

ものづくり産業の国際競争を支援する電気標準

— キャパシタンス標準の実現と計量トレーサビリティ体系の確立 —

中村 安宏*、堂前 篤志

キャパシター（コンデンサー）は電子部品の中でも最も基本的な素子の一つであり、各種電気機器に多数用いられている。電気機器などの産業界において、最近、キャパシターの品質の国際規格への適合要求が強くなっている。特に国家標準への計量トレーサビリティは必須の事項として要望されている。産業界の要望に応えるため、産総研において世界トップクラスのキャパシタンス標準を開発し、それを迅速に供給するための技術開発を行った。具体的には従来法に代わって新たに量子化ホール抵抗に基づくキャパシタンス標準を開発し、また校正事業者の認定を支援して標準供給体制の確立を行った。さらに供給の迅速化、低コスト化のために遠隔校正システムを開発した。

キーワード：キャパシタンス、コンデンサー、電気標準、トレーサビリティ、遠隔校正

National electrical standards supporting international competition of Japanese manufacturing industries

– Realization of a new capacitance standard and its traceability system –

Yasuhiro Nakamura* and Atsushi Domae

A capacitor or a condenser is one of the most basic electrical devices and is used in various electrical equipments. Recently the electrical equipment industry has been requesting the quality of capacitors to be compatible with international standards; among other things, it is strongly demanded that the traceability of a capacitance standard should be consistent with the national standards. To respond to this need from the industry, we have developed a new national standard of capacitance based on the quantized Hall resistance and also established its traceability system in cooperation with the accredited calibration businesses. A remote calibration system of capacitance has also been developed to disseminate the standard quickly and to reduce calibration costs.

Keywords: Capacitance, condenser, electrical standard, traceability, remote calibration

1 はじめに

積層セラミックコンデンサー、チップインダクター、EMI フィルター、薄膜抵抗素子などの電子部品・電子モジュールの製造産業は我が国の主要産業の一つであり、例えばコンデンサーだけでも、その市場規模は8000億円～1兆円と推定されている。また、最近の薄型テレビ、携帯電話、パソコンなどに代表されるデジタル家電の高機能化・多機能化や自動車の電子化などによって、コンデンサーの需要が増大しており、さらに、次世代エネルギーデバイスとしての蓄電池キャパシター（大容量コンデンサー）への期待から、環境・エネルギー分野においても今後の需要の拡大が見込まれている^[1]。現在、コンデンサーにおいて、我が国の電子部品産業が占める世界シェアはおおよそ7割と推定されているが、最近、アジア大手電機メーカーによるシェア拡大が急速に進んでいると言われている。

これら電子部品メーカーの主要顧客、すなわち電子部品

の主な供給先は、自動車産業、電気機器産業あるいは通信機器産業のいわゆる大手ものづくり産業である。これらの産業界から、最近、安心・安全と省エネの観点から、電子部品・電子モジュールに対する信頼性のさらなる向上が要求されており、またそれと同時に、ISO/TSI6949（自動車産業向けの品質マネジメントシステムの国際規格）、ISO/IEC17025（試験所および校正機関の能力に関する国際規格）などの国際規格への適合が強く要望されるようになってきている。特に、国家標準への計量トレーサビリティ確保が必須の事項として要求され、そのため国内電子部品メーカーでは、これら顧客の要望に応えるため、製造ラインの検査装置に対する計量トレーサビリティの確保と国際整合化への対応が喫緊の課題となっているのが現状である。

国内産業界のこのような課題に対応するため、産業技術総合研究所では国家標準として電圧や抵抗などの各種電気量の標準を開発し、これを国際比較などによって国際整

産業技術総合研究所 計測標準研究部門 〒305-8563 つくば市梅園1-1-1 中央第3
National Metrology Institute of Japan, AIST Tsukuba Central 3, 1-1-1 Umezono, Tsukuba 305-8563, Japan * E-mail: y.nakamura@aist.go.jp

Original manuscript received January 28, 2010, Revisions received July 12, 2010, Accepted July 14, 2010

合性の確保された標準として確立し、さらに国内校正事業者をとおして、国内産業の生産現場の隅々にまで、計量標準を広く供給・浸透させる体制作りを急いでいる。キャパシタンスやインダクタンス、交流抵抗といったインピーダンスの各量は、数ある電気量の中でも最も基本的な物理量であるが、電子機器の高機能化、自動車の電子化や性能向上に伴って、ここ数十年の間に、特にコンデンサーについて、より高精度な標準を望む声が大きくなってきた。そこで、コンデンサーの標準、すなわちキャパシタンス標準について、それまでの標準設定・実現方法をゼロから見直し、新たなキャパシタンス標準の確立と計量トレーサビリティ体系の構築を目指して研究開発を行った。

キャパシタンス標準をはじめ、産総研が開発・確立した世界トップレベルの各種電気標準を国内の電子部品メーカーに迅速に供給することによって、電子部品の一つ一つに計量トレーサビリティの保証を与え、これをとおして、国内電子部品産業はもとより、電子部品の供給先である電機・通信・自動車産業などの我が国基幹産業のグローバル競争や技術開発競争を知的基盤の面から強力にサポートし、国際競争力強化に貢献することを目指している。

2 シナリオ

2.1 国家標準の開発目標の設定

「新たに開発するキャパシタンスの国家標準はどの程度の不確かさ（精度）を目指すべきか」、また、「校正対象としてはどのような二次標準器を想定すべきか」など、新たな国家標準の開発に当たっては、まず、開発の目標を設定する必要がある。開発の当時、国家標準（一次標準器）から値付けする二次標準器には空気キャパシターあるいはマイカキャパシターと呼ばれる標準キャパシターが主に用いられていた。これは温度係数が小さいかまたは小型で扱いやすいことが理由で、企業の標準室で一般に広く使用されていたものであるが、期待できる不確かさは1 ppm(1 $\mu\text{F}/\text{F}$) レベルであった。より高精度なキャパシタンス標準を要望する電子部品メーカーあるいはキャパシタンスの計測器メーカーは、空気キャパシターに比べさらに高精度・高安定である熔融石英型キャパシターを所有し、このタイプのキャパシターに対して標準の供給を求めている。熔融石英型キャパシターであれば、0.1 ppm レベルの不確かさが期待できる。そこで、校正対象として熔融石英型キャパシターを想定し、それを校正するための国家標準（キャパシタンス標準）を開発することにした。

