

量子交流電圧標準の応用

松丸大樹*

(2020年6月29日受理)

Applications of quantum AC voltage standard

MATSUMARU Daiki

Abstract

The Josephson effect is universally observed in superconducting tunnel junctions (Josephson junctions) and DC (direct current) voltage standards have been achieved using an integrated circuit of Josephson Junctions, which is called a Josephson junction array (JJA). Quantum AC (alternating current) voltage standards have been also successfully achieved by several national metrology institutes thanks to new operation methods and advances in microfabrication technologies of JJAs. Additionally, the technology to generate quantum AC voltage has various applications, primarily in the field of metrology. In this paper, previous studies on the application of AC voltage via the Josephson effect are presented and their current statuses, issues, and prospects are summarized.

1. はじめに

今日、電気は人間の衣食住どれをとってもその恩恵なしには成り立たないほど重要な役割を担っている。現代の社会や科学技術の要求に応えるためには、電気関係量の精確な計測技術とトレーサビリティの確保による正確性の担保が不可欠である。電気関係量のトレーサビリティ体系を担う一次標準には、電圧・抵抗・キャパシタンス・インダクタンスなど様々な量目が存在するが、本調査研究では「電圧標準」に焦点をあて、その研究開発動向について調査を行った。

現在、直流の電圧標準技術はほぼ確立されており、ジョセフソン効果と呼ばれる量子現象によって一次標準となる基準電圧を実現している。一方、交流の電圧標準技術に関しても、直流と同じくジョセフソン効果を用いた量子交流電圧標準の実現と応用に向けた研究開発が近年盛んに行われている。

本稿では、まず電気標準の歴史を概説し、現在用いら

れている直流および交流の電圧標準について解説する。その後、ジョセフソン効果を用いた量子交流電圧標準の原理と、その応用に向けた研究開発の動向について報告する。

2. 電気標準の歴史

古来より、人類は必要なものを作製・収集・交換することにより共存と繁栄を図ってきた。その中でも“交換”は比較評価に基づいた行為であり、評価の信頼性や一貫性を担保するためには基準となる“ものさし”（計量標準、計測標準）が必要となる。比較的早く生み出された概念として長さや重さが挙げられる。当時の長さや重さの基準は、長さが人間の体の一部の長さであったり、重さが植物の種子の重さであったりするなど、精確さと正確さに欠けるものであった¹⁾。より普遍的な計量単位の基準を求め、18世紀末にフランスで初めてメートル法が制定された。世界規模での商取引（交換）を行うには、このような改革は不可欠だったと言える。

このような流れと同様に、電気関係量に関する計測標

* 物理計測標準研究部門量子電気標準研究グループ

準もまた人間が電気を利用できるようになるにつれ進歩してきた。1827年、ドイツの Ohm が電流・電圧・抵抗の関係を示す「オームの法則」を公表したことにより電気回路解析が始まった。その後、Siemens が水銀柱を用いた抵抗標準器を提案し、Clark がクラーク電池による電圧標準器を提案するなど今日の電気標準の基礎が作られた²⁾。さらに、1908年の電気単本万国会議では、国際的に統一された電気単位が制定された。そこでは、電流の単位は銀分離器（硝酸銀溶液において、1秒間に析出する銀の質量が1.118 mg のときに流れる電流を1アンペアと定義）、抵抗の単位は水銀抵抗原器（断面積1 mm²、長さ106.3 cm、0℃の水銀柱の抵抗値を1オームと定義）の各原器を用いて定義された。電圧の単位（ボルト）に関しては、オームの法則を介して電流と抵抗から求められる値を元に定義され、標準器としてはウェストン標準電池が採用された。

ただし、これらの単位は実用単位と呼ばれ、cm, g, s から成る CGS 単位系における組立量（絶対単位）とは区別されていた。様々な機関による絶対単位の計測の結果、1948年に開催された国際度量衡総会で、電流の単位であるアンペアが以下のように定義されることとなった。

「アンペアは、真空中に1メートルの間隔で平行に配置された無限に小さい円形断面積を有する無限に長い二本の直線状導体のそれぞれを流れ、これらの導体の長さ1メートルにつき 2×10^{-7} ニュートンの力を及ぼし合う一定の電流である。」

この定義の採択により、電気関係量は m, kg, s と共に MKSA 単位系に統一され、1960年の国際度量衡総会で採択された国際単位系（Système International d'unités: SI）に繋がった。この定義によって電気単位は人工物による定義を離れ、力学量によって普遍的に定まる単位となった。一方で、精密な電気計測をこの定義の下で行うのは技術的に難しいということもあり、電気関係量の標準は、電圧と抵抗の標準を引き続き実用上の標準として用いていくことになる。

1962年にジョセフソン効果³⁾（詳細は3章を参照）が、1980年には、二次元電子系（電子が薄い平面内に閉じ込められた系）に垂直に磁場を印加した際に横抵抗（ホール抵抗）が量子化する量子ホール効果⁴⁾が発見された。ジョセフソン効果による電圧および量子ホール効果による抵抗は、物質に依存せず普遍的に定まる量子力学的な効果によるものである。それらは普遍的かつ実用性の高い量子標準の実現につながった。日本では1977年頃からジョセフソン電圧標準が⁵⁾、1990年からは量子

ホール効果抵抗標準が、それぞれ電圧および抵抗の一次標準として用いられるようになり、現在に至る。なおこれらの方式では、電圧および抵抗値を得るために電気素量 e およびプランク定数 h という基礎物理定数を用いる必要があり、実験的に得られるそれらの値の不確かさが無視できないために量子効果の普遍性を活かさないことが問題となった。そこで、1987年に開催された国際度量衡総会の決議に基づき、1990年1月1日から、ジョセフソン効果による電圧を表す式に含まれる $K_J = 2e/h$ （ジョセフソン定数）と量子ホール効果による抵抗を表す式に含まれる $R_K = h/e^2$ （フォン・クリッツィング定数）の各値として以下の協定値が用いられることになった⁶⁾。

$$K_{J-90} \equiv 483\,597.9 \text{ GHz/V}$$

$$R_{K-90} \equiv 25\,812.807 \, \Omega$$

これらの協定値を用いて標準を供給することで SI との純粋な結びつきは失われてしまうものの、実用電気標準の閉じた分野内では、電圧では1 nV/V オーダーの不確かさ、抵抗では10 nΩ/Ω オーダーの不確かさをもつ高い精度の標準供給が可能となり、産業界に大きな利益をもたらした。

21世紀が近づくと、測定技術の向上とともに再び SI の定義を見直す機運が高まってきた。特に国際単位系の中で、kg のみが人工物に依存した定義であることが問題となっていた。その基準となっていた国際キログラム原器の安定性などを考慮しながら、7つの SI 基本単位のうちの4つに対して、より普遍的な新しい定義を定めることなどが2018年の国際度量衡総会で決議された。これは協定値が基準となっていた電気標準を、先に示した K_J と R_K の定義を通じて、再び調和の取れた SI の枠組みに復活させるという意味も持っていた。

そして、2019年の5月20日（世界計量記念日）より、キログラム (kg)、アンペア (A)、ケルビン (K)、モル (mol) の4つの単位に対して新しい定義が施行され、そこで用いられる基礎物理定数は以下に示す不確かさのない定義値とすることが定められた。

$$\text{電気素量} : e = 1.602\,176\,634 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$\text{プランク定数} : h = 6.626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ J s}$$

$$\text{ボルツマン定数} : k = 1.380\,649 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1} \quad (1)$$

アボガドロ定数： $N_A = 6.022\,140\,76 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

この改定により、前述した K_J および R_K の各値は上記の定義値から求まり、かつ電気標準が純粋に SI に準拠した標準となった。以下に改定後のジョセフソン定数とフォーン・クリツィング定数を示す⁷⁾。

$$K_J = 483\,597.848\,416\,984 \text{ GHz/V}$$

$$R_K = 25\,812.807\,459\,304\,5 \Omega$$

これらの値は本来無限の桁数をもつが、多くの精密測定で問題が生じないであろう 15 桁で表記し、用いることを原則とする。必要に応じて上記の e と h の定義値から計算して必要な桁数とすることも可能である。一方、改定後の SI では、アンペアは以下のように定義される。

「アンペア（記号は A）は、電流の SI 単位であり、電気素量 e を単位 C（A s に等しい）で表したときに、その数値を $1.602\,176\,634 \times 10^{-19}$ と定めることによって定義される。ここで、秒は $\Delta\nu_{Cs}$ によって定義される。」

なお、 $\Delta\nu_{Cs}$ は秒の定義において定められるセシウム原子の遷移周波数を表す。この定義に従って電流標準を実現するためには、電荷が単位時間に通過した個数を数えることが必要である。このような“究極の量子電流標準”を実現するために、電子一個一個を制御する単一電子ポンプ素子などの研究が各国で盛んに行われている⁸⁾⁻¹⁵⁾。量子電流標準が実現すると、微小電流計測の精度向上による産業界への貢献はもちろん、新たな物理現象の解明など学術研究への貢献も期待される。例えば、量子力学的に独立に生成した電流・電圧・抵抗の各値をオームの法則に適用し、それぞれの量子現象の妥当性を相互に検証する量子メトロロジートライアングル（QMT）と呼ばれる実験を行うことが可能になる¹⁶⁾⁻¹⁸⁾。QMT 実験では、単一電子ポンプ素子による電流を、量子ホール効果による抵抗に流し、その際生じる電圧降下を、ジョセフソン効果による電圧値と比較する。現状では単一電子ポンプ素子で発生できる電流の値が小さいことや、測定の不確かさが大きいことなどの課題があるが、各国の研究所がこの検証を目指し研究を進めている¹⁶⁾⁻¹⁸⁾。

