

交流電圧標準を導く薄膜型サーマルコンバータの開発

— 交流電圧標準のトレーサビリティ体系構築の取り組み —

藤木 弘之*、天谷 康孝、佐々木 仁

国家標準の交流電圧標準は、サーマルコンバータと呼ばれる交直変換器を用いて、直流電圧標準と交流電圧を比較測定して導かれている。しかし、サーマルコンバータを作製可能な標準機関は少なく、入手が困難であるため、国家標準の範囲拡張が難しい状況であった。また、従来のサーマルコンバータは、壊れやすく、大量の校正を行う校正事業者の校正器物として使いにくいいため、国家標準機関で普及するのみであった。今回、作製方法の簡易化と従来の性能を改善する目的で、新型のサーマルコンバータの開発を行った。新型サーマルコンバータは窒化アルミ基板を採用することで、耐久性が向上し、産業現場に近い校正室でも校正器物として使用可能となった。

キーワード: 交直変換標準、交流電圧標準、サーマルコンバータ、校正、計量トレーサビリティ

Development of thin film multijunction thermal converters

– Establishing metrological traceability system for AC voltage standard –

Hiroyuki FUJIKI*, Yasutaka AMAGAI and Hitoshi SASAKI

Thermal voltage converters have been widely used in the electric standard field as a major method to derive AC voltage standards from DC voltage standards. However, few organizations have skills for fabricating thermal voltage converters. Furthermore, establishing AC-DC voltage standards has been constrained by the lack of high-quality thermal converters. High-quality thermal converters are used only by national metrology institutes (NMIs), because conventional thermal converters are too fragile for many calibration service providers. The National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST) has developed new thin film multijunction thermal converters (TFMJTCs) to realize a reliable high-performance thermal converter. Development of a durable TFMJTC with a heater on an aluminum nitride (AlN) chip would be a significant contribution to Japanese calibration service providers.

Keywords: AC-DC transfer difference standard, AC voltage standard, thermal converter, calibration, metrological traceability

1 はじめに

現在、生産現場、情報技術、科学測定等で使われている機器の大多数は、電気信号により測定されており、電圧計側や電流計側が測定の大半で利用されていると言っても過言ではない。常に、信頼できる電力量が利用できることは、社会の発展に大いに貢献する成果であると考えられる。最近では、電力量の計測のニーズが高まっており、電力は電圧、電流、位相角よりなる組み立て量であるので、交流電圧標準の高精度化の要望も強い。

産業界から求められている交流電圧標準の範囲は幅広く、電圧範囲は、医療機器や微小電力計測で求められる 1 μ V から、一般の汎用電子機器で利用されている電圧 (数 mV ~ 数百 V)、電力設備で利用される数万 kV までである。周波数範囲は、振動計測、薬品の攪拌、蓄電池評価等の物性特性の交流計測で利用される 0.01 Hz から、商用周

波数 (50 Hz と 60 Hz)、高調波計測 (商用周波数の 100 次程度である 10 kHz 程度)、無線電力伝送技術に関連する中周波 (数十 kHz ~ 数十 MHz)、通信等で利用される GHz と幅広い。これらの範囲の大半で、計測のトレーサビリティが要求されており、国家標準機関と校正事業者が計量標準の確立や、校正、維持・管理を行っている。

交流電圧標準を導く最も精度の良い方法は、熱型の交直変換器 (サーマルコンバータ) を用いて直流電圧標準と比較測定する交直変換方法である^[1]。このため、交流電圧標準の国家標準の供給は交直変換標準を用いて行われている。交直変換標準の供給においては、直流電圧から交流電圧への変換誤差に相当するサーマルコンバータの交直差の校正を行う。言い換えると、校正事業者への標準供給とは、サーマルコンバータを校正器物として用いることである。しかし、従来のサーマルコンバータは、後述するよ

産業技術総合研究所 計測標準研究部門 〒305-8563 つくば市梅園 1-1-1 中央第3

National Metrology Institute of Japan, AIST Tsukuba Central 3, 1-1-1 Umezono, Tsukuba 305-8563, Japan * E-mail: h-fujiki@aist.go.jp

Original manuscript received November 27, 2014, Revisions received January 27, 2015, Accepted January 29, 2015

うに、高精度を優先しているため、構造の制約があり、過電流や衝撃に弱く、取り扱いが難しいため、校正事業者や産業界では広く普及していなかった。校正事業者や産業界の大半では交流電圧計による校正が行われているが、サーマルコンバータの最大のメリットである安定性が生かされず、校正事業者による産業界への供給範囲も、交流電圧計では範囲の拡張が難しいため、交流電圧標準の供給範囲は十分でなかった。

