

LCRメータを置換法に 利用するには？

計量標準総合センター 電気標準第1研究室
米永暁彦

低周波インピーダンスクラブ 平成17年度第1回研究会 2005年7月7日

CENTRE FOR ADVANCED INDUSTRIAL SCIENCE AND TECHNOLOGY (CAIST)

1

はじめに

- ▶ LCRメータ：
 - 自動化に適する。
 - スキャナと併用した置換法校正への期待。
(NMIJ: 2003年度置換法によるインダクタ校正サービス開始)
- ▶ それでは、置換法を行う場合、
 - 1) どのような点に注意し、
 - 2) どんなパラメータ評価が必要だろうか？置換法の基本に立ち返って考察する。
- ▶ 想定対象: Agilent 4284A、基本確度 500 ppm

低周波インピーダンスクラブ 平成17年度第1回研究会 2005年7月7日

CENTRE FOR ADVANCED INDUSTRIAL SCIENCE AND TECHNOLOGY (CAIST)

2

置換法とは？

[JIS Z8103:2000 計測用語]

➤ 2504 置換法 (substitution method)

測定量と既知量とを置き換えて2回の測定結果から測定量を知る方法

解説

「…正確な基準と比較し、測定器自身の不正に基づく誤差を除くのを目的とする場合が多い。」

置換法で高精度測定が期待されるのはこの場合。

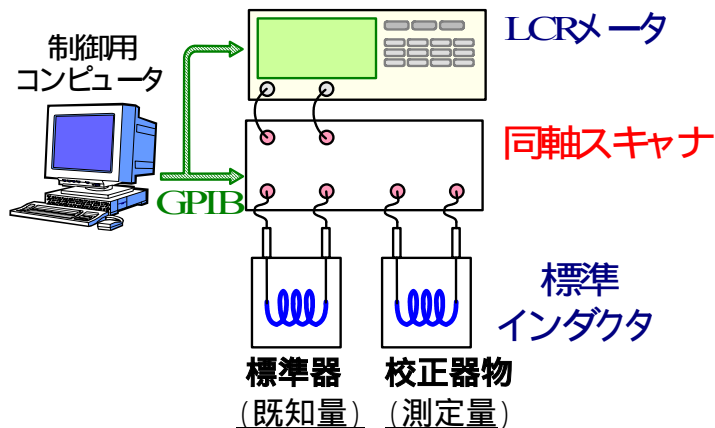
低周波インピーダンスクラブ 平成17年度第1回研究会 2005年7月7日

CLUSTER CENTER OF ADVANCED INDUSTRIAL SCIENCE AND TECHNOLOGY (CAIST)

3

LCRメータを利用した置換法

・ インダクタ校正における概念図



低周波インピーダンスクラブ 平成17年度第1回研究会 2005年7月7日

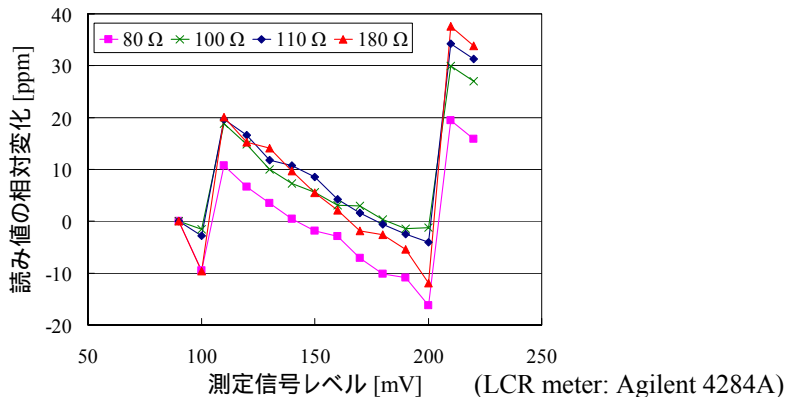
CLUSTER CENTER OF ADVANCED INDUSTRIAL SCIENCE AND TECHNOLOGY (CAIST)

4

測定条件で読み値が変化する例2

●設定信号レベル(抵抗 at 1592 Hz)