3. 電圧標準の現状

3.1 ジョセフソン効果による量子電圧の生成

前述したように、現在の電圧標準はジョセフソン効果を用いて実現されており、使用する素子や制御システム

をのぞいた基本的な原理は今日に至るまで変わっていない。ここではまず、ジョセフソン効果の原理と初期のシステムについて述べていく¹⁹⁾⁻²¹⁾。

ジョセフソン効果は、2つの超伝導体の間に金属または絶縁体を挟み込んだトンネル接合（ジョセフソン接合、図1）に生じる量子現象である。超伝導とは、極低温において物質の電気抵抗が零になる現象であり、多くの金属にこの現象が確認されている。特定の温度以下（この温度を臨界温度という）になると、電気抵抗の温度依存性に跳びが生じ、電流を流しても電圧が発生しない（すなわち電気抵抗が零になる）。また、量子力学では、ある確率で自身のもつポテンシャルよりも高いエネルギーの領域に波動関数が染み出すことが知られており、その領域の先に波動関数が伝搬することをトンネル効果と呼ぶ。ジョセフソン効果とは、超伝導状態にある物質同士が弱く結合した状態（絶縁体または常伝導金属を挟み込んだ状態）にあるときに生じるトンネル効果に起因した物理現象のことである。ジョセフソン接合の両側の超伝導体もつ秩序パラメータの位相差に応じて一定電流が流れる。これを直流ジョセフソン効果という。この場合に接合を流れる電流は、位相差を $\Delta\theta$ とすると

$$I = I_C \sin(\Delta\theta) \tag{2}$$

と表される。ここで、 I_C は超伝導の臨界電流である。ここで、接合に有限電圧（臨界電流を超えるバイアス電流）が加わった状態を考える。超伝導電子対のエネルギーを μ とすると、量子状態は角周波数 $\omega = \mu / \hbar$ ($\hbar = h/2\pi$) で振動している。接合の両端に有限電圧が加わった際のエネルギーは、各超伝導体内の超伝導電子対のエネルギーをそれぞれ μ_1, μ_2 とすると、

$$\mu_1 - \mu_2 = 2eV$$

となる²¹⁾。超伝導体間の位相差は、

$$\Delta\theta = \int dt(\omega_1 - \omega_2) = 1/\hbar \int dt(\mu_1 - \mu_2) = 1/\hbar \int dt 2eV$$

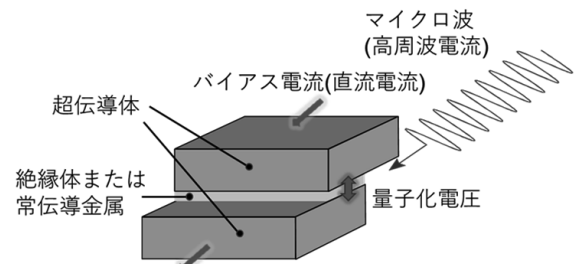


図1 ジョセフソン接合。

$$= 2eVt/\hbar + \Delta\theta_0$$

となる ($\Delta\theta_0$ は定数). これを (2) 式に代入すると,

$$I = I_c \sin(2eVt/\hbar + \Delta\theta_0)$$

となる. よって, 接合に直流電圧が加わった際, ジョセフソン接合には $V=0$ の場合における位相差 $\Delta\theta_0$ から相対的に

$$f_j = \frac{1}{2\pi} \frac{2eV}{\hbar} = \frac{2eV}{h} \quad (3)$$

の周波数で位相が変化する交流電流成分が存在することが分かる. これを交流ジョセフソン効果という. この時, 接合に周波数 f のマイクロ波 (高周波電流) を照射すると, 接合に流れていた交流電流と共振現象を起こし量子化された電圧ステップ (シャピロステップ, 図2) が生じることが知られている. この際に発生する電圧は, (3) 式を V について解いた場合の式の定数倍となり,

$$V_n = \frac{h}{2e} n f = \frac{n f}{K_J} = \Phi_0 n f \quad (4)$$

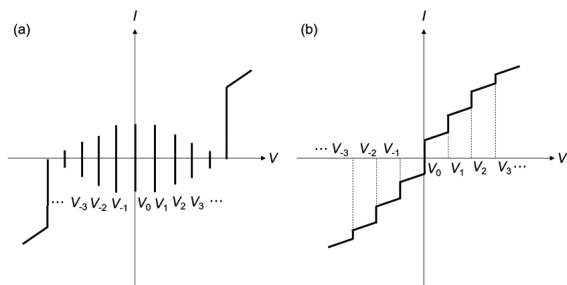


図2 ジョセフソン効果による定電圧ステップ (シャピロステップ). (a) 高キャパシタンス接合. (b) 低キャパシタンス接合^[20]を参考に作成.]

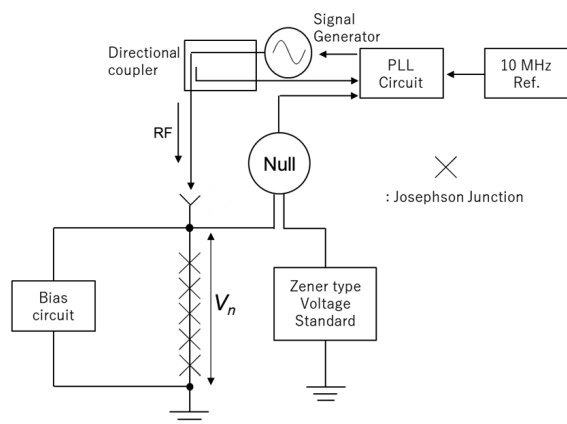


図3 初期の直流電圧校正システム (CJVS)^[20]を参考に作成.]

と表される (ジョセフソンの式). ここで, n は整数 (ジョセフソン接合の数に対応), K_J は前述したジョセフソン定数, $\Phi_0 (=h/2e)$ は単一磁束量子を示す.

このようにジョセフソン効果を用いれば, ジョセフソン定数と周波数のみによって決定される量子力学的に保証された標準電圧を作り出すことが可能になる. ジョセフソン効果を用いた初期の直流電圧標準は **Conventional Josephson Voltage Standard (CJVS)** と呼ばれ, 標準供給 (二次標準器の校正) は, 以下のように行われた (図3). 10 MHz の参照周波数信号に 10 pHz/Hz オーダーの不確かさでロックされたマイクロ波は, 位相同期回路 (Phase locked loop: PLL) により差電圧 (Null) が最小になる周波数に固定されてジョセフソン接合に印加される. マイクロ波は交流ジョセフソン効果によって発生した交流電流と共振し, (4) 式で表される量子化電圧を発生させる. この量子化電圧を被校正器物 (ツェナー型標準電圧発生器が多く用いられる) から発生した電圧と比較測定を行うことによって校正を行う.

3.2 直流電圧—直流プログラマブル電圧標準—

前述した従来の CJVS システムでは, 高キャパシタンス接合 (アンダーダンプ接合) を用いていたことから, 電圧ステップが零バイアス電流に対して多価関数となっている (図2 (a)). ステップ選択 (動作点をどのステップ上にするかの選択) においては確率的な要素が排除できないため, 要求された値の出力には適切な負荷抵抗を用いた場合でも通常複数回のバイアス電源の操作が必要であった²⁰⁾. そのため, 電圧の値を瞬時にかつ任意に変化させることには困難が伴った.

1995年, Hamilton らによって新しい方式の「プログラマブルジョセフソン電圧標準 (Programmable Josephson Voltage Standard: PJVS)」が提案された²²⁾. この方式では, 低キャパシタンス接合 (オーバーダンプ接合, 図2 (b)) を用いることで電圧ステップが一価関数となり, 適切なバイアス電流を印加することで確実かつ瞬時に要求された電圧を出力することが可能となっている. また, 複数の接合を 1, 2, 4, 8... のようにバイナリなセグメントに分け, セグメントごとのバイアス電流の ON/OFF を切り替えることによって (4) 式の n を変化させ, 任意の出力電圧を得る (図4). 産総研でも PJVS システムを開発し, CJVS システムとの直接比較により nV/V オーダーの不確かさでの一致が確認され²³⁾, 2015年より PJVS を用いて 1 V, 1.018 V, 10 V の標準供給を行っている (図5)²⁴⁾. また, 産総研で行われた BIPM (Bureau international des poids et mesures: 国際度量衡

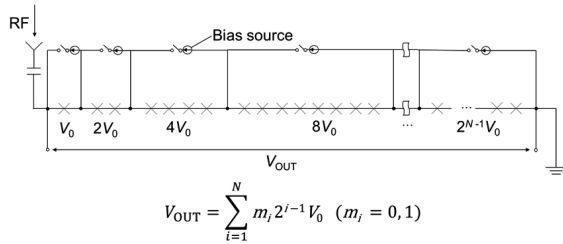


図4 PJVSの等価回路^[20)を参考に作成.]



図5 現在の直流電圧標準システムの外観。

局)との直接比較によって、異なる種類のジョセフソン接合アレイから生成した10Vの直流電圧の比較を行ったところ、10 pV/V オーダーの不確かさでの一致が確認されている²⁵⁾。

3.3 交流電圧—交直変換標準—

交流電圧の標準に関しては、交流電圧の実効値を既知の直流電圧と比較する交直変換標準が一次標準として用いられている^{26), 27)}。以下にその原理を示す。交流電圧の実効値を求めるために、基準となる直流電圧源と熱電変換素子(サーマルコンバータ=Thermal converter: TC)を用意する。TCによって入力電圧信号の電気エネルギーが熱エネルギーに変換され、熱電対の起電力として入力信号の大きさが測定される(図6)。直流電圧と交流電圧を交互にTCに入力し、得られた起電力の差が最

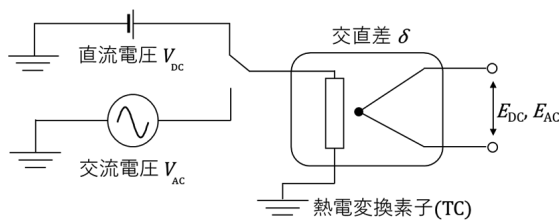


図6 交直変換標準による交流電圧の実効値の決定^[27)を参考に作成.]

も小さくなるまで直流電圧の値を変化させる。入力する直流電圧はあらかじめ直流電圧標準を用いて校正されており、かつ使用したTCの交直差(δ_{AC-DC})の値が分かっているならば、以下の交直差の定義式(5式)を用いて交流電圧の実効値が求まる。現在、産総研では10 Hzから1 MHz(10 mVから1000 V)までの範囲で交直変換標準の標準供給(拡張不確かさ(包含係数 $k=2$): $2 \mu\text{V/V}$ 以上)を行っている²⁸⁾。

$$\delta_{AC-DC} = \frac{V_{AC} - V_{DC}}{V_{DC}} \quad (5)$$

4. 量子交流電圧標準の研究開発

4.1 量子交流電圧標準

3.3節で述べたTCを用いた交直変換標準は、非常に広い範囲を高い精度でカバーできるため、広く用いられている一方で、波形に関する情報が得られない、低い周波数領域で不確かさが大きくなる、などの課題がある。オシロスコープなどの時間軸上の波形の校正や、地震計をはじめとした振動計の低周波領域、例えば10 Hz以下における高精度な校正という産業界からのニーズに応えるため、ジョセフソン効果を用いた量子交流電圧標準の実現を目指した研究開発が各国の国家計量標準機関(National Metrology Institute: NMI)などで行われている。以下で量子交流電圧標準としての採用が検討又は実現されているいくつかの手法についての紹介を行う^{29), 30)}。

