

## はじめに

旧、電子技術総合研究所では、1892年にウエストンによって発明された標準電池を試作し、これらの標準電池を群管理することによって、長年にわたり直流電圧の国家標準を支えてきた。特に、精密測定には、ウエストンカドミウム標準電池のうち酸性飽和型標準電池が用いられた。この標準電池は、厳重な温度管理下であれば、0.2ppm/年程度の安定度を長年に及んで保持することが可能であった。また、当時は電圧標準の維持・供給だけではなく、産業界の要請により標準電池の売却業務も取り扱っていた。これらの一貫した産業界への寄与により、標準電池が広く社会に普及し電圧標準の国家基盤を担っていた。

標準電池は、電圧標準の維持・供給の観点から見ると幾つかの欠点があった。温度や機械的振動によって電圧値が変動しやすく、また、内部抵抗が400～800Ωと大きかったため、極力電流を流してはいけないなど取り扱いが不便であった。この欠点を改良するための研究開発も盛んに行われ多くの新しい標準電池が試作されたが、これに変わって、安定度の向上したツェナー標準電圧発生器が出現し電圧標準用に使用され始めた。これを機に、標準電池は、いつしか時代の変遷とともにその姿を消し、取り扱いの便利なツェナー標準電圧発生器に直流電圧標準の維持・供給の役割を譲ることとなった。

ツェナー標準電圧発生器は、出力電圧が安定でかつ経年変化が小さいため、多くの製造企業や認定事業者の間で、現場用の常用標準あるいは特定二次標準器として幅広く使用されている。世界的にも幅広く支持されており、維持・供給用の標準器としてではなく、国際比較の仲介器としての重要な役割も果たしている。産業技術総合研究所計量標準総合センター（NMIJ）では、特定二次標準器の校正および依頼試験等にツェナー標準電圧発生器の校正を受け付けている。

近年、このツェナー標準電圧発生器も測定精度の向上にともない、多くの問題点が指摘され始めた。1996年～1997年にかけてアジア太平洋計量計画（APMP）の直流電圧標準国際比較が実施されたが、校正機関の相対湿度に40%～70%の大きな相違があったため、仲介器の校正値が湿度依存により大きく変動したことが報告された。この他にも、温度・圧力等による依存性が、NMIJを始め多くの研究機関より発表されている。

NMIJにおいては、電圧標準の基盤を確固たるものにするために、巡回比較用の仲介器の準備を推し進めてきた。2000年～2004年にかけて、4台の仲介器の湿度・温度・圧力の各環境特性および経年変化等について明らかにしてきた。また、これに付随して、仲介器の絶縁抵抗を測定するための装置も開発した。4台の仲介器は、いずれも優れた環境特性を示していることが判明し、NMIJの校正値が、各校正現場の環境条件によって大きく変動することはないと期待できる。各校正現場の現有する精度を熟考して、各特性係数を的確に処置することにより、より精度の高い巡回比較が実施できると考えている。

本報告は、産業技術総合研究所の所有する仲介器が、校正能力を審査するための技能試験に使用された場合に、各校正現場の技術者および校正担当者が、仲介器の特質を把握して、より適切に技能試験に対処できるように技術資料としてまとめたものである。

# 電圧標準に用いる仲介用標準器の環境特性

## 目 次

### Abstract

第1章 産業技術総合研究所の仲介用ツェナー標準電圧発生器について	1
1.1 仲介器の構造	1
1.1.1 仲介器の取り扱い	1
1.2 アップグレードボックスの特長	2
1.3 出力端子間の絶縁抵抗	2
1.3.1 絶縁抵抗の測定原理	3
1.3.2 Y-Δ変換高抵抗ブリッジ	3
1.3.3 測定手順	4
1.3.4 測定精度	4
1.3.5 測定方法	5
1.3.6 測定結果	6
第2章 仲介用ツェナー標準電圧発生器の湿度特性	8
2.1 恒温恒湿槽	8
2.2 測定方法	8
2.3 実験結果	8
2.4 湿度係数	11
第3章 仲介用ツェナー標準電圧発生器の温度特性	13
3.1 駆動方法の相違による影響	13
3.1.1 測定手順	13
3.1.2 測定結果	13
3.2 環境温度の影響（予備測定）	15
3.2.1 測定手順	15
3.2.2 測定結果	15
3.3 測定方法	15
3.4 実験結果	15
3.5 温度係数	18
第4章 仲介用ツェナー標準電圧発生器の圧力特性	21
4.1 測定方法	21
4.2 測定結果	22
4.3 圧力係数	22
第5章 仲介用ツェナー標準電圧発生器の経年変化	27
5.1 季節変動	27
5.2 測定方法	27
5.3 測定結果	29
5.4 経年変化率	29
第6章 まとめ	32

## Abstract

Recently, Zener voltage references have used as high quality secondary voltage standards. In some advanced industrial laboratories that do not have Josephson standards, the Zener voltage references are employed as the traveling standards for maintaining the values calibrated by using Josephson standards at National Metrology Institute of Japan (NMIJ) or as primary reference standards for calibrating many voltmeters, digital multi meters, and so on.

The four Zener voltage references (Fluke 732B) belonging to the NMIJ have been housed in a box which is termed an “up-graded box”. This box needs to obtaine higher insulation resistance of the Zener voltage references and to measure the Zener voltage references with the computer-controlled systems.

To measure high insulation resistances of the traveling standards, a high-resistance bridge based on principle of Y- $\Delta$  conversion was designed at the NMIJ. By this bridge, it defined that the Zener voltage references using up-graded box have approximately three times as higher insulation resistances as only the Zener voltage references. The insulation resistances of four Zener voltage references by this improvement were enhanced from 0.7 T $\Omega$  to about 2 T $\Omega$ . At the same time, a type B standard uncertainty which is caused by the insulation resistances could be reduced to 1/3.

It is desired that these Zener voltage references show no change of values with different environmental conditions. However, it was found that output voltages of the Zener voltage references actually change according to the change in ambient relative humidity, temperature and pressure. Therefore, it is very important to specify variations of the output voltages due to environmental factors.

We performed a study to evaluate the behavior relative to the environmental changes of the 1.018V and 10V output voltages of four Zener voltage references. Consequently, it defined individual environmental characteristic to use Zener voltage references as the traveling standards in DC voltage standards. At present, the NMIJ is preparing to contribute these Zener voltage references for the skill testing. National Institute of Technology and Evaluation (NITE) also will employ four Zener voltage references for many industries.

Correlations between output voltages of four Zener voltage standards and environmental factors of relative humidity, temperature and pressure were measured at the NMIJ. Four Zener voltage references found to have negligible small humidity dependence, the temperature and pressure dependence was of order of -0.01 ppm/K and of 0.002 ppm/hPa respectively. The above measurement results enabled us to apply corrections when used the Zener voltage standards as the traveling standards for comparing voltage standards between the NMIJ and industries having different environmental conditions.



# 第1章 産業技術総合研究所の仲介用ツェナー標準電圧発生器について

## 1.1 仲介器の構造

産業技術総合研究所（以後、産総研と呼ぶ）では、ツェナー標準電圧発生器（以後、ツェナーと呼ぶ）のjcss校正試験と依頼試験を受け付けているが、測定には自動化されたジョセフソン電圧標準測定装置を使用している。この自動化には、ツェナーの極性切り替えや出力電圧の選定操作が行われるが、これに対応するため、低熱起電力のロータリスイッチを取り付けた、アルミニウム製のアップグレードボックスと呼ばれるツェナーの格納箱が、坂本らによって考案された。

写真1のように、産総研で所有する電圧標準用の仲介器は、高さ180mm×横210mm×縦470mmのアルミニウム製容器に、ツェナー732B型を格納した構造となっている。ツェナーの出力端子は、低熱起電力のロータリスイッチを介して、アップグレードボックスの正面部にある出力コネクタに接続されている。出力端子と出力コネクタの間に位置するロータリスイッチは、計算機制御された外部のモータで駆動され、ツェナーの極性や出力電圧を自動的に切り替えている。また、正面部には、ツェナーの内部温度を測定するためのサーミスタ抵抗測定用BNCコネクタや、ロータリスイッチの接続位置を検出するためのコネクタ等も取り付けられている。

ツェナーの駆動電源は、交流でも直流（バッテリー）でも使用可能であるが、仲介器として校正室から他の校正室に移動させるには、内蔵のバッテリーを使用することになる。市販されているツェナーの内蔵バッテリーの寿命は、約3日間程度であるから、この動作時間であれば国内を移動させるには十分である。ただ、搬送途中の交通機関の事故あるいは消耗の激しいバッテリーへの充電不足等により、ツェナーの動作が、搬送途中で停止する恐れも予想される。移動途中の仲介器としての信頼性と確実性を確保するためには、バッテリーの寿命に幾分余裕を持たせることが得策と考えられる。このため、産総研の仲介器では、内蔵バッテリーの他、アップグレードボックス内にさらにバッテリーを追加して、約6日間に及ぶバッテリー駆動を可能としてある。

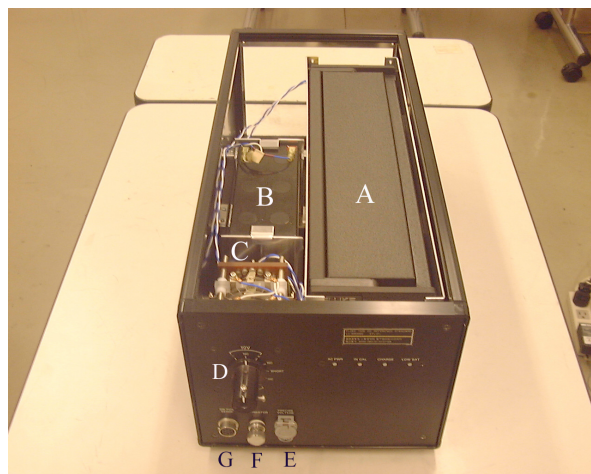


写真1 産総研の仲介用標準器  
 A：ツェナー標準電圧発生器（Fluke732B）  
 B：外付けバッテリー  
 C：低熱起電力ロータリスイッチ  
 D：ロータリスイッチ回転用つまみ  
 E：出力端子  
 F：サーミスタ測定用端子  
 G：ロータリスイッチ位置検出用端子

### 1.1.1 仲介器の取り扱い

計量標準総合センター（以後、NMIJと呼ぶ）では、ジョセフソン電圧標準測定装置の自動測定に対応するために、電圧標準供給用のアップグレードボックスを考案した。しかし、巡回比較に参加する認定事業者や参加企業に、このアップグレードボックスに格納したツェナーを仲介器として巡回させた場合、その測定手法は、一般的に、デジタルマルチメータや電圧計を使用することが予想される。もちろん、種々の測定手法に対応できなければ、仲介器としての役割を果たすことはできない。このため、NMIJでは、単に仲介器だけではなく、計測器対応の三端子ケーブルも一体として巡回させる予定である。

参考までに、アップグレードボックス付きツェナー標準電圧発生器の取り扱いについて述べる。

- 1) 仲介器の正面部にあるロータリスイッチが、任意のNCの位置に設定されていることを確認する。
- 2) 付属の三端子ケーブルの端子側を計測器に接続する。
- 3) 付属の三端子ケーブルのコネクタ側を、仲介器の

PRECISE VOLTAGEと表記されたコネクタ端子に接続する。

- 4) 仲介器のロータリスイッチを、測定電圧1.018Vまたは10Vの(+)に切り替えて測定をする。
- 5) 電圧測定。
- 6) 次に、仲介器のロータリスイッチを、測定電圧1.018Vまたは10Vの(-)に切り替えて測定をする。
- 6) 電圧測定。
- 7) 仲介器のロータリスイッチを任意のNCの位置に戻す。
- 8) 仲介器のPRECISE VOLTAGEのコネクタ端子から三端子ケーブルを外す。
- 9) 測定終了。

以上の操作で仲介器の校正は終了するが、重要な点は、仲介器の出力電圧を三端子ケーブルの端子側で、短絡させないように十分注意して取り扱うことである。

### 1.2 アップグレードボックスの特長

産総研は、産業界に正確で信頼のおける電圧標準を供給する責務があるため、測定の不確かさをあいまいにすることは極力避けなければならない。

試験者が、ツェナーの極性反転を、端子に直接接続されたリード線により切り替えると、接続を元に戻しても出力端子に存在する熱起電力が再現せず、電圧の定義点が不明確になる可能性がある。アップグレードボックスの使用は、ツェナーの極性を出力端子で直接反転させるのではなく、低熱起電力のロータリスイッチを介して極性を反転させるため、ツェナーの出力端子における熱起電力が一定となり、明確な定義点が、アップグレードボックスの出力端子に得られることになる。

また、アップグレードボックスは、高い絶縁抵抗を得るためにも使用される。特に、ツェナーの出力端子1.018Vの出力抵抗は、1kΩと非常に大きいため、出力端子間および出力端子と筐体間の絶縁抵抗は、この出力抵抗に対してより大きいことが望まれる。アップグレードボックスの使用は、ツェナーの筐体をグランド電位から浮かした状態で格納し、ツェナーの出力端子のみを用いるので、この出力端子とアップグレードボックス間の高い絶縁抵抗を用いることができる。なおかつ、アップグレードボックスをグランド電位に落とすので、ツェナー自身の耐ノイズ性を悪くしない。つまり、ツェナーの筐体をグランド電位にすると、出力端子と筐体間の絶縁抵抗を使用することになるが、アップグレードボックスをグランド電位に落とすと、仲介器全体として、アップグレードボックスの絶縁抵抗も含めた、より高い絶縁抵抗が得られ

ることになる。

このような改良点によって、仲介器の出力端子間の絶縁抵抗を、ツェナー単独の絶縁抵抗より、約3倍の大きさに改善することができた。

### 1.3 出力端子間の絶縁抵抗

産総研において、電圧標準の維持・供給用に開発されたジョセフソン電圧標準測定装置は、極めて高い精度を実現しているが、TypeBの標準不確かさの限界が、検出器の分解能である3nVで決定されているため、他の誤差要因は、3nVよりも可能な限り小さくすることが必要である。この3nVの不確かさに対して大きく影響してくるのが、校正対象であるツェナーの出力端子間の絶縁抵抗である。

図1は、ツェナー標準電圧発生器の簡単な概略図<sup>1)2)</sup>を示した。定電圧ダイオードに逆電流を流してやると、降伏現象によって、電流が変化しても電圧の変化しない一定電圧が発生する。この一定電圧は、供給のための標準値には使用することができないため、定電圧ダイオードの一定電圧を基準にして抵抗分圧器の両端に10Vを発生させてやる。そして、この抵抗分圧器の抵抗比を利用して出力電圧1.018Vを得ている。ここで問題となるのは、出力端子1.018Vの出力抵抗が大きいため、この出力端子間の絶縁抵抗の大きさが、抵抗比に関与してくることである。

出力電圧 $V_{out}$ と絶縁抵抗 $R_{e1}$ 、 $R_{e2}$ との関係は(1)式によって求められる。

$$V_{out} = V_{in} \left( \frac{R_{out}}{R + R_{out}} \right) \left( \frac{1}{1 + \frac{R}{R + R_{out}} \cdot \frac{R_{out}}{R_{e1} + R_{e2}}} \right) \quad (V) \quad (1)$$

ただし、 $V_{in}$  : 抵抗分圧器の入力電圧

$R_{out}$  : 出力端子1.018Vの出力抵抗

$R$  : 抵抗分圧器の抵抗

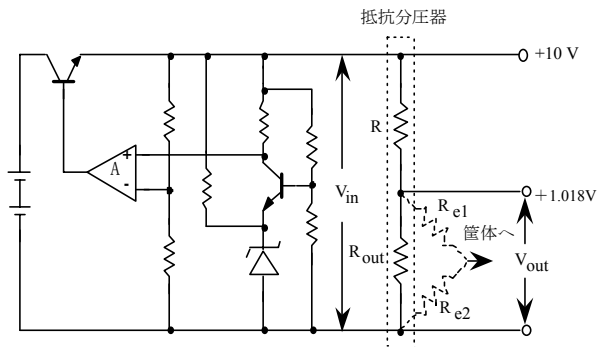


図1 ツェナー標準電圧発生器 (732B) の概略図

(1)式より、出力端子間の絶縁抵抗 $R_{e1}$ 、 $R_{e2}$ はできる限り大きくすることが望ましく、アップグレードボックスは、その仕様を満足させるものである。

アップグレードボックスの有効性を実証するために、以下に述べるようなY- $\Delta$ 変換高抵抗測定装置<sup>3)</sup>を開発して絶縁抵抗を測定した。

### 1.3.1 絶縁抵抗の測定原理

図2に高抵抗ブリッジの主要部分を構成するY- $\Delta$ 変換回路を示した。 $R_{ao}$ 、 $R_{bo}$ および $R_{co}$ の三個の低抵抗器は、Y型を構成しているが、Y- $\Delta$ 変換により等価的に抵抗器 $R_2$ 、 $R_{ac}$ および $R_{cb}$ の $\Delta$ 型を形成する。特に、抵抗器 $R_2$ は極めて高い抵抗器となり、四辺ブリッジの一边として使用する。以下に説明するように、抵抗器 $R_1$ も同様にブリッジの一边となるが、Y- $\Delta$ 変換による抵抗 $R_{cb}$ が並列に加わると、その公称値がずれるため調整用の抵抗器 $r_1$ を直列接続してある。可変抵抗器 $R_{ao}$ は、分離型の補償方法を分担する第1の補償抵抗器であり、ブリッジの主回路を平衡させるときに用いる。この補償抵抗器 $R_{ao}$ は、4個の可変抵抗器から成り、各レンジの可変範囲は、最下位の桁が、1k $\Omega$ ～10k $\Omega$ であり、次の桁が、10k $\Omega$ ～100k $\Omega$ 、さらに、100k $\Omega$ ～1M $\Omega$ となり、最上位の桁が、1M $\Omega$ ～10M $\Omega$ となっている。つまり、1k $\Omega$ ～10M $\Omega$ までの任意の値を設定することができる。

