

## ジョセフソン電圧標準の現状

丸山道隆\*

(平成21年12月4日受理)

## Review on Josephson voltage standard

Michitaka MARUYAMA

## Abstract

This paper reviews the present status of Josephson voltage standard (JVS), especially focusing on the next generation quantum AC voltage standard systems. JVS systems are currently working as the national standard systems for DC voltage in the world. Recently, much effort has been made at the national metrology institutes (NMI's) to enhance the conventional JVS to the systems for AC voltage (AC-JVS). Though the realization of AC-JVS systems has some challenging factors to be solved, it will bring great benefit and open new applications. Operation principle, characteristics and the latest experimental results for three promising types of AC-JVS are reported.

## 1. はじめに

身の回りを見渡してみると、電気に関連した機器は、いまや社会のあらゆる場所で用いられていることに気付く。身近であると同時に、日常生活や産業を支える上でなくてはならない存在である。電気は、機器を動作させるためのエネルギー源としてはもちろんのこと、制御や通信を行うための情報担体としても利用される。これら電気エネルギーや電気信号は、高い制御性や高度な演算能力、使用環境におけるクリーンさや伝送の容易さなど、他に代え難い利点をもっている。そのため、電気機器は今後もますます増え続け、高度化しながらその重要性がさらに増していくと思われる。

これら電気機器の製造・流通・利用などを行う際、高い安全性や信頼性を確保するために重要な基盤となるものの一つが電気標準である。これは電気に関する物理量を測定する際に実用上の基準を与えるもので、機器の性能や使用条件を定量的かつ客観的に保証する上でのよりどころとなる。また、国際的に統一された基準を採用することは、産業界の国際競争力にも関わる重要性をもつ。

電気標準の中でも、本稿で扱う「電圧」に関する標準としては、現在、ジョセフソン効果を利用した直流電圧

標準<sup>1)-5)</sup>と、サーマルコンバータを用いた交直変換標準<sup>6)-8)</sup>が、日本における国家一次標準として整備されている。これら日本の標準は、他の国々が保有する標準システムとの相互比較も行われ、国際的に統一的な標準供給体制が実現されている。

電気標準の「直流・低周波」分野における電圧以外の標準としては、直流抵抗<sup>1), 4), 5), 9)-11)</sup>、交流抵抗<sup>12), 13)</sup>、キャパシタンス<sup>14)-16)</sup>、誘導分圧器<sup>17), 18)</sup>などがあり、やはり国家一次標準として、計量標準総合センター（以下、NMIJと呼ぶ）により維持・管理されている。実際の運用では、国家一次標準として定められた特定標準器（NMIJが保有）を用いて校正された特定二次標準器（日本電気計器検定所（JEMIC）や企業など、計量法校正事業者登録制度（JCSS）の登録事業者が保有）から、常用参照標準器（同）や実用標準器（ユーザが保有）を経て、ユーザの汎用測定器へとトレーサビリティが保たれている。なお、電力標準については、JEMICが指名計量標準機関として、NMIJに代わって特定標準器の維持・管理を行っている<sup>19)</sup>。

本稿では、上記した電気標準の中でもとくに電圧標準に焦点を絞る。まず、「電圧」というパラメータが電気標準のうちの一つとして採用されている理由を述べた上で、電圧標準供給の現状と課題、次世代量子交流標準の開発動向などについて報告する。

\* 計測標準研究部門 電磁気計測科 電気標準第2研究室

## 2. 電圧標準と国際単位系

国際単位系 (SI) において, 電磁気量の単位は  $m$  (長さ),  $kg$  (質量),  $s$  (時間),  $A$  (電流) の4種類の組み合わせで表わされる. 従って, SIに厳密に準拠するためには, すでに標準が実現されている長さ・質量・時間に加えて, 電流標準を作らなければならない. しかしながら, そのためには以下の二つの現実的な問題が生じる<sup>1)</sup>. 一つは, 電流値が2本の導体間の斥力により定義されており, 「・・・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・・・」<sup>20)</sup> という理想的な構造で実験を行うことが不可能なことである. もう一つは, 上記定義から電磁気量を得るためには, 力学量にトレーサブルである必要があり, 電気量の測定システムを構成する上での困難が生じることである. このような理由から, 電磁気量に限り, 電圧と抵抗を基準として用いる“実用上”の電気標準体系が用いられるようになった.

最近では, 単一電子トランジスタ (SET) を用いて電子の数をカウントする方法が急速な進歩をとげつつあり, それを用いた電流標準を実現するための研究なども行われている. これが実現すれば, 独立した電圧・電流・抵抗の各標準を用いて, オームの法則そのものの正当性を確認する実験 (メトロロジートライアングル) が可能となる<sup>21)</sup>. 現状では, まだ十分な精度が得られておらず, 改善のためのさまざまな努力が行われている.

ここで, (旧電総研および旧電気試験所を含む) NMIJ における電圧および抵抗標準の歴史を少し振り返ってみる. まず, 電圧標準としては, 1948年からカドミウムを用いたウェストン電池による国家標準が維持されてきた. (それ以前は電流原器 (銀分離器) による電流標準が用いられていた.) 1977年からはジョセフソン効果を用いた量子電圧標準に置き換えられて, 今日に至っている<sup>2)</sup>. 一方, 抵抗標準は, 1914年から水銀抵抗原器, 1948年からはマンガン抵抗器, その後, クロスキャパシタを経て, 1990年から量子化ホール抵抗素子を用いて維持管理されている<sup>9), 10), 22)</sup>. このように, 現在では, 電圧・抵抗ともに, 量子力学に基づいた, より普遍的な標準が実現されている.

## 3. ジョセフソン効果

前節で述べたとおり, 現在の電圧標準はジョセフソン効果<sup>23)</sup>を用いて実現されている. ジョセフソン効果とは, 2つの超伝導体の間に薄い絶縁層又は常伝導金属層を挟

んだ構造 (ジョセフソン接合) (図1(a)) において生じる, 超伝導電子対 (クーパー対) のトンネル効果に伴って起こる量子現象のことである<sup>24)-26)</sup>.

トンネル電流の大きさは各超伝導電極における波動関数の位相差 ( $\phi$ ) によって決まり,

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

ただし,  $I_s$ : 超伝導トンネル電流

$I_c$ : 臨界電流

と表わされる. また, 位相差と接合両端の電圧 ( $V$ ) との間には

$$d\phi / dt = (2e / \hbar) V \quad (2)$$

ただし,  $e$ : 電子の電荷

$\hbar = h / 2\pi$

$h$ : プランク定数

の関係が成り立つ. (2)式より,  $V = 0$ の状態では,  $\phi$ の時間変化はゼロであり, よって(1)式より, 接合には  $I_c \sin \phi$ の大きさの一定電流が流れる. これを直流ジョセフソン効果と呼ぶ.

実際のジョセフソン接合の電流-電圧特性は, 抵抗シャント接合 (RSJ) モデルと呼ばれる等価回路によって説明される (図1(b)). 図中で, “JJ” は(1)式に従う非線形インダクタンスを示し,  $R_n$ は接合抵抗,  $C$ は接合容量を表す. RSJモデルに従うと, 接合を流れる電流は次式

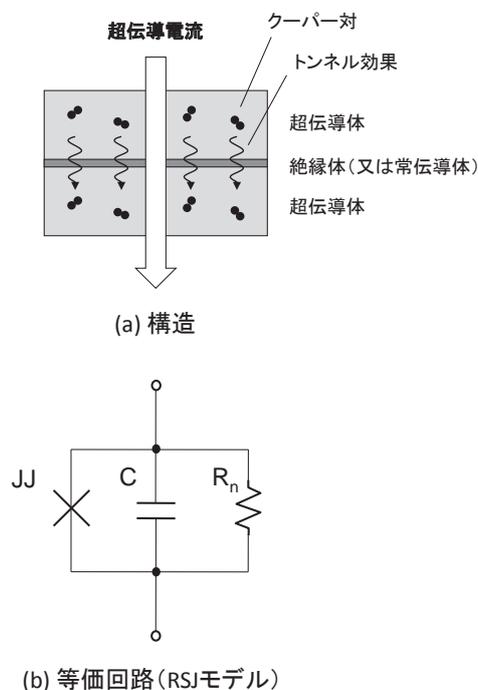


図1 ジョセフソン接合

により表わされる：

$$I = I_s + V/R_n + C \, dV/dt. \quad (3)$$

(1)式より、超伝導電流( $I_s$ )の大きさは $I_c$ を超えることができないため、外部から $I_c$ を超える電流を印加すると、接合は電圧状態(常伝導状態)へと急速にスイッチする(図2(a)-(i), 2(b)-(i)). この非常に高速なスイッチング特性と磁束の量子化現象とを利用して、超高速(> 100 GHz)かつ超低消費電力(< 数  $\mu\text{W}/\text{gate}$ )なデジタル回路やアナログ-デジタル変換器(A/Dコンバータ)、高感度あるいは広帯域な計測器などを実現するための研究が行われている<sup>27)</sup>.