開発したキャパシタンス標準は他国の国立標準研究所（NMI: National Metrology Institute）における同種の標準と比較され、標準の同等性が確認されることによ

て、国際整合性が確保できる。世界トップレベルのキャパシタンス標準を実現する主要国のNMI、具体的にはNIST（米）・PTB（独）・NMIA（豪）・LNE（仏）においてそれぞれ実現されているキャパシタンス標準の不確かさを調査した結果、いずれも標準不確かさ0.1 ppm以下で標準を確立していることが分かった^{[2][5]}。校正対象（二次標準器）として、高精度・高安定な熔融石英型キャパシターを想定する意味においても、また国内産業のグローバル競争を支援する意味からも、世界トップレベルの標準の実現は必須であると判断した。そこで、開発目標として「標準不確かさ0.1 ppm以下の国家標準の確立」を設定した。

2.2 産業現場までの標準供給シナリオ

メーカーの生産現場までキャパシタンス標準を供給し、計量トレーサビリティ体系を構築するには、民間の校正事業者の役割が必須だと考える。現在、世界の多くのNMIでは産業界の求める標準を数多く開発・整備し、広い範囲にわたって校正サービスを提供している。（例えば、電気標準を例にみても、NIST、PTBは共に約330種類、香港SCLは約200種類の校正サービスを提供している^[6]。）しかし、産総研においても同様に産業界ニーズに見合うすべての範囲の標準を整備し供給することが最善の策かといえ、必ずしもそうではないと思われる。我が国には、他国と比べて能力の高い校正事業者や精密機器製造事業者が数多く存在する。計量トレーサビリティ体系の構築において、これらの国内事業者の協力を得て、その校正実施能力を最大限に活用することができれば、産業現場の隅々まで迅速かつ安定な標準供給が実現でき、またそれと同時に、産総研の業務のスリム化やリソースの効率的運用が可能になるとと思われる。そこで、キャパシタンス標準の供給においては、図1のような標準供給体制を想定した。

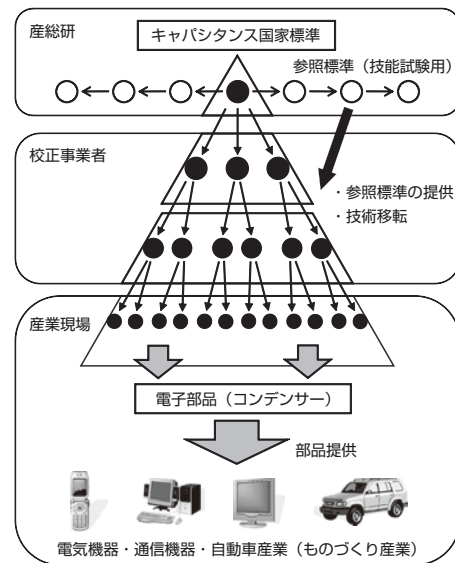


図1 キャパシタンス標準の供給体制シナリオ

すなわち、産総研は、基本範囲で国家標準を開発・確立し、国内の校正事業者に供給し、校正事業者において、基本範囲の標準をもとにして校正範囲の拡張を行って産業現場へ供給する体制である。この場合、産総研の役割は上位の校正事業者に、高精度でかつ限定した基本範囲の標準を定期的に供給するだけに限られ、校正業務のスリム化が図れる。また、供給する標準の範囲を限定することで、産総研におけるリソースの選択・集中が可能となり、これによって校正装置の高精度化と効率化を図ることができる。さらに、標準の供給形態はすべて「計量法に基づく校正事業者登録制度（JCSS：Japan Calibration Service System）」を基本として考える。このことにより、図1に示すように標準供給の階層化が実現でき、産総研における高精度かつ基本範囲の国家標準が各階層の校正事業者によって範囲拡張され、生産現場の隅々にまで確実に提供される。具体的には、産総研において、10 pF、100 pF、1000 pFのキャパシタンス標準を開発・整備し、これを上位の校正事業者に供給する。上位の校正事業者において、例えば、10 pFを基準に1 μFへの拡張などの校正範囲の拡張が行われ、下位の校正事業者へ供給される。下位の事業者からさらに生産現場へ校正範囲の拡張を伴ってキャパシタンス標準が供給される。この体制を構築することで、メーカーの生産現場まで必要な範囲のキャパシタンス標準が、必要な時に国家標準に連鎖して供給される。つまり、生産現場の計測器あるいはコンデンサーの国家標準への計量トレーサビリティ体系が効率的に確立できる。

この標準供給体制を構築するにあたっては、各階層の校正事業者、特に最上位の校正事業者の役割が極めて重要である。したがって、産総研は国家標準を開発・供給するだけでなく、それと同時に校正事業者の技術力の向上に対する支援も必要になる。また、その技術を評価・審査するための標準（技能試験用参照標準）も別途必要になる。これは、校正事業者が、例えば国家標準から供給された10 pFを基準にして1 μF、10 μFへと拡張する際に、その拡張した結果が正しいか否かを確認することが必要になるためである。そこで、図1に示すように、産総研においてもある程度キャパシタンス標準の範囲を拡張し（つまり、10 pF、100 pF、1000 pFを基準に1 μF、10 μFへの拡張を行い）、これを校正事業者の技術力確認のための参照標準に使用することとした。また、これら開発すべきすべての標準を計画的に整備するために、表1に示すような年度展開で標準整備計画を策定し、これに基づいて計画的に資源配分を行って、標準の開発・実現を行うこととした。さらに、この供給体制の実現には国内校正事業者の理解と協力が不可欠である。そこで、標準にかかる国内委員会

表1 キャパシタンス標準整備計画

供給容量	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
10 pF		○								
100 pF	○									
1000 pF		○								
0.01 μF				○						
0.1 μF				○						
1 μF				○						
10 μF						○				
100 μF									○	
1000 μF										○

