

氏名（本籍）	あま がい やす たか 天 谷 康 孝（茨城県）
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	乙第 851 号
学位授与の日付	平成 26 年 3 月 20 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 2 項該当
学位論文題目	交流電圧標準におけるサーマルコンバータの 低周波特性評価に関する研究

論文審査委員	（主査）教授 高梨 良文
	教授 飯田 努 教授 石黒 孝
	准教授 田村 隆治 教授 相川 直幸
	産業技術総合研究所 主任研究員 佐々木 仁

論文内容の要旨

日常生活、生産活動、商取引など様々な場面で、私たちは、長さや温度などを測り、誰もがその値を疑うことなく生活を営んでいる。こうした社会の営みを可能にしているのは、それぞれの物理量の物差しとなる基準が存在しているからである。この物差しが計量標準である。その中でも、電気標準は電圧、抵抗、電流、インピーダンス等の電気に関する物理量を測定する際に実用上の基準を与えるものである。私たちの生活を支える電気機器の性能や安全性能を定量的かつ客観的に保証する上でのよりどころとなる。また、それと同時に、工業製品の ISO/IEC17025（試験所および校正機関の能力に関する国際標準規格）への適合が強く要望されるようになり、国際的に統一された基準を採用することは、企業が国際競争を勝ち抜くために欠かせない条件となった。

これら電気標準の中でも、本論文で扱う「交流電圧」は、交流計測器や電力計測器の基準を与える標準であり、直流電圧、直流抵抗、インピーダンスと並ぶ実用上重要な標準である。現在、交流電圧の実効値は、サーマルコンバータと呼ばれる電気・熱変換素子を用いて、直流電圧との熱量を介した実効値比較測定法によって導かれている。この方法では、正確に実効値を比較するため、素子の電気・熱変換メカニズムに相当する交直差の評価が欠かせない。実際の運用では、国家標準に指定された“原器”に相当するサーマルコンバータと校正事業者の計測器との比較測定を実施することで、国家標準にトレーサブルな校正

サービスが実現している。そのような校正サービスに裏付けられた計測器を用いる事で、企業や一般校正事業者が消費者に提供する製品・役務の安全性・信頼性をより一層確実にしている。その一方、10 Hz 以下の低周波領域の交流電圧標準は、地震計測や発電タービンの監視モニタリングとして利用されている振動加速度センサの高精度化に欠かせないが、後述するようにサーマルコンバータの熱的非線形効果のため、離散的なサンプリング測定法を用いた実効値演算方式が用いられる。これはサンプリング測定法の技術利点を生かした標準体系である一方、切れ目のない比較の連鎖を通して実現してきた計量トレーサビリティの乖離現象を生んでいる。本研究の対象とした 10 Hz 以下のサーマルコンバータの研究に着目すると、可聴帯域に比べてその研究は遅れていた。この原因を一言でいえば、材料の温度依存性や輻射の効果による素子固有の熱的非線形効果の影響によって電気-熱変換メカニズムが複雑化することにある。そのため、交直差を正確に評価するためには、より高度な解析技術と実験技術が要求される。現在では、これまで開発が進められてきたサーマルコンバータの中でも、薄膜型サーマルコンバータが最も正確な実効値測定素子として認識されているが、その一方で、熱時定数を増加させることで応答時間が増大することや、低周波特性を改善するために導入された複雑な素子構造により駆動周波数領域が低周波に限定される課題がある。

そこで、本研究では、10 Hz から 1 MHz までの高帯域な駆動動作を特徴とし、周波数特性を可計算なシンプルな幾何構造を有する単一熱電対型サーマルコンバータを研究対象に選択し、10 Hz 以下の交直差の低周波特性の詳細な数値解析を行う。これは薄膜型サーマルコンバータの駆動範囲が低周波領域に限られてしまうこととは大きく異なる特徴である。さらに、量子力学に基づく厳密な実効値を出力可能な交流プログラマブルジョセフソン電圧発生器を用いたサンプリング測定法を確立し、10 Hz 以下における数値解析の実験的な検証に挑む。これらの目標を達成するために、1) 熱的非線形性要素を考慮した交直差の低周波特性の数値解析、2) 熱電対出力の熱ドリフトの改善、3) サンプリング法を駆使した交流プログラマブルジョセフソン電圧発生器による実験評価手法の開発、および4) 数値解析結果の実験的な検証の課題を設けて進めた。