ここで、次式で表わされるパラメータ( $\beta_c$ ):

$$\beta_c = 2\pi I_c R_n^2 C / \Phi_0 \quad (4)$$

ただし、 $\Phi_0 = h/2e$ : 単一磁束量子をマッカンバ係数と呼び、スイッチングの際に生じるヒステリシス特性の尺度となる。 $\beta_c \leq 1$ の場合を、オーバーダンブ型接合と呼び(図2(a)),  $\beta_c \gg 1$ の場合を、アンダーダンブ型接合と呼ぶ(図2(b)). なお、図2(b)中の $V_g$ は超伝導ギャップ電圧と呼ばれ、準粒子(超伝導体中の常伝導電子)トンネリング<sup>25)</sup>に起因した特性を表す。

電圧状態における電流-電圧特性は、直流的に見ると、図2(a)-(i)に示したように、接合抵抗( $R_n$ )によるオーミックな特性を示すが、実はそれ以外にも、(3)式第1項の $I_s$ に起因した、非常に高い周波数の交流電流が流れている。これは、(2)式の積分を(1)式に代入して得られる次式により確かめることができる：

$$I_s = I_c \sin\{\phi_0 + 2\pi(2e/h)Vt\}. \quad (5)$$

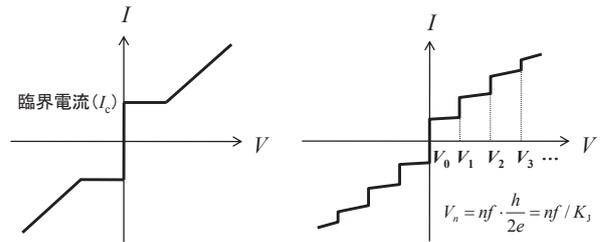
(5)式において、電圧状態では、電圧に比例した周波数：

$$f_j = (2e/h)V \quad (6)$$

をもつ超伝導電流( $I_s$ )が流れ、接合が発振状態となること分かる。これを交流ジョセフソン効果と呼ぶ。

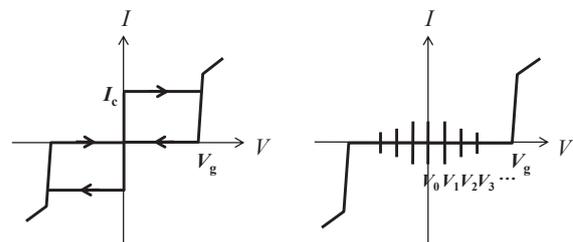
ここまでの議論では、接合が電圧状態のときに、(6)式で決まる、電圧に依存した周波数での内部発振状態が生じるという結論に至った。このときに、接合に外部から周波数 $f$ のマイクロ波を印加すると、 $f_j$ の値が $f$ の整数倍に近い場合に周波数の引き込み現象(共振現象)が起こり、 $f$ に依存した一定間隔をもつ電圧ステップ：

$$V_n = (h/2e)nf = nf/K_J \quad (7)$$



(i) マイクロ波照射なし (ii) マイクロ波照射あり (シャピロステップ)

(a) オーバーダンブ接合 ( $\beta_c \leq 1$ の場合)



(i) マイクロ波照射なし (ii) マイクロ波照射あり (シャピロステップ)

(b) アンダーダンブ接合 ( $\beta_c \gg 1$ の場合)

図2 ジョセフソン接合の電流( $I$ )-電圧( $V$ )特性

ただし、 $n$ : 整数

$K_J = 2e/h$ : ジョセフソン定数

が生じる(図2(a)-(ii), 2(b)-(ii)). このように、ジョセフソン接合のマイクロ波応答により生じる電圧ステップをシャピロステップと呼ぶ<sup>26)</sup>. (7)式は量子力学的に保障された関係であり、実験的にも、16桁<sup>28)</sup> 或いは19桁<sup>29)</sup>以上の精度で成り立つことが確かめられている。従って、マイクロ波の周波数を精度よく定めれば、非常に正確な電圧を得ることが可能となる。ジョセフソン電圧標準は、この原理を利用して実現されている。

なお、(7)式に現れるジョセフソン定数( $K_J$ )の値は、国際科学会議(ICSU)の加盟団体である科学技術データ委員会(CODATA)の2006年の勧告値<sup>30)</sup>によると、「483 597.891(12) GHz/V」(カッコ内の値は下2桁の値の標準不確かさを表す)という値が示されている。この値は、ジョセフソン効果以外の多くの独立な実験により得られた $e$ や $h$ の値も用いて決定されており、今後、測定技術の進歩に伴って改訂されていく予定である。一方、ジョセフソン効果における $K_J$ の値は、上記の勧告値に比べはるかに高い普遍性を有しており、この利点を生かした高精度な測定を行う際には、実用上の不便が生じる。そ

ここで、1988年に国際度量衡委員会（CIPM）は、前年に開催された第18回国際度量衡総会（CGPM）の決議に基づき、 $K_J$ の測定値が今後大幅に変更されないことを期待した上で、電圧標準供給における実用上の協定値として

$$K_{J-90} \equiv 483\,597.9 \text{ GHz/V} \quad (8)$$

という値を、1990年1月1日より世界中で統一して用いることを勧告した<sup>1),20)</sup>。この値は、不確かさをもたない定義値として、量子ホール抵抗標準におけるフォンクリッツィング定数の協定値 ( $R_{K-90} \equiv 25\,812.807 \, \Omega$ ) とともに、電気標準体系において今日まで用いられている。

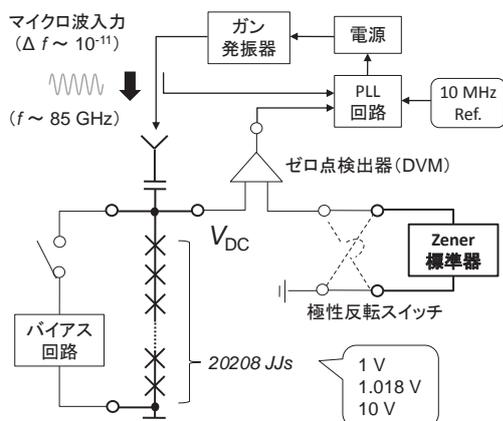
#### 4. 従来の電圧標準システム

##### 4.1 直流ジョセフソン電圧標準 (CJVS)

図3に、NMIJが維持する直流ジョセフソン電圧標準 (JVS又は、後述する他の方式と区別するために、“Conventional”の意味を付加してCJVSとも呼ぶ) システムの外観写真とブロック図を示す。このシステムは、10 MHz参照信号を基準として、11桁の精度で安定した



(a) 外観写真



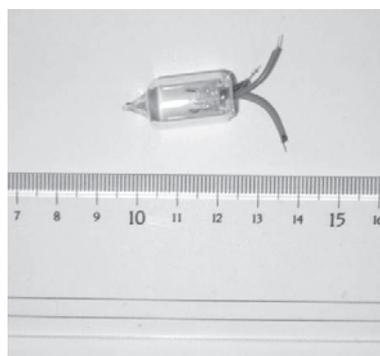
(b) ブロック図

図3 直流ジョセフソン電圧標準(CJVS)システム (NMIJ保有の特定標準器)

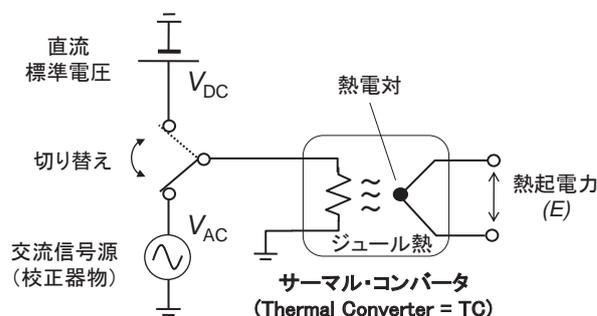
周波数のマイクロ波が得られるPLL回路<sup>3)</sup>と発振器、ジョセフソン素子を動作温度である4.2 Kの低温に冷却するための治具（インサート）と液体Heデュア、被校正器との電圧差を測定するためのゼロ点検出器などから構成される。このシステムでは、20 208個のNb/AlO<sub>x</sub>/Nb接合アレイ素子に85 GHzのマイクロ波を印加することにより、1 V、1.018 V、10 Vの3種類の電圧を出力し、10<sup>-9</sup>の不確かさで、登録事業者が保有する特定二次標準器 (JVSやツェナー標準電圧発生器) に対して校正サービスを行っている。最近では、ドイツ連邦物理工学研究所 (PTB) において、冷凍機を用いたCJVSシステムの開発も行われている<sup>31)</sup>。

##### 4.2 交直変換標準

交流電圧の校正には、電気信号をジュール熱に変換するサーマルコンバータ (TC) を用いた交直変換標準 (AC-DC transfer standard) が用いられる<sup>6)-8),32),33)</sup> (図4)。入力信号による発熱量は、TC内に設置された熱電対に発生する起電力により定量的に評価される。熱を介すことにより、交流電圧と直流電圧を実効値として直接比較



(a) TC素子の写真



(b) 校正のしくみ

図4 交直変換標準システム (NMIJ保有の特定標準器)

することが可能となる。この方式では、被校正器物からの交流電圧の値が、直流の標準電圧を基準として校正される。NMIJでは、このシステムを用いて $10^{-6}$ の不確かさで、10 Hzから1 MHzまでの周波範囲、および10 mVから1 kVまでの電圧値と、10 mAの電流値に対して、JEMICが保有するTCへの校正サービスを行っている。それらのTCを経て、現場で用いられるキャリブレータ（交流および直流の標準電圧発生器）や標準電圧計などの校正が行われる。現在、NMIJでは、周波数範囲をさらに拡大するなど高度化のための研究が行われている<sup>34), 35)</sup>。今後は、電流範囲を広げるための取り組みも行われていく予定である。

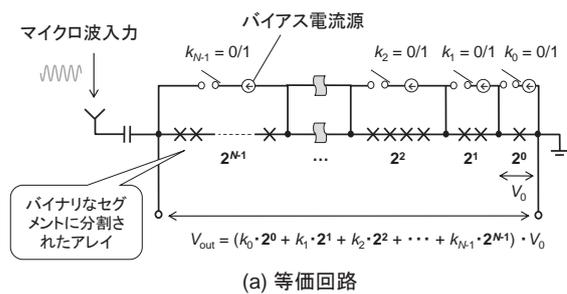
## 5. 新しい電圧標準システム

### 5.1 直流プログラマブルジョセフソン電圧標準(PJVS)

4-1節で述べた従来のCJVSシステムでは、ジョセフソン素子に、ヒステリシス特性をもつアンダーダンプ型接合（図2(b)）を用いているため、所望する電圧ステップ上に動作点を導く際に、確率に依存した複数回の試行（バイアスのON/OFF作業）を要する。そのため、出力電圧を頻繁に切り替えて任意制御するには向いておらず、現状では1 V, 1.018 V, 10 Vなどの限られた値しか校正することができない。