や研究成果発表会などにおいて、産業界との意見交換を積極的に行うことにより合意形成に努めることとした。

3 キャパシタンス標準の開発

3.1 方法の選択

キャパシタンス標準を実現する方法には世界的に二つの方法が認められている。一つは、クロスキャパシターと呼ばれる特殊な形状のキャパシター（コンデンサー）を用いる方法である。図2に示すように、互いに平行に配置された4本の電極棒において、対向する2組の電極間のキャパシタンス（クロスキャパシタンス）の単位長さあたりの値を C_{12} 、 C_{34} とすると、 C_{12} 、 C_{34} の平均値が次式によって表わされることが、A. M. Thompson と D. G. Lampard によって導かれている^[7]。

$$(C_{12} + C_{34}) / 2 = (\epsilon_0 \ln 2) / \pi \quad (1)$$

同式から分かるように、単位長さあたりのクロスキャパシタンスの平均値は電極間の誘電率 ϵ_0 のみに依存する。クロスキャパシター全体を真空中におけば、単位長さあたりのクロスキャパシタンスは $1.953549043 \dots$ pF となり、これは電極の形状には依存しない。つまり、電極棒の長さを正確に決めることができれば、クロスキャパシターによって長さ標準からキャパシタンスを決定することができる。ただし、式(1)が成り立つ条件として、4本の電極棒が無限に長いことが前提となっている。すなわち、無限に長い電極棒に

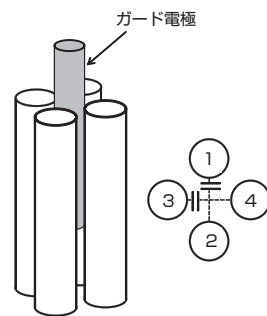


図2 クロスキャパシター

おける単位長さ当たりのキャパシタンスが式 (1) となる。したがって、実際にクロスキャパシターを実現する場合には、図 2 に示すように、四つの電極間に別のガード電極を挿入する必要がある。ガード電極が挿入されている部分はキャパシタンスがゼロとなる。この状態でガード電極を移動させると、その移動分だけキャパシタンスが増減する。つまり、ガード電極の移動距離分のクロスキャパシタンスを求めれば、それは式 (1) に従うことになる。この手法を用いて、多くの NMI がキャパシタンス標準を確立している^{[2][5]}。しかし、実際にクロスキャパシターを製作するには電極棒の機械加工の精度が極めて重要になる。表面の粗さや電極棒の平行度がクロスキャパシタンスの不確かさに直接影響することになる。また、クロスキャパシターによるキャパシタンス測定には熟練技術を要し、これを用いて 0.1 ppm 以下の標準を実現するのは容易ではない。クロスキャパシターの先進国である NMIA (豪)、NIST (米)、PTB (独)、LNE (仏) においては、これを用いて 0.1 ppm 以下の標準を実現しているものの、他の NMI においては 0.1 ppm を超える不確かさとなっているのが実状である。また、産総研 (旧電子技術総合研究所) においても、かつてクロスキャパシターを製作・実現した実績はあるが、不確かさ 0.1 ppm 以下は達成されていない^[8]。

キャパシタンス標準を実現するもう一つの方法は、図 3 に示すように、量子化ホール抵抗を基準として、抵抗標準からキャパシタンス標準を決定する手法である。1990 年以降、直流抵抗の標準は量子化ホール抵抗を基準に決める

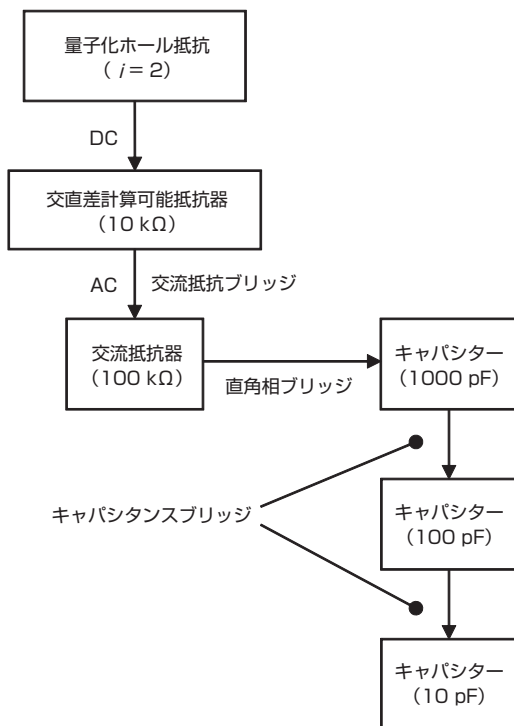


図 3 量子化ホール抵抗に基づくキャパシタンス標準

ことが世界的に合意されている。産総研 (旧電子技術総合研究所) においても、この合意 (正確には、第 77 回国際度量衡委員会勧告、1988 年) に基づき、量子化ホール抵抗標準を開発・整備し、量子化ホール抵抗に基づく抵抗標準の維持・供給を行ってきている^[9]。標準の起点を量子効果に求めれば、いつ、誰が、どこで行っても同じ結果が得られる。特に量子ホール効果を示す式は式 (2) で与えられ、同式から明らかなように、量子化ホール抵抗 R_H の決定に他の基準や標準は一切必要としない (h はプランク定数、 e は電子の素電荷、 i は量子化の次数を表す整数)。

$$R_H(i) = h/ie^2 \quad (2)$$

これは、クロスキャパシターにおいては電極棒をいかに精度よく作製しても、キャパシタンスの決定には必ず長さ標準が必要になることとは大きく異なる利点である。また、上述のように、量子化ホール抵抗は直流抵抗標準の起点であり、したがってキャパシタンスも同じく量子化ホール抵抗から導くことができれば、装置の共有化、効率化が可能となり、標準を開発した後の維持・管理の面でも有利である。そこで、キャパシタンス標準の実現方法として、量子化ホール抵抗を基準に導出する方法を採用することとした。

3.2 ニーズに対応した新たな手法の開発

量子化ホール抵抗からキャパシタンスを導くには、図 3 に示すように、各種ブリッジ回路と特殊な抵抗器が必要となる。具体的には、交流抵抗ブリッジ、直角相ブリッジ、キャパシタンスブリッジ、および交流-直流差が計算可能な特殊形状の抵抗器である。これら機器をそれぞれ高精度に開発し、それを用いて抵抗標準からキャパシタンスへ順次測定を行うことで、量子化ホール抵抗からキャパシタンスが導出できる。この一連の測定の中で、抵抗からキャパシタンスへの変換を行う直角相ブリッジはキャパシタンス標準の最終的な不確かさを決めるうえで特に重要である。図 4 に直角相ブリッジの回路構成を示す。同図から直角相ブリッジの平衡条件は、

$$\omega^2 C_1 C_2 R_1 R_2 = 1 \quad (3)$$

となる。ここで、 ω は角周波数、 C_1 、 C_2 はキャパシタンス、 R_1 、 R_2 は抵抗である。この式から明らかなように、直角相ブリッジは、周波数依存型のブリッジである。つまり、直角相ブリッジにおいて、抵抗を基準にキャパシタンスを決める場合、平衡周波数は一意的に決定されることになる。(式 (3) から明らかなように、比較すべき抵抗 R_1 、 R_2 とキャパシタンス C_1 、 C_2 を固定値とした場合、平衡周波数 ω は当然一つ