国内に供給する交流電圧標準の体系の確立のためには、日本の標準が国際的に認められることも重要である。このため、国際比較が実施されるが、交流電圧標準の巡回器としてサーマルコンバータが用いられ、直流電圧標準の国際比較の結果と併せて、交流電圧標準の同等性が確認される。国際比較に加えて、標準の専門家による交直変換標準の技術能力の現地審査も行われ、各国の標準機関の校正・測定能力を示す Calibration and Measurement Capabilities (CMC) の登録が行われる。CMC は、各国の国家標準機関の相互承認に必要なものであり、国家標準機関を頂点とする各国の計量標準トレーサビリティ体系を相互に信頼し、他国の国家標準の校正結果を自国でもそのまま同等と認めるものである。製品の輸出の際は、試験器等がこの計量標準にトレーサブルである場合、製品の試験成績書がワンストップで相手国に受け入れられることとなる。

このように、国家標準機関においても、産業界への交流電圧標準供給においてもサーマルコンバータは、必要不可欠であるが、作製が難しいため、供給可能な標準機関は少ない。サーマルコンバータによる交流電圧標準の開発研究が盛んであった 1960 年代や交流電圧の高精度化が行われた 1990 年代はサーマルコンバータを開発する研究者や民間企業が存在したが^{[2][3]}、2000 年代になり、民間のサーマルコンバータの製造メーカーの衰退や国家標準機関の研究者の引退により、高精度なサーマルコンバータを入手することは困難な状況である。特に、最高精度を維持するサーマルコンバータを供給している組織は 2005 年ごろから皆無になっている状況であった。

我々は、国家標準で使うことができる最高精度のサーマルコンバータの供給を目的として、実用的なサーマルコンバータの開発を行った。開発では、サーマルコンバータの性能を改善し、耐久性のある構造を設計することで、校正事業者や計測メーカーにも普及するように、使いやすいことを目的とするユーザビリティを考慮したサーマルコンバータの作製を行った。加えて、作製方法も見直すことで、従来の方法より格段に作製が簡易になり、歩留まりの改善や作製技術の継承も容易になった。この結果、サーマルコンバー

タの安定供給ができるようになり、交流電圧標準の国内体系の確立(図1)が可能となった。

2 交流電圧標準の社会的な目的

近年、研究開発や生産現場で広く利用されている電圧計、電力計、電気指示計器、電子センサー等の計測機器は、品質管理、性能評価、適合試験、環境モニタリングのため、高精度化や高信頼性が強く求められている。一方、製品のグローバル化、標準化も急速に進んでおり、日本で製造された製品を輸出する際、国内の基準のみでなく、国際規格を満たす必要性に迫られている。現在、国内外で、製品の製造者責任も厳しく問われており、検査の測定結果について保証が求められている。電気関連製品については、出荷時に耐電圧試験等の製品検査が求められ、検査に用いた計測器の信頼性の確保が重要になる。例えば、アメリカで使用される電気製品については、安全性を審査する機関：Underwriters Laboratories Inc. (UL) が発行する UL 規格において、検査する計測器に国家標準へのトレーサビリティを求められるようになってきており、計測器の不備があると、実質輸出できなくなる可能性がある。ヨーロッ

