

交流抵抗標準とキャパシタンス標準に関する調査研究

森風歌*

(2025年2月28日受理)

A survey on standards of AC resistance and capacitance

MORI Fuka

Abstract

Impedance standards serve as essential references in the metrology of electronic components - one of Japan's major industrial products - for evaluating electrical characteristics. Standards of AC resistance and capacitance of National Metrology Institute of Japan were developed and have been maintained based on the quantized Hall resistance as a reference using a quadrature bridge and impedance bridges. In this article, we review the foundation technology, calibration and measurement capabilities (CMC), and the outcomes of international comparisons of AC resistance and capacitance standards. Furthermore, several limitations in conventional standards have been identified to extend the frequency range and the impedance range. As potential solutions, a quadrature bridge with extended frequency range and digital impedance bridges enabling arbitrary impedance measurements are proposed.

1 はじめに

現代社会に欠かすことのできない電子機器の生産量は年々増加しており、中でもスマートフォンは2030年の出荷台数が15億台を超えると予想されている¹⁾。スマートフォンの中には、センサーやバッテリーなど多くの電子部品が搭載されている。中でも電子機器の制御において欠かすことのできないチップ積層セラミックコンデンサは、スマートフォンに1000個以上搭載されており、機能の向上に伴いさらに搭載される数は増大する²⁾。スマートフォンの他に、パソコンやタブレット、ウェアラブル端末といった電子機器や自動車にも多くの電子部品が搭載されている。また、電子部品は日本の主要産業品目のひとつであり、世界の電子部品市場の日本企業のシェアは2022年において33%、2022年の電子機器（電子部品、電気計測機器）の輸出割合は17.4%と高い割合を示す³⁾。さらに、2023年における日系電子部品メーカーの世界生産額は9兆7150億円で、日本の電子情報

産業の中で最大規模である⁴⁾。また、電子部品と同様に多くの電子機器や自動車に搭載されているリチウムイオン電池は、特に車載用の電池で国内の出荷販売額が年々増加している⁵⁾。このような近年の情勢を考慮すると、電子機器や自動車の需要拡大に伴い、電子部品や電池の需要も拡大していくことは明らかである。

自動車や電子機器の安全性と品質の確保のためには、それを構成する電子部品や電池ひとつひとつの測定値の信頼性が重要となる。例えば積層セラミックコンデンサなどの電子部品や電池の評価には、インピーダンス試験が行われている^{2),6)}。また、電子部品や電池を構成する材料開発の現場においても、LCRメータやネットワークアナライザを用いたインピーダンスの周波数特性評価が行われる⁷⁾⁻¹⁰⁾。このインピーダンス測定で得られる測定値の上位標準には、インピーダンス標準がある。インピーダンス標準は、大きく分けてキャパシタンス標準、交流抵抗標準、インダクタンス標準がある。本報告は、このうちキャパシタンス標準と交流抵抗標準について調査した結果を報告し、精密電気計測の観点からそれらの課題について述べる。

* 物理計測標準研究部門 応用電気標準研究グループ

2 キャパシタンス標準のトレーサビリティ

キャパシタンス標準のトレーサビリティは、大きく分けて2つの体系がある。ひとつの体系はクロスキャパシタとよばれる装置を用いる方法である。クロスキャパシタは、1956年にA. M. Thompsonらにより提案された特殊なキャパシタである¹¹⁾。電極棒の長さを正確に決定することで、長さを上位標準としてキャパシタンスの値を決定できる。現在は、オーストラリアのNational Measurement Institute, Australia (NMIA)、フランスのLaboratoire National de Metrologie et d'Essais (LNE)、中国のNational Institute of Metrology (NIM)などの国家計量標準機関(National Metrology Institute, NMI)において、キャパシタンスの国家標準として使用されている¹²⁾⁻¹⁴⁾。もうひとつの体系は量子化ホール抵抗(quantized Hall resistance, QHR)によって供給される方法である。QHRは、1980年にvon Klitzingらにより発見された量子ホール効果¹⁵⁾により得られる量子化された直流抵抗値である。産業技術総合研究所計量標準総合センター(National Metrology Institute of Japan, NMIJ)では1988年の第77回国際度量衡委員会勧告により、1990年からQHRに基づく直流抵抗標準の維持・供給を行っている^{16), 17)}。量子ホール効果は、二次元電子系に垂直に磁界を印加すると生じるホール電圧およびホール抵抗が量子化する現象で、量子ホール効果による直流抵抗値 $R_H(i)$ は式(1)で与えられる。

$$R_H(i) = \frac{h}{ie^2} = \frac{R_K}{i} \quad (1)$$

ここで、 h はプランク定数、 i は整数、 e は電気素量、 R_K はvon Klitzing定数である。 i の整数は、占有率とよばれる。プランク定数と電気素量は2018年11月の国際度量衡委員会により定義値として採択されたため、2019年5月からより厳密に $R_{K-90} = 25\,812.807\,459\,304\,5\,\Omega$ でSIトレーサブルとなった¹⁸⁾。

3 NMIJの交流抵抗標準・キャパシタンス標準の供給体制

「2 キャパシタンス標準のトレーサビリティ」で述べた通り、NMIJではQHRをもとにインピーダンス標準を整備している。図1に交流抵抗標準とキャパシタンス標準の供給体制フロー図を示す。DC QHRを基準に、100 Ω 標準直流抵抗器、10 k Ω 交直差計算可能抵抗器へ、比較の連鎖により、直流抵抗が校正される¹⁹⁾。交直差

