

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 2 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25871192

研究課題名(和文)完全に基礎物理定数に基づく電圧標準体系の確立に向けた量子化ホール抵抗分圧器の開発

研究課題名(英文)Development of quantized Hall resistance voltage divider towards establishment of the voltage standard system based entirely on the fundamental physical constant

研究代表者

堂前 篤志 (DOMAE, Atsushi)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・物理計測標準研究部門・主任研究員

研究者番号：20357552

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：完全に基礎物理定数に基づく電圧標準体系の確立を目指して、そのキーデバイスとなる量子化ホール抵抗分圧器開発およびその精密評価法の開発を行った。当初目標とした10:1比の量子化ホール抵抗分圧器開発には至らなかったが、開発した参照用抵抗分圧器を基準に2:1比の量子化ホール抵抗分圧器を $0.1 \times 10^{-6}$ オーダーの精度(不確かさ)で評価することができた。この成果により基礎物理定数に基づく電圧標準体系の確立の見通しをつけることができた。

研究成果の概要(英文)：To establish the voltage standard system based entirely on the fundamental physical constant, quantized Hall resistance (QHR) voltage divider and its evaluation system has been researched. We developed the evaluation system by using a reference voltage divider. Measurement uncertainty of QHR voltage divider of 2:1 ratio was estimated to be in the order of  $0.1 \times 10^{-6}$ .

研究分野：電気・電子工学

キーワード：量子ホール効果 電気標準 精密電気計測

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 科学や産業技術におけるあらゆる測定の信頼性を確保するには、国際単位系 (SI) に基づく計量標準が非常に重要となる。

(2) ジョセフソン効果と量子ホール効果の発見により、電気分野の計量標準 (電気標準) の体系は標準電池や水銀抵抗といった性能が作製技術に依存してしまう「モノ」に依存した体系から、基礎物理定数を基本とした体系に移行した。これにより電気標準の普遍性および不変性が飛躍的に向上した。

(3) しかし、これらの効果で実現できる標準の値は限定されていた。ジョセフソン効果を基本とした電圧標準の場合、標準電池からの歴史的経緯、ジョセフソン素子集積化の限界などの要因により、ジョセフソン効果からダイレクトに実現されている電圧値は 1 V、1.018 V、10 V の 3 点に限られていた。このため、これらの電圧値以外、特に 10 V 以上の電圧はジョセフソン効果で決められた 10 V と抵抗分圧器の分圧比を組み合わせて実現する手法が用いられる。

(4) 抵抗分圧器は従来からある巻線型や薄膜型といった抵抗素子により構成されているため、抵抗素子の経年変化や温度特性によって抵抗分圧器の分圧比は変化してしまう。つまり、電圧標準は標準直流電圧値以外では今でも抵抗分圧器という「モノ」に依存している、と言える。

(5) 真に基礎物理定数を基本とした究極の電圧標準体系を実現するため、研究代表者らが開発を進めていたのが量子化ホール抵抗 (QHR) 素子で構成した抵抗分圧器 (QHR 分圧器) である。QHR 分圧器の分圧比は  $h/e^2$  ( $h$ : プランク定数,  $e$ : 素電荷) を基本に決まる。また、QHR は経年変化をせず、極低温状態では温度の影響を受けないため、分圧比も原理的には変化しない。この QHR 分圧器とジョセフソン効果による現行の電圧標準を組み合わせることで、任意の電圧値を完全に基礎物理定数を基本に決めることを目指していた。そして、これまでに 32 個の QHR 素子で構成された 2 進数型分圧比の QHR 分圧器を製作し、その分圧比を市販最高精度の計測器を用いて  $4 \times 10^{-6}$  の精度 (不確かさ) で評価した。

## 2. 研究の目的

(1) 本研究では、10:1 比の QHR 分圧器を製作し、その分圧比を市販最高精度の計測器を超える  $0.1 \times 10^{-6}$  オーダーの精度 (不確かさ) で評価することを最終目標とする。

(2) 10:1 比の分圧比は、ジョセフソン効果で決められた 1 V or 10 V を基準に 100 V や 1000V といった 10 の冪乗の電圧を実現するために必須の分圧比である。10 の冪乗の電