4.2 交流プログラマブルジョセフソン電圧標準

1つ目は、交流プログラマブルジョセフソン電圧標準(ACPJVS)と呼ばれる手法である。3.2節で紹介した直流プログラマブル電圧標準を応用したもので、接合を駆動するバイアス電流のON/OFFをリアルタイムで切り替えることによって電圧を生成する接合数を時間的に変化させ、交流波形を生成する。これは(4)式の n を時間変化させることに対応しており、複数のセグメントを選択することによって10V程度の大きな電圧振幅を得られるという特徴を持っている。産総研、米国NIST(National Institute of Standards Technology)、ドイツPTB(Physikalisch-Technische Bundesanstalt)ではACPJVSシステムを開発し、それぞれ実効値 $V_{rms}=10\text{V}$, 7V , 10V の交流波形発生に成功している³¹⁻³³⁾。

この方式では、電圧の切り替え時に量子化されていない領域が存在し、それに伴うトランジェントエラーが生じるという課題がある(図7)。トランジェントエラー

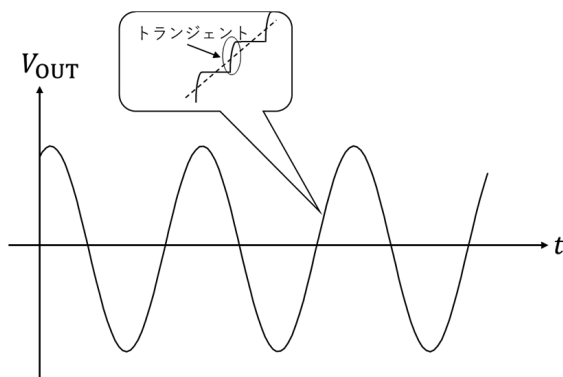


図7 ACPJVSにより発生させた交流波形^[20]を参考に作成]

についての定量的な考察から、実現可能な実効値の不確かさとして、50 Hz から 60 Hz では 0.5 $\mu\text{V/V}$ 未満、1 kHz では 2 $\mu\text{V/V}$ 超過と示されている²⁰⁾。また、トランジェント部分の測定データを排除しながら離散的に測定を行う「サンプリング方式」という手法も提案されている³⁴⁾。この方式による高周波の生成にはバイアス回路の高速な切り替えが必要になるため、主に数 kHz 程度までの低周波領域の波形発生に利用することが期待されている。

4.3 パルス駆動型ジョセフソン電圧標準

2つ目は、パルス駆動型ジョセフソン電圧標準 (Pulse-Driven JVS) と呼ばれる手法である³⁵⁾。ジョセフソン接合アレイに対してマイクロ波の代わりに高速な電流パルスパターンを印加すると、電流パルス 1 個につき磁束量子 (Φ_0) 1 つ分に対応した電圧が生成する ((4) 式)。パルス列を入射した際、パルスの間隔が狭い領域では電

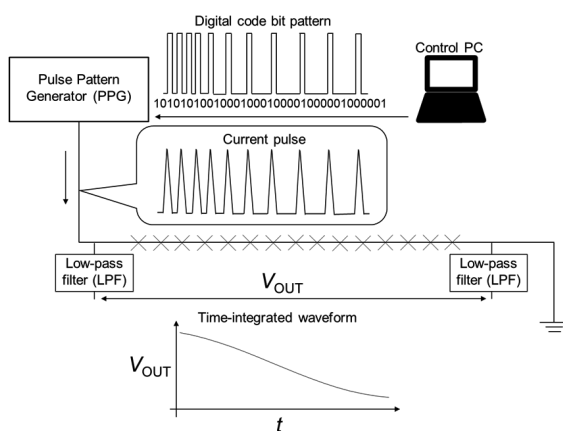


図8 パルス駆動型ジョセフソン電圧標準の原理^[20]を参考に作成]

圧が密に発生し、広い領域では電圧が疎に発生するので、ローパスフィルタ (Low-pass filter: LPF) を介して時間積分することにより電圧レベルの大小に変換し、交流波形を発生させる (図8)。この方式は (4) 式の f を時間変化させることに対応し、セグメントの切り替えを行わないことから本質的にトランジェントエラーが存在せず、不要な高周波成分 (スプリアス) を含まない高品位な波形生成が可能である。一方、室温で発生させた高周波の電流パルスを極低温下にある素子まで伝搬させる必要があるため、パルス信号の減衰や分散を回避するために接合数が制限されてしまい、大きな電圧値の出力が難しいという課題がある。現状では $V_{\text{rms}} = 3 \text{ V}$ 程度の出力電圧が上限となっている³⁶⁾、複数の素子を直列配置することで出力電圧を増やす研究なども行われている³⁷⁾。また、低周波の波形発生には大きなメモリ長の高速パルスパターン発生器 (Pulse Pattern Generator: PPG) を必要とするため、メモリ長が短くて済む比較的高い周波領域の波形生成に向けた手法である。

4.4 単一磁束量子型ジョセフソン電圧標準

最後に紹介するのは、単一磁束量子型のジョセフソン電圧標準 (rapid-single-flux-quantum JVS: RSFQ-JVS) である³⁸⁾。超伝導回路内で発生させた単一磁束量子 (SFQ) を情報担体として利用するこの手法は3つの中で最初に提案された手法であり、超伝導体を用いたデジタル回路素子技術の派生といえる。この手法では (4) 式の n を時間変化させる型、 f を時間変化させる型のどちらも実現可能である。この手法の利点は、パルス数可変増倍回路、パルス分配器、電圧増幅器がすべて素子内に組み込まれている点にある。これにより、パルス駆動型ジョセフソン電圧標準で問題となっていた高周波パルス伝送の問題が緩和されるとともに、室温部に配置する PPG が不要になるなどのメリットがある。しかしながら、回路集積度の限界が課題であり、現状では直流で数 10 mV 程度の出力が上限となっているため³⁹⁾、大きな出力電圧を要せず高周波波形を必要とするボルツマン定数を基準とした熱力学温度測定などへの応用が期待されている。

4.5 まとめ

ここまで、量子交流電圧標準としての採用が検討又は実現されているいくつかの手法についての紹介を行ってきた。ACPJVS は電圧を切り替える際のトランジェントエラーが課題であるが、容易に 10 V 程度の電圧を出力できるという利点がある。Pulse-Driven JVS は高周波パルス伝送に課題があるものの、高品位な波形発生が可能

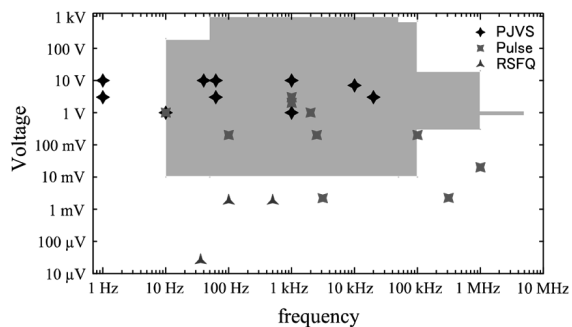


図9 交流電圧標準の各方式の開発領域。影のついた部分はTCの標準供給領域^{(28), (33), (36), (37), (40)–(50)}。

である点では優れている。RSFQ-JVSは回路集積化に課題があるものの、前述した高周波パルス伝送の課題を解決するポテンシャルを有している。このように、いずれの手法にも一長一短な特徴があるため、それらの特徴を生かしながら適材適所に利用していくことが必要である。

5. 量子交流電圧標準の応用と取り組み状況

5.1 量子交流電圧標準の応用

3.3節で述べた通り、現在の交直変換標準はサーマルコンバータ（Thermal converter: TC）を用いて実現されている。今後実用化と応用の拡大が期待される量子交流電圧標準との関係を明らかにするため、現在の交流電圧校正における各方式の校正範囲（電圧と周波数の関係）を図9に示す。この図から、TCは非常に広い電圧および周波数範囲をカバーしていることが分かる。一方、量子交流電圧標準はTCでカバーしきれない低周波や高周波における標準を実現することが期待される。また、量子交流電圧標準の研究開発は、現行の交直変換標準を置き換えることを目指したアプローチのみならず、交直変換標準の特性を改めて評価し、補完する形でのアプローチも行われている。このように、量子交流電圧標準の研究開発の方向性はその応用と密接な関係にある。本章では、前章で紹介した量子交流電圧標準の応用とその開発状況について紹介する^{(51), (52)}。

5.2 ACボルトメーター

ジョセフソン効果によって交流電圧発生が可能であるならば、交流電圧の時間発展を測定する精密な計測器としての応用は可能である。実際には開発中の量子交流電圧標準の妥当性を高精度電圧源（キャリブレーション）に

よって確認していることが多い。ここでは、まず純粋に交流電圧計（ACボルトメーター）としての応用について紹介していく。ここで念頭に置いていただきたいのは、現在の交直変換標準の拡張不確かさが $2\mu\text{V/V}$ 以上であるということである。また、TCとは異なり実波形の測定を行っているため、交流の実効値電圧を調べるTCによる校正の不確かさとの単純な比較で議論することはできないという点にも留意が必要となる。

NISTで行われたのは、ACPJVSを用いた市販のキャリブレーションの測定だった。この実験では、キャリブレーションとACPJVSの波形を同期させ、サンプリング方式による測定が行われた。7Vの実効値、62.5Hzの周波数でタイプA不確かさが $0.4\mu\text{V/V}$ と報告されている⁽³²⁾。

PTBで行われたACPJVSによる同様の実験では、7Vの実効値で10Hzから10kHzの周波数範囲での測定が行われ、タイプA不確かさが $2\mu\text{V/V}$ 未満となっていた⁽⁴²⁾。その後に行われた実験では、キャリブレーション校正の合成不確かさが $0.62\mu\text{V/V}$ 未満（ $k=1$, 40Hzから1kHz, $V_{\text{rms}}=10\text{V}$ ）と報告され、1kHz以下における不確かさの低減を示している⁽³³⁾。Pulse-Driven JVSを用いたキャリブレーションとの比較測定も行われていて、予備的な実験では125Hzでの値で規格化されたAC-AC差の最大の不確かさが $50\mu\text{V/V}$ （0.1kHzから9kHz, $V_{\text{rms}}=11.8\text{mV}$ ）と報告されている⁽⁵³⁾。

産総研でも、ACPJVSを用いた62.5Hzにおけるキャリブレーション測定を行い、拡張不確かさ $1.3\mu\text{V/V}$ 未満（ $k=2$, $V_{\text{rms}}=10\text{V}$ ）を報告している⁽³¹⁾。また、PPGで発生させたパルス列を、フォトダイオードを経由してPulse-Driven JVSを駆動するという研究も報告している⁽⁵⁴⁾。ジョセフソンアレイとPPGを電気的に絶縁することができるので、コモンモードノイズの影響を防ぐという利点がある。この方法では、Unipolar（正負どちらかのみをとる）な交流波形を60Hzと152.6kHzの周波数（ピーク間電圧最大1mV）で生成することに成功している。