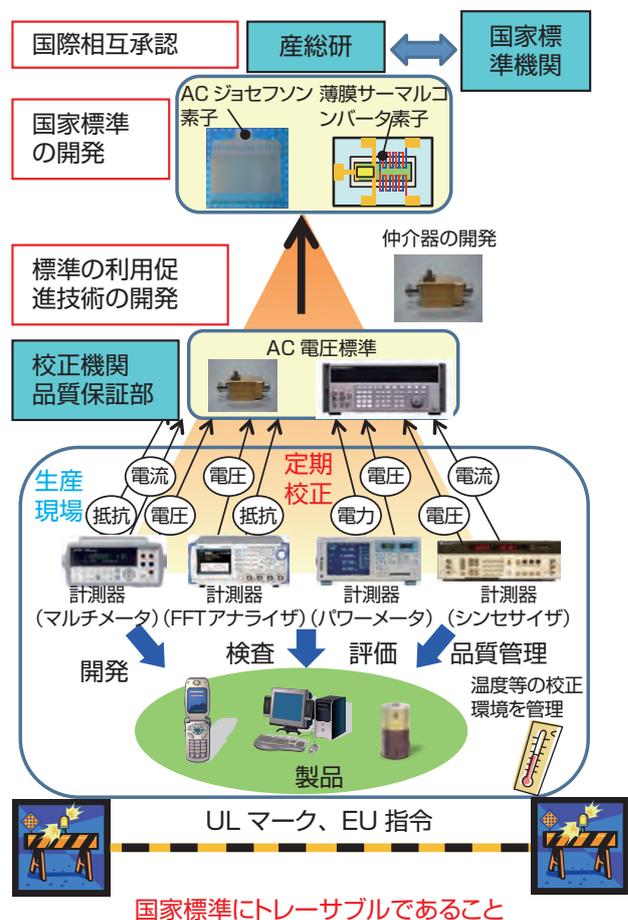


図1 交流電圧標準の国内体系の確立シナリオ

パにおいても、CE (Communauté Européenne) マーキングが存在する。上記で用いられる計測器は、定期的に（通常、年に1度）校正が行われ、検査・測定結果を保証することになる。交流電圧標準の校正が求められる1例として、図2に電力・電力量計のトレーサビリティ体系を示す。輸出や審査、その他の規格で、顧客から図2のようなトレーサビリティ体系図の提出を求められることもある。

企業の品質保証部が管理している上位標準器^{用語1}や産業現場の検査機器は、周囲温度や湿度、振動等の物理的外乱により必ずしも安定ではないため、これらの外的要因によって出力値に影響を受ける。このため、製品の品質保証部は定期的な自社の校正機器の維持・管理を行うことになる。一般に、品質保証部は、自社の上位標準器を用いて、製造メーカーの検査等で用いられる電子計測機器の定期的に社内校正を行っている。品質保証部の上位標準器は校正事業者で校正を受けている。このようにして、図1に見られるように、産業現場の検査機器のトレーサビリティが確保される。

生産現場での計測器は、生産ライン等に設置され、できるだけ移動させずに使用されるケースが多く、計測器の校正は現場環境で実施されるのが普通である。企業の品質保証部では、校正機器の安定度、物理的外乱や時間の経過に伴う校正値の劣化を考慮して校正設備の管理を行っているが、顧客から、短期納期の要望も多く、出荷前の検査不備による納期の遅れを防ぐため、校正機器の信頼性確保が重要となっている。また、仕様適合や違法コピー製品に対する問い合わせも多く、問い合わせのあった製品の

検査の結果を保証するため、計量トレーサビリティが必要となる。品質保証部では、前述のように自前の校正器物を校正事業者に校正を依頼して、値の管理を行っているが、交流電気測定の場合、浮遊容量の影響、インピーダンス特性、負荷効果、反射等を考慮に入れた測定技術も必要になっている。周波数が高くなると、測定条件のわずかな違いによって、測定結果が簡単に変わるため、自社の測定技術の正しさを確認するために、信頼性のある上位標準器が望まれている。加えて、安定で使い勝手の良い機器の要望も多い。生産現場においてトレーサビリティを必要とする計測器は、一つの生産事業所あたり約数十～数百台におよぶことも珍しくなく、ものづくり産業全体で考えると、安定で使い勝手の良い計測器の開発は、計測器の校正や生産ライン管理に係る負担軽減や経費の削減になり、競争力の向上に貢献することが期待できる。製品の高品質化、標準化、安全性の確保のいずれにおいても、測定の保証は要求されるものであり、電気標準の安定供給が望まれている。

3 交流電圧標準を導く交直変換標準

電気の基本量である交流電圧・電流標準は、エレクトロニクス産業をはじめとする電子機器産業、あるいは電力エネルギー業界、電子情報通信機器産業界において、広く用いられている物理標準である。一方、交直変換標準は、交流電圧を導く標準であるが、一般にはなじみが薄い標準であり、日本語の解説書は少ない。この章では、次章以降で必要となる交直変換標準とサーマルコンバータの原理