これを改善するため、1995年頃、Hamiltonらによって考案された方式が「プログラマブルジョセフソン電圧標準(PJVS)」<sup>36)</sup>である。この方式では、ジョセフソン素子として、ヒステリシスのないオーバーダンプ型接合を用いる。さらに、接合アレイを1, 2, 4, 8, …,  $2^{N-1}$  ( $N$ :セグメント数)などのバイナリなセグメントに分割し、各セグメントに印加するバイアス電流をON/OFF制御することにより、アクティブな素子数として(7)式における $n$ の値を制御し、任意の出力電圧を得る(図5)。なお、 $n$ の値は電圧ステップの次数(図2(a)-(ii)参照)によっても決められるが、通常はステップ幅(ステップ高ともいう)の最も広い1次のステップが用いられ、負の電圧を出力する場合には-1次のステップが用いられる。

この方式は、 $N$ ビットのデジタル-アナログ変換器(D/Aコンバータ)であるとみなすことができ、アクティブなセグメントの任意な組み合わせにより、最下位ビット(LSB)における出力電圧を最小単位として、任意の電圧値を出力することができる。また、電圧ステップ幅の広いオーバーダンプ型接合を用いているため、従来のCJVSより広い動作マージンが得られるという利点も持



(a) 等価回路

バイナリ・コード ( $2^{N-1} \dots 2^2 2^1 2^0$ )	出力電圧 ( $V_{out}$ )
0 ··· 0 0 1	$\rightarrow V_0$
0 ··· 0 1 0	$\rightarrow 2 V_0$
0 ··· 0 1 1	$\rightarrow 3 V_0$
0 ··· 1 0 0	$\rightarrow 4 V_0$
...	
1 ··· 1 1 1	$\rightarrow (2^N - 1) V_0$

(b) D/A変換に基づいた任意電圧の発生

図5 プログラマブル・ジョセフソン電圧標準(PJVS)

つ。そのため、液体Heフリーな冷凍機を用いた冷却システムの採用が容易となり、システムの小型化や運用コスト低減などにも貢献する。

このように、従来のCJVSに比べて、高い利便性と機能性をもつPJVSシステムは、ツェナー標準電圧発生器やデジタルボルトメータ(DVM)の校正の他、ワットバランス<sup>37), 38)</sup>や量子メトロロジートライアングル(QMT)<sup>39)</sup>など、さまざまな応用が期待されている。

産総研においては、エレクトロニクス研究部門において開発された10 K動作可能なNbN/TiN<sub>x</sub>/NbNオーバーダンプ型接合を用いたPJVS用素子チップ(10 V, 11 bit, 327 680接合)が、米国標準技術研究所(NIST)と共同開発された<sup>40)</sup>。また、素子作製における歩留まりや動作マージンを向上させるため、5 Vチップを2枚組み合わせるマルチチップ技術や、冷凍機を用いたコンパクトな冷却システムも開発された<sup>41), 42)</sup>。従来のCJVSとの比較実験では、 $10^{-9}$ の不確かさでの一致が確認されている<sup>43)</sup>。NMIJにおいては、現在、このシステムを用いたデジタルボルトメータ(DVM)のリニアリティ校正も可能である<sup>44)</sup>(図6)。これらの運用実績が積み重ねられ、十分な信頼性が示されれば、将来的に、現状のCJVSを用いた一次標準器と置き換えられる可能性も考えられる。

海外では、この方式の考案以来、米国のNISTにおいて精力的な研究が続けられている。集積度を高めるため、複数の接合を上下に積み重ねたスタック型のNb/MoSi<sub>x</sub>/Nbオーバーダンプ接合を用いた10 VのPJVSチッ

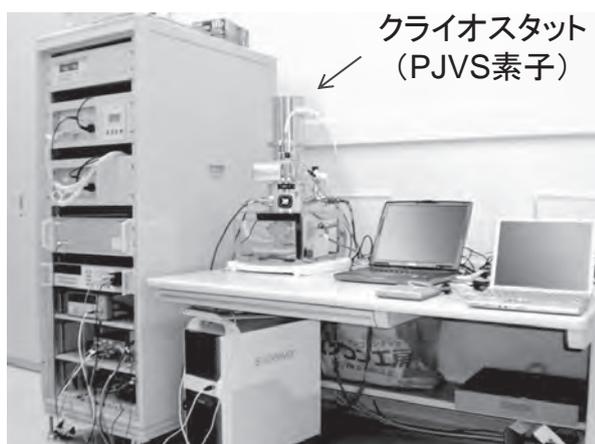


図6 PJVSを用いたDVM校正用冷凍機システム

ブが開発された<sup>45)</sup>。また、最近では動作マージンを見つけるなどの測定シーケンスを自動化した“Turnkey”システムの開発に力を入れている<sup>46)</sup>。ドイツのPTBにおいては、SINIS構造（S：超伝導体，I：絶縁体，N：常伝導金属）を用いたオーバーダンプ型接合による10 V用素子チップが開発された。CJVSと直接比較する実験では、 $10^{-10}$ の不確かさ（10 Vに対して1.8 nV）で両者の出力電圧値の一致が報告されている<sup>47)</sup>。

## 5.2 次世代量子交流電圧標準（ACJVS）

### 5.2.1 量子交流電圧標準の必要性和原理

4-2節で述べたように、サーマルコンバータを用いた交直変換標準は、幅広い周波数領域と電圧範囲をカバーする標準として、交流電圧を校正する上で中心的な役割を果たす重要なものである。ただ、この方式では、交流電圧をエネルギー的に平均化した実効値を用いるため、時間軸上の変化に関する情報が得られないという欠点ももつ。一方、産業界においては、用途にもよるが、例えばオシロスコープや振動計など時間軸上の情報を扱う機器に対して、電圧の波形や瞬時値をダイレクトに校正したいという要望がある。

このような必要性に応えるため、現在、NMIJほか、各国の計量標準機関（NMI）において、ジョセフソン効果を用いた直流電圧標準を交流電圧へと発展させた、次世代の“量子交流電圧標準”の開発が進められている。

すでに述べたように、ジョセフソン電圧標準においては、(7)式の関係を利用して直流用の標準が実現されているが、これを交流用に拡張するためにはどうすればよいだろうか。(7)式において、 $K_J$ は基礎物理定数であり、時間的に一定である。変化可能なパラメータは整数 $n$ と周波数 $f$ の二つであり、このどちらかを時間の関数とし

て制御してやれば、交流電圧を発生させることができる。それぞれのアプローチに対して、交流電圧を発生させるためのさまざまな方式が考案されているが、その中でも、とくに実用化が有望視されている三つの方式：

- ①交流プログラマブルジョセフソン電圧標準  
(AC Programmable JVS = ACPJVS)
- ②パルス駆動型ジョセフソン電圧標準  
(Pulse-Driven JVS)
- ③単一磁束量子回路型ジョセフソン電圧標準  
(Rapid-Single-Flux-Quantum (RSFQ) JVS)

について、以下の節で詳しく述べる。

### 5.2.2 交流プログラマブルジョセフソン電圧標準（ACPJVS）

この方式は、アティブな素子数として、(7)式における整数 $n$ を制御するもので、動作の原理や回路構成は、基本的に5-1節で述べたPJVSと同じである（図5参照）。ただし、直流用のPJVSにおいては、バイナリな各セグメントに対するバイアス電流の切り替えを静的に行っていた。一方、本節で述べる交流用のACPJVSでは、バイアスの切り替えを高速にプログラム制御することで、交流電圧の発生を可能とする。この方式で生成される交流電圧は、厳密に見ると階段状（stepwise）に近似された波形となる（図7）。そのため、この方式は、次節で述べるパルス駆動方式のような本質的な（intrinsic）交流電圧標準ではなく、（実効値などを）調整可能な（adjustable）交流電圧標準である、という言い方がされる。

この方式の利点は、従来のCJVSと同様の10 V程度の大きな電圧振幅を比較的容易に得ることができる点である。従って、以下で述べる欠点をカバーできればこの方式の実用的な価値は高く、交流電圧計の校正やサーマルコンバータとの相互比較、インピーダンス標準、量子電力標準（Quantum Watt）などさまざまな応用が期待されている。

この方式の欠点は、バイアスを階段状に切り替えるときに、動作点が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、誤差（トランジエントエラー）が生じることである（図7）。トランジエントエラーの影響は、発生させる信号の周波数が高くなるほど増加する。そのためこの方式は、商用周波数（50–60 Hz）程度までの低周波領域を得意とする一方で、kHzを超える高周波波形の生成には向いていない。トランジエントエラーの影響を、所望する不確かさに対して十分抑えられるかどうか、この方式で実用システムを構築する際のカ

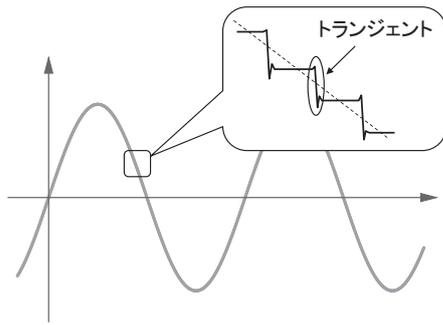


図7 ACPJVSによる交流生成波形の模式図

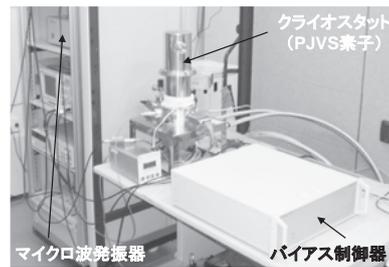
ギとなる。

産総研では、現在までに直流用PJVSをベースにした冷凍機システムと、交流用にカスタマイズしたバイアス制御器とを組み合わせることにより、4 Vのピーク電圧および2 kHzまでの周波数での正弦波波形生成実験に成功している(図8)。現在、NMIJにおいて、サンプリング方式での測定や不確かさの評価、トランジェントエラー低減など、実用化に向けた研究が進められている<sup>48)</sup>。