英国NPL（National Physical Laboratory）でもフォトダイオードによってPulse-Driven JVSを駆動するシステムを採用し、Unipolarな交流波形を3kHzから300kHzの周波数（ピーク間電圧最大6.30mV）で生成することに成功している⁽⁴⁴⁾。

ACボルトメーターへの応用は、開発中の量子交流電圧標準そのものの性能評価とも見ることができる。様々な周波数範囲での測定が行われ、交直変換標準の不確かさを下回る精度での測定結果も報告されている。出力電圧の小さい範囲（ $V_{\text{rms}}=10\text{V}$ 程度まで）では、現在の開

発段階でも十分に標準としての役割を果たすことが可能と言える。

5.3 熱電変換素子 (サーマルコンバーター, TC) の評価

量子交流電圧標準を直流・交流の電圧源として用いて TC の交直差を測定することで、その妥当性を確認することも可能である。TC による校正の不確かさを量子交流電圧標準によって評価することで、交直変換標準の不確かさを改善することも考えられる。

5.3.1 ACPJVS によるアプローチ

NIST では、ACPJVS を直流・交流の電圧源として用いて TTS (thermal-transfer standard = 市販の交直変換標準器) の交直差測定が行われた。ジョセフソン素子は大きな電流を流せないため、キャリブレーションから TTS に負荷電流を供給し、ACPJVS とサンプリング方式を用いてキャリブレーションの出力電圧をリアルタイムに校正することで TTS の交直差を調べた。その結果、10 Hz から 1 kHz の範囲での合成不確かさが $1.2 \mu\text{V/V}$ ($k=1$, 実効値電圧 100 mV から 1 V) であると推定され、従来方式による TTS 校正の不確かさを下回ることが期待される ($V_{\text{rms}}=1 \text{ V}$, 10 Hz から 100 Hz)⁴¹⁾。

PTB でも、ACPJVS を直流・交流の電圧源として用いて TC の交直差測定が行われた⁴²⁾。実際に交直差測定を行ったところ、1 kHz において拡張不確かさが $1.7 \mu\text{V/V}$ 未満であった ($k=2$)。一方、1 kHz 以上の測定においては 2 つの TC (かつ異なる実効値電圧) による交直差に大きなずれが確認されたことから、1 kHz 以上での交流波形の生成にはまだ課題が残っていると言える。

産総研では、TC による校正が行われていない 10 Hz 未満の周波数領域に取り組んだ⁴⁰⁾。この周波数領域は、これまでデジタルサンプリング方式と呼ばれる A/D 変換による標準供給が行われており、不確かさは $20 \mu\text{V/V}$ (TC の 10 Hz 未満における不確かさは $40 \mu\text{V/V}$) であった²⁷⁾。ACPJVS による TC の交直差測定の結果、10 Hz では $3.1 \mu\text{V/V}$ ($k=1$, $V_{\text{rms}}=3 \text{ V}$) という合成不確かさが報告され、従来方式よりも小さい不確かさで交直差測定が行われた。この後に行われた実験によって、1 Hz での交直差測定の拡張不確かさ $4.4 \mu\text{V/V}$ ($k=2$, $V_{\text{rms}}=10 \text{ V}$) が報告された⁵⁰⁾。

TC による交直差測定をジョセフソン電圧標準で行うことによって、TC の校正不確かさを小さくすることができる。今回の結果を用いれば、これまで $15 \mu\text{V/V}$ の不確かさでしか校正できなかった 10 Hz から 100 Hz の交流電圧を、 $3.1 \mu\text{V/V}$ の不確かさ ($k=1$, $V_{\text{rms}}=3 \text{ V}$) で

校正することが可能になる。このように、ジョセフソン効果を用いた交流波形の校正は、既存の標準の校正不確かさを改善するポテンシャルを持っている。

5.3.2 Pulse-Driven JVS によるアプローチ

より高い周波数領域における交直変換標準の評価は、主に Pulse-Driven JVS によって行われてきた。

NIST では、Pulse-Driven JVS によって 2.5 kHz から 10 kHz (実効値電圧 50 mV から 200 mV) の範囲において、TTS の交直差測定が行われた。その結果、実効値 100 mV では $134 \mu\text{V/V}$, 実効値 200 mV では $49 \mu\text{V/V}$ という値が報告された⁴⁶⁾。国家標準として用いられている TC の交直差測定では、10 kHz (入力電圧 6 mV) 周波数における不確かさが $183 \mu\text{V/V}$ から $12 \mu\text{V/V}$ に低減したことを報告しており、これはジョセフソン電圧標準によって電圧値のスケーリングを行う必要がなくなったことに起因している⁵⁵⁾。

PTB で行われていた Pulse-Driven JVS による TTS の交直差測定では、通常よりも小さなクライオスタットを用いることで電圧導線の長さを短くし、1 MHz ($V_{\text{rms}}=20 \text{ mV}$) における標準偏差を $10\,000 \mu\text{V/V}$ から $510 \mu\text{V/V}$ まで低減させたことを報告している⁴⁷⁾。

中国 NIM (National Institute of Metrology) でも Pulse-Driven JVS による TTS の交直差測定が行われており、100 kHz, 10 mV における不確かさバジェットシートの中では、伝送線による電圧降下が最も大きな不確かさ要因となっている⁵⁶⁾。

電圧の大きさは mV オーダーではあるものの、TC の校正範囲に匹敵する周波数範囲での検証が行われており、交直差と不確かさの低減に注力されていることがうかがえる。

5.4 電力標準

電力は

$$P = V_{\text{rms}} I_{\text{rms}} \cos\phi \quad (6)$$

と表される。電圧、電流の実効値 (V_{rms} , I_{rms}) の積に両者の波の位相差を反映した力率 ($\cos\phi$) が掛かっている。P は正確には有効電力と呼ばれ、負荷で消費される電力を表す。一般的に電力とみなされているのはこの値になる。電源からの出力は

$$S = V_{\text{rms}} I_{\text{rms}}$$

となり、電圧と電流の積で表される。これを皮相電力と呼ぶ。また、電圧に対して電流の位相がずれた場合、負

荷で消費されない（電源に戻ってくる）電力も存在し、

$$Q = V_{\text{rms}} I_{\text{rms}} \sin\phi$$

で表され、これを無効電力という。これら3つの値には

$$S^2 = P^2 + Q^2$$

という関係が成り立っており、電力標準ではこれら3つの値を測定している。実際にはD/Aコンバーターによって出力した電圧と電流の波形を、電圧はVoltage Amplifier、電流はTransconductance Amplifierを用いて増幅し、電流はCurrent Transformerを用いて電圧に変換された上で測定が行われる。測定された2つの波形から位相差 ϕ を求め、(6)式によって電力を計算する。ジョセフソン効果を用いて任意波形の生成が可能になると、電力標準の評価も行うことが可能になる。商用周波数が50 Hzから60 Hzであることから、低周波を得意とするPJVSを用いた電力標準への応用が進んでいる。

5.4.1 ACPJVSによるアプローチ

PTBの電力標準では、TCによって交流電圧・電流の実効値を求め、電圧計でそれら2つの波形の位相差測定を行っている。PJVSを用いて電圧計の線形性を評価しゲインエラーの修正を行うことで不確かさの低減を目指している。予備的な実験では、主要な不確かさ要因である電圧計の不確かさが $1 \mu\text{V}/\text{V}$ から $0.38 \mu\text{V}/\text{V}$ ($V_{\text{rms}}=120 \text{ V}$, $I_{\text{rms}}=5 \text{ A}$, $k=1$)まで低減したことが報告されている⁵⁷⁾。さらなる改善には、発生させた交流電圧と電流をそれぞれ120 Vと5 Aに変換する際の不確かさ低減に取り組む必要があった。その後に行われた報告では、 $1.2 \mu\text{W}/(\text{VA})$ ($V_{\text{rms}}=120 \text{ V}$, $I_{\text{rms}}=5 \text{ A}$, $k=1$)⁵⁸⁾、 $2.5 \mu\text{W}/(\text{VA})$ ($V_{\text{rms}}=120 \text{ V}$, $I_{\text{rms}}=5 \text{ A}$, 50 Hzから60 Hz, $k=2$)⁵⁹⁾という不確かさに達する可能性が報告された。

NISTでは、電力標準における実効値測定をACPJVSのサンプリング測定によって置き換えようとしている。実際に行われた電力校正の実験では、出力された電圧と、電圧に変換された電流の波形をPJVSによって交互にサンプリング測定することによって、1サイクルでの測定を可能にしている。この手法ではsin波の状態でデータを得るため、電流と電圧の位相差を求めることも可能になる。この実験によって、これまで $7 \mu\text{W}/(\text{VA})$ から $15 \mu\text{W}/(\text{VA})$ ($V_{\text{rms}}=120 \text{ V}$, $I_{\text{rms}}=5 \text{ A}$, 60 Hz, $k=1$)であった不確かさが、 $1 \mu\text{W}/(\text{VA})$ を目指せる段階になったことを報告している⁶⁰⁾。残るタイプA不確かさの最も大きな要因は、 $V_{\text{rms}}=120 \text{ V}$, $I_{\text{rms}}=5 \text{ A}$ の出力を得るための増幅部分である。

NIMにおいてもACPJVSを用いたサンプリング測定が行われた⁶¹⁾。まずロックインアンプとの比較が行われ、ACPJVSが出力した交流電圧との差が実効値電圧で $0.1 \mu\text{V}$ 以下、位相が $0.1 \mu\text{rad}$ 以下であることが確認された。その後、電力標準器が発生する60 Hz, $I_{\text{rms}}=1 \text{ A}$ の電流を 1Ω 抵抗で変換した交流電圧を測定したところ、これまでの電力標準の電流測定の不確かさは $2 \mu\text{V}/\text{V}$ ($k=1$)、位相測定では $3 \mu\text{rad}$ ($k=1$)であったが、電圧測定で $0.3 \mu\text{V}/\text{V}$ ($k=1$)、位相測定では $0.2 \mu\text{rad}$ ($k=1$)という値が報告されている。

5.4.2 Pulse-Driven JVSによるアプローチ

オーストラリアのNMIA (National Measurement Institute of Australia) では、Pulse-Driven JVSを用いて電力測定におけるひずみ信号（高調波成分）の位相差測定が行われた⁶²⁾。2つのジョセフソンアレイを用いて 180° 位相の異なる高調波を出力し、その位相ずれを高調波の条件を変えながら測定した。システムの目標とする不確かさは 0.002° から 0.010° ($k=2$)であった。

ジョセフソン電圧標準を用いた電力標準への応用は、要求される条件が比較的低周波かつ高出力であるため、主にPJVSを用いて行われてきた。現状の電力標準よりも小さい不確かさで電力標準を実現することが示され、実際のシステム実装が今後行われていくと考えられる。

