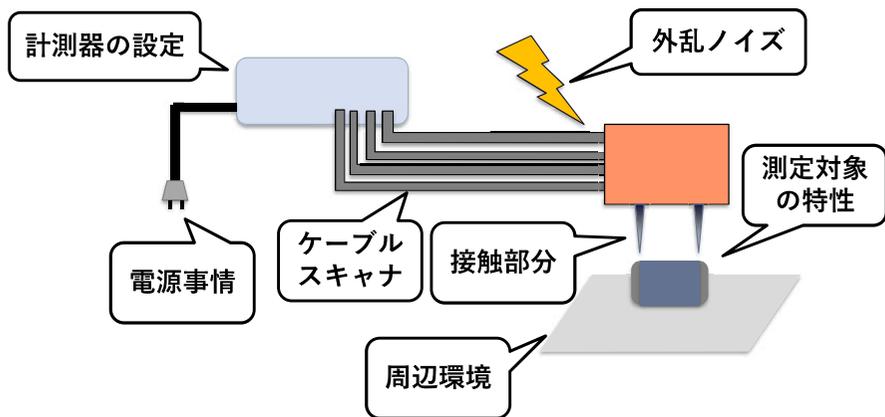
導電性高分子コンデンサ
等価回路モデル

基礎編

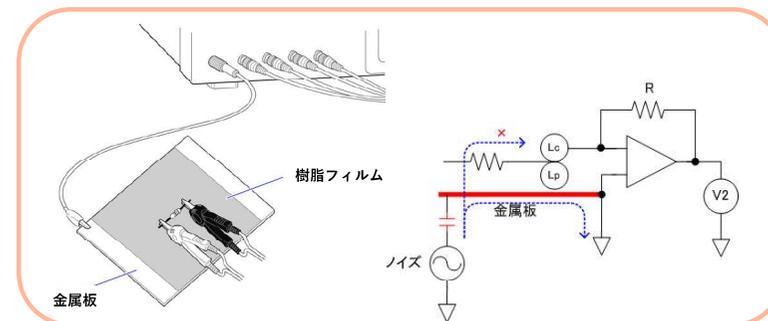
1. インピーダンスの前提知識
2. 測定方法 (測定原理)
3. 測定ケーブルの接続方法
4. LCRメータの測定条件の決め方
5. 複合素子の測定と等価回路モード
6. 計測時の留意点および対処例

計測時の留意点

実際に計測するときにはさまざまな要因が測定値に影響します



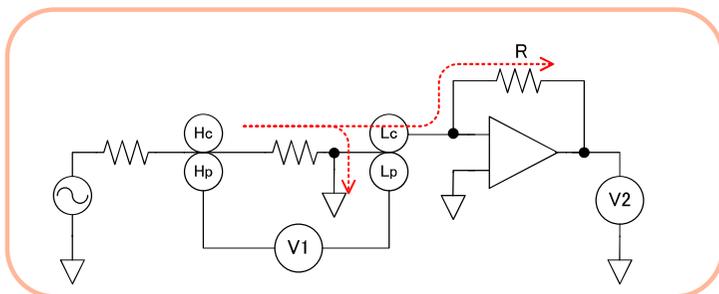
対処例：高インピーダンス素子の測定



高インピーダンス素子の測定は外来ノイズの影響を受けやすく、測定値が不安定になることがある。

→ガード端子に接続した金属板上で測定すると安定する

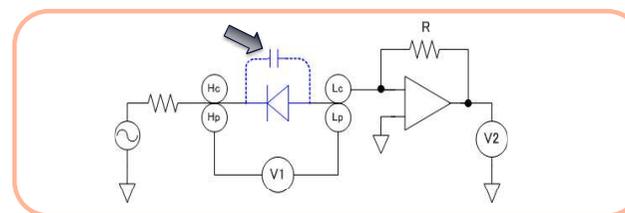
対処例：接地された試料の測定



接地された試料の場合、試料電流が接地側に分流するため測定できない。

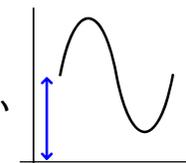
→試料を接地から絶縁してください

対処例：ダイオードの接合容量の測定



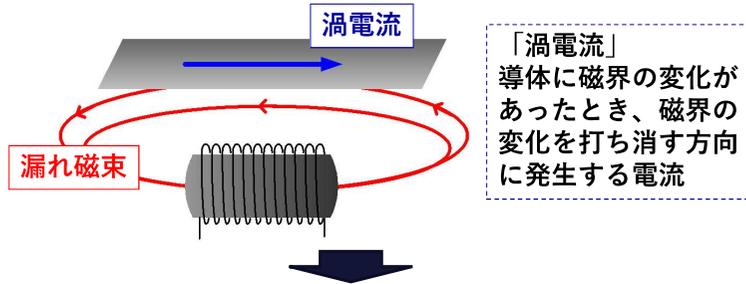
ダイオードは順方向にバイアスされるとONしてしまうため、接合容量の測定ができない。

- ①ダイオードがONしない電圧まで、測定信号レベルを下げてください
- ②交流信号にDCバイアスを加算して、ダイオードがONしない領域で測定してください



テストフィクスチャ等の影響

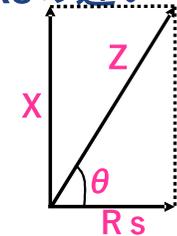
インダクタの近くに導体があると、インダクタからの漏れ磁束によって導体に渦電流が流れ、測定値に影響を与えてしまう。



フィクスチャや測定床面の材質、距離が異なると測定値が変化する可能性があります

コイル測定におけるRdcとRsの違い

- Rs (直列等価抵抗) とは
→ 交流信号に対するインピーダンスZの実数成分
- Rsには「コアによる損失」、「巻線による損失」が含まれています。R_{dc}は巻線の抵抗そのもので「巻線による損失」に含まれます。そのため、RsはR_{dc}よりも大きくなります。

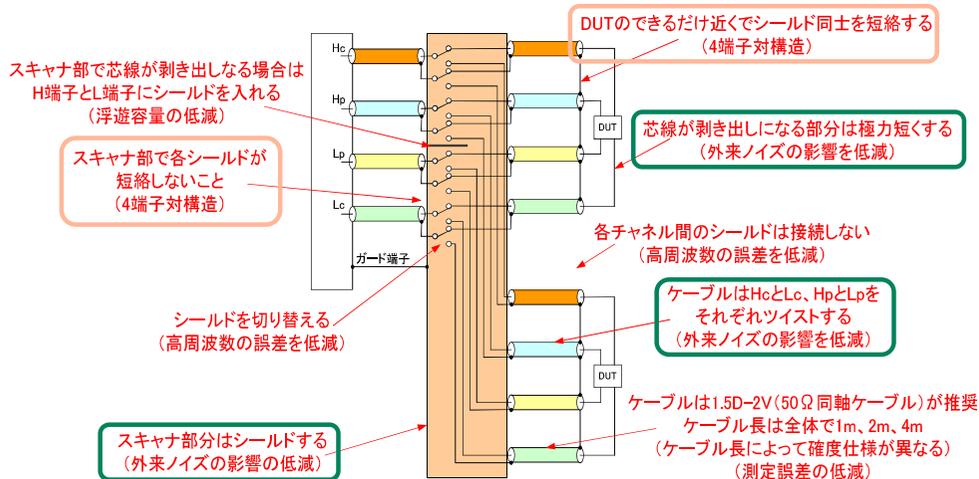


「コアによる損失」・・・「鉄損」とも言う。
コアの磁界変化を打ち消すように発生する電流 (渦電流) による損失や、コアが磁化された時に起きるエネルギー損失がある。

「巻線による損失」・・・「銅損」とも言う。
周波数の高い信号ほど線材の表面に集中して流れる表皮効果により、交流では線材の抵抗が大きくなったように見える。

RsとRdcで測定値が異なります

スキャナの注意点



目次

1. 基礎編 (約50分間)