設定信号レベル 90 mV を基準とした抵抗の読み値の相対変化



低周波インピーダンスクラブ 平成17年度第1回研究会 2005年7月7日

www.aist.go.jp/RI/AVANCE/INDUSTRIAL/SCIENCE/AND/TECHNOLOGY/IBTT/

9

思考実験

[設定] 100.9 Ω と 101.1 Ω を電流 0.5 mA で比較

[問題] なるべく正確に 0.5 mA 流れるように設定信号レベルを変えるのが良いのか？

	100 mV	101 mV
100.9 Ω	0.4977 mA	0.5027 mA
101.1 Ω	0.4975 mA	0.5022 mA

注: LCRメータ出力インピーダンス 100 Ω 考慮

[ポイント] この場合、設定信号レベルを調節すると、
20 ppm 測定値が変化する。 **同じとみなせるか？**

低周波インピーダンスクラブ 平成17年度第1回研究会 2005年7月7日

www.aist.go.jp/RI/AVANCE/INDUSTRIAL/SCIENCE/AND/TECHNOLOGY/IBTT/

10

LCRメータを用いた置換法の表現

- インピーダンス $\mathbf{x} = \begin{pmatrix} r \\ x \end{pmatrix}$ 、LCRメータ読み値 $\mathbf{y} = \begin{pmatrix} R \\ X \end{pmatrix}$

$$\text{LCRメータの特性: } \mathbf{y} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) = \begin{pmatrix} f_R(r, x) \\ f_X(r, x) \end{pmatrix}$$

- 置換法の校正式 $\mathbf{x}_2 = \mathbf{x}_1 + (\mathbf{y}_2 - \mathbf{y}_1)$
(\mathbf{x}_1 : 標準(値が既知)、 \mathbf{x}_2 : 測定量(値が未知))

- \mathbf{x}_0 の近傍で1次のTaylor級数展開

$$\mathbf{y} = \mathbf{f}(\mathbf{x}_0) + \begin{pmatrix} f_{Rr}(\mathbf{x}_0) & f_{Rx}(\mathbf{x}_0) \\ f_{Xr}(\mathbf{x}_0) & f_{Xx}(\mathbf{x}_0) \end{pmatrix} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_0) + \boldsymbol{\delta}(\mathbf{x}, \mathbf{x}_0)$$

$$\left(f_{Rr} = \frac{\partial f_R}{\partial r}, f_{Rx} = \frac{\partial f_R}{\partial x}, f_{Xr} = \frac{\partial f_X}{\partial r}, f_{Xx} = \frac{\partial f_X}{\partial x} \right)$$

低周波インピーダンスクラブ 平成17年度第1回研究会 2005年7月7日

LCRメータを用いた置換法の表現

$$\text{測定値 } \mathbf{y}_1, \mathbf{y}_2 \left(\mathbf{F}(\mathbf{x}_0) = \begin{pmatrix} f_{Rr}(\mathbf{x}_0) & f_{Rx}(\mathbf{x}_0) \\ f_{Xr}(\mathbf{x}_0) & f_{Xx}(\mathbf{x}_0) \end{pmatrix} \right)$$

$$\begin{cases} \mathbf{y}_1 = \mathbf{f}(\mathbf{x}_0) + \mathbf{F}(\mathbf{x}_0) \cdot (\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_0) + \boldsymbol{\delta}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_0) \\ \mathbf{y}_2 = \mathbf{f}(\mathbf{x}_0) + \mathbf{F}(\mathbf{x}_0) \cdot (\mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_0) + \boldsymbol{\delta}(\mathbf{x}_2, \mathbf{x}_0) \end{cases}$$

ε : スパン誤差
 θ : ベクトル回転誤差
 δ : 直線性誤差

\mathbf{x}_2 の推定値

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_1 + (\mathbf{y}_2 - \mathbf{y}_1) &= \mathbf{x}_1 + \mathbf{F}(\mathbf{x}_0) \cdot (\mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_1) + \boldsymbol{\delta}(\mathbf{x}_2, \mathbf{x}_0) - \boldsymbol{\delta}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_0) \\ &= \mathbf{x}_2 + \Delta(\mathbf{x}_0) \cdot (\mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_1) + \boldsymbol{\delta}(\mathbf{x}_2, \mathbf{x}_0) - \boldsymbol{\delta}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_0) \end{aligned}$$

推定値と \mathbf{x}_2 の差

$$\Delta(\mathbf{x}_0) = \mathbf{F}(\mathbf{x}_0) - \mathbf{E} = \begin{pmatrix} f_{Rr}(\mathbf{x}_0) - 1 & f_{Rx}(\mathbf{x}_0) \\ f_{Xr}(\mathbf{x}_0) & f_{Xx}(\mathbf{x}_0) - 1 \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} \varepsilon_r & -\theta_x \\ \theta_r & \varepsilon_x \end{pmatrix}$$

(\mathbf{E} : 単位行列)