5.5 インピーダンス標準

インピーダンス (Z) とは、交流における抵抗成分の総称であり、交流抵抗 (R)・キャパシタンス (C)・インダクタンス (L) の3つに分類される。それぞれの標準は直流抵抗の一次標準である量子化ホール抵抗 (Quantized Hall Resistance: QHR) にトレーサブルな標準器を用いて供給が行われている。実際の校正には、インピーダンスブリッジと呼ばれる手法が用いられている。以下にその方法を示す。

図10のようなブリッジ回路を用意し、精確に求められた電源電圧比 V_A/V_B と既知のインピーダンスの値 Z_S を用いて未知のインピーダンス Z_X を求める。ブリッジ回路が平衡状態（2つのインピーダンスに流れる電流が等しく逆向き）になったことをマルチポイント検出器での電圧値 V_n で確認する。この際、微小電圧源の電圧 ΔV で V_n の値が零になるように調整する。平衡状態になった時、2つの出力電圧 V_A, V_B 、インピーダンス Z_S, Z_X と微小電圧源の電圧 ΔV の関係は

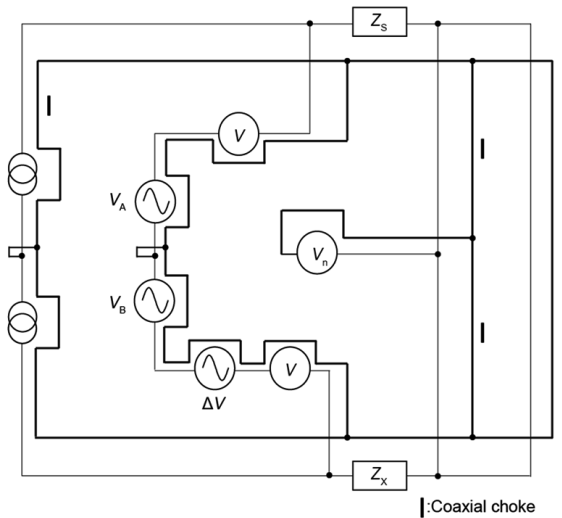


図 10 4 端子対型インピーダンスブリッジ回路^[63]を参考に作成.]

$$\frac{Z_x}{Z_s} = \frac{V_A}{V_B + \Delta V}$$

となり、 $\Delta V \ll 1$ のとき

$$\frac{Z_x}{Z_s} = \frac{V_A}{V_B \left(1 + \frac{\Delta V}{V_B}\right)} \approx \frac{V_A}{V_B} \left(1 - \frac{\Delta V}{V_B}\right)$$

と近似することができる。現在産総研では、以下の校正範囲で校正が行われている²⁸⁾。

- ・交流抵抗器：10 Ω から 100 kΩ (1 kHz と 10 kHz, 相対拡張不確かさ 10 nΩ/Ω オーダーから μΩ/Ω オーダー)
- ・標準キャパシタ：10 pF から 1000 pF, 10 nF から 10 μF (1 kHz と 1.592 kHz, 相対拡張不確かさ 10 nF/F オーダーから 10 μF/F オーダー)
- ・インダクタ：10 mH から 100 mH (1 kHz と 1.592 kHz, 相対拡張不確かさ 10 μH/H オーダー)

現在、インピーダンス校正に用いるブリッジの電源電圧に、ジョセフソン電圧標準で生成した交流波形を用いた回路の研究開発が複数の NMI で行われている。

5.5.1 ACPJVS によるアプローチ

PTB では、ACPJVS を用いた 2 種類のインピーダンス測定を行った⁶⁴⁾。1 つ目は、4 端子対型インピーダンスブリッジ回路の電源電圧として 2 つの ACPJVS を用いて任意の周波数の交流電圧を 2 つ発生させ、2 つの基準抵抗器が平衡状態になるように振幅と位相差を調整する方法である (potential comparison circuit)。この方法では、トランジェントの部分測定していないため、抵抗

の実数部のみの比較となっている。2 つ目の実験は、それぞれの基準抵抗器を 10 kΩ の可変抵抗でブリッジさせ、最終的に両者の比較を 100 Ω の可変抵抗で調節しながらロックインアンプで行うというものである (the coaxial setup)。この方法ではロックインアンプによって位相と振幅を測定しているため、先程とは異なり抵抗の虚数成分も測定することが可能である。これらの測定は 25 Hz から 6 kHz の間で行われ、2 つの実験結果が 5 kHz 以下において 10 nΩ/Ω のオーダーで一致していることが示された。

これまでのインピーダンス標準は、精密トランスおよび誘導分圧器を用いて実現されてきた。校正する周波数範囲の拡張には分圧器の改良が必要になる可能性があるため、ジョセフソン電圧標準を用いて任意の周波数での電圧比を実現する手法が確立すれば、校正する周波数範囲の拡張が容易になることが期待できる。

5.5.2 Pulse-Driven JVS によるアプローチ

より高い周波数でのインピーダンス測定への応用には、Pulse-Driven JVS が用いられてきた。NIST では、電源電圧を Pulse-Driven JVS に置き換えたブリッジ回路 (Josephson-based full digital bridge: JB-FDB) を用いて 3 つの実験が行われた⁶⁵⁾。1 つ目の実験では、トランスによって電圧比を実現していた置き換え前のブリッジ回路との抵抗測定における比較で、12.906 kΩ の抵抗における交直差を 1 kHz から 20 kHz の範囲にわたって測定した。その結果、0.05 μΩ/Ω 未満での一致が確認された。2 つ目は、抵抗 (10 kΩ)、キャパシタンス (10 nF)、インダクタンス (1 H) の比較測定をそれぞれの組み合わせで行い、JB-FDB の確認を行う実験であった。用意されたインピーダンスは 1592 Hz で値がすべて 10 kΩ に等しくなるように設定されているため、比は 1 に近くなる。実際に比の測定を行い、その結果の差分を

$$\Delta_A = (Z_L/Z_R)/(Z_L/Z_C) - (Z_C/Z_R)$$

という式で求めることでその一貫性を確認した ($Z_{X\alpha=R,C,L}$ は各要素のインピーダンスを表す)。測定の結果、差分結果の複素平面プロットでは値が零の付近に分布せず、一定の線形性が見られた。これはインダクタの大きな温度係数が要因であった。3 つ目の実験ではこの影響を除くため、インダクタを採用せず複数の抵抗 (129 kΩ, 12.9 kΩ) とキャパシタ (1 nF, 10 nF) での比を求め、2 つ目の実験と同様に差分を求めた。抵抗とキャパシタの比が 1:1 または 1:10 になるよう 1233 Hz で測定を行った結果、0.5 μΩ/Ω 以内での一貫性

が確認された。1 nF と 10 nF の比較を含んだ差分は不確かさが 0.1 $\mu\Omega/\Omega$ のオーダーであったが、含んでいない差分では 10 n Ω/Ω のオーダーとなっていた。これらの実験結果より、JB-FDB は 10 n Ω/Ω の精度での抵抗の周波数依存性が測定できるポテンシャルを有していることが分かった。

PTB でも Pulse-Driven JVS を用いたインピーダンス標準への応用が行われている。こちらでは、2 つの Pulse-Driven JVS と QHR を用いた直角相ブリッジを構築し、キャパシタンスの測定を行っている⁶⁶⁾。このブリッジの不確かさは 1233 Hz で 8 n Ω/Ω (20 mV) となっており、測定対象とした 10 nF のキャパシタンス標準の安定性を含めると、合成不確かさが 13.9 nF/F となっていた。同じ 10 nF のキャパシタンス標準を、これまで使われていた誘導分圧器 (Inductive Voltage Divider, IVD) を用いたブリッジで 1 nF の標準を用いて測定したところ、2 つのブリッジで 13 n Ω/Ω 以内での一致が見られた。その後に行われた実験では、2 つのジョセフソンアレイを別々に銅で覆うことでクロストークを減らし、市販のハイエンドキャパシタンスブリッジとの比較を 10 nF のキャパシタンス標準同士の測定によって行った⁶⁷⁾。その結果、246 Hz から 5 kHz までの結果が 0.1 $\mu\text{F}/\text{F}$ のオーダーで一致し、20 kHz までの結果は $\mu\text{F}/\text{F}$ のオーダーで一致した ($V_{\text{rms}} = 75 \text{ mV}$)。

従来のインピーダンス標準では、 R から R (C から C)、 R から C 、 C から L を求めるためにそれぞれ別のセットアップを特定の周波数においてのみ使用してきた。ジョセフソン電圧標準を用いて任意の周波数、位相を持った交流波形を生成しインピーダンス測定を行うことで、1 つのブリッジで全複素平面をカバーする (すべてのインピーダンス測定を実現する) ことが可能となる。

5.6 ジョンソンノイズ温度計およびボルツマン定数の決定

SI 改定 (2019 年 5 月 20 日) 以前の熱力学温度の単位ケルビン (K) は、

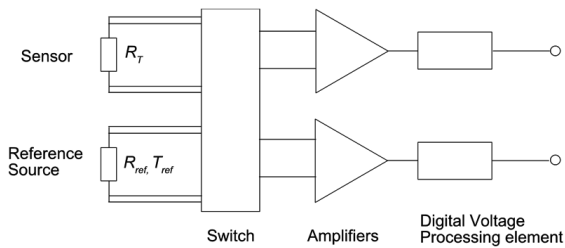


図 11 ジョンソンノイズ温度計^[68)を参考に作成.]