2. 質疑応答 (約5分間)

～休憩 (約10分間)～

3. 応用編 (約50分間)

4. 質疑応答 (約5分間)

目次

1. 基礎編 (約 50 分間)
 2. 質疑応答 (約 5 分間)
- ～休憩 (約 10 分間)～
3. 応用編 (約 50 分間)
 4. 質疑応答 (約 5 分間)

目次

1. 基礎編 (約 50 分間)
 2. 質疑応答 (約 5 分間)
- ～休憩 (約 10 分間)～
3. 応用編 (約 50 分間)
 4. 質疑応答 (約 5 分間)

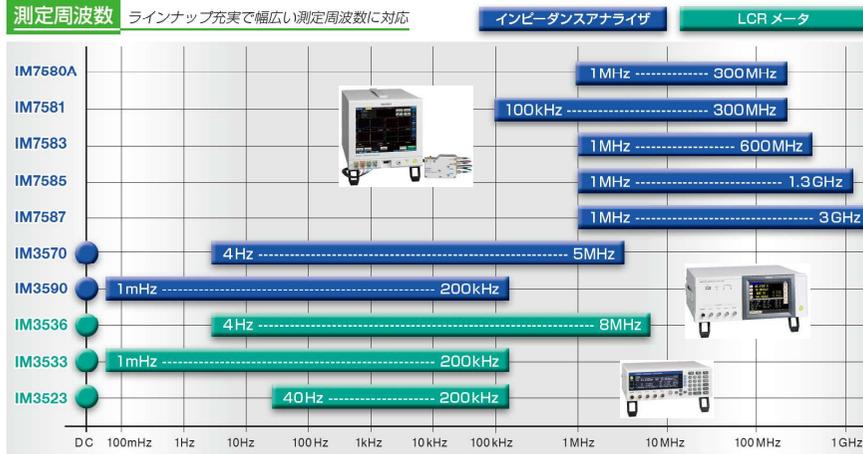
応用編

0. 製品ラインアップ (電子部品計測アプリケーション)
1. トランス (変圧器) のインダクタンス測定
2. インダクタ (コイル) のインダクタンス測定
3. 電気自動車用リアクトルの損失測定
4. 太陽光発電用リアクトルの損失測定
5. コンデンサ (MLCC、電解、タンタル) の容量測定
6. 電気絶縁材料の比誘電率・誘電正接の温度特性試験
7. JIS C 3216-5 エナメル線の誘電正接 ($\tan \delta$) 試験
8. 水素製造用電解セル解析
9. 粉体インピーダンス測定

応用編

0. [製品ラインアップ \(電子部品計測アプリケーション\)](#)
1. トランス (変圧器) のインダクタンス測定
2. インダクタ (コイル) のインダクタンス測定
3. 電気自動車用リアクトルの損失測定
4. 太陽光発電用リアクトルの損失測定
5. コンデンサ (MLCC、電解、タンタル) の容量測定
6. 電気絶縁材料の比誘電率・誘電正接の温度特性試験
7. JIS C 3216-5 エナメル線の誘電正接 ($\tan \delta$) 試験
8. 水素製造用電解セル解析
9. 粉体インピーダンス測定

製品ラインアップ (インピーダンスアナライザ、LCRメータ)



製品ラインアップ (インピーダンスアナライザ用オプション)

IM9201 3 GHzまでの高周波測定を6サイズのSMDで

基本仕様	DC ~ 3 GHz
使用測定数値範囲	0.003, 100%, 160%, 201%, 321%, 322%
測定可能材料寸法 (JIS)	20番型: max. 0.6x0.3 ~ 0.4x0.12 (10サイズ未満)
測定との接続	測定電極に2端子接続
最小測定電圧	±45Vmax (AC: DC)
インピーダンス (Z) 範囲	Z _{Re} = Ae + (Z _{Im} / Z _{Re}) × Y ₀ × Z ₀ + 100 Z _{Im} = 100 × (Y ₀ / 1000000) [S] Y ₀ = (10 × 100 × Y ₀ / 1000000) [S]
測定精度	±0.5%
付属品	スタートプレート (5電極), GNDプレート (2電極), デバイスタッド (2電極) ほか

IM9202 1台で幅広い形状とサイズの電子部品測定

基本仕様	LCR ~ 500 MHz
使用測定数値範囲	0.003 ~ 99.999%
測定可能な材料	プロセッサ: リード長さ 1 mm ~ 25 mm コンデンサ: リード長さ 2 mm ~ 10 mm 抵抗器: リード長さ 2 mm ~ 25 mm トランス: リード長さ 2 mm ~ 25 mm コイル: リード長さ 2 mm 以上 SMD: 部品長さ 1.6 mm ~ 2.4 mm 部品幅 0.8 mm 以上 部品高さ 0.65 mm 以上
測定との接続	測定電極に2端子接続
最大測定電圧	±42Vmax (AC: DC)
付属品	スタートプレート, SMD オープン補正用器具 ほか

オプション IM7580 シリーズでテストフィクスチャを使用する場合、以下のオプションが必要です。
テストフィクスチャの選定には、測定の電圧および最大電流を考慮してください。

組み合わせた例: 1 MHz ~ 600 MHz 測定	
インピーダンスアナライザ	IM7583
インピーダンスアナライザ用オプション	IM9201
テストフィクスチャ、スタンド	IM9200
アダプタ (3.5 mm-7 mm)	IM9906
校正キット	IM9905

製品ラインアップ (LCRメータ用オプション)

SMD テストフィクスチャ IM9110 (0.01 サイズに対応した SMD テストフィクスチャ 2端子構造)	SMD テストフィクスチャ IM9100 (直結型、底面に電極がある SMD 用, DC ~ 8 MHz, 測定可能端子径: 0.3 ~ 1.0 mm)	4端子プローブ L2000 ケーブル長 1m, DC ~ 8 MHz, 50Ω, 測定可能端子径: 0.3 ~ 5 mm	ピンセットプローブ L2001 ケーブル長 73 cm, DC ~ 8 MHz, 50Ω, 先端電極間隔: 0.3 ~ 6 mm (IM9901: JIS サイズ 1608 ~ 5750) (IM9902: JIS サイズ 0693 ~ 5750)	コンタクトチップ IM9901 L2001の先端交換用小型サイズ, L2001に付属	コンタクトチップ IM9902 L2001の先端交換用小型サイズ	4端子プローブ 9140-10 ケーブル長 1m, DC ~ 200 kHz, 50Ω, 測定可能端子径: 0.3 ~ 5 mm	テストフィクスチャ 9261-10 ケーブル長 1m, DC ~ 8 MHz, 50Ω, 測定可能端子径: 0.3 ~ 1.5 mm
テストフィクスチャ 9262 (直結型, DC ~ 8 MHz, 測定可能端子径: 0.3 ~ 2 mm)	SMD テストフィクスチャ 9263 (直結型, DC ~ 8 MHz, 試料寸法: 1 ~ 10 mm)	4端子プローブ 9500-10 ケーブル長 1m, DC ~ 200 kHz, 50Ω, 測定可能端子径: 0.3 ~ 2 mm	SMD テストフィクスチャ 9677 (直結型、側面に電極がある SMD 用, DC ~ 120 MHz, 試料寸法: 3.5 x 0.5 mm)	SMD テストフィクスチャ 9679 (直結型、側面に電極がある SMD 用, DC ~ 120 MHz, 試料寸法: 幅 1.0 ~ 4.0 mm, 高さ 1.5 mm 以下)	DC バイアス電圧ユニット 9268-10 (直結型, 40 Hz ~ 8 MHz, 最大印加電圧 DC +40V)	DC バイアス電流ユニット 9269-10 (直結型, 40 Hz ~ 2 MHz, 最大印加電流 DC 2A)	QP-IB 接続ケーブル 9151-02 ケーブル長: 2 m