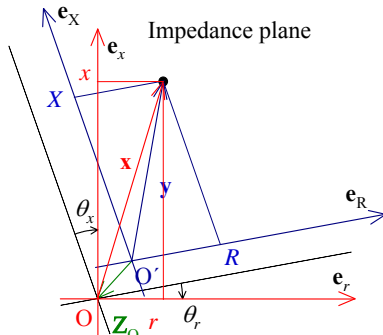
\mathbf{x}_0 の近傍で決まる量

低周波インピーダンスクラブ 平成17年度第1回研究会 2005年7月7日

幾何学的なイメージ

幾何学的なモデル

- アドミッタンスに関して、K. Suzuki et al., "A Calibration Method for Four-Terminal-Pair High-Frequency Resistance Standards," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol.42, no.3, pp.379-384,1993.



幾何学的なモデル

スパン誤差 $\varepsilon_r, \varepsilon_x$, ベクトル回転誤差 θ_r, θ_x , オフセット誤差 Z_0 , 直線性誤差 $\delta = (\delta_r, \delta_x)$

$y \approx Ax + Z_0$ として推定。

$$A \approx \begin{pmatrix} (1 + \varepsilon_r) \cos \theta_r & -(1 + \varepsilon_x) \sin \theta_x \\ (1 + \varepsilon_r) \sin \theta_r & (1 + \varepsilon_x) \cos \theta_x \end{pmatrix}$$

$$\delta = y - (Ax + Z_0)$$

低周波インピーダンスクラブ 平成17年度第1回研究会 2005年7月7日

www.aist.go.jp/RI/ADVANCED INDUSTRIAL SCIENCE AND TECHNOLOGY UNIT

13

パラメータの評価方法

▶ 必要なパラメータ (x_0 の近傍で決まる量)

- ◇ スパン誤差 $\varepsilon_r, \varepsilon_x$
- ◇ ベクトル回転誤差 θ_r, θ_x
- ◇ 直線性誤差 (高次の剰余項) δ

▶ 評価方法の工夫

着目点: **パラメータが結果に及ぼす影響は微量**

- ◇ 補正よりも、不確かさの推定に必要
- ◇ 各パラメータに求められる精度は高くない
- ◇ オータダを求めるだけなら他の結果が利用?
 - ◇ x_0 の近傍以外の評価結果・文献

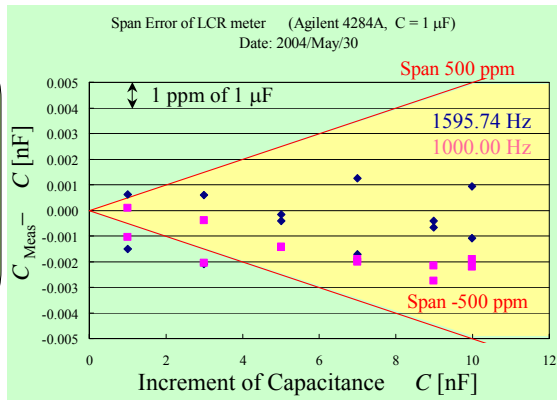
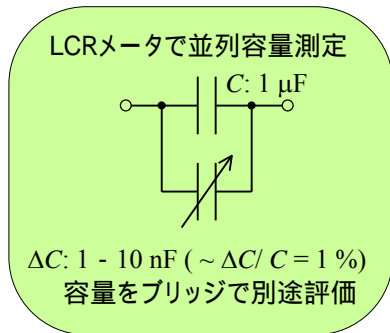
低周波インピーダンスクラブ 平成17年度第1回研究会 2005年7月7日

www.aist.go.jp/RI/ADVANCED INDUSTRIAL SCIENCE AND TECHNOLOGY UNIT

14

スパン誤差評価例

- **スパン誤差**: $|\varepsilon_x| < 500 \times 10^{-6}$ (製造者仕様書の基本確度)
ディケードキャパシタによる確認



低周波インピーダンスクラブ 平成17年度第1回研究会 2005年7月7日

www.aist.go.jp/RI/ADVANCED INDUSTRIAL SCIENCE AND TECHNOLOGY UNIT

15

ベクトル回転誤差

- 文献の引用
 - 30 ppm : H. Fujimoto et. al, “Development of Four-Terminal Pair High Capacitance Standards and Calibration Method Using Resister Standards,” 2001 NCSL Japan Forum, in Japanese.
- 次の標準が利用できれば測定して評価
 - $\tan \delta$ が既知のキャパシタ
 - 時定数が既知の交流抵抗
 - Q値 (or 等価直列抵抗) が既知の自己インダクタ
 - 相互インダクタ