「熱力学温度の単位、ケルビンは、水の三重点の熱力学温度の 1/273.16 である。」

と定義され、水の三重点は、純粋な水をガラスの容器 (セル) に封入して、その容器内で実現されていた。一方、水の三重点の温度は、同位体組成の違いにより変化することが知られており、精密測定においては、水の三重点を実現する同位体組成の曖昧さが問題になることが指摘されていた⁶⁹⁾⁻⁷¹⁾。実際に、BIPM がパイロットとなり行った水の三重点温度の国際比較 (CCT-K7)⁷²⁾ では、参加国の間で差が生じており、その差が各国で用いた水の試料の同位体組成の違いが主要因であると考えられた⁷³⁾。その後、2007 年の第 23 回国際度量衡総会 (General Conference on Weights and Measures: CGPM) において、水の三重点を実現する水の同位体組成が定義に追加され、定義の曖昧さは解消された⁷⁴⁾。しかし、セルのガラスによる不純物溶出の影響の評価の難しさなど、物質に基づくこれまでの定義に限界が見られ、ケルビン (K) の再定義を目指す機運が高まった。そして、熱力学温度の単位ケルビン (K) を、ボルツマン定数 k を定めることによって定義するものへと改定することが測温諮問委員会 (Consultative Committee for Thermometry: CCT) により検討され、2010 年の会合により、定義の改定のために以下の条件を満たすことを国際度量衡委員会 (International Committee for Weights and Measures: CIPM) に対して勧告した⁷⁵⁾。1) (複数の測定結果を総合した) ボルツマン定数の値決定の相対標準不確かさが 1 $\mu\text{K}/\text{K}$ を下回ること、および、2) その測定が少なくとも原理的に異なる 2 つの方法の結果に基づくこと。定義改定以前の熱力学温度は水の三重点によって定められていたため、その測定結果からボルツマン定数を逆算することになる。ボルツマン定数を電氣的に測定できる手段として、ジョンソンノイズ温度計 (Johnson noise thermometry: JNT) がある。JNT とは、電子の熱雑音のスペクトル強度 (電圧値の二乗平均 $\overline{V_T^2}$) を測定し、 T を決定する熱力学温度計の 1 つである。以下にその測定法を示す。ジョンソンノイズ温度計による熱力学温度の測定には、以下のナイキストの式を用いる^{75),76)}。

$$\overline{V_T^2} = 4kTR(T)\Delta f$$

ここで、 k はボルツマン定数、 $R(T)$ は校正された抵抗値、 Δf は測定周波数の帯域幅である。数ある熱力学温度計の中で、ジョンソンノイズ温度計は測定可能な温度領域が広く (6 mK から 1445 K)⁶⁸⁾、プローブ形状が通常の

温度計に近いという特徴を持っている (図 11)⁷⁷⁾.

ノイズ温度計のゲインとバンド幅を正確に定量化することが難しいため、2つのノイズ源を用いて測定が行われる⁷⁸⁾。1つは温度の分かっていない抵抗器で、もう1つは reference noise source でこちらは温度が既知のものを用いる。2つの電圧ノイズを測定し、それらの比によって温度を決定する。この際、アンプのゲインとバンド幅に依存せず温度を決定することができる。これまでのジョンソンノイズ温度計の不確かさは 10 $\mu\text{K}/\text{K}$ から 50 $\mu\text{K}/\text{K}$ 程度であり、音響気体温度計を用いた温度測定の測定不確かさ (1 $\mu\text{K}/\text{K}$ から 10 $\mu\text{K}/\text{K}$) を下回っていた⁷⁷⁾。これは、電気測定系の理想的でない振る舞いによって正確な測定が制限されていることによるものである。Reference noise source としてジョセフソン効果で生成される量子力学的に定義された電圧ノイズを用いることで、不確かさの低減が期待できる。

現在、1990年国際温度目盛 (International Temperature Scale of 1990: ITS-90) という実用的な国際温度目盛によって温度標準の供給が行われている。これは、温度の再現性が非常によい純物質の相転移を利用した複数の温度定点とその間を補完する温度計と補間式を定めている⁷⁵⁾。近年、熱力学温度計の技術発展に伴い、この温度定点およびそれらの間の温度において ITS-90 での値と熱力学温度の値との乖離が確認されるようになってきている⁷⁵⁾。JNT の不確かさを低減によってこの差の評価をより小さい不確かさで行うことが可能になる。

2003年、NIST では JNT の reference noise source として Pulse-Driven JVS を組み込み、温度定点の1つである Ga の三重点 ($T_{90}=302.916\text{ K}$) セル中の 100 Ω 抵抗と量子化されたノイズ源 (Quantized voltage noise source: QVNS) で電圧ノイズを比較する実験を行った⁷⁹⁾。その結果、2 mK/K での一致が確認され、 $k=1$ での不確かさは 1 mK/K であった。また、抵抗器の温度は $302.5\text{ K} \pm 0.3\text{ K}$ (ノイズ間の相互相関による不確かさ、 $k=1$) と推定された。

これまで JNT は、上述したような温度定点の測定に用いられてきたが、熱力学温度の単位の定義改定を目指し、JNT を用いたボルツマン定数の測定が行われてきた。

NIM では、QVNS を組み込んだ JNT でのボルツマン定数の測定が行われた⁸⁰⁾。100日に及ぶ実験の結果、ボルツマン定数の合成標準不確かさは $2.7(\mu\text{J K}^{-1})/(\text{J K}^{-1})$ となり、2014年の科学技術データ委員会 (Committee on Data for Science and Technology: CODATA) の基礎物理定数作業部会 (Task Group on Fundamental Physical

Constants) から発表された基礎物理定数の推奨値 (CODATA2014) における値との差は $+0.89(\mu\text{J K}^{-1})/(\text{J K}^{-1})$ であった。

NIST でも、QVNS を組み込んだ JNT でのボルツマン定数の測定が行われた⁸¹⁾。50日に及ぶ実験の結果、ボルツマン定数の合成標準不確かさは $5.0(\mu\text{J K}^{-1})/(\text{J K}^{-1})$ となり、CODATA2014 における値との差は $-4.05(\mu\text{J K}^{-1})/(\text{J K}^{-1})$ であった。この実験は 2017 年に行われたが、2011年に NIST で行われた実験の不確かさの半分以下となっていた。

産総研では、QVNS を組み込んだ JNT を独自に開発した⁸²⁾。また、水の三重点 (273.16 K) における電圧ノイズを測定する抵抗として、温度係数の小さな ($0\text{ }^{\circ}\text{C}$ で $2\mu\Omega/(\Omega\text{ }^{\circ}\text{C})$) 100 Ω の Ni-Cr 箔を QHR トレーサブルに用意し、ボルツマン定数の測定を行った⁸³⁾。測定を行うと、比の標準偏差よりも大きな値のずれ ($100(\mu\text{J K}^{-1})/(\text{J K}^{-1})$ 以上) が確認されるとともに、電磁干渉 (Electro Magnetic Interference: EMI) の影響を受けていた。この実験の後、超伝導集積回路を組み込んだ JNT (そこで用いられたノイズ源を Integrated quantum voltage noise source: IQVNS と呼ぶ) が開発され、EMI の影響を排した実験が行われた⁸⁴⁾。その結果、ボルツマン定数の合成標準不確かさは $10.22(\mu\text{J K}^{-1})/(\text{J K}^{-1})$ となり、CODATA2014 における値との差は $-3.56(\mu\text{J K}^{-1})/(\text{J K}^{-1})$ であった。

このように、ボルツマン定数を決定するための実験が JNT や他の熱力学温度計を用いて行われ、kg, A, mol とともに 2019年5月20日をもって K の改定が行われることとなった⁷⁴⁾。以下にその定義を示す。

「ボルツマン定数 k を単位 J K^{-1} ($\text{kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{K}^{-1}$ に等しい) で表したときに、その数値を $1.380\,649 \times 10^{-23}$ と定めることによって定義される。」

産総研では、定義値となったボルツマン定数 ((1) 式) を用いて IQVNS を用いた JNT による Ga の融点の測定が行われた⁸⁵⁾。IQVNS の作るノイズをサンプリング間隔に合わせることによって、測定上リアルなランダムノイズを生成することができる。測定の結果、温度が $302.926\,1\text{ K} \pm 0.012\text{ K}$ ($29.766\,1\text{ }^{\circ}\text{C}$) と求まり、CODATA2017 が示した ITS-90 の値 ($29.764\,6\text{ }^{\circ}\text{C}$) の統計不確かさである 12 mK に収まっていることが確認された。

ジョセフソン効果を用いた電圧発生によって、ジョンソンノイズ温度計の不確かさが大きく軽減され、定義値の決定に寄与できるほど小さな不確かさでのボルツマン定数の測定を達成するほどとなっている。今後は、広い

温度領域への適用可能性やそのコンパクト性を生かして様々な温度定点などでの簡便な熱力学温度の測定が行われていくことが期待される。

5.7 高周波 AWS (Arbitrary Waveform Synthesizer)

近年、情報通信機器の周波数帯は4Gから5Gへの移行が始まりつつあり（このGはGenerationの頭文字を表す）、その周波数帯域（最大28GHz）に対応した高周波参照標準をSI量子トレーサブルに開発しようとする試みがなされている。

NISTでは、Pulse-Driven JVSを用いた回路を組み、1GHz、2GHzの信号生成を行った⁸⁶⁾。この実験では102個または1440個の接合のみを使っており、高出力化を目指す際の高周波実装（信号減衰）を考慮しAttenuator（減衰器）を入れた際の結果も報告している。その結果、102個の接合を用いた回路で1GHzの信号を生成した際には-71dB（1mW基準、以降dB表記は1mW基準とする）の出力と-66dBのSpurious-Free Dynamic Range（SFDR、最大信号成分とその次に大きな信号成分の実効値の比率）が確認され、1440個の接合を用いた回路で1GHzの信号を生成した際には-49dB（Attenuator入りでは-89dB）の出力と-79dBのSFDRが示された。

SI量子トレーサブルなRF参照標準として、RSFQ-JVSもその候補の1つとして考えることができる。NISTでは、実際にRSFQ-JVSを用いた回路を組み、4GHzの信号生成を行った⁸⁷⁾。この方式ではPulse-Driven JVSで問題となっていた高周波実装の問題を回避できるため、より高い周波数領域での信号生成が期待できる。実験では、4GHzの信号生成を確認した（-38dBの出力と-70dBのSFDR）。

高周波領域の任意波形を生成し、参照標準として用いるには、より高出力、低ノイズ、精確な信号生成が求められる。また、サーミスタベースの高周波電力標準の周波数に依存した効率の校正やカロリメーターの校正をこれに置き換えたりするなどの提案もなされ、応用先の選択肢の広がりがうかがえる（上記の校正を行うために必要となるスペック：出力範囲-30dBから10dB、18GHzまでの周波数範囲で2mW/W未満の不確かさ⁸⁶⁾）。

5.8 量子メトロロジートライアングル

2章の最後でも述べたが、量子力学的に生成した電流（単位：A）、電圧（単位：V）、抵抗（単位： Ω ）の3つの電気関係量をオームの法則に適用し、それぞれの量子現象の妥当性を相互に検証することを量子メトロロジー

トライアングル（QMT）実験と呼ぶ。産総研を含む複数のNMIでこの取り組みが行われている^{88), 89)}。量子交流電圧標準の応用としての取り組みは、このような学術研究に近い分野でも行われている。

QMT実験では、微小電圧計を用いて、2種類の方法で生成した電圧（例えば、量子化ホール抵抗に単一電子ポンプ素子による電流を流した時に生じる電圧降下とジョセフソン電圧標準に生じる電圧）を精確に比較する必要がある。零位法を用いた場合には差電圧がほぼ零になるよう各電圧値を調節したうえで測定を行うが、実際の測定では、ノイズや熱起電力の揺らぎなどの外乱による差電圧の増加が避けられない。産総研では、このような差電圧の増加が微小電圧計のGain Errorに起因した不確かさ要因となることを避けるため、ジョセフソン電圧標準を駆動するマイクロ波周波数にフィードバック機構を組み込むことで、差電圧が常にほぼ零となるように調整する差電圧トラッキング機構の開発が行われている。このような手法は、零位法を用いた他の精密電圧測定への応用も期待できる。