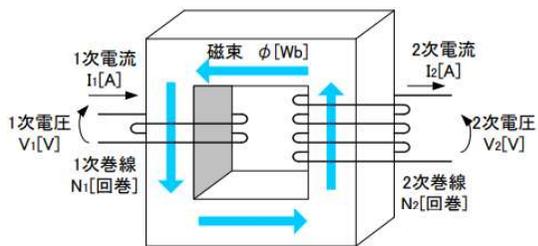
※ 9268-10 または 9269-10 使用の際は外付けの定電圧源、定電流源が必要になります

RF-ID タグの測定

応用編

- 製品ラインアップ (電子部品計測アプリケーション)
- トランス (変圧器) のインダクタンス測定
- インダクタ (コイル) のインダクタンス測定
- 電気自動車用リアクトルの損失測定
- 太陽光発電用リアクトルの損失測定
- コンデンサ (MLCC、電解、タンタル) の容量測定
- 電気絶縁材料の比誘電率・誘電正接の温度特性試験
- JIS C 3216-5 エナメル線の誘電正接 (tan δ) 試験
- 水素製造用電解セル解析
- 粉体インピーダンス測定

トランス (変圧器) のインダクタンス測定 (1/5)

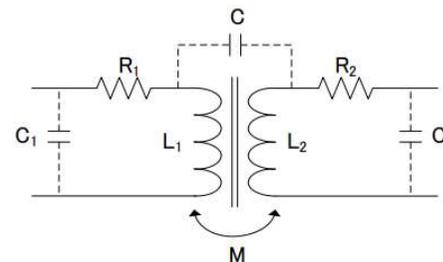


$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$$

交流電圧はトランス (変圧器) を用いて昇圧、降圧することができます。基本構造は、鉄心に1次コイルと2次コイルを巻きつけた構造になっています。

電流が流れるとコイル内部に磁界が発生し、電圧が生じます。電圧の大きさはコイルの巻数に比例します。例えば1次コイル (入力側) の巻数が100ターン、2次コイル (出力側) の巻数が200ターンの場合、出力側巻数が2倍なので、入力側に100Vの電圧をかければ、出力側には200Vの電圧が生じることになります。ただし、トランスの1次側と2次側で電力は変わりません。

トランス (変圧器) のインダクタンス測定 (2/5)



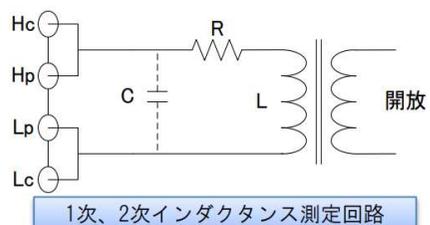
R₁: 1次巻線抵抗 R₂: 2次巻線抵抗
C₁: 1次巻線浮遊容量 C₂: 2次巻線浮遊容量

トランスはインダクタ応用のひとつであり、その測定法はインダクタの場合と同様です。

トランス測定における主な評価パラメータは以下のようなものがあります。

- ・1次インダクタンス (L₁)
- ・2次インダクタンス (L₂)
- ・漏洩インダクタンス
- ・巻線間容量 (C)
- ・相互インダクタンス (M)
- ・巻数比

トランス (変圧器) のインダクタンス測定 (3/5)



1次、2次インダクタンス測定回路

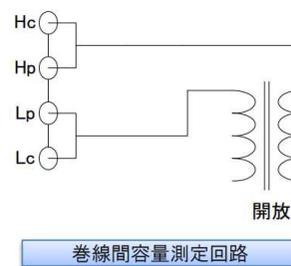
1次側または2次側に測定器を直接接続することにより、1次インダクタンス (L₁) や2次インダクタンス (L₂) を測定することができます。ただし、他の巻線はすべて開放状態にしておきます。インダクタンス測定結果には、巻線の分布容量の影響が含まれることに注意してください。



漏洩インダクタンス測定回路

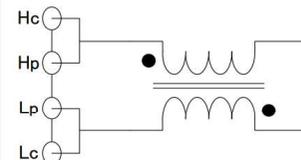
理想的なトランスでは、出力を短絡すると入力も短絡されます。しかし、実際のトランスでは出力を短絡しても漏洩インダクタンスが残ります。漏洩インダクタンス (leakage inductance) は、2次側を短絡し、1次側のインダクタンスを測定することにより得ることができます。

トランス (変圧器) のインダクタンス測定 (4/5)

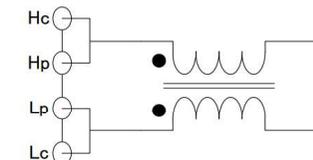


巻線間容量測定回路

$$M = \frac{La - Lo}{4}$$



La測定



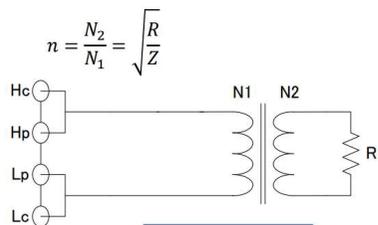
Lo測定

相互インダクタンス測定回路

1次側と2次側の巻線間容量 (C) は、各巻線の片方ずつを測定機に接続することにより測定できます。

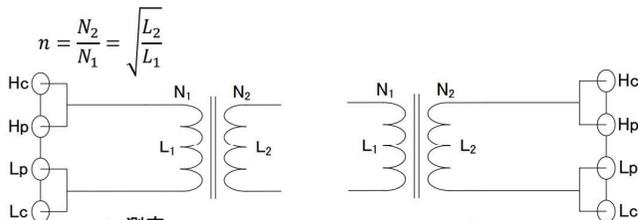
相互インダクタンス (M) は、同相直列・逆相直列接続にしてインダクタンスを測定し、上式を使って計算することができます。

トランス (変圧器) のインダクタンス測定 (5/5)



巻数比測定回路

巻数比は、2次側に抵抗Rを接続し、1次側でインピーダンス値Zを測定することにより、近似値を求めることができます。



L₁ 測定

L₂ 測定

1次インダクタンスL1、2次インダクタンスL2を測定することで、**巻数比**を算出できます。ただし、磁気漏れ等の影響を受けますので近似値となります。

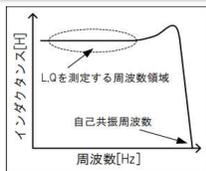
応用編

0. 製品ラインアップ (電子部品計測アプリケーション)
1. トランス (変圧器) のインダクタンス測定
2. [インダクタ \(コイル\) のインダクタンス測定](#)
3. 電気自動車用リアクトルの損失測定
4. 太陽光発電用リアクトルの損失測定
5. コンデンサ (MLCC、電解、タンタル) の容量測定
6. 電気絶縁材料の比誘電率・誘電正接の温度特性試験
7. JIS C 3216-5 エナメル線の誘電正接 (tan δ) 試験
8. 水素製造用電解セル解析
9. 粉体インピーダンス測定

インダクタ (コイル) のインダクタンス測定 (1/4)



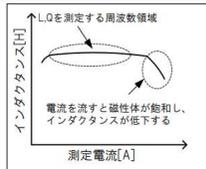
コイルには空芯 (コアが空気または非磁性材料) のものと、フェライトなどの磁性体 (透磁率の高い材料) をコアに用いたものがあります。コア入りのインダクタには電流依存性があります。



インダクタンスの周波数特

インダクタ (コイル) のもつ**インダクタンス**と、コイルの寄生容量でLC共振する現象を自己共振と呼びます。また、この自己共振がおこる周波数を**自己共振周波数**と呼びます。コイルの評価では自己共振周波数よりも十分低い周波数でLとQを測定してください。

コイルの**インピーダンス**は $Z=j2\pi fL$ で計算でき、高周波数ほど高くなります。より精度よく測定するためには、精度の良いレンジで測定できるインピーダンスとなるような周波数に設定してください。