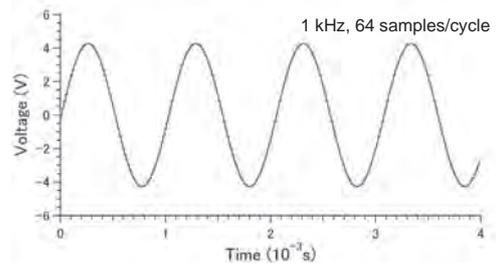
海外においては、直流用PJVSと同様に、米国のNISTやドイツのPTBなどで先駆的な研究開発が進められており、電圧振幅10 Vの正弦波波形生成の成功や、電力標準システム(NISTの“Quantum Watt”システムなど)への組み込みなどが報告されている<sup>46), 47), 49), 50)</sup>。

トランジェントエラーについての定量的な考察も行われており、実験結果やモデル計算などをもとに、実効値(rms値)において得られうる不確かさの上限として、50-60 Hzの商用周波数帯で「 $< 0.5 \mu\text{V/V} (10^{-7})$ 」、1 kHzのオーディオ周波数帯で「 $> 2 \mu\text{V/V} (10^{-6})$ 」という値が示されている<sup>51), 52)</sup>。これをもとに、NISTから、ACPJVSの目標スペックとして、「1 kHz以下の周波数で、出力電圧: 1.5 Vrms (実効値)、サンプル数: 512 sample/cycle、高調波レベル:  $2 \mu\text{V/Vrms}$ 」という値が提示されている。

一方、トランジェントエラーの寄与が避けられない実効値測定ではなく、トランジェントの影響を回避しながら離散的に電圧値を評価する“サンプリング方式”での測定も試みられている(図9)。PTBは、サンプリングDVMを直接校正する手法で $10^{-7}$ の不確かさ( $0.38 \mu\text{V/V} @ 60 \text{ Hz}$ ,  $\pm 1.2 \text{ Vpp}$  (peak-to-peak電圧))を報告している<sup>53)</sup>。また、NISTは、DVMの非線形特性の影響を避けるため、ACPJVSとキャリブレーションとの電圧差をDVMでモニタする“差動(differential)サンプリング方式”という、PTBとは異なるアプローチで実験を行い、やはり $10^{-7}$ の不確かさ( $0.3 \mu\text{V/V} @ 50 \text{ Hz}$ ,  $1.2 \text{ Vrms}$ )を示して

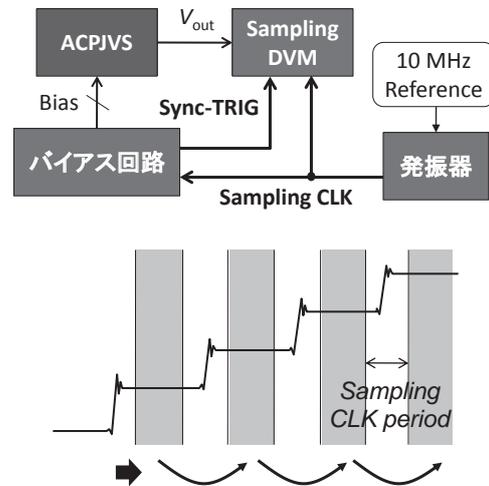


(a) 装置の外観写真



(b) 生成された正弦波波形

図8 産総研で開発中のACPJVSシステムと生成波形例



- ① Sync-TRIGに同期してサンプリング開始
- ② 1サンプルおきのデータを収集することによりトランジェントの影響を回避

図9 ACPJVSにおける“サンプリング測定”の原理

いる<sup>54)</sup>。なお、2台のACPJVSシステムを用いた差動サンプリング測定においては、 $10^{-8}$ の不確かさ( $10 \text{ nV/V} @ 60 \text{ Hz}$ ,  $1.5 \text{ Vrms}$ )での一致が報告されている<sup>55)</sup>。

今後は、実効値測定およびサンプリング測定の両方式の特徴を理解しながら、各アプリケーションに最適なシステム開発を進めていくことが重要と思われる。

### 5.2.3 パルス駆動型ジョセフソン電圧標準 (Pulse-Driven JVS)

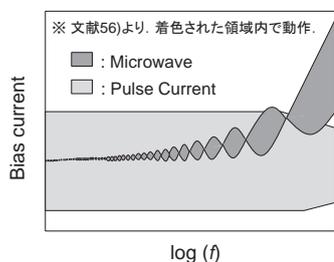
前節のACPJVSが(7)式における $n$ を制御していたのに対し、周波数 $f$ を制御することによって、トランジェントエラーの問題を解決したのがこの方式である。ただし、マイクロ波の周波数をそのまま変化させると、電圧ステップの幅や位置が変化し、素子の動作点や動作マージンが変動してしまうという問題が生じる(図10(a))。そこで、従来のマイクロ波の代わりに電流パルスを印加する方式が、1996年にNISTのBenzらによって考案された<sup>56)</sup>。

ジョセフソン接合に臨界電流( $I_c$ )を超える大きさの電流パルスを印加すると、その両端に電圧パルス( $v(t)$ )が発生する。このとき、電圧パルスの面積(時間積分)は、次式で示されるように磁束量子( $\Phi_0$ )の整数倍に正確に一致する<sup>57)</sup>：

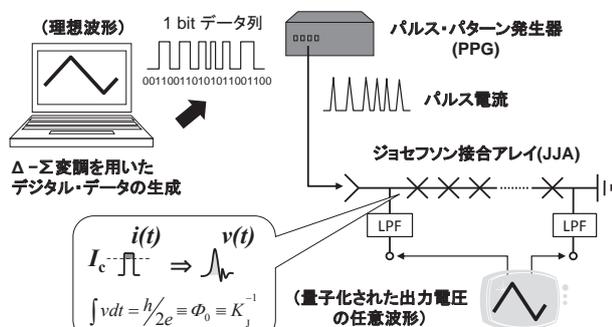
$$\int v(t) dt = n \Phi_0 \quad (9)$$

ただし、 $n$ ：整数。

すなわちジョセフソン接合は、量子化された電圧積分値を出力する電流/電圧変換器として機能し、パルス駆動型JVSではこの性質を利用している。なお、(9)式は、周波数( $f$ )が時間の逆数( $1/t$ )のディメンジョンをもつこと



(a) 動作マージンの周波数依存性



(b) 動作原理

図10 パルス駆動型ジョセフソン電圧標準

に着目すれば、(7)式と等価であることが分かる。つまり、パルス駆動による動作も、本質的には従来のマイクロ波応答と同じ原理に基づいている。

ここで、発生する磁束量子の数((9)式中の $n$ )は印加する電流パルスの高さ( $I_p$ )と幅( $\tau$ )に依存し、 $n = 1$ に対する実用的な最適値は、モデル計算により

$$I_p \approx 2.634 I_c \quad (10)$$

$$\tau \approx 1/(2f_c) \quad (11)$$

ただし、 $f_c = I_c R_N / \Phi_0$ ：特性周波数と見積もられている<sup>56)</sup>。図10(a)のバイアスマージンは、この条件下で計算されたものである。

以上がパルス駆動による量子化電圧発生メカニズムであるが、任意波形を生成するためには、これら電流パルスをデジタル信号のビット列(1と0の並び)とみなし、ビット配列に対して適切な変調を施す(図10(b))。ビットの“1”が連続して続くときにはパルス間隔が最小となるのに対し、“0”がくるとパルス間隔が広がるため、パルスの繰り返し周波数( $f_s$ )が実効的に変化する。出力電圧の平均値は単位時間当たり発生する磁束量子の数、すなわち $f_s$ に比例するため、ビット列の適切な変調を行えば、任意の電圧波形を発生することができる。すなわち、 $f_s$ が(7)式における $f$ に相当する。一方で、動作マージンは $\tau$ に依存するため、図10(a)に示したように、 $f_s$ を変化させても変動しない。

この方式の利点は、ACPJVSで問題となっていたトランジェントエラーが生じないため、本質的に量子化された(インtrinsicな)交流電圧波形の生成が可能なことである。また、通常はデジタル信号を用いると必ず量子化ノイズが生じるが、ビット列を生成する際に、ノイズシェーピング効果のある $\Delta-\Sigma$ (デルターシグマ)変調を用いることにより、量子化ノイズを高周波領域に押し上げることができる(図11)。この高周波成分をローパスフィルタ(LPF)を用いて除去すれば、信号対雑音比(S/N比)のきわめて高い、高精度な波形を得ることができる。

この方式の欠点としては、高帯域なパルス信号をジョセフソン素子がマウントされた極低温環境下へと伝送する必要があるため、高周波実装技術を必要とする点がある。配線や素子アレイを伝搬する際に、分散によってパルス信号のひずみが生じ、動作マージンを低下させる原因となる。そのため、素子アレイの接合数にも限界があり、高い出力電圧を得ることが難しい。また、トランジェントエラーがないため、商用周波数帯から

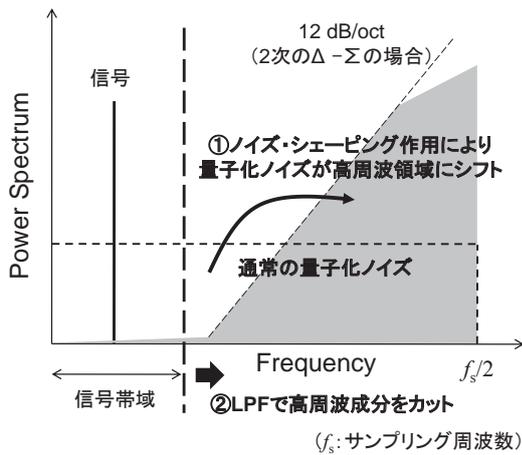


図11 Δ-Σ (デルタシグマ) 変調におけるノイズ・シェーピング

MHz程度までの高周波信号の生成を得意とする一方で、印加する電流パルスのビット長がパルスパターン発生器 (PPG) のメモリ長により制限されるため、現状では商用周波数帯以下の低周波波形の生成には向いていない。