圧は実用上のニーズが非常に高いため、10:1 比の分圧比は重要な比のひとつである。

(3) 市販の計測器をそのまま用いた分圧比の測定では、その測定精度 (不確かさ) は  $4 \times 10^{-6}$  程度が限界であった。この不確かさは計測器のオフセット誤差などに起因しており、その改善は容易でない。本課題では分圧比測定の基準となる基準抵抗分圧器を新たに製作し、その基準の比と QHR 分圧器の比の比較測定をすることで、QHR 分圧器の分圧比を  $0.1 \times 10^{-6}$  オーダーの高精度で評価することを目指す。

## 3. 研究の方法

(1) 本研究の最終目標である「10:1 比の QHR 分圧器を製作し、その分圧比を市販最高精度の計測器を超える  $0.1 \times 10^{-6}$  オーダーの精度 (不確かさ) で評価」を実現するために「10:1 比 QHR 分圧器の製作」と「分圧比測定システムの構築」の 2 本立てで研究開発を進める。

(2) 10:1 比 QHR 分圧器の設計では漏れ電流への対策 (シールドの追加、配線パターン工夫など)、配線の複線化による配線抵抗の抑制、など分圧比の誤差要因を抑える工夫を施す。分圧器の製作プロセス条件は 2 進数型 QHR 分圧器の製作で得られたものを基本とする。分圧器製作中に走査電子顕微鏡やデバイスパラメータ評価装置を用いてプロセス途中での評価を行い、その結果をプロセス条件にフィードバックし、適宜プロセス条件の最適化を行う。製作には所属機関内のナノプロセッシング施設 (AIST Nano-Processing Facility (AIST-NPF)) を活用する。本施設には、電子ビーム描画装置や真空蒸着装置などの各種加工装置、ならびに走査電子顕微鏡やデバイスパラメータ評価装置などの各種計測・評価装置が揃えられており、QHR 分圧器の製作に必要な・十分な機能を有する。

(3) 分圧比測定システムの構築のキーデバイスである基準抵抗分圧器を開発する。研究代表者の所属する研究グループでは、直流電圧の国家標準 (ジョセフソン効果電圧標準装置) や直流抵抗の国家標準 (量子ホール効果抵抗標準装置) などの各種国家標準の維持・管理を行っており、これに付随して極低温超伝導電流比較器、 $^3\text{He}$  冷凍機などの超高精度測定機器・実験機器が利用可能な状態にある。基準抵抗分圧器の設計・製作にあたっては、これら機器を活用し、適宜製作途中の分圧器の評価を行い、基準抵抗分圧器に起因した不確かさの低減を目指す。

## 4. 研究成果

(1) 従来の QHR 分圧器製作方法では、複数の QHR 素子を接続する際に、電圧用配線と電流用配線を別々の配線層で配線する必要があ

り、配線層が2層構造となっていた。これら配線層間では非常に高い絶縁性能を確保することが必要であり、これに起因してQHR分圧器製作の歩留まりを高くすることが困難であった。本研究では電圧用配線と電流用配線を1層で配線する新たなQHR分圧器の構造を考案した。そして、QHRの等価回路モデルを基に、1層配線の場合の分圧比を数値計算により求め、従来型の2層配線の場合の数値計算結果との比較を行った。その結果、1層配線モデルの分圧比の公称比からのずれは、2層配線モデルと同程度になることを明らかにした。

一方で、製作したQHR分圧器の製作・評価に必要な液体ヘリウムが、世界的供給不足および納入元の設備停止のため十分に確保できない状況となった。また、10V以下の任意電圧を発生可能な電圧標準システム（プログラブルジョセフソン電圧標準）が実用化に至り、10:1比が必須ではなくなった。これら研究開始時には想定していなかった事情により、最終的に使用するQHR分圧器を2:1比の既製作品へ変更した。

(2) QHR分圧器の分圧比評価には、基準となる参照用抵抗分圧器を事前に校正しておく必要がある。この参照用抵抗分圧器の校正のため分圧比測定システムの構築を行った。分圧比測定システムは、分圧比評価の基準となる標準抵抗器、比較器として用いる市販のデジタルマルチメーター、切り替えスイッチであるスキャナ、および制御用パソコンから成る。図1にシステムの写真を示す。

