

# 自己平衡型高抵抗ブリッジを用いた 直流電気抵抗 10 MΩ～100 GΩの校正

阿部 隆行（日本電気計器検定所 標準部）

## 1. はじめに

直流電気抵抗において一般的に高抵抗と称される  $10^6 \Omega$  を超過する抵抗器の精密な測定方法としてハーフブリッジ法が利用されている<sup>(1)(2)</sup>。ハーフブリッジとは、4辺の抵抗から構成されるホイートストンブリッジの半分の2辺の抵抗器を使用し他の2辺は直流電源を使用するブリッジ法の一つであり、別名デュアルソースブリッジとも呼ばれている。

通常、高抵抗における精密測定では、 $10^{12} \Omega$  のように絶縁抵抗値に測定対象の抵抗値が近くなると、漏れ電流の問題、充電電流の問題および誘導の問題等を考慮する必要がある。しかし、ハーフブリッジにおいては、これらの問題点への解決方法として誘導を防ぐシールドと、接地に注意することにより十分な校正精度が得られる特徴がある<sup>(3)</sup>。

日本電気計器検定所（以下、JEMIC）と国立研究開発法人産業技術総合研究所計測標準研究部門（以下、NMIJ）は、ハーフブリッジ法を用いた自己平衡型高抵抗ブリッジ（Self-Balancing High-Resistance Bridge、以下、SBHRB）<sup>(4)</sup> を共同開発した。本稿では、SBHRB の特性評価結果と NMIJ にて高抵抗の校正に使用されているブリッジとの比較結果、及び測定の不確かさについて述べる。

## 2. ハーフブリッジ法基本回路

ハーフブリッジ法とは図1の  $R_S$  基準抵抗器、 $R_X$  校正抵抗器、 $V_S$ 、 $V_X$  の電圧源、D のゼロ検出器により構成され、基準抵抗器に流れる電流を  $I_S$ 、被校正抵抗器に流れる電流を  $I_X$  とし、検出器 D がゼロを示す場合  $I_S$  と  $I_X$  の大きさは等しく、 $I_S = V_S / R_S$ 、 $I_X = V_X / R_X$  より、次式の関係が成立する。

$$R_S / R_X = V_S / V_X \dots\dots\dots (1)$$

よってこの式に基準抵抗器  $R_S$  および電圧  $V_S$ 、 $V_X$  の測定値（もしくは校正値）を代入することにより、被校正抵抗器の抵抗値  $R_X$  が求まる。

## 3. SBHRB の概要

SBHRB の概要を図2に示す。検出器 D の入力部は、 $10^4 \text{ V/A}$

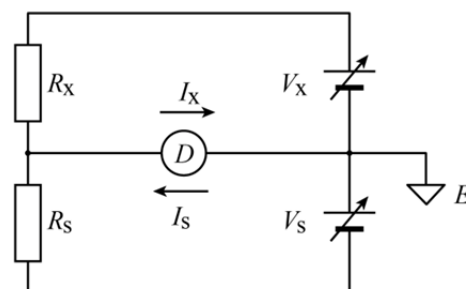


図1 ハーフブリッジ法基本回路

～ $10^{13} \text{ V/A}$  のトランスインピーダンスゲイン（以下、ゲイン）を持ち、入力換算雑音が最小  $0.2 \text{ fA} / \sqrt{\text{Hz}}$  の電流電圧変換器を用いている。また、電圧に変換された誤差信号を後段の積分回路で積算を行い、電源電圧  $V_X$  の制御に用いている。 $V_X$  は、オペアンプを用いた非反転加算増幅回路を構成しており、パソコンによって制御された D/A 変換器の出力電圧と、上記積分回路の出力電圧の和を加算増幅している。電圧  $V_S$ 、 $V_X$  はデジタルマルチメータを用いて測定を行っており、測定電圧の切り替えには低熱起電力特性を有するラッチングリレーを使用した。

## 4. トランスインピーダンスゲインと積分定数抵抗値の検討

本ブリッジは、誤差電流を電圧に変換増幅し、電圧  $V_X$  を調整するフィードバック系を有しており、安定にフィードバックループが動作するようパラメータを決定する必要がある。そこで、被校正抵抗器  $R_X$  の抵抗レンジごとに、電流電圧変換器のゲイン及びその後段の積分回路の時定数の最適値を検討した。