NMIJでは、SNS接合<sup>40)</sup>やSINIS接合<sup>58), 59)</sup>を用いた素子チップの作製や、光コム駆動による量子化電圧ステップ観測<sup>60)</sup>などの基礎研究を行ってきた。最近では、(財)国際超電導産業技術研究センター (ISTEC) との共同研究において、高周波プローブを備えた冷凍機システムを用いた動作実験を行い、60 Hzから150 kHzの正弦波波形および任意波形の生成に成功している<sup>61)-64)</sup> (図12, 13)。この実験で用いられたシステムは、もともとRSFQ回路<sup>57)</sup>を用いた通信ネットワークスイッチデバイスのデモンストレーション用に開発されたもので、32チャンネルの10 Gbps/ch (1チャンネルあたりの通信速度)の電気I/Oポートを有する<sup>65)</sup>。また、極低温動作可能な単一走行キャリアフォトダイオード (UTC-PD)<sup>66)</sup>のカスタムモジュールを素子近傍の4 Kステージに搭載し、40 Gbpsの光信号入力を可能にしている<sup>67)</sup>。素子のマウントにはコプレーナ配線 (CPW) 形状をもつ高周波プローブが用いられる。これらの実装技術の採用により、広帯域なパルス伝送が実現された。

現状ではまだ、グラドループによるノイズなどシステム上の問題や、アレイ素子の規模が小さいなどの課題があるものの、光駆動方式では、1 mVrms程度の電圧振幅と-80 dBc (キャリア信号に対するデシベル値) (実効値で8桁) 程度のスプリアスレベル、後述する電気入力でのACカップリング方式では、10 mVrms程度の電圧振幅と-90 dBc (実効値で9桁) 程度のスプリアスレベルが得られている。市販の発振器と比べると、格段に良好

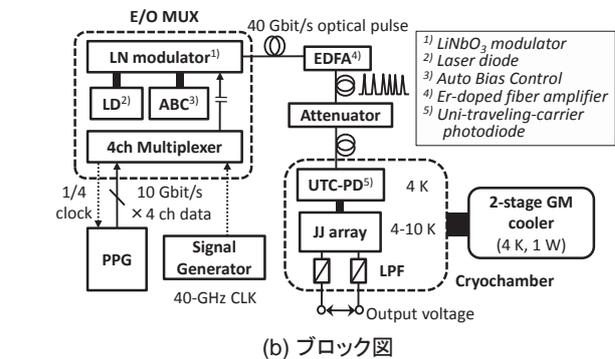
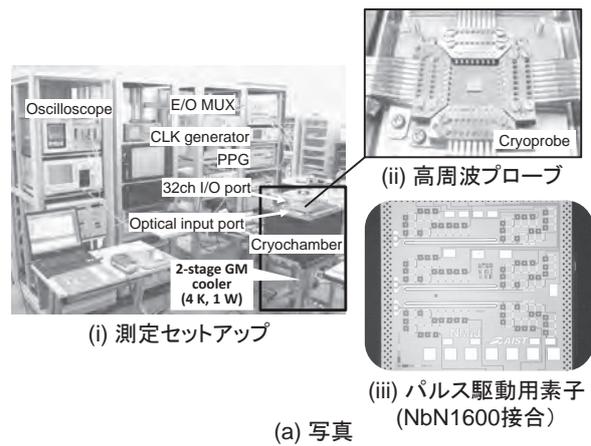


図12 NMIJで開発中の光パルス駆動型JVSシステム (財) 国際超電導産業技術研究センターとの共同研究

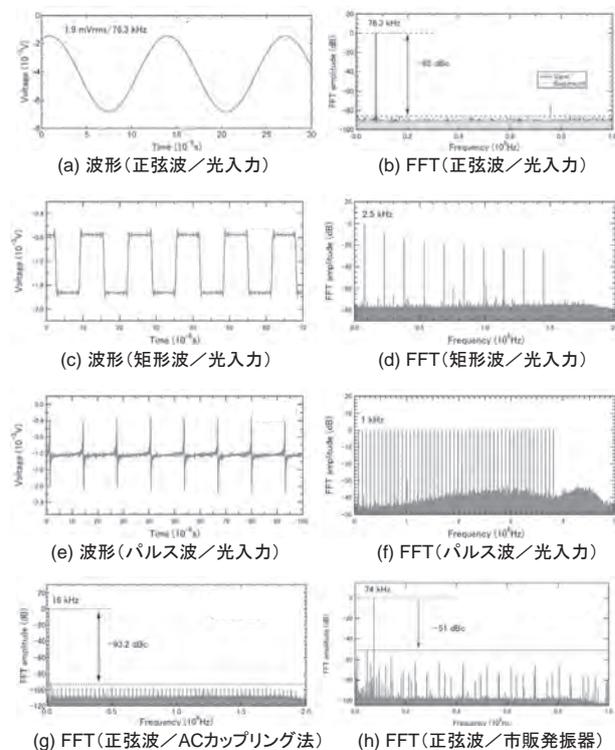


図13 パルス駆動型JVSによる生成波形とそのFFTスペクトル

な単一トーンの信号が得られていることが分かる(図13(h)). 現在, 同軸配線のグラウンドをチャンネルごとに分離するなどの最適化や接合数の向上が試みられている. 今後は, 高周波プローブや光パルス入力など, 実装技術に関するノウハウを生かしながら, 実用化に向けたシステム開発が進められていく予定である.

海外では, 米国のNISTや, ドイツのPTBを中心とするヨーロッパにおいて先駆的な研究が行われており, “JAWS”(= Josephson Arbitrary Waveform Synthesizer)のニックネームで, 精力的な研究開発が行われている<sup>68)</sup>・<sup>69)</sup>. 最近では, 韓国計量標準科学研究院(KRISS)でもNISTのシステムを導入したテストが行われている<sup>70)</sup>.

NISTにおいては, バイポーラ出力を得るために, パルスパターン発生器(PPG)と正弦波発振器(SG)とを組み合わせた“ACカップリング法”を提案し(図14(a)),  $-111$  dBc(実効値で12桁)以下のスプリアスレベルを実証した. さらに, この値は測定に用いたデジタルのひずみを含んでいるため, 素子自体はノイズフロアである $-135$  dBc程度のポテンシャルをもつと報告している<sup>52)</sup>・<sup>71)</sup>. 2本の6400接合アレイを直列接続して275 mVrmsの電圧振幅を達成したことから, 今後, 4組(計8本)のアレイを組み合わせた1 Vrmsシステムの構築を計画している. また, サーマルコンバータに基づいた交直変換標準の不確かさを評価する実験<sup>72)</sup>や, 可計算なノイズ信号を用いて絶対温度やボルツマン定数を測定する

研究(Johnson Noise Thermometry: JNT)<sup>73)</sup>への応用に取り組んでいる.

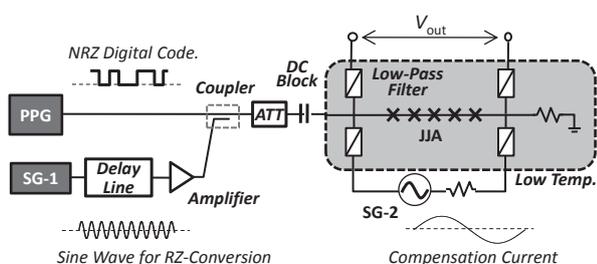
一方, ヨーロッパでは, NISTとは異なるアプローチでバイポーラ出力の生成に取り組んでいる. オランダの計量研究所(NMi)やドイツのIPHT, PTBおよびSYMPULS社のグループは, 電気的なパルス入力において, 3レベル(ternary) PPG(通常のPPGは“1”と“0”の2レベル)を独自開発した<sup>74)</sup>・<sup>75)</sup>. 2560接合のアレイを駆動する実験では, 19 mVppの電圧振幅において,  $-86$  dBcのスプリアスレベル(実効値で9桁)を示した. また, イギリスのNPLやドイツのPTB, オランダのNMiの他, フランス, スロベニア, スウェーデンのグループにより, 2入力1出力のバランス型フォトダイオードを用いたバイポーラ出力のJAWS開発プロジェクトが行われている<sup>69)</sup>・<sup>76)</sup>(図14(b)).

最近では, PTBから, NISTで開発されたニオブシリサイド( $\text{Nb}_x\text{Si}_{1-x}$ )バリア<sup>77)</sup>・<sup>78)</sup>を用いたSCS接合(“C”は, “Conductor Material”を表し, 組成比 $x$ によって金属-絶縁体間で特性がチューナブルなこのバリア材料を, 従来の“N”や“I”と区別する意図で記される. なお, PTBの実験では実質的にSNS接合として用いられている)を用いた上, メアンダ形状のコプレーナライン構造を採用した4795接合アレイのチップを作製し, 25.54 mVの電圧振幅で $-121$  dBcという, NISTと同程度のスプリアスレベルが報告されるなど, 着実な進展を見せている<sup>79)</sup>.

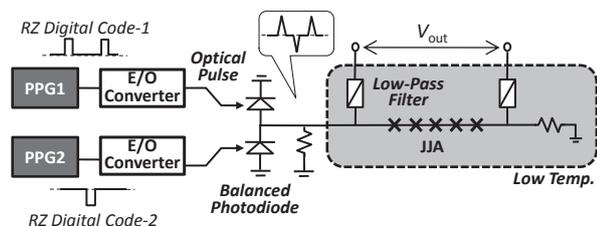
以上, パルス駆動型JVSは, 出力電圧が小さいという課題はあるものの, 真の交流標準電圧波形を生成できる方式としての期待度が高い. 各研究機関とも, 力を入れて開発に取り組んでおり, 実用化の見通しが得られつつある.