しか存在しない。)このため量子化ホール抵抗から導かれるキャパシタンスは、ある特定の周波数での値に限られる。

(通常、 $C_1=C_2=1000$ pF、 $R_1=R_2=100$ k Ω とするため、平衡周波数は $\omega=10^4$ rad/s、すなわち約1.592 kHzとなる。)これはクロスキャパシターによるキャパシタンス標準とは異なる欠点である。(クロスキャパシタは原理的に周波数に依存しない。)

図1で示したように、開発するキャパシタンス標準の直接の供給先は高精度の校正サービスを行う上位校正事業者である。上位校正事業者の候補として想定される計測器メーカーや民間校正業者にキャパシタンス標準の校正周波数についてニーズ調査したところ、「1 kHzでの校正を希望」とのことであった。しかし、図4に示す回路を用いる限り、量子化ホール抵抗から導出されるキャパシタンスは周波数 1.592 kHz での値に限定される。1.592 kHz と 1 kHz の差、つまり 592 Hz の差は無視できるとの考えも一般的であったが、産業ニーズを満足させるには、標準供給の開始前に、校正対象である熔融石英型の標準キャパシ

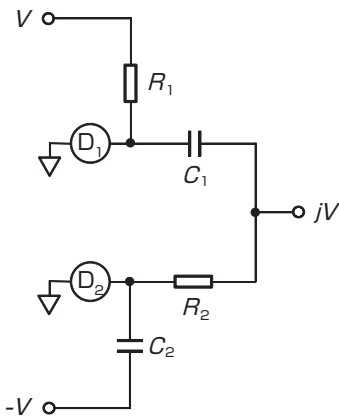


図4 直角相ブリッジ

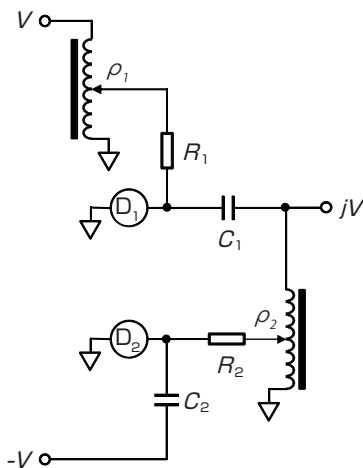


図5 周波数可変直角相ブリッジ

ターについて 1 kHz 付近の周波数特性を詳細に測定・評価する必要があると判断した。そこで、図4の回路に改良を加え、平衡周波数が可変となる新たな回路構成の直角相ブリッジを考案した。図5に周波数可変型直角相ブリッジの回路を示す。従来型回路(図4)に二つの誘導分圧器を加えると、ブリッジの平衡条件が式(4)で表わされることを見出した。

$$\omega^2 C_1 C_2 R_1 R_2 = \rho_1 \rho_2 \quad (4)$$

ここで $\rho_1 \rho_2$ は新たに加える二つの誘導分圧器の分圧比である。この分圧比 $\rho_1 \rho_2$ を任意にとることによって、原理上あらゆる周波数において直角相ブリッジが平衡することになる。実際には、 $\rho = n/8$ ($n = 1, 2, 3, \dots$) を採用してブリッジを構築し、平衡周波数が $1.25n/2\pi$ kHz となる周波数可変直角相ブリッジを実現した^[10]。このブリッジを用いて熔融石英型標準キャパシターの周波数特性を測定したところ、図6に示すように、あるタイプのキャパシター(GR1408)においては、1 kHz 付近で周波数による容量変化が存在することが判明し、「熔融石英型キャパシターにおいて、1.592 kHz と 1 kHz の範囲では周波数依存性はない」との一般的考えを覆す新たな知見が得られた^[11]。またそれと同時に、主な二次標準器として想定される AH11A 型標準キャパシターについては、周波数による容量変化は無視できることも確認できた^[12]。以上のように、直角相ブリッジに周波数可変となる新たな回路構成を取り入れた「量子化ホール抵抗に基づくキャパシタンス標準」(図7)を開発した。開発したキャパシタンス標準の不確かさ評価を行ったところ、標準不確かさ 0.04 ppm と見積もられ、目標とする 0.1 ppm 以下を達成することができた。またこの結果は国際比較によっても確認され(図8)、他国の NMI の専門研究者による技術評価(ピアレビュー)を経て、国際同等性が十分にあること(CMC 登録^[6])が証明された。なお、

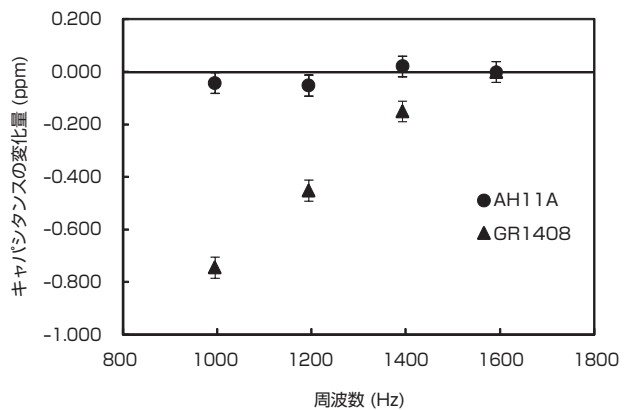


図6 熔融石英型標準キャパシターの周波数特性

現在、量子化ホール抵抗に基づくキャパシタンス標準を実現している機関は産総研以外にはNPL（英）、CMS（台）、BIPM（国際度量衡局）があるが、いずれも直角相ブリッジには従来型の回路を用いている。