低周波インピーダンスクラブ 平成17年度第1回研究会 2005年7月7日

www.aist.go.jp/RI/ADVANCED INDUSTRIAL SCIENCE AND TECHNOLOGY UNIT

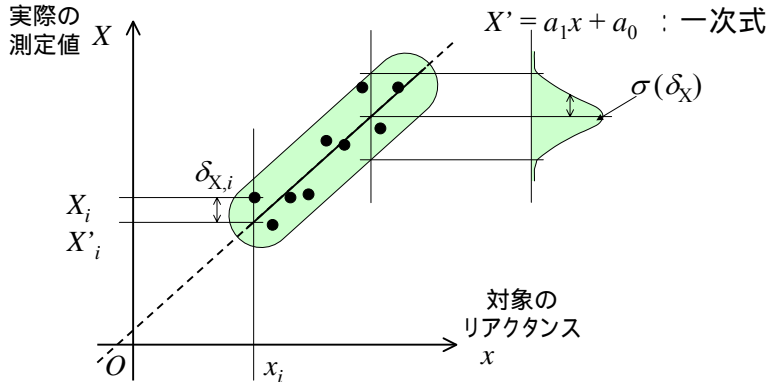
16

直線性誤差

$$\delta = y - (Ax + Z_0) \quad (\text{実際の測定値と1次近似との差})$$

$$x = (r \ x)', y = (R \ X)'$$

- イメージ ($r = \text{一定}$ の場合) 一次近似から予想される測定値



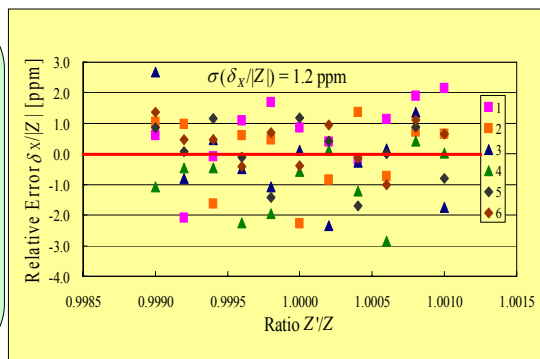
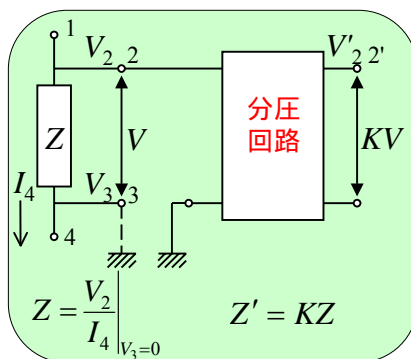
低周波インピーダンスクラブ 平成17年度第1回研究会 2005年7月7日

www.aist.go.jp/RI/ADVANCED INDUSTRIAL SCIENCE AND TECHNOLOGY

直線性誤差評価例

- 直線性誤差: $|\delta_X|/|Z| \approx 2.5 \times 10^{-6}$ (10 mH, 100 mH)

Improved Voltage Method⁽¹⁾ での評価例



(1) K.Suzuki et al.: "Non-Linearity Evaluation Method of Four-Terminal-Pair LCR Meter", NCSL International Conference Proceedings 2001

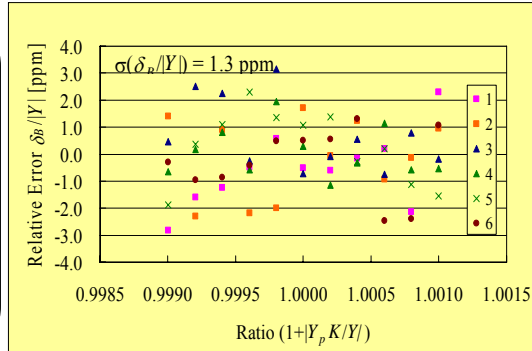
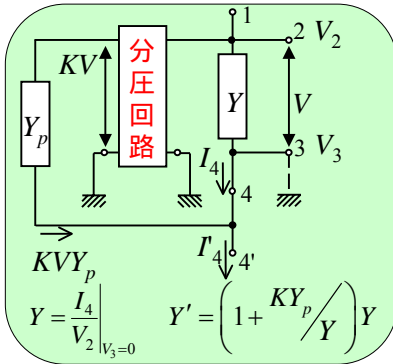
低周波インピーダンスクラブ 平成17年度第1回研究会 2005年7月7日

www.aist.go.jp/RI/ADVANCED INDUSTRIAL SCIENCE AND TECHNOLOGY

直線性誤差評価例2

- 直線性誤差: $|\delta_x|/|Z| < 2.5 \times 10^{-6}$ (10 mH, 100 mH)