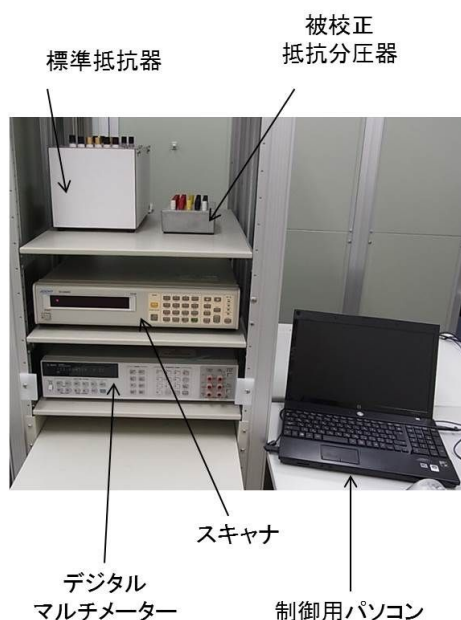


図1 開発した分圧器比測定システム

構築した分圧比測定システムに起因した不確かさは $0.1 \times 10^{-6}$ オーダーと見積もられ、参照用抵抗分圧器を評価するために十分な性能を有することを確認した。

(3) QHR分圧器の分圧比評価の基準となる参照用抵抗分圧器を製作し、その分圧比の経時変化および温度特性を分圧器比測定システムで評価した。

参照用抵抗分圧器(2:1比)は、2個の金属箔抵抗素子(公称抵抗値:10k)を用いて製作した。

この抵抗分圧器の分圧比を周囲温度 $23 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ に管理した状態で15日間に渡って測定し続けた結果、1/2端子における分圧比の平均値は $0.5 + 3.2 \times 10^{-6}$ であった。また、分圧比の変化は15日間の間で $\pm 0.2 \times 10^{-6}$ の範囲に収まっていた。このため、分圧比の安定度に起因した標準不確かさを変化幅 $\pm 0.2 \times 10^{-6}$ の矩形分布を仮定し、 $0.1 \times 10^{-6}$ と評価した。

参照用抵抗分圧器を空気恒温槽内に収納し、槽内温度を $23 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow 26 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow 20 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow 23 \text{ }^\circ\text{C}$ と変化させ、各温度における1/2端子の分圧比を測定した。その測定結果の分布から、分圧比の温度に対する変化の割合を $-0.06 \times 10^{-6} / \text{ }^\circ\text{C}$ と評価した。QHR分圧器の分圧比評価の際、参照用抵抗分圧器は空気恒温槽内に収納し、 $23 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ の温度環境で管理する。そのため、この参照用抵抗分圧器の周囲温度変化に起因する標準不確かさを、温度幅が $\pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ の矩形分布を仮定し、 $0.06 \text{ }^\circ\text{C}$ と評価した。これらの値から、QHR分圧器の分圧比評価時の参照用分圧器の周囲温度に起因した標準不確かさを $0.01 \times 10^{-6}$ 以下と評価した。

上述の評価により、製作した参照用抵抗分圧器に起因した不確かさはQHR分圧器を $0.1 \times 10^{-6}$ オーダーで評価するために十分小さな値であることを確認した。

(4) QHR分圧器の出力電圧と参照用抵抗分圧器の出力電圧の差電圧を測定することで、参照用抵抗分圧器の分圧比を基準にQHR分圧器の分圧比を評価した。評価回路の回路図を図2、外観を図3に示す。この回路では、直流電圧( $V_{\text{input}} = 2.065 \text{ V}$ )を参照用抵抗分圧器とQHR分圧器に印加し、出力端子における僅かな差電圧 $V_2$ 、 $V_1$ 、 $V_0$ を測定する。差電圧 $V_2$ 、 $V_1$ 、 $V_0$ の測定結果、および4-(3)に記述した参照用抵抗分圧器の1/2端子における分圧比(公称比1/2からのずれ分 $= 3.2 \times 10^{-6}$ )から、QHR分圧器の1/2端子における分圧比(公称比1/2からのずれ分)は次式で求められる。

$$\varepsilon \approx \rho + \frac{1}{V_{\text{input}}} \left\{ (\Delta V_1 - \Delta V_0) - \frac{\Delta V_2 - \Delta V_0}{2} \right\}. \quad (1)$$