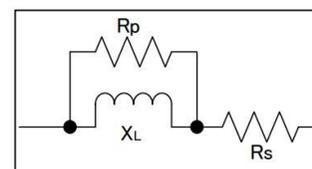


インダクタンスの電流依存

電流依存性のあるコイル (磁性体コア) の測定では、磁性体が飽和しない信号レベルに設定してください。電流依存性の無いコイルであれば最も精度の良い信号レベルになる設定を推奨します。IM35xxシリーズではVモードの1Vが最も精度のよい設定です。IM758xシリーズではDUTポート50Ω終端時のパワーで測定信号レベルを規定しており、最も精度が良い設定は+1dBmです。

コア入りのコイルや、定格電流が小さいコイルなどを測定する場合はIM35xxシリーズで設定できるCC (定電流) モードが便利です。

インダクタ (コイル) のインダクタンス測定 (2/4)



インダクタの等価回路

LsとLpの決め方

低インダクタンスのコイル
インピーダンスが低いためRpを無視できる。**直列等価回路**で測定する。

高インダクタンスのコイル
インピーダンスが高いためRsを無視できる。**並列等価回路**で測定する。

各周波数でのインピーダンスの目安 (Dが小さいとき)

	10Hz	1kHz	100kHz	5MHz	300MHz
100mH	6.3Ω	630Ω	63kΩ	3.1MΩ	
10mH	630mΩ	63Ω	6.3kΩ	310kΩ	
1mH	63mΩ	6.3Ω	630Ω	31kΩ	
100μH	6.3mΩ	630mΩ	63Ω	3.1kΩ	
10μH		63mΩ	6.3Ω	310Ω	
1μH		6.3mΩ	630mΩ	31Ω	1.9kΩ
100nH			63mΩ	3.1Ω	190Ω
10nH			6.3mΩ	310mΩ	19Ω
1nH					1.9Ω

Lpに設定するところ
部品メーカーに確認
Lsに設定するところ

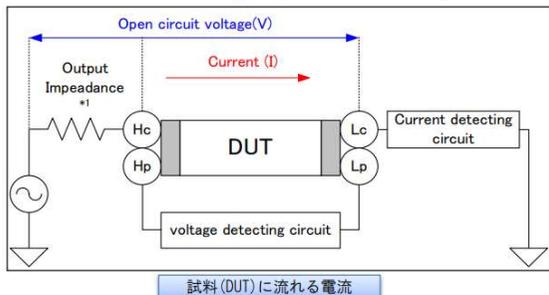
一般的に、**低インピーダンス素子 (約100Ω以下)** を測定する場合は**直列等価回路モード**が用いられ、**高インピーダンス素子 (約10kΩ以上)** を測定する場合は**並列等価回路モード**が用いられます。約100Ω~10kΩのインピーダンスなど等価回路モードが不明な場合は、部品製造元に確認してください。実際のインダクタは、**理想インダクタLに巻線の銅損Rs、コアの鉄損Rp**がつながったような動作をします。理想インダクタのリアクタンスXLは、 $XL=j2\pi fL$ と計算できます。RsやRpの大きさによるので一概には言えませんが、低インダクタンスのコイルはXLが小さいので、RpとLを並列にしたインピーダンス≒XLとみなせます。一方、RsはLsが小さいので無視することはできないので、直列等価回路となります。高インダクタンスでは逆で、Rpは無視できませんがRsは無視できるので並列等価回路となります。

インダクタ (コイル) のインダクタンス測定 (3/4)

$$|Z| = \sqrt{(R_{out} + R_{coil})^2 + (2\pi fL)^2}$$

$$|I| = \frac{|V|}{|Z|}$$

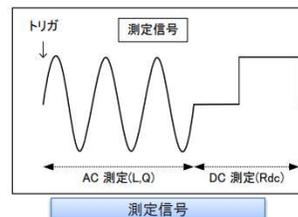
R_{out} : 出力抵抗
 R_{coil} : コイルの抵抗成分
 L : コイルのインダクタンス
 f : 測定周波数 V : 開放端子電圧



コイルに流れる電流 (I) は、開放端子電圧と、出力インピーダンス、被測定物のインピーダンスから計算することができます。

※1 出力インピーダンスは機種や低インピーダンス高精度モードが有効になっているかどうかによって異なります。取扱説明書に記載してある製品仕様欄を参考にしてください。

インダクタ (コイル) のインダクタンス測定 (4/4)



Rdcの測定

コイルの評価では、L、Q、**Rdc**を測定します。IM3533やIM3536などは1台でL、Q、**Rdc**の測定ができます。交流信号でLとQを測定した後、直流信号で**Rdc**を測定します。

※ R_s 、 $R_p = R_{dc}$ ではありません。 R_s や R_p は交流で測定した抵抗です。 R_s や R_p にはコアの損失、表皮効果や近接効果によって増加した巻線抵抗などが含まれます。巻線材の温度係数が大きいと、温度によって**Rdc**が変化してしまいます。IM3533には**Rdc**の温度補正機能があります。

直流重畳特性

コイルの特性の一つに**直流重畳特性**というものがあります。直流電流に対するインダクタンスの低下を表したもので、電源回路のように大電流を流す回路向けのコイルにとって重要な評価項目です。

弊社LCRメータに内蔵されているDCバイアス電圧印加機能はコンデンサ測定用であり、直流電流を流すことはできません。直流電流を重畳するにはDCバイアス電流ユニット9269-10と外部電源を使うか、回路を自作してください。

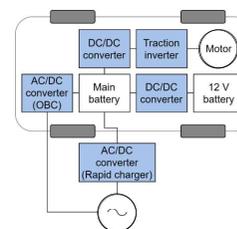
※ DCバイアス電流重畳回路は各LCRメータ取説後方の付録ページを参照してください。



応用編

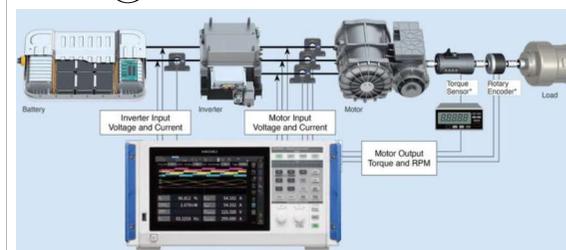
0. 製品ラインアップ (電子部品計測アプリケーション)
1. トランス (変圧器) のインダクタンス測定
2. インダクタ (コイル) のインダクタンス測定
3. **電気自動車用リアクトルの損失測定**
4. 太陽光発電用リアクトルの損失測定
5. コンデンサ (MLCC、電解、タンタル) の容量測定
6. 電気絶縁材料の比誘電率・誘電正接の温度特性試験
7. JIS C 3216-5 エナメル線の誘電正接 ($\tan \delta$) 試験
8. 水素製造用電解セル解析
9. 粉体インピーダンス測定

電気自動車用リアクトルの損失測定 (1/3)



電気自動車における各種電源

左図は、BEV (バッテリー式電気自動車) 用電源の概念図を示します。車載バッテリーの充電用として、車載充電器 (OBC) や急速充電器が使われます。これらの充電器は商用電源をバッテリーの直流高電圧に変換する**AC/DCコンバータ**から構成されています。車載バッテリーの電力を宅内や系統で使用することを目的としたV2H (Vehicle to Home) やV2G (Vehicle to Grid) 用として双方の電力供給が可能な車載充電器の実用化も始まっています。パワートレイン用として、**昇圧DC/DCコンバータ**や**インバータ**が使われています。また、メインバッテリーと補機類用12Vバッテリー間の電力融通のためには **DC/DCコンバータ**が使われます。これらの電源は、パワーエレクトロニクスの技術を用いて、小型・軽量・高効率化を実現しています。

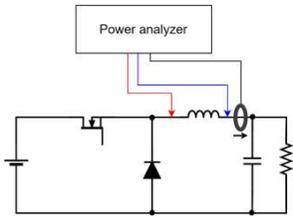


お勧めの構成
 パワーアナライザ
 PW8001 + U7005

電流センサ (一例)
 CT6904A (定格 500 A)