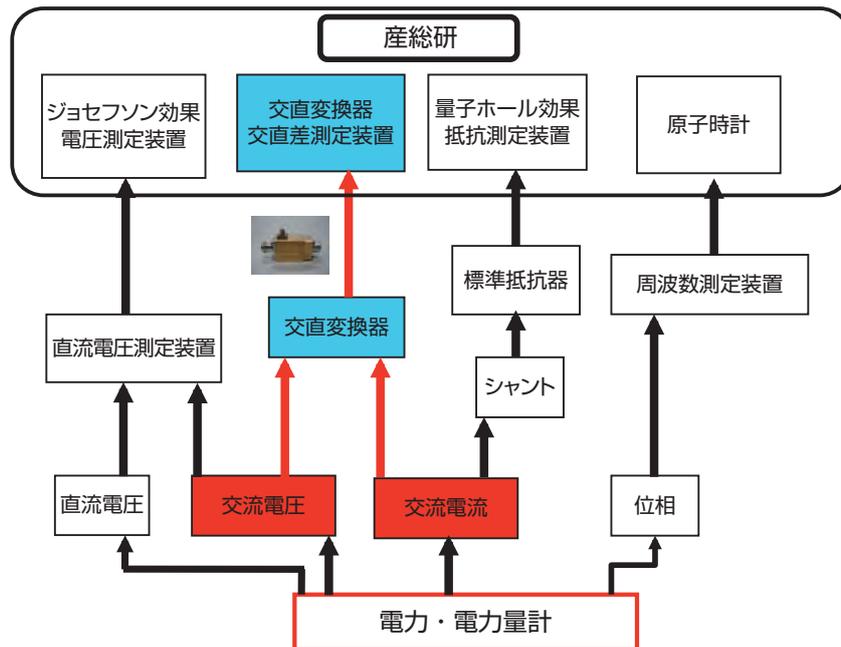


図2 電力・電力量計のトレーサビリティ体系

や技術について簡単に紹介する。

3.1 交直変換標準

交流電圧標準は、交直変換器を介して直流電圧と交流電圧を比較することで導かれる。この比較には熱が利用されている。エネルギー保存則に基づき、変換器内の負荷（ヒータ）で発生する熱量が交流および直流でそれぞれ等しいとき、交流電圧および直流電圧が等しいと定義される。この定義に基づくと、交流の実効値と直流の値を比較でき、直流電圧から交流電圧が導かれる。この比較法に基づく標準体系は「交直変換標準」と呼ばれ、直流電圧から交流電圧への変換誤差に相当するものを「交直差」と呼んでいる。現在までのところ、交流電圧を導くのに、サーマルコンバータを介して直流電圧標準（ジョセフソン電圧標準）より求めるのが一番精度が高いことから、この方法が世界的な主流である^[1]（図3）。このため、交流電圧標準の確立には、交直変換器の変換誤差に相当する交直差の評価とサーマルコンバータの開発が必要であり、各国家標準機関に交直差標準が存在する。交直差が小さく、その評価が可能なサーマルコンバータの開発は、国家標準の交流電圧標準の範囲拡張や高度化に必要であり、重要な研究テーマであるが、作製可能な標準機関は少なく、安定に入手することは困難な状況である。一方、サーマルコンバータは校正業務に伴い破損や劣化が起こるため、サーマルコンバータの安定供給は、標準供給の維持・管理のためにも不可欠で、校正事業者に小さい不確かさで交流電圧標準を供給するのに必要なものである。

ここで、5章で述べる要素技術課題では、サーマルコンバータの交直差の主な要因を考慮する必要があるため、交直差の原因について記述する。サーマルコンバータは、ヒータへの入力電圧によって生じたジュール効果による温度上昇を熱電対によって検出するものである。サーマルコンバータの主な交直差は下記に示す3項目に分類される。

(I) DC特性（熱的交直差）：サーマルコンバータ素子に直流電流を通電した場合、トムソンおよびペルチェ効果によりジュール熱以外の発熱・吸熱が生じ、ヒータ

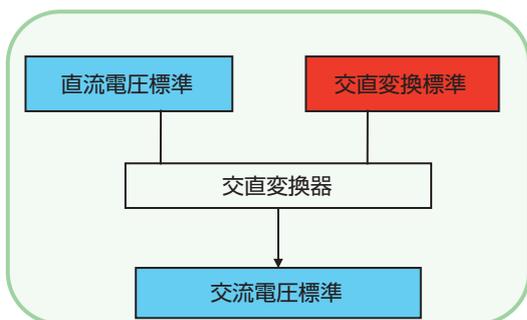


図3 交流電圧標準の流れ

線の温度分布が不均一になる。この結果、直流と同じ実効値を有する交流正弦波をヒータ線に通電しても、熱電対の出力電圧に差が生じ、交直差（熱的交直差）をもたらす^[4]。

(II) 低周波特性：サーマルコンバータの熱的時定数と比較して入力交流電圧の周波数が十分に高くはない場合、ヒータ線の温度は入力電圧に追随し、周波数に温度が変化する温度振動（Thermal Ripple）が生じ、交直差の原因となる。

(III) 高周波特性：10 kHz以上の周波数領域においては、表皮効果や、入力回路の浮遊容量、インダクタンスの影響がデバイスから排除できず、このため、交直差の周波数特性をもつ。また、1 MHzより高い周波数は、インピーダンスの整合を考慮に入れる必要がある。

以上の原因により、標準的なサーマルコンバータの交直差の周波数特性は、概ね図4に示されるようになる。100 Hzから10 kHzの間の周波数領域では、高周波特性および低周波特性は相対的に小さく、非ジュール熱の影響による「熱的交直差」が支配的となる。上記、(II)、(III)の交直差の評価は理論モデルによって評価され、(I)は熱的交直差を測定するFRDC-DC法によって行われる^{[5]~[7]}。

