

# 電圧標準 ( Voltage Standards )

基礎計測部

村山 泰, 坂本泰彦, 桜庭俊昭, 西中英文, 遠藤 忠

Voltage standard systems using Josephson junction arrays at ETL and measurement data of commercially available Zener-diode voltage reference standards are described.

電圧標準としては長らく化学変化を利用したカドミウム標準電池(ウェストン電池)が使われてきた。発生電圧は約1.0186Vで経年変化は数 $\mu\text{V}$ /年以下であり、長期安定度にすぐれ、保存と使用に注意すれば長期に渡って使用できる。化学作用であるため周囲環境の影響を受けやすく、電極物質とその電解溶液からなる構造上、振動に弱い、まして転倒することなどできない。温度係数は約 $-40\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ であり、ppm以下の精度が求められる標準としては、厳重な温度管理が求められる。

標準の恒常性、普遍性を求め、1970年代、量子現象であるジョセフソン効果を利用した電圧標準が実現された。電総研では1977年からジョセフソン効果を用いた電圧標準を国家標準として採用している<sup>1)</sup>。当初、発生電圧はジョセフソン素子2個による約10mVであった。これと100:1の抵抗分圧器を用いて、二次標準となった標準電池の校正が測定対象であった。ジョセフソン素子作製技術の向上により、1980年代半ばにジョセフソン素子を多数(1000~3000個)ならべ、1Vの電圧を発生する1-V JJA (Josephson junction array)が登場し、1Vの電圧が直接ジョセフソン素子の発生する電圧で測られるようになった。電総研でも1-V JJAを用いた1Vジョセフソン電圧標準システムの開発を行い、1990年から1Vシステムにより電圧の校正を行っている<sup>2)</sup>。

一方、0.1ppmよりよい安定度を謳うツェナー・ダイオードを基準にした標準電圧発生器が市販されるようになった。標準電池に比べ、温度係数が小さく、機械的なショックにも強く、その取り扱いが容易なことから、産業界や国立の標準研究機関などで、二次標準器やトランスファー標準器として広く使われるようになってきている。市販のツェナー標準電圧発生器の出

力電圧は10V, 1.018V(あるいは1V)である。産業界、ことに工場現場では10Vが多く使われており、各標準研究機関は10V出力を高い精度で供給することが求められている。

電総研ではツェナー標準電圧発生器の10V出力の校正を行うため、1Vシステムと10:1の抵抗分圧器とを用いた自動10V測定システムを完成し、日々の校正に対応している<sup>3)</sup>。10:1の抵抗分圧器を用いた自動10V測定システムの構成を図1に示す。水銀電池を用い、抵抗分圧器に一定電流を流し、分圧器の10V, 1Vの電圧をそれぞれツェナー標準電圧発生器の10V出力および1Vジョセフソン電圧と比較する。次に回路のオフセットや熱起電力を消去するために、回路の極性を反転して測る。さらに同じ測定を逆の順序で繰り返し、時間的に平均することで熱起電力や分圧器に流す電流の一次の変動を消去する。電流の安定に時間がかかるた