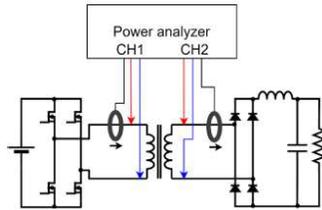


電気自動車用リアクトルの損失測定 (2/3)



リアクトル (インダクタ) の損失測定

パワーアナライザと電流センサを用いて、インダクタの両端電圧とインダクタに流れる電流を測定することでインダクタの損失を測定できます。左図に非絶縁降圧チョップパDC/DCコンバータのインダクタ損失測定時の結線例を示します。降圧チョップパの場合、電流センサは測定するインダクタの出力側に接続した方が、安定した測定結果を得られます。インダクタの入力側のノードはスイッチング周期ごとに電圧値が変化するため、高周波成分を含む電圧波形となっています。一方、インダクタの出力側のノードは電圧変動が少ないです。一般的に、電流センサは高周波になると同相電圧除去比 (CMRR) が低下するため、高周波成分の少ない出力側に接続したほうが、より安定した結果が得られます。



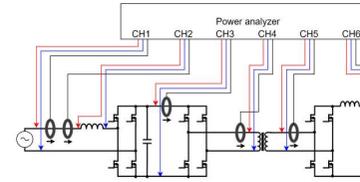
トランスの損失測定

トランスの入出力電力を測定し、差分を計算することでトランスの損失を測定できます。左図に絶縁型フルブリッジDC/DCコンバータのトランスの損失測定時の結線例を示します。トランスの入出力前後の電力 (P_1 および P_2) を測定し、右式を用いて、損失 (P_{loss}) および効率 (η) を求めます。トランスは、その出力からスイッチング周波数とその高調波成分を持つ交流信号であり、低力率デバイスであるため、十分な振幅精度および位相精度を持ったパワーアナライザおよび電流センサを使用する必要があります。

$$P_{loss} = P_1 - P_2$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 [\%]$$

電気自動車用リアクトルの損失測定 (3/3)



トランスの損失測定

左図に車載充電器 (OBC) の損失を測定する場合の結線例を示します。一般的なOBCは入力商用電力を力率改善回路 (PFC) により高電圧DC電力に変換し絶縁DC/DCコンバータにより電圧値を調整したDC電力をバッテリーに供給することで充電を行っています。OBC全体の損失 P_{ALL} 、PFC用インダクタの損失 P_{LPFC} 、PFC回路の損失 P_{PFC} 、絶縁DC/DCコンバータ用トランスの損失 P_{trans} 、絶縁DC/DCコンバータの損失 $P_{DC/DC}$ により算出できます。

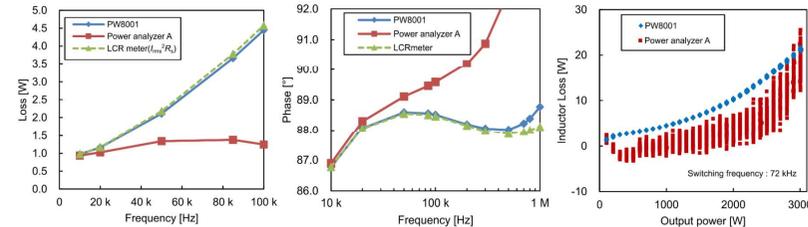
$$P_{ALL} = P_1 - P_6$$

$$P_{LPFC} = P_2$$

$$P_{PFC} = P_1 - P_3$$

$$P_{trans} = P_4 - P_5$$

$$P_{DC/DC} = P_3 - P_6$$



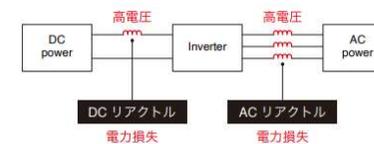
PFC回路のインダクタ損失の測定結果

トータムボール型PFC回路の入インダクタ損失を100W刻みでプロット。PW8001での測定結果はばらつきが小さく非常に安定している。パワーアナライザAでの測定結果はばらつきが大きく、出力電力が小さい領域ではインダクタの損失値が負の値になってしまっている。

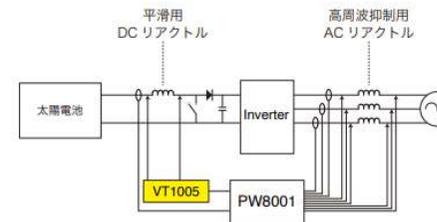
応用編

- 製品ラインアップ (電子部品計測アプリケーション)
- トランス (変圧器) のインダクタンス測定
- インダクタ (コイル) のインダクタンス測定
- 電気自動車用リアクトルの損失測定
- 太陽光発電用リアクトルの損失測定
- コンデンサ (MLCC、電解、タンタル) の容量測定
- 電気絶縁材料の比誘電率・誘電正接の温度特性試験
- JIS C 3216-5 エナメル線の誘電正接 ($\tan \delta$) 試験
- 水素製造用電解セル解析
- 粉体インピーダンス測定

太陽光発電用リアクトルの損失測定 (1/2)

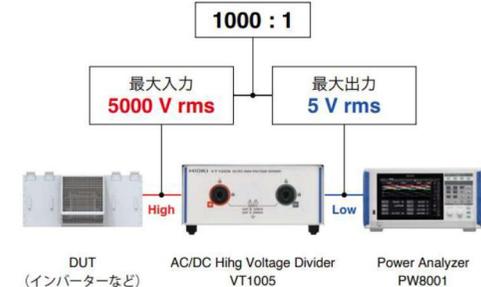


高圧回路用のトランスやリアクトルの電力損失を測定する場合、高電圧の測定が必要です。トランスやリアクトルは低力率なデバイスですが、力率が低い場合、位相誤差が測定値に大きく影響するため、位相誤差の少ない電力測定が不可欠です。



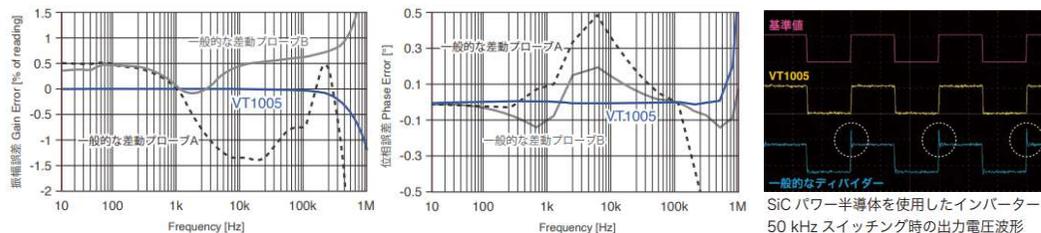
使用機器

パワーアナライザ	PW8001	HIOKI 製品
AC/DC ボルテージディバイダ	VT1005	HIOKI 製品
AC/DC カレントセンサ	CT6877A	HIOKI 製品



PW8001とVT1005を使用すると、最大5000 V (± 7100 V peak、測定カテゴリなし、予想される過渡過電圧 0 V) の電圧を測定できます。

太陽光発電用リアクトルの損失測定 (2/2)



リアクトルの損失測定を正しく測定するために重要なボルテージディバイダー VT1005

振幅特性と位相特性の平坦性

VT1005は、振幅誤差 $\pm 0.1\%$ 以内 (DC~200 kHz)、位相誤差 $\pm 0.1^\circ$ 以内 (DC~500 kHz) です。測定帯域における振幅特性、位相特性の平坦性に優れ、インバーターの効率を正確に測定できます。また、電圧と電流の位相差 88° のリアクトル損失も誤差 $\pm 5\%$ で測定できます。

耐ノイズ性

VT1005は、コモンモードや高周波ノイズに強く、ノイズ環境下でも正確に電圧を測定できます。インバーターのような変換器はノイズの発生源となるため、効率測定ではノイズ耐性が重要です。