第 1 章では、序論としての研究の背景、目的と論文の構成について述べた。

第 2 章では、単一熱電対型構造のサーマルコンバータの交直差の低周波特性の数値解析について述べた。低周波における複雑な電気-熱メカニズムを解析するには、温度依存性や輻射のような熱的非線形効果を加味した熱伝導方程式を正確に解析することが必須である。本研究では、直線状のヒータと熱電対から構成される単一熱電対型構造の素子を解析対象に選び、ヒータの熱的非線形効果だけでなく、従来の解析的な近似計算では正確に考慮することが困難であった、熱電対のゼーベック係数の温度依存性や熱容量の効果を新たに加味した熱伝導方程式を導いた。この方程式から有限要素法によって交直差の低周波特性の

数値的な厳密解を導いた。10 Hz 以上の周波数領域において従来の比較評価法による実験結果との比較を行い、解析結果の妥当性を示すことに成功した。次に、サーマルコンバータの熱起電力の熱ドリフトの解析結果について述べた。サーマルコンバータの熱電対からの熱起電力には、ほぼ例外なく時間的に変動するドリフト現象が観測される。ドリフトは周波数が非常に低い信号と見なせるため、特に低周波では、フィルタ等で測定信号と分離することは容易ではないことから、その抜本的な解決策が求められる。本研究では、従来の単一時定数モデルを複数の時定数モデルに拡張し、熱ドリフトノイズのメカニズムを解析した。その結果、単一熱電対型素子の熱電対の基準接点での温度上昇が原因であること突き止め、抜本的な解決方法としてガラスを熱容量の大きな金属ブロックで覆う熱結合法が有効な方法であることを提案した。

第3章では、前章で得られた交直差に関する解析結果を検証するため、量子力学に基づく正確な実効値が可計算な正弦波形を生成する交流ジョセフソン電圧発生器を用いて交直差の低周波特性の評価手法の開発した。交流ジョセフソン電圧発生器は、ジョセフソン接合にマイクロ波を照射した際に、電流・電圧特性に表れる安定な量子化ステップを利用し、動的にジョセフソン接合のジャンクション数を切り替える事で正弦波電圧を発生する方式である。この方式は、実効値が可計算な特徴を持つ一方、スイッチングの際にトランジェントエラーが発生することや、サーマルコンバータを駆動するために必要な負荷電流が供給できないことが課題となっていた。本研究では、このトランジェントエラーの影響を低減するために、離散的サンプリング測定法を駆使した評価装置を新たに開発した。さらに、半導体型交流電圧発生器を併用することで、差動サンプリング方式を実現し、サンプラのゲインの非線形性の影響を低減するとともに、サーマルコンバータの評価に必要な負荷電流を供給することも実現した。この装置を用いて、周波数 10 Hz から 62.5 Hz の範囲で、単一熱電対型サーマルコンバータと薄膜型コンバータの交直差の評価を行った。その結果、従来の比較法で得られた交直差の低周波特性の結果と、繰り返し測定のばらつきの範囲内でよく一致し、本測定手法の妥当性が示された。さらに、本手法によって測定した交直差の測定の不確かさを解析した所、従来手法の実験精度を約 1 桁凌駕する $3 \mu\text{V/V}$ の不確かさを得ることに成功した。