4 計量トレーサビリティ体系の確立

4.1 技術審査のための参照標準の開発と技術移転

産総研で開発したキャパシタンス標準は、図1に示す標準供給体制に基づいて産業現場まで供給される。また、これによりキャパシタンスの計量トレーサビリティ体系が確立される。ただし、上述のように、産総研から供給される標準は10 pF、100 pF、1000 pFのみである。一方、産業界の生産現場では、少なくとも1 pFから100 μFまでの範囲のキャパシタンス標準が必要とされる。そこで、図1の各階層の校正事業者において、校正範囲の拡張が不可欠になる。校正事業者の候補としてはキャパシタンスの計

測器メーカーや電子部品メーカーの品質管理部署が想定されるが、これらの校正事業者が産総研から供給されたキャパシタンス標準を基準として自らで拡張方法を開発し、産業現場や顧客が必要とする範囲のキャパシタンス標準を実現し供給することになる。この際、校正事業者は、拡張方法の技術的妥当性などについて、JCSSに基づく技術審査を受けることになるが、この審査には、拡張結果が正しいか否かの判断をするための参照標準（値が既知の標準）が必要になる。例えば、産総研から供給された10 pFの値を基準として、校正事業者が自らで開発した手法を用いて、1 μFの校正を行う場合、校正結果が正しいか否かの判定には値が既知な1 μFの標準が必要となる。そこで、産総研において、10 pF、100 pF、1000 pFの標準（低容量標準）とは別に、新たに技術審査用の参照標準として0.01 μF、0.1 μF、1 μF、10 μFの標準（中容量標準）を開発し、JCSSの認定審査機関である（独）製品評価技術基盤機構（NITE）へ提供することとした。中容量標準の開発にあたっては、測定系をすべて同軸四端子対型ブリッジとする技術を採用した。これによって、容量の拡張、すなわち低インピーダンス化への対応を図った。同軸四端子対型とすることにより、測定ケーブルの影響を除去し、寄生インピーダンスの効果を軽減することができる。開発した中容量キャパシタンス拡張システムの外観を図9に示す。中容量拡張システムの不確かさは、0.01 μFにおいて標準不確かさ0.38 ppm、10 μFにおいて標準不確かさ2.0 ppmと見積もられ、技術審査用参照標準として十分な精度を持つ容量拡張システムが開発できた^{[13][14]}。

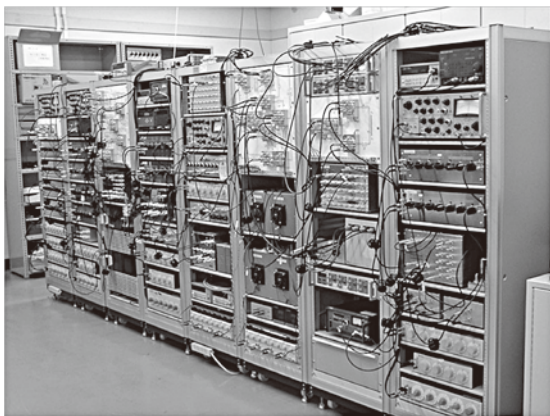


図7 量子化ホール抵抗に基づくキャパシタンス標準(国家標準)

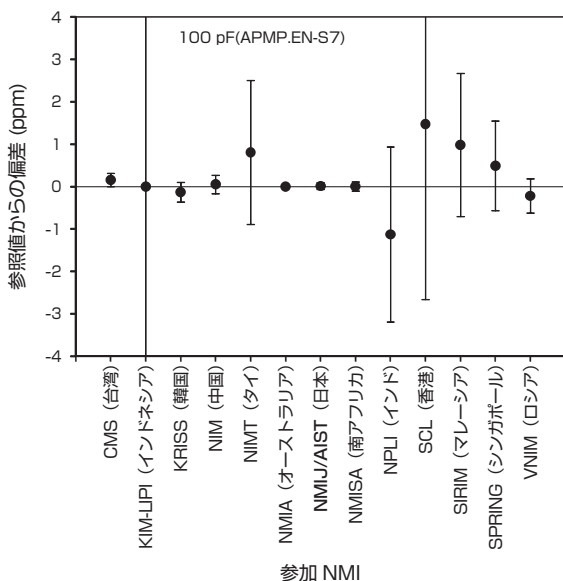


図8 キャパシタンス標準の国際比較結果

また、校正事業者による校正範囲の拡張を技術支援するため、産総研で開発した中容量拡張技術を校正事業者の一つである日本電気計器検定所に技術移転した^[15]。（具体的には、産総研との共同研究により、同所において産総研と同型の中容量拡張システムを開発した。）その結果、同所において中容量拡張システムによる容量範囲の拡張が

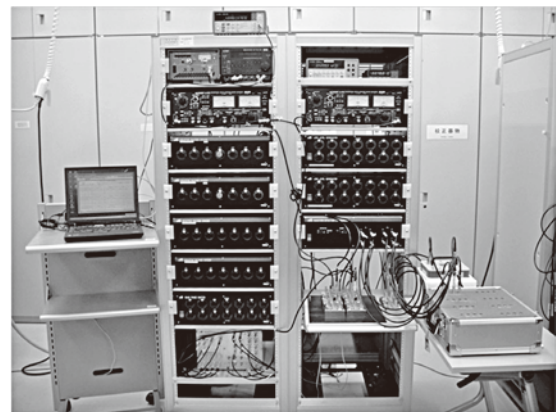


図9 中容量キャパシタンス拡張システム

実現され、NITE による審査を経て JCSS 校正事業者への登録が認定された。また、その他の校正事業者に関しても、範囲拡張にかかる不確かさ解析方法などについて積極的に技術的指導・助言を行い、現在までに、キャパシタンス標準において国内に 3 社の JCSS 登録事業者（最上位の校正事業者）が認定されている。（電気標準全般においては、現在、約 50 の JCSS 登録事業者が認定されており、そのうち上記 3 事業者を含む 9 事業者が最上位の校正事業者として認定されている。）