6. 総括

本稿では、電気標準がどのように生まれてきたのかを概説し、現在用いられている電圧標準についての解説を行った後、ジョセフソン効果を用いた交流電圧標準の応用に関する研究開発動向を報告した。主な応用について以下にコメントを記載する。

- ・ACボルトメーターへの応用：開発は十分に進んでおり、出力電圧の小さい範囲では、現在の開発段階でも十分に標準としての役割を果たすことが可能と言える。
- ・サーマルコンバータ（TC）への応用：（ACPJVS）既存の標準の校正不確かさを改善するポテンシャルを持っていることが分かる。（Pulse-Driven JVS）電圧の大きさはmVオーダーではあるものの、TCの校正範囲に匹敵する周波数範囲での検証が行われており、交直差測定による不確かさの低減に注力されていることがうかがえる。
- ・電力標準への応用：現状の電力標準よりも小さい不確かさで電力標準を実現できることが示され、標準システムへの実装が今後行われていくと考えられる。
- ・インピーダンス標準への応用：現在実証に向けた取り組みが盛んであり、ジョセフソン電圧標準を用いて任意の周波数、位相を持った交流波形を生成しインピーダンス測定を行うことで、1つのブリッジで全複素平面をカバーする（すべてのインピーダンス測定を実現する）こ

とが可能となる。

・ジョンソンノイズ温度計およびボルツマン定数の決定：ジョセフソン効果を用いた電圧発生によって、ジョンソンノイズ温度計の測定不確かさが大きく軽減され、定義値の決定に寄与できるほど小さな不確かさでのボルツマン定数の測定を達成するほどとなった。今後は、広い温度領域への適用可能性を生かして様々な温度定点などでの熱力学温度の測定が行われていくことが期待される。

また、高周波AWS、量子メトロロジートライアングルへの応用という新しい開発領域も登場しており、今後の発展が期待される。現状の応用における不確かさ低減を目指すとともに、新たな応用開発を進めていくことが、量子交流電圧標準の応用をさらに発展させていくために重要であると考えられる。

謝辞

本調査研究を行うにあたり、多くの方に貴重なご助言をいただきました。物理計測標準研究部門 金子晋久首席研究員、量子電気標準研究グループ 丸山道隆グループ長並びに 福山康弘主任研究員、中村秀司主任研究員、岡崎雄馬主任研究員、高田真太郎研究員、応用電気標準研究グループ 坂本憲彦グループ長、山田達司主任研究員、堂前篤志主任研究員、天谷康孝主任研究員、大川顕次郎研究員、量子計測基盤研究グループ 浦野千春グループ長、温度標準研究グループ 中野享グループ長と斎藤郁彦研究員に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 白田孝 2018 新しい1キログラムの測り方 科学が進めば単位が変わる 講談社
- 2) 石崎正 1961 基礎電気標準について 計測 11 492-498
- 3) B D Josephson 1962 Possible New Effects in Superconductive Tunnelling *Phys. Lett.* 1 251
- 4) K v Klitzing, G Dorda and M Pepper 1980 New Method for High-Accuracy Determination of the Fine-Structure Constant Based on Quantized Hall Resistance *Phys. Rev. Lett.* 45 494
- 5) 村山泰, 坂本泰彦, 桜庭俊昭, 西中英文, 遠藤忠 2000 電圧標準 電子技術総合研究所彙報 64 5
- 6) 遠藤忠 2000 電気標準の変遷 技術探索 120 31-34
- 7) <https://www.bipm.org/utis/en/pdf/si-mep/SI-App2-ampere.pdf>
- 8) 中村秀司 2013 電流標準の現状と展望 産総研計量標準報告 8 441
- 9) M W Keller, A L Eichenberger, J M Martinis and N M Zimmerman 1999 A Capacitance Standard Based on Counting Electrons *Science* 285 1706
- 10) B Steck, A González-Cano, N Feltn, L Devoille, F Piquemal, S V Lotkhov and A B Zorin 2008 Characterization and metrological investigation of an R-pump with driving frequencies up to 100 MHz *Metrologia* 45 482
- 11) B Camarota, H Scherer, M W Keller, S V Lotkhov, G-D Willenberg and F J Ahlers 2012 Electron Counting Capacitance Standard with an improved five-junction R-pump *Metrologia* 49 8
- 12) S Nakamura, Y A Pashkin, J Tsai and N-H Kaneko 2015 Single-Electron Pumping by Parallel SINIS Turnstiles for Quantum Current Standard *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 64 1696
- 13) G Yamahata, S P Giblin, M Kataoka, T Karasawa and A Fujiwara 2017 High-accuracy current generation in the nanoampere regime from a silicon single-trap electron pump *Sci. Rep.* 7 45137
- 14) N-H Kaneko, S Nakamura and Y Okazaki 2016 A review of the quantum current standard *Meas. Sci. Technol.* 27 032001
- 15) S P Giblin, A Fujiwara, G Yamahata, M-H Bae, N Kim, A Rossi, M Möttönen and M Kataoka 2019 Evidence for universality of tunable-barrier electron pumps *Metrologia* 56 044004
- 16) 岡崎雄馬 2016 量子メトロロジートライアングルの現状と基盤技術 産総研計量標準報告 9 323
- 17) H Scherer and B Camarota 2012 Quantum metrology triangle experiments: a status review *Meas. Sci. Technol.* 23 124010
- 18) N-H Kaneko 2017 Review of quantum electrical standards and benefits and effects of the implementation of the 'Revised SI' *IEEJ Trans.* 12 627
- 19) C A Hamilton, C J Burroughs and S P Benz 1997 Josephson voltage standard-a review *IEEE Trans. Appl. Supercon.* 7 3756
- 20) 丸山道隆 2011 ジョセフソン電圧標準の現状 産総研計量標準報告 8 263
- 21) 電気学会クライオエレクトロニクス常置専門委員会 1978 ジョセフソン効果《基礎と応用》電気学会
- 22) C A Hamilton, C J Burroughs and R L Kautz 1995 Josephson D/A converter with fundamental accuracy

- IEEE Trans. Instrum. Meas.* 44 223
- 23) T Yamada, Y Murayama, H Yamamori, H Sasaki, A Shoji, A Iwasa, H Nishinaka and Y Nakamura 2009 Comparison of a Multichip 10-V Programmable Josephson Voltage Standard System With a Superconductor-Insulator-Superconductor-Based Conventional System *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 58 832
- 24) M Maruyama, A Iwasa, H Yamamori, S Chen, C Urano and N-H Kaneko 2015 Calibration System for Zener Voltage Standards Using a 10 V Programmable Josephson Voltage Standard at NMIJ *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 64 1606
- 25) S Solve, R Chayramy, M Maruyama, C Urano, N-H Kaneko and A Rüfenacht 2018 Direct DC 10 V comparison between two programmable Josephson voltage standards made of niobium nitride (NbN)-based and niobium (Nb)-based Josephson junctions *Metrologia* 55 302
- 26) 天谷康孝 2011 交流電圧標準の現状 産総研計量標準報告 8 245
- 27) 天谷康孝 2014 交流電圧標準におけるサーマルコンバータの低周波特性評価に関する研究 博士論文 東京理科大学
- 28) <https://unit.aist.go.jp/ripm/aelec-std/calibration.html>
- 29) T E Lipe and J R Kinard 2012 Quantum AC Voltage Standards *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 61 2160
- 30) 丸山道隆, 金子晋久 2014 極低温技術を用いた電気標準の現状—ジョセフソン電圧標準と量子ホール抵抗標準の開発と応用—*低温工学* 49 44
- 31) S Chen, Y Amagai, M Maruyama and N-H Kaneko 2015 Uncertainty Evaluation of a 10 V RMS Sampling Measurement System Using the AC Programmable Josephson Voltage Standard *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 64 3308
- 32) A Rüfenacht, C J Burroughs, P D Dresselhaus and S P Benz 2013 Differential Sampling Measurement of a 7 V RMS Sine Wave With a Programmable Josephson Voltage Standard *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 62 1587
- 33) M Schubert, M Starkloff, J Lee, R Behr, L Palafox, A Wintermeier, A C Boeck, P M Fleischmann and T May 2015 An AC Josephson Voltage Standard up to the Kiloherz Range Tested in a Calibration Laboratory *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 64 1620
- 34) R Behr, L Palafox, G Ramm, H Moser and J Melcher 2007 Direct Comparison of Josephson Waveforms Using an AC Quantum Voltmeter *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 56 235
- 35) S P Benz and C A Hamilton 1996 A pulse-driven programmable Josephson voltage standard *Appl. Phys. Lett.* 68 3171
- 36) N E Flowers-Jacobs, A Rüfenacht, A E Fox, S B Waltman, J A Brevik, P D Dresselhaus and S P Benz 2018 Three Volt Pulse-Driven Josephson Arbitrary Waveform Synthesizer *2018 Conf. on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2018) (IEEE)* (<https://doi.org/10.1109/CPEM.2018.8501053>)
- 37) N E Flowers-Jacobs, A E Fox, P D Dresselhaus, R E Schwall and S P Benz 2016 Two-Volt Josephson Arbitrary Waveform Synthesizer Using Wilkinson Dividers *IEEE Trans. Appl. Supercon.* 26 1
- 38) F Hirayama, M Maezawa and M Suzuki 2007 One-bit digital-to-analog converter based on rapid single flux quantum circuit *Physica C* 463 1084
- 39) M Maezawa, F Hirayama and M Suzuki 2005 One-bit digital-to-analog converter based on rapid single flux quantum circuit *Physica C* 426 1674
- 40) Y Amagai, M Maruyama and H Fujiki 2013 Low-Frequency Characterization in Thermal Converters Using AC-Programmable Josephson Voltage Standard System *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 62 1621
- 41) A Rüfenacht, F Overney, A Mortara and B Jeanneret 2011 Thermal-Transfer Standard Validation of the Josephson-Voltage-Standard-Locked Sine-Wave Synthesizer *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 60 2372
- 42) J Lee, R Behr, L Palafox, A Katkov, M Schubert, M Starkloff and A C Böck 2013 An ac quantum voltmeter based on a 10 V programmable Josephson array *Metrologia* 50 612
- 43) J M Underwood 2019 Uncertainty analysis for ac-dc difference measurements with the AC Josephson voltage standard *Metrologia* 56 015012
- 44) J Ireland, J Williams, O Kieler, R Behr, E Houtzager, R Hornecker, and H E v d Brom 2019 An Optoelectronic Pulse Drive for Quantum Voltage Synthesizer *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 68 2066
- 45) S P Benz, S B Waltman, A E Fox, P D Dresselhaus, A Rüfenacht, J M Underwood, L A Howe, R E Schwall and C J Burroughs 2015 One-Volt Josephson Arbitrary Waveform Synthesizer *IEEE Trans. Appl. Supercon.* 25