計算可能抵抗器は、内部の抵抗エレメントの形状と寸法から、望みの周波数における交流抵抗とリアクタンス値を見積もることが可能である。この抵抗器を基準とし、インピーダンスブリッジを介して100 k Ω 交流抵抗器に、その後直角相ブリッジを介して1 nF 標準キャパシタを校正する。NMIJが保有する交流抵抗標準、キャパシタンス標準の供給システムの外観を図2に示す。3.1から3.3では、供給体制において不可欠な要素である交直差計算可能抵抗器とブリッジについて詳述する。

3.1 交直差計算可能抵抗器

交直差計算可能抵抗器は、金属管中に配線された抵抗線の配置、長さ、太さから直流抵抗から交流抵抗への校正が可能となる。インピーダンスの周波数特性が計算可能であり、インピーダンス Z は次式で与えられる。

$$Z = R_0[1 + \alpha(\omega) + j\omega\tau] \quad (2)$$

ここで R_0 は直流抵抗値、 ω は角周波数、 τ は時定数である。すなわち、 $\alpha(\omega)$ が周波数に対する抵抗の値の変化、 $j\omega\tau$ が位相角の変化を示す。最も単純な形状であるcoaxial型、bifilar型やquadrifilar型がある²⁰⁾。NMIJでは、

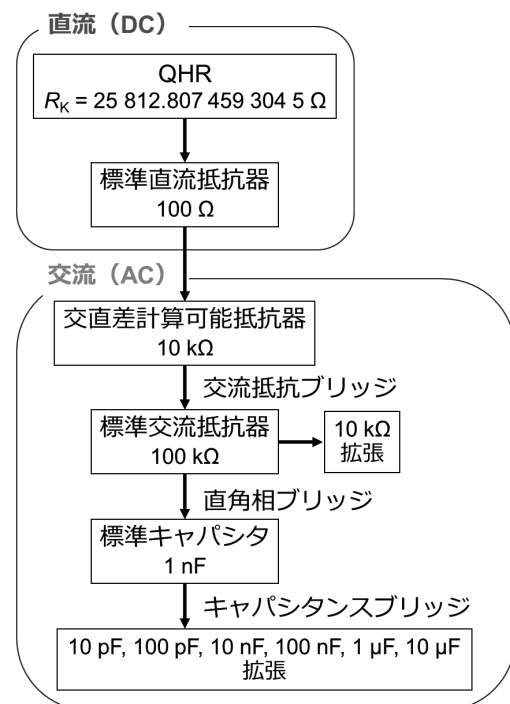


図1：NMIJの交流抵抗標準とキャパシタンス標準の供給体制フロー図。

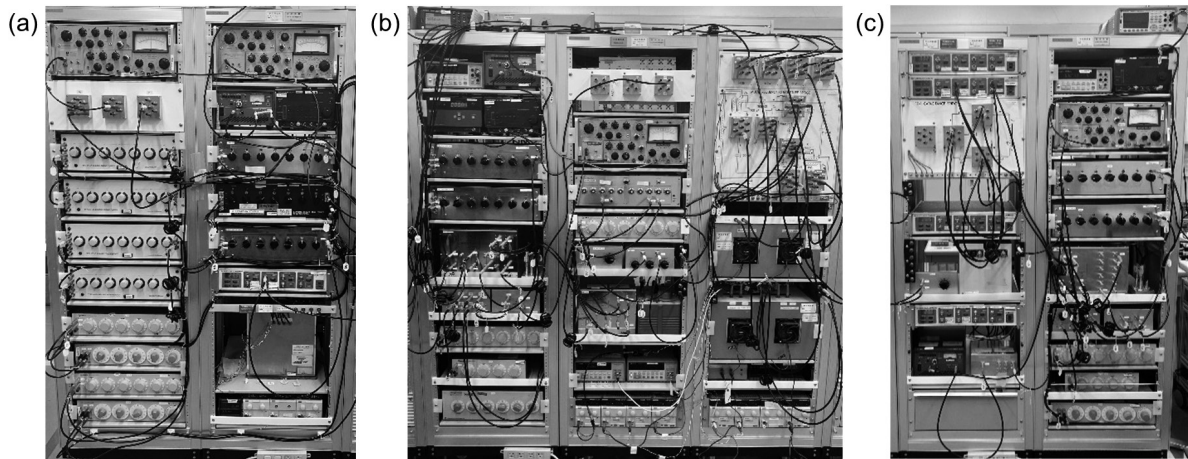


図2：NMIJの交流抵抗標準，キャパシタンス標準の供給システム．(a) 交流抵抗ブリッジ，(b) 直角相ブリッジ，(c) キャパシタンスブリッジ．

リアクタンス値が最も小さいという利点と，校正に使用する周波数や基準抵抗値の値から quadrifilar 型を用いている．quadrifilar 型の交流差計算可能抵抗器は 1960 年代に D. L. H. Gibbings によって開発され²¹⁾，J. Bohacek によって詳しく計算された²²⁾．

3.2 インピーダンスブリッジ

交流抵抗値とキャパシタンス値を，比較の連鎖により拡張する際に用いる交流抵抗ブリッジとキャパシタンスブリッジについて紹介する．ここで，これらのブリッジをまとめてインピーダンスブリッジと呼ぶ．図3には，二端子対のインピーダンスブリッジの基本回路を示す．検出器(D)が0を示す，すなわちブリッジ平衡時に式(3)が成り立つ．

