

氏名	し だ かつ のり 信 太 克 則
授与学位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和 56 年 11 月 11 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最終学歴	昭和 45 年 3 月 東北大学大学院工学研究科 電子工学専攻修士課程修了
学位論文題目	電圧標準の高精度維持に関する研究
論文審査委員	東北大学教授 松尾 正之 東北大学教授 穴山 武 東北大学教授 高木 相 東北大学教授 脇山 徳雄

論 文 内 容 要 旨

科学技術の著しい発展は計測技術の飛躍的な進歩に負う所が多く、かつこの計測技術のよりどころである各種標準が高精度で確立され、また維持されていることを無視することはできない。電圧標準に関しては長年、標準電池の安定度にたよらざるを得なかった。電圧又は電流をより高精度の力学量から導く、いわゆる絶対測定はきわめて複雑かつ困難な実験であり、従来の絶対測定では、その測定結果が標準電池の安定度に比較してひと桁以上悪く、電圧単位の高精度確立に関し、十分満足すべき評価の基準とすることがむずかしかった。しかし、一方、標準電池の安定度の方も、その監視があくまでも標準電池間の相互比較によるもので、相対的な結果を示すにすぎなかった。

このような状況のもとで、本研究はおおむね 10^{-6} の精度の電圧標準維持の状態から、現在の室温中の測定システムにおける限界に近い 10^{-8} の精度の電圧標準の維持の実現を目的として行われた。そして、本論文は、今まで十分なされていなかった、電圧標準器としての標準電池の特性を定量的に明らかにし、かつ、上記目的を達成しえたことを中心に述べている。

本論文は 7 章よりなり、以下順に各章の概要を述べる。

第 1 章「緒論」では、まず電気標準研究の背景と意義を述べ、本研究の立脚点および概要について述べている。

第2章「従来の電圧標準研究の経緯」では、はじめにジョセフソン電圧標準確立以前の電圧標準研究の経緯を述べ、さらに、電圧標準確立における画期的成果であり、かつ本研究の重要な足がかりとなった交流ジョセフソン効果により発生する電圧を用いた標準確立に関する研究について、概観している。まず、ジョセフソン電圧標準の原理が示され、それが極低温におけるジョセフソン素子の量子効果により生ずるもので、その定電圧性は素子に照射されるマイクロ波の周波数と基礎物理定数によってのみ定まることが示されている。次に測定用ジョセフソン電圧標準システムについて述べられており、現在 10^{-8} の精度で発生電圧 10 mV を検出できることが示されている。更に、標準電池校正のための昇圧器が示され、それによって、標準電池起電力がはじめて、より高精度の電圧発生源で定められたことが述べられている。最後に、電圧標準の高精度維持に要求される問題として、ジョセフソン電圧標準システムは液体ヘリウム中でのみ動作し、かつ、現在は複雑な手順で測定を行わなければならないゆえに、常時電圧を発生させることができないことから、依然として、電圧標準維持のために高安定な標準電池が必要であることが示されている。

第3章「直流電圧の精密測定法」では、電圧標準の究極の目標でもある、直流電圧の測定の限界について、まず測定対象すなわち被測定電圧源、次に測定装置、そして、最後に両者を結ぶ接続系の3種類の要素に分け、それぞれに関して考察がなされている。特に、測定装置の入力抵抗と被測定電圧源の信号源抵抗が測定限界を与え、標準電池では 10^{-9} V、ジョセフソン電圧では素子の常抵抗を 40 m Ω として 10^{-12} V 程度であることが論じられている。しかし、その測定精度まで測定可能とするためには、熱起電力を含む外乱を除くことが必要であり、配線、温度、振動、電気シールドなどの注意すべき測定上の処理、また測定回路の極性反転などの測定手法の工夫が要求されることが示されている。

第4章「超精密温度制御恒温槽」では、新しい標準電池用恒温槽について詳述している。これは標準電池を一定不変の環境状態に置くことが、電圧標準を高精度で維持するためには不可欠であることによる。