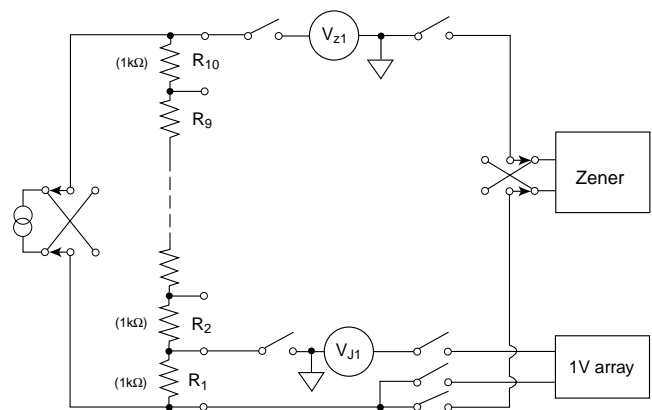


図1 1Vジョセフソン電圧標準システムと10:1抵抗分圧器とを用いたツェナー標準電圧発生器の10V出力の測定回路。

KEY WORDS: 電圧標準, ジョセフソン接合アレー(JJA), ツェナー標準電圧発生器

表1 1Vシステムと10Vシステムにおける主なパラメータ。

	1-V array	10-V array
Array	1-V array	10-V array
• Number of JJ's	3000 JJ × 1 line	5036 JJ × 4balanches
• Junction size	25 × 40 μm <sup>2</sup>	12.5 × 40 μm <sup>2</sup>
Millimeter wave		
• Operating frequency	93 ~ 94 GHz	90 ~ 91 GHz
• Gunn oscillator	60 mW(Millitech)	90 mW(Japan Energy)
• Accuracy	Better than 1 Hz	←
• Transmission from room temperature to low temperature	Dielectric waveguide (insertion loss : 3 ~ 5 dB)	←
Maximum zero-crossing voltage	2.7 V	14 V
Detection method	Null balancing method	←
• Balance voltage	Less than 25 nV	Less than 500 nV
• Step selection	± 1 step	± 5 step
Bias circuit connection	Connected during balance	Disconnected during balance (use of mercury relay)

め、通常行っている3点の測定に約2時間を要し、また測定前後に行う分圧器の自己校正に約8時間ずつを要する。分圧器の自己校正は全自動なので、夜に行っているが、分圧器に電流を流しはじめてから安定するまでに約2日を要する。不確かさに関しては、分圧器の各エレメントからの漏れ電流の評価がむずかしく、これに基づく不確かさが大きい。ツェナー標準電圧発生器の10V出力を測定したときの不確かさを約0.014ppmと見積もっている。

簡便で素早く、かつより高い精度で10Vを測定できるように、10-Vアレーを用いた10Vジョゼフソン電圧標準システムの開発を行った<sup>4)</sup>。基本的な構成は1Vシステムと同じで、ジョゼフソン素子の数を約2万個に増やした。1Vシステムと10Vシステムのパラメータを対比して表1に示す。図2に10-Vアレーを用いたツェナー標準電圧発生器の10V出力の測定回路を示す。検出器として用いたDVMの直線性エラーを小さくするために、我々は零位法を用いている。ジョゼフソン素子は照射するマイクロ波の周波数による一定間隔の定電圧ステップを発生し、その電圧は周波数によって決まる。(我々の場合1ステップ約200μVである。)被測定電圧に最も近い電圧ステップにアレーをバイアスし、DVMで読み取る差電圧が小さくなるようにマイクロ波の周波数を変え、被測定電圧とアレー電圧とをバランスさせ、そのときの周波数とステップの数とから正確な電圧が得られる。1Vシステムではバイアス回路

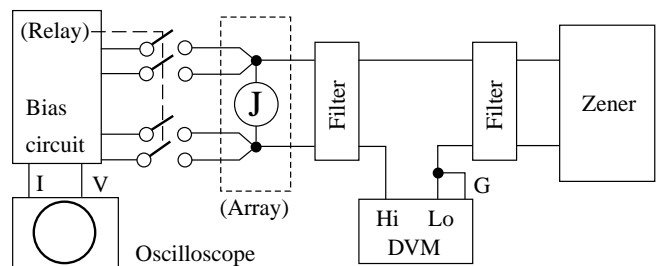


図2 10-Vアレーを用いたツェナー標準電圧発生器の出力電圧の測定回路。

を繋いだまま電圧測定を行っているが、10Vシステムでは電圧測定時に、外部雑音やバイアス回路の漏れ電流の影響を避けるため、絶縁抵抗に注意した水銀リレーを用いて、バイアス回路を切り離している。被測定電圧に最も近い電圧ステップにアレーをバイアスしてから、バイアス回路を切り離すのであるが、このとき目的のステップとは違うステップへの跳びがよく起る。被測定電圧とアレー電圧との差電圧が小さくなるようにマイクロ波の周波数を変えるのであるが、周波数の変化量が大きすぎるとステップの状態が変わり、ステップから外れてしまう。このマイクロ波で調整できるステップの数を示したのが表1のStep selectionである。10Vの測定では数ステップの跳びがあっても測定できるのに対し、1Vの測定ではステップの跳びは許されず、目的のステップを捕まえるまでバイアス回路のオンオフを繰り返すことになり、実際には測定に