応用編

0. 製品ラインアップ (電子部品計測アプリケーション)
1. トランス (変圧器) のインダクタンス測定
2. インダクタ (コイル) のインダクタンス測定
3. 電気自動車用リアクトルの損失測定
4. 太陽光発電用リアクトルの損失測定
5. コンデンサ (MLCC、電解、タンタル) の容量測定
6. 電気絶縁材料の比誘電率・誘電正接の温度特性試験
7. JIS C 3216-5 エナメル線の誘電正接 ($\tan \delta$) 試験
8. 水素製造用電解セル解析
9. 粉体インピーダンス測定

コンデンサ (MLCC、電解、タンタル) の容量測定 (1/7)

需要が多い順ランキング (2025年)

ランク	コンデンサの種類	主な用途	特徴
1位	セラミックコンデンサ (MLCC)	スマートフォン、PC、車載電子機器、IoT	小型・高周波対応・安価・高信頼性
2位	アルミ電解コンデンサ	電源回路、家電、産業機器	大容量・低コスト・極性あり
3位	フィルムコンデンサ	オーディオ、電源、産業用インバータ	高耐圧・高信頼性・非極性
4位	タンタルコンデンサ	医療機器、携帯機器、軍事用途	小型・安定・高信頼性
5位	スーパーキャパシタ (EDLC)	バックアップ電源、再生可能エネルギー、EV	超大容量・繰り返し充放電可能
6位	マイコンデンサ	高周波回路、無線通信	高精度・高安定性・高価

コンデンサ (MLCC、電解、タンタル) の容量測定 (2/7)



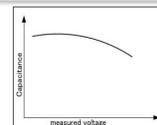
MLCCには測定電圧によって容量が変化する高誘電率型と変化する温度補償型があります。容量を規定するときの測定条件は、温度補償型・高誘電率型それぞれJIS規格で定められています。

JIS C5101-21 表面実装用固定磁器コンデンサ種類1 温度補償型 (CH, COG等) (1EC30384-21)					
パラメータ	定格静電容量	定格電圧	測定周波数	測定電圧※1	DCバイアス
C, D (tan δ)	$C \leq 1000\text{pF}$	全て	1MHz又は100kHz (1MHz基準)	5Vrms以下	なし
	$C > 1000\text{pF}$		1kHz又は100kHz (1kHz基準)		

JIS C5101-22 表面実装用固定磁器コンデンサ種類2 高誘電率系 (B, X5R等) (1EC30384-22)					
パラメータ	定格静電容量	定格電圧	測定周波数	測定電圧※2	DCバイアス
C, D (tan δ)	$C \leq 100\text{pF}$	全て	1MHz	$1.0 \pm 0.2\text{Vrms}$	なし
	$100\text{pF} < C \leq 10\mu\text{F}$	6.3Vを超える	1kHz	$1.0 \pm 0.2\text{Vrms}$	
	$C > 10\mu\text{F}$	6.3V以下	1kHz	$0.5 \pm 0.2\text{Vrms}$	

※1 測定電圧 (= 試料に印加される電圧) は、開放端子電圧を出力抵抗と試料で分圧した電圧です。測定電圧 (= 試料に印加される電圧) は開放端子電圧と、出力抵抗、試料のインピーダンスより計算できます。

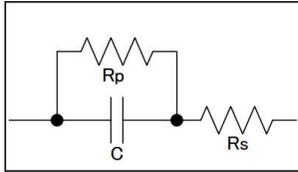
※2 試料のインピーダンスが不明な場合や、ばらつきの大い複数の試料を測定する場合はCVモードが便利です。



高誘電率系のコンデンサ

温度特性がB、X5R、X7Rなどと表記されているコンデンサには高誘電率の材料が用いられています。高誘電率系のコンデンサは小型・大容量を実現できる一方で、測定電圧や温度によって容量が大きく変化してしまうといった特徴があります。

コンデンサ (MLCC、電解、タンタル) の容量測定 (3/7)



コンデンサの等価回路

CsとCpの決め方

大容量のコンデンサ
Cのインピーダンスが低いため
Rpを無視できる。直列等価回路
に設定する。

小容量のコンデンサ
Cのインピーダンスが高いため
Rsを無視できる。並列等価回路
で設定する。

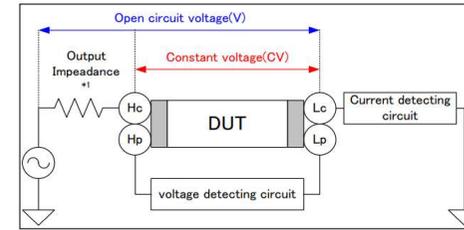
各周波数でのインピーダンスの目安(Dが小さいとき)

	100Hz	120Hz	1kHz	100kHz	1MHz
1pF				1.6MegΩ	160kΩ
10pF				160kΩ	16kΩ
100pF				16kΩ	1.6kΩ
1nF			160kΩ	1.6kΩ	160Ω
10nF			16kΩ	160Ω	16Ω
100nF			1.6kΩ	16Ω	1.6Ω
1μF			160Ω	1.6Ω	160mΩ
10μF			16Ω	160mΩ	16mΩ
100μF	16Ω	13Ω	1.6Ω	16mΩ	1.6mΩ

■ Cpに設定するところ
■ 部品メーカーに確認
■ Csに設定するところ

一般的に、大容量コンデンサのような低インピーダンス素子(約100Ω以下)を測定する場合は直列等価回路モード、小容量のコンデンサのような高インピーダンス素子(約10kΩ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。約100Ω~10kΩ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。実際のコンデンサは、理想コンデンサCに直列にRs、並列にRpがつながったような動作をします。通常Rpは非常に大きく(MΩ以上)、Rsは非常に小さい(数Ω以下)です。理想コンデンサのリアクタンスXcは、 $Xc=1/j2\pi fC[\Omega]$ と計算できます。Xcが小さいとき、RpとCを並列にしたインピーダンス≒Xcとみなせます。一方、Xcが小さいとRsを無視することができないため、全体ではXcとRsの直列等価回路とみなすことができます。Xcが大きい時は逆に、Rpは無視できませんがRsは無視できるので並列等価回路となります。

コンデンサ (MLCC、電解、タンタル) の容量測定 (4/7)



試料(DUT)に印加される電圧

※1 出力インピーダンスは、機種や低インピーダンス高精度モードが有効になっているかどうかによって異なります。取扱説明書に記載してある製品仕様欄を参考にしてください。

開放電圧 (V) モードと定電圧 (CV) モードの違い

開放電圧とは、何も試料がつながっていないときにHc端子に発生する電圧です。開放電圧を出力抵抗と試料で分圧した電圧が試料に印加されます。

定電圧 (CV) モードでは試料両端の電圧を設定します。IM35xxでは電圧のモニタ値を読んで、ソフト的にフィードバックをかけてCVにしています。3504-xxではハード (アナログ回路) 的にCVにしているので高速に定電圧測定ができます。3506-10は開放電圧 (V) モードのみですが、出力抵抗が小さい(1kHzの2.2μFレンジ以上では1Ω、それ以外の条件で20Ω) ため他の機種よりも開放端子電圧≒測定電圧となる試料のインピーダンスが低いのが特徴です。

コンデンサ (MLCC、電解、タンタル) の容量測定 (5/7)

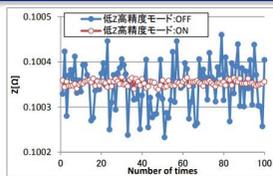


電解コンデンサの容量を規定するときの測定条件はJIS規格で定められており、コンデンサメーカーの公称値はJIS規格に従った測定値となります。しかしながら、電解コンデンサの静電容量値は、測定周波数によって大きく異なるため、実際に使用する回路条件に合わせた周波数でも容量値を確認します。