はじめに、恒温槽の現状を明らかにし、それらによっては電圧標準維持の高精度化が不可能であったことを示すと共に、超精密制御恒温槽の必要性が述べられている。次に槽設計に要求される条件が明確に示され、その条件を満たす具体的な設計方針が論じられている。 10^{-8} の精度の電圧標準維持には標準電池を 27 μ K 以内の温度勾配、176 μ K 以内の温度安定度に保たなければならないことが示されている。これらの結果をもとに、図1にその断面が示されるような、同軸円筒3層構造の超精密温度制御恒温槽が設計製作され、種々の特性が実験的に検証され、かつその試験結果が考察され、また、実際に製作した恒温槽の性質が調べられたことが述べられている。特に、この恒温槽の短時間温度安定度が 20 μ K/日で、長期的な温度変動に関しては図2に示されるように最大 8 mK の年周期のゆらぎが観測されたことが示され、かつその原因について論じられている。最後に、種々の要求された条件が、この測定結果からほぼ満たされたことが示され、一

方、今後のより高精度の恒温槽設計への得られた有用な知見も記されている。なお、恒温槽全体の温度分布が数値計算により 1 mK の精度で推定され、その測定範囲で実験と矛盾しないことが明らかにされたことも述べられている。

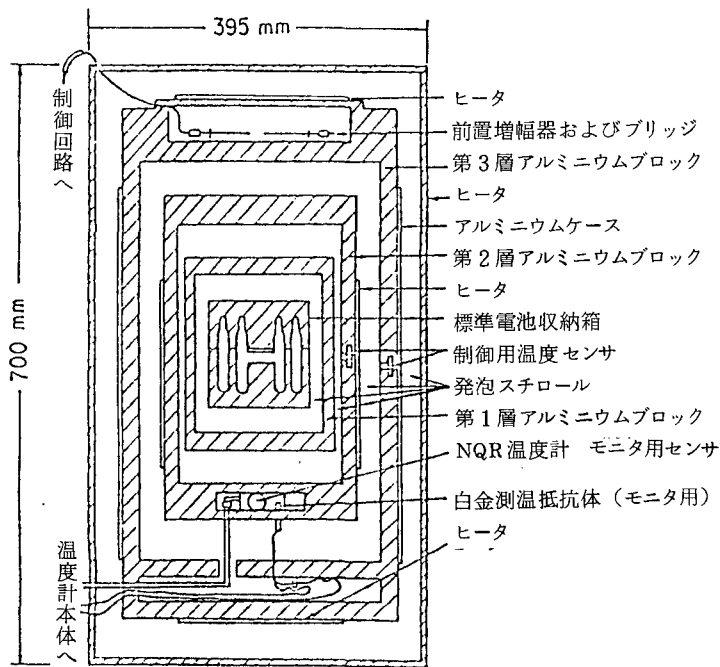


図1 恒温槽断面図

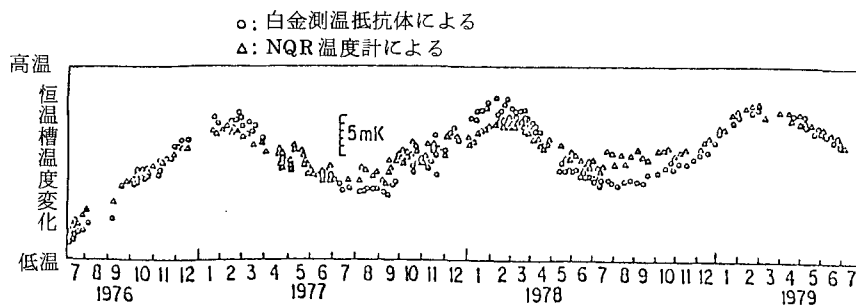


図2 恒温槽の長期安定度

第5章「カドミウム標準電池起電力の精密測定と電圧標準の高精度維持の確立」では本論文の主題である電圧標準の高精度維持に関し重要な位置を占める、カドミウム標準電池についての研究成果が述べられている。