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{Z_2}{Z_1} \quad (3)$$

式(3)からわかるように，電圧比からインピーダンス比を求めることができ，単純な比を用いるためインピーダンス比を求める際の操作は簡便である．しかし，このブリッジはリード線の抵抗やインダクタンス，浮遊容量など，インピーダンス値の評価算出することが難しい不確かさ要因を多く含む．そこで，より精密にインピーダンスを測定する方法として四端子対定義が多く用いられている．

四端子対定義は，信号電流ケーブルと電圧検出ケーブルが独立しており，ケーブルの残留インピーダンスの影響を減少させることができる²³⁾．内部導体の電流が発生する磁界をシールド導体の電流の磁界が打ち消した

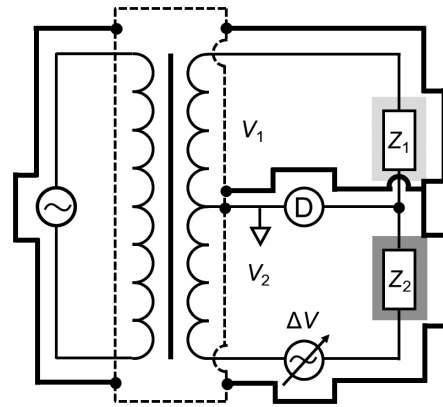


図3：二端子対インピーダンスブリッジ．

め，電圧検出ケーブルと電流検出ケーブル間の浮遊容量の発生を抑制できる．さらに，リード線の抵抗やインダクタンスによる不確かさ要因が小さくなる．

インピーダンス値が高い場合は，電流が流れにくいため二端子対法を用いた場合でも測定値への影響は小さいが，インピーダンス値が低い場合には残留インピーダンス値が相対的に大きくなるため測定値への影響が大きくなる．このため，四端子対定義に基づき設計されたインピーダンスブリッジは精密測定に対して有効となる．主要NMIの標準の供給体制から，測定するインピーダンス値や要求される精度に依存して二端子対法と四端子対法が使分けられていることがわかる²⁴⁾⁻²⁸⁾．実際に，NMIJではキャパシタンスブリッジと直角相ブリッジを二端子対法，交流抵抗ブリッジを四端子対法に基づいて構築されたブリッジで測定している．

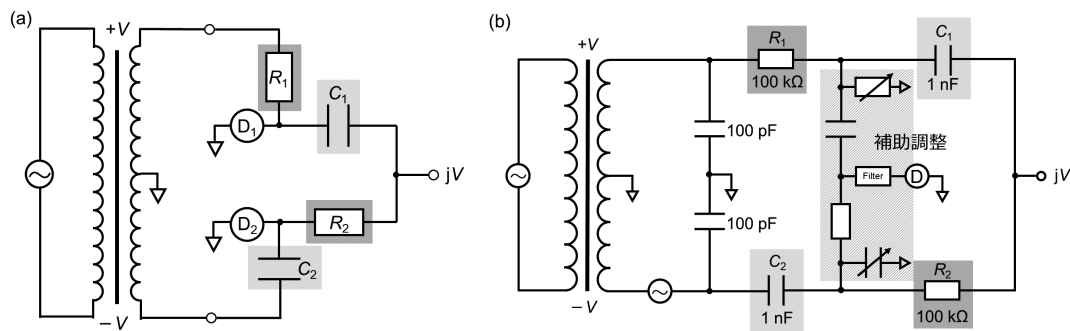


図4 (a) 直角相ブリッジ, (b) NMIJの直角相ブリッジ. 簡略化のため同軸表示を省略.

3.3 直角相ブリッジ

交流抵抗とキャパシタンスは位相が 90° 異なるため、比較する際には位相を 90° 変化させる必要があり直角相ブリッジを用いる. 一般的な直角相ブリッジを図4 (a)に示す. 直角相ブリッジの平衡条件は式(4)で与えられる.

$$\omega^2 C_1 C_2 R_1 R_2 = 1. \quad (4)$$

ここで ω は角周波数, C_1 と C_2 は被校正キャパシタンス, R_1 と R_2 は基準となる標準交流抵抗である. 平衡条件から, キャパシタンスまたは交流抵抗, またはその両方の値を変化させない限り, 平衡条件を満たした状態で周波数を変化させることができない. NMIJでは, 図3 (b)に示すような二端子対定義に基づいた直角相ブリッジを用いて, $100 \text{ k}\Omega$ の交流抵抗器で 1 nF のキャパシタを校正する. そのため, 平衡条件を満たす周波数は角周波数が 10^4 rad s^{-1} (周波数として表記すると約 1.592 kHz)の1点のみとなる. すなわち, NMIJでは直角相ブリッジを用いたキャパシタンスの校正は, この周波数において行われている.

4 デジタルインピーダンスブリッジ

デジタルブリッジは, 電圧源, 検出器, 調整器といったブリッジの要素のいずれか, またはすべてをデジタル化した2種類のブリッジに分けることができ, 各々デジタルアシストブリッジとフルデジタルブリッジと呼ばれる²⁹⁾.

デジタルアシストブリッジは, 依然として比の基準を比トランスや誘導分圧器といったアナログ回路設計に基づく電磁部品に依存しており, 製造時に巻線による電圧比が固定されるという制限がある. また, フルデジタル

ブリッジは, 高精度なD/Aコンバータを用いることで, サンプリングとデジタル処理により任意の電圧比や周波数を生成, 測定することができる³⁰⁾. デジタルインピーダンスブリッジは, 測定の自動化により操作が簡便になり, 繰り返し測定や連続測定が可能になるという利点がある. 一方, デジタル化に起因して生成されるノイズなどの不確かさ要因が増大するという欠点もある.