被校正抵抗器  $R_X = 10 \text{ G}\Omega$ 、基準抵抗器  $R_S = 1 \text{ G}\Omega$  にそれぞれ  $V_X = 100 \text{ V}$ 、 $V_S = 10 \text{ V}$  を印可した場合、それぞれの抵抗器には  $I_X = I_S = 10^{-8} \text{ A}$  の電流が流れる。この電流を7桁（0.1 ppm）で校正できれば、つまり  $10^{-8} \times 10^{-7} = 10^{-15} \text{ A}$  (1 fA) の電流分解能が検出器 D にあれば、抵抗比  $R_X / R_S$  を最大で7桁（0.1 ppm）で校正できると考えられる。

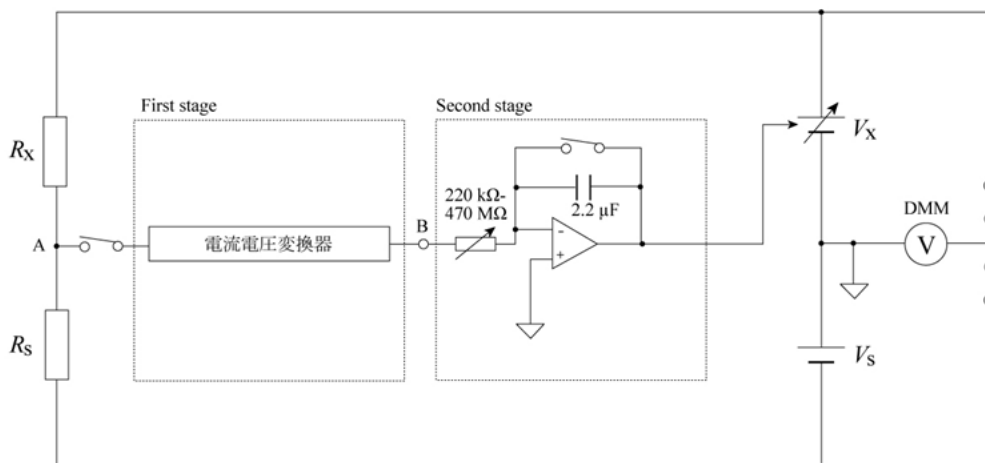


図2 自己平衡型高抵抗ブリッジの概要

また、後段の積分回路の入力電圧の分解能を  $10 \mu\text{V}$  とすると、先ほどの  $1 \text{ fA}$  を  $10 \mu\text{V}$  に変換増幅する  $10 \mu\text{V} / 10^{-15} \text{ A} = 10^{10} \text{ V/A}$  のゲインが必要であることがわかる。

表 1 に示すのは上述の計算に従って得られた必要条件であり、後述するゲイン決定の際は、この値以上のゲインを選択した。

また、ブリッジが安定に動作するパラメータの決定のため、ゲイン及び後段の積分回路の入力抵抗値を変化させ、電圧  $V_X$  の測定値のばらつきを評価した。

後段の積分回路の入力抵抗値（積分時定数）は、 $220 \text{ k}\Omega$ 、 $470 \text{ k}\Omega$ 、 $1 \text{ M}\Omega$ 、 $2 \text{ M}\Omega$ 、 $5 \text{ M}\Omega$ 、 $10 \text{ M}\Omega$ 、 $22 \text{ M}\Omega$ 、 $47 \text{ M}\Omega$ 、 $100 \text{ M}\Omega$ 、 $470 \text{ M}\Omega$  の合計 10 種類をダイヤルスイッチにより選択可能な構成としている。

ゲインおよび積分定数抵抗値の最適値の決定は、 $R_X = 10 \text{ M}\Omega$  から  $1 \text{ T}\Omega$  ( $R_S = 1 \text{ M}\Omega$  から  $100 \text{ G}\Omega$ ) の 6 種類の組み合わせにおいて、ゲインおよび積分定数抵抗値 ( $220 \text{ k}\Omega$ 、 $1 \text{ M}\Omega$ 、 $5 \text{ M}\Omega$ 、 $22 \text{ M}\Omega$ 、 $100 \text{ M}\Omega$ 、 $470 \text{ M}\Omega$ ) を変化させ、電圧  $V_X$  を測定して、その標準偏差が最小となる組み合わせより検討を行った。

