

## 量子電圧生成技術の現状と展望

小柳香穂\*

(2025年3月14日 受理)

## Review and prospects for quantum voltage generation technology

KOYANAGI Kaho

## Abstract

Regarding to quantum voltage generation technology based on the Josephson effect, the current state of the art and the latest research trends in the metrological fields for DC voltage and AC electrical quantities worldwide have been investigated and reviewed. This paper also reports on the researches into the applications of the quantum voltage generation technology in not only primary measurement standards but also a wide range of fields such as industry, science, quantum computing, and IoT sensors.

## 1 はじめに

現在我々の社会において「電気」は、家電やスマートフォンなど身の回りの製品から、自動車・電車など交通機関、インターネットや電話等通信のための基地局などインフラ整備にいたるまで、私たちの生活を支えるあらゆるもののエネルギー源や情報担体として利用されており、なくてはならないものである。これら電気を利用する機器の安全性や信頼性を担保するためには、精確な電気計測技術が重要であり、計測の基準となる“ものさし”の国家計量標準へのトレーサビリティが確保され、その正しさが保証されていることが求められる。

電気の物理量は大きく直流と交流とに分けられるが、我が国の直流の国家標準としては、ジョセフソン効果<sup>1)</sup>に基づく直流電圧標準と量子ホール効果<sup>2)</sup>に基づく直流抵抗標準という二つの量子標準が確立しており、産総研の計量標準総合センター(NMIJ)が維持・管理を行っている。一方、交流電圧に関する国家標準としては、熱電変換素子であるサーマルコンバータを用いた交直変換標準<sup>3)</sup>が用いられる。この方式は、幅広い周波数および電圧範囲において高精度な測定を実現する一方で、と

くに近年、振動計測などの分野で重要性が増す低周波領域での不確かさ増大や、特定の器物に依存しない普遍性の観点などにおいて課題があり、次世代の量子交流電圧標準の実現や、インピーダンスなど交流計測への量子標準の応用に向けた研究が世界各国で精力的に行われている。

また、産業や科学の発展に伴い、社会全体においても高精度な電気計測技術へのニーズは増しつづけている。そのため最近では、国家計量標準の高度化のみにとどまらず、汎用的な高安定電源への量子電圧生成技術の応用・拡大に大きな注目が集まっている。

本研究では、電気の物理量のうち電圧に焦点を当て、現行の直流電圧の国家標準で用いられる量子電圧生成技術に関して、その原理や応用、交流電気計測などへの広がりについて調査を行った。本稿では、まずジョセフソン効果を利用した量子電圧生成の原理や直流および交流電圧生成の方式について解説する。続いて、量子効果に基づいた直流電圧の一次標準の世界情勢や、量子交流電圧標準の各国における最新の研究動向について報告する。最後に、一次標準以外の幅広い分野に向けた量子電圧生成技術の応用や研究事例を紹介する。

---

\* 物理計測標準研究部門 量子電気標準研究グループ

## 2 量子電圧生成の原理

### 2.1 ジョセフソン効果を利用した量子電圧生成

ここでは、直流電圧標準に利用されている量子効果であるジョセフソン効果について説明する<sup>4),5)</sup>。

ジョセフソン効果<sup>1)</sup>は、2つの超伝導体の間に薄い絶縁体または常伝導金属を挟んだ構造(ジョセフソン接合)(図1)に生じる量子現象である。この現象は、超伝導体間でクーパー対と呼ばれる電子対がトンネル効果によって移動することにより発生する。この接合間を流れるトンネル電流は2つの超伝導体の位相差 $\phi$ に依存し、

$$I_s = I_c \sin \phi. \quad (1)$$

と表される。ここで、 $I_s$ は超伝導電流、 $I_c$ は臨界電流である。また、位相差は接合の電位差 $V$ に比例した速さで時間変化し、以下の関係を満たす。

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{2e}{\hbar} V. \quad (2)$$

ただし、 $e$ は電気素量、 $\hbar$ はディラック定数である。

(2)式の両辺を時間積分し、導出された $\phi$ を(1)式に代入すると

$$I_s = I_c \sin \left( \frac{2e}{\hbar} Vt + \phi_0 \right) = I_c \sin (2\pi f_0 t + \phi_0), \quad (3)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \frac{2e}{\hbar} V = \frac{2e}{h} V. \quad (4)$$

と表される。ただし、 $h$ はプランク定数である。(3)式は、ジョセフソン接合に電圧が発生している状況下においては、周波数 $f_0$ をもつ交流の超伝導電流が流れることを意味しており、これを交流ジョセフソン効果と呼ぶ。これに対して電圧が0の場合には、(2)式より $\phi$ は定数をとる。(1)式より接合には直流の超伝導電流が流れることになり、この場合は直流ジョセフソン効果と呼ばれる。

上記したジョセフソン接合に周波数 $f$ のマイクロ波を照射すると、交流ジョセフソン効果による超伝導電流の周波数 $f_0$ の値と近いときに共鳴が起こり、図2に示すような櫛状または階段状の定電圧ステップ(シャピロステップ<sup>6)</sup>と呼ばれる)が生じる。このとき、 $n$ 次の電圧ステップにおける電圧値 $V_n$ は以下の式で表され、 $f$ の整数倍に比例した値で量子化された値をとる。

$$V_n = \frac{h}{2e} n f = \frac{n f}{K_J} = \Phi_0 n f, \quad (5)$$

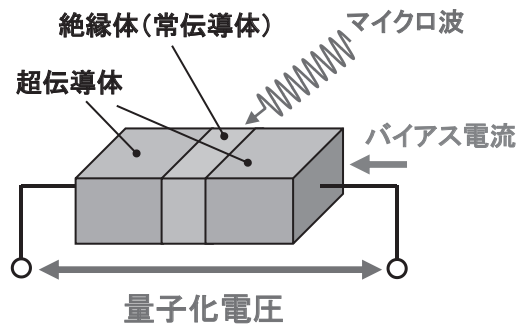


図1 ジョセフソン接合の模式図

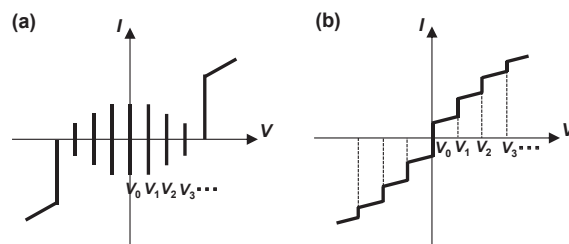


図2 ジョセフソン接合にマイクロ波を照射した場合の電流—電圧特性。(a)障壁層が絶縁体(アンダーダンプ型接合)の場合。(b)障壁層が常伝導金属(オーバーダンプ型接合)の場合。

$$K_J \equiv \frac{2e}{h}. \quad (6)$$

ただし、 $n$ は整数、 $\Phi_0$ は単一磁束量子(Single Flux Quantum: SFQ)、 $K_J$ はジョセフソン定数である。

ここで、 $K_J$ に関して、2019年5月20日より以前は、電圧標準の分野における実用上の協定値として

$$K_{J-90} \equiv 483\,597.9 \text{ GHz/V}. \quad (7)$$

という値が1990年より世界中で統一して用いられていた<sup>7)</sup>。この値は不確かさをもたないが、国際単位系(International System of Unit: SI)の定義から乖離していることが長年の課題となっていた。その後、電流の単位(アンペア)を含む4つの単位に関する定義改定が行われ、2019年の世界計量記念日5月20日から世界的に改定された定義が適用された。ここでSIの7つの基本単位のうち、改定後のSI定義では、基礎物理定数である電気素量およびプランク定数が不確かさのない定義値( $e \equiv 1.602\,176\,634 \times 10^{-19}$ ,  $h \equiv 6.626\,070\,15 \times 10^{-34}$ )として新たに定められ、従ってジョセフソン定数としては以下の値が用いられることになった。

$$K_I \approx 483\,597.848\,416\,984\text{ GHz/V.} \quad (8)$$

なお、(8) 式の小数点以下は本来無限の桁数を有するが、原則として多くの測定で丸め誤差が無視できる 15 桁の桁数を用いることが推奨されている<sup>8)</sup>。

このように、周波数  $f$  を精度よく定めれば、(5) 式に従う普遍的な電圧を生成可能であることから、直流電圧の分野では 1970 年代からジョセフソン効果が国家標準として利用されている。なお、周波数については 15 桁以上の高精度な標準が実現されており<sup>9)</sup>、産業界が必要とする十分な精度 (9 桁程度) で直流電圧の標準供給を行うことが可能である。

## 2.2 直流および交流電圧標準の方式

### 2.2.1 プログラマブル型ジョセフソン電圧標準 (PJVS) および ACPJVS)

まず、現在直流電圧標準として広く用いられているプログラマブル型ジョセフソン電圧標準 (Programmable Josephson Voltage Standard: PJVS) について説明する。この方式は、1995 年に Hamilton により提案され<sup>10)</sup>、ジョセフソン接合アレイを各接合数が  $2^0$  から  $2^{N-1}$  ( $N$ : セグメント数) のバイナリなセグメントに分割し (図 3)、セグメント毎のバイアス電流を独立に ON/OFF 制御することで、実効的な接合数 (式 (5) の  $n$  に相当) を変化させ任意電圧を出力可能とする。