電解コンデンサでは容量の他に、内部電極部の抵抗や電解質抵抗などによる等価直列抵抗Rs (ESR)、損失角の正接D (tan δ) など測定します。

JIS C5101-4アルミニウム固体 (MnO2) 及び非固体電解コンデンサ (IEC 60384-4)					
パラメータ	定格静電容量	定格電圧	測定周波数	測定電圧※1	DCバイアス※2
C, D (tan δ)	全て	全て	100Hz又は120Hz	0.5Vrms以下	0.7~1.0V
Z	全て	全て	100, 120, 1k, 10k, 100k, 1MHzで最もZが低くなる周波数	発熱しない値	なし

※1 測定電圧(=試料に印加される電圧)は、開放端子電圧を出力抵抗と試料で分圧した電圧です。測定電圧(=試料に印加される電圧)は、開放端子電圧と、出力抵抗、試料のインピーダンスより計算できます。
※2 DCバイアス印加は省略可能です。

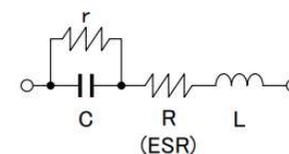


約100Ωの抵抗を繰り返し測定

低インピーダンス高精度モードでは出力抵抗が下がり、測定電流が増加して繰り返し測定精度が向上します。100μFを超えるような大容量 (低インピーダンス) のコンデンサを測定する場合、より安定して測定できます。左図はIM3570を使って、低インピーダンス高精度モードON/OFFで繰り返し精度を比較したものです。(100kHz、1Ωレンジ、1V)

※低インピーダンス高精度モードが有効になる条件は機種によって異なります。各機種の取り扱い説明書を参照してください

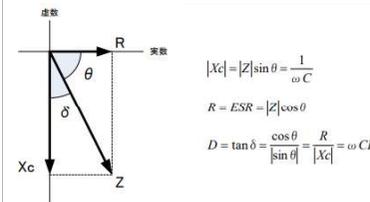
コンデンサ (MLCC、電解、タンタル) の容量測定 (6/7)



C: 静電容量
r: 陽極酸化被膜の等価並列抵抗
R: 等価直列抵抗 (ESR)
L: 等価直列インダクタンス

※参考文献: アルミニウム電解コンデンサの概要 (ニチコン様より)

電解コンデンサの等価回路



ベクトル図

等価直列抵抗 (ESR)、損失係数D (tan δ)

電解コンデンサの一般的な等価回路は左図のようになります。ここで、低周波 (50Hz~1kHz) では等価直列インダクタンスLによるリアクタンス (XL) はごく小さいため零とみなし、このときの各素子の抵抗成分、リアクタンス成分は、複素平面上において左図のようなベクトル関係になります。

コンデンサは、R=0、損失係数D=0が理想ですが、実際には電解コンデンサの場合には、電極箔の抵抗、電解質の抵抗、引出しリードの抵抗および各部の接続抵抗などの抵抗成分が存在するため、等価直列抵抗ESRまたは損失係数D (tan δ) は、電解コンデンサの良し悪しを評価する指標となります。

IM3533やIM3536では4つのパラメータを同時に測定、表示することが可能ですので、電解コンデンサの評価指標として、リアクタンスX、静電容量C、等価直列抵抗Rs、損失係数Dを同時に確認することができます。



IM3536の表示例

コンデンサ (MLCC、電解、タンタル) の容量測定 (7/7)



タンタルコンデンサは陽極にタンタル金属を使った電解コンデンサの一種です。他のコンデンサと比べ小型・大容量で、セラミックコンデンサの大容量品と比較して、電圧・温度特性に優れているのが特徴です。測定条件はJIS規格で定められており、静電容量C、等価直列抵抗Rs (ESR)、損失角の正接D (tan δ) やインピーダンスZを測定します。

JIS C5101-3 表面実装用固定タンタル固体 (MnO₂) 電解コンデンサ

パラメータ	定格静電容量	定格電圧	測定周波数	測定電圧※1	DCバイアス※2
C, D (tan δ)	全て	全て	100Hz又は120Hz	0.5Vrms以下	0.7V~1.0V
Rs (ESR)、Z	全て	全て	100kHz	0.5Vrms以下	0.7V~1.0V

JIS C5101-15固定タンタル非固体又は固体電解コンデンサ

パラメータ	定格電圧	定格静電容量	測定周波数	測定電圧※1	DCバイアス※2
C, D (tan δ)	全て	100Hz又は120Hz	100Hz又は120Hz	0.1Vp~1.0Vp	2.1V~2.5V※3
Rs (ESR) Z	全て	100Hz, 120Hz, 1kHz, 10kHz, 100kHz, 1MHzの中で最も低いインピーダンス値が得られる周波数を選択する		0.1Vp~1.0Vp	2.1V~2.5V※4

JIS C5101-24表面実装用固定タンタル固体 (導電性高分子) 電解コンデンサ

パラメータ	定格静電容量	定格電圧	測定周波数	測定電圧※1	DCバイアス※2
C, D (tan δ)	全て	2.5V以下 2.5Vを超える	100Hz又は120Hz	0.5Vrms以下	1.1V~1.5V 1.5V~2.0V
Rs (ESR)、Z	全て	全て	100kHz	0.5Vrms以下	なし

※1 測定電圧 (= 試料に印加される電圧) は、開放端子電圧を出力抵抗と試料で分圧した電圧です。

測定電圧 (= 試料に印加される電圧) は、開放端子電圧と、出力抵抗、試料のインピーダンスより計算できます。

※2 DCバイアス印加は省略可能です。

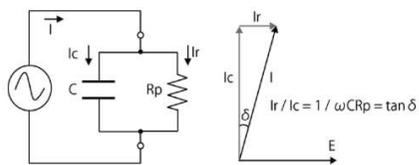
※3 双極性コンデンサにはDCバイアスを印加しません。

※4 測定電圧0.5 Vp以上の時のみ印加する。

応用編

0. 製品ラインアップ (電子部品計測アプリケーション)
1. トランス (変圧器) のインダクタンス測定
2. インダクタ (コイル) のインダクタンス測定
3. 電気自動車用リアクトルの損失測定
4. 太陽光発電用リアクトルの損失測定
5. コンデンサ (MLCC、電解、タンタル) の容量測定
6. [電気絶縁材料の比誘電率・誘電正接の温度特性試験](#)
7. JIS C 3216-5 エナメル線の誘電正接 (tan δ) 試験
8. 水素製造用電解セル解析
9. 粉体インピーダンス測定

電気絶縁材料の比誘電率・誘電正接の温度特性試験 (1/2)



絶縁体の等価回路と交流電圧印加時のベクトル

EVやパワーエレクトロニクス用電気絶縁材料の比誘電率・誘電正接試験で、高温環境下での試験ニーズが増えています。KEYCOM社製測定電極と弊社LCRメータにより、このニーズにお応えいたします。

対象

- 平面板 (固体)、液体、ジェル、シート、フィルム状の各種電気絶縁材料
- セラミック、積層基板、プラスチック・樹脂、絶縁紙など
- 研究開発・生産現場試験

測定のポイント

誘電正接tan δとは、電気絶縁材料の状態を数値で表す指標です。絶縁体に交流電圧を印可すると、電気エネルギーの一部が熱エネルギーとして損失される誘電損 (または誘電損失) が起こります。tan δはこの誘電損の度合いで、印加する交流周波数と温度・湿度に依存します。

インバータやコンバータ、モータ用の電気絶縁材料には、スイッチングされた電圧がかかります。そのため、スイッチング周波数相当のtan δ試験が欠かせません。また、EV用モータやパワーモジュールは、低温から200°Cを超える使用環境が想定されるので、電気絶縁材料のtan δ-温度特性試験が重要になります。

電気絶縁材料の比誘電率・誘電正接の温度特性試験 (2/2)



低温-高温、真空 (減圧) 環境で使える
KEYCOM社測定用電極



熱衝撃試験機を使った測定セット
LCRメータ

静電容量方式 比誘電率・誘電正接 測定用電極は、低温から高温のtan δ測定が可能です。詳しくは、KEYCOM社にお問い合わせください。

解決策

KEYCOM社 (<https://keycom.co.jp/index.html>) の静電容量方式 比誘電率・誘電正接 測定用電極は、低温から高温のtan δ測定を実現します。測定試料は電極との組み合わせにより、平面板、フィルム (シート)、ジェル、液体に対応できます。