各抵抗レンジにおいて、ゲインおよび積分定数抵抗値を変化させた場合の電圧  $V_X$  の標準偏差の値を図 3 に示す。図中の例えば E10 という数値は、 $10^{10} \text{ V/A}$  の変換ゲインを使用したことを意味している。積分器の時定数を小さくする

と、積分回路の反応が早くなるためばらつきが大きくなり、逆に時定数を大きくすると外部ノイズに対しても反応が遅くなるため電圧  $V_X$  のばらつきは大きくなると考えられる。ゲインを大きくするに従い、最適な積分定数が高時定数側に推移している様子がおおむね見て取れる。

## 5. 自己平衡型高抵抗ブリッジの特性評価結果

図 3 より、幾つかのゲイン及び積分定数抵抗値を選び抵抗比測定を行った。抵抗比測定においては、電圧  $V_X$ 、 $V_S$  の極性を  $+/-/+$  と反転させ、それぞれの極性において  $V_X$ 、 $V_S$  を 100 点ずつ計 800 点測定し、各平均値より電圧比 (= 抵抗比) を算出した。これを 1 セットとして 5 セット測定し最終的な結果とした。図 4 に測定結果を示す。縦軸は被測定抵抗器  $R_X$  の抵抗値であり、NMIJ による校正値を 0 としている。図 4 におけるエラーバーは、各測定の標準偏差を表しており、一点破線は、NMIJ の拡張不確かさ (包含係数  $k = 2$ ) を表す。

表 1 において、 $100 \text{ G}\Omega$  を 7 桁 ( $0.1 \text{ ppm}$ ) の精度で測定するには、 $10^{11} \text{ V/A}$  の変換ゲインが必要であるとした。図 4 左下のグラフにおいて、 $10^9 \text{ V/A}$  の結果は、より高いゲインの結果と比べて  $10 \text{ ppm}$  程度の差異があり、ゲインが不足していることがわかる。

この抵抗比測定の中心値及び標準偏差の値から、各抵抗レンジにおけるゲイン及び積分定数抵抗値の決定を行った。決定したパラメータを表 2 に示す。

## 6. 測定の不確かさの算出

代表的な被校正抵抗器  $R_X = 1 \text{ G}\Omega$ 、基準抵抗器  $R_S = 100 \text{ M}\Omega$  の組み合わせについて測定の不確かさを評価した。なお、校正環境は、温度  $23.0 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 、相対湿度  $50 \% \pm 5 \%$  を想定した。

表 1  $R_X$  抵抗値と必要最小ゲインの一覧

被校正抵抗器 $R_X$	基準抵抗器 $R_S$	ゲイン (V/A)	積分定数抵抗値
10 MΩ	1 MΩ	$10^8$	5 MΩ
100 MΩ	10 MΩ	$10^9$	1 MΩ
1 GΩ	100 MΩ	$10^{10}$	5 MΩ
10 GΩ	1 GΩ	$10^{11}$	5 MΩ
100 GΩ	10 GΩ	$10^{11}$	470 MΩ
1 TΩ	100 GΩ	$10^{11}$	100 MΩ

表 2 各抵抗値の組み合わせとパラメータ

被校正抵抗器 $R_x$	被校正抵抗器 $R_s$ ( $\Omega$ )	必要最小ゲイン (V/A)
10 M $\Omega$	$10^7$	$10^7$
100 M $\Omega$	$10^8$	$10^8$
1 G $\Omega$	$10^9$	$10^9$
10 G $\Omega$	$10^{10}$	$10^{10}$
100 G $\Omega$	$10^{11}$	$10^{11}$
1 T $\Omega$	$10^{12}$	$10^{12}$

### 6.1 標準器に起因する不確かさの要因 $u(R_S)$

#### (1) 校正の不確かさ $u(R_{S1})$

標準器の校正の不確かさは、次式より求められる。

$$u(R_{S1}) = u(R_{Scer}) / k$$

$u(R_{Scer})$ : 校正証明書による不確かさ

$k$ : 包含係数

なお、校正証明書による不確かさは、JEMIC における 100 M $\Omega$  の最高測定能力 (以下、CMC) である 6 ppm を使用し、標準不確かさの値は、 $\pm 3.00 \times 10^{-6} \Omega/\Omega$  とした。