はじめに、標準電池の種類とカドミウム標準電池の特性が定性的に示され、更に、高精度電圧標準維持に要求される標準電池の条件についての考察が記述されている。次に図3に示すような回路を用いたカドミウム標準電池起電力の測定方法が示されている。第4章で記述した超精密温度制御恒温槽を用い、かつジョセフソン電圧によって、図4に●印で示すようにはじめに、カドミウム標準電池起電力が 10^{-8} の測定精度で求められ、かつ、同時に白金測温抵抗体とNQR温度計の2種類の温度測定装置により、1mKより良い精度で標準電池温度変化が明らかにされたことが記述されている。このような精度の高い測定手法により、その得られた測定結果が高い信頼性を示し、またそれらの測定結果から、カドミウム標準電池の起電力が30℃の恒温槽においては、温度変動による起電力の変化と無関係に、図4の○印のごとく、約 $-0.19\mu\text{V}/\text{年}$ の一方向の長期的な変化を示すことが、はじめに明らかにされたことが述べられている。本章では、さらに、この測定結果に基づく、カドミウム標準電池の特性についての検討が行われ、また、今後の問題点と将来の展望が論じられている。

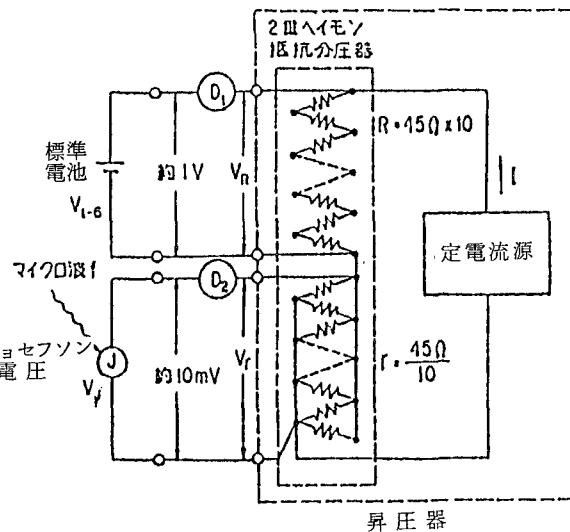


図3 測定回路の概略図

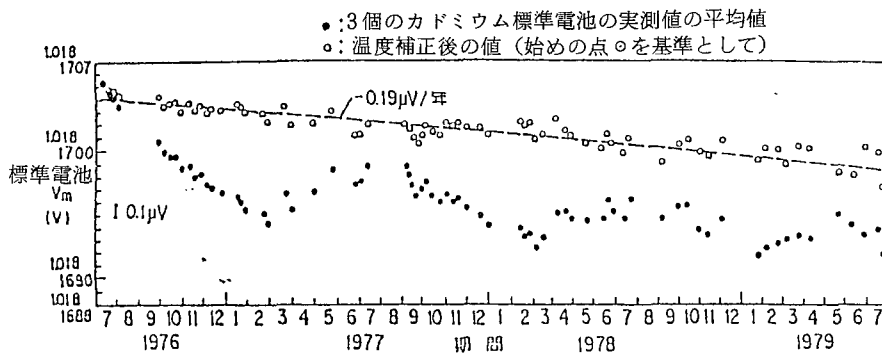


図4 3個のカドミウム標準電池の平均値 V_m の経年変化

第6章「カドミウム-鉛標準電池の特性とその高精度電圧標準維持への応用」では、新しく開発されたカドミウム-鉛標準電池の特性が明らかにされ、更に、その測定結果から得られたカドミウム-鉛標準電池の性質を利用した、高精度電圧標準維持への新しい応用が提起されている。はじめに、カドミウム-鉛標準電池の製作の目的が明示され、次に、カドミウム-鉛標準電池の特性を測定する方法および図5の●印に示すような測定結果の得られたことが示されている。