4.2 標準供給状況の分析と新たな供給方法の開発

上述のように、キャパシタンス標準の計量トレーサビリティ体系の確立には、校正事業者の存在が不可欠である。産総研の国家標準を校正事業者を介して産業現場まで届けるシナリオを描いた。現状において、キャパシタンスの JCSS 校正事業者の認定は着実に進んでおり、当初のシナリオどおりの標準供給体制が実現されつつある。しかし、計量トレーサビリティの確保を真に必要なとしているのは産業の現場であり、産業現場のニーズを満足させて初めて目的が達成されたことになる。すなわち、産業現場における計量トレーサビリティ体系の状況について調査・分析が必要と考えた。そこで、産業界に対して標準供給体制にかかるニーズの調査を行ったところ、現状の供給体制では、生産現場の計測器の 1 台 1 台まで、計量トレーサビリティの保証を付与することは時間とコストの面で難しいとのことであった。すなわち、現状のように、校正すべき計測器を校正事業者に持ち運んで校正を受ける形態（持ち込み校正）では、校正に出している期間は計測器を使う製造ラインを停止せねばならず、24 時間稼働が普通の製造ラインでは不可能である。また、1 生産現場あたり数百～数千台の計測器をすべて校正に出そうとすれば、校正手数料が莫大になり現実的ではないとの調査結果が得られた。つまり、当初シナリオのままでは、産業現場までの計量トレーサビリティ体系の確立は難しいと判断した。

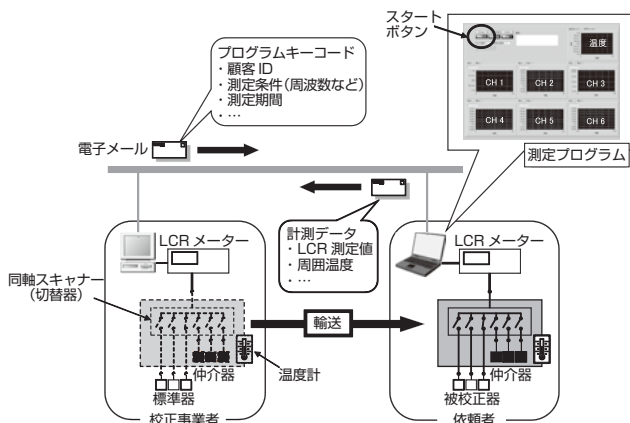


図 10 キャパシタンス標準の遠隔校正の概念図

そこで、校正時間を短縮し、校正コストが軽減できる新たな供給方法として、遠隔校正法の研究開発を行った^{[16]-[18]}。図 10 に、キャパシタンス標準における遠隔校正の概念図を示す。これは仲介器を介在させて行う校正手法である。通常の校正においては、校正の依頼者は校正を受けたい被校正器を自らの負担と責任において、校正事業者へ送付あるいは持ち運び、校正を受ける。これに対し、図 10 の遠隔校正では、依頼者は校正事業者から送付される仲介器と測定装置を用いて、被校正器の校正のための測定を依頼者自身の手によって行う。具体的には、同図に示すように、まず校正事業者によって事前に校正された仲介器が依頼者に送られる。この際、同軸スキャナと呼ばれる切替器も同時に送付される。依頼者側ではこれに市販の LCR メーターとパソコン (PC) および被校正器を接続して校正システム (遠隔校正システム) を組立て、事前に PC にインストールされた測定プログラムを起動して測定を行なう。校正システムおよび測定プログラムは、開始から終了まで全自動で測定が実施できるように設計されており、依頼者側に測定のための特別なトレーニングやスキルを必要としない。依頼者側で行なわれた測定結果は電子メールで校正事業者に自動転送され、校正事業者側でデータの解析を行ったのち、校正結果を同じく電子メールで依頼者に返送する。以上のように、遠隔校正においては、依頼者は、自身の被校正器を外部へ持ち出すことなく校正を受けることができる。これによって、被校正器の輸送に係るコストが不要になり、また校正のために被校正器が使用できない期間も最低限に短縮することができる。遠隔校正の手法を標準供給体制に組み入れることによって、上位校正事業者から直接、生産現場への標準供給も可能になり、供給の迅速化と計量トレーサビリティ体系の合理化を図ることができる (図 11)。

開発した遠隔校正システムの外観を図 12 に示す。本システムの開発に当たっては、産業界への普及を考え、導入

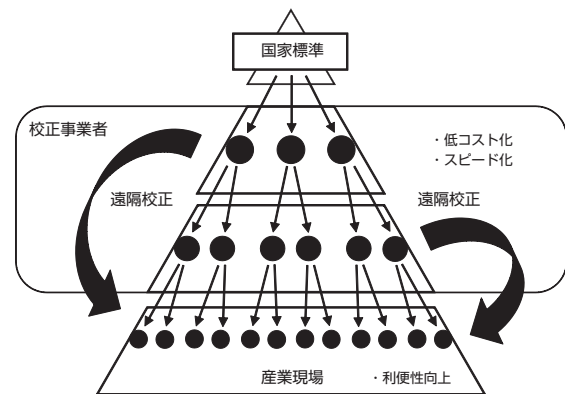


図 11 遠隔校正による供給の迅速化とトレーサビリティ体系の合理化

コストの低減を図る目的で、校正システムの一部にはあえて産業界で広く使用されている市販計測器を採用した。また、校正に対する専門知識の少ない依頼者（ユーザー）でも利用できるシステム作りを行い、特にデータの送受信、あるいは測定条件の設定において、ユーザーが介入できないようデータ保護・セキュリティ対策には細心の注意を払った。さらに、校正対象をキャパシタンス (C) だけでなく、インダクタンス (L) や交流抵抗 (R) も含めたインピーダンス標準全般 (LCR 標準) の遠隔校正が可能なシステムとした。図 13 に、本システムを用いた遠隔校正の実証実験結果を示す。従来の持ち込み校正と比較して遜色のない結果を得ることができた。この結果を踏まえてシステムの実用化について検討を行い、具体的に国内電子部品メーカーに対して、現在、遠隔校正システムの導入に関する相談を行っている。このメーカーの生産現場には LCR 部品の検査用メーターが数千台保有されており、遠隔校正によってこれらすべての計測器に計量トレーサビリティの保証を与えることが期待されている。また、同メーカー以外にも産業界への積極的な技術移転・実用化を図り、キャパシタンス標準の産業界への迅速な供給と計量トレーサビリティ体系の確立を推進したいと考えている。