このような $R_{ao}$ に対して、点線で示した等価の $\Delta$ 回路における $R_2$ は次式となる。

$$R_2 \approx \frac{R_{ao} \cdot R_{bo}}{R_{co}} \quad [\Omega] \quad (2)$$

(2)式より、例えば $R_{co}$ を小さく $R_{bo}$ を大きく選定すれば、等価的に $R_2$ は高抵抗となる。

このような原理を用いると、安定な低抵抗器から基準となる高抵抗を擬似的に得られるため、入手するのが困難である安定な高抵抗器を選定する必要もなく、極めて容易にツェナーの絶縁抵抗を測定することができる。しかし、ここで問題となるのは、非常に高い絶縁抵抗を測定するため、測定装置およびツェナー周辺に分布する漏れ抵抗（絶縁抵抗）の影響を除去しなければならないことである。このために、主回路と同じY- $\Delta$ 変換の原理を用いたワグナー接地装置を考案してY- $\Delta$ 変換高抵抗ブリッジに取り付けた。この接地装置によって、不確かさの原因となる漏れ抵抗の影響は、すべて除去できることになる。

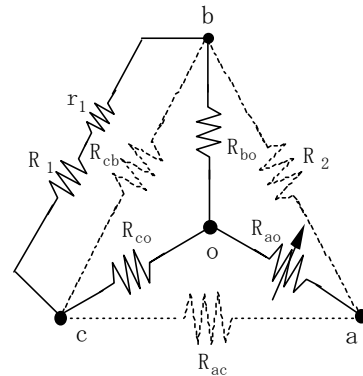


図2 Y- $\Delta$ 変換回路

### 1.3.2 Y- $\Delta$ 変換高抵抗ブリッジ

図3に、漏れ電流の影響を除去するために、ワグナー接地装置を付加したY- $\Delta$ 変換高抵抗ブリッジの回路図を示した。抵抗器 $R_s$ は値が既知であり、抵抗器 $R_x$ はツェナーの絶縁抵抗を示す。 $r_s$ は、主回路の平衡操作に用いる第2の補償抵抗器である。

等価抵抗 $R_2$ を基準にすると、絶縁抵抗 $R_x$ は、

$$R_x = \frac{(R_s + r_s)R_2}{R_p} \quad [\Omega] \quad (3)$$

$$\text{ただし、} R_p = \frac{(R_1 + r_1)R_{cb}}{R_1 + r_1 + R_{cb}}$$

となる。(3)式から、絶縁抵抗 $R_x$ の値によって、等価抵抗 $R_2$ の大きさが決まることになる。つまり、(2)式の補償抵抗器 $R_{ao}$ の設定値が決定される。このとき例えば、可変範囲の最大値10M $\Omega$ を設定値とすると、残りの三つの可変抵抗器で上位から3桁を設定できるが、最小値1k $\Omega$ を設定値とすると、数値は上位の1桁のみになってしまう。要するに、絶縁抵抗の大きさによっては、ブリッジの平衡操作において、補償回路の一部分しか使用しないことになる。このような問題点を解決するために、第2の補償回路 $r_s$ を別途用いることにした。この補償抵抗器 $r_s$ は、3個の可変抵抗器から構成され、各レンジの可変範囲は、最下位の桁が、100 $\Omega$ ～1k $\Omega$ であり、次の桁が、1k $\Omega$ ～10k $\Omega$ 、最上位桁が、10k $\Omega$ ～100k $\Omega$ となっている。ただし、 $R_s$ は100k $\Omega$ の固定抵抗器である。

上記のような、二つの補償回路の平衡操作の手順は、まず始めに、最上位の桁は、第1補償回路 $R_{ao}$ のみで求めておいて、その次の桁からは、第2の補償回路 $r_s$ を用いてブリッジの平衡条件を求める。平衡検出には、検出器Dを用いる。この手法は、(2)式と(3)式からも原理的に可能なことが明らかである。この補償方法を用いることにより、任意の値の絶縁抵抗を1/1000の桁まで求めることが可能となった。ただし、測定精度は、1%程度であると推察する。

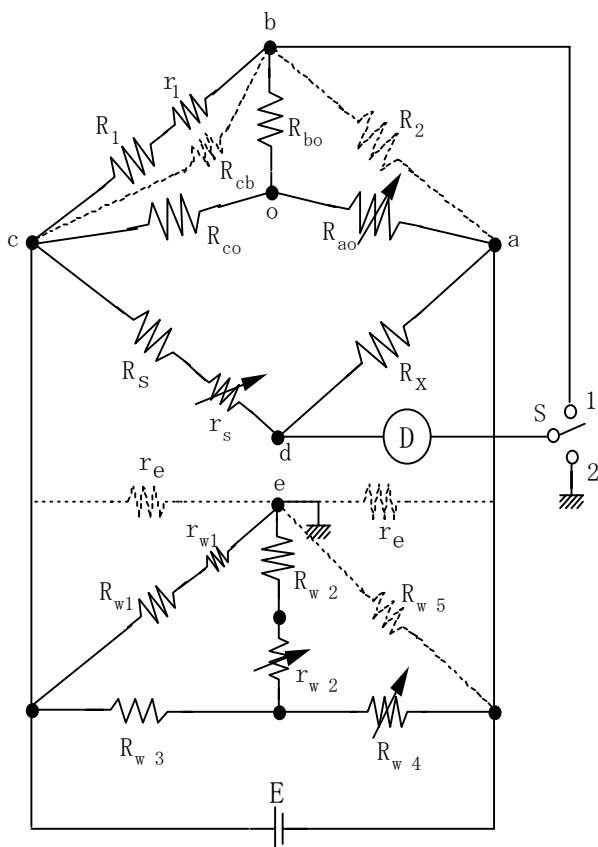


図3 接地装置付きY-Δ変換高抵抗ブリッジ回路図

抵抗器 $R_{w1} \sim R_{w4}$ および $r_{w1}$ と $r_{w2}$ は、漏れ電流の影響を除去するためのY-Δ変換型接地装置を示す。また、可変抵抗器 $R_{w4}$ と $r_{w2}$ は、主回路と同様に分離型の補償方法を受け持つ補償抵抗器である。第1の補償回路は、可変抵抗器 $R_{w4}$ が分担し、第2の補償回路は、可変抵抗器 $r_{w2}$ が負担する。各補償回路の可変範囲は、主回路の補償回路と全く同じである。平衡検出には、同様に検出器Dを用いる。

1.3.3 測定手順

まず始めに、切り替えスイッチSを2側にする。漏れ電流の原因となる漏れ抵抗 $r_e$ は、すべて接地装置側の対地電位e点に集中して分布するから、見かけ上、接地装置の一部であるかのように形成される。この状態において、ブリッジ回路が平衡するように、第1と第2の補償抵抗器 $R_{w4}$ と $r_{w2}$ を調整して検出器Dを平衡させる。平衡時における検出器の両端e点とd点はグラウンド電位となる。次に、切り替えスイッチSを1側に切り替える。この主回路を用いて、ツェナーの絶縁抵抗測定を実施する。d点は見かけ上、対地から浮いた状態になっているが、前の平衡操作により等価的に対地電位を保持している。主回路の平衡は、第1と第2の補償抵抗器 $R_{ao}$ および $r_s$ を調整して検出器

Dで平衡を検出する。

このときの平衡条件式は(2)式と(3)式から、次式となる。

$$R_x = \frac{(R_s + r_s)R_{ao}R_{bo}}{R_{co}R_p} \quad [\Omega] \quad (4)$$

よって(4)式より、絶縁抵抗 $R_x$ が求められることになる。

ブリッジの測定手順から、接地装置側を平衡させた後、主回路の平衡操作のために第2の補償抵抗器 $r_s$ を調整すると、接地装置側の平衡が崩れることになる。このとき、 $r_s$ の変量が大きく、 $r_s$ が $R_s$ と比較して値の大きさに差のない場合には、再度切り替えスイッチSを2側にして、接地装置側の平衡操作でd点を対地電位に再調整後、再び主回路の平衡条件を求めなければならない。しかし、 $r_s$ の変化量が小さく、 $r_s$ が $R_s$ と比較して十分に小さい場合には、第1回目の主回路の平行操作のみで、ツェナーの絶縁抵抗 $R_x$ が求まることになる。接地装置側の再調整はしなくても良い。

1.3.4 測定精度

測定装置の不確かさの要因としては、

- (1) ブリッジを構成する抵抗器の温度特性。
- (2) 接続導線の抵抗。
- (3) 抵抗器と端子間との接触抵抗。
- (4) 抵抗端子間あるいは端子とケース間に分布する漏れ抵抗。
- (5) 検出器の低電位端子からの漏れ電流。
- (6) 回路に存在する熱起電力。

等が考えられる。しかし、本測定装置の目標精度が1%程度であること、また、接地装置を具備している点などから考慮すると、前記の不確かさの要因は、すべて無視できると推察できる。そして、この装置の不確かさに最も大きく影響を与えるのは、ブリッジの主回路を構成する抵抗器の公称精度であると考えられる。

ブリッジの主回路を、すべて公称精度+δ%の抵抗素子を選定して組み立てたとすると、(4)式は以下のようになる。

$$R_x = \frac{(R_s + r_s)R_{ao}R_{bo}}{R_{co}R_p} (1 + \delta) \quad [\Omega] \quad (5)$$

つまり、(5)式から、公称精度+1%以下の抵抗素子を主回路に選定してやれば、原理上、測定精度1%を達成できることになる。

上記の条件で組み立てた本装置を用いて、NMIJで校正された高抵抗標準器およびケースレー (KEITHLEY) 社から市販されている参照標準器 (5156 ELECTROMETER



表1 Y-Δ変換高抵抗ブリッジの測定結果

(a) 標準器の校正

公称値 (Ω)	校正値 (Ω)	ブリッジ測定値 (Ω)	差 (%)
$1 \times 10^{10}$	$1.001 \times 10^{10}$	$1.008 \times 10^{10}$	0.7
$1 \times 10^{10}$	$0.999 \times 10^{10}$	$1.005 \times 10^{10}$	0.6
$1 \times 10^{11}$	$1.013 \times 10^{11}$	$1.011 \times 10^{11}$	-0.2
$1 \times 10^{12}$	$1.004 \times 10^{12}$	$1.000 \times 10^{12}$	-0.4

(b) 任意の値の校正

公称値 (Ω)	校正値 (Ω)	ブリッジ測定値 (Ω)	差 (%)
$2 \times 10^{10}$	$2.000 \times 10^{10}$	$2.010 \times 10^{10}$	0.5
$1.1 \times 10^{11}$	$1.113 \times 10^{11}$	$1.117 \times 10^{11}$	0.4
$1.01 \times 10^{12}$	$1.014 \times 10^{12}$	$1.008 \times 10^{12}$	-0.6
$1.1 \times 10^{12}$	$1.106 \times 10^{12}$	$1.105 \times 10^{12}$	-0.1
$1.11 \times 10^{12}$	$1.115 \times 10^{12}$	$1.119 \times 10^{12}$	0.4

CALIBRATION STANDARD)の測定を行って見た。また、本装置は、任意の値も測定可能であるので、各標準器を直列接続することによって、任意の値の参照標準器を得ることとした。任意の値の参照標準器の校正値は、直列接続に用いた各標準器の校正値の和とした。

その結果を表1の(a)と(b)に示す。測定結果からY-Δ変換高抵抗ブリッジの測定値と参照標準器の校正値との差は、いずれも1%以下で合致しているため、開発した本測定装置のType B標準不確かさは、包含係数 $k=2$ で約0.8%程度であると推定できる。

### 1.3.5 測定方法

ツェナー単独の絶縁抵抗は、図4のように、アップグレードボックスをグランド電位にして、ツェナーのL端子と筐体間の絶縁抵抗 $R_x$ を三端子法で測定した。電源側のケーブルは、ツェナーのL端子に接続されており、検出器側のケーブルは、ツェナーの筐体に接続されている。検出器側ケーブルの内部導体と外部導体間に分布する漏れ抵抗およびアップグレードボックスとツェナーの筐体間に分布する漏れ抵抗を、まとめて $r_d$ で表す。絶縁抵抗 $R_x$ を通過した信号電流 $I$ が、この漏れ抵抗 $r_d$ を経てグランドに漏れ電流として分流すると、漏れた電流分は、検出器Dで感知できないためブリッジの平衡条件に誤差を与えることになる。この漏れ抵抗 $r_d$ の影響を防ぐために接地装置を動作させる。

測定手順から、まず始めに、接地装置側でブリッジの平衡操作を行うことにより、検出器側ケーブルの内部導体が、強制的にグランド電位となる。次に、ツェナーの絶縁抵抗 $R_x$ を測定するためにブリッジを主回路側に切り

替えても、検出器側ケーブルの内部導体は、等価的にグランド電位を保持している。この状態を実現してやれば、検出器側ケーブルの内部導体と外部導体間およびアップグレードボックスとツェナーの筐体間は、すべて同電位(グランド電位)となるため、これらの間に分布する漏れ抵抗 $r_d$ を介して信号電流 $I$ が、漏れ電流としてグランドに分流することを阻止できる。また、電源側に分布する絶縁抵抗 $r_v$ は、電源ケーブルの外部導体が接地装置のグランドに接続されているため、見かけ上、接地装置の一部となり主回路に影響を及ぼすことはない。絶縁抵抗 $r_v$ を流れる漏れ電流は、外部導体を通じて電源側に戻り接地装置を流れるだけである。この動作原理によって、ツェナーの絶縁抵抗 $R_x$ は、装置内の漏れ電流の影響を受けることなく、(4)式の平衡条件から求めることができる。

アップグレードボックスを使用したときの絶縁抵抗は、図5に示したように、ツェナーのL端子とアップグレードボックス間の絶縁抵抗 $R_x$ を二端子法で測定した。電源側のケーブルは、アップグレードボックスに接続されており、検出器側のケーブルは、ツェナーのL端子に接続されている。ツェナーの筐体は、どのケーブルにも接続されず、対地から完全に浮いた状態でアップグレードボックス内に格納されている。前述したように、検出器側のケーブルは、内部導体と外部導体が同電位(グランド電位)となるため、線間に分布する漏れ抵抗の影響は無視できる。また、電源側ケーブルに分布する絶縁抵抗は、等価的に接地装置の一部となるため主回路に影響を及ぼさない。

この二端子法では、シールドを使用しないため、アップグレードボックスに電源電圧 $+V$ を印加して、ツェナー全体を高い電位で覆うことで、周囲からの漏れ電流の流入を妨げている。この効力を検証するためには、アップグレードボックス近辺に手などを近づけてみて、ブリッジの平衡が崩れるかどうかを観測してみるのも一方法である。本実験において、ブリッジの平衡状態は、常に保たれたままであった。これによって、アップグレードボックスを、さらに、グランド電位で覆われたシールドボックス内に格納するための煩雑さを省略している。

また、アップグレードボックスは、 $+V$ の電位が印加されているため、周辺の低電位部分に対して漏れ抵抗 $r_e$ を形成し、これを介してアップグレードボックスから漏れ電流 $i$ の流れる可能性も考えられる。しかし、この現象は、アップグレードボックスを電源ケーブルの内部導体の延長と考えると、電源ラインからの漏れ電流は、ブリッジの主回路になんら影響しないこととなる。つまり、アップグレードボックスから漏れ電流 $i$ がいくら発生しても、