またこの方式では、各セグメントの ON/OFF をリアルタイムで切り替えることにより交流波形も生成可能である。この方式による量子交流電圧生成技術は交流プログラマブル型ジョセフソン電圧標準 (ACPJVS) と呼ばれる。ACPJVS は、PJVS と同様の 10 V 程度の大きな電圧振幅を比較的容易に出力可能という特徴がある。現在までに 20 V の PJVS 素子が開発されており<sup>11), 12)</sup>、複数の素子を接続することでさらに大振幅の交流波形の出力も期待できる。

一方でこの方式では、バイアス電流の ON/OFF を切り替えるときに、量子化された電圧ステップから外れる瞬間が必ず存在するため、トランジェントエラーが生じるという課題が存在する (図 4)。このトランジェントエラーは、生成する波形の周波数が高くなるほど増加するため、数 kHz 程度以下の低周波領域での波形生成に適した方式であると言える。また、上記の課題を解決するために、トランジェントエラーが生じるタイミングを排除しながら、量子化された電圧のみを離散的に測定する“サンプリング測定”も考案されている<sup>13), 14)</sup>。この

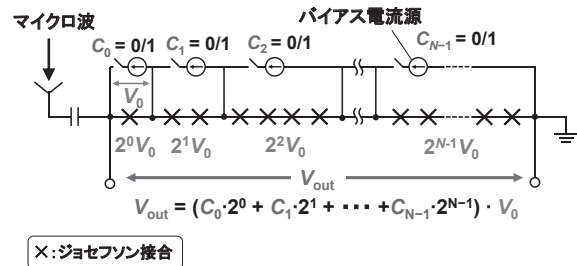


図 3 プログラマブル型ジョセフソン電圧標準の等価回路

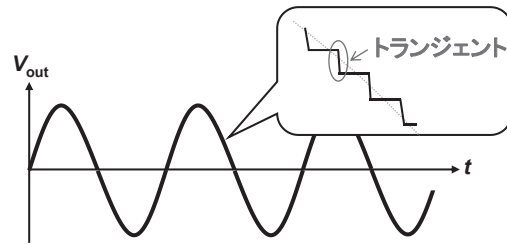


図 4 ACPJVS による生成波形に生じるトランジェントエラー

手法により、これまでに 1 kHz 程度までの周波数で 6 桁から 8 桁程度の高精度測定が報告されている<sup>14)-17)</sup>。また最近では、サブサンプリングの手法を導入することで、適用可能な周波数領域を 100 kHz まで拡張し、振幅 1 V の交流電圧測定において 3.5  $\mu$ V/V (包含係数  $k=1$ ) の不確かさを実現する技術なども報告されている<sup>18)</sup>。

### 2.2.2 パルス駆動型ジョセフソン電圧標準 (PD-JVS) または JAWS)

ジョセフソン接合に臨界電流を超える波高をもつ高速な電流パルスを印加すると、時間積分の値が SFQ に対応した量子化された電圧パルスが生成される。出力された電圧パルスローパスフィルタ (LPF) で平滑化すると、パルス間隔が密なときには大きな電圧値が得られ、逆に粗な時には小さな電圧値が得られる。この特性を生かし、従来用いられていたマイクロ波の代わりに高速な電流パルス印加し、そのパルス間隔を変調することで交流波形生成を行う方式が、1996 年に Benz らにより考案された<sup>19)</sup>。この方式は、パルス駆動型ジョセフソン電圧標準 (Pulse-Driven Josephson Voltage Standard: PD-JVS) またはジョセフソン任意波形発生器 (Josephson Arbitrary Waveform Synthesizer: JAWS) と呼ばれる。

本方式による交流波形生成のメカニズムについて説明する (図 5)。まず、入力する電流パルスの有無を“1”と“0”のデジタル信号に対応させ、生成したい波形に応じた粗密変調を施したビット列を生成する。なお、このビット

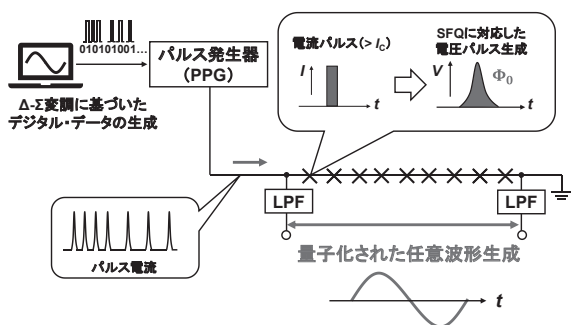


図5 パルス駆動型ジョセフソン電圧標準による交流電圧波形生成の原理

ト列の生成には  $\Delta$ - $\Sigma$  変調を用いる。  $\Delta$ - $\Sigma$  変調では、ノイズシェーピング効果により量子化ノイズを信号帯域よりも高周波側へ移動させることができる。このため、LPFによりこれらの高周波ノイズ成分を効果的に除去でき、スプリアスを含まない交流波形を得ることが可能となる。このようにして得られたビット列のデータをもとにパルスパターン発生器 (PPG) で電流パルス列へ変換し、これをジョセフソン接合アレイに入力することで量子化電圧パルスが生成される。この得られた電圧パルス列を LPF を介して時間積分 (平滑化) することで、任意の交流電圧波形を生成できる。

本方式による交流波形生成の原理は、式 (5) において  $f$  を変化させることに対応している。前節で述べた PJVS のようなセグメントの切り替えを行わないことから、原理的にトランジェントエラーを含んでおらず、歪みのない理想的な交流電圧波形を生成可能である。一方で、室温にある PPG から発生した高速パルス信号を、極低温下にあるジョセフソン接合アレイに入力する必要がある。パルス信号の減衰や分散のために駆動可能な接合数が制限されてしまう、すなわち大きな振幅を得ることが難しいという点が課題である。とはいえ、これまでの精力的な研究により、複数のアレイを結合するなどの工夫で、実効値 4 V 程度まで出力電圧を向上させた結果などが報告されている<sup>20)</sup>。

また、この方式では、MHz 程度までの比較的高い周波数の波形生成を可能とする一方で、低周波信号に対応したパルス列を生成する際には長いビット列が必要となることから、PPG のメモリ容量の限界によって、下限周波数が制限される。

### 2.2.3 単一磁束量子回路型ジョセフソン電圧標準 (RSFQ-JVS または SFQ-JVS)

最後に、超伝導デジタル集積回路である RSFQ (Rapid

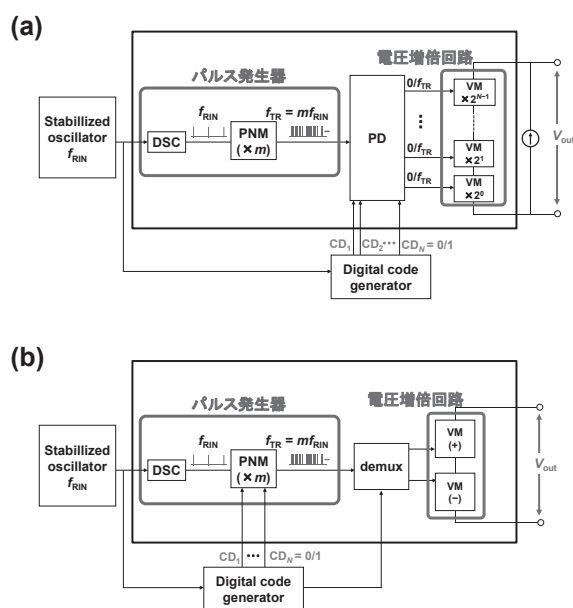


図6 単一磁束量子回路型ジョセフソン電圧標準の原理と構成。(a) 式 (5) の  $n$  を変化させる方法の場合。(b) 式 (5) の  $f$  を変化させる方法の場合。

Single Flux Quantum) 回路<sup>21)</sup>の技術を応用した方式について説明する。RSFQ 回路では、SFQ を情報担体とし、ジョセフソン接合を含む超伝導ループ内の SFQ の有無をデジタル信号の 1 と 0 に対応させて論理演算を行う。この RSFQ 回路を用いて、単位時間あたりに生成される SFQ パルスの数を制御することにより、任意の量子化電圧を生成可能である。この方式は、Hamilton (1992)<sup>22)</sup> や Semenov (1993)<sup>23)</sup> により考案され、単一磁束量子回路型ジョセフソン電圧標準 (RSFQ-JVS または SFQ-JVS) と呼ばれる。

本方式は大きく分けて、式 (5) の  $n$  を変化させる方法<sup>24)</sup> と、 $f$  を変化させる方法<sup>25)</sup> に分けられる。まず  $n$  を変化させる方法 (図 6(a)) では、外部から供給される参照マイクロ波信号 (周波数:  $f_{RIN}$ ) を dc/SFQ 変換器 (DSC) で SFQ パルスに変換し、パルス数増倍回路 (Pulse-Number Multiplier: PNM) で  $f_{TR} = m f_{RIN}$  ( $m$ : 整数) の SFQ パルストレインに変換する。多くの PNM は、参照信号に同期した 10 MHz から 100 MHz 程度の SFQ パルス列を、10 GHz から 100 GHz 程度に通倍でき、高速なパルス列を生成可能である。この SFQ パルストレインは、パルス分配器 (Pulse Distributor: PD) を通じて、バイナリ化されたセグメントをもつ電圧増倍回路 (Voltage Multiplier: VM) に供給される。このとき、各セグメントに供給される SFQ パルストレインを外部か