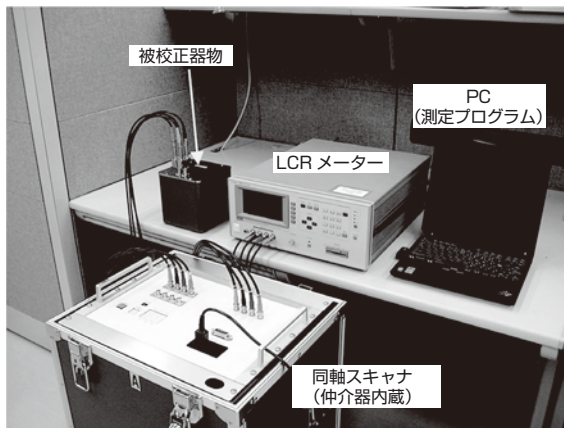


図 12 LCR 標準遠隔校正システム

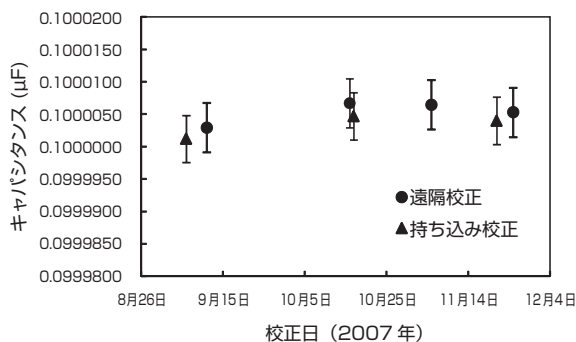


図 13 遠隔校正の実験結果 (持ち込み校正との比較)

5 今後の課題

国際統合化された世界トップレベルのキャパシタンス標準を開発し、校正事業者をととして産業界へ標準供給する体制を構築することで、計量トレーサビリティ体系を確立し、これによって国内産業の競争力強化を支援することを目的として、一連の研究開発を行った。現在までに JCSS 校正事業者が 3 社登録認定され、これらの事業者によって 1 pF ~ 100 μF の範囲の校正が実現されるようになり、標準供給体制の基本は確立できた。しかし、真の意味で計量トレーサビリティ体系の確立を達成するためには、産業界の現場が必要とする標準を迅速かつ低コストに供給できる体制作りが不可欠である。これに対する解決策の一つとして遠隔校正法を検討し、キャパシタンス標準を含むインピーダンス標準 (LCR 標準) 全般にわたっての遠隔校正システムを研究開発した。実証実験によって技術的には実用化の目的が立ったものの、実際に産業界へ普及させるには、システムの低価格化、遠隔校正手法の JCSS による認定など未解決の課題がいくつかある。しかし、産総研が確立した国家標準を産業界の隅々にまで届ける体制の構築こそが、今後注力すべき課題であると考えている。本稿で提案した遠隔校正法だけでなく、新たな供給手法の開発も視野に入れ、より効率的で合理的な計量トレーサビリティ体系の確立が今後の取り組むべき課題と考えている。

参考文献

- [1] (株)日本エコノミックセンター: '10 コンデンサ業界の実態と将来展望, (株)日本エコノミックセンター (2009).
- [2] H. Bachmair, T. Funck, R. Hanke and H. Lang: Realization and maintenance of the unit of capacitance with the PTB cross capacitor during the last ten years, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 44, 440-442 (1995).
- [3] G. Trapon, O. Thevenot, J. C. Lacueille and G. Geneves; Realization of the farad at BNM-LCIE, *CPEM '98 Conference Digest*, 448-449 (1998).
- [4] G. W. Small, B. W. Ricketts, P. C. Coogan, B. J. Pritchard and M. M. R. Sovierzoski: A new determination of the quantized Hall resistance in terms of the NML calculable cross capacitor, *Metrologia*, 34, 241-243 (1997).
- [5] A. Jeffery, R. E. Elmquist, L. H. Lee, J. Q. Shields and R. F. Dziuba: NIST comparison of the quantized hall resistance and the realization of the SI ohm through the calculable capacitor, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 46, 264-267 (1997).
- [6] BIPM: *Calibration and Measurement Capabilities - CMCs (Appendix C)*, The BIPM key comparison database (<http://kcdb.bipm.org/AppendixC/default.asp>) (2009).
- [7] A. M. Thompson and D. G. Lampard: A new theorem in electrostatics and its application to calculable standards of capacitance, *Nature*, 177, 888 (1956).
- [8] K. Shida, T. Wada, H. Nishinaka, M. Kobayashi, G. Yonezaki, T. Igarashi and T. Nemoto: Determination

- of the quantized Hall resistance value by using a calculable capacitor at ETL, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, IM-36, 214-217 (1987).
- [9] 遠藤忠: 新しい電気の量子標準—ジョセフソン効果電圧標準と量子ホール効果抵抗標準—, *応用物理*, 59, 712-724 (1990).
- [10] Y. Nakamura, A. Fukushima, Y. Sakamoto, T. Endo and G. W. Small: A multifrequency quadrature bridge for realization of the capacitance standard at ETL, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 48, 351-355 (1999).
- [11] Y. Nakamura, M. Nakanishi and T. Endo: Measurement of frequency dependence of standard capacitors based on the QHR in the range between 1 kHz and 1.592 kHz, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 50, 290-293 (2001).
- [12] 中村安宏: 溶融石英型標準キャパシタの周波数特性の測定, *AIST Today*, 3 (1), 17 (2003).
- [13] A. Domae, Y. Nakamura and Y. Ichikawa: Calibration of standard capacitors of 0.01 μF - 1 μF at NMIJ/AIST, *CPEM Conference Digest 2004*, 608-609 (2004).
- [14] 米永曉彦, 堂前篤志, 中村安宏: 四端子対インピーダンスブリッジを用いた標準キャパシタの校正法とその不確かさ, *産総研計量標準報告*, 6 (2), 101-117 (2007).
- [15] 坂上清一: 4端子対キャパシタンスブリッジの整備, *JEMIC計測サークルニュース*, 32 (3), 16-17 (2003).
- [16] Y. Nakamura, A. Yonenaga, N. Sakamoto and A. Shimoyama: Remote calibration of standard inductors, *IEEJ Trans. FM*, 126, 1183-1186 (2006).
- [17] 中村安宏: 低周波インピーダンスの遠隔校正について, *JEMIC計測サークルニュース*, 36 (1), 1-6 (2007).
- [18] S. Matsuzawa, T. Shimodaira, K. Hanaoka, A. Shimoyama, S. Sakagami, A. Domae, K. Kito and Y. Nakamura: Feasibility study on remote calibration of impedance standards for industrial use, *CPEM Conference Digest 2008*, 348-349 (2008).