以下に近年の研究開発の例を2点紹介する. 1点目は, 電圧比を決定する正弦波発生器について改善した報告である. 従来の正弦波発生器と比較して振幅と位相角の分解能が高く, 2つのチャンネルから発生する電圧の比も 10^{-8} レベルを300 s近く保持できる. この正弦波発生器は, 2つのチャンネルの電圧比により 10^{-7} レベルの相対不確かさでフルデジタルブリッジに使用でき, 電圧比を誘導分圧器に置き換えることによって 10^{-8} レベルの相対不確かさでデジタルアシストブリッジに使用できることが示された^{31), 32)}. しかし, この方法では正弦波発生器の安定性がインピーダンスブリッジの性能に直接影響することになる. そこで2点目の研究開発例は, 1点目の例である2つの電圧比をインピーダンス比に直接使用する方法に対して, 検出器の高分解能化と高安定性化により改良したという報告である. この方法は, まず比較する2つのインピーダンスに流れる電流をおおまかに平衡させ, その後, 生じた電流差をトランスインピーダンス機能を持つ電流増幅器で自動的に平衡する設計となる. これにより, $1 \text{ k}\Omega$ の抵抗と 1 nF のキャパシタの比較におけるタイプAの不確かさが約 1×10^{-8} となった³³⁾.

5 各国標準研究所の現状

ここでは, 主要なNMIの交流抵抗標準とキャパシタンス標準についての校正測定能力(Calibration and Measurement Capability: CMC)を調査して得た値を比較

した。比較結果を踏まえ、考えられる背景を列挙するとともに、キャパシタンス標準で実施された国際比較について述べる。

5.1 主要な NMI における交流抵抗標準・キャパシタンス標準

CMC とは、校正サービスを通して顧客に提供できる登録等の範囲の中で最小の不確かさである。2024 年の時点で登録されている CMC は、全ての量目を合わせて 26 000 件を超える。表 1 では、各 NMI で登録されている交流抵抗標準の登録値について、周波数と拡張不確かさの範囲に着目してまとめた。各 NMI について顕著な特徴はみられないが、LNE は高い周波数範囲でかつ広い交流抵抗値が登録されているという特徴がある。そこで、図 5 に LNE の周波数に対する交流抵抗標準の校正測定能力をその相対拡張不確かさによって色分けしてまとめたグラフを示す。ここで図 5 のグラフ中で示す線の表記は、ある 1 点の周波数において校正測定能力を有する交流抵抗値が連続的であることを表す。相対拡張不確かさの値が $1 \mu\Omega/\Omega$ から $1 \text{ m}\Omega/\Omega$ 未満と 3 桁の幅があるが、周波数範囲が 20 Hz から 30 MHz、交流抵抗値は $0.5 \text{ m}\Omega$ から $1 \text{ M}\Omega$ までと広い値の範囲において校正測

表 2：主要 NMI のキャパシタンス標準の校正測定能力。

NMI	周波数範囲	相対拡張不確かさ ($\mu\text{F}/\text{F}$)
NPL	20 Hz to 1 MHz	0.7 to 1 000.0
LNE	20 Hz to 30 MHz	1.2 to 400.0
PTB	50 Hz to 1 MHz	10 to 700.0
NMIA	400 Hz to 5 kHz	0.08 to 200.0
NIST*	50 Hz to 10 MHz	0.19 to 14 000.0
NIM	10 Hz to 10 MHz	1.0 to 6 000.0
KRISS	60 Hz to 13 MHz	10.0 to 32 000.0

定能力を有している。LNE では不確かさレベルで 3 段階に分けられ³⁴⁾、最も高精度な方法として two-stage (double stage) 型オートトランスをもとにした比較ブリッジ³⁵⁾、次に高精度な方法として 4 つの抵抗器をもとにした Wheatstone bridge、最も汎用的で低精度な方法としてサンプリング技術を利用した比較ブリッジという測定方法によって交流抵抗標準のトレーサビリティを確保している³⁶⁾。

次に、表 2 では各 NMI で登録されているキャパシタンス標準の登録値について、周波数と拡張不確かさの範囲に着目してまとめた。NMIA が狭い周波数範囲において小さな相対拡張不確かさで供給しているのに対し、その他の NMI では相対拡張不確かさの値は大きくなるが、広い周波数範囲で供給しているということがわかる。この理由として、国の主要産業が背景にあると考えられる。オーストラリアは、鉄鋼業が主要な産業であり、エレクトロニクス産業が盛んではないため、国内でのキャパシタンス標準の需要が少なく古い高精度な装置を使い続けているということが考えられる。これに対して、オーストラリア以外の国の代表として韓国を例にする。韓国はエレクトロニクス産業が盛んであり、国内の需要があるにも関わらず、日本の JCSS 登録事業者のような二次標準を拡張しメーカー等が維持管理する標準器を校正する機関がない。そのため、精度は低くても広い周波数範囲の校正測定能力を有している必要があると考えられる。

表 1：主要 NMI の交流抵抗標準の校正測定能力

NMI	周波数範囲	相対拡張不確かさ ($\mu\Omega/\Omega$)
NPL*	40 Hz to 20 kHz	0.5 to 50.0
LNE	20 Hz to 30 MHz	25.0 to 250.0
METAS*	10 Hz to 80 kHz	0.1 to 100.0
PTB*	10 Hz to 1 MHz	2.0 to 180.0
NMIA	10 Hz to 200 kHz	4.0 to 120.0
KRISS*	400 Hz to 1 MHz	30.0 to 7 500.0