本研究においてはじめて、このカドミウム-鉛標準電池の長期的な起電力変化が30°Cの恒温層において、図5○印に示すごとく約 $+0.16\mu\text{V}/\text{年}$ であることが明らかにされたこと、およびその結果についての検討が述べられている。さらに、本章では、ここに得られた測定結果から、カドミウム-鉛標準電池とカドミウム標準電池の組み合わせにより、高精度電圧標準維持に関してきわめて有用な2、3の応用の可能性が論じられている。すなわち、まず、従来の温度センサによっては、発熱等が生じ、環境をみだすために、真の温度変化を測定することが非常に困難であった、標準電池自体およびそのごく近傍の温度変化の測定が、この2種類の温度係数の異なる標準電池群により0.4mKの分解能で可能となったことが示されている。次に、温度係数が従来のカドミウム標準電池の10分の1の $+5\mu\text{V}/\text{C}$ に軽減することにより、標準電池周囲温度変化が標準電池におよぼす影響を減少させることを可能とした組み合わせ標準電池群について、その特性の測定結果が示され、かつ検討が加えられている。更に、このカドミウム-鉛標準電池と従来のカドミウム標準電池の組み合わせにより、その経年変化が、図6の□印で示されるように、 $-10\text{nV}/\text{年}$ という、従来の標準電池の長期安定度の10倍以上の安定度を有する標準電池群の可能性が示されている。この結果は、電圧標準の高精度維持に対する有力な確証となるもので、ジョセフソン電圧標準の確立と共に、こ

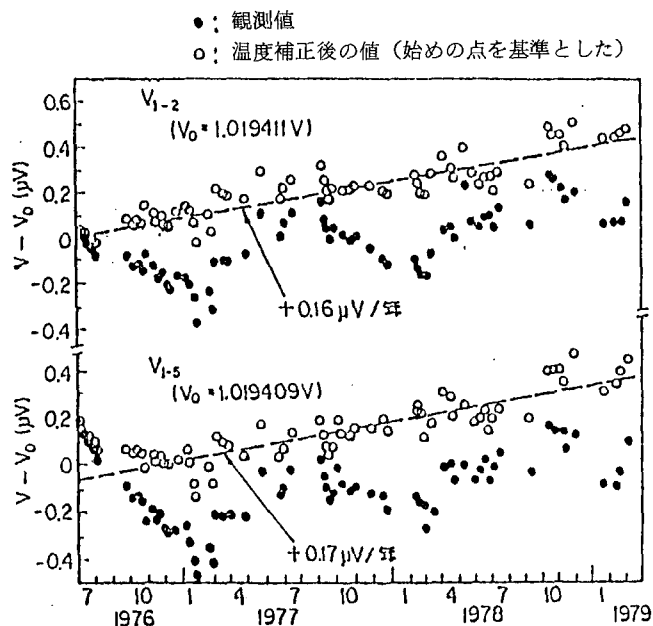


図5 カドミウム-鉛標準電池の起電力変化

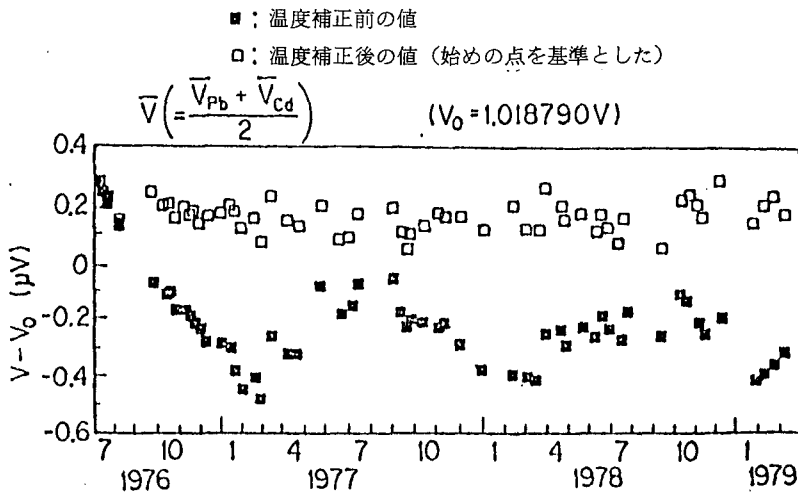


図6 カドミウム標準電池とカドミウム-鉛標準電池の組合せによる起電力変化

の分野における、きわめて重要な成果であることが述べられている。最後に、本章で述べられた種々の組み合わせ標準電池群によって得られた結果を基にした将来への展望が論じられている。