執筆者略歴

中村 安宏（なかむら やすひろ）

1994年3月同志社大学大学院工学研究科博士課程（後期）修了、博士（工学）取得。1994年4月工業技術院電子技術総合研究所（現産業技術総合研究所）入所。2005年10月計測標準研究部門電磁気計測科電気標準第1研究室長、2007年4月同研究部門電磁気計測科長、2009年4月より同研究部門主幹研究員。キャパシタンス標準をはじめとする各種電気標準の研究開発と標準供給業務に従事。2002年市村学術賞（貢献賞）。本論文では、量子化ホール抵抗に基づくキャパシタンス標準の開発、LCR標準遠隔校正手法の開発、および全体構想の策定と取りまとめを担当した。



堂前 篤志（どうまえ あつし）

2000年3月豊橋技術科学大学工学部電気・電子工学課程卒業。2000年4月工業技術院電子技術総合研究所（現産業技術総合研究所）入所。2001年4月より計測標準研究部門電磁気計測科研究員、2006年5月よりキャパシタンス標準および交流抵抗標準の校正責任者。キャパシタンス標準および交流抵抗標準の研究開発と標準供給業務に従事。本論文では、中容量キャパシタンス拡張システムの開発を担当した。



査読者との議論

議論1 全般的評価

コメント（工藤 勝久：産業技術総合研究所環境安全管理部）

産業界からのニーズに対応した研究開発目標を明示し、産業現場に至る標準供給のシナリオも明確です。世界の標準研究機関における開発状況を十分に把握した上で、これまで培ってきた研究ポテンシャルをベースとして、明確な研究ロードマップにしたがった研究開発を実施し、オリジナリティの高い世界トップレベルのキャパシタンス標準を確立しています。一方で、一次標準から産業現場への標準供給を実現するための効果的な標準供給手法を開発し、世界に誇れるキャパシタンス標準のトレーサビリティ体系の確立に大きく貢献しています。

コメント（小野 晃：産業技術総合研究所）

キャパシタンスの国家標準の開発と、それを産業現場まで供給するための技術開発が、そのシナリオとともに俯瞰的に記述されており、優れた第2種基礎研究と製品化研究の論文になっています。最高精度を追求する国家標準の開発にとどまらず、産業現場に効率的、合理的に標準を供給するための遠隔校正のアイデアとその実現も優れた成果と考えます。

議論2 電気標準全般への言及

コメント（工藤 勝久）

本論文では、キャパシタンス標準に限定した内容になっています。ものづくり産業の国際競争を支援するのはキャパシタンス標準が特に重要であると主張している印象を持ちました。一般的には、コアとなる電気標準の一つという位置づけかとも思いますが、電圧、電流、抵抗標準などと比較した場合、産業界からのニーズとして差別化できるのでしょうか。そのあたりについて、「はじめに」に簡単に言及されれば、読者の理解の助けになると思います。

回答（中村 安宏）

本論文は筆者が主に担当したキャパシタンス標準に焦点を当てて、研究開発のシナリオと成果を記述しました。ご指摘のとおり、キャパシタンスはコアとなる電気標準の一つではありますが、電圧標準や抵抗標準といった他の電気量の標準も、ものづくり産業の国際競争支援には欠くことができません。ただ、電圧標準や抵抗標準にまで言及すると、内容が散漫になると考え、本論文では意識的にキャパシタンス標準だけに絞った内容としました。しかし、ご指摘どおり、「はじめに」では、他の電気量についても言及した方がよいと思われるので、加筆・修正いたしました。

議論3 現状の校正事業者の数

質問（工藤 勝久）

「2.2 産業現場までの標準供給のシナリオ」で、校正事業者の階層構造が図1に書かれています。後述で、JCSS校正事業者3社が記述されていますが、国内の校正事業者の階層がいくつあり、各層の校正事業者の数などの状況はよくわかりません。もう少し定量的な記述が可能でしょうか。

回答（中村 安宏）

電気標準において、現在は約50事業者がJCSS校正事業者として認定されています。このうち、図1に示しました最上位の校正事業者は、9事業者（キャパシタンスに限れば3事業者）で、その他は第2階層以下の事業者になります。これらの校正事業者数の現状を本文中に加筆いたしました。

議論4 外国の国立標準研究所の状況

質問（工藤 勝久）

「3.2 ニーズに対応した新たな手法の開発」で、量子ホール抵抗からキャパシタンスを導く手法は、おおいに誇れる成果だと思

ます。他の標準研究所でクロスキャパシタンス法と量子ホール抵抗から導出する手法を用いている研究所の割合などの状況、産総研が新規に開発した手法を導入している外国の標準機関があるかなど、可能であれば加筆をお願いします。

回答（中村 安宏）

クロスキャパシタを利用している国立標準研究所の中で、高精度にキャパシタンス標準を実現しているのは、本文中にも記載しました NMIA（豪）、NIST（米）、PTB（独）、LNE（仏）です。これ以外では NIM（中国）、VNIIM（露）がクロスキャパシタで標準を実現しています。また、量子化ホール抵抗からキャパシタンスを導出しているのは、産総研以外では、NPL（英）、CMS（台）、BIPM（国際度量衡局）があります。しかし、いずれも従来型の直角相ブリッジ回路でキャパシタンス標準が実現されており、周波数可変である当所のシステムは国際的に見て優位な立場にあります。

議論5 新たな標準供給手法

質問（工藤 勝久）

「5. 今後の課題」で、「- 新たな供給手法の開発も視野に入れ、-」とあります。計量標準共通の課題でもありますが、何か加筆できるアイデアをお持ちでしょうか。

回答（中村 安宏）

本論文で紹介した「遠隔校正法」以外に、その他の手段として産業現場に「長期間安定な標準器」を設置して、産業現場においていつでも手軽に機器の校正ができるシステムを実現することが考えられます。例えば、ジョセフソン電圧標準と薄膜サーマルコンバータ AC/DC 標準を組み合わせると、「長期間高安定な標準電圧電流発生装置」を実現できる可能性があります。このような「産業現場で直接校正可能な技術」を開発し、産業現場に技術移転することによって、校正の低コスト化と校正時間の短縮を図り、トレーサビリティ体系のさらなる合理化が実現できるのではないかと考えています。