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

この方式は, 前節までで述べた二つの方式で必要とされていたバイアス回路や高速パルス発生器などの制御機器を, RSFQ回路(=超伝導デジタル集積回路)を用いてジョセフソンアレイ素子近傍に作りこみ, オンチップ化してしまおうというものである(図15). 1991年にRSFQ回路<sup>57)</sup>が提案されてすぐ, Hamilton(1992)<sup>80)</sup>とSemenov(1993)<sup>81)</sup>によって考案された. 本稿で紹介する次世代量子交流標準における三つの方式の中では最も古い歴史をもつが, その機能面から見ると, 他の方式の発展形であるとみなすことができる. この方式では, (7)式における $n$ 又は $f$ を制御するそれぞれのタイプが可



(a) ACカップリング方式(NIST)



(b) バランス型フォトダイオードを用いた方式 (NPL/PTB/NMiほかヨーロッパ)

図14 海外におけるパルス駆動型JVSの開発方式

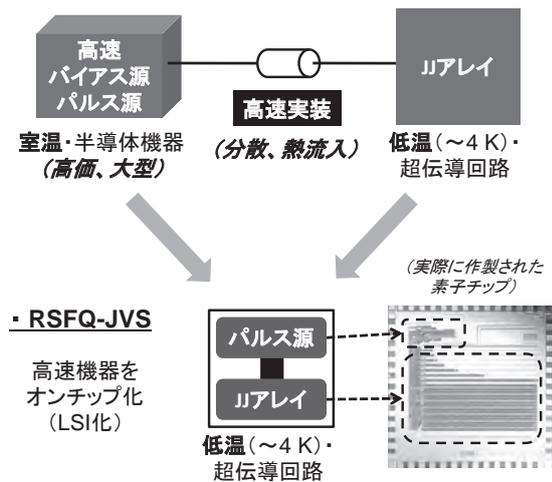


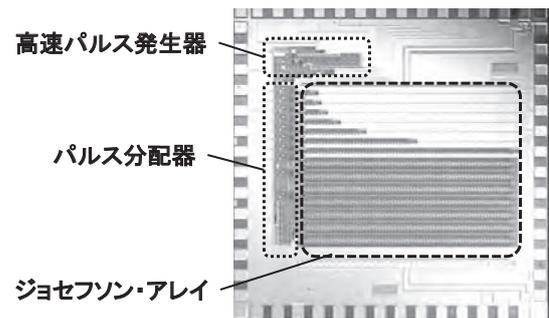
図15 単一磁束量子回路(RSFQ)型ジョセフソン電圧標準

能であり、幾つかのバリエーションが考案されている。

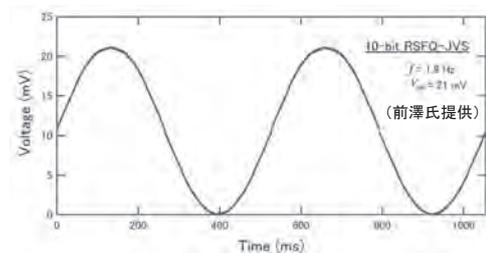
RSFQ回路は、(9)式で示された単一磁束量子(SFQ)とそれに付随する電圧パルスを情報担体として利用することにより、クロック速度が100 GHzを超える高速性と、数 $\mu\text{W/gate}$ の低消費電力性をもつデジタル回路である。これにより、ACPJVSで問題となっていたトランジエントエラーを大幅に削減できることや、パルス駆動型JVSで課題となる高周波実装の負担を軽減できるなどの利点がある。また、出力段ジョセフソンアレイが入力段回路と直流的に分離する構造のため、コモンモード雑音は原理的に発生しない。さらに、室温系の高価な高周波機器を不要とするため、コスト削減やシステムの小型化が可能であり、より利便性の高いポータブルなシステム開発にも貢献すると考えられる。

一方、この方式の欠点としては、複雑な構造のRSFQ回路を作製するために高度なプロセス技術を必要とすることがあげられる。出力電圧は回路規模(集積度)に比例し、交流標準として実用レベルの電圧を得るには、現状の集積度を飛躍的に高めなければならない。半導体LSIに比べて格段に少ないリソースのもとで開発が行われるプロセス技術を考慮すると、残念ながらすぐに実用化できる方式とは言えないかもしれない。しかしながら、いわゆるムーアの法則のように、将来的にプロセス技術が向上すれば、その分、大きな出力電圧と高い機能性が得られることは確かであり、長期的なスパンで見るときには最も魅力的な方式の一つであると言える。

産総研の前身である通商産業省工業技術院においては、1998年頃から旧電総研において、ニューヨーク州立大学(SUNY)と共同で、RSFQ-JVSの開発プロジェクトが行われた<sup>82)</sup>。産総研では現在までに、10 bitの



(a) 作製された素子の写真



(b) 生成された正弦波波形

図16 RSFQ型JVSにおける波形生成実験結果

RSFQ-JVS素子チップを用いた正弦波波形生成の機能試験に成功している<sup>83),84)</sup>(図16)。また、最近では、よりパルス駆動方式に近い、1 bitのD/Aコンバータタイプの提案と取り組みなども行われている<sup>85),86)</sup>。不確かさの評価や高速試験、システム開発などは今後の課題であり、現在研究が進められている。

海外では、NISTとSUNYによる提案以来、各要素回路の開発が進められ、PTBのグループにおいて機能試験に成功している<sup>87),88)</sup>。しかし、すでに述べたように、現状のプロセス技術では十分な回路規模の素子チップを作製することが容易でないことから、現在この方式に取り組んでいるのは日本だけとなっている。その意味で、この方式は、次世代量子交流電圧標準開発における日本の独自性を発揮するチャンスを秘めているとも言え、海外の研究機関からもその動向に関心が寄せられている。

### 5.3 各方式の守備範囲

以上、5節では、新しい電圧標準システムの各方式や開発状況について述べた。図17に、従来方式でカバーされている電圧および周波数範囲とともに、新しい各種方式で期待される動作領域を示す。いずれの方式にも得意・不得意な領域があり、互いを補いながらシステム開発を進めていく必要があることが分かる。また、各方式間で重なり合う部分もあるが、これは、異種方式間での相互比較による信頼性検証において重要な意味をもつと

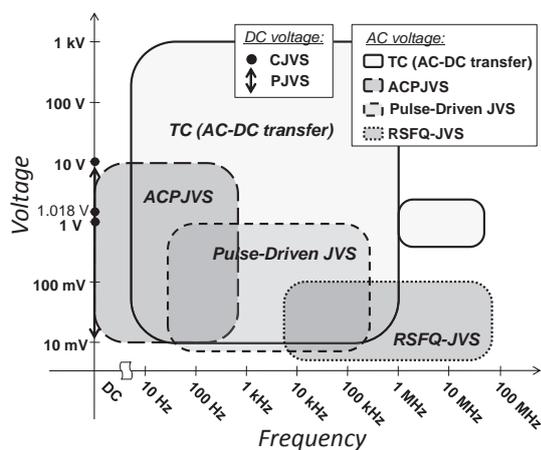


図17 電圧標準の各方式における動作領域の現状と見込み

表1 電圧標準の各方式における開発の現状

方式	直流電圧		交流電圧			
	CJVS	(DC)PJVS	TC	ACPJVS	Pulse-Driven	RSFQ
電圧値 (実効値)	1 V 1.018 V 10 V	-10 V ~ +10 V	10 mV ~ 1 kV	3 V (AIST) 10 V (NIST/PTB)	10 mV (AIST) 275 mV (NIST) 18 mV (PTB他)	7 mV (AIST)
周波数	DC	DC	10 Hz ~ 1 MHz	~ 2 kHz	~ 100 kHz	~ 10 Hz
開発フェーズ	開発済 (維持・管理)	・システムの高度化と小型化 ・校正サービス業務の開始	開発済 (周波数および電流範囲の拡大)	・不確かさの評価 ・トランジェントエラーの抑制・回避 ・システム開発	・出力電圧の増大 ・システム開発 ・不確かさの評価 ・JNT等応用開発	・回路設計 ・プロセス開発 ・システム開発
相互比較の状況	BIPMIによる各国NMI間での国際比較体制が確立	CJVSとの比較実験で9-10桁の精度での一致が報告	BIPMIによる各国NMI間での国際比較体制が確立	サンプリング方式でTCやキャリブレーションとの比較実験が報告	TCとの比較実験や交直差校正システムへの組み込みが報告	報告なし

考えられる。最後に、これまでに述べた各方式の国内外での開発状況のまとめを表1に示す。

## 6. まとめ

本稿では、ジョセフソン効果を用いた量子電圧標準の現状と課題、今後の展望などについて述べた。直流用のシステムが、30年近くにわたり国家一次標準として稼働し続け、産業界を支えている一方で、次世代の交流用システムが今まさに開発されつつある。それらの標準が実現すれば、これまで不可能であった交流電圧の波形情報の校正が可能になるなど、さまざまな応用が開けると期待される。一方で、候補とされている各方式には、それぞれ一長一短があることから、それらの特徴をよく理解した上で開発を行う必要がある。また、標準の継続的な維持管理という面からは、当然ながら、実績ある従来方式の利便性や機能性を高めていく努力も不可欠である。今後は、それら従来方式と新方式とを合わせて、適材適所での利用や開発を進めることが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、有益なご助言・ご議論をいただきました電磁気計測科の中村安宏科長、電気標準第2研究室の金子晋久室長、浦野千春主任研究員ならびに電磁気計測科の皆様にご感謝致します。また、早くインタビューをお引き受けいただきました電磁気計測科・電気標準第1研究室の藤木弘之主任研究員、西中英文主任研究員、岩佐章夫主任研究員にご感謝致します。貴重なご意見をいただくとともに、適切なご助言をいただきましたエレクトロニクス研究部門・磁束量子デバイスグループの前澤正明研究グループ長、超伝導計測デバイスグループの山森弘毅主任研究員ならびに山田隆宏研究員にご感謝致します。