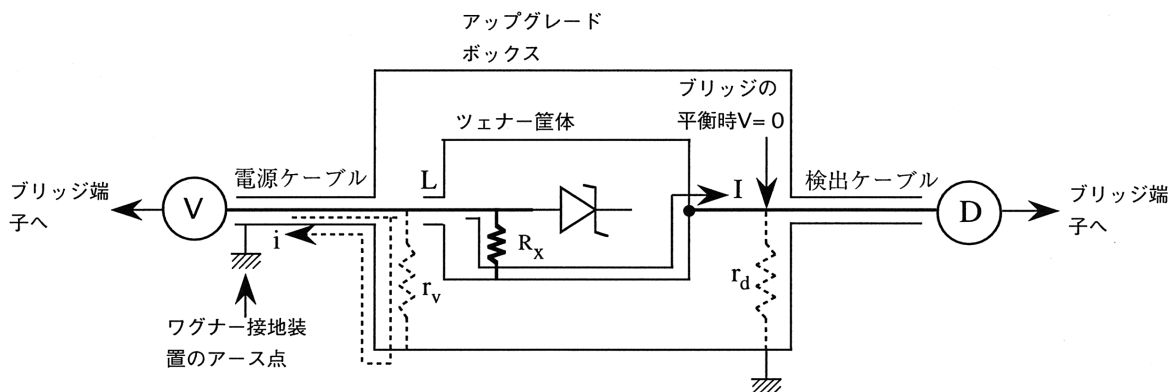


図4 絶縁抵抗の三端子測定法

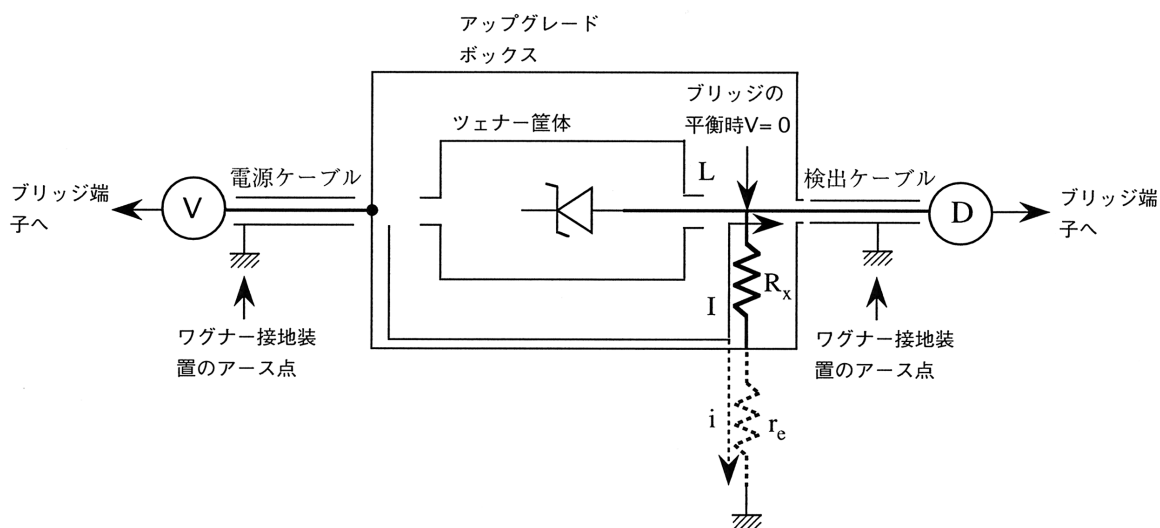


図5 絶縁抵抗の二端子測定法

残りの信号電流Iが仲介器の絶縁抵抗 $R_x$ 流れて、この信号電流Iが途中の検出ケーブルから漏れることなくすべて検出器を通過すれば、正確なブリッジの平衡条件が得られるということである。

1.3.6 測定結果

表2に、ツェナー自身の出力端子と管体間の絶縁抵抗およびツェナーをアップグレードボックスに格納して仲介器として用いるときの、出力端子とアップグレードボックス間の絶縁抵抗を示した。

ツェナー732B型の絶縁抵抗は、ツェナー単体では約0.7TΩであるが、アップグレードボックスを用いることにより、約3倍の2TΩに改善することができた。この結果、Type Bへの影響は、ツェナー単体の約1.5nVからアッ

プグレードボックス使用時の0.5nVに小さくすることができ、アップグレードボックスの有効性を実証できた。検出器の分解能である3nVが、TypeBの不確かさの限界値であることを考えると、この改善は、不確かさをより小さくする上で極めて意義のあるものと考えられる。

特定二次標準器や常用参照標準器を用いて校正事業を行っている認定事業者や計測器メーカー等には、このアップグレードボックスの使用は、現状の精度から判断すると必ずしも必要であるとは限らない。しかし、品質システムのため、特定標準器を維持および管理しなければならないNMIJにおいては、産業基盤への責務として当然改善しなければならない不確かさの一要因であると考えている。

ただし、アップグレードボックスは、精度改善および

第2章 仲介用ツェナー標準電圧発生器の湿度特性

自動化への対応のためにツェナーに必要な格納箱であり、ツェナーの環境特性を改善するために使用するものではない。つまり、これから述べる仲介器の環境特性につい

ては、ツェナー自身の有する特性でありアップグレードボックスとは無関係である。

表2 ツェナー標準電圧発生器732B型とアップグレードボックスの絶縁抵抗

シリアル番号	ツェナー単体		アップグレードボックス使用	
	1.018V (L) 一筐体 (TΩ)	10V (L) 一筐体 (TΩ)	1.018V (L) 一箱 (TΩ)	10V (L) 一箱 (TΩ)
695001	0.610	0.615	2.05	2.00
695002	0.670	0.665	2.03	2.04
695003	0.650	0.656	2.04	2.17
695004	0.603	0.611	2.02	2.01

箱：アップグレードボックス

## 第2章 仲介用ツェナー標準電圧発生器の湿度特性

1996年～1997年にかけてアジア太平洋計量計画（APMP）の直流電圧標準国際比較が実施された。仲介器として、2台のツェナー標準電圧発生器が参加国に巡回されたが、校正を受け持った参加研究所の相対湿度が、40%～70%の相違があったため、仲介器が階段状の湿度変化をうけることとなった。この湿度の相違は、仲介器の校正値に大きく影響を与えることになり、Liuらは、数学的モデルを提案して解析を行った<sup>4)</sup>。

産総研では、4台のツェナー標準電圧発生器を、電圧標準用の仲介器として寄与するために準備を進めていたが、Liuらの発表を参考に湿度特性を測定した。

### 2.1 恒温恒湿槽

環境特性の測定に用いるために、坂本らが改造した恒温恒湿槽を写真2に示した。槽内寸法は、高さ600mm×幅730mm×奥行700mmの容積を持ち、4台のツェナーが十分に収納できる大きさとなっている。槽内湿度は、 $23^{\circ}\text{C}\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ の一定温度において、35～80%の範囲を $\pm 2\%$ の制御で設定できる。また、槽内温度は、 $55\%\pm 2\%\text{RH}$ の一定湿度の状態、 $20\sim 25^{\circ}\text{C}$ の範囲を $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ の制御で設定できる。前面にはドアがなく、空気が上から下に流れて外気を遮断するエアシャッターとなっているため、恒温恒湿槽の前面において、ツェナーとの直接接続が可能となり測定作業が容易にできる構造となっている。

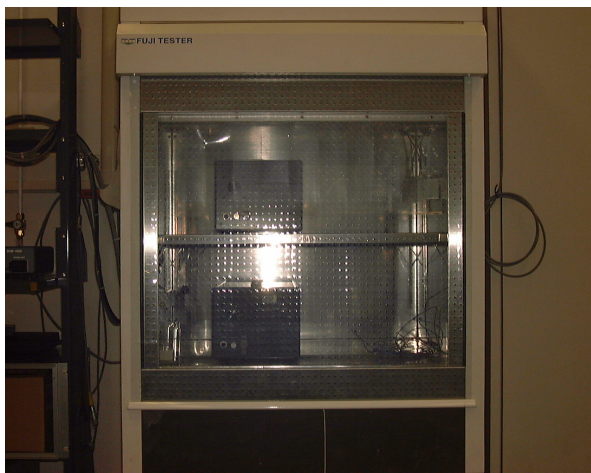


写真2 改造した恒温恒湿槽

### 2.2 測定方法

仲介用標準器として使用する4台のツェナーは、フルーク社製732B型で製造番号は、6950001～6950004である。これら4台のツェナーは、湿度依存性の測定を行うために約8ヶ月間にわたって恒温恒湿槽に保管した。槽内の相対湿度は、まず始めに35%RHに設定をし、次に75%RHに設定を上げてから、再び35%RHに戻している。設定湿度に対して槽内の湿度は、約1%/分の割合で安定な値に到達することができる。また、湿度依存性の測定の間、槽内の温度は、 $23^{\circ}\text{C}\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ の一定温度を維持していた。測定周期の判断基準として、Liuらの先例の実験から、湿度変化は、非常に大きな時定数を持つことが明らかとなっているため、本実験においても、それぞれの設定湿度35%RHと75%RHにおいて、約10週間程度の長期にわたる測定期間を確保した。なお、測定中におけるツェナーの駆動電源は、すべてバッテリーである。

### 2.3 実験結果

環境湿度の変動に対して、4台の仲介用標準器の約8ヶ月間にわたる湿度応答を図6に示した。(a)には、出力電圧1.018Vの測定結果を、また、(b)には、出力電圧10Vの測定結果をそれぞれ示してある。横軸は、測定月日であり、縦軸は、出力電圧の変化を示してある。また、図中には、試験対象であるツェナーのシリアル番号を示した。

先例では、湿度の変化に対して出力電圧は、一次遅れの応答を示していたが、本湿度特性の実験では、湿度よりもむしろ時間に対して直線的に変動する経年変化のような動きを示した。このため、この湿度応答から直接的に湿度特性を求めることは困難であるとともに、Liuらの提案した数学的モデルを用いて解析することも不可能であった。

この問題を解決するために、筆者らは、ツェナーの出力電圧に、湿度依存性と経年変化が同時に発生したと仮定した。経年変化が、湿度変動の影響を受けつつ見掛け上直線的に変化しているように観測できるが、湿度設定を35%RHから75%RHに変化させると、より大きな湿度変動を経年変化が受けるため、二つの設定湿度間の経年変

第2章 仲介用ツェナー標準電圧発生器の湿度特性

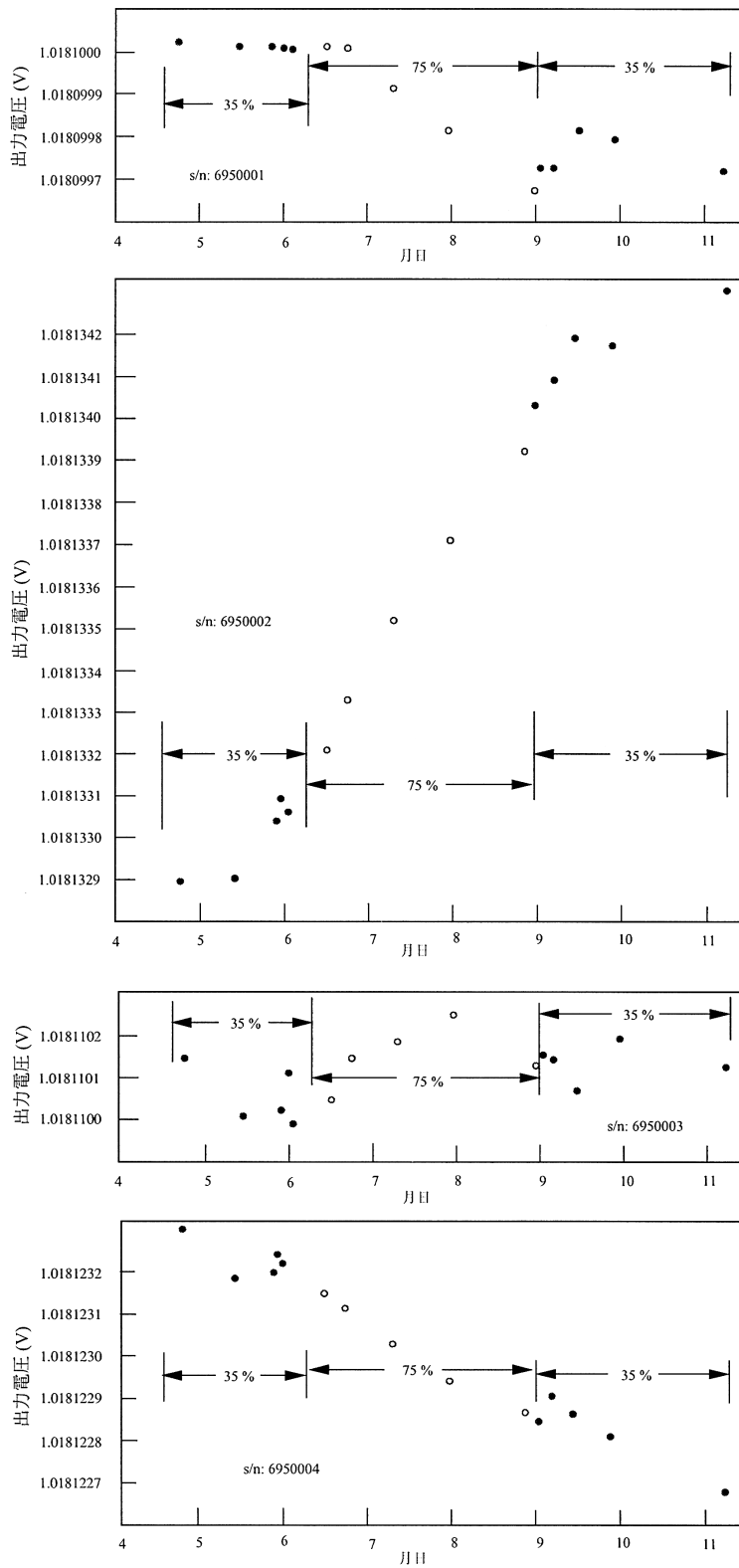


図6(a) 出力電圧1.018Vの湿度特性

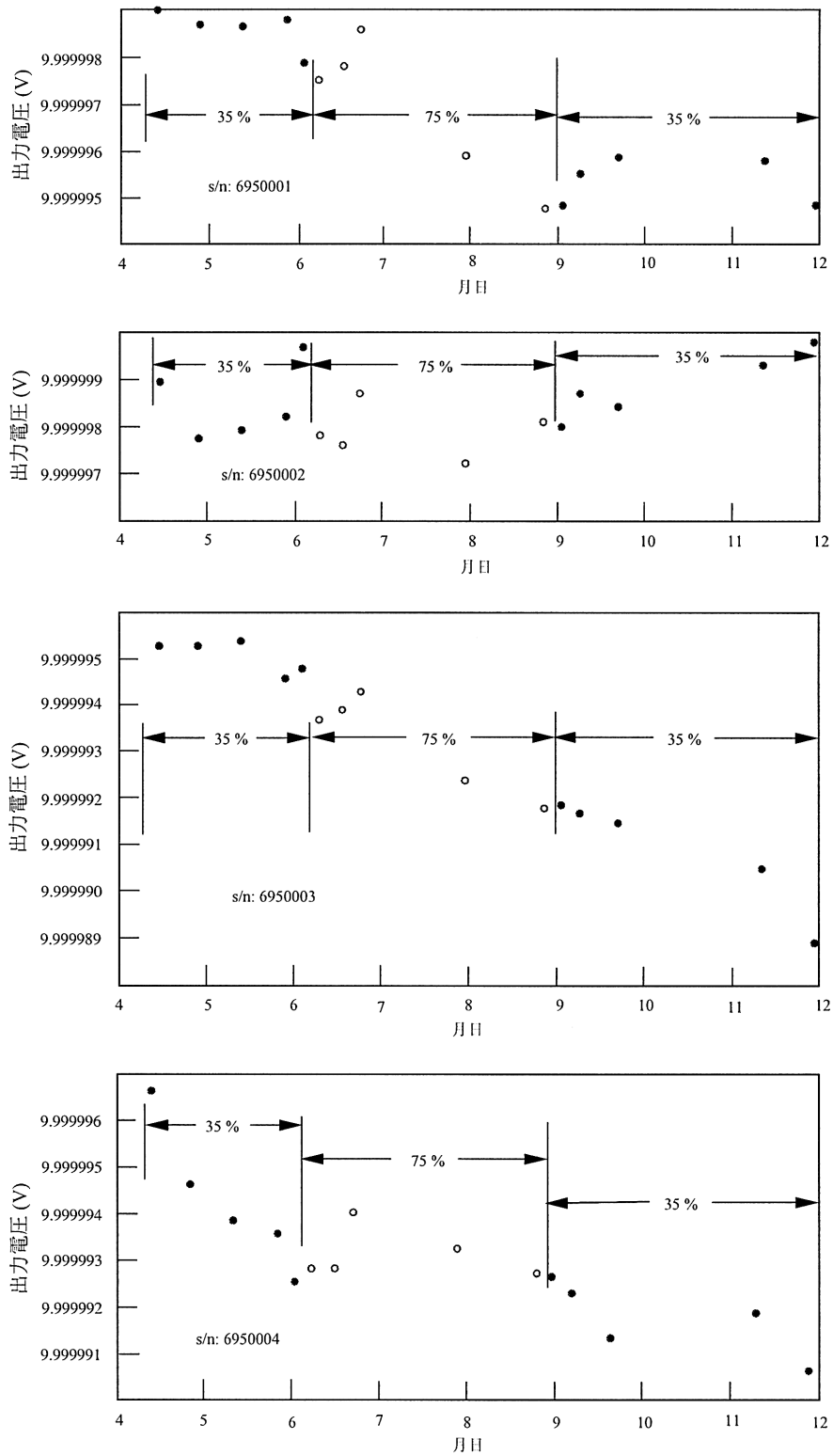


図6(b) 出力電圧10Vの湿度特性

化にずれが発生すると推測した。そして、このずれが湿度特性ではないかと考えた。以上の推測と考えを基に、得られた実験データから、以下に提案する数学的手法を用いて湿度特性を解析してみた。

まず始めに、設定湿度35% RHと75%RHに発生している出力電圧の経年変化は、時間に対してほぼ一次関数であると推察できるから、出力電圧 $V_i$ と時間 $T_i$ との関係は、(6)式となる。

$$V_i = A + BT_i \quad (6)$$

パラメータAとBは、実験データから最小二乗法を用いて、(7)式と(8)式から精密に求めることができる。

$$A = \frac{(\sum T_i^2 \sum V_i - \sum T_i \sum T_i V_i)}{n \sum T_i^2 - (\sum T_i)^2} \quad (7)$$

$$B = \frac{(n \sum T_i V_i - \sum T_i \sum V_i)}{n \sum T_i^2 - (\sum T_i)^2} \quad (8)$$

ただし、 $i$ は測定回数であり、 $i=(1,2,3, \dots, n)$ となる。

(7)式と(8)式から、設定湿度35%RHと75%RHにおける経年変化の回帰直線（一次関数） $V_{35i}$ と $V_{75i}$ をそれぞれ求めると、

$$V_{35i} = A_{35} + B_{35} T_{35i} \quad (9)$$

$$V_{75i} = A_{75} + B_{75} T_{75i} \quad (10)$$

となる。ただし、 $A_{35}$ と $B_{35}$ は、設定湿度35%RHにおける回帰直線のパラメータであり、 $A_{75}$ と $B_{75}$ は、設定湿度75% RHにおける回帰直線のパラメータである。また、 $T_{35i}$ と $T_{75i}$ は、設定湿度35%RHと75%RHにおける測定時間である。