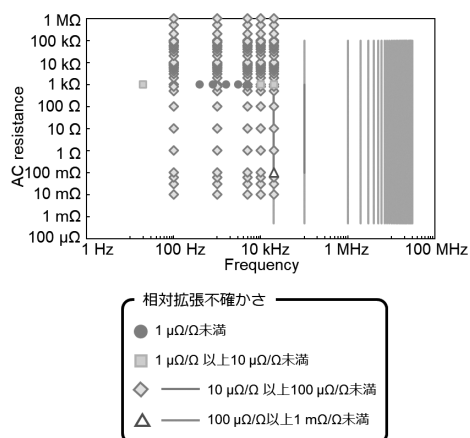


図 5：LNE の交流抵抗標準の校正測定能力。

5.2 国際同等性

多くの産業製品を輸出入している日本において、製品の性能に関する測定結果が国際的に整合しているという国際同等性の確保は重要である。キャパシタンス標準は、主に 10 pF の標準器を仲介器とした国際比較が行われている。最新のレポートは 2018 年に発行されており、国際度量衡局 (Bureau International des Poids et Mesures : BIPM) を中心として 7 か国間の国際比較が行われている³⁷⁾。また、NMIJ は 2009 年に最終レポートとしてまとめられたアジア太平洋計量計画 (Asia Pacific Metrology

Programme : APMP) の 13 か国の研究所が参加した国際比較に参加した³⁸⁾。参加した研究機関のうち 1 機関を除くすべての研究機関の間で良好な一致を示した。最近に参加した国際比較では, Euro-Asian Cooperation of National Metrological Institutions (COOMET) を中心に 10 pF の国際比較が行われ, 2017 年の最終レポートによりまとめられている³⁹⁾。ここでは, European Association of National Metrology Institution (EURAMET) から PTB, APMP から NMIJ が参加することで, 地域内だけでなく地域間での比較も同時に行われた。不確かさの範囲内でよく一致しているという結果であった。

また, 交流抵抗標準の国際比較は, 上位標準である直流抵抗標準と下位標準であるキャパシタンス標準の国際比較によって同等性が確認されているとみなされており, 2024 年度の時点で実施されていない。

6 NMIJ から産業界へのトレーサビリティ体系と標準供給の状況

NMIJ から産業界への交流抵抗標準とキャパシタンス標準のトレーサビリティ体系は以下のようになってい

る。NMIJ の所有する特定標準器からインピーダンスブリッジを介して登録事業者の持つ特定二次標準器を校正し, 登録事業者がキャパシタンス値の拡張を行いながらワーキングスタンダードを校正する。最後にこれを基準として校正対象器物を校正する。

登録事業者として, 交流抵抗は日本電気計器検定所 (Japan Electric Meters Inspection Corporation : JEMIC) とキーサイト・テクノロジー株式会社, キャパシタンスは JEMIC とキーサイト・テクノロジー株式会社に加えて株式会社村田製作所が登録されている⁴⁰⁾。図 6 と図 7 には, 各々の登録事業者について周波数に対する交流抵抗またはキャパシタンスの校正能力とその不確かさを色分けしてまとめた図を示す。図 6 (b) と図 7 (b) において面状にハイライトした部分は, 周波数と交流抵抗値またはキャパシタンス値ともに連続的な範囲を表す。図 6 と図 7 から, 交流抵抗, キャパシタンスともにキーサイト・テクノロジー株式会社がい広い周波数範囲で, かつ連続値で供給していることがわかる。キーサイト・テクノロジー株式会社は, 電気計測器を多く取り扱っており, 測定器を製造するうえで必要な範囲について広く校正能力を有している。また, 株式会社村田製作所は日本の主

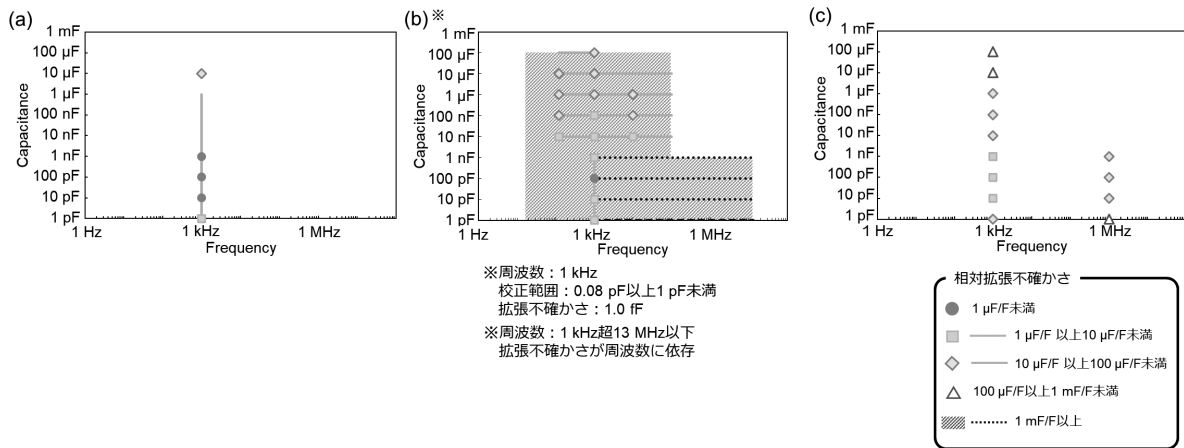


図 6 : JCSS 登録事業者の交流抵抗の校正測定能力. (a) JEMIC, (b) キーサイト・テクノロジー.