## 参考文献

- 1) 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 59-6 (1990) 712-724.
- 2) 村山 泰, 坂本泰彦, 桜庭俊昭, 西中英文, 遠藤 忠：電圧標準, 電子技術総合研究所彙報 64-8 (2000) 5-9.
- 3) 吉田春雄：ジョセフソン電圧標準装置のための位相同期回路, 産総研 TODAY 10 (2002) 29.
- 4) 浦野千春, 金子晋久, 桐生昭吾：量子電気標準の現状, 電子情報通信学会誌 88-10 (2005) 829-834.
- 5) 大江武彦：量子電気標準の現状と研究開発動向, 産総研計量標準報告 6-2 (2007) 119-127.
- 6) 藤木弘之：交直差変換標準の供給—交直変換器—, 産総研 TODAY 11 (2003) 31.
- 7) I. Budovsky, A. R. Bin Zainal Abidin, A. Y. K. Yan, et al.: APMP International Comparison of AC-DC Transfer Standards at the Lowest Attainable Level of Uncertainty, IEEE Trans. Instrum. Meas. 54-2 (2005) 795-798.
- 8) H. Fujiki: Improvement of the Voltage Dependence of High-Voltage AC-DC Transfer Differences at the NMIJ, IEEE Trans. Instrum. Meas. 57-9 (2008) 1992-1997.
- 9) 中西正和, 木下攢止, 坂本 泰：抵抗標準, 電子技術総合研究所彙報 64 (2000) 11-16.
- 10) 金子晋久：量子ホール効果抵抗標準の研究の現状, 産総研計量標準報告 2-4 (2004) 617-625.
- 11) 大江武彦：集積量子化ホール抵抗素子の開発, 産総研 TODAY 3 (2009) 18.
- 12) Y. Nakamura and H. Fujiki: An Analysis on the Uncertainty of Calculating the Time Constant of the

- Quadrifilar Reversed Resistor, AIST Bulletin of Metrology (産総研計量標準報告) 3-3 (2004) 341-348.
- 13) 堂前篤志, 交流抵抗標準, 産総研TODAY 4 (2006) 34-35.
- 14) 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. 50-2 (2001) 290-293.
- 15) 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 4-3 (2006) 175-187.
- 16) 米永暁彦, 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 (2007) 101-117.
- 17) 中村安宏: Two-stage型誘導分圧器の校正と不確かさ評価, 産総研計量標準報告 4-1 (2005) 45-52.
- 18) 坂本憲彦: 誘導分圧器標準の高周波化, 産総研TODAY 2 (2009) 24.
- 19) <http://www.jemic.go.jp/>
- 20) 計量標準センター訳編: 国際単位系 (SI) (日本規格協会, 2007) 24, 103-104.
- 21) 金子晋久: “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 24-03 (2009) 50-55.
- 22) 遠藤 忠: 電気標準の変遷, 電気学会誌 120-1 (2000) 31-34.
- 23) B. D. Josephson: Possible New Effect in Superconducting Tunneling, Phys. Lett. 1-7 (1962) 251-253.
- 24) 原 宏, 菅原昌敬 訳 (T. Van Duzer and C. W. Turner 著): 超伝導デバイスおよび回路の原理 (コロナ社, 1983) 第4章.
- 25) 菅野卓雄 監訳 (A. Barone and G. Paternò 著): ジョセフソン効果の物理と応用 (近代科学社, 1988) .
- 26) 岸野正剛: 超伝導エレクトロニクスの物理 (丸善, 1993) 第4章.
- 27) 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. 1-1 (1991) 3-28.
- 28) J.-S. Tsai, A. K. Jain and J. E. Lukens: High-Precision Test of the Universality of the Josephson Voltage-Frequency Relation, Phys. Rev. Lett. 51-4 (1983) 316-319.
- 29) A. K. Jain, J. E. Lukens and J.-S. Tsai: Test for Relativistic Gravitational Effects on Charged Particles, Phys. Rev. Lett. 58-12 (1987) 1165-1168.
- 30) <http://physics.nist.gov/cuu/Constants/>
- 31) M. Schubert, M. Starkloff, M. Meyer, G. Wende, S. Anders, B. Steinbach, T. May and H.-G. Meyer: First Direct Comparison of a Cryocooler-Based Josephson Voltage Standard System at 10 V, IEEE Trans. Instrum. Meas. 58-4 (2009) 816-820.
- 32) B. D. Inglis: Standards for ac-dc Transfer, Metrologia 29-2 (1992) 191-199.
- 33) 天谷康孝: 交流電圧標準の現状, 産総研計量標準報告 8-2 (2011) 245-261.
- 34) Y. Amagai and Y. Nakamura: An Analysis of Low Frequency Properties in a Thermal Converter, Proc. of 27th Conf. Precision Electromagnetic Meas. (CPEM 2010) (Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS), Daejeon, Korea, June 2010) 26-27.
- 35) H. Fujiki and Y. Amagai: Frequency Characteristics of Calculable Thin-Film Multijunction Thermal Converters above 1 MHz, Proc. of 27th Conf. Precision Electromagnetic Meas. (CPEM 2010) (Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS), Daejeon, Korea, June 2010) 62-63.
- 36) C. A. Hamilton, S. P. Benz, C. J. Burroughs and T. E. Harvey: SNS Programmable Voltage Standard, IEEE Trans. Appl. Supercond. 7-2 (1997) 2472-2475.
- 37) R. L. Steiner, E. R. Williams, D. B. Newell and R. Liu: Uncertainty Improvements of the NIST Electronic Kilogram, IEEE Trans. Instrum. Meas. 56 (2007) 592-596.
- 38) I. A. Robinson and B. P. Kibble: An Initial Measurement of Planck's Constant Using the NPL Mark II Watt Balance, Metrologia 44 (2007) 427-440.
- 39) F. Piquemal, A. Bounouh, L. Devoille, N. Feltin, O. Thevenot and G. Tracon: Fundamental Electrical Standards and the Quantum Metrological Triangle, C. R. Physique 5 (2004) 857-879.
- 40) H. Yamamori, M. Ishizaki, M. Itoh and A. Shoji: NbN / TiN<sub>x</sub> / NbN / TiN<sub>x</sub> / NbN Double-Barrier Junction Arrays for Programmable Voltage Standards, Appl. Phys. Lett. 80-8 (2002) 1415-1417.
- 41) 東海林 彰: デスクトップ型ジョセフソン電圧標準システムを開発, 産総研TODAY 8 (2002) 18.
- 42) <http://www.iqantum.co.jp/>
- 43) T. Yamada, Y. Murayama, H. Yamamori, H. Sasaki, A. Shoji, A. Iwasa, H. Nishinaka and Y. Nakamura: Comparison of a Multichip 10-V Programmable Josephson Voltage Standard System with a Superconductor-

- Insulator-Superconductor-Based Conventional System, *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 58-4 (2009) 832-837.
- 44) 岩佐章夫, 村山 泰, 西中英文, 中村宏安, 山田隆宏, 山森弘毅, 佐々木 仁, 東海林 彰: プログラマブルジョセフソンによるDMMの電圧レンジ校正, NMIJ直流低周波電気標準クラブ 第8回クラブ研究会資料 (2008.7.30) .
- 45) P. D. Dresselhaus, Y. Chong, J. H. Plantenberg and S. P. Benz: Stacked SNS Josephson Junction Arrays for Quantum Voltage Standards, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 13-2 (2003) 930-933.
- 46) C. J. Burroughs, A. Rüfenacht, P. D. Dresselhaus, S. P. Benz and M. M. Elsbury: A 10 Volt "Turnkey" Programmable Josephson Voltage Standard for DC and Stepwise-Approximated Waveforms, *Measure* 4-3 (2009) 70-75.
- 47) J. Kohlmann, F. Müller, O. Kieler, R. Behr, L. Palafox, M. Kahmann and J. Niemeyer: Josephson Series Arrays for Programmable 10-V SINIS Josephson Voltage Standards and for Josephson Arbitrary Waveform Synthesizers Based on SNS Junctions, *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 56-2 (2007) 472-475.
- 48) M. Maruyama, T. Yamada, H. Sasaki, H. Yamamori, C. Urano, and N. Kaneko: Generation of AC Waveforms Using a NbN-Based Programmable Josephson Voltage Standard System with a 10-K Cooler, *Proc. of 27th Conf. Precision Electromagnetic Meas. (CPEM 2010)* (Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS), Daejeon, Korea, June 2010) 8-9.
- 49) C. J. Burroughs, Jr., S. P. Benz, P. D. Dresselhaus, B. C. Waltrip, T. L. Nelson, Y. Chong, J. M. Williams, D. Henderson, P. Patel, L. Palafox and R. Behr: Development of a 60 Hz Power Standard Using SNS Programmable Josephson Voltage Standards, *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 56-2 (2007) 289-294.
- 50) L. Palafox, R. Behr, W. G. K. Ihlenfeld, F. Müller, E. Mohns, M. Seckelmann and F. Ahlers: The Josephson-Effect-Based Primary AC Power Standard at the PTB: Progress Report, *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 58-4 (2009) 1049-1053.
- 51) C. J. Burroughs, Jr., A. Rüfenacht, S. P. Benz, P. D. Dresselhaus, B. C. Waltrip and T. L. Nelson: Error and Transient Analysis of Stepwise-Approximated Sine Waves Generated by Programmable Josephson voltage Standards, *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 57-7 (2008) 1322-1329.
- 52) S. P. Benz, C. J. Burroughs, P. D. Dresselhaus, M. M. Elsbury and D. Olaya: Measurement Capacities of AC Josephson Voltage Sources, 9th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS '09), (Dresden, 2009).
- 53) L. Palafox, G. Ramm, R. Behr, W. G. K. Ihlenfeld and H. Moser: Primary AC Power Standard Based on Programmable Josephson Junction Arrays, *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 56-2 (2007) 534-537.
- 54) A. Rüfenacht, C. J. Burroughs, Jr., S. P. Benz, P. D. Dresselhaus, B. C. Waltrip and T. L. Nelson: Precision Differential Sampling Measurements of Low-Frequency Synthesized Sine Waves With an AC Programmable Josephson Voltage Standard, *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 58-4 (2009) 809-815.
- 55) A. Rüfenacht, C. J. Burroughs and S. P. Benz: Precision Sampling Measurements Using ac Programmable Josephson Voltage Standard, *Rev. Sci. Instrum.* 79 (2008) 044704-1-9.
- 56) S. P. Benz and C. A. Hamilton: A Pulse-Driven Programmable Josephson Voltage Standard, *Appl. Phys. Lett.* 68-2 (1996) 3171-3173.
- 57) 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.* 1-1 (1991) 3-28.
- 58) M. Maezawa and A. Shoji: Overdamped Josephson Junctions with Nb/AlO<sub>x</sub>/Al/AlO<sub>x</sub>/Nb Structure for Integrated Circuit Application, *Appl. Phys. Lett.* 70-26 (1997) 3603-3605.
- 59) M. Hidaka, S. Nagasawa, K. Hinode and T. Satoh: Improvements in Fabrication Process for Nb-Based Single Flux Quantum Circuits in Japan, *IEICE Trans. Electron.* E91-C (2008) 318-324.
- 60) C. Urano, N. Kaneko, M. Maezawa, S. Gorwadkar, T. Itatani, H. Saitou, J. Maeda and S. Kiryu: Operation of Josephson Junctions With Current Pulses Generated by Triggering a Cold Photo Detector With an Optical Comb, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 17-2 (2007) 870-873.
- 61) C. Urano, M. Maruyama, N. Kaneko, H. Yamamori, A. Shoji, M. Maezawa, Y. Hashimoto, H. Suzuki, S. Nagasawa, T. Satoh, M. Hidaka and S. Kiryu: Operation of a Josephson Arbitrary Waveform Synthesizer with Optical Data Input, *Supercond. Sci. Technol.* 22 (2009) 114012 (4pp).
- 62) M. Maruyama, C. Urano, N. Kaneko, H. Yamamori, A.