ここで、(9)式と(10)式は、相互に独立したものであると考えられるから、得られた二つの回帰直線からパラメータの差を求めたとき、その差の大きさが、経年変化（回帰直線）のずれであり湿度特性に相当するものであると予測した。しかし、ここで考慮しなくてはならないのは、二つの回帰直線の実験データに対する当てはめの不確かさである。二つの経年変化のずれが、湿度依存によるものなのか、あるいは、回帰直線の不確かさより生じるものなのかを検証しなければならない。

二つの回帰直線の当てはめの不確かさを、標準偏差 $S_{35}$ および $S_{75}$ で表すと、(11)式と(12)式になる。

$$S_{35} = \sqrt{\frac{\sum (V_{135} - V_{35i})^2}{n-2}} \quad (11)$$

$$S_{75} = \sqrt{\frac{\sum (V_{175} - V_{75i})^2}{n-2}} \quad (12)$$

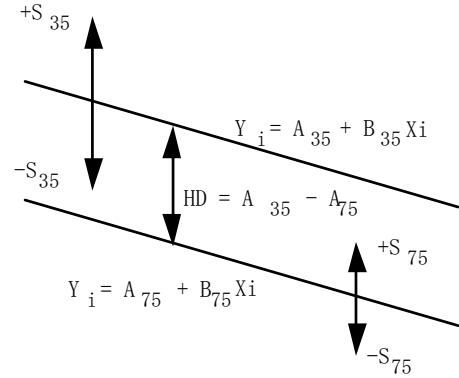


図7 回帰直線の不確かさと湿度特性の相関関係

ただし、 $S_{35}$ および $S_{75}$ は、設定湿度35%RHと75%RHにおける標準偏差をそれぞれ表している。 $V_{135}$ と $V_{175}$ は、同様に設定湿度35%RHと75%RHにおける実験値をそれぞれ示す。これに対して、 $V_{35i}$ および $V_{75i}$ は、それぞれの実験値に対応する予測値に相当する。 $(n-2)$ は、自由度である。

以上の議論から、二つの回帰直線の不確かさとずれの関係性を、図7に示した。湿度依存性をHD (Humidity Dependence) とすると、標準偏差 $S_{35}$ および $S_{75}$ に比べて、 $HD > S_{35}$ かつ $S_{75}$ であれば、ツェナーに湿度依存性が存在すると考えられる。そして、 $HD < S_{35}$ または $S_{75}$ であれば、標準偏差より小さくなるため、測定値のばらつきの中から湿度依存性だけを識別することは不可能になってしまう。よって、回帰直線のずれは、湿度依存によるものではなく、二つの回帰直線の周りにばらつく出力電圧の変動によるものであると推察できる。

上記の数式から得られた計算結果を表3の(a)と(b)に示す。(a)は、ツェナーの出力電圧1.018Vの結果を、(b)には、出力電圧10Vの結果をそれぞれまとめてある。しかし、パラメータ $B_{35}$ および $B_{75}$ は、同じパラメータである $A_{35}$ および $A_{75}$ に比べて非常に小さいため、表2に記述することは省略した。

得られた計算結果より、二つの回帰直線のパラメータ $A_{35}$ と $A_{75}$ の間には、明らかに大きさに差が確認できるため、一見、ツェナーの出力電圧1.018Vと10Vには、湿度依存性が発生しているように見える。しかし、前にも述べたように二つのパラメータの差は、二つの回帰直線の標準偏差より小さくなるため、現実的に測定値のばらつきの中からこの差を識別することは極めて困難である。

## 2.4 湿度係数

4台のツェナーの湿度係数の推定値を表4に示した。先例のアジア太平洋計量計画 (APMP) の直流電圧標準国際比較において、仲介器として使用された2台のツェナ

一の湿度特性の大きさから比べると、本実験に用いたツェナーは、極めて良好な湿度特性を持つ仲介器であることが明らかとなった。また、顕著な湿度依存性が、実験

結果から得られなかったため、NMIJに所有する4台の仲介器の湿度依存性は、通常の湿度変動では無視できるほど小さいと判断した。

表3 4台の仲介器の湿度特性を見積もるための計算結果

(a) 出力電圧1.018Vの評価

シリアル番号		695001	695002	695003	695004
標準偏差 ( $\mu\text{V}$ )	S <sub>35</sub>	0.06	0.12	0.06	0.04
	S <sub>75</sub>	0.12	0.05	0.06	0.03
パラメータ ( $\mu\text{V}$ )	A <sub>35</sub>	1.018183028	1.017833695	1.018091770	1.018234887
	A <sub>75</sub>	1.018183010	1.017833711	1.018091827	1.018234857
A <sub>35</sub> -A <sub>75</sub> ( $\mu\text{V}$ )		-0.02	0.02	0.06	-0.03

(b) 出力電圧10Vの評価

シリアル番号		695001	695002	695003	695004
標準偏差 ( $\mu\text{V}$ )	S <sub>35</sub>	0.57	0.70	0.88	0.40
	S <sub>75</sub>	1.15	0.64	0.93	0.60
パラメータ ( $\mu\text{V}$ )	A <sub>35</sub>	10.00084112	10.00001125	10.00075145	10.00115137
	A <sub>75</sub>	10.00084092	10.00001063	10.00075144	10.00115137
A <sub>35</sub> -A <sub>75</sub> ( $\mu\text{V}$ )		-0.20	-0.62	-0.01	0.00

表4 仲介器の湿度係数の推定値

シリアル番号	湿度係数 (nV/%RH)	
	10V	1.018V
6950001	<15	<1.3
6950002	<15	<1.3
6950003	<15	<1.3
6950004	<15	<1.3



## 第3章 仲介用ツェナー標準電圧発生器の温度特性

現在、市販されているツェナー標準電圧発生器は、ツェナーダイオードの降伏現象を利用したものである。しかし、この現象から得られる一定電圧は、標準値として使用できないため、電子回路や抵抗分圧器等と組み合わせて利用可能な標準電圧に変換し、出力電圧として発生させている。このような構造をもつ、ツェナー標準電圧発生器の温度特性は、出力段に使用されている抵抗分圧器の温度特性にほぼ依存すると考えられる。

一般的に、抵抗器は、温度変化に対する時定数が非常に長く、値が安定化するには長時間を必要とする。このため、ツェナー標準電圧発生器の出力電圧も、温度変化に対してその値が安定化するためには、長時間を要すると予測できる。

ツェナー標準電圧発生器の駆動電源は、ACラインおよびバッテリーによって得ることができる。本来なら、どちらの駆動方法を用いたとしても、ツェナーの出力電圧には、なんら差が生じないはずである。しかし、駆動方法をACラインからバッテリーに切り替えると、その直後から、ツェナーの出力電圧が、長時間にわたって変動することが報告されている<sup>5)</sup>。電圧変動の原因としては、ツェナーの内部温度も長時間に及んで変化していることから、この内部温度の変動が、出力電圧に關与している抵抗比を変化させたものと考えられる。

以上から、仲介器として使用する4台のツェナーの出力電圧は、環境（外部）温度および内部温度の変動に依存するため、出力電圧を安定化させるうえで、その取り扱いは、慎重にならなければならない。

### 3.1 駆動方法の相違による影響

内部温度の影響を実験するためには、ツェナーの環境温度の変動を除去しなければならない。このため、4台のツェナーを、温度 $23 \pm 0.1^\circ\text{C}$ 、湿度 $55 \pm 1\% \text{RH}$ に制御された恒温恒湿槽に常時保管した。

#### 3.1.1 測定手順

まず始めに、AC駆動で約2時間程度出力電圧の連続測定を行う。次に、AC駆動からバッテリー駆動に切り替えて、引き続き約15時間程度にわたり電圧の連続測定を行う。最

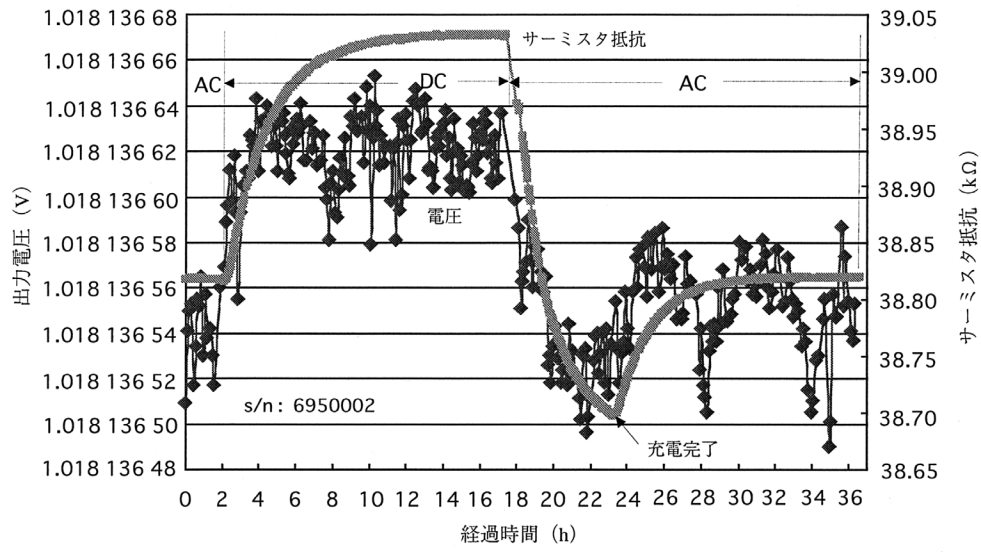
後に、再度AC駆動に切り替えて、バッテリーの充電が完了するまで5時間以上連続して出力電圧の測定を行う。なお、バッテリー駆動には、内臓バッテリーと外付けバッテリーの両方を用いた。

#### 3.1.2 測定結果

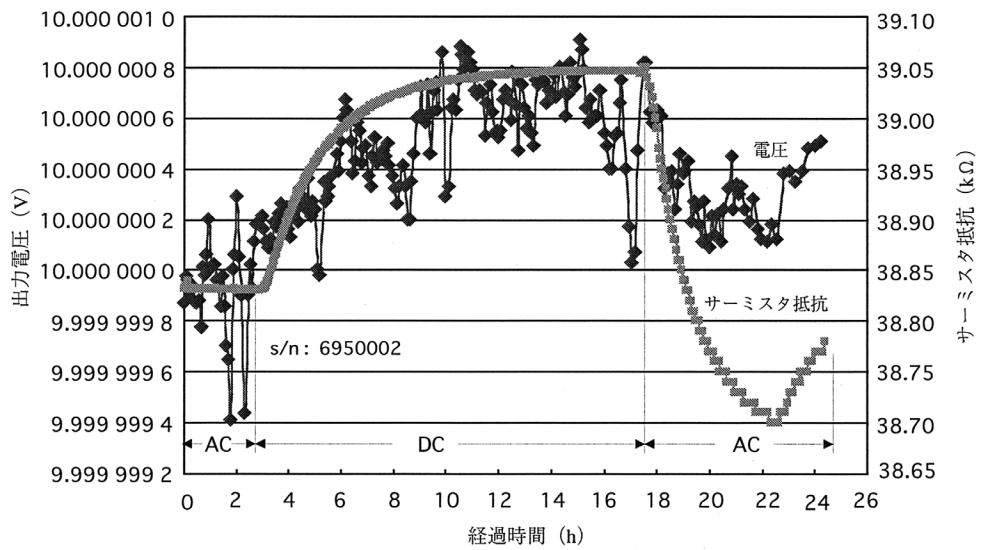
図8は、一例であるが、駆動方法の違いによる出力電圧の連続変化を示した。(a)は、出力電圧1.018 Vの測定結果を、(b)には、出力電圧10Vの測定結果をそれぞれ示してある。横軸は、経過時間を表し、縦軸は、出力電圧とツェナーの内部温度を監視するためのサーミスタ抵抗値を示してある。また、図中には、使用したツェナーのシリアル番号を示した。

ツェナーの駆動電源をACラインからバッテリーに切り替えると、出力電圧1.018Vおよび10Vは、内部温度の変化に追従して約2時間程度で急速に立ち上がり、その後は、値が最終値の $\pm 2 \times 10^{-8}$ 以内に落ち着くまでに約8時間以上の時定数が必要であった。サーミスタの抵抗値（内部温度）は、約12時間以上の長い時定数を要して一定値に到達したが、ツェナーの内部温度に換算すると約 $0.1^\circ\text{C}$ 低下したことになる。また、ツェナーの出力電圧は、AC駆動に比べてバッテリー駆動の方が、約 $8 \times 10^{-8}$ 程度大きな値を示した。この電圧差は、ツェナーの内部温度の低下したことが起因と考えられる。

一般的に、通常のツェナー測定は、ACラインを使用する場合あるいはバッテリーを使用する場合と二つの駆動方法があるが、校正現場では統一されていないのが実状である。どの駆動方法を用いるかは、各校正現場の現有する精度によって判断することになる。特に、技能試験等による校正能力審査の場合である。NMIJで所有する4台のツェナー仲介器は、ツェナーをバッテリー駆動で長時間放置しておき、十分に値を安定化させた上で校正を実施する予定である。このような測定条件で校正されたツェナーを巡回させた場合、各校正現場の駆動方法の選定は、前記の電圧差 $8 \times 10^{-8}$ が一つの目安として考えられる。つまり、測定精度が $8 \times 10^{-8}$ より大きければ、駆動方法に関しては何ら考慮する必要はないが、測定精度が $8 \times 10^{-8}$ より小さいことを主張するならば、NMIJと同様の方法でツェナー校正しないと、現状の精度（ $8 \times 10^{-8}$ 以下）を技能試験では審査しかねることになる。



(a) 出力電圧1.018Vの変化



(b) 出力電圧10Vの変化

図8 駆動方法の違いによる出力電圧の変化

### 3.2 環境温度の影響（予備測定）

環境（外部）温度の影響を調べるために、前節とは逆に、ツェナーの内部温度の影響を取り除かなければならない。このためには、ツェナーをバッテリー駆動で12時間以上放置しておき、内部温度と電圧値を安定化させておく必要がある。

#### 3.2.1 測定手順

駆動電源の相違による影響を除去するために、温度23℃、湿度55%RHの恒温恒湿槽内に、ツェナーをバッテリー駆動の状態に12時間以上放置しておき、内部温度と出力電圧を安定化させた。また、ツェナーを槽内温度23℃に12時間以上放置したことは、ツェナーの出力電圧値が、環境温度23℃で一定値になっていると考えられる。つまり、内部温度は安定化し、なおかつ出力電圧は、環境温度23℃で安定している状態であると推察できる。

このような状態でまず始めに、約2時間程度ツェナーの出力電圧を測定して、出力電圧が一定であることを確認する。次に、槽内の設定温度を15℃に低下させて、ツェナーの出力電圧が、環境温度15℃において一定値に到達するまで引き続き15時間以上に及んで連続測定を行う。さらに、槽内の温度を再び23℃に戻してツェナーの出力電圧を安定化させてから、同様に約2時間程度ツェナーの出力電圧を測定する。最後に、槽内の設定温度を35℃に上昇させて、ツェナーの出力電圧が一定値に到達するまで引き続き15時間以上の連続測定を行う。この二つの温度過程（23℃から15℃および23℃から35℃）から、ツェナーの出力電圧とサーミスタの抵抗値（内部温度）の温度特性を予備的に調べてみた。

#### 3.2.2 測定結果

図9は、周囲温度を変化させたときの温度特性の一例である。(a)には、出力電圧1.018 Vの測定結果を、(b)には、出力電圧10Vの測定結果をそれぞれ示した。横軸は、経過時間であり、縦軸は、出力電圧とサーミスタの抵抗値である。図中には、試験対象であるツェナーのシリアル番号を示した。

出力電圧1.018Vの温度特性は、槽内温度を23℃から15℃に低下させると、初期の段階では急速に周囲の温度に追従して変化するが、値が最終値の $\pm 2 \times 10^{-8}$ 以内に落ち着くまでに約8時間以上の時定数を要した。さらに、槽内温度を23℃から35℃に上昇させた場合についても、ほぼ同様の結果が得られた。また、出力電圧10Vの温度特性については、二つの温度過程（23℃から15℃、23℃から35℃）に対して、

その値が最終値の $\pm 2 \times 10^{-8}$ 以内に安定するまでに約12時間以上の時定数が必要であった。

ツェナーの内部温度は、サーミスタの抵抗値から換算できるが、槽内温度を23℃から15℃に低下させた場合は、約0.2℃程度低下した。また、槽内温度を23℃から35℃に上昇させると、0.2℃程度上昇した。そして、この内部温度が、二つの温度過程（23℃から15℃、23℃から35℃）に対して一定値に到達するのに、約12時間以上の長い時定数を必要とした。