3.2 サーマルコンバータ

交直変換器は、シングルジャンクションサーマルコンバータ（Single-Junction Thermal Converter：SJTC）^[8]、ワイヤー多熱電対型TC（Multi-junction Thermal Converter：MJTC）^[9]、薄膜型マルチジャンクションサーマルコンバータ（Thin-Film MJTC）^{[10]~[11]}、および熱型半導体RMSセンサー（Solid-State Thermal RMS Sensor）^[12]の4種類の交直変換器が開発されている。

(1) シングルジャンクションサーマルコンバータ（SJTC）

シングルジャンクションサーマルコンバータ素子（図5）は、ヒータワイヤーと熱電対から構成されている。用いられている熱電対が1対であるので、シングルジャンクションサーマルコンバータと呼ばれている。入力した直流と交流

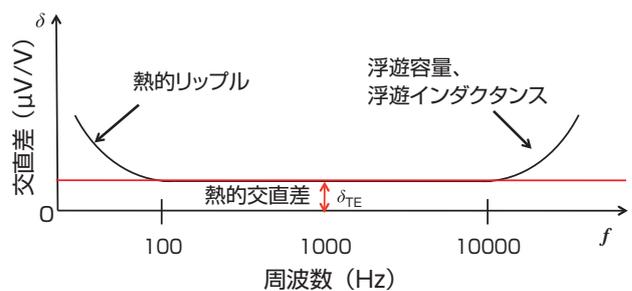


図4 サーマルコンバータの交直差の周波数特性

の電圧によりヒータ線で発生した熱を熱電対で比較測定する。熱電対は電気的絶縁をとるためビーズを介してヒータ線に取り付けられている。ヒータ線と熱電対部分は、外界との熱的絶縁を高めるため、真空ガラス球の中に封入されている。ヒータ線は、浮遊インダクタンスや容量の影響を小さくし、また、高い周波数でのインピーダンスの不整合による反射の影響を考慮し、線長は短い構造となっている。ヒータ線幅は、表皮効果の影響を抑え、抵抗値をある程度大きくするため、細線構造となり、直径おおよそ 25 μm であり、定格電流は約 10 mA である。ヒータ線は、過電流によるヒータ自体の発熱により、劣化・断線等が生じる。ヒータ線と熱電対とも細線のため、製作には顕微鏡下での手作業が必要となり、大量生産、歩留まり改善は困難である。

シングルジャンクションサーマルコンバータは 1960 年代にすでに $\mu\text{V}/\text{V}$ レベルでの測定に使用され、現在でも交流電圧標準の分野において広く用いられている。SJTC は構造が単純なために、経年変化が小さく、周波数特性が 1 MHz 程度の高周波まで小さい。しかし、ヒータ線の温度分布に起因するトムソン効果およびペルチェ効果により、ジュール熱以外の発熱/吸熱が生じ、交直差をもたらす。

(2) ワイヤー多熱電対型サーマルコンバータ (Multi-junction Thermal Converter: MJTC)

ワイヤー多熱電対型サーマルコンバータは、特に評価が難しかった熱的交直差の問題を解決するために開発された。ストレート形状のヒータ線は、印加電圧の Hi 側と Lo 側で温度勾配がある。このため、図 6^[9]に見られるように、ヒータ線を折り返してより線にすることで、ヒータ線の熱の不均一を軽減している。加えて、多数の熱電対を用いてヒータ線の温度分布を一様化することによって、熱的交直差を 0.1 $\mu\text{V}/\text{V}$ 以下に抑えている。また副次的な効果として、出

力電圧は多数の熱電対の数だけ増幅されて、100 mV 程度に上昇しており、交直差の測定が容易である。しかし、その構造はサーマルコンバータの中で一番複雑で、直径 10 μm から 40 μm のヒータ細線に、直径 20 μm の熱電対ワイヤーを顕微鏡下で取り付ける作業が必要で、大量生産は困難である。作製された個数は、100 個程度で、主な国立標準機関に 1、2 個程度配られた。一方、静電気により絶縁破壊を起こして壊れやすいため、頻繁に使用することはできず、通常の校正業務では、シングルジャンクションサーマルコンバータや次で述べる薄膜型マルチジャンクションサーマルコンバータが用いられることが多かった。また、構造が複雑なために高周波特性もシングルジャンクションサーマルコンバータに比べて劣る。現在、ワイヤー多熱電対型サーマルコンバータは作製されていない。

(3) 薄膜型マルチジャンクションサーマルコンバータ (Thin-Film MJTC)