#### (2) 経年変化 $u(R_{S2})$

基準抵抗器  $R_S$  の経年変化は、製造者の仕様より  $6 \times 10^{-6} \Omega/\Omega$  と見積もった。したがって標準不確かさの値は、 $6/\sqrt{3} \times 10^{-6}$  となり、 $\pm 3.46 \times 10^{-6} \Omega/\Omega$  以内と推定した。

#### (3) 温度依存性 $u(R_{S3})$

基準抵抗器  $R_S$  の温度依存性 (温度係数) は、製造者の仕様より 5 ppm/ $^{\circ}\text{C}$  と見積もった。したがって標準不確かさの値は、校正温度環境  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  より  $\pm 1.44 \times 10^{-6} \Omega/\Omega$  以内と推定した。なお、実際の測定時に有意な温度変動があった場合には、温度変動と抵抗器の温度依存性との積が測定結果のばらつきに含まれる可能性がある。そのため、この項目を不確かさに入れた場合、その不確かさは大きめに見積も

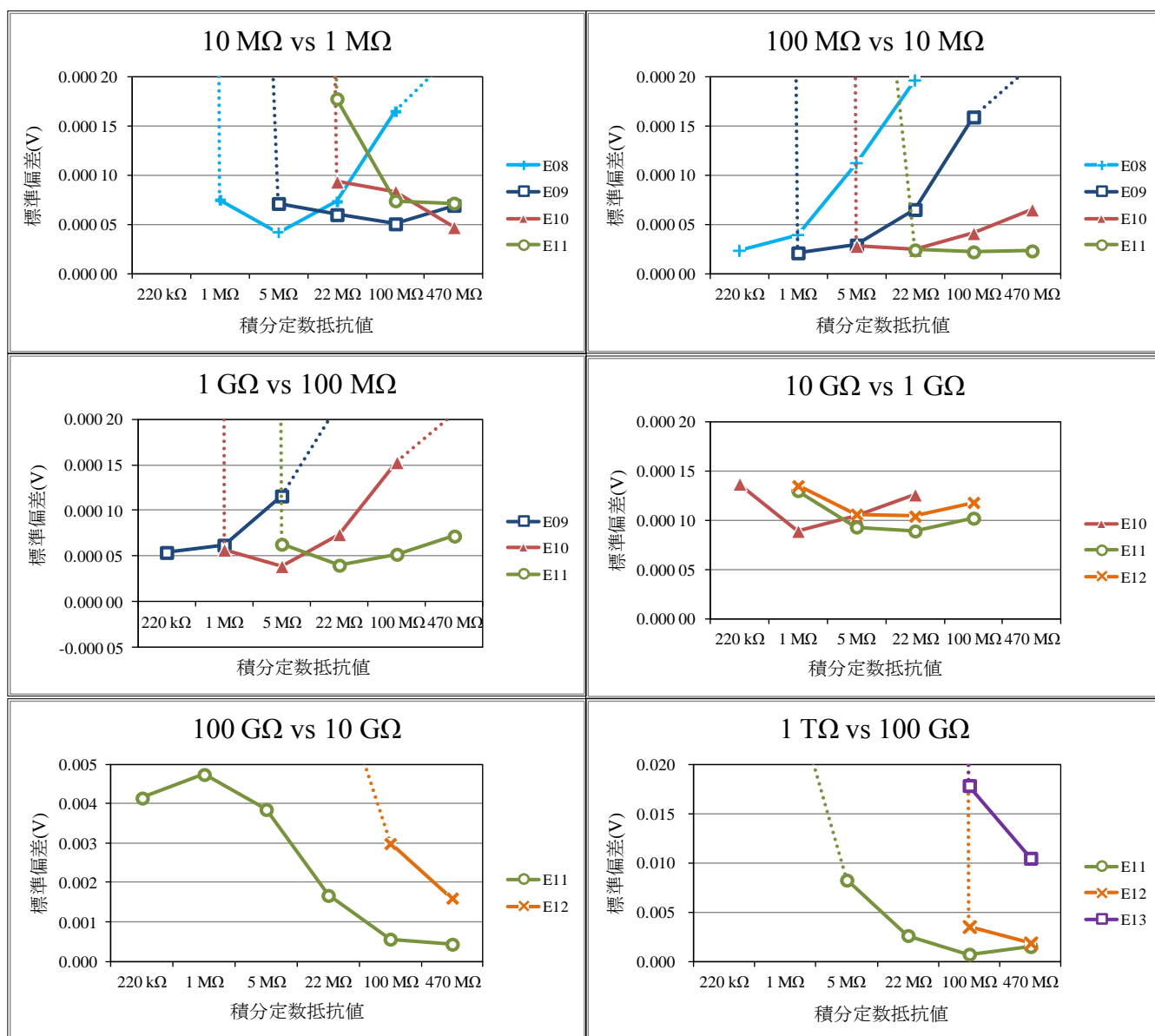


図 3 各抵抗値の組み合わせとゲイン、積分乗数抵抗値の標準偏差グラフ

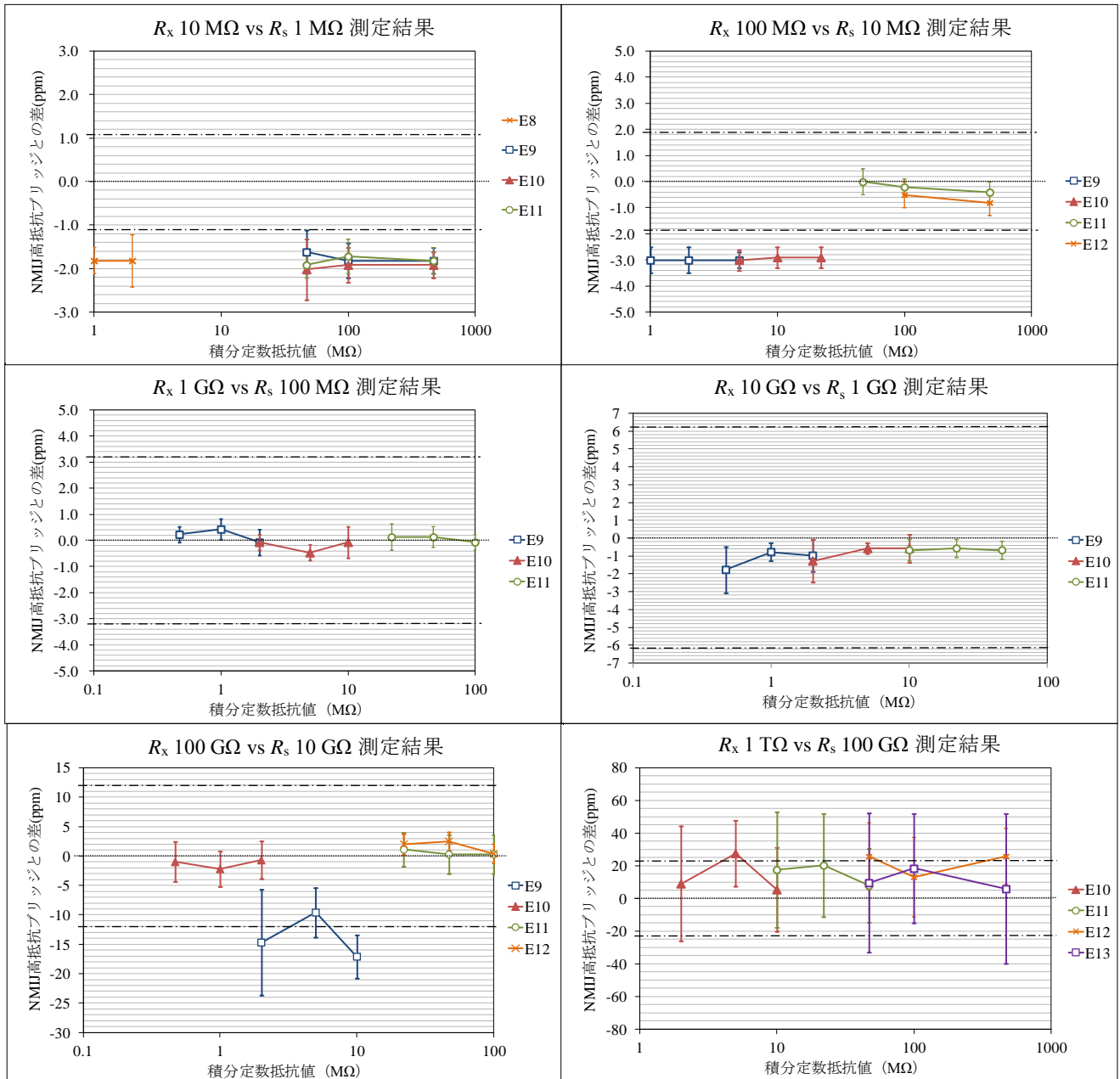


図4 各測定結果とNMIJ高抵抗ブリッジとの差

られることになるが、本研究ではその立場をとる。

(4) 電圧依存性  $u(R_{S4})$

基準抵抗器  $R_S$  の電圧依存性による不確かさは、実験データより  $2 \text{ ppm}/100 \text{ V}$  と見積もった。標準不確かさの値は、 $2/\sqrt{3} \times 10^{-6}$  となり、 $\pm 1.15 \times 10^{-6}$  以内と推定される。

6.2 電圧比の不確かさ  $u(r_m)$