第7章「結論」では、本研究で得られた結果を総括して述べている。

以上、本論文で述べられた一連の研究成果は、 10^{-8} という高精度の電圧標準の定常的な維持に対し、また、今後のより高精度の電圧標準維持の研究に対するその足がかりとして、すくなくならず貢献するものと確信する。

審査結果の要旨

近年基礎物理定数のみを利用するジョセフソン電圧標準が確立され、 10^{-8} の精度で 10^{-2} Vの電圧標準が得られるようになった。しかしジョセフソン電圧標準は常時電圧を発生させることが困難であるため、電圧標準の維持の点で必ずしも実用的でない。著者はこの点に注目し、従来の標準電池による電圧標準維持の精度の向上を目ざして研究を行い、 10^{-6} の従来の精度を 10^{-8} に高め得ることを確かめた。本論文はその成果をとりまとめたものであり、全文7章よりなる。

第1章は緒論である。第2章では、従来の標準電池による電圧標準の研究の経緯についてのべ、精度を向上するための問題点を明らかにしている。すなわち本研究の拠り所となった交流ジョセフソン効果、ならびにこれを用いたジョセフソン電圧標準システムについてのべ、ついでジョセフソン電圧標準を用いて標準電池起電力を 10^{-8} の精度で校正する方法についてのべている。

第3章では、電圧標準の究極の精度を支配する直流電圧の測定限界について種々考察し、後章の実験に備えている。

第4章では、電圧標準を高精度で維持するために不可欠の新しい標準電池用恒温槽について詳述している。はじめに設計の必要条件を明らかにし、これに基づきアルミニウムブロックを用いた同軸円筒3層構造の超精密温度制御恒温槽を新しく設計製作している。実測結果は、短時間温度安定度 $20\ \mu\text{K}/\text{日}$ 、長期的な温度変動は周囲温度の影響を受け、最大 $8\ \text{mK}$ の年周期のゆらぎを示すことなどを明らかにし、所期の必要条件がほぼ満足されることを確かめている。

第5章では、前章の恒温槽を用い、ジョセフソン電圧標準によって現用のカドミウム標準電池起電力の精密測定を行い、 30°C の恒温槽内でその起電力は約 $-0.19\ \mu\text{V}/\text{年}$ の一方向の長期的な変化を示すことを明らかにしている。

第6章では、前章と同様な方法でカドミウム-鉛標準電池の起電力の精密測定を行い、約 $+0.16\ \mu\text{V}/\text{年}$ の長期的変化を実測するとともに、高精度電圧標準維持に関し有用な二、三の応用の可能性を論じている。すなわち2種類の温度係数の異なる標準電池群により、従来測定が困難であった恒温槽内の温度測定を $0.4\ \text{mK}$ の分解能で行えること、またこれらの標準電池の組合せにより、その経年変化が従来の標準電池より一桁以上小さい $-10\ \text{nV}/\text{年}$ の長期安定度が実現できることなどをのべている。

これらの成果は著者によりはじめて明らかにされた重要な知見であり、高く評価される。

第7章は結論である。

以上要するに、本論文は精密な恒温槽を試作することにより、従来測定が困難であった標準電池の安定度を 10^{-8} の精度で測定することに成功し、同時に従来のものより一桁以上の優れた長期安定度を有する標準電池群の可能性を与えたもので、電圧標準維持に貢献するところが大きく、電気工学電子工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。