薄膜型マルチジャンクションサーマルコンバータ (図 7) は、微細加工技術が発達していた 1980 年後半から開発が行われた。作製が非常に難しかったワイヤー多熱電対型サーマルコンバータを薄膜化したものである。薄膜型も、SJTC の欠点である小さい出力を改善するため、一般に、多熱電対型 (MJTC) であり、標準の世界では、Thin-Film MJTC と呼ばれる。薄膜型サーマルコンバータのヒータ構造は、その温度分布の不均一を改善するため、折り返しの U 字型の形状が採用されていることが多い。薄膜型サーマルコンバータは、ヒータまわりの熱的絶縁のため、ヒータ直下の基板の厚みの調整が必要となるが、1990 年代初めに、ヒータ膜下を異方性エッチングしたシリコン基板上に薄膜を形成する技術が開発されて、国家標準機関に広く普及した。しかし、薄膜型サーマルコンバータも構造が複雑なために高周波特性は SJTC に比べて劣る。10 kHz 以

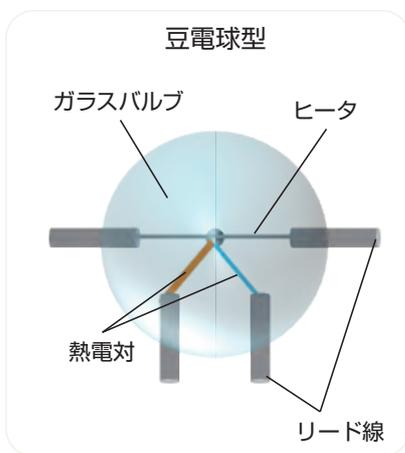


図 5 シングルジャンクションサーマルコンバータ (豆電球型) の模式図

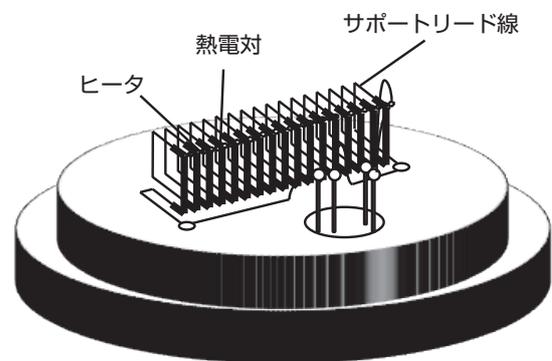


図 6 ワイヤー多熱電対型サーマルコンバータの模式図

上では、ヒータ-熱電対間のストレイの影響、誘電損失等により、交直差の周波数特性の再現性が悪くなる。また、SJTCと同じく、構造の変更はあまり容易でなく、サーマルコンバータに流せる定格電流は10 mA程度で、過電流により、断線破壊される。

(4) 熱型半導体 RMS センサー (Solid-State Thermal RMS Sensor)

熱型半導体 RMS センサーは、シングルジャンクションサーマルコンバータとマルチジャンクションサーマルコンバータの実用的な代用品として、アメリカの計測器メーカーにより開発された。熱型半導体 RMS センサー型は、ヒータの温度上昇を熱電対ではなく、トランジスタのベース・エミッタ接合電圧 V_{BE} の温度依存性を温度検出素子として用いている。熱的な時定数が短いため、10 Hz 付近の交直差が $100 \mu\text{V/V}$ 以上になることもある。熱的交直差は、マルチジャンクションサーマルコンバータと比べて大きく、不確かさは多少大きい。しかし、販売されている熱型半導体 RMS センサー型のサーマルコンバータは、過電流に対する保護回路が内蔵されており壊れ難い。また、高性能アンプを用いているため、出力電圧が大きく、測定が容易になっている。校正事業者で一番普及しているサーマルコンバータは、熱型半導体 RMS センサーを用いたものである。国家標準のサーマルコンバータとして望まれることは、交直差の不確かさが小さく、その周波数特性等の評価が可能なことである。このため、熱型半導体 RMS センサーは校正事業者の校正器物として、普及している。

市販の熱型半導体 RMS センサーを除く、電圧用サーマルコンバータは、図8に見られるように、浮遊容量等の電氣的境界条件を決めるため、金属ケース内にマウントされ

る。サーマルコンバータ素子のヒータ抵抗は構造的な制約のため、おおよそ $25 \Omega \sim 100 \Omega$ 程度であるので、電圧の拡張は、図8のように、レンジ抵抗器と呼ばれる分圧用の抵抗器を直列に接続して拡張する。この方法で、サーマルコンバータの交直差は、レンジ抵抗器込みの交直差で、1000 V まで拡張される^[13]。交直変換標準で確立できる交流電圧の範囲は、電圧範囲は、1 mV \sim 1 kV、周波数範囲は0.1 Hz \sim 100 MHz 程度である。これ以外の範囲は、変成器を用いたり、サンプリング方法、サーミスタを用いた別の方法が採用されている^{[14][15]}。最近では、サーマルコンバータを用いて GHz の周波数へ拡張する開発研究が NIST で行われている^[16]。