(1) 測定値のばらつき  $u(r_{m1})$

測定値のばらつきによる標準不確かさは、次式より求められる。

$$u(r_{m1}) = s(q_k) / \sqrt{10}$$

$s(q_k)$  : 10回の測定値の実験標準偏差

なお、後述するバジェットシートでは、実測データによる数値を代入した。

標準不確かさの値は、 $\pm 1.58 \times 10^{-7}$  と見積もる。

(2) 測定分解能  $u(r_{m2})$

測定分解能は、 $0.1 \times 10^{-6}$  とする。したがって標準不確かさの値は、 $0.1/\sqrt{3} \times 10^{-6}$  となり、 $\pm 2.90 \times 10^{-8}$  と見積もる。

(3) トランスファにおける不確かさ  $u(r_{m3})$

$V_S$  および  $V_X$  のトランスファにおける不確かさは、製造者の  $100 \text{ V}$  トランスファ確度の仕様「読み取り値の  $0.5 \text{ ppm} + \text{レンジの} 0.1 \text{ ppm}$ 」を使用する。したがって、電圧比の不確かさは、 $100 \text{ V}$  レンジにて  $10 \text{ V}$  を測定した時の不確かさ  $0.5 \text{ ppm} + 1 \text{ ppm} = 1.5 \text{ ppm}$  および  $100 \text{ V}$  レンジにて  $100 \text{ V}$  を測定した時の不確かさ  $0.5 \text{ ppm} + 0.1 \text{ ppm} = 0.6 \text{ ppm}$  それぞれを合成した値を包含係数  $k = 2$  で割った値  $\pm 8.08 \times 10^{-7}$  と見積もる。

表3 測定の不確かさのバジェットシート

標準抵抗器(1 GΩ)							