らのデジタル制御により ON/OFF することで、任意の電圧値を出力することができる。一方、 $f$  を変化させる方法（図 6(b)）では、PNM の倍率  $m$  をデジタル制御することにより変化させ、任意の電圧値を出力する。この方法は、前節で述べた JAWS で必要な PPG を、RSFQ 回路技術を利用して集積化した方式であると言える。

上記いずれの方法においても、2.2.1 節で述べた ACPJVS とは異なり、マイクロ波やバイアス電流のような時間的に連続した信号ではなく、離散的なパルス列を用いていることから、トランジェントエラーを含まない量子電圧波形を生成可能である。また、DSC および PNM といった、パルス発生回路や電圧を増倍する VM をオンチップ化したことにより、高価な PPG を不要としたのみならず、室温からの雑音・熱流入の低減や JAWS で課題となっていた配線におけるパルス減衰を回避できるといった利点も存在する。

これまでの研究では、周波数 46.9 kHz で最大振幅 2.54 mV の交流波形生成などが報告されている<sup>26)</sup>。より大きな振幅を得るためには、PD や VM などの回路集積度を高める必要があり、RSFQ 回路のより高度な集積化技術が待たれることから、1 V や 10 V などの比較的大きな電圧振幅を必要とする用途に対しては、すぐの実用化が困難な状況であることが課題である。

### 3 量子電圧標準の現状と研究動向

#### 3.1 各国における直流電圧標準

##### 3.1.1 日本における直流電圧標準

日本では 1977 年頃から、ジョセフソン効果を用いた直流電圧標準の使用を開始した<sup>27)</sup>。当初は出力可能な電圧値がわずか 10 mV 程度であったが、ジョセフソン接合アレイ素子の集積化が進み、現在では 10 V 以上の電圧値が得られるようになっている。また、(現在の PJVS システムと区別するため、) 初期の頃から利用されていたシステムは、コンベンショナル型ジョセフソン電圧標準 (CJVS) システムと呼ばれる。CJVS システムでは、図 2(a) に示したような多価関数の特性をもつアンダーダンプ型接合の素子が用いられており、電圧ステップの選択に確率的要素が伴うため、所望の電圧値を得るためには複数回の試行が必要であった<sup>4), 5)</sup>。電圧設定に時間がかかり、任意の電圧を瞬時に得ることが難しいことから、主に 1 V, 1.018 V, 10 V などの固定値のみの校正に利用が限定された。また、外来ノイズに弱いため、ジョセフソン素子の冷却には液体ヘリウムが用いられ

た。

このような機能的な自由度の低さや操作の複雑性、液体ヘリウム使用に伴う運用コストや継続性への不安を改善するため、産総研では、所内で連携しながら機械式冷凍機を用いた PJVS システムの開発を行い、2015 年から CJVS に代わって標準供給における運用を開始した<sup>28)</sup>。PJVS システムでは、バイアス電流の ON/OFF によりセグメント数を変化させることで、瞬時に任意の電圧を得ることができる。また、アンダーダンプ型接合に比べて広い動作マージンを有するオーバードンプ型接合（図 2(b)）の素子を用いているためノイズ耐性が向上し、液体ヘリウム不要な機械式冷凍機での動作を可能とする。NMIJ が保有する PJVS システムに対して、従来の CJVS システムとの間の直接的な比較測定が行われ、1 nV/V 以下の不確かさの範囲内で両者の同等性が確認された<sup>28)</sup>。

NMIJ が維持管理する現行の直流電圧の国家標準 (PJVS システム) を図 7 に示す。本システムは、10 K で動作可能な窒化ニオブ (NbN) 超伝導体を電極としたジョセフソン接合からなる PJVS 素子、素子を動作温度まで冷却するための GM (Gifford-McMahon) 冷凍機、素子に 14 GHz 前後のマイクロ波を印加するためのマイクロ波発振器、素子を駆動するためのバイアス電流回路、および量子化電圧と被校正器物の出力電圧との差電圧を検出するための高感度電圧計などから構成される。PJVS 素子は、全 24 チャンネルのバイナリなセグメントに分割された、合計 524 288 個のオーバードンプ型ジョセフソン接合からなる接合アレイを有しており、セグメントの切り替えにより、最小で約 4 mV から最大で 10 V



図 7 NMIJ が維持管理する現行の直流電圧標準システム (PJVS システム) の外観写真

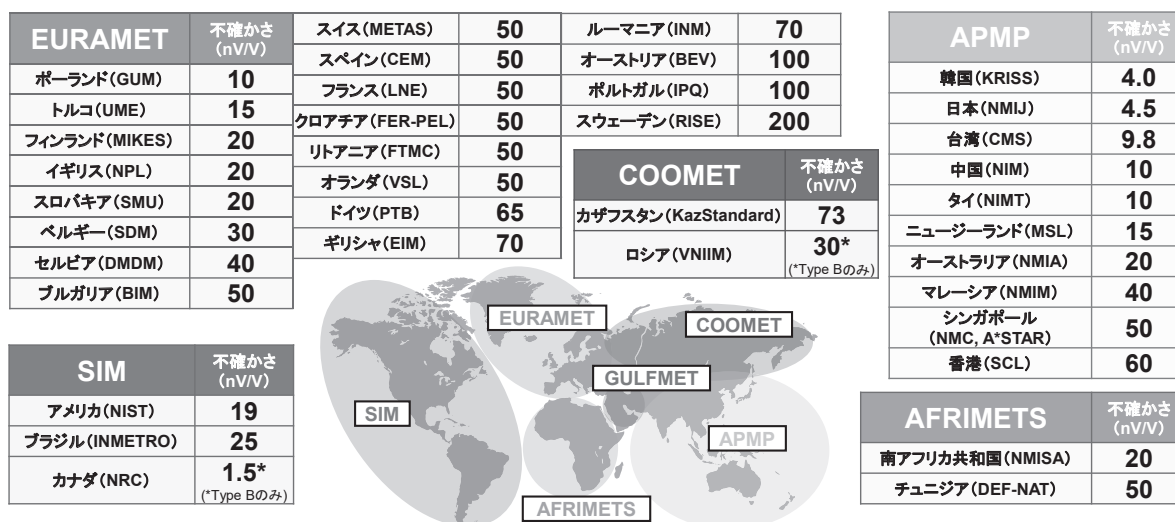


図 8 世界各国における量子標準に基づいた直流電圧標準供給の現状 (KCDB における CMC の登録状況)

程度以上までの任意電圧の発生を可能とする。このシステムを用いて、公称 1 V および 1.018 V に対しては拡張不確かさ 8 nV/V ( $k=2$ )、公称 10 V に対しては拡張不確かさ 4.5 nV/V ( $k=2$ ) での標準供給が可能である。

### 3.1.2 世界における CMC 登録状況

ジョセフソン効果に基づく直流電圧標準は、日本やアメリカ、欧州などで精力的な研究開発が行われてきた。近年では、幅広い国々の計量標準研究機関 (NMI) でジョセフソン電圧標準が採用されており、研究開発に着手する国も増えている。世界の現状を把握するため、国際度量衡局 (BIPM) が管理する基幹比較データベース (KCDB)<sup>29</sup> を用いて、校正測定能力 (Calibration and Measurement Capability: CMC) の登録状況について調査を行った。その結果を図 8 に示す。この調査では、上位標準としてジョセフソン電圧標準を用い、二次標準器として広く用いられるツェナー標準電圧発生器を校正対象として登録された CMC のみをピックアップし、その拡張不確かさを国および地域別に整理した。なお、ロシアとカナダについては、校正器物に依存する Type A 不確かさを除いた Type B 不確かさのみが登録されており、図 8 に掲載された数値も Type B 成分のみであることを注意されたい。

この調査結果では、GULFMET を除く地域の世界 37 か国でジョセフソン電圧標準が利用されていることが明らかになり、幅広い地域に量子電圧標準が普及していることが分かった。CMC 登録された拡張不確かさは、上記したロシアとカナダを除くと、最小で 4.0 nV/V

(KRISS)、最大で 200 nV/V (RISE) となっており、直流電圧の分野では量子標準を用いることで、7 桁から 9 桁の高い精度で産業界への標準供給が行われているといえる。

## 3.2 交流電圧標準への応用

### 3.2.1 現行の交流電圧標準と課題

3.1 節では、直流電圧の国家一次標準の現状について述べた。一方、交流電圧に関しては、熱電変換素子であるサーマルコンバータ (TVC) を用いた交直変換標準が広く用いられている。この方式では、基準となる直流電圧と、校正対象である交流電圧とを、交互に TVC へと入力し、それぞれの発熱量を比べることで、交流電圧の実効値を高い精度で校正することができる。

NMIJ が維持管理する交直変換標準においては、10 mV から 1000 V の電圧範囲および、1 Hz から 10 MHz の周波数範囲に対して、 $10^{-6}$  V/V の相対不確かさで標準供給可能である。幅広い電圧および周波数範囲を高精度に校正可能なこの方式は、産業界のニーズを満たすために欠かせないものである一方で、波形情報のない実効値のみの校正である点や、交直差と呼ばれる変換誤差が個々の TVC 素子に依存するうえ、とくに近年重要性の増す商用周波数以下の低周波領域で不確かさが急増する点などが課題となっている。