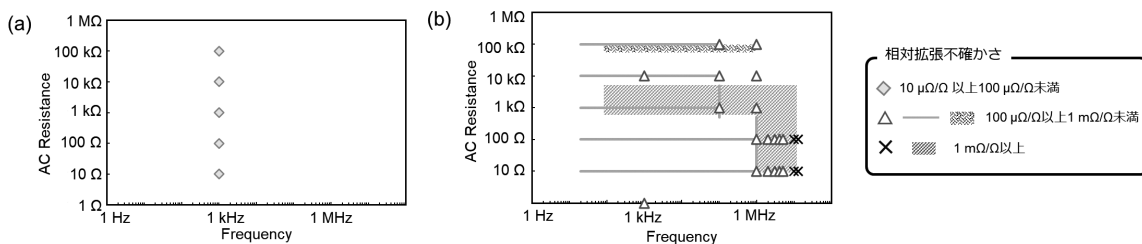


図 7 : JCSS 登録事業者のキャパシタンスの校正測定能力. (a) JEMIC, (b) キーサイト・テクノロジー, (c) 村田製作所.

要なコンデンサメーカーであり、多くの製品を輸出するために国際同等性が重要という観点から、トレーサビリティに基づいた標準の供給体制を重視していることが伺える。

7 課題と今後の展望

これまでにNMIJや主要NMI、日本の産業界における交流抵抗標準とキャパシタンス標準に関する技術と、校正測定能力について述べた。これらの調査結果から、明らかになった課題について、産業界の需要、および、標準供給の堅牢性の観点から考察する。さらに、各々の課題に対する今後の展望も示す。

7.1 課題

7.1.1 産業界の需要に対する課題

産業界の需要に対する課題として、標準の周波数範囲拡大を挙げる。産業界への標準供給に関するキーワードのひとつに周波数がある。例えば、電子部品のひとつであるコンデンサは、損失による抵抗である等価直列抵抗 (Equivalent Series Resistance : ESR) や寄生インダクタンス (Equivalent Series Inductance : ESL) を内在する。これにより、周波数変化に伴い、共振点というインピーダンスが最も小さい状態の前後で容量性と誘電性を示す。このように、インピーダンスの周波数特性は理想的なキャパシタンスをモデルとした理論値から乖離する。共振点は、コンデンサの材料や構造、サイズの違いに依存するため、コンデンサの特性評価の指標のひとつとして重要なパラメータである⁴¹⁾。この共振点が観測される周波数帯域は、MHz付近であることが多い。また、コンデンサを構成する材料のひとつである誘電材料は、代表的な分極メカニズムをMHzからGHzの周波数範囲にもっており、この周波数特性が材料の誘電特性を物理的に解明する際の重要な情報のひとつとなる⁴²⁾。一方、リチウムイオン電池などの蓄電デバイスにおいても、インピーダンス特性は対象となる蓄電デバイスのサイズや形状に対して優位な違いを示す。その特性の違いは、特に1kHz付近よりも高周波数の帯域ほど顕著に現れる⁴³⁾。

これらの背景から、電子部品や電池の特性を評価するインピーダンスメータは、数MHz程度の周波数帯域まで測定可能であることが望ましいと考えられる。しかし「3.3 直角相ブリッジ」で述べた通り、現在のキャパシタンス標準のために構築されている直角相ブリッジを用いての校正では、1点のみの周波数 (1.592 kHz) に限定された供給となる。以上のことから、産業界には

1.592 kHzよりも高周波範囲での標準供給の需要があると想定される。

7.1.2 計量標準の維持・強靱化に対する課題

NMIJでは、直流抵抗から交流抵抗への校正には10kΩの交直差計算可能抵抗器が用いられている。交直差計算可能抵抗器の原理と交流抵抗標準の実現方法については、「3.1 交直差計算可能抵抗器」で述べた。しかし、2024年の時点でこの交直差計算可能抵抗器は代替器を入手することが困難な状況にある。そのため、抵抗器の内部構造が変化するなどの故障により、下位標準である交流抵抗標準とキャパシタンス標準の供給の継続性に支障が出る可能性がある。

7.2 今後の展望

7.1.1と7.1.2で示した各課題に対して、現在想定している今後の展望を示す。

7.2.1 直角相ブリッジの測定周波数の高周波化

直角相ブリッジを用いた測定の周波数が1点のみとなっていることに対する今後の展望を示す。以前、一部の校正事業者から、周波数が1kHzにおける校正への要望があったことから、周波数範囲1kHzから1.592kHzの離散的な複数周波数におけるキャパシタンス値の周波数依存性を、多周波数直角相ブリッジを用いて測定する研究が実施された^{44), 45)}。この多周波数直角相ブリッジは、既存の直角相ブリッジにtwo-stage型の誘導分圧器 (Inductive Voltage Divider : IVD) を2つ導入し、IVDの分圧比を調整することで原理上は任意の周波数において平衡が可能となる。周波数が $n/8 \times 10/2\pi$ kHz ($n=3, 4, 5, 6, 7, 8$) の6点における100kΩ交流抵抗を基準とした1nFキャパシタの測定結果は、測定した全周波数においてタイプAの相対不確かさが 2×10^{-7} であった。また、周波数1.592kHzと1kHzの違いにより、10pFのキャパシタの器物によってはその容量値に変化があるということがわかった。同様に、3つのIVDを接続した周波数可変直角相ブリッジを用いて、周波数500Hzから5kHzの範囲で100kΩ交流抵抗器を基準として1pFキャパシタを測定した報告もある⁴⁶⁾。これらの先行研究を応用し、既存の直角相ブリッジに対して適切にIVDを挿入することにより、直角相ブリッジの測定周波数を現在よりも高周波化できる可能性がある。