測定時、参照用抵抗分圧器は空気恒温槽内に収納し、周囲温度を $23 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ に管理した。また、QHR分圧器は、極低温冷凍機内にて、周囲温度 $0.8 \text{ K}$ で使用した。式(1)の

関係および差電圧測定結果から、QHR 分圧器の 1/2 端子における分圧比を  $0.5 - 2.4 \times 10^{-6}$  と評価した ( $\epsilon = -2.4 \times 10^{-6}$ )。測定の標準不確かさは、参照用抵抗分圧器に起因した標準不確かさ (分圧比校正、分圧比安定度、周囲温度変化)、差電圧測定の不確かさ、差電圧測定結果のばらつきを考慮して、 $0.9 \times 10^{-6}$  と推定した。

(5) 最終目標の 10:1 比 QHR 分圧器評価には至らなかったが、2:1 比 QHR 分圧器の分圧比を  $0.1 \times 10^{-6}$  オーダーの不確かさで評価することができ、“真に基礎物理定数を基本とした電圧標準体系”を実現する見通しをつけることができた。

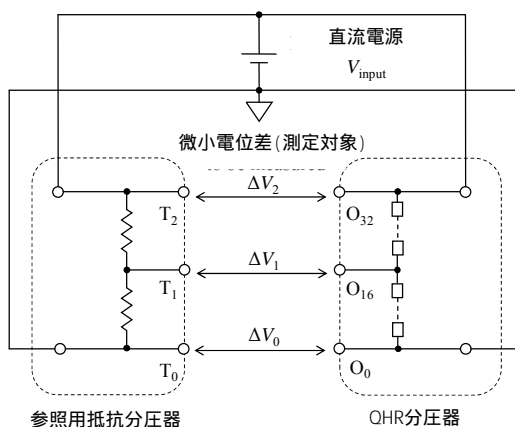


図2 QHR 分圧器の分圧比評価の回路図

・参照用抵抗分圧器  
(空気恒温槽内で269 K (23 )に管理)



・QHR分圧器  
(極低温冷凍機内で  
0.8 Kに管理)

・直流電源

図3 QHR 分圧器の分圧比評価回路の外観

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

堂前篤志, 金子晋久, 桐生昭吾, 標準抵抗器を利用した簡便な抵抗分圧器校正シ

ステム, 高速信号処理応用技術学会誌, 査読有, 16 巻 1 号, 2013, 56-63, DOI: なし

Atsushi Domae, Takehiko Oe, Syogo Kiryu, Nobu-Hisa Kaneko, Evaluation of a Resistive Voltage Divider Based on a Quantized Hall Resistance Voltage Divider, Conference on Precision Electromagnetic Measurements 2016 (CPEM2016) Digest, 査読有, 2016(7/10 発行予定), DOI: なし

〔学会発表〕(計5件)

堂前篤志, 金子晋久, 桐生昭吾, 標準抵抗器を利用した分圧比校正システムの開発と B タイプ不確かさの評価, 高速信号処理応用技術学会, 2013 年 8 月 7 日, 名古屋

堂前篤志, 金子晋久, 桐生昭吾, 参照用抵抗分圧器の製作, 電気学会全国大会, 2015 年 3 月 26 日, 東京

堂前篤志, 金子晋久, 桐生昭吾, 量子化ホール抵抗分圧器の分圧比評価における参照用抵抗分圧器に起因した不確かさの評価, 高速信号処理応用技術学会研究会, 2015 年 8 月 26 日, 東京

堂前篤志, 大江武彦, 金子晋久, 桐生昭吾, 参照用抵抗分圧器を基準とした量子化ホール抵抗分圧器の分圧比評価, 電気学会全国大会, 2016 年 3 月 18 日, 仙台

Atsushi Domae, Takehiko Oe, Syogo Kiryu, Nobu-Hisa Kaneko, Evaluation of a Resistive Voltage Divider Based on a Quantized Hall Resistance Voltage Divider, Conference on Precision Electromagnetic Measurements 2016 (CPEM2016), 2016 年 7 月 14 日(予定), オタワ(カナダ)

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

堂前 篤志 (DOMAE Atsushi)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・物理計測標準研究部門・主任研究員

研究者番号: 20357552