そのため近年では、これまで直流電圧標準としての利用に限られていたジョセフソン電圧標準を、交流電圧標準へと拡張した“量子交流電圧標準”の研究開発が世界

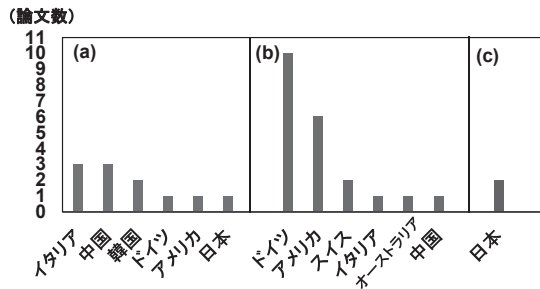


図9 過去5年間の(a) ACPJVS, (b) JAWS および (c) RSFQ-JVS に関する投稿論文数の国別比較

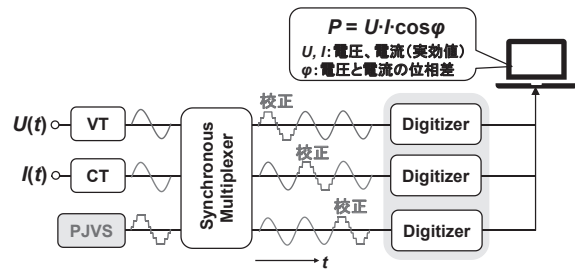


図10 ACPJVS を用いたサンプリング測定方式の量子電力標準システムの概念図<sup>31)</sup>

中で活発に行われており、その実現が期待されている。次節以降では、量子交流電圧標準に向けた各国の研究開発および応用の状況について調査した結果を、2.2 節で説明した各方式毎に述べる。

### 3.2.2 ACPJVS の現状と応用先

まず初めに ACPJVS の研究動向について述べる (図 9(a))。なお、図 9 には、過去 5 年間 (2020 年から 2024 年まで) の ACPJVS, JAWS および RSFQ-JVS に関する投稿論文数を調べ、国別に比較した結果を示している。この調査は、学術データベースである “Web of Science” を用いて行い、ACPJVS, JAWS および RSFQ-JVS に関する論文数をキーワード検索により調べた。具体的には、各方式に対して、“AC PJVS, AC programmable Josephson voltage standard”, “Josephson arbitrary waveform synthesizer, pulse driven Josephson voltage standard” および “SFQ AC voltage” というキーワードを用い、検索結果の中から計量標準に関する論文のみをピックアップしてカウントを行った。

図 9(a) に示した結果によると、ACPJVS に関する投稿論文数は全部で 11 本あり、欧米からアジアまで幅広い地域で研究が行われていることが伺える。また、各国が保有する ACPJVS の同等性を確認するために、国際比較の実現に向けた取り組みも始まっており、研究開発はすでに成熟段階に入っているといえる。この取り組みでは、約 10 年間にわたるパイロットスタディが行われ、BIPM の主導のもと日本を含めた 9 か国が参加した。現在プロトコルの作成や追加の技術的検証が進められており、早ければ数年以内にも比較測定が開始されるのではないかと見込まれている<sup>30)</sup>。

最近では、ACPJVS を様々な用途へと応用する取り組みが行われているが、ここでは一例として、イタリア国立計量研究所 (INRiM) から報告されているサンプリン

グ測定方式の量子電力標準に関する研究事例を紹介する<sup>31)</sup>。一般的には、デジタイザを用いて電圧と電流の二つの信号を交互にサンプリング測定し、それらの実効値および位相差を算出することで、電力を導出する手法が広く用いられている。一方、この研究では、図 10 に示すように、電圧と電流の信号経路に加え、ACPJVS からの出力信号をマルチプレクサを介して各デジタイザに分配することで、リアルタイムにデジタイザを校正しながら電力測定を行うことができる。また、上記校正が行われる際のダウンタイムを解消するため、追加の 1 台を含む合計 3 台のデジタイザを用いることで、時間軸上で休みなく電圧・電流の信号を 100 % 記録することを可能としている。このシステムを用いることにより、デジタイザの残留ゲインエラーを 0.2  $\mu\text{V/V}$  以下まで低減した。また、INRiM が保有する電力の一次標準との比較を行い、従来の拡張不確かさ 16  $\mu\text{W}/(\text{V A})$  以内での良好な一致と、10  $\mu\text{W}/(\text{V A})$  までの不確かさの低減が報告されている。

### 3.2.3 JAWS の現状と応用先

続いて、JAWS の各国の論文投稿件数を図 9(b) に示す。JAWS に関する論文は、過去 5 年間に 21 本投稿されており、これは ACPJVS と比較して 2 倍程度の本数である。この理由としては、JAWS が歪みのない理想的な量子交流波形を生成できることや、複数のアレイを用いるなどして出力電圧値の向上がなされてきたために、インピーダンス標準など様々な用途への応用研究が急速に拡大しているためであると推測される。

計量標準分野における JAWS の応用研究は、AC ボルトメーターや TVC の評価、電力標準など多岐に渡るが<sup>5)</sup>、ここでは、最近報告されたインピーダンス標準への応用例を紹介する。

まず背景として、現行のインピーダンス標準は、図 11 に示すようなブリッジ回路を用いて、ブリッジの

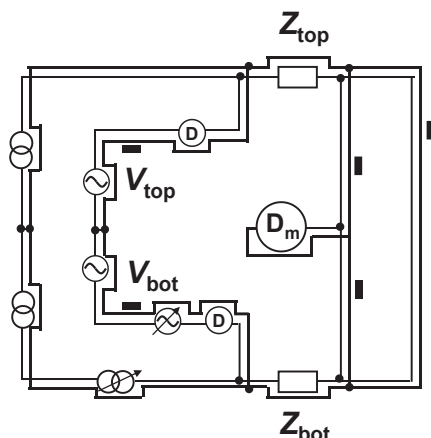


図 11 現行のインピーダンス標準で用いられる 4 端子対型インピーダンスブリッジの回路構成<sup>33)</sup>

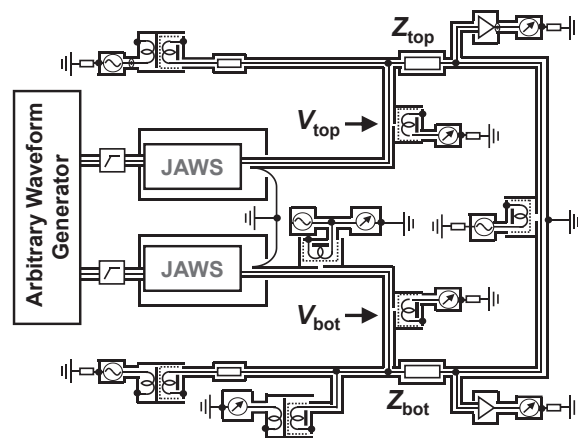


図 12 JAWS を利用したインピーダンスブリッジ (DJIB) の回路構成<sup>34)</sup>

電圧比で決まる平衡条件を満たすことで、上位標準である量子化ホール抵抗へのトレーサビリティを確保している<sup>32)</sup>。この電圧比は誘導分圧器の巻き数比により決定され、 $10^{-9}$  V/V レベルの不確かさでの極めて高精度な比較測定を実現する<sup>33)</sup>。しかしこの方式では、巻き数比で決まる電圧比が固定されてしまうため、電圧比選択の柔軟性の点で課題があった。また、評価対象となるインピーダンスには、交流抵抗 ( $R$ )、キャパシタンス ( $C$ )、インダクタンス ( $L$ ) という三つの物理量があるが、それらは互いに位相が異なるため、各物理量毎に最適化された特定のブリッジを用いて特定の周波数で測定を行う必要がある。そのため測定系が複雑化し、測定周波数も制限されるなどの課題があった。

これらの課題を改善する手法として、アメリカとスイスの共同研究により、電圧源を 2 つの JAWS に置き換えることで、誘導分圧器を介さない DJIB (Dual Josephson Impedance Bridge) が提案された<sup>34)</sup> (図 12)。この方式を用い、抵抗同士の比較 ( $R$ - $R$  比較) において、交直差を可計算な  $12.906 \text{ k}\Omega$  の標準抵抗器を使用して比が 1:1 の測定を行った結果、全ての周波数範囲で交直差の相対誤差が、拡張不確かさである  $0.2 \mu\Omega/\Omega$  以内で一致する良好な結果が確認された。また、抵抗とキャパシタンスの比較 ( $R$ - $C$  比較) においても、 $1233 \text{ Hz}$  の周波数で  $100 \text{ pF}$  のキャパシタンス標準器の校正を行い、従来のシステムで得られた結果と合成標準不確かさである  $0.06 \mu\text{F/F}$  ( $k=1$ ) の範囲内で良好な一致が確認された。 $1 \text{ nF}$  のキャパシタンス標準器の校正では、周波数特性が従来の手法で得られた特性と一致したうえ、測定周波

数範囲を  $80 \text{ kHz}$  と従来の 4 倍にまで拡張した。さらに、抵抗とインダクタンスの比較 ( $R$ - $L$  比較) においても従来のブリッジで得られた結果と周波数特性が良好に一致することが報告されている。