7.2.2 ジョセフソン効果を用いたデジタルインピーダンスブリッジ

IVDにより電圧比を決定するデジタルインピーダンスブリッジは、標準器と被校正器に印加される交流電圧の比がIVDの製作する際に定められた通倍比にあらかじ

め固定されてしまう。さらに位相と周波数も容易に変化させることはできない。振幅比、位相、周波数を任意の値に設定して測定が可能となると、比較の連鎖によって積み重なる不確かさがなくなるため測定精度の向上が期待できることに加えて、任意のインピーダンス比の測定が可能となるという利点がある。この実現のためには、Josephson Arbitrary Waveform Synthesizer (JAWS) 用いたデジタルインピーダンスブリッジが測定システムの有力な候補のひとつではないかと考えられる。JAWS は、数 Hz から 1 MHz の周波数または DC に対して、量子標準電圧に基づく高精度、計算可能、かつ歪みのない電圧波形を生成することができる D/A コンバータでとして、1996 年に S. P. Benz らによって報告された⁴⁷⁾。2つの独立した JAWS を使用するフルデジタルインピーダンスブリッジは、Dual Josephson Impedance Bridge (DJIB) と呼ばれ、任意の値で正確な位相角と電圧比を生成でき、さらに周波数も可変なブリッジである⁴⁸⁾。近年、PTB や METAS などヨーロッパの NMI を中心に、2つの JAWS を電圧源として用いた研究が盛んに実施されている。例えば、2024 年に開催された精密電気計測国際会議 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM) では、DJIB 同士の測定結果の比較が報告がされている⁴⁹⁾。PTB と METAS の DJIB で測定したインピーダンス比 ($C:C$ または $R:R$) の測定結果の差は、周波数 1.233 15 kHz において 6 nF/F または 6 n Ω/Ω となった。2機関の結果の差が小さいことから、DJIB を用いた測定の正確さが伺える。供給の継続性の懸念という課題を解消する方法の候補と得るほか、インピーダンス測定の自動化・省力化が期待できる。

8 総括

生活に欠かすことのできない電子機器や自動車に多く搭載されている電子部品や電池の評価には、材料開発の段階からインピーダンス評価が用いられている。その安全性や信頼性のためには、測定値の基準となる標準の値が重要となる。そこで、インピーダンス標準の中の交流抵抗標準とキャパシタンス標準に関して、計量標準総合センター (NMIJ) を中心に測定方法や供給範囲などを調査した。

標準供給システムには交直差計算可能抵抗器やインピーダンスブリッジ、直角相ブリッジが用いられる。各国の標準研究所が持つ校正測定能力は、特にキャパシタンス標準で国際機関による違いがみられた。日本の産業界に対しては、JCSS 登録事業者により値が拡張されて

メーカーなどに標準供給されている。以上の調査から、NMIJ における交流抵抗標準とキャパシタンス標準の供給においては、周波数の広帯域化への需要と、中長期的な展望として維持・強化化に対する課題が明らかになった。

謝辞

本調査研究をまとめるにあたり、貴重なご助力とご鞭撻を賜りました産業技術総合研究所 計量標準総合センター 物理計測標準研究部門 応用電気標準研究グループ 坂本憲彦 グループ長に深く感謝いたします。最後に貴重なご意見をいただきました皆様に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 総務省. 令和 5 年版 情報通信白書 ICT 白書, <https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r05/pdf/n4500000.pdf>. Online accessed 21 February 2025.
- 2) 積層セラミックコンデンサ (MLCC) の技術と市場, 株式会社シーエムシー出版 (2023).
- 3) 総務省. 令和 6 年版 情報通信白書 ICT 白書, <https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r06/pdf/n2150000.pdf>. Online accessed 21 February 2025.
- 4) JEITA 日本部品部会. 日本の電子部品産業の強み - 世界シェア, <https://home.jeita.or.jp/ecb/about/industry.html>. Online accessed 21 February 2025.
- 5) 経済産業省. 経済産業省生産動態統計年報 (2023), https://www.meti.go.jp/statistics/tyo/seidou/result/ichiran/08_seidou.html. Online accessed 10 October 2024.
- 6) 中村崇. 車載用リチウムイオン電池のリユース技術と実際例, NTS (2023).
- 7) T. Teranishi. *JCS-Japan*, **125**, 7, 547 (2017).
- 8) K. Jiang, L. Zhang, B. Li, P. Li, S. Yu, R. Sun, Z. Fu, and X. Cao. *Ceramics International*, **48**, 30020 (2022).
- 9) N. Gauthier, A. Agrawal, O. Dubrunfaut, S. Franger, B. Lestriez, J. Badot, and L. Assaud. *Electrochimica Acta*, **437**, 141495 (2023).
- 10) F. Rahmawati, B. Musyarofah, K. D. Nugrahaningtyas, A. Prasetyo, V. Suendo, H. Haeruddin, M. F. A. Handaka, H. Nilasari, and H. Nursukatmo. *Journal of Materials Research and Technology*, **15**, 2725 (2021).
- 11) A. M. Thompson, and D. G. Lampard. *Nature*, **177**, 888 (1956).
- 12) J. Schurr, N. Fletcher, P. Gournay, O. Thévenot, F.