### 3.3 測定方法

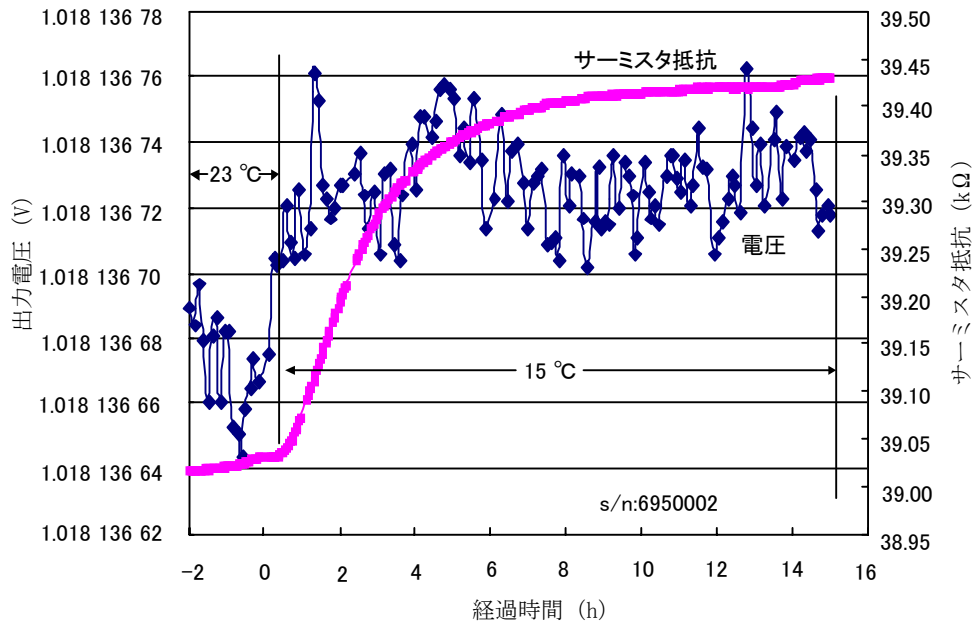
前節の予備測定から、ツェナーの環境温度および駆動方法を変化させると、ツェナーの出力電圧と内部温度は、長時間にわたって変化を続け、値が安定するまでに少なくとも12時間程度の時定数が必要であると判明した。以上の、測定条件を満足させながら、ツェナーの温度依存性の実験を実施した。

まず始めに、設定温度23℃の恒温恒湿槽内にツェナーをバッテリー駆動で12時間以上放置後、23℃におけるツェナーの出力電圧を校正した。次に、ツェナーを槽内に保管したままの状態に、設定温度を15℃に変更してから、同様にツェナーを12時間以上放置後、15℃におけるツェナーの出力電圧を校正した。さらに、再び、槽内の設定温度を23℃に戻して、ツェナーの出力電圧を12時間後に校正した。最後に、槽内の設定温度を35℃に上昇させて、同様に12時間後にツェナーの出力電圧の校正を行った。このような温度設定によって、ツェナーの環境温度が、23℃から15℃に低下した場合および23℃から35℃に上昇した場合の温度特性が、それぞれ求められた。

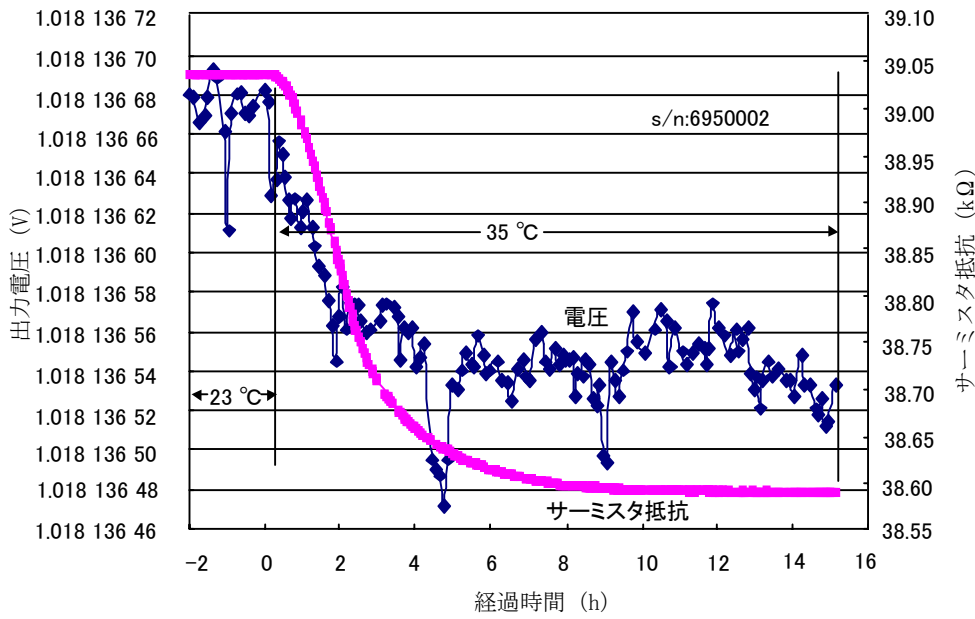
### 3.4 実験結果

本実験は、試験温度を23℃から15℃に低下させたときと、23℃から35℃に上昇させたときの二つの実験過程があるため、基準となる23℃においては、二つの測定値と標準偏差を有することになる。そして、この二つの標準偏差の大きさは、値が等しくないため23℃における平均値と標準偏差には、加重平均と重み付きの標準偏差を用いることにした。

試験温度を低下させた場合の、23℃における出力電圧の測定値を $M_0$ および標準偏差を $S_0$ とする。また、試験温度を上昇させた場合の、23℃の電圧の測定値を $M_0$ および標準偏差を $S_0$ とすると、最良推定値である加重平均 $M_w$ は、(13)式から求まる。

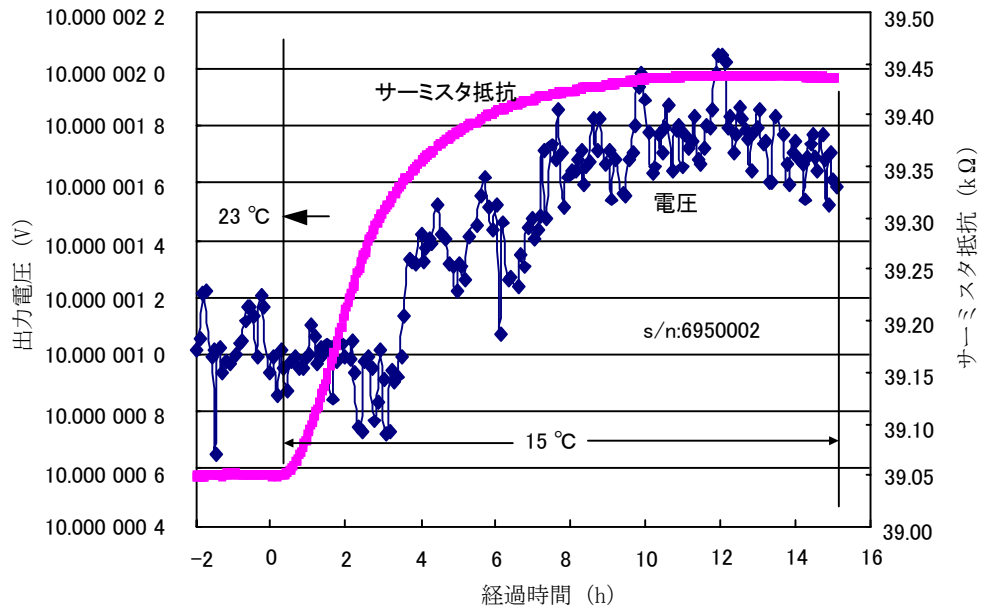


(イ) 環境温度を23 °Cから15 °Cに変化させたときの温度依存

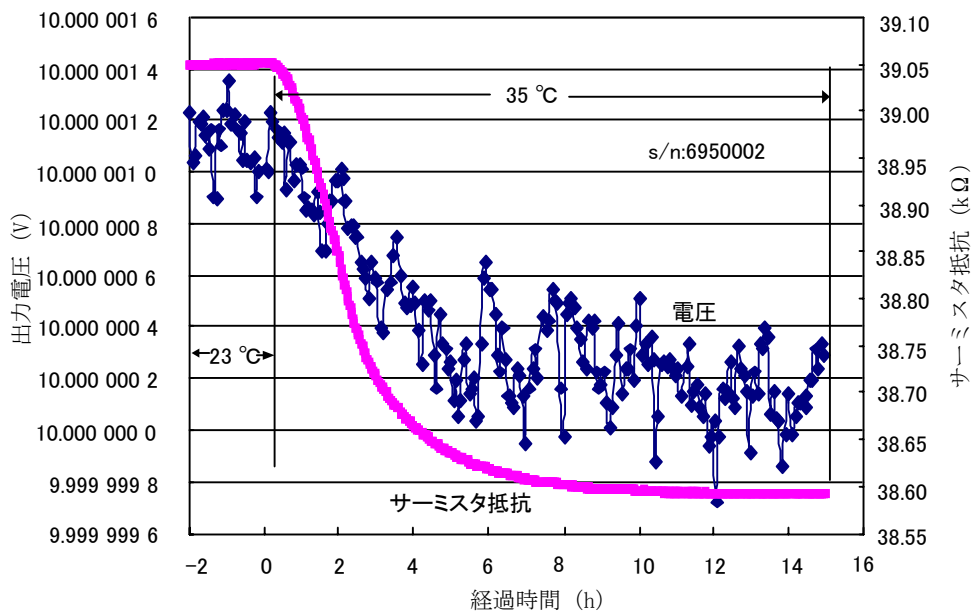


(ロ) 環境温度を23 °Cから35 °Cに変化させたときの温度依存

図9(a) 環境温度の変化による出力電圧1.018Vの温度特性



(イ) 環境温度を23 °Cから15 °Cに変化させたときの温度依存



(ロ) 環境温度を23 °Cから35 °Cに変化させたときの温度依存

図9(b) 環境温度の変化による出力電圧10Vの温度特性

$$M_w = \frac{\frac{M_d}{S_d^2} + \frac{M_u}{S_u^2}}{\frac{1}{S_d^2} + \frac{1}{S_u^2}} \quad (13)$$

また、重み付き標準偏差 $S_w$ は、(14)式となる。

$$S_w = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{S_d^2} + \frac{1}{S_u^2}}} \quad (14)$$

図10には、出力電圧と環境温度との相関関係を求めた。(a)は、出力電圧1.018Vの温度特性を、(b)には、出力電圧10Vの温度特性をそれぞれ示した。ただし、23°Cにおける測定値は、(13)式より求めた加重平均を用いている。横軸は、環境温度であり、縦軸は、出力電圧とサーミスタの抵抗値である。図中には、試験対象であるツェナーのシリアル番号を示した。また、図中のプロット上の縦線は標準偏差の大きさである。ただし、23°Cの標準偏差の大きさは、(14)式から求めた重み付きの標準偏差を用いた。

得られた4台のツェナーの温度特性から、出力電圧と環境温度との相関関係は、ほぼ直線的とみなせるので、温度係数は、最小二乗法（(6)式～(8)式を参照）を用いて回帰直線から求めた。また、回帰直線の当てはめの不確かさは、標準偏差（(11)式あるいは(12)式を参照）を用いて表した。回帰直線は、図中の破線で示してある。

### 3.5 温度係数

仲介器として使用する4台のツェナーの温度係数とその不確かさ（標準偏差）を、表5に示した。NMIJの仲介器を技能試験等に用いた場合、それぞれの校正現場は、NMIJと同じ温度条件を実現することが望ましいが、この条件を満たすことは、極めて困難な課題と考えられる。このため、實際上、校正温度がNMIJと大きく異なるときは、温度補正を加えるなりの対処が必要となる。ただし、仲介器の温度係数が非常に小さいため、すべての校正値に対して必ずしも補正が意味をもつとは限らず、校正精度に影響を与えない範囲のNMIJとの温度差であれば無視できると考えられる。

表5 仲介器の温度係数と不確かさ

シリアル番号	温度係数 (nV/K)		typeA(nV)	
	1.018V	10V	1.018V	10V
6950001	-12	-82	2	19
6950002	-9	-72	22	6
6950003	-9	-155	31	933
6950004	-9	-64	37	147