4 交流電圧標準の確立シナリオ

交流電圧標準の国内体系を確立していく上で、求められているシナリオは、国際相互承認、高精度な国家標準の確立と産業界への標準供給である(図1)。

国際相互承認と産業界からの要望に対応するため、2001年から交直変換標準の国内体系の範囲拡張を進めた。2001年当時の交直変換標準の供給範囲は、電圧範囲は、2 V \sim 20 V、周波数範囲は、40 Hz \sim 100 kHz であり、他国の国家標準機関と比べて範囲が狭く、最高測定能力は10 ppm と不確かさも大きい状況であり、交流電圧標準の整備が望まれていた。国家標準の確立には、“新しい標準器の開発”が必要であり、校正の普及には、国家標準の“利用促進技術の開発”が重要である。このため、図1に示すように、国家標準の研究開発と標準の利用促進技術の開発の両輪で進める必要がある。

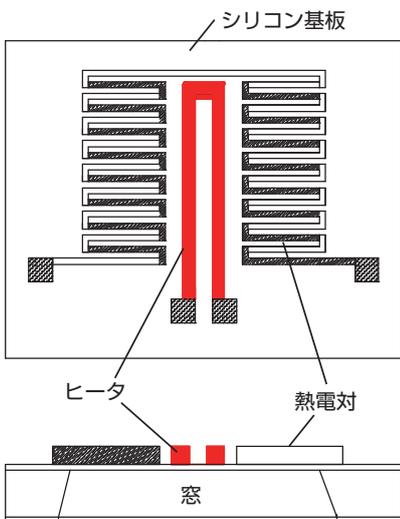


図7 薄膜型マルチジャンクションサーマルコンバータの模式図

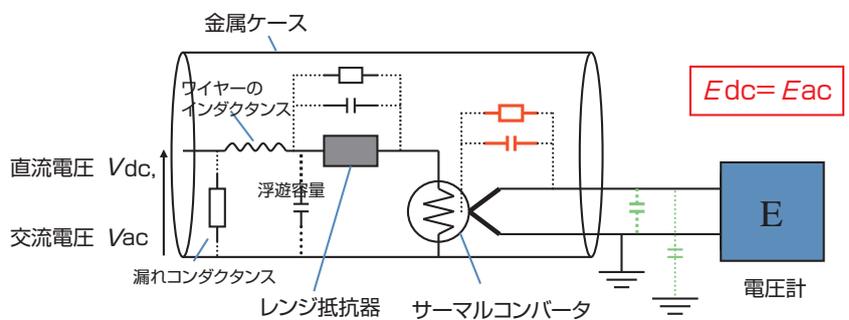


図8 サーマルコンバータのマウント例

交流電圧範囲拡張のため、分圧用のレンジ抵抗器がサーマルコンバータに直列接続され、金属ケースに取められる。これにより、図中の浮遊容量、浮遊インダクタンス、寄生抵抗を含めた交直差の周波数特性を決定できる。

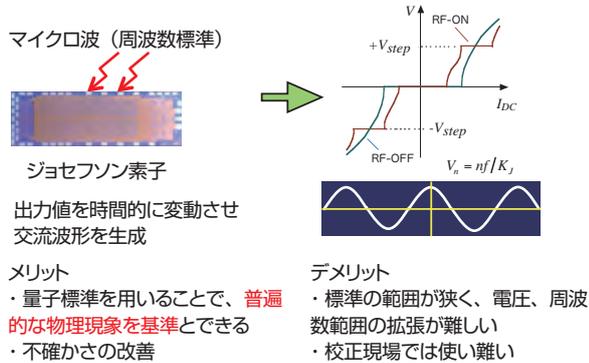
4.1 国家標準の確立

交流電圧標準を導く方法は、理想的な交流波形を作る方法と交直変換方法がある（図9）。国家標準として望ましいのは、誰がいつどこでやっても再現性がある普遍的な標準で、小さい不確かさが得られる方法である。この観点から考えると、交流電圧標準の国家標準は、量子標準が理想的である。この方法の代表例として、図9①に示されるように、ジョセフソン直流電圧標準を用いて、出力値を時間的に変動させ交流波形を生成する方法が考案されている（AC電圧ジョセフソン標準^[17]）。現在の直流電圧標準は、量子現象であるジョセフソン効果を用いて実現されているが、ジョセフソン直流電圧は、接合数と照射するマイクロ波の周波数で決まり、マイクロ波の周波数を精度良く定めれば、非常に正確な電圧を得ることが可能となるものである^[18]。現在、ジョセフソン効果を用いて、理想的な交流電圧を作る研究開発が主な国家標準機関で行われている。産総研でも、交流電圧の国家標準の候補の一つとして、直流電圧標準のグループが中心となり、AC電圧ジョセフソン標準の開発を行っている^[19]。この方法で生成される交流電圧は、厳密に見るとステップ状であるが、電圧の切り替えのときに、各ステップの量子化された電圧から外れる瞬間が存在し、誤差（トランジェントエラー）が生じるため、トランジェントエラーを回避する方法が研究されている。しかし、AC電圧ジョセフソン標準が実現しても、その電圧