- Overney, L. Johnson, R. Xie, and E. Dierikx. *Metrologia*, **54**, 01016 (2017).
- 13) M. S. Khan, O. Séron, G. Thuillier, O. Thévenot, P. Gournay, and F. Piquemal. *Rev. Sci. Instrum.*, **88**, 055109 (2017).
- 14) L. Huang, Y. Yang, W. Wang, and D. Dai. *CPEM Digest* (2024).
- 15) K. v. Klitzing, G. Dorda, and M. Pepper. *Phys. Rev. Lett.*, **45**, 494 (1980).
- 16) 中村安宏, 堂前篤志. *Synthesiology*, **3**, 3, 213 (2010).
- 17) 丸山道隆, 大江武彦. 電気学会誌, **139**, 356 (2019).
- 18) Bureau International des Poids et Mesures. The International System of Units 9th edition, file:///C:/Users/m43m22618/Downloads/SI-Brochure-9.pdf. (2019). Online accessed 21 February 2025.
- 19) 大江武彦. 産総研計量標準報告 **6**, 119 (2007).
- 20) 藤木弘之, 堂前篤志, 中村安宏. 電気学会全国大会講演論文集, 2001, 355 (2001).
- 21) D. L. H. Gibbings. *Proc. Inst. Elec. Eng.*, **110**, 2, 335 (1963).
- 22) J. Bohacek, and V. Fajt. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **29**, 367 (1980).
- 23) R. D. Cutkosky. *J. Res. Nat. Bur. Stand.-C. Eng. Instrum.*, **74C**, 63 (1970).
- 24) Y. Yang, L. Huang, Y. Lu, J. Zhao, J. Wang, W. Wang, and Z. Lu. *CPEM Digest* (2020).
- 25) D. B. Kim, D. M. Kassim, W. Kim, L. Callegaro, V. D'Elia, B. Trinchera, J. Kucera, and R. Sedlacek. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **68**, 6 (2019).
- 26) R. Sindjui, O. Thévenot, P. Gournay, F. Piquemal, G. Thuillier, S. Khan, and O. Séron. *17th International Congress of Metrology*, 12003 (2015).
- 27) M. Marzano, V. D'Elia, M. Ortolano, and L. Callegaro. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **71**, 1503008 (2022).
- 28) J. Schurr, and J. Lee. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **71**, 1503008 (2022).
- 29) L. Callegaro. *IEEE Instrum. Meas. Mag.*, **18**, 42 (2015).
- 30) M. Ortolano, L. Palafox, J. Kučera, L. Callegaro, V. D'Elia, M. Marzano, F. Overney, and G. Gülmez. *Metrologia*, **55**, 499 (2018).
- 31) J. Kučera, J. Kováč, L. Palafox, R. Behr, and L. Vojáčková. *Meas. Sci. Technol.*, **31**, 064002 (2020).
- 32) J. Kučera, and J. Kováč. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **67**, 1199 (2018).
- 33) Y. Wang, S. Schlamminger, D. Jarrett, A. Panna, and A. D. Koffman. *CPEM Digest* (2024).
- 34) M. Ouameur, R. Vasconcellos, and M. Agazar. *Metrology*, **4**, 1 (2024).
- 35) M. Ouameur, R. Vasconcellos, M. Agazar, O. Thévenot, and E. Patois. *Metrologia*, **59**, 055005 (2022).
- 36) M. Agazar, and M. Ouameur. *CPEM Digest* (2020).
- 37) P. Gournay, B. Rolland, R. Chayramy, F. Overney, Y. Yang, L. Huang, Z. Lu, Y. Wang, A. Koffman, L. Johnson, R. Xie, J. Belliss, S. Giblin, B. Thornton, J. Schurr, J. Lee, and Y. Semenov. *Metrologia*, **56**, 01001 (2019).
- 38) L. Johnson, W. Chua, A. Corney, J. Hsu, H. Sardjono, R. D. Lee, Z. Zhonghua, A. Charoensook, P. Coogan, Y. Nakamura, A. Moodley, A. K. Saxena, Y. K. Yan, A. R. B. Z. Abidin, J. Lee, and Y. Semenov. *Metrologia*, **46**, 01003 (2009).
- 39) O. Velychko, and O. Akhmadov. *Metrologia*, **54**, 01005 (2017).
- 40) 独立行政法人製品評価技術基盤機構. <https://www.nite.go.jp/iajapan/jcss/labsearch/index.html>. Online accessed 1 October 2024.
- 41) 株式会社 村田製作所. エレクトロニクス産業を支えるセラミックコンデンサの基礎と応用, 株式会社オーム出版, 62, 136, 137 (2003).
- 42) 荒川智紀. 産総研計量標準報告 **11**, 1, 53 (2023).
- 43) K. Ariyoshi, A. Mineshige, M. Takeno, T. Fukutsuka, T. Abe, S. Uchida, and Z. Siroma. *Electrochemistry*, **90**, 102008 (2022).
- 44) Y. Nakamura, A. Fukushima, and Y. Sakamoto. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **48**, 351 (1999).
- 45) Y. Nakamura, M. Nakanishi, and T. Endo. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **50**, 290 (2001).
- 46) J. C. Hsu, Y. S. Ku, and H. L. Pang. *CPEM Digest* (2004).
- 47) S. P. Benz, and C. A. Hamilton. *Appl. Phys. Lett.*, **68**, 27 (1996).
- 48) F. Overney, N. E. Flowers-Jacobs, B. Jeanneret, A. Rüfenacht, A. E. Fox, P. D. Dresselhaus, and S. P. Benz. *Metrologia*, **57**, 065014 (2020).
- 49) S. Bauer, F. Overney, A. L. Ichenberger, M. Kraus, and Y. Pimsut. *CPEM Digest* (2024).