標準不確かさ成分 $u(x_i)$	不確かさの要因	標準不確かさの値 $u(x_i)$	分布	$c_i \equiv \partial f / \partial x_i$	$u(y) \equiv  c_i  u(x_i)$	自由度 $\nu_i$	備考
$u(R_s)$	標準器に起因する不確かさ	4.94E-6		1	4.94E-6	$\infty$	
$u(R_{s1})$	校正の不確かさ	3.00E-6	正規			$\infty$	校正証明書より
$u(R_{s2})$	経年変化	3.46E-6	矩形			$\infty$	管理基準より
$u(R_{s3})$	温度依存性	1.44E-6	矩形			$\infty$	温度係数と温度環境より
$u(R_{s4})$	電圧依存性	1.15E-6	矩形			$\infty$	実験結果より
$u(r_m)$	電圧測定装置に起因する不確かさ	8.33E-7		1	8.33E-7	6942	
$u(r_{m1})$	測定値のばらつき	1.58E-7	正規			9	10回測定
$u(r_{m2})$	測定分解能	2.90E-8	矩形			$\infty$	表示分解能 1 $\mu$ V
$u(r_{m3})$	電圧比の不確かさ	8.08E-7	正規			$\infty$	製造者の仕様より
$u(r_{m4})$	熱起電力	1.16E-7	矩形			$\infty$	熱起電力 2 $\mu$ V
$u(r_{m5})$	配線抵抗による不確かさ						
$u(r_{m6})$	電流電圧変換器の検出分解能	5.00E-8	矩形			$\infty$	実験結果より
合成分散					$u_c^2(y) = \sum u_i^2(y) =$	2.51E-11	
合成標準不確かさ					$u_c(y) =$	5.01E-6	
有効自由度					$\nu_{eff}(y) =$	9080079	
包含係数					$k =$	2	
拡張不確かさ					$U = k \times u_c(y) =$	1.002E-5	
校正の不確かさ (相対比)					$U =$	2.0E-5	
					$U =$	20	( $\times 1E-6$ )