恒温槽や熱衝撃試験機を使うと、比誘電率・誘電正接の温度特性試験が可能です。対応規格は、ASTM D-150、JIS C 2101、JIS C 2141、JIS C 6481、JIS K 6911、JIS C 2111 28.1.2 (B法) などが上げられます。

応用編

0. 製品ラインアップ (電子部品計測アプリケーション)
1. トランス (変圧器) のインダクタンス測定
2. インダクタ (コイル) のインダクタンス測定
3. 電気自動車用リアクトルの損失測定
4. 太陽光発電用リアクトルの損失測定
5. コンデンサ (MLCC、電解、タンタル) の容量測定
6. 電気絶縁材料の比誘電率・誘電正接の温度特性試験
7. **JIS C 3216-5 エナメル線の誘電正接 ($\tan \delta$) 試験**
8. 水素製造用電解セル解析
9. 粉体インピーダンス測定

JIS C 3216-5 エナメル線の誘電正接 ($\tan \delta$) 試験 (1/2)

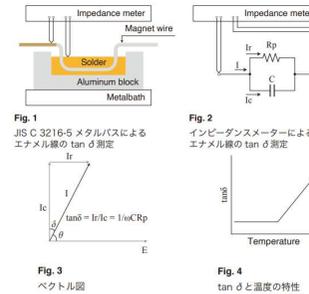


エナメル線 (マグネットワイヤー) は、主にモーターの巻線に使用されています。エナメル線メーカーの研究開発や生産品の検査、モーターメーカーの受け入れ検査や材料の開発では、JIS C 3216-5をもとに誘電正接 $\tan \delta$ を測定し、エナメル線の性能試験をしています。

対象

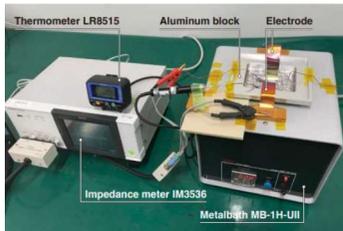
- モーター巻線用エナメル線 (マグネットワイヤー) および絶縁フィルム
- モーター研究開発、モーター生産時の受入検査

JIS C 3216-5にもとづく誘電正接試験



規格に沿った誘電正接試験では、インピーダンスメーターを使用します。また、温度を保持する装置としてメタルバスまたは金属ブロックを使用します (Fig. 1)。エナメル線および被膜の等価回路は、コンデンサと抵抗の並列回路になります (Fig. 2)。この回路に交流電圧をかけると、電圧Eより90°近く進んだ電流Iが現れます (Fig. 3)。損失角 δ は電流IのY軸成分IcとX軸成分Irの三角形で表され、このIrとIcの比が誘電正接 $\tan \delta$ になります。エナメル線被膜の絶縁状態が悪いと、誘電正接 $\tan \delta$ は高い値を示します。また、温度を上昇させると、ある温度から誘電正接 $\tan \delta$ の値が上昇します (Fig. 4)。インピーダンスメーターの測定周波数を上げた場合も誘電正接 $\tan \delta$ は高い値を示します。

JIS C 3216-5 エナメル線の誘電正接 ($\tan \delta$) 試験 (2/2)



使用機器

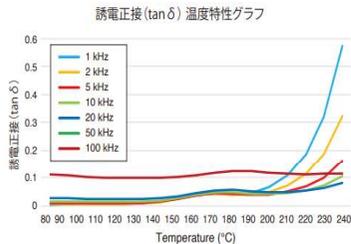
LCRメーター	IM3536	HIOKI製品
データロガー	LR8515	HIOKI製品
シーケンス制御電圧		
メタルバス	MB-1H-UII	小池精密機器製作所 (http://www.k-p-i.net/)
アルミニウムブロック	特注品	ハンダを溶かすため、溶れないよう特注品

試験方法

- ・試験開始前にLCRメーターのオープン補正を実施します。
 - ・溶かしたハンダにエナメル線を漬け込みます。
 - ・メタルバスを使用し、ハンダの温度を40°Cから10°C刻みで上昇させます。
 - ・LCRメーターで各温度の誘電正接を測定します。
 - ・複数の測定周波数で誘電正接を測定します。
 - ・各温度でLCRメーターのショート補正を電極間で実施します。
 - ・Sequence Maker*を使用し、測定データを記録します。
- *Sequence Makerは、無償のExcel*アドインです。Excel*からLCRメーターの測定周波数の切り替え制御や測定データの収集ができます。 <https://sequencemaker.hioki.com/ja/>

実測データ

- ・測定周波数が高いほど $\tan \delta$ は高い値を示します。
- ・測定周波数1kHzでは、190°Cから $\tan \delta$ が一定状態から急激に増加します。
- ・測定周波数が高いほど、急激に増加する温度が高い傾向にあります。
- ・誘電正接試験の測定周波数や評価温度範囲は評価対象の製品仕様により決定します。
- ・LCRメーターIM3536は、測定周波数を4Hzから8MHzに設定できます。
- ・メタルバスMB-1H-U II (小池精密機器製作所製 <http://www.k-p-i.net>) は300°Cまで温度設定が可能です。

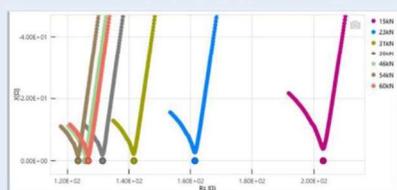


応用編

0. 製品ラインアップ (電子部品計測アプリケーション)
1. トランス (変圧器) のインダクタンス測定
2. インダクタ (コイル) のインダクタンス測定
3. 電気自動車用リアクトルの損失測定
4. 太陽光発電用リアクトルの損失測定
5. コンデンサ (MLCC、電解、タンタル) の容量測定
6. 電気絶縁材料の比誘電率・誘電正接の温度特性試験
7. JIS C 3216-5 エナメル線の誘電正接 ($\tan \delta$) 試験
8. **水素製造用電解セル解析**
9. 粉体インピーダンス測定

粉体インピーダンス測定 (2/2)

15-60 kNのステップ加圧測定のアウトプット

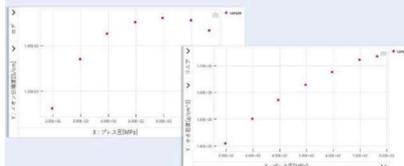


ナイキストプロット

実測データ

研究を進めるためには仮説と実験を繰り返す必要があります。全固体電池の研究を加速させるためには**プレス**の**圧力条件**や**材料の配合比**を変えながら、多くの実験を行う必要があります。しかしながら、従来はグローブボックス内で圧粉を行った後、試料を外部に取り出して特性評価を行う必要がありました。さらに測定後の試料は再利用できないため、プレス圧条件ごとに1つのサンプルを消費していました。つまり、作業時間の長さや試料の消費量が評価コストを増大させていました。このことは研究者が実験回数を増やすことの障壁となっていました。

HIOKIの粉体インピーダンス測定システムは、**グローブボックス内ですべてのプロセスを完結**できます。例えばこれまで約2時間以上かかっていた実験作業を**10分程度**に短縮することを期待できます。さらにプレス機構と電気計測用の電極が一体化しているため、1つのサンプルに対してプレス圧を変えながら連続的な測定が可能となり、試料の消費量も大幅に削減できます。研究者は限られたリソースを効率的に活用しながら、より多くの実験ができます。

プレス圧15-60 kNに対する
イオン伝導度とかさ密度の関係

目次

1. 基礎編 (約50分間)
2. 質疑応答 (約5分間)

～休憩 (約10分間)～

3. 応用編 (約50分間)
4. 質疑応答 (約5分間)

HIOKI



HIOKI


<https://www.hioki.co.jp/jp/>

ご聴講ありがとうございました