第3章 仲介用ツェナー標準電圧発生器の温度特性

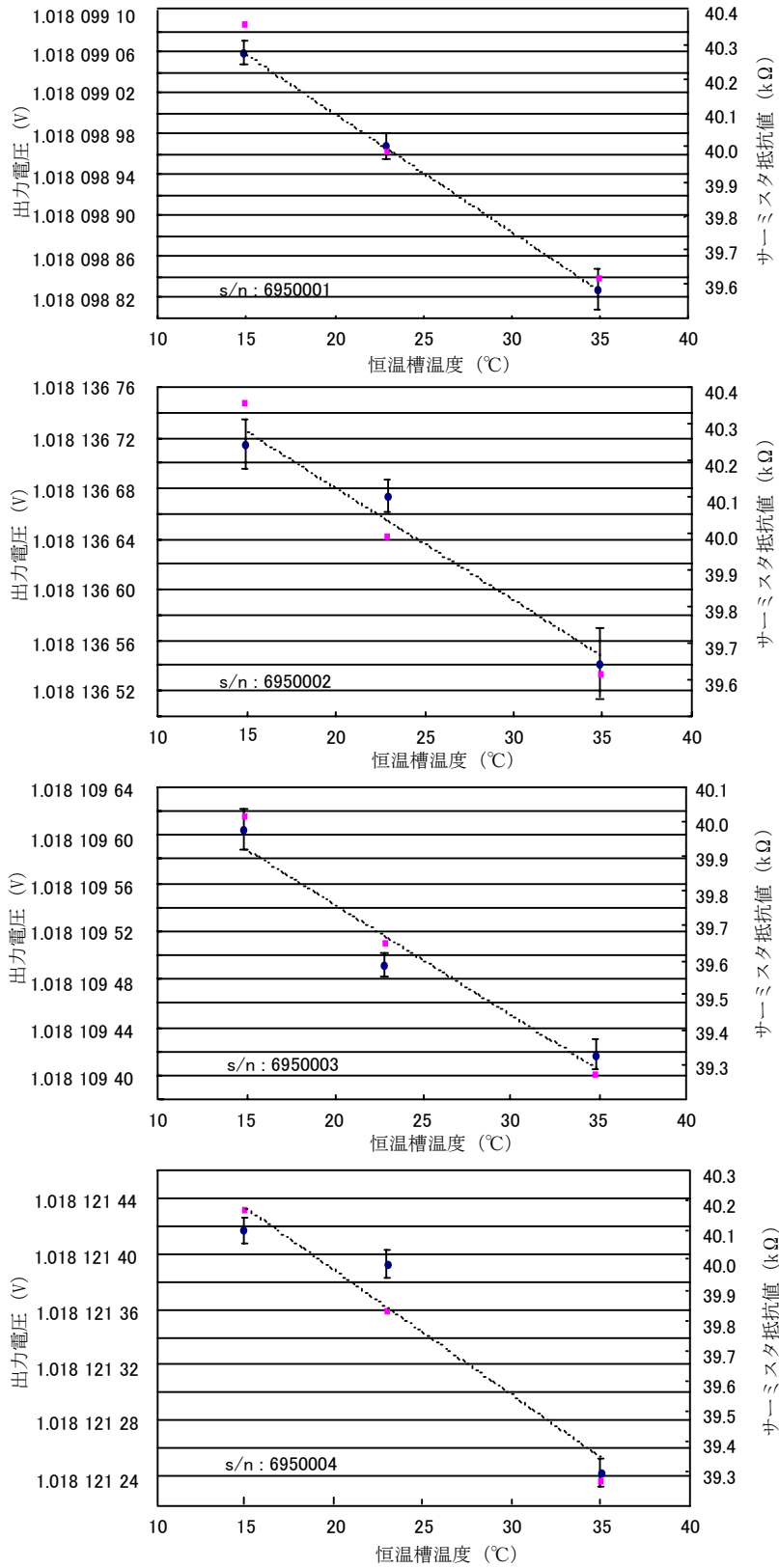


図10(a) 出力電圧1.018Vの温度特性  
 黒丸は電圧を示し、四角はサーミスタ抵抗値を表す。  
 破線は回帰直線であり、縦線は標準偏差を示す。

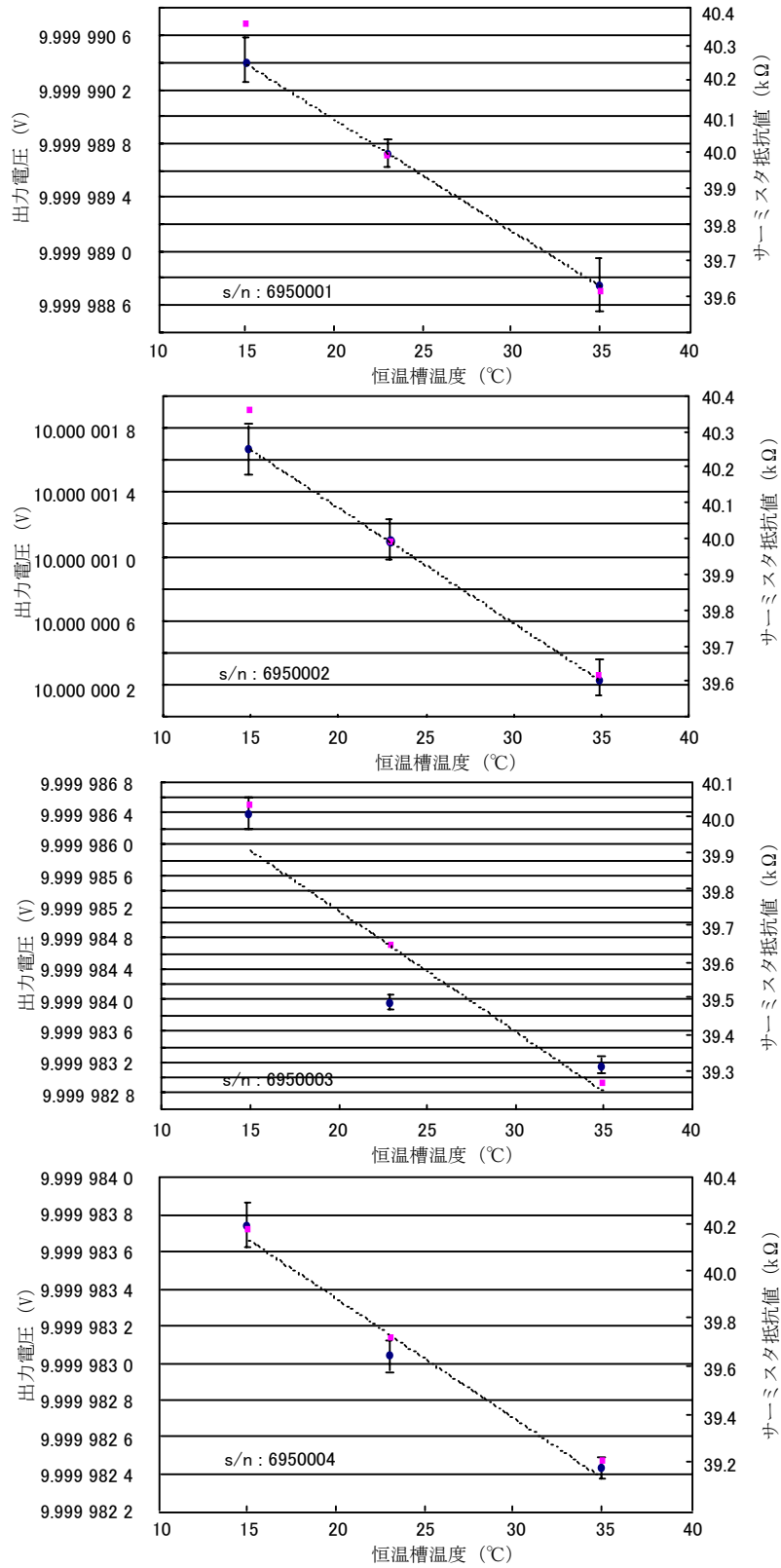


図10(b) 出力電圧10Vの温度特性  
 黒丸は電圧を示し、四角はサーミスタ抵抗値を表す。  
 破線は回帰直線であり、縦線は標準偏差を示す。



## 第4章 仲介用ツェナー標準電圧発生器の圧力特性

現在、フルーク社から市販されているツェナー標準電圧発生器は、ツェナーダイオードの製造会社によってタイプLとタイプMの2種類に分類できる。タイプLは、リニアテクノロジー (Linear Technology) 社の製品であり、タイプMは、モトローラ (Motorola) 社の製品である。ツェナー標準電圧発生器は、上記のどちらかのタイプのツェナーダイオードを使用しているが、産総研における4台のツェナー標準電圧発生器については、フルーク社に調査の協力を依頼した結果、4台ともLタイプであることが確認できた。なお、参考までにNMIJで校正依頼を受け付けた、ツェナー標準電圧発生器のタイプの種類を、表6に一覧したので参照されたい（フルーク社の調査結果より）。

このツェナー標準電圧発生器は、タイプの種類によって圧力特性に相違が生じることが報告されている<sup>6)</sup>。先例の実験結果から、タイプMは、負の圧力係数を持ち、タイプLは、逆に正の圧力係数を持つことが明らかとなっている。NMIJで所有する4台のツェナーは、すべてLタイプであるため正の圧力係数を持つことが予想されるが、仲介器としての役割を果たすためには、圧力特性を

明確にしなければならない。しかし、当所には、圧力特性を実験するための相応の設備がないため、松下電器産業（株）に協力を依頼して圧力試験装置を借用させてもらうことになった。

### 4.1 測定方法

測定した4台のツェナーは、フルーク社製732B型で、製造番号は6950001～6950004である。図11には、圧力特性を測定するための簡単な概略図を示した。

圧力特性を求めるための実験手順として、まず始めに、4台のツェナーの中から、任意の1台を基準用を選び実験室内に接続する。次に、残りの3台のツェナーの中から、任意の1台を試験用を選択して圧力試験室内に接続する。この測定手順を、実験室側と圧力試験室側で交互に繰り返す。すべてのツェナーが、基準用にも試験用にも使用されるようにする。ツェナーの電源は、基準用および試験用ともバッテリー駆動であるが、駆動電源の相違による影響を除くために、交流駆動からバッテリー駆動に切り換えた後、12時間以上にわたって2台のツェナーを放置した。

圧力試験室は、圧力とその継続時間が自動設定されるため、作業を中断することなく圧力変化に対して連続測定が可能となっている。設定圧力は、まず始めに、大気圧にほぼ近い1000hPa、次に900hPa、さらに800hPaと順次降圧して行き、その後は、900hPaさらに1000hPaへと順次元に戻してゆく。測定時間は基本的に、始めの設定圧力1000hPaについてのみ約60分間であり、他の設定圧力900hPa、800hPaおよび最後の1000hPaについては、90分間としている。測定時間の違いは、圧力を変化させると圧力試験室内の圧力が、設定圧力に到達するまでに約30分程度要するためである。

この圧力試験室内に接続された試験用のツェナーは、上記の圧力変化に対して圧力依存性があれば出力電圧に変化を生じることになる。一方、実験室内に接続された基準用のツェナーは、測定中に大気圧の大きな変化が発生しなければ、その出力電圧は、ほぼ一定値と考えることができる。よって、これらのツェナーの出力電圧の差を、デジタルマルチメータ（HP社製3458A型）で連続的

表6 ツェナーダイオードのタイプ

校正機関・会社名	シリアル番号 (732B)	タイプ
産業技術総合研究所	6950001	L
	6950002	L
	6950003	L
	6950004	L
沖エンジニアリング	6230008	L
アジレントテクノロジー	5740105	M
	5740205	M
	5740305	M
	5740405	M
	6260008	L
松下電器産業	6050005	L
	6050006	L
長野県精密工業試験場	6605008	L
	6605009	L
	6605010	L
	6605011	L

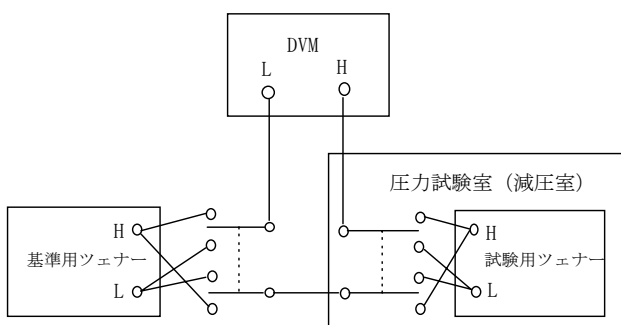


図11 測定システムの概略図

に測定を行ってやれば、ツェナーの圧力依存性が求められることになる。また、測定中に大きな大気圧変化は、起こらなかったことを観測している。

4.2 測定結果

図12に、4台のツェナー仲介器の圧力特性の測定結果を示した。(a)には、出力電圧1.018Vの圧力依存性を、(b)には、出力電圧10Vの圧力依存性をそれぞれ示した。横軸は、測定時間であり、縦軸は、出力電圧の差と各試験圧力を示してある。また、図中には、試験対象であるツェナーのシリアル番号を示した。

ツェナーの出力電圧は、試験圧力の変化に対して極めて俊敏に追従しており、圧力変化と出力変化は、ほぼ同時に進行しているものと観測できる。測定結果から圧力特性を求めるためには、圧力と出力電圧差の相関関係を明確にしなければならない。そのためには、各試験圧力における多数の測定値から、測定値の平均値と標準偏差を求めた。ただし、900hPaと1000hPaについては、往復の平均値と標準偏差が得られるので、最良推定値を求めるために、加重平均と重み付きの標準偏差を求めた。

降圧過程における、1000hPaの差電圧の平均値を $M_d$ および平均値の標準偏差を $S_d$ とする。また、昇圧過程における、1000hPaの差電圧の平均値を $M_u$ および平均値の標準偏差を $S_u$ とする。これから最良推定値である加重平均 $M_w$ は、第3章の(13)式から求まる。また、重み付き標準偏差 $S_w$ は、同様に第3章の(14)式から得られる。900hPaについても、(13)式と(14)式を用いて、加重平均 $M_w$ と重み付き標準偏差 $S_w$ を求めた。

出力電圧の差と試験圧力との相関関係は、図13のようになる。ただし、900hPaと1000hPaについては、加重平均値を用いている。(a)は、出力電圧1.018Vの圧力特性を、(b)は、出力電圧10Vの圧力特性をそれぞれ示した。各測定値における標準偏差の大きさは、図中のプロット上の縦線で示してある。ただし、900hPaと1000hPaについては、重み付き標準偏差を用いている。

4.3 圧力係数

図13の測定結果より、4台のツェナーの出力電圧の変化と圧力との関係は、ほぼ直線的とみなせる。よって、圧力係数を求めるために、最小二乗法 ((6)式~(8)式を参照) を用いて回帰直線を求めた。また、この回帰直線の当てはめの不確かさを、標準偏差 ((11)式あるいは(12)式を参照) で表した。回帰直線は、図中の破線で示してある。

表7に、仲介器として用いる4台のツェナーの圧力係数とその不確かさ(標準偏差)を示した。圧力依存性は、極めて小さいように見えるが、NMIJでツェナーを校正後、仮に低気圧が発生して30hPa程度の気圧変化が起こったとすると、出力電圧の変化は、約 $6 \times 10^{-8}$ 程度となり、NMIJの校正値に対して大きな影響を及ぼすことになる。このため、校正現場では低気圧の発生時には、ツェナーの校正を中止にするか、やむおえず校正しなければならない場合には、圧力補正を加えるなどの対策をしなければならない。また、校正現場の立地条件によっては、産総研との標高差にも注意する必要がある。当然ではあるが、校正現場の必要とする精度あるいは最高測定能力に気圧変化が影響しなければ、通常の校正業務が可能である。

表7 仲介器の圧力係数と不確かさ

シリアル番号	圧力係数 (nV/hPa)		TypeA(nV)	
	1.018V	10V	1.018V	10V
6950001	2	18	13	66
6950002	1	16	4	65
6950003	2	18	2	94
6950004	2	21	26	155