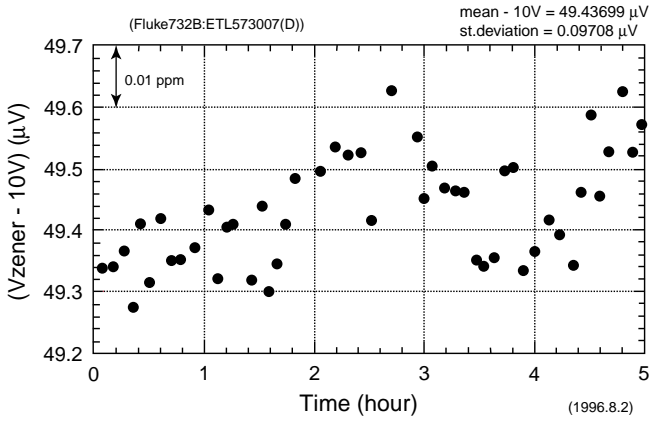
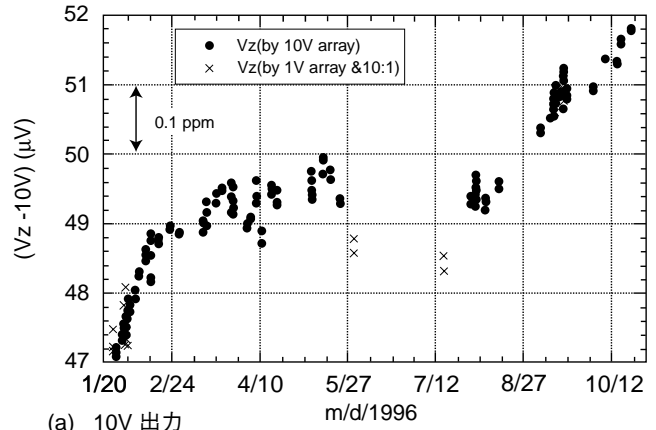


図3 10-Vアレーによるツェナー標準電圧発生器 (Fluke 732B) の10V出力の測定例 (短期安定度)。

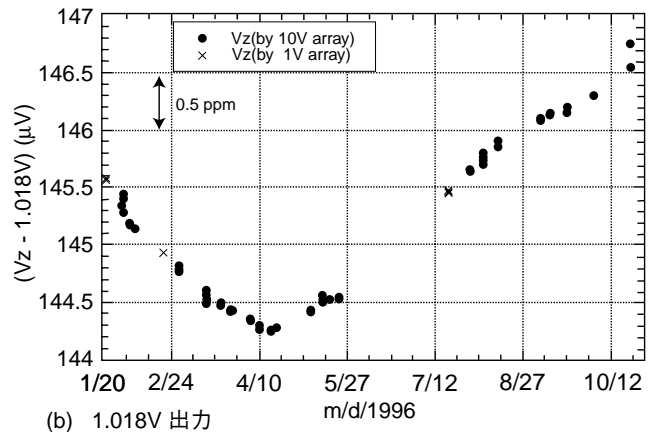
時間が掛かっている。ステップの跳びはスイッチのチャタリングなどで起ると考えられるが、その影響を少なくするために、チャタリングの少ない水銀リレーを用いたが、この問題は完全には解決されていない。今後の課題である。

ツェナー標準電圧発生器の10V出力の測定において、通常行っている3点の測定にかかる時間は10分から20分程度であり、その不確かさを $6 \times 10^{-9}$ と見積もっている。10V出力を連続して測定した例を図3に示す。また長期測定データを図4に示す。このツェナー標準電圧発生器は明らかに季節変動を示している。原因としては、湿度の影響が示唆されているので<sup>5)</sup>、今後湿度の影響も調べたいと思っている。10V出力と1V出力のドリフト傾向が幾分異なるが、1V出力は10V出力を分圧していることを考えると、このツェナーの1V出力は分圧器の変動が大きく影響しているものと思われる。その後、我々の10-Vアレーは発生電圧が不安定となったため、現在はHYPRES製のアレーを用いている。