このように、DJIB を用いることによって、測定精度を損なうことなく 1 つのブリッジで様々な比較を、幅広い周波数で測定可能であることが実証・報告されている。とくに、従来の手法では 7 時間以上の測定時間を要する  $R$ - $C$  チェーンの実現がより簡略化され、測定時間が 2 時間未満に短縮される点は、測定効率化の観点から大きなメリットとして期待される。

### 3.2.3 RSFQ-JVS の現状と応用先

最後に、RSFQ-JVS の各国の研究動向について述べる。本方式に関する論文投稿件数は、図 9(c) に示したように、過去 5 年において日本からの 2 本のみであった。1992 年頃に米国国立標準技術研究所 (NIST)<sup>22)</sup> やニューヨーク州立大<sup>23)</sup> において提案および実証が行われた後、日本でも産総研の前身である電子技術総合研究所で 1998 年頃より研究開発が開始された<sup>35)</sup>。これまでに、 $36 \text{ mV}$  程度までの直流電圧生成<sup>24), 25)</sup>、および振幅約  $4 \text{ mV}$  程度までの正弦波波形の生成が報告されている<sup>26), 36)</sup>。2006 年頃まではドイツ国立物理工学研究所 (PTB) が AC 波形合成用のローカルメモリとしてのシフトレジスタの開発など<sup>37)</sup>、海外でも RSFQ-JVS の研究が行われていたが、2011 年の段階では既に日本のみとなっていた<sup>4)</sup>。

その後、SI 定義改定に必要なボルツマン定数の決定に向けたジョンソンノイズサーモメトリ (JNT) 実験において、正確な実効値をもつ疑似乱数発生器として

RSFQ-JVS が注目され、産総研においてシステム開発と JNT 測定への活用が行われた<sup>38)</sup>。さらに最近では、量子コンピュータの研究が世界で加速的に進んでいることに関連し、極低温環境下で動作する任意波形発生器としての応用が期待されるなど、量子ビット操作を低ノイズ・高精度に制御する手法としての応用展開が進められている。この詳細については、4.3 節で改めて述べる。

#### 4 量子電圧生成技術の国家標準以外への応用と発展

##### 4.1 リニアリティ測定

デジタルボルトメータ (DVM) は、様々な機器の検査や製品の品質管理、標準器などとして、産業界における精密電圧測定で広く使用されている。そのため、DVM の測定精度を維持・向上することは、電気計測におけるトレーサビリティ確保や、機器の信頼性担保、産業技術の発展などのために非常に重要である。

DVM の精度を保証するための校正および評価方法は、大きくゲイン測定とリニアリティ測定とに分けられ、前者は各測定レンジでフルスケールに近い両極性の 2 点 (または原点近傍を含めた 3 点) の電圧値を測定すれば評価可能である。一方、各測定レンジ内の非線形性を表すリニアリティ特性を評価するためには、理想的なゲイン直線からの微小な偏差を測定する必要がある。とくに市販の測定器の中で最高分解能を誇る 8.5 桁の DVM のリニアリティ特性の詳細な評価においては、既存の信号源では精度が足りず、ジョセフソン電圧標準を利用した評価が行われている<sup>39)</sup>。

DVM のリニアリティ測定では、A/D コンバータの線形性をチェックするため、複数の測定点において、理想直線 (通常は正負のフルスケール間、あるいは原点とフルスケールとの間を結んだ直線) との差を求め評価を行う。そのため、レンジ内で複数点の測定が必要であることから、1 点の測定に長い時間を要する従来の CJVS システムでは、測定効率がよくないうえに、環境条件の変動や A/D コンバータの内部基準源の非線形ドリフトの影響が不確かさの限界要因となっていた。そこで、任意の電圧を瞬時に出力できる PJVS システムの登場により、リニアリティ測定の高速度と高精度化が実現された。

PJVS を用いたリニアリティ測定は数十年前から研究されており<sup>40), 41)</sup>、産総研では、10 V レンジと 1 V レンジのリニアリティ特性を拡張不確かさ  $0.1 \mu\text{V/V}$  ( $k=2$ ) 以内の高い精度で評価できることを実証した<sup>42)</sup>。また、欧州原子核研究機構 (CERN) では大型ハドロン衝突型加速器の高精度化を目的に、粒子加速器のマグネット電

流を測定するための新しいデジタイザの評価を、PTB が開発した PJVS システムを用いて行った。その結果、10 V レンジのリニアリティ測定において、拡張不確かさ  $0.04 \mu\text{V/V}$  ( $k=3$ ) での評価を実現し、 $0.1 \mu\text{V}$  レベルのデジタイザ固有の特性を明らかにしたことなどが報告されている<sup>43)</sup>。

##### 4.2 高安定電圧源

イオントラップ法の一つであるペニングトラップは、電場と磁場により荷電粒子を局所的に閉じ込める技術として、質量分析器や量子コンピュータなどで利用されている。この手法では、イオンの質量に反比例するサイクロトロン振動数から、トラップされたイオンの質量を決定する。そのため、イオンの検出精度向上には、トラップするための電磁場の安定性が重要となる。静磁場の生成に関しては、現行の技術でもすでに数時間にわたって 11 桁の相対精度での安定度が得られているため<sup>44)</sup>、特に静電場の安定性が今後の検出精度向上の鍵を握っている。

静電場の生成には通常、半導体のツェナーダイオードをベースにした定電圧源が用いられているが、その相対電圧安定度の限界 ( $2 \times 10^{-8}$  V/V 程度) のために<sup>45)</sup>、サイクロトロン周波数の測定精度は 11 桁に制限されていた。更なる精度で質量比を決定するためには、静電場の安定性、すなわち定電圧源の安定性の改善が必要不可欠である。

この問題を解決するため、ドイツの Kaiser らのグループは、20 V 出力可能な PJVS システムを、これまでになく高安定な電圧源として採用した<sup>46)</sup>。ツェナーベースの従来の電圧源と比較して、PJVS ベースの電圧源は 9 倍安定であることが確認されている。その結果、トラップさせた  ${}^9\text{Be}^{3+}$  イオン (軸方向固有周波数:  $\nu_z = 795 \text{ kHz}$ ) の軸方向固有周波数測定における相対不確かさが、従来の電圧源では  $(17.6 \pm 1.5) \times 10^{-9} \text{ Hz/Hz}$  であったのに対し、 $(9.7 \pm 0.8) \times 10^{-9} \text{ Hz/Hz}$  に改善されたと報告されている。

サイクロトロン振動数は、軸方向固有周波数、トラップサイクロトロン周波数、マグネトロン周波数の 3 つの独立した周波数により決定されるが、後者のトラップサイクロトロン周波数とマグネトロン周波数は磁場と同程度の相対精度で検出可能であったのに対し、電源電圧安定性と直接関係する軸方向固有周波数の相対精度がサイクロトロン振動数の精度を制限していた。そのため PJVS を高安定電圧源として用いることで、軸方向固有周波数の相対精度が向上したことから、前例のない

10<sup>-12</sup> kg/kg レベルの相対不確かさでの質量比測定が実現可能であることが示唆されている。また、電圧範囲を拡張することにより、検出可能なイオンの種類を増やすことが可能であることから、出力電圧を 80 V まで拡大した PJVS システムの開発も行われている<sup>47)</sup>。

### 4.3 高周波信号源

量子コンピュータは、古典コンピュータでは解決できない複雑な問題を高速に解決する可能性を有していることから、研究開発が精力的に進められている。量子コンピュータには様々な量子ビットの制御方式が提案されているが、その中でも超伝導量子ビットを用いた量子コンピュータは、量子ビットの高い制御性と高い集積性から、現在最も主流な方式として研究が行われている<sup>48)</sup>。

超伝導量子コンピュータの大規模化に向けた重要な課題の一つが、外部から侵入する熱雑音の抑制である<sup>49)</sup>。従来の制御方法では、図 13(a) に示すように、希釈冷凍機内の極低温環境下の量子ビット一つ一つに対して、室温に置かれた信号源で生成したマイクロ波信号を、各ケーブルを介して照射する。しかし、量子ビット数に比例して、室温と極低温間のケーブル数が増加することから、熱流入や必要なスペースが増加してしまい、冷凍機

内に実装できるケーブル数には上限が生じる。その結果、最大量子ビット数は 10<sup>3</sup> 個程度に制限されるという課題があった。

そこで近年、制御回路を冷凍機内に実装する制御方法(図 13(b) および 13(c)) が提案されている。これらの方法では、室温からのケーブル数を大幅に削減し、熱やノイズの流入を抑制できるため、量子ビットの高集積化が可能になると期待される。なお、これらの方式を実現するためには、冷凍機内の極低温環境下で動作する制御回路が必要となるが、その候補として JAWS や SFQ 回路が注目されており、それらの応用研究が盛んに行われるようになった。以下では、それらの研究事例や各方式の特徴について紹介する。

量子計算で必要とされる多数の量子ゲートを実装し動作させるためには、各ビットに照射するマイクロ波の振幅や位相を適切に制御する必要がある。まず、SFQ 回路を用いたマイクロ波パルス生成器(図 14(a))<sup>50)</sup> の利点としては、SFQ-SW (SFQ Switch) および MFQ (Multi Flux Quantum) ドライバにより SFQ パルス列の長さ・個数を調節できるため、量子ビットに照射するマイクロ波パルスの振幅を広い範囲で制御することができることにある。