範囲や周波数範囲は、一部に限られると考えられており、産業現場で、実際の校正業務に使用する際も難しい点がある。現在、理想的な交流波形を生成する研究開発の他に、AC電圧ジョセフソン標準とサーマルコンバータを組み合わせ、高精度で交流電圧測定装置や発生装置を校正するシステムの開発も行われている^[20]。この方法のメリットは、サーマルコンバータの不確かさを小さくでき、現在の交流電圧の標準供給の体系が利用できることにある。

現在の交流電圧標準のトップは、図9②に示される交直変換方法であるが、AC電圧ジョセフソン標準のトランジェントエラー等のため、将来においても国家標準である可能性もある。国家標準のサーマルコンバータは、3章で述べた交直差の原因の評価や不確かさの改善が不可欠であるが、交直差の周波数特性は、抵抗値や浮遊容量で変化する。（国家標準としてのサーマルコンバータは、他からの校正ではなく、交直差の出発点として、交直差の値を独自に見積もる必要がある。）このため、抵抗値や形状の異なる複数のサーマルコンバータを作製し、それらの交直差の変化を評価することで、交直差の値を決定している。また、交流電圧の範囲の拡張においても、3章で述べた原因に対処するサーマルコンバータを作製する必要がある。このように、国家標準の確立には、複数の特性の異なるサーマルコンバータが必要であるが、前述のように、高性能のサーマルコンバータは入手が難しく、交流電圧の体系シナリオにおいては、サーマルコンバータの開発が必要な状況であった。

①理想的な正弦波を作る方法



②直流電圧標準と比較する方法

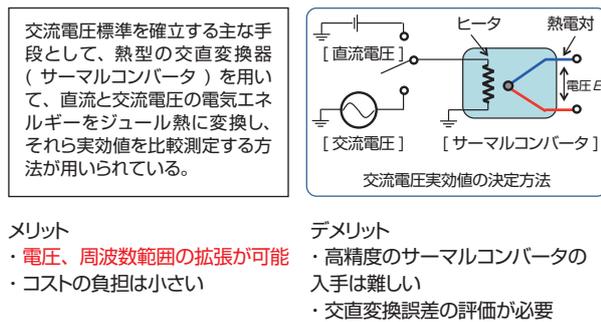


図9 交流電圧標準の実現方法

4.2 国家標準の利用促進技術

産業界から望まれている標準は、オペレーションや維持の負担が少なく、安価で、幅広い範囲で使用可能な標準である。国家標準と同等の不確かさが要求されることは例外である。量子ホール効果を利用した抵抗標準^[18]やジョセフソン直流電圧標準においても、量子標準で供給している値は、10 K Ωや10 Vの値で、その他の範囲は、抵抗ブリッジや分圧器等を用いて範囲の拡張が行われている。他の容易な実現方法がある中で、すべての標準供給範囲を量子標準でカバーするのは、現実的でなく、供給の観点からは、量子標準の意義も薄れてくる。交流電圧標準においても、量子交流電圧標準が将来確立した後でも、抵抗や直流電圧と同様に、電圧範囲の拡張や、産業界で利用されている計測機器への校正の橋渡しをする安価で、安定な校正器が必要になる。このように、交流電圧を導く方法や供給体系は、国家標準が、交直変換標準からAC電圧ジョセフソン標準に置き換わっても、サーマルコンバータは利用促進のために使われる可能性が極めて高い。実際、現在の直流電圧標準においても、最高精度の校正依頼は、

ツエナー電圧標準器によるものが求められる。交流電圧においても、サーマルコンバータの校正依頼が継続すると予想される。

産業界への利用促進のためには、交流電圧測定装置や発生装置を校正するため、安価で、経年変化が小さく、ロバストで、取り扱いが容易な標準器が望まれる。標準の普及のシナリオとして、高度な国家標準が確立しても、国家標準から校正を受ける適当な校正器物がなければ、産業現場で利用できない。一般製品の検査現場で用いられるような交流電圧測定装置や発生装置を校正器物とした場合は、経時変化や温度、湿度等の外乱による校正值の劣化を考えると、高度な国家標準の恩恵を十分受けない可能性がある。高性能なサーマルコンバータは安定で、1 kHz 付近の交直差の経年変化は、1 ppm 以下であり、電圧依存も極めて小さい。校正事業者や企業の校正室がサーマルコンバータを校正器物として利用できれば、高精度で、安定な標準を手に入れることができる。また、サーマルコンバータではなく、交流電圧計の交流電圧値で校正してしまうと、その範囲外に小さい不確かさで校正範囲を