1Vシステムから10Vシステムに切り替えるための準備として、10Vシステムの長期信頼性のテストおよびデータの連続性を得る目的で、ツェナー標準電圧発生器の10V出力を10Vシステム、および、1Vシステムと10:1分圧器を用いた自動10V測定システムとで交互に測ることにより二つのシステムの比較を行った。二つのシステム比較の手順は、先ず10Vシステムでツェナーを2点測り、次に10:1分圧器を用いたシステムで同一ツェナーを4点測り、再び10Vシステムでツェナーを2点測るという順である(1例だけ逆の順序)。測定結果



(a) 10V出力



(b) 1.018V出力

図4 ツェナー標準電圧発生器(Fluke 732B)の出力電圧の測定例 (a) 10V出力, (b) 1.018V出力。

を表2(a)に示す。表2において測定値の後の括弧は測定値の不確かさ、測定値の差の後の括弧はふたつの不確かさのRSS (root of sum of squares)である。ふたつのシステムによる測定値の差は、2例を除いて測定の不確かさの範囲内であるが、分圧器を用いたシステムの不確かさが大きいいためその中に隠れてしまっている。ツェナー標準電圧発生器の短期安定度も問題となる。図3では、ツェナーの出力電圧は短い時間では $0.2 \mu\text{V}$ 位動いているように見える。10:1分圧器を用いたシステムでは1点の測定に約40~50分かかっているのに対して、10-Vアレーによる測定は1点につき5,6分の短い時間で行われており、時間的なアンバランスも大きい。今回、長期間に渡って測定を行うことでデータ数を増やして比較を行ったが、二つのシステム間に有意の差があるようには見えない。

発生電圧1Vについても一つのツェナー標準電圧発生器の1.018V出力を10Vシステムと1Vシステムとで

表2 10Vシステムと1Vシステムによるツェナー標準電圧発生器の出力電圧の測定値とその差, (a) 10V出力, (b) 1.0180V出力。

(a) 10V出力				
date	10-V array system (Vz - 9.999V) ( $\mu$ V)	1-V array system & 10:1 divider (Vz - 9.999V) ( $\mu$ V)	difference in two means ( $\mu$ V)	
1998- 7-15	979.575 (0.030)	979.605 (0.104)	-0.030 (0.108)	
7-17	979.317 (0.027)	979.247 (0.122)	0.070 (0.125)	
9-3	980.821 (0.064)	980.839 (0.112)	-0.018 (0.129)	
10-21	981.991 (0.043)	982.003 (0.159)	-0.012 (0.165)	
11-18	983.410 (0.030)	983.328 (0.183)	0.082 (0.185)	
12-16	985.166 (0.043)	985.027 (0.102)	0.139 (0.110)	
1999- 1-26	986.891 (0.056)	987.067 (0.277)	-0.175 (0.283)	
6-3	986.434 (0.079)	986.546 (0.103)	-0.112 (0.130)	
6-24	986.522 (0.039)	986.658 (0.115)	-0.133 (0.115)	
7-15	987.141 (0.057)	987.191 (0.129)	-0.050 (0.141)	