次に、JAWS を用いたパルス生成器(図 14(b))<sup>51)</sup> は、外部から入力したマイクロ波パルスを、ジョセフソンアレイの接合数に比例した振幅の大きいパルス列に変換できることが利点である。そのため、冷凍機内の 3 K ステージと 10 mK ステージ間に設置される減衰器を介した場合でも、量子ビットに対して十分な信号振幅で制御を行うことが可能である。

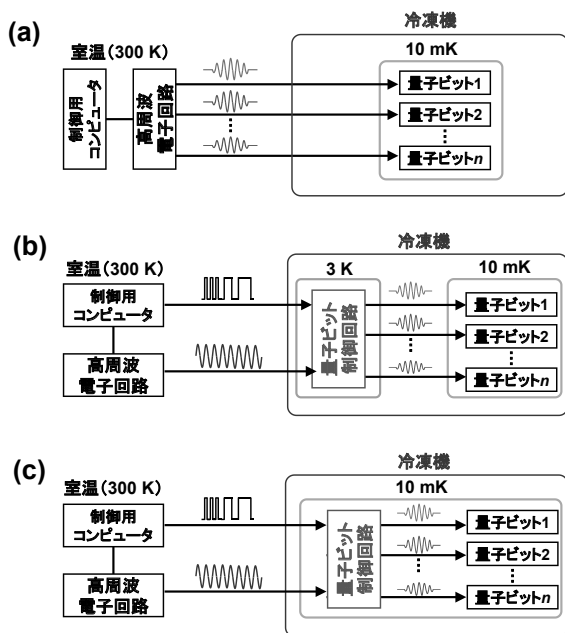


図 13 量子ビット制御方法の比較<sup>49)</sup> ((a) 従来方式, (b) 制御回路を希釈冷凍機の 3 K ステージに実装する方式, (c) 制御回路を希釈冷凍機の 10 mK ステージに実装する方式)

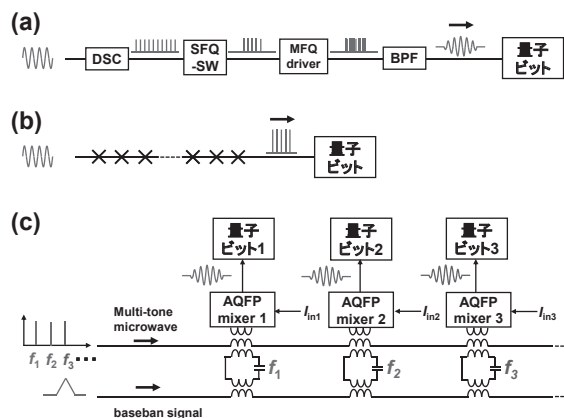


図 14 (a) SFQ 回路, (b) JAWS, および (c) AQFP を用いた量子ビット制御用パルス発生器の基本構成<sup>49), 50), 51), 53)</sup>

表1 各制御方法における1ビット操作あたりの消費電力および最大ビット数の比較<sup>49), 50), 51), 53)</sup>

	従来	SFQ	JAWS	AQFP
消費電力	-	51.7 $\mu$ W/qubit	1.6 $\mu$ W/qubit	81.8 pW/qubit
最大ビット数	$\sim 10^3$	$1.9 \times 10^4$	$5.0 \times 10^5$	$1.2 \times 10^5$

上記した二つの方法では、SFQの発生・制御に伴う消費電力および発熱（基本的には $I_c\Phi_0$ で決定される）が避けられない<sup>52)</sup>。1ビット操作あたりの消費電力を見積もると、表1に示すように、数十から数 $\mu$ Wレベルに達することから、比較的冷凍能力に余裕のある3Kステージ（冷凍能力： $\sim 1$  W）に実装することが想定される（図13(b)）。この場合、3Kステージと10mKステージ間に配置されるケーブルの本数が、最大ビット数を制約する要因のひとつとなる。

一方で、横浜国立大学や産総研では近年、エネルギー効率により優れた断熱磁束量子パラメトロン回路（Adiabatic Quantum-Flux-Parametron：AQFP）回路を用いた量子ビット制御回路（図14(c)）の提案と研究開発が行われている<sup>53)</sup>。この方式では、SFQの発生・制御に際して、断熱的に状態を変化させることができるため、上記した $I_c\Phi_0$ よりも小さい消費電力での動作が可能である。その結果、1ビット操作あたりの消費電力は数十pWオーダー（表1）と極めて小さく、量子ビットに隣接した10mKステージ（冷凍能力： $\sim 180$   $\mu$ W）上への実装を可能とする（図13(c)）。さらに、マイクロ波多重化技術を用いることで、室温と10mKステージ間のケーブル数を抜本的に削減し、高いスケーラビリティが得られるといった利点も存在する。

これらの技術はいずれも、表1に示すように、従来の制御方法と比較して10から100倍程度集積度を向上できる可能性を有していることから、量子コンピュータの大規模化を後押しする重要技術としての貢献が期待される。

#### 4.4 微小電圧校正

遠隔・自動制御の高度化や医療・インフラ整備、少子高齢化に伴う社会問題解決などのため、近年ありとあらゆるモノとインターネットを結び付ける“IoT”技術の活用が注目されている。IoTネットワークでは、様々な情報をリアルタイムに収集するために多くのセンサが用いられるが、現状ではそれら全てが必ずしも高い信頼性を有しているとは限らない。センサの信頼性が低いと、そこから収集される情報の信頼性も低下し、とくに高度な制御を必要とする用途や、社会全体に影響を与えるビッ



図15 微小電圧レンジのトレーサビリティを確保する二次標準器として開発された小型プログラマブル型ジョセフソン電圧標準（タワー型PJVS）装置のプロトタイプ

グデータ、人命に関わる安全管理や医療などにおいては、致命的なリスクが生じる恐れがある。したがって、センサによる測定値の信頼性を確保することは喫緊の課題となっている。

このような状況のもと、大阪大学と神戸大学、産総研のグループは、IoTネットワーク向けセンサのトレーサビリティ構築を目的とした共同プロジェクトを開始した<sup>54)</sup>。センサには多種多様なものが存在し、それぞれ温度や圧力など様々な物理量の検出に特化されているが、それらの多くでは検出結果が、最終的には電気信号に変換されて出力される。そこで、上記のプロジェクトでは電気的物理量、なかでも電圧に焦点をあて、センサがカバーする（例えば1mV程度以下の）微小電圧レンジにおける校正スキームの確立を目指している。しかしながら、現行の国家標準システムでは、4mV程度以上の直流電圧校正にしか対応できておらず、産業界で用いられる高安定な二次標準器も10Vから100mVの範囲の電圧値しか出力できないため、それより小さな微小電圧レベルに拡張する際には、校正の不確かさが増大してしまうという課題があった。

そこで産総研では、このような微小電圧レンジに対応した二次標準器として、従来の1/100以下となる約30 $\mu$ Vの分解能をもつ小型プログラマブル型ジョセフソン電圧標準（通称、タワー型PJVS）装置（図15）の開発が行われた。この装置は家庭用電源のみで手軽に稼働できるにも関わらず、現行の直流電圧の国家標準と同等レベルの測定精度が実証されており<sup>55)</sup>、原理的に経年変化のない高安定二次標準器としての活用が期待される。量子現象を用いた高精度測定器を小型かつ簡便に利

用できることから、限られた研究機関に留まらず、広く一般企業や病院などへの普及を目指している。

#### 4.5 量子交流電圧波形の新しい生成方式

前節では、微小レンジの直流電圧に関するセンサのトレーサビリティ構築を目指した取り組みについて述べた。しかし、センサによる測定量は一般に直流だけでなく、交流信号の場合もあり、微小電圧レンジの交流電圧標準の技術確立も求められる。このようなニーズに対応するため、従来にはない新しい原理（PJVS 素子に照射するマイクロ波の周波数変調）による微小量子交流電圧波形の生成手法が産総研により提案された<sup>56)</sup>。

以下では、この手法による量子交流波形生成の原理について説明する（図 16）。ジョセフソン素子にマイクロ波を照射すると、(5)式に従って周波数に比例した電圧が出力される。このとき、照射するマイクロ波の周波数に FM 変調をかけて時間的に変化させると、周波数の増減に応じて出力電圧も時間変化する。すなわち、交流波形を得ることができる。しかしそれだけだと、出力波形に直流成分が残るため、純粋な交流電圧とは言えない。そこで本方式では、直列接続された 2 本のジョセフソンアレイ A、B に対し、A には特性周波数近傍の基本波を FM 変調したマイクロ波信号を、B には基本波に周波数が固定されたマイクロ波信号を入力し、AB 間の差電圧を出力することでオフセット成分を含まない真の量子交流電圧波形を生成可能とする。

ただし、このままだと生成された波形は使用したマイクロ波発振器の FM 変調特性に依存して歪んでいる可能性があるため、次に述べる理論波形の再生により出力波形を校正する。図 16 に示すように、マイクロ波発振器からそれぞれのジョセフソンアレイに入力される 2 つのマイクロ波信号を途中で分岐し、ミキサー回路で混合することにより、2 つのマイクロ波の差周波数をもつ信号を生成する。この信号をパルスカウンターに入力するこ