Improved Current Method⁽¹⁾ での評価例

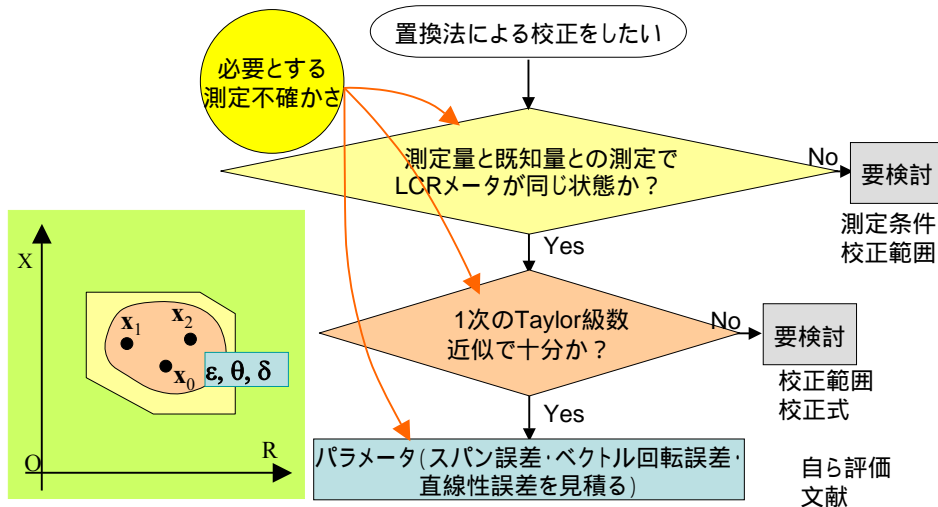


(1) K.Suzuki et al.: "Non-Linearity Evaluation Method of Four-Terminal-Pair LCR Meter", NCSL International Conference Proceedings 2001

低周波インピーダンスクラブ 平成17年度第1回研究会 2005年7月7日

www.aist.go.jp/AVANCE/INDUSTRIAL/SCIENCE/AND/TECHNOLOGY/IBT/

まとめ



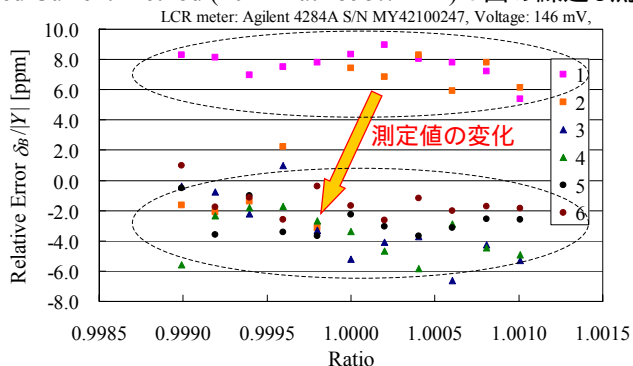
低周波インピーダンスクラブ 平成17年度第1回研究会 2005年7月7日

www.aist.go.jp/AVANCE/INDUSTRIAL/SCIENCE/AND/TECHNOLOGY/IBT/

同じ状態に保つことの難しさ

- 測定条件を固定していながら何らかの状態が変化したと思われる例(相対値 10×10^{-6} 程度)

Improved Current Method (10 mH at 1595.74 Hz) 3回の繰返し測定



低周波インピーダンスクラブ 平成17年度第1回研究会 2005年7月7日

CLM0000000100 ADVANCED INDUSTRIAL SCIENCE AND TECHNOLOGY (AIST)

21

おわりに

- LCRメータを置換法に利用する際に注意すべき点・必要なパラメータについて、主に Agilent 4284A を想定して考察した。
- 主に1000 Hz 付近の測定データをもとに考察したが、周波数範囲に応じて状況は変わるので、高周波などでは新たな考察が必要と考えられる。
- インピーダンスは周波数・電圧など条件に広がりがあり、全てを自ら評価するのは労力が大きい。ユーザ間で情報を共有したい。

低周波インピーダンスクラブ 平成17年度第1回研究会 2005年7月7日

CLM0000000100 ADVANCED INDUSTRIAL SCIENCE AND TECHNOLOGY (AIST)

22