第4章では、前章で詳述したサンプリング法を用い世界ではじめて 10 Hz 以下のサーマルコンバータの交直差の実験的評価を行った。単一熱電対型サーマルコンバータに加え独自に作成した薄膜型サーマルコンバータの評価を行ったところ、10 Hz 以下の交直差は周波数の増加とともに増大する傾向を示した。数値解析との比較を行ったところ、計算結果は、不確かさの範囲で実験結果を良く再現した。このように、10 Hz 以下の数値解析の結果の妥当性を高精度な実験から明らかにすることに成功した。次に、熱物性値や幾何構造のような入力パラメータ、数値計算手法、数理モデルの不確かさを加味して、数値的

な誤差伝搬解析を行い、10 Hz 以下の交直差の計算値の不確かさを解析した。この結果、入力パラメータが支配的な要因であり、中でも特に、温度上昇を決定する一次的な要素となる電気伝導率、時定数を決める熱容量や幾何構造の不確かさの支配的要因であることが示された。解析の結果、4 Hz における数値解析に起因する不確かさは $49 \mu\text{V/V}$ と計算され、10 Hz 以下においても、デジタルサンプリング技術と同等の不確かさを実現できることが明らかになった。さらに、この章では、先の 2 章で提案した熱結合法を実現するため、サーマルコンバータのガラス部分を熱容量の大きな銅ブロックで熱的に結合させた素子を試作し、過渡応答特性評価を行った。その結果、熱電対の基準接点の温度上昇が抑制され、出力電圧の熱ドリフトを大幅に軽減することに成功し、測定精度の向上が実現した。

最後に第 5 章では、本論文のまとめとして総括を示した。

我国では、本研究で確立した数値解析の手法により評価されたサーマルコンバータを用いて 10 Hz 以下における新たな交流電圧標準が整備され、振動加速度センサの信頼性をより一層確実にしている。また、次世代交流電圧標準方式として期待されるジョセフソン交流電圧発生方式とサーマルコンバータ両方式の低周波領域における相互比較実験は交流電圧標準の移行においては欠かせないステップであり、電圧波形標準、パルス電圧標準、0.1 Hz 以下の超低周波交流電圧標準のような本格的な量子交流電圧標準の実現へ向けた足がかりを築いた点からも本研究は大きな意義を有している。

論文審査の結果の要旨

交流電圧標準は、電力の品質維持に不可欠であり、直流電圧や直流抵抗と並ぶ、実用上最も重要な標準である。また近年では、防災や騒音の分野で用いる振動センサの高精度化により、10 Hz 以下における交流電圧の測定精度の改善が求められている。交流電圧標準は、時間的に変動する電圧の実効値で定義される。これに基づき交流電圧標準を導出する方法として、広帯域をカバーできることから、サーマルコンバータと呼ばれる電気-熱変換素子を用いた、直流電圧との熱量比較が最も広く採用されている。サーマルコンバータには直流電圧と交流電圧の応答差に相当する交直差が存在し、交流電圧実効値を正確に評価するためには、交直差を高精度で推定することが不可欠である。これまで、各国標準研究機関では、国家標準に指定されたサーマルコンバータの交直差を理論的に推定することにより、交流電圧標準を維持してきた。しかしながら、低周波領域では、サーマルコンバータのヒータ部に発生する熱により熱伝導メカニズムが複雑化し、交直差を高精度に評価することが困難であった。この問題は、近年の電力計測機器の高度化や、10 Hz 以下の交流電圧実効値の高精度計測を求めるニーズにより、解決すべき大きな課題とされていた。

本研究では、サーマルコンバータにおける交直差を高精度に評価することを目的として、サーマルコンバータの測定精度を解析する高度な数値シミュレーション技術を確立して、測定精度を律する因子を特定した。この結果を踏まえて、交流プログラマブルジョセフソン電圧発生器を新たに開発して、世界に先駆けてサーマルコンバータの低周波域における特性を実験的に評価し、さらに薄膜型サーマルコンバータの開発に取り組み、その結果交流電圧標準の測定精度の飛躍的な改善に成功した。