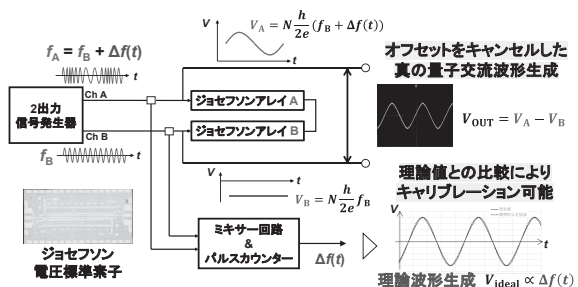


図 16 新たに提案された周波数変調方式による量子交流電圧生成の原理

表 2 量子交流電圧生成の各手法における利点と欠点の比較

手法	メリット	デメリット
ACPJVS	<ul style="list-style-type: none"> <li>高コストな PPG が不要</li> <li>技術的に確立</li> <li>大振幅 (~10 V)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ ステップ近似された階段状の波形</li> <li>✓ トランジエントエラーによる精度の限界</li> </ul>
JAWS	<ul style="list-style-type: none"> <li>歪みのない量子波形</li> <li>高精度</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 高価な PPG が必要</li> <li>✓ パルス減衰による接合数の限界</li> </ul>
SFQ-JVS	<ul style="list-style-type: none"> <li>高コストな PPG が不要</li> <li>トランジエントエラー回避</li> <li>高精度</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ RSFQ 回路の高度な集積技術が必要</li> </ul>
周波数変調法	<ul style="list-style-type: none"> <li>高コストな PPG が不要</li> <li>歪みのない量子波形</li> <li>高精度、小型システム</li> <li>微小振幅にも対応</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 信号振幅が周波数変調幅で制限</li> <li>✓ (新方式のため実証と検証が必要)</li> </ul>

とにより、変調周波数を時刻毎に計算し、理論波形を再生することができる。この再生波形を実験的に得られた交流電圧波形と比較分析することで、生成された量子交流波形の波形および振幅精度を担保することが原理的に可能である。なお、この手法は特許出願され<sup>57)</sup>、これまでに実効値で 1 mV 程度の振幅の波形生成も実証されているが<sup>56)</sup>、理論波形の高精度な再生を実証することや、生成波形の精度検証が今後の課題である。

最後に、上記した周波数変調方式と、ACPJVS や JAWS, RSFQ-JVS など従来の量子交流電圧波形生成技術との比較を表 2 に示す。周波数変調方式では、従来の欠点であったトランジエントエラーや高コストなパルス発生器の必要性などを回避でき、量子化歪みのない交流波形を生成できる手法であることから、とくに微小電圧レンジに対応した量子交流電圧標準の新しい方式として期待される。

## 5 まとめ

本研究では、国家計量標準としての利用にとどまらず、様々な分野への応用展開と活用が進む、ジョセフソン効果に基づいた量子電圧生成技術の現状と展望について調査を行った。

本稿ではまず、ジョセフソン効果を利用した量子電圧生成の原理や、直流および交流電圧生成の方式について解説した。次に、世界各国における直流電圧標準の現状や、交流電圧標準の研究開発動向について述べた。最後に、一次標準以外の幅広い分野に向けた量子電圧生成技術の応用研究事例や、新たに提案された波形生成原理などを紹介した。

量子直流電圧標準は既に世界中で普及している現状にある。一方、量子交流電圧標準の現状として、ACPJVS は国際比較に向けた取り組みが開始されるなど研究開発が成熟段階にきている。JAWS はインピーダンス標準な

どへの応用が注目されており、近年急速に研究が加速している。また、超伝導集積回路技術のさらなる進展が待たれる RSFQ-JVS は、過去5年間の論文数が日本からの2件のみと下火になってはいるが、近年の世界的な量子コンピュータ研究の進展に伴い、量子ビット制御回路としての応用展開が新たに開拓されるなど、再び注目度が上がりつつある。

国家標準以外の分野への量子電圧生成技術の応用例として、PJVS はリニアリティ測定やペニングトラップ質量分析器の高安定電圧源に利用され、JAWS や SFQ-JVS は超伝導量子コンピュータの制御器の研究・開発に使われており、幅広い分野への普及が期待される。また、IoT センサネットワークや生体計測のニーズに対応した微小電圧レンジの高安定二次標準器として、タワー型 PJVS 装置の開発も行われている。家庭用電源のみで稼働可能な可搬型システムであるにもかかわらず、直流電圧生成の精度は国家標準と同等レベルであることが実証されている。今後は、直流だけでなく交流電圧生成への適用も望まれることから、従来技術の欠点を回避するために新たに提案された周波数変調法式の技術確立も重要な研究課題であるといえる。

## 謝辞

本調査研究を行うにあたり、多くの方に有益なご助言・ご議論をいただきました。物理計測標準研究部門 金子晋久首席研究員、物理計測標準研究部門量子電気標準研究グループ 丸山道隆グループ長、並びに大江武彦主任研究員、岡崎雄馬主任研究員、山森弘毅主任研究員、松丸大樹研究員、応用電気標準研究グループ 坂本憲彦グループ長、量子・AI 融合技術ビジネス開発グローバル研究センター 量子センサー研究チーム 天谷康孝チーム長に心より感謝申し上げます。

## 参考文献

- 1) B. D. Josephson, "Possible New Effect in Superconducting Tunneling," *Phys. Lett.*, vol. 1, pp. 251-253, 1962.
- 2) K. V. Klitzing, G. Dorda, and M. Pepper, "New Method for High-Accuracy Determination of the Fine-Structure Constant Based on Quantized Hall Resistance," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 45, no. 6, pp. 494-497, 1980.
- 3) 天谷康孝, "交流電圧標準の現状," 産総研計量標準報告, vol. 8, no. 2, pp. 245-261, 2011.
- 4) 丸山道隆, "ジョセフソン電圧標準の現状," 産総研計量標準報告, vol. 8, no. 2, pp. 263-278, 2011.
- 5) 松丸大樹, "量子交流電圧標準の応用," 産総研計量標準報告, vol. 10, no. 3, pp. 531-547, 2020.
- 6) S. Shapiro, "Josephson Currents in Superconducting Tunneling: The Effect of Microwaves and Other Observations," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 11, no. 2, pp. 80-82, 1963.
- 7) 遠藤忠, "新しい電気の量子標準," 応用物理, vol. 59, no. 6, pp. 712-724, 1990.
- 8) <https://www.bipm.org/en/publications/mises-en-pratique>
- 9) 今江理人, "日本における国家計量標準とその供給体制: 時間 周波数標準," 計測と制御, vol. 48, no. 4, pp. 321-325, 2009.
- 10) C. A. Hamilton, "Josephson D/A Converter with Fundamental Accuracy," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 44, no. 2, pp. 223-225, 1995.
- 11) H. Yamamori, T. Yamada, H. Sasaki, and A. Shoji, "A 10 V programmable Josephson voltage standard circuit with a maximum output voltage of 20 V," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 21, no. 10, p. 105007, 2008.
- 12) F. Müller, T. Scheller, R. Wendisch, R. Behr, O. Kieler, L. Palafox, and J. Kohlmann, "NbSi Barrier Junctions Tuned for Metrological Applications up to 70 GHz: 20 V Arrays for Programmable Josephson Voltage Standards," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 23, no. 3, pp. 1101005-1101005, 2013.
- 13) W. G. KurtenIhlenfeld, E. Mohns, E. Mohns, R. Behr, J. Williams, P. Patel, G. Ramm, and H. Bachmair, "Characterization of a High-Resolution Analog-to-Digital Converter With a Josephson AC Voltage Source," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 54, no. 2, pp. 649-652, 2005.
- 14) R. Behr, L. Palafox, G. Ramm, H. Moser, and J. Melcher, "Direct Comparison of Josephson Waveforms Using an AC Quantum Voltmeter," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 56, no. 2, pp. 235-238, 2007.
- 15) A. Rüfenacht, C. J. Burroughs, and S. P. Benz, "Precision sampling measurements using ac programmable Josephson voltage standards," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 79, no. 4, p. 044704, 2008.
- 16) Y. Amagai, M. Maruyama, and H. Fujiki, "Low-Frequency Characterization in Thermal Converters Using AC-Programmable Josephson Voltage Standard System," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 62, no. 6, pp. 1621-1626, 2013.