(4) 熱起電力に起因する不確かさ  $u(r_{m4})$

$V_s$  および  $V_x$  の電圧測定の切り替えには、リレーを使用している。その熱起電力による影響は極性反転による相殺されると期待できるが、実際に評価した熱起電力は、実測値より計算した結果 2  $\mu$ V 以下であり、10 V に対し 0.2 ppm と見積もった。標準不確かさの値は、 $0.2 / \sqrt{3} \times 10^{-6}$  となり、 $\pm 1.16 \times 10^{-7} \Omega/\Omega$  以内と推定した。

(5) 配線抵抗による不確かさ  $u(r_{m5})$

測定電圧は、基準抵抗器  $R_s$  または被測定抵抗器  $R_x$  の抵抗値と配線抵抗によって分圧された結果で得られるため、配線抵抗値を考慮する必要がある。配線抵抗値は実測した結果より、100 m $\Omega$  以下であった。したがって配線抵抗は  $R_s$  および  $R_x$  の抵抗値に対し十分小さいため、不確かさは考慮しない。

(6) 電流電圧変換器の検出分解能  $u(r_{m6})$

電流電圧変換器における検出分解能は実験データより、少なくとも 10 fA であった。したがって  $R_x$  の抵抗値と入力電圧および表 2 のゲインより求められる電流値に対する相対比は 0.1 ppm と見積もった。標準不確かさの値は、 $0.1 / 2 / \sqrt{3} \times 10^{-6}$  となり、 $\pm 5.00 \times 10^{-8} \Omega/\Omega$  以内と推定した。

測定の不確かさのバジェットシートを表 3 に示す。

7. まとめ

本ブリッジにおける  $R_x = 10 \text{ M}\Omega \sim 1 \text{ T}\Omega$  の測定では、国家標準にトレーサブルな NMIJ の高抵抗測定ブリッジとの比較を行い、良好な整合性を得ることを確認している。現在 SBHRB は、校正システムに導入し、直流抵抗器の校正範囲 10 M $\Omega \sim 100 \text{ G}\Omega$  における JCSS 校正の最高測定能力(CMC)を大幅に低減し、産業界への標準供給に用いている。

表 4 に 10 M $\Omega \sim 100 \text{ G}\Omega$  における CMC 一覧を示す。

今後は、100 G $\Omega$  の標準抵抗器の評価を行い、校正範囲を 1 T $\Omega$  まで拡張することを計画する。

表 4 10 M $\Omega \sim 100 \text{ G}\Omega$  における CMC 一覧

定格値	10 M $\Omega$	100 M $\Omega$	1 G $\Omega$	10 G $\Omega$	100 G $\Omega$
CMC	4.2 ppm	6 ppm	10 ppm	20 ppm	50 ppm

## 参考文献

---

- (1) D. G. Jarrett, “Automated Guarded Bridge for Calibration of Multimegohm Standard Resistors from 10 M $\Omega$  to 1 T $\Omega$ ”, IEEE Trans. on Inst. and Meas., 46, 2 (1997) 325-328.
- (2) L. C. A. Henderson, “A new technique for the automatic measurement of high value resistors”, J. Phys. E: Sci. Instrum., 20 (1987) 492-495.
- (3) 近藤勝宏: 抵抗測定の応用(高抵抗の測定編)、日本電気計器検定所、(2003)
- (4) 阿部隆行・大江武彦・金子晋久: 「自己平衡型高抵抗ブリッジの開発」計測自動制御学会東北支部 50 周年記念学術講演会、pp.190-193 (2014)

(2017年5月16日受付)