本論文は5章より構成されており、第1章では研究の背景と目的について詳述している。まず、先端科学計測の分野や、工業製品や資源の円滑な国際的商取引において、計量標準の持つ役割とその重要性について述べ、加えて電力計測機器の高度化、低周波用の振動センサの高精度化に向けた、欧米における交流電圧標準の開発の現状を概観している。続いて、交流電圧測定に関する既往研究を紹介し、サーマルコンバータを用いた交直変換式と、その低周波特性の評価技術の重要性を記述している。最後に、これらの背景を踏まえて本研究の位置づけを明確にし、論文の概要を述べている。

第2章では、測定精度を支配する要因を明らかにすることを目的として、有限要素法を用いた計算機シミュレーション技術を新たに導入し、サーマルコンバータの熱伝導メカニズムの解析を行っている。この解析では、従来考慮されなかった熱電対の熱容量やゼーベック係数の温度依存性を新たに解析対象に加え、より精度の高いシミュレーションを行っている。その結果、交直差の低周波域の測定精度に影響を与える因子として、①計測に用いる交流電圧源の揺動、および②熱容量に依存する熱電対出力の変動と特定している。

第3章では、前章で明らかにした計測の電源電圧の課題を解決するため、量子力学の原理に基づき、正確な電圧出力が可能な交流プログラマブルジョセフソン電圧発生器の開発を行い、サーマルコンバータの低周波特性評価への応用を提案している。ここでは離散的に電圧を測定するサンプリング回路技術を導入することで、交流プログラマブルジョセフソン電圧発生器の波形に含まれるトランジェントエラーの回避に成功した。その結果、実効値電圧3Vの実効値測定において世界最高レベルの測定精度0.6 $\mu\text{V/V}$ を実現した。商用周波数以下の交流電圧の実効値の不確かさは3 $\mu\text{V/V}$ と推定され、従来法の不確かさを約一桁改善している。さらに、交流プログラマブルジョセフソン電圧発生器をサーマルコンバータの低周波特性の評価に応用することで、理論に頼らず、実験的により高精度に交直差を評価できることを示した。この結果は、交流ジョセフソン電圧装置によりサーマルコンバータの特性の絶対評価が可能であることを示しており、今後の交流電圧標準の量子標準への置き換えに道を開くものである。ただし、ジョセフソン素子の動作には極低温環境が必須であり、実用性や汎用性に課題が残されている。

第4章では、第2章の解析結果を踏まえて、熱容量が可変な薄膜型サーマルコンバータを新規に試作して低周波特性の評価を行っている。新たに開発を行った薄膜型サーマルコンバータの特徴は、薄膜ヒータを窒化アルミニウムチップに直接形成することで、従来のシリコン基板上にヒータを作製する方式に比べて設計の自由度が向上し、チップの厚みを変えることで熱容量を容易に変えることができる点にある。熱容量を増加させることで熱電対からの温度振幅が抑制され、繰り返し測定の際のばらつきを低減に成功している。さらに、交直差は1 Hzまで10 $\mu\text{V/V}$ レベルのフラットな周波数特性を示し、従来のサーマルコンバータの周波数特性を凌駕する性能を示している。このように、低周波域において、交流電圧と直流電圧の応答差の少ない理想的なサーマルコンバータを実現している。今後、数値シミュレーションを薄膜型サーマルコンバータに適用することにより、さらなる特性の向上が期待される。

第5章では、本研究で達成した結果を総括し、この研究分野の今後の課題と展望について論じている。

以上で述べたように、本論文では、高精度な数値シミュレーションにより測定精度を律する要因を特定して、サンプリング回路技術を駆使した交流プログラマブルジョセフソン電圧発生器の開発、および新規薄膜型デバイスの開発を行い、低周波領域における交直差の測定精度の飛躍的な改善に成功している。この結果、当該交流電圧標準分野におけるサーマルコンバータの有用性と技術的見通しを明らかにしている。さらに、交流ジョセフソン電圧装置により、交直差の実験的評価を行ったことは、今後の交流電圧標準の量子標準への置き換えへの道を開くものである。これらの点で本論文は高い工学的、学術的意義がある。よって博士(工学)の博士論文として十分に価値があるものと認める。