- 17) S.-F. Chen, Y. Amagai, M. Maruyama, and N. Kaneko, "Uncertainty Evaluation of a 10 V RMS Sampling Measurement System Using the AC Programmable Josephson Voltage Standard," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 64, no. 12, pp. 3308-3314, 2015.
- 18) R. Behr and L. Palafox, "An AC quantum voltmeter for frequencies up to 100 kHz using sub-sampling," *Metrologia*, vol. 58, no. 2, p. 025010, 2021.
- 19) S. P. Benz and C. A. Hamilton, "A pulse-driven programmable Josephson voltage standard," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 68, no. 22, pp. 3171-3173, 1996.
- 20) N. E. Flowers-Jacobs, A. Rüfenacht, A. E. Fox, S. B. Waltman, R. E. Schwall, J. A. Brevik, P. D. Dresselhaus, and S. P. Benz, "Development and Applications of a Four-Volt Josephson Arbitrary Waveform Synthesizer," *Proc. 2019 IEEE International Superconductive Electronics Conference (ISEC)*, pp. 1-2, 2019.
- 21) K. K. Likharev and V. K. Semenov, "RSFQ logic/memory family: a new Josephson-junction technology for sub-terahertz-clock-frequency digital systems," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 1, no. 1, pp. 3-28, 1991.
- 22) C. A. Hamilton, "Josephson voltage standard based on single-flux-quantum voltage multipliers," *IEEE Trans. Applied Supercond.*, vol. 2, no. 3, pp. 139-142, 1992.
- 23) V. K. Semenov, "Digital to analog conversion based on processing of the SFQ pulses," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 3, no. 1, pp. 2637-2640, 1993.
- 24) M. Maezawa, F. Hirayama, and M. Suzuki, "Rapid single flux quantum digital-to-analog converter for ac voltage standard," *Phys. C*, vol. 426-431, pp. 1674-1679, 2005.
- 25) F. Hirayama, M. Maezawa, and M. Suzuki, "One-bit digital-to-analog converter based on rapid single flux quantum circuit," *Phys. C*, vol. 463-465, pp. 1084-1087, 2007.
- 26) Y. Mizugaki, Y. Takahashi, H. Shimada, and M. Maezawa, "Design and Operation of a 9-bit Single-flux-quantum Pulse-frequency Modulation Digital-to-analog Converter," *Phys. Procedia*, vol. 65, pp. 209-212, 2015.
- 27) 遠藤忠, "我が国の電圧標準の変更とその意義," *電気学会雑誌*, vol. 97, no. 6, pp. 37-38, 1977.
- 28) M. Maruyama, A. Iwasa, H. Yamamori, S.-F. Chen, C. Urano, and N. Kaneko, "Calibration System for Zener Voltage Standards Using a 10 V Programmable Josephson Voltage Standard at NMIJ," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 64, no. 6, pp. 1606-1612, 2015.
- 29) <https://www.bipm.org/kcdb/>
- 30) S. Solve, M.-S. Kim, R. Behr, L. Palafox, I. Budovsky, and A. Rüfenacht, "Progress of the BIPM Pilot Studies on Differential Measurements of an ac Source with Programmable Josephson Voltage Standards," *Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2024) Digest*, pp. 1-2, 2024. (10.1109/CPEM61406.2024.10646091)
- 31) B. Trinchera, P. Durandetto, and D. Serazio, "Quantum sampling AC standard for electrical power metrology based on programmable Josephson junction series array," *Measurement*, vol. 233, p. 114747, 2024.
- 32) 坂本憲彦, "キャパシタンス標準の現状と課題," *産総研計量標準報告*, vol. 4, no. 3, pp. 175-187, 2006.
- 33) <https://unit.aist.go.jp/ripm/aelec-std/calibration.html>
- 34) F. Overney, N. E. Flowers-Jacobs, B. Jeanneret, A. Rüfenacht, A. E. Fox, P. D. Dresselhaus, and S. P. Benz, "Dual Josephson impedance bridge: towards a universal bridge for impedance metrology," *Metrologia*, vol. 57, no. 6, p. 065014, 2020.
- 35) H. Sasaki, S. Kiryu, F. Hirayama, T. Kikuchi, M. Maezawa, and A. Shoji, "RSFQ-based D/A converter for AC voltage standard," *IEEE Trans. Applied Supercond.*, vol. 9, no. 2, pp. 3561-3564, 1999.
- 36) 前沢正明, 平山文紀, 鈴木基史, "単一磁束量子回路を用いた高精度デジタルアナログ変換器," *2004 電子情報通信学会総合大会予稿集*, S16-S17, 2004.
- 37) M. I. Khabipov, D. Hagedorn, F.-Im Buchholz, J. Kohlmann, F. Maibaum, M. Schilling, and J. Niemeyer, "Development of RSFQ voltage drivers for arbitrary AC waveform synthesizers," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 43, pp. 1175-1178, 2006.
- 38) C. Urano, K. Yamazawa, and N.-H. Kaneko, "Measurement of the Boltzmann constant by Johnson noise thermometry using a superconducting integrated circuit," *Metrologia*, vol. 54, no. 6, pp. 847-855, 2017.
- 39) H. E. Van Den Brom, E. Houtzager, G. Rietveld, R. Van Bemmelen, and O. Chevtchenko, "Voltage linearity measurements using a binary Josephson system," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 18, no. 11, pp. 3316-3320, 2007.
- 40) F. Overney, A. Rüfenacht, J.-P. Braun, B. Jeanneret, and P. S. Wright, "Characterization of Metrological Grade Analog-to-Digital Converters Using a Programmable Josephson Voltage Standard," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 60, no. 7, pp. 2172-2177, 2011.

- 41) W. G. KurtenIhlenfeld, E. Mohns, E. Mohns, R. Behr, J. Williams, P. Patel, G. Ramm, and H. Bachmair, "Characterization of a High-Resolution Analog-to-Digital Converter with an Ac Josephson Voltage Source," *Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM2004) Digest*, pp. 662-663, 2004.
- 42) M. Maruyama, H. Takahashi, K. Katayama, T. Yonezawa, T. Kanai, A. Iwasa, C. Urano, S. Kiryu, and N.-H. Kaneko, "Evaluation of Linearity Characteristics in Digital Voltmeters Using a PJVS System With a 10-K Cooler," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 64, no. 6, pp. 1613-1619, 2015.
- 43) N. Beev, M. C. Bastos, M. Martino, D. Valuch, L. Palafox, and R. Behr, "Design and Metrological Characterization of a Digitizer for the Highest Precision Magnet Powering in the High Luminosity Large Hadron Collider," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 73, pp. 1-10, 2024.
- 44) C. Roux, C. Böhm, A. Dörr, S. Eliseev, S. George, M. Goncharov, Y. N. Novikov, J. Repp, S. Sturm, S. Ulmer, and K. Blaum, "The trap design of PENTATRAN," *Appl. Phys. B*, vol. 107, no. 4, pp. 997-1005, 2012.
- 45) Ch. Böhm, S. Sturm, A. Rischka, A. Dörr, S. Eliseev, M. Goncharov, M. Höcker, J. Ketter, F. Köhler, D. Marschall, J. Martin, D. Obieglo, J. Repp, C. Roux, R.X. Schüssler, M. Steigleder, S. Streubel, Th. Wagner, J. Westermann, V. Wieder, R. Zirpel, J. Melcher, and K. Blaum, "An ultra-stable voltage source for precision Penning-trap experiments," *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. Accel. Spectrometers Detect. Assoc. Equip.*, vol. 828, pp. 125-131, 2016.
- 46) A. Kaiser, S. Dickopf, M. Door, R. Behr, U. Beutel, S. Eliseev, A. Kaushik, K. Kromer, M. Müller, L. Palafox, S. Ulmer, A. Mooser, and K. Blaum, "Josephson voltage standards as ultra-stable low-noise voltage sources for precision Penning-trap experiments," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 124, no. 22, p. 224002, 2024.
- 47) L. Palafox and R. Behr, "Computer-Controlled operation of PTB's 80 V Programmable Josephson Voltage Standard," *Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2024) Digest*, pp. 1-2, 2024. (10.1109/CPEM61406.2024.10646008)
- 48) 井元信之, "量子コンピュータ技術の歴史と展望," *精密工学会誌*, vol. 85, no. 12, pp. 1033-1039, 2019.
- 49) 竹内尚輝, 更田裕司, 山下太郎, 山本剛, "超伝導量子ビット用制御回路—現状と課題—," *低温工学*, vol. 59, no. 2, pp. 71-79, 2024.
- 50) H. Shen, N. Takeuchi, Y. Yamanashi, and N. Yoshikawa, "Amplitude-controllable microwave pulse generator using single-flux-quantum pulse pairs for qubit control," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 36, no. 9, p. 095010, 2023.
- 51) L. Howe, M. A. Castellanos-Beltran, A. J. Sirois, D. Olaya, J. Biesecker, P. D. Dresselhaus, S. P. Benz, and P. F. Hopkins, "Digital Control of a Superconducting Qubit Using a Josephson Pulse Generator at 3 K," *PRX Quantum*, vol. 3, no. 1, p. 010350, 2022.
- 52) 竹内尚輝, "超低電力マイクロプロセッサ実現に向けた断熱型磁束量子パラメトロン of 進展," *低温工学*, vol. 52, no. 5, pp. 332-339, 2017.
- 53) N. Takeuchi, T. Yamae, T. Yamashita, T. Yamamoto, and N. Yoshikawa, "Microwave-multiplexed qubit controller using adiabatic superconductor logic," *Npj Quantum Inf.*, vol. 10, no. 1, p. 53, 2024.
- 54) [https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP\\_100151.html](https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100151.html)
- 55) M. Maruyama, C. Urano, H. Yamamori, H. Sasaki, A. Yoshida, T. Misawa, R. Inoue, D. Matsumaru, and N.-H. Kaneko, "Development of Josephson Voltage Standard Systems Toward Reliability Improvement of IoT Sensors," *Proc. International Symposium on Superconductivity*, 2021.
- 56) M. Maruyama, C. Urano, H. Yamamori, and N.-H. Kaneko, "Generation of AC Waveforms Using Josephson Arrays Driven with Frequency-Modulated Microwave," *Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2022)*, 2022.
- 57) 特願 2022-139820