- 1
- 46) O F O Kieler, R P Landim, S P Benz, P D Dresselhaus and C J Burroughs Jr. 2008 AC-DC Transfer Standard Measurements and Generalized Compensation With the AC Josephson Voltage Standard *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **57** 791
- 47) H E v d Brom, O F O Kieler, S Bauer and E Houtzager 2017 AC-DC Calibrations With a Pulse-Driven AC Josephson Voltage Standard Operated in a Small Cryostat *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **66** 1391
- 48) T Watanabe, Y Takahashi, H Shimada, M Maezawa and Y Mizugaki 2015 4-bit Bipolar Triangle Voltage Waveform Generator Using Single-Flux-Quantum Circuit *Physics Procedia* **65** 213
- 49) Y Mizugaki, Y Takahashi, H Shimada and M Maezawa 2015 Design and Operation of a 9-bit Single-flux-quantum Pulse-frequency Modulation Digital-to-analog Converter *Physics Procedia* **65** 209
- 50) Y Amagai, M Maruyama, H Yamamori, T Shimazaki, K Okawa, H Fujiki and N-H Kaneko 2020 Extending voltage range to 10 V rms in AC-DC difference measurements with AC programmable Josephson voltage standard
- 51) R Behr, O Kieler, J Kohlmann, F Müller and L Palafox 2012 Development and metrological applications of Josephson arrays at PTB *Meas. Sci. Technol.* **23** 124002
- 52) A Rüfenacht, N E Flowers-Jacobs and S P Benz 2018 Impact of the latest generation of Josephson voltage standards in ac and dc electric metrology *Metrologia* **55** S152
- 53) D Schleußner, O F Kieler, R Behr, J Kohlmann and T Funck 2010 Investigations using an improved Josephson Arbitrary Waveform Synthesizer (JAWS) system *2010 Conf. on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2010) (IEEE)* (<https://doi.org/10.1109/CPEM.2010.5543512>)
- 54) C Urano, M Maruyama, N-h Kaneko, H Yamamori, A Shoji, M Maezawa, Y Hashimoto, H Suzuki, S Nagasawa, T Satoh, M Hidaka and S Kiryu 2009 Operation of a Josephson arbitrary waveform synthesizer with optical data input *Supercond. Sci. Technol.* **22** 114012
- 55) T E Lipe, J R Kinard, Y-H Tang, S P Benz, C J Burroughs and P D Dresselhaus 2008 Thermal voltage converter calibrations using a quantum ac standard *Metrologia* **45** 275
- 56) K Zhou, J Qu, X Xu and Z Zhou 2018 Thermal Transfer Standard Calibrations Using a Pulse-Driven AC Josephson Voltage Standard *2018 Conf. on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2018) (IEEE)* (<https://doi.org/10.1109/CPEM.2018.8501010>)
- 57) L Palafox, G Ramm, R Behr, W G K Ihlenfeld and H Moser 2007 Primary AC Power Standard Based on Programmable Josephson Junction Arrays *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **56** 534
- 58) L Palafox, R Behr, W G K Ihlenfeld and F Müller 2008 The Josephson effect based primary ac power standard at PTB: progress report *2008 Conf. on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2008) (IEEE)* (<https://doi.org/10.1109/CPEM.2008.4574863>)
- 59) E Mohns, G Ramm, W G K Ihlenfeld, L Palafox and H Moser 2009 The PTB primary standard for electrical AC power *MAPAN* **24** 15
- 60) B C Waltrip, B Gong, T L Nelson, Y Wang, C J Burroughs Jr, A Rüfenacht, S P Benz and P D Dresselhaus 2009 AC Power Standard Using a Programmable Josephson Voltage Standard *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **58** 1041
- 61) L Wang, Zhenshen Jia, Z Liu, Q He and H Huang 2018 Precision AC Power Measurement Based on Differential Sampling System Using ACPJVS *J. Phys.: Conf. Ser.* **1065** 052023
- 62) D Georgakopoulos, I Budovsky, S P Benz and G Gubler 2018 Josephson Arbitrary Waveform Synthesizer as a Reference Standard for the Measurement of the Phase of Harmonics in Distorted Signals *2018 Conf. on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2018) (IEEE)* (<https://doi.org/10.1109/CPEM.2018.8501223>)
- 63) 堂前篤志 2014 キャパシタンス標準に関する計測技術の研究 博士論文 東京都市大学
- 64) J Lee, J Schurr, J Nissila, L Palafox, R Behr and B P Kibble 2011 Programmable Josephson Arrays for Impedance Measurements *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **60** 2596
- 65) F Overney, N E Flowers-Jacobs, B Jeanneret, A Rüfenacht, A E Fox, J M Underwood, A D Koffman and S P Benz 2016 Josephson-based full digital bridge for high-accuracy impedance comparisons *Metrologia* **53** 1045
- 66) S Bauer, R Behr, T Hagen, O Kieler, J Lee, L Palafox and J Schurr 2017 A novel two-terminal-pair pulse-driven Josephson impedance bridge linking a 10 nF

- capacitance standard to the quantized Hall resistance *Metrologia* 54 152
- 67) S Bauer, R Behr, O Kieler, J Lee, L Palafox and J Schurr 2018 Progress on PTB's Pulse-Driven Josephson Impedance Bridge Combined with an AC Quantum Hall Resistance *2018 Conf. on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2018) (IEEE)* (<https://doi.org/10.1109/CPEM.2018.8501036>)
- 68) 三澤哲郎 2014 音響気体温度計による熱力学測定に関する調査研究 産総研計量標準報告 9 75
- 69) J V Nicholas, D R White and T D Dransfield 1996 Isotope influences on the triple point of water and the definition of the kelvin *1997 Proc. TEMPMEKO* 9
- 70) 中野享 2000 温度定点の同位体効果とその不確かさへの寄与に関する調査研究 計量研究所報告 49 183
- 71) D R White, T D Dransfield, G F Strouse, W L Tew, R L Rusby and J Gray 2003 Effects of Heavy Hydrogen and Oxygen on the Triple-Point Temperature of Water *AIP Conference Proceedings* 684 221
- 72) M Stock, S Solve, D del Campo, V Chimenti, E Méndez-Lango, H Liedberg, P P M Steur, P Marcarino, R Dematteis, E Filipe, I Lobo, K H Kang, K S Gam, Y-G Kim, E Renaot, G Bonnier, M Valin, R White, T D Dransfield, Y Duan, Y Xiaoke, G Strouse, M Ballico, D Sukkar, M Arai, A Mans, M de Groot, O Kerkhof, R Rusby, J Gray, D Head, K Hill, E Tegeler, U Noatsch, S Duris, H Y Kho, S Ugur, A Pokhodun and S F Gerasimov 2006 Final Report on CCT-K7: Key comparison of water triple point cells *Metrologia* 43 03001
- 73) 山澤一彰, 丹波純 2013 温度標準の現状 *Netsu Soku-tei* 40 158
- 74) <https://www.bipm.org/documents/20126/41483022/SI-Brochure-9-EN.pdf/2d2b50bf-f2b4-9661-f402-5f9d66e4b507>
- 75) 山田善郎 2014 《第 8 回》温度 (K) についての基礎解説と最新動向 *計測と制御* 53 758
- 76) 関英雄 1955 雑音の成因とその取扱い *電気学会雑誌* 75 1408
- 77) 山田隆宏 2016 ジョソソ雑音温度計のための集積型量子電圧雑音源 科学研究費助成事業 研究成果報告書
- 78) J F Qu, S P Benz, H Rogalla, W L Tew, D R White and K L Zhou 2019 Johnson noise thermometry *Meas. Sci. Technol.* 30 112001
- 79) S W Nam, S P Benz, P D Dresselhaus, W L Tew, D R White and J M Martinis 2003 Johnson noise thermometry measurements using a quantized voltage noise source for calibration *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 52 550
- 80) J Qu, S P Benz, K Coakley, H Rogalla, W L Tew, R White, K Zhou and Z Zhou 2017 An improved electronic determination of the Boltzmann constant by Johnson noise thermometry *Metrologia* 54 549
- 81) N E Flowers-Jacobs, A Pollarolo, K J Coakley, A E Fox, H Rogalla, W L Tew and S P Benz 2017 A Boltzmann constant determination based on Johnson noise thermometry *Metrologia* 54 730
- 82) M Maezawa, T Yamada and Chiharu Urano 2014 Integrated quantum voltage noise source for Johnson noise thermometry *J. Phys.: Conf. Ser.* 507 042023
- 83) K Yamazawa, C Urano, T Yamada, T Horie, S Yoshida, H Yamamori, N Kaneko, Y Fukuyama, M Maruyama, A Domae, J Tamba and S Kiryu 2014 Boltzmann Constant Measurements Using QVNS-Based Johnson Noise Thermometry at NMIJ, *AIST Int J Thermophys* 35 985
- 84) C Urano, K Yamazawa and N-H Kaneko 2017 Measurement of the Boltzmann constant by Johnson noise thermometry using a superconducting integrated circuit *Metrologia* 54 847
- 85) C Urano, K Yamazawa and N-H Kaneko 2020 Measurement of the Melting Point of Gallium Using a Johnson Noise Thermometer *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 69 3698
- 86) C A Donnelly, N E Flowers-Jacobs, J A Brevik, A E Fox, P D Dresselhaus, P F Hopkins and S P Benz 2020 1 GHz Waveform Synthesis With Josephson Junction Arrays *IEEE Trans. Appl. Supercon.* 30 1400111
- 87) P F Hopkins, J A Brevik, M Castellanos-Beltran, C A Donnelly, N E Flowers-Jacobs, A E Fox, D Olaya, P D Dresselhaus and S P Benz 2019 RF Waveform Synthesizers With Quantum-Based Voltage Accuracy for Communications *Metrology IEEE Trans. Appl. Supercon.* 29 1301105
- 88) 金子晋久 2009 “標準”はいま 量子力学的にオームの法則は成り立つか? 量子メトロロジートライアングル パリティ 24 50
- 89) L Devoille, N Feltn, B Steck, B Chenaud, S Sassine, S Djordevic, O Séron and F Piquemal 2012 Quantum metrological triangle experiment at LNE: measurements on a three-junction R-pump using a 20000:1 winding ratio cryogenic current comparator *Meas. Sci. Technol.* 23 124011