第4章 仲介用ツェナー標準電圧発生器の圧力特性

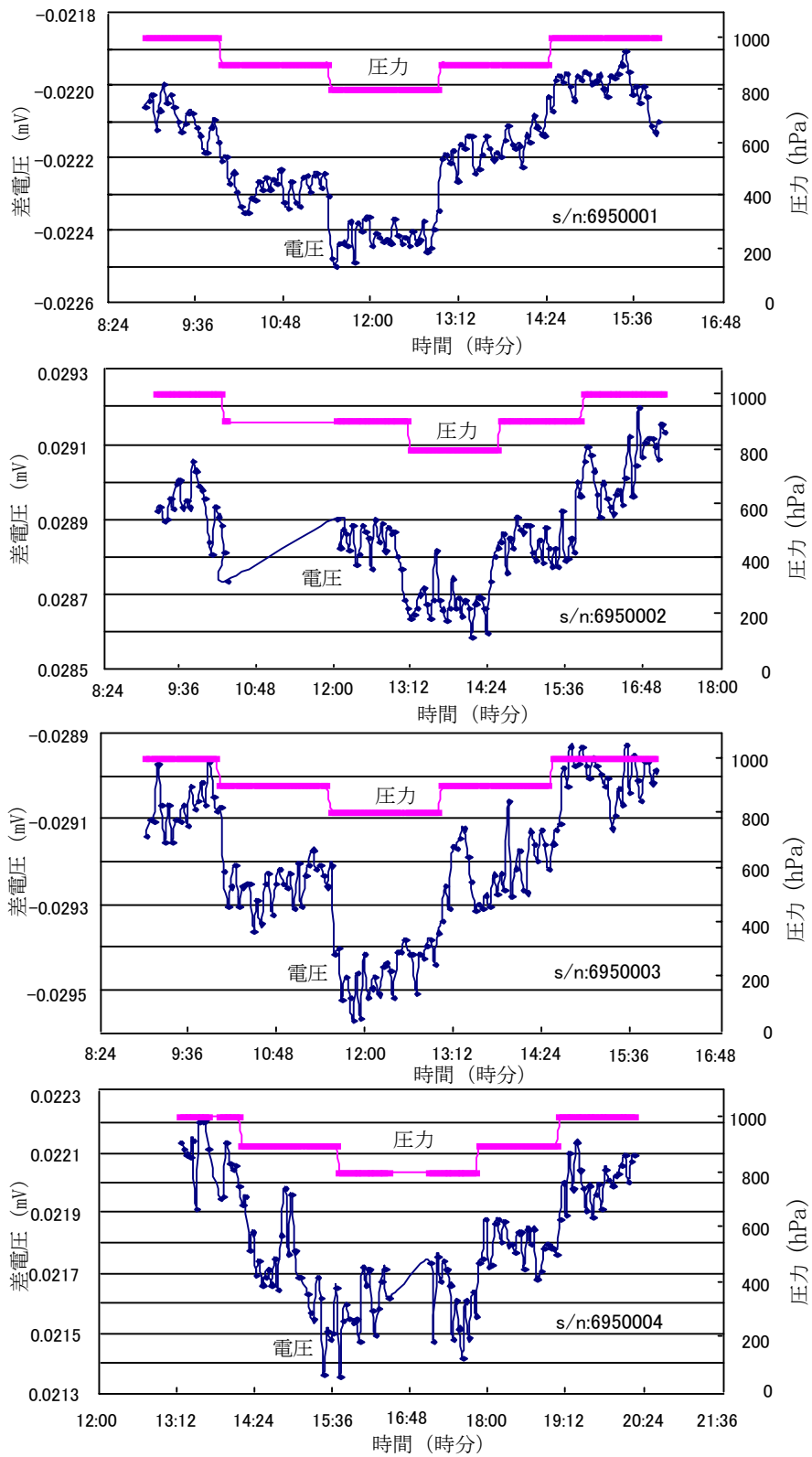


図12(a) 出力電圧1.018Vの圧力特性

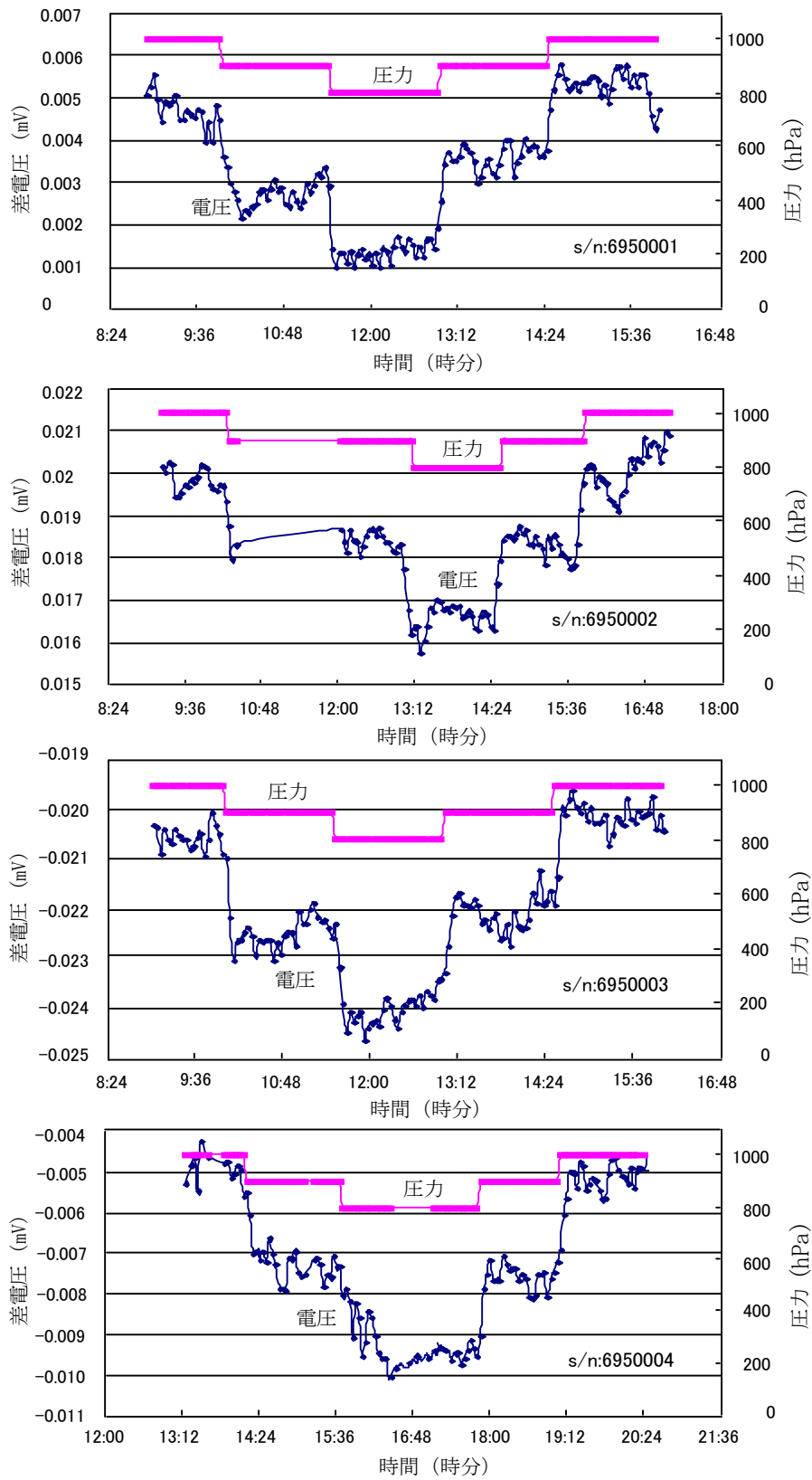


図12(b) 出力電圧10Vの圧力特性

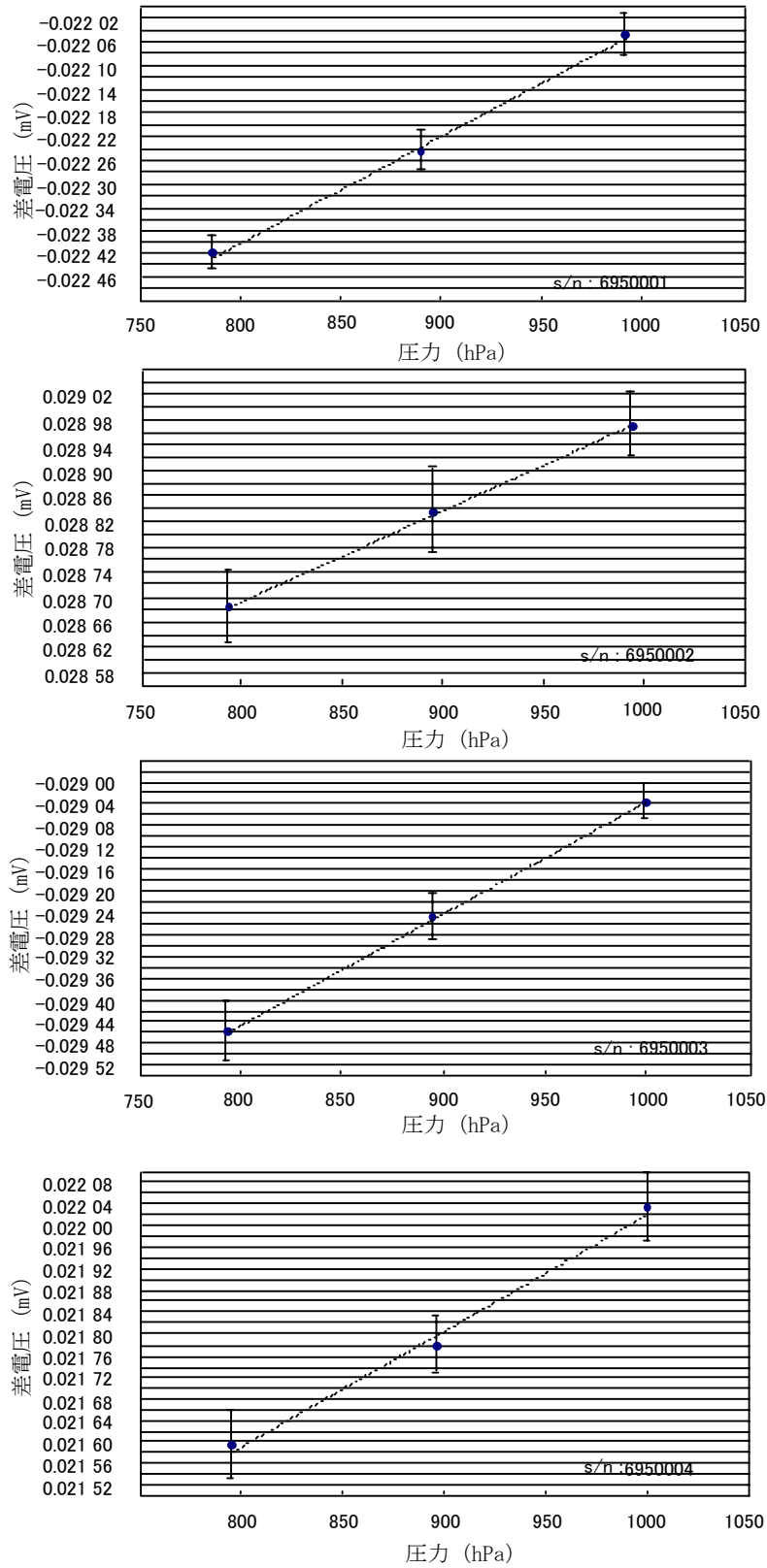


図13(a) 出力電圧1.018Vと圧力との関係  
破線は回帰直線を表し、縦線は標準偏差を示す。

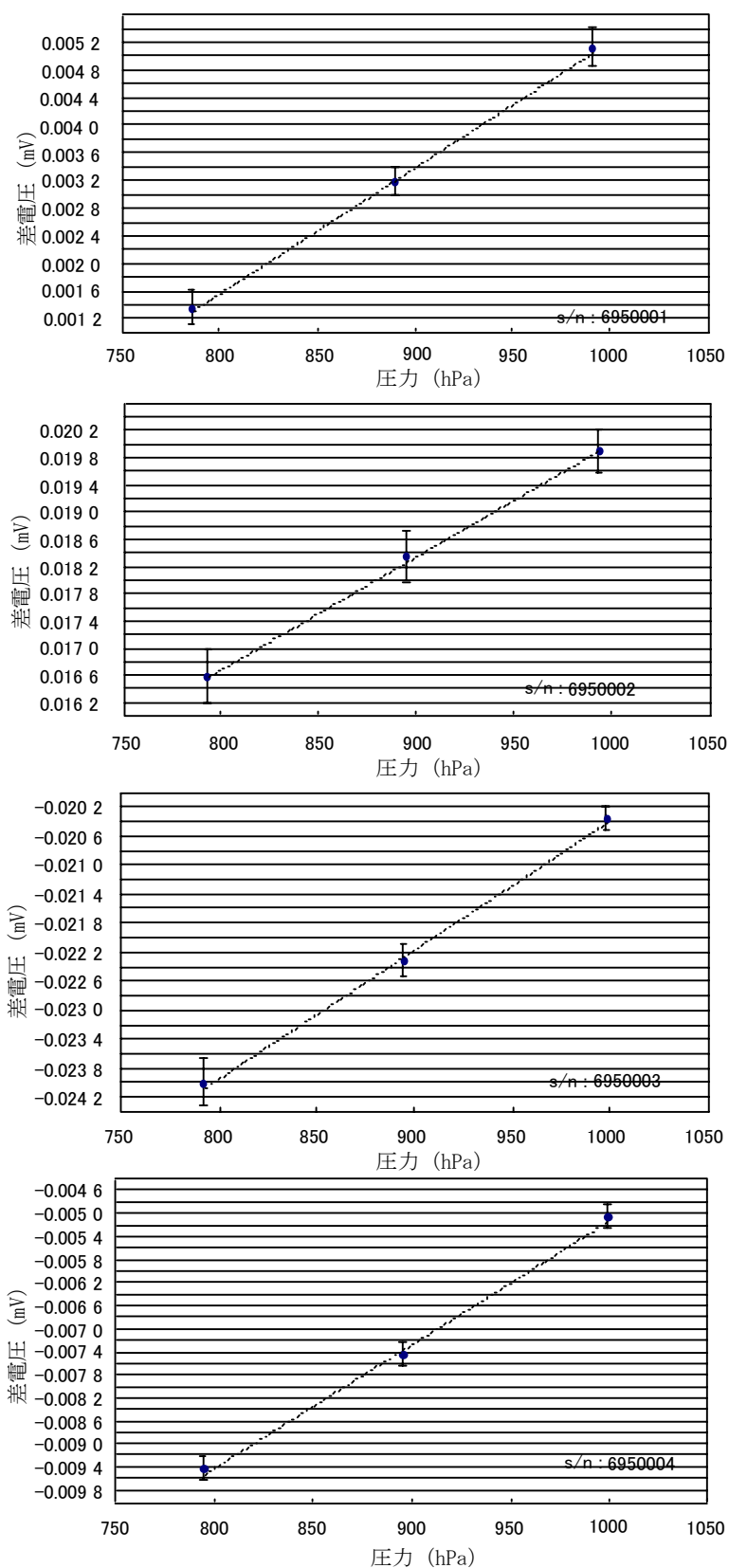


図13(b) 出力電圧10Vと圧力との関係  
破線は回帰直線を表し、縦線は標準偏差を示す。

## 第5章 仲介用ツェナー標準電圧発生器の経年変化

産総研では、より正確な巡回比較が実施できるよう、仲介器の重要な環境条件である湿度、温度および圧力に関して、それらの特性を前章で明らかにしてきた。一方、ツェナー自身の電圧が時間的に変化していく経年変化も、また重要な特性の一つである。蓄積された経年変化のデータから回帰直線を導きだし、その延長上の予測値と、測定から得られた校正値との一致度を確認することにより、校正が正しく実施されたかどうかの判断基準にもなる。

経年変化には、電圧値が波状の変動を繰り返しながら一方向に移動していく、季節変動と呼ばれる現象が、ツェナーによっては発生する。この原因は、今のところ解明されていないが、季節ごとに校正室内の湿度が変動するため、ツェナー内部の抵抗分圧器や出力端子間の絶縁抵抗が、湿度変化の影響を受けるのではないかと考えられる。

このため、産総研で所有している仲介器用の4台のツェナーが、当実験室内のツェナー近辺の湿度変化に対して、どのような経年変化を示すのかを、約一年間にわたって測定を行ってみた。

### 5.1 季節変動

季節変動の発生している経年変化の一例を、**図14**に示した。(a)は、出力電圧1Vの経年変化を、(b)には、出力電圧1.018Vの経年変化をそれぞれ示した。ツェナーは、NMIJ所有のものでフルーク社製の732A型である。1990年～2004年まで10年以上に及んで、桜庭らが取り続けてきたデータであるが、年間数ppmの変動を繰り返しながら、一方向に移動していくのが観測できる。このような波状の変化を、通常、季節変動と呼んでいる。発生する原因は今のところ不明であるが、原理的には次のことが考えられる。

前1章の**図1**で、標準電圧発生器の簡単な概略図を示してあるので参照されたい。ツェナーダイオードの一定電圧を基準にして、抵抗分圧器の両端に10Vが発生している。そして、この10Vの電圧を抵抗比で分圧することにより、1.018Vあるいは1Vの出力電圧を得ている。

出力電圧 $V_{out}$ は、第1章の(1)式によって求められる。

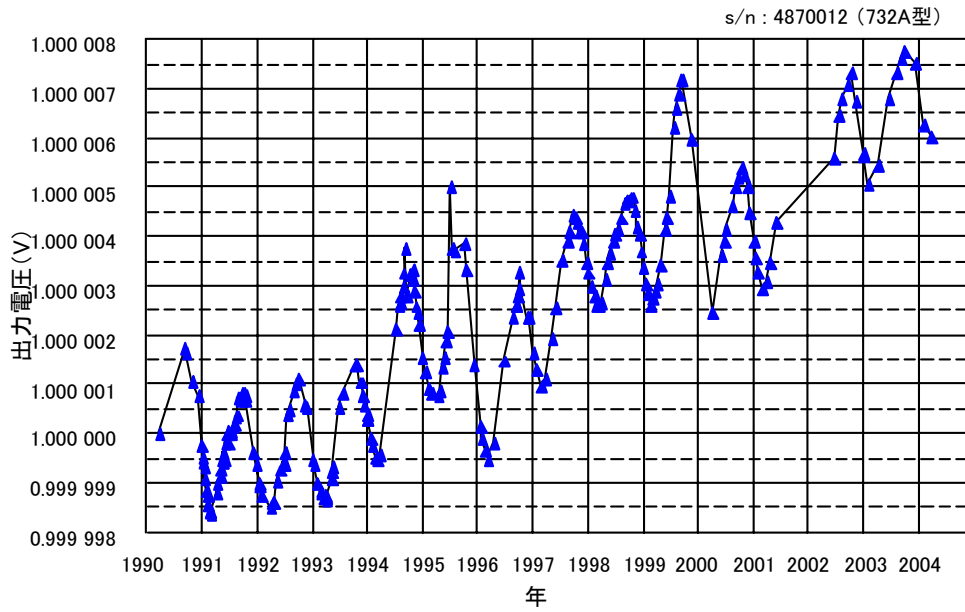
(1)式から、仮に抵抗分圧器 $R_{out}$ 、 $R$ および絶縁抵抗 $R_{e1}$ 、

$R_{e2}$ が、周辺湿度の季節変動によって抵抗値が変化し、なおかつ、その抵抗値の変化が起因して、それぞれの抵抗比が変化すると想定する。すると、(1)式から明らかのように、出力電圧 $V_{out}$ が変動する。これによって、ツェナーの経年変化に季節変動の現象が発生することになる。ただし、以上はあくまでも一つの要因であり、季節変動が他に起因することも十分考えられる。

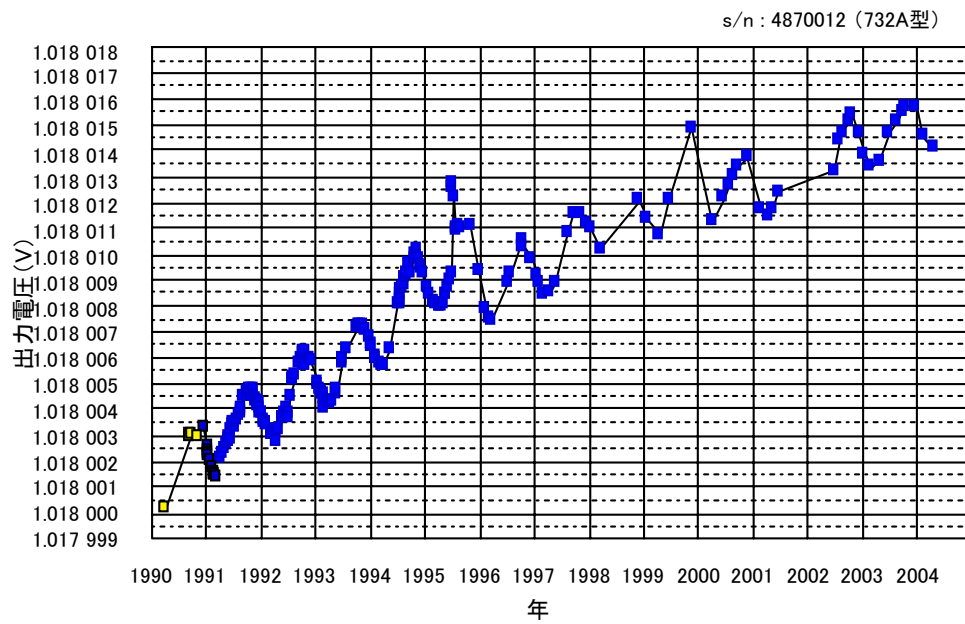
### 5.2 測定方法

測定した4台のツェナーは、フルーク社製732B型で、製造番号は6950001～6950004である。4台のツェナーは、実験室内に放置した状態で約2週間毎に測定を行い、1年間にわたってデータを蓄積した。また、環境湿度は、ツェナーを校正する直前に、ツェナー直上の湿度を電子式湿度計で測定している。4台のツェナーの駆動電源は、すべてバッテリーを使用した。第3章の温度特性の実験から明らかのように、電源をAC駆動からバッテリー駆動に切り替えるとツェナーの内部温度が長時間にわたって変化する。これに追従して出力電圧も長い時定数で変化し、最終値の $\pm 2 \times 10^{-8}$ 以内に到達するのに約8時間の長期に及ぶ。この特性のため、ツェナーの電源をバッテリー駆動に切り替えた直後から直ちに測定を開始すると、測定時間の関係上、ツェナーによっては駆動電源の違いによる影響をうけてしまう。4台のツェナーの一部の経年変化に、内部温度の変動による誤差が加わらないようにするには、すべて同一条件でツェナーを測定する必要がある。

このため、本実験では、ツェナーの出力電圧を安定化させるために、4台のツェナーを12時間以上バッテリー駆動で放置しておいてから経年変化の測定を実行した。



(a) 出力電圧1 Vの経年変化



(b) 出力電圧1.018 Vの経年変化

図14 季節変動の発生した経年変化



### 5.3 測定結果

図15に、4台のツェナーの経年変化を示した。(a)には、出力電圧1.018Vの経年変化を、(b)には、出力電圧10Vの経年変化をそれぞれ示した。横軸は、測定年月日であり、縦軸は、出力電圧とツェナー近辺の湿度変化を示してある。また、図中には、試験対象であるツェナーのシリアル番号を示した。

ツェナー近辺の湿度は、一年間を通じて最大幅で約30%の変動をパルス状に発生している。この変動にも関わらず出力電圧の動きは湿度変化とは無関係に、ほぼ直線的に時間とともに移行していくように観測できる。ツェナーによっては、s/n : 6950002の経年変化で見られるように、30%のパルス状の湿度変動の範囲内で出力電圧が僅かに反応しているように見える。しかし、季節変動は、前例で示したように数ppmに及ぶ大きな変化を生じているため、この出力電圧の微妙な動きは、季節変動ではないと判断した。以上のことから、仲介器として用いる4台のツェナーは、湿度変化の影響を受けることなく、時間に対して直線的な変化を示すものと考えられる。

これより、出力電圧と時間の関係は、一次関数と考えられるので最小二乗法（(6)式～(8)式を参照）を用いて回帰直線を求めた。また、回帰直線の当てはめの不確かさを標準偏差（(11)式あるいは(12)式を参照）で表した。

### 5.4 経年変化率

表8に、回帰直線から得られた4台のツェナーの経年変化率と標準偏差を示した。経年変化率は、一ヶ月間に換算した値である。

4台のツェナーの経年変化は、環境湿度とは無関係であり、問題として取り上げられている季節変動の現象は発生しなかった。第2章の湿度特性の実験結果では、ツェナーの湿度依存性は、測定値の標準偏差よりも小さく無視できることが明確となったが、本章の経年変化の特性からも、4台のツェナーの湿度依存性は、無視できることが実証できた。