- Shoji, M. Maezawa, Y. Hashimoto, H. Suzuki, S. Nagasawa, T. Satoh, M. Hidaka and K. Shogo: Data Coding Method for Driving a Josephson Arbitrary Waveform Synthesizer using an Optical Modulator, Proc. 12th International Superconductive Electronics Conference (ISEC 2009), (Fukuoka, 2009) HF-P24.
- 63) C. Urano, M. Maruyama, N. Kaneko, H. Yamamori, A. Shoji, M. Maezawa, Y. Hashimoto, H. Suzuki, S. Nagasawa, T. Satoh, M. Hidaka and S. Kiryu: Josephson Arbitrary Waveform Synthesizer Using Opto-Electronics, Proc. 9th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS '09), (Dresden, 2009) P-533.
- 64) M. Maruyama, C. Urano, N. Kaneko, H. Yamamori, A. Shoji, M. Maezawa, Y. Hashimoto, H. Suzuki, S. Nagasawa, T. Satoh, M. Hidaka and S. Kiryu: Utilization of a Cryo-Prober System for Operation of a Pulse-Driven Josephson Junction Array, Proc. 9th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS '09), (Dresden, 2009) P-284.
- 65) Y. Hashimoto, S. Nagasawa, T. Satoh, K. Hinode, H. Suzuki, T. Miyazaki, M. Hidaka, N. Yoshikawa, H. Terai and A. Fujimaki: Superconductive Single-Flux-Quantum Circuit/System Technology and 40Gb/s Switching System Demonstration, 2008 IEEE Int. Solid-State Circuits Conf. (ISSCC 2008) (San Francisco, 2008) 29.6.
- 66) T. Ishibashi, T. Furuta, H. Fushimi, S. Kodama, H. Ito, T. Nagatsuma, N. Shimizu and Y. Miyamoto: InP/InGaAs Uni-Traveling-Carrier Photodiodes, IEICE Trans. Electron. E83-C-6 (2000) 938-949.
- 67) Y. Hashimoto, H. Suzuki, M. Maruyama, K. Fujiwara and M. Hidaka: 40 Gbit/s Operation of Superconductive Single Flux Quantum Digital Integrated Circuit with Optical Data Input, Electron. Lett. 45-1 (2009) 87-88.
- 68) S. P. Benz, P. D. Dresselhaus, C. J. Burroughs and N. F. Bergren: Precision Measurements Using a 300 mV Josephson Arbitrary Waveform Synthesizer, IEEE Tran. Appl. Supercond. 17-2 (2007) 864-869.
- 69) O. A. Chevtchenko, H. E. van den Brom, E. Houtzager, R. Behr, J. Kohlmann, J. M. Williams, T. J. B. M. Janssen, L. Palafox, D. A. Humphreys, F. Piquemal, S. Djordjevic, O. Monnoye, A. Poletaev, R. Lapuh, K.-E. Rydler and G. Eklund: Realization of a Quantum Standard for AC Voltage: Overview of a European Research Project, IEEE Trans. Instrum. Meas. 54-2 (2005) 628-631.
- 70) Y. Chong: Research Activities on Josephson AC Waveform Synthesis in KRISS, Proc. 12th International Superconductive Electronics Conference (ISEC 2009), (Fukuoka, 2009) HF-P13.
- 71) S. P. Benz, P. D. Dresselhaus, A. Rufenacht, N. F. Bergren, J. R. Kinard and R. P. Landim: Progress Toward a 1 V Pulse-Driven AC Josephson Voltage Standard, IEEE Tran. Instrum. Meas. 58-4 (2009) 838-843.
- 72) S. P. Benz, C. J. Burroughs, Jr., P. D. Dresselhaus, N. F. Bergren, T. E. Lipe, J. R. Kinard and Y. Tang: An AC Josephson Voltage Standard for AC-DC Transfer-Standard Measurements, IEEE Trans. Instrum. Meas. 56-2 (2007) 239-243.
- 73) S. P. Benz, J. Qu, H. Rogalla, D. R. White, P. D. Dresselhaus, W. L. Tew and S. W. Nam: Improvements in the NIST Johnson Noise Thermometry System, IEEE Trans. Instrum. Meas. 58-4 (2009) 884-890.
- 74) H. E. van den Brom, E. Houtzager, O. Chevtchenko, G. Wende, M. Schubert, T. May, H.-G. Meyer, O. Kieler and J. Kohlmann: Synthesis of Sinusoidal Signals with a Josephson Arbitrary Waveform Synthesizer, Supercond. Sci. Technol. 20 (2007) 413-417.
- 75) H. E. van den Brom, E. Houtzager, B. E. R. Brinkmeier and O. A. Chevtchenko: Bipolar Pulse-Drive Electronics for a Josephson Arbitrary Waveform Synthesizer, IEEE Trans. Instrum. Meas. 57-2 (2008) 428-431.
- 76) J. M. Williams, T. J. B. M. Janssen, L. Palafox, D. A. Humphreys, R. Behr, J. Kohlmann and F. Müller: The Simulation and Measurement of the Response of Josephson Junctions to Optoelectronically Generated Short Pulses, Supercond. Sci. Technol. 17 (2004) 815-818.
- 77) B. Baek, P. D. Dresselhaus and S. P. Benz: Co-Sputtered Amorphous  $Nb_xSi_{1-x}$  Barriers for Josephson-Junction Circuits, IEEE Trans. Appl. Supercond. 16 (2006) 1966-1970.
- 78) D. Olaya, P. D. Dresselhaus, S. P. Benz, J. Bjarnason and E. N. Grossman: Amorphous Nb-Si Barrier Junctions for Voltage Standard and Digital Applications, IEEE Trans. Appl. Supercond. 19-3 (2009) 144-148.
- 79) J. Kohlmann, O. F. Kieler, F. Müller, D. Schleussner, L. Palafox, R. Behr: SNS Junction Series Arrays for Josephson Voltage Standards, 9th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS '09), (Dresden, 2009).
- 80) C. A. Hamilton: Josephson Voltage Standard Based on Single-Flux-Quantum Voltage Multipliers, IEEE Trans. Appl. Supercond. 2-3 (1992) 139-142.

- 81) V. K. Semenov: Digital to Analog Conversion Based on Processing of the SFQ Pulses, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 3-1 (1993) 2637–2640.
- 82) H. Sasaki, S. Kiryu, F. Hirayama, T. Kikuchi, M. Maezawa, A. Shoji and S. V. Polonsky: RSFQ-Based D/A Converter for AC Voltage Standard, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 9-2 (1999) 3561–3564.
- 83) 前澤正明, 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年電子情報通信学会総合大会 (東京都, 2004) SC-8-3.
- 84) M. Maezawa, F. Hirayama and M. Suzuki: Rapid Single Quantum Digital-to-Analog Converter for ac Voltage Standard, *Physica C* 426–431 (2005) 1674–1679.
- 85) F. Hirayama, M. Maezawa and M. Suzuki: One-Bit Digital-to-Analog Converter Based on Rapid Single Flux Quantum Circuit, *Physica C* 463–465 (2007) 1084–1087.
- 86) T. Tanaka, T. Kobayashi, M. Moriya, Y. Mizugaki and M. Maezawa: Stacked-SQUID-Based Voltage Multiplier Cell Generating Twofold or Fourfold Voltage, *Proc. 12th International Superconductive Electronics Conference (ISEC 2009)*, (Fukuoka, 2009) SP-P22.
- 87) K. I. Khabipov, D. Hagedorn, F.-Im. Buchholz, J. Kohlman, F. Maibaum, M. Schilling and J. Niemeyer: Development of RSFQ Voltage Drivers for Arbitrary AC Waveform Synthesizers, *J. Phys: Conference Series* 43 (2006) 1175–1178.
- 88) F.-Im. Buchholz, D. V. Balashov, R. Dolata, D. Hagedorn, M. I. Khabipov, J. Kohlman, A. B. Zorin and J. Niemeyer: LTS Junction Technology for RSFQ and Qubit Circuit Applications, *Physica C* 445–448 (2006) 930–936.