(b) 1.018V出力				
date	10-V array system (Vz - 1.018V) ( $\mu$ V)	1-V array system (Vz - 1.018V) ( $\mu$ V)	difference in two means ( $\mu$ V)	
1998- 9-8	138.132 (0.004)	138.126 (0.004)	0.006 (0.005)	
10-5	138.299 (0.010)	138.325 (0.005)	-0.026 (0.011)	
10-28	138.417 (0.004)	138.427 (0.009)	-0.010 (0.010)	
11-12	138.365 (0.014)	138.377 (0.006)	-0.012 (0.015)	
11-25	138.205 (0.005)	138.212 (0.006)	-0.007 (0.007)	
12-3	138.049 (0.004)	138.044 (0.017)	0.005 (0.018)	
12-25	137.794 (0.006)	137.816 (0.011)	-0.022 (0.012)	
1999- 1-7	137.568 (0.005)	137.584 (0.010)	-0.016 (0.011)	
1-29	137.246 (0.009)	137.219 (0.052)	0.027 (0.052)	
6-4	137.223 (0.005)	137.225 (0.006)	-0.002 (0.008)	
6-25	137.412 (0.005)	137.415 (0.005)	-0.003 (0.008)	
7-15	137.604 (0.006)	137.609 (0.005)	-0.005 (0.007)	
9-30	138.248 (0.014)	138.257 (0.004)	-0.009 (0.014)	

交互に測ることによって二つのシステムの比較を行った。測定結果を表2(b)に示す。不確かさの要因は二つのシステムとも同じであり、一番大きな要因は測定値の分散である。二つのシステムによる測定値の差は、2例を除いて測定の不確かさの範囲内にある。ツェナーの出力電圧の変動を考えると、余り細かい議論はできないが、これらの結果から、二つのシステムによる測定値の間に有意の差はないと考えている。ツェナー標準電圧発生器を仲介とした比較ではこれ以上の議論はむずかしい。今後、10Vについては10:1分圧器の電圧比を直接測り、10:1の比の確認、1Vについては二つのシステムのステップ電圧同士の直接比較を行いたいと思っている。

電圧の標準として要求されることは、何時でも稼動

できる状態にあることである。1Vシステムで使用している1Vアレーは、100 lのコンテナの液体ヘリウム中に常時保存されていて、何時でも電圧を発生できる状態にある。我々は10年以上にわたってトラブルなく1Vジョゼフソン電圧標準システムを運用してきた。一方、10Vシステムは上述の比較測定を行っている半年の間にヘリウム補給のトラブルを3度起こしてしまった。1999年2月にヘリウム補給部分を作りかえ、その後トラブルは起きていない。

以上が電総研における電圧標準の現状である。今後、10Vジョゼフソン電圧標準システムをより使いやすくするために、バイアス回路を切り離すときのステップの跳びの問題、測定中より長い時間ステップ上に安定に留まっていること、測定リード線中の電圧ド

リフトの軽減などを解決して、より素早い、より高い精度の測定を目指したい。

最近プログラマブルアレーとよばれる、電圧を即座にセットできる、ジョゼフソンアレーが開発されている<sup>6)</sup>。発生電圧は今のところ1Vまでである。もともとは交流波形の合成を目指したものであるが、任意の電圧を即座にセットできることから、今後1Vまでの電圧標準はこの方式に変わる可能性があるとともに、正確な電圧測定器として活用されるようになるであろう。

## 参考文献

- 1) 電総研ニュース, 328号, 1977.5
- 2) Y.Sakamoto, H.Yoshida, T.Sakuraba, A.Odawara, Y.Murayama, and T.Endo, IEEE Trans. Instrum. & Meas., vol.40, p.312, 1991
- 3) Y.Sakamoto, T.Endo, and T.Sakuraba, IEEE Trans. Instrum. & Meas., vol.42, p.583, 1993
- 4) Y.Murayama, T.Sakuraba, Y.Sakamoto, A.Iwasa, H.Yoshida, T.Kozakai, and T.Endo, IEEE Trans. Instrum. & Meas., vol.46, p.233, 1997
- 5) T.J.Witt, D.Reymann, and D.Avrans, IEEE Trans. Instrum. & Meas., vol.44, p.226, 1995
- 6) C.A.Hamilton, C.J.Burroughs, S.P.Benz, and J.R.Kinard, IEEE Trans. Instrum. & Meas., vol.46, p.224, 1997

## 関連ラボ

電子計測第3ラボ

( Electronic Metrology Lab. )

## 研究項目及び研究期間

量子電気標準及び低周波電気標準の高度化の研究

(平成6年度～11年度)

新しい直流・低周波電気標準の開発及び高度化の研究

(平成12年度～17年度)