表8 仲介器の経年変化率と不確かさ

シリアル番号	経年変化率 (nV/月)		TypeA(nV)	
	1.018V	10V	1.018V	10V
6950001	-27	-294	53	341
6950002	39	-58	115	609
6950003	-57	-327	33	435
6950004	-93	-156	58	423

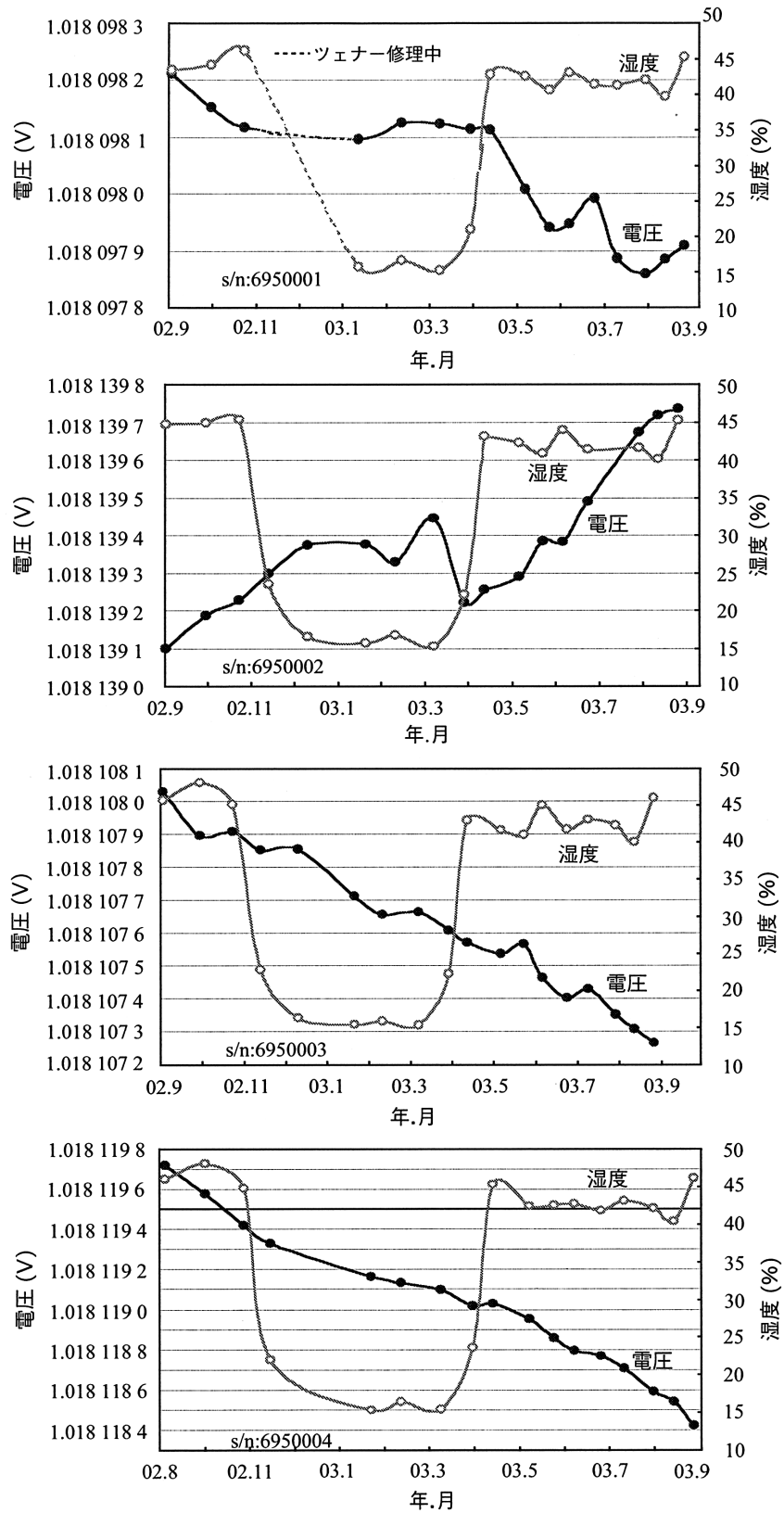


図15(a) 出力電圧1.018Vの経年変化

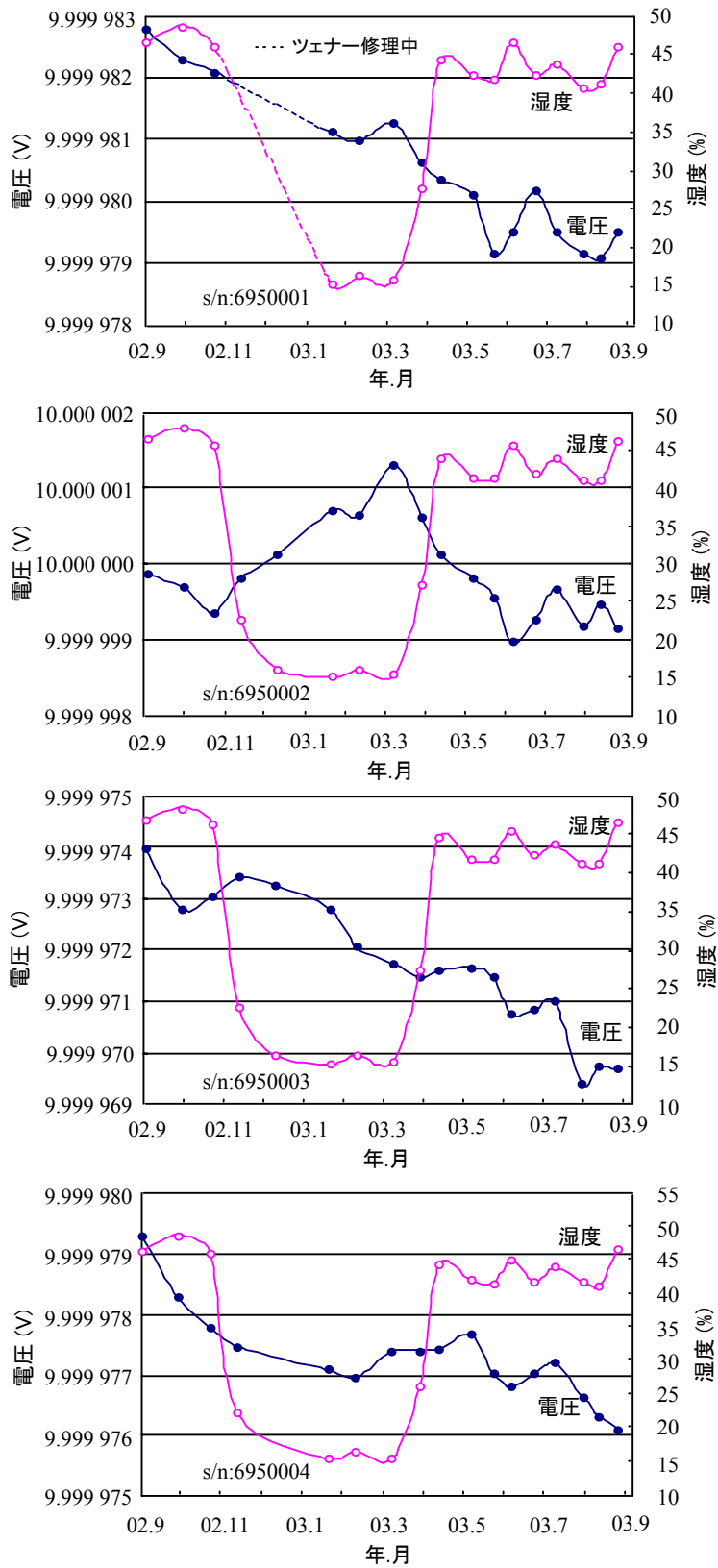


図15(b) 出力電圧10Vの経年変化

## 第6章 ま と め

NMIJでは、電圧標準に用いる仲介器の環境特性を長年にわたって調べてきた。これら4台の仲介器は、今後の製品評価技術基盤機構の実施する技能試験等に使用されるため、信頼のおける仲介器を産業界に提供することは、NMIJの責務と考えている。本論文では、今後、広く電圧標準の分野に寄与するための仲介器について、第1章では仲介器自身の説明を、次に、第2章では湿度特性を、第3章では温度特性を、さらに、第4章では圧力特性を、最後に、第5章では経年特性について述べてきた。

NMIJでは、特定二次標準器のjcss校正試験やそれ以外の依頼試験に、ジュセフソン電圧標準測定装置を使用しているが、校正担当者の労力と取り扱い上の煩雑さを軽減させるために、主な操作部分は自動測定となっている。この自動測定に対応するため、アップグレードボックスと呼ばれるツェナーの格納箱が、NMIJにおいて考案された。

第1章のアップグレードボックスを使用することにより、

- (1) ツェナー端子の熱起電力が安定するため、出力電圧の定義点が明確になる。
- (2) 仲介器の絶縁抵抗が、約3倍の大きさとなるため、Type Bへの影響を約1/3に減少することができる。
- (3) 外部バッテリーを追加してあるので動作時間が約2倍となる。

等の特長をもった仲介器が得られることになった。しかし、アップグレードボックスは、仲介器の環境特性を改善するために使用される訳ではない。また、(2)の絶縁抵抗を測定するためにY-Δ変換型高抵抗ブリッジを開発した。

仲介器の環境条件による影響は、世界的にも問題視されており、湿度・温度および圧力等に関する報告が、NMIJも含めて多くの研究機関から発表されている。特に、国際比較等においては、極めて高い精度での比較が要求されるため、環境条件の相違から甚だ校正値を悪くしたという事実も報告されている。本来、このような影響を取り除くには、校正室の環境条件を国内外含めて統一することが理想であるが、現実的には不可能に近い対策である。最善の良策として考えられるのは、仲介器の環境特性を求めておいて、必要があれば補正などを加えるとい

う方法を用いれば、異なる環境条件下においても、より精度の高い比較が可能になると考えられる。

第2章の湿度特性については、4台の仲介器を改造した恒温恒湿槽に保管して、設定湿度を35%RH、次に、75%RH、最後に再び35%RHに戻して、それぞれの設定湿度における出力電圧を約10週間に及んで測定を行った。得られた出力電圧の変化は、湿度変化より、むしろ時間に対して直線的に変化する経年変化のような動きを示した。このような変化から直接的に湿度特性を求めることは不可能であるため、ある仮説を提案した。経年変化が、湿度変化の影響をうけながら直線的に変化していると考えたと、湿度75%RHにおける経年変化は、35%RHの経年変化よりも、より大きな湿度変動の影響をうけるはずである。この影響の相違によって、湿度75%RHの経年変化と湿度35%RHの経年変化との間にずれが発生すると予測した。そして、このずれが、仲介器の湿度特性ではないかと仮定した。また、ずれを解明するために、二つの経年変化から二つの回帰直線を求めて、回帰直線のパラメータの差から経年変化のずれを求めるという数学的手法も提案した。

上記の数学的解析より、確かに、二つの回帰直線のパラメータの間には、差が発生した。つまり、湿度特性が確認できた。しかし、二つの回帰直線の不確かさ（標準偏差）を求めてみると、この不確かさの大きさは、パラメータの差よりはるかに大きいことが判明した。この事実から、回帰直線の不確かさの中からパラメータの差を識別することは不可能であり、言い換えれば、不確かさの中に湿度特性が存在していることになる。ここで結論として、4台の仲介器は、通常の湿度変化においては無視できるほど小さい湿度依存性をもつと判断した。

次に、第3章の温度特性であるが、仲介器には、外部（環境）温度と内部温度の二つの温度依存性がある。

仲介器の電源をAC駆動からバッテリー駆動に切り替えると、その直後から内部温度と出力電圧が変動を始め、出力電圧は約8時間程度および内部温度は約12時間程度で一定値に到達した。内部温度と出力電圧の最終値を求めると、内部温度は、約0.1°C低下し、出力電圧は、その値が約 $8 \times 10^{-8}$ 程度大きくなった。校正担当者は、この電圧値の差と現場の校正精度を考慮しながら駆動方法を慎

重に決定する必要がある。特に、技能試験等による巡回比較を実施する場合、この駆動方法の選択は、精度上重要な問題を生じることになる。

環境温度の変化による温度依存性を測定するために、4台の仲介器を恒温恒湿槽に保管した。槽内の試験温度は、まず始めに23℃に設定し、次に15℃に低下させた。そして、再度23℃に戻して、さらに35℃に上昇させた。環境温度に対して出力電圧と内部温度を安定化させるために、それぞれの試験温度で仲介器を槽内に12時間以上放置した。このような条件下で測定を実施したところ、環境温度と出力電圧の関係は、ほぼ直線的となり最小二乗法を用いて温度係数を求めた。この結果、4台の仲介器の温度係数は、約 $-1 \times 10^{-8}/K$ であることが明らかとなった。

第4章の圧力特性については、4台の仲介器を減圧室内に接続する試験用と実験室内に接続する基準用とに任意に選別し、その後は、4台を順送りにして減圧室側と実験室側に接続した。減圧室内の圧力は、順次1000hPa、900hPa、800hPaと降圧し、再度900hPa、1000hPaに昇圧させた。このような減圧室の圧力変化に対して、2台の仲介器の出力電圧の差は、デジタルマルチメータで連続的に測定され、その測定値を自動的に計算機で読み取った。なお、仲介器の電源は、測定中すべてバッテリー駆動である。

データ処理の結果、出力電圧の差と圧力との相関関係は、ほぼ直線的であると見なされたので圧力係数を最小二乗法より求めた。これによって、4台の仲介器の圧力係数は、約 $+2 \times 10^{-9}/hPa$ であることが判明した。また、NMIJの仲介器に使用されているツェナーダイオードのタイプは、すべてLタイプである。

最後に、第5章の経年変化であるが、この特性で特に問題となるのが、電圧値が時間に対して波状にうねりながら一方向に移動していく、季節変動と呼ばれる現象で

ある。この現象の原因は、現在のところ解明されていないが、季節ごとに発生する校正室内の湿度変化による起因説が今のところ一番有力となっている。NMIJの所有する仲介器の経年変化に季節変動が発生することは好ましくなく、特性の優れた仲介器を選定するために、校正室内の湿度変化と経年変化との関係を約1年間に及んで観測してきた。

測定結果より、仲介器近辺の湿度は、1年間を通じて約30%RHの変化をパルス状に発生したが、経年変化に問題となるような季節変動は発生しなかった。出力電圧はむしろ時間に対して直線的な変化を示した。4台の仲介器の経年変化率は、最小二乗法を用いて求めたが、いずれも良好な特性を示す仲介器であることが確かめられた。

以上に述べた各特性の結果を、まとめて表9に示した。

NMIJでは、産業基盤に貢献する目的のために仲介器の準備を進めてきた。4台の仲介器は、製品評価技術基盤機構から校正能力を審査するための仲介器として、各校正事業者間に巡回されることになる。NMIJの環境条件下で校正された仲介器を各校正事業者の異なる環境条件下で校正を実施しても、優れた環境特性を有しているため、基本的には校正値への影響はほとんどないと考えている。しかし、あまりにも環境条件がかけ離れていると、校正能力が正しく評価されない危険性も起こりうる。特に、大気圧の大きな変化には要注意である。いずれにしても、各特性係数が明確になったことで、本仲介器を電圧標準の巡回比較に用いた場合、各校正事業者の校正能力を環境条件に左右されることなく、的確に審査できるものと考えている。

最後に、本研究を遂行するにあたり、圧力特性の実験において、貴重なる助言と惜しめない御協力を頂いた、松下電器産業（株）の池田勝氏、千原光次氏、青木秀明氏、および瑞光計器（株）の築田智氏に深く感謝の意を表します。

表9 環境特性まとめ

シリアル番号 (732B)	湿度係数 ( $\times 10^{-6}/\%RH$ )		温度係数 ( $\times 10^{-6}/K$ )		圧力係数 ( $\times 10^{-6}/hPa$ )		経年変化率 ( $\times 10^{-6}/月$ )	
	10V	1.018V	10V	1.018V	10V	1.018V	10V	1.018V
6950001	<0.0015	<0.0013	-0.008	-0.012	+0.0018	+0.0018	-0.029	-0.027
6950002	<0.0015	<0.0013	-0.007	-0.009	+0.0016	+0.0014	-0.006	0.039
6950003	<0.0015	<0.0013	-0.016	-0.009	+0.0018	+0.0020	-0.033	-0.057
6950004	<0.0015	<0.0013	-0.006	-0.009	+0.0021	+0.0021	-0.016	-0.093

## 参考文献

- 1) Thomas J. Witt, "Maintenance and Dissemination of Voltage Standards by Zener-diode-based Instruments," *IEE Proc.-Sci. Meas. Technol.*, Vol. 149, pp.305-312, 2002.
- 2) 例えば、菅野允「改訂 電磁気計測」：電子情報通信学会編 コロナ社、pp.191-193.
- 3) 西中英文：特願2002-315162、特開 2004-150902.
- 4) L. X. Liu, et al., "Mathematical model to approximate the response of a Zener cell output under varying environmental conditions," *Metrologia*, vol.37, pp.213-218, 2000.
- 5) 松沢草介 他「ツェナー型標準電圧発生器の出力電圧と装置内部温度の相関」：平成10年電気学会全国大会講演論文集[1].
- 6) Thomas J. Witt, "Pressure Coefficients of Some Zener-Diode Based Electronic Voltage Standards," in *CPEM ' 98 Conf. Dig.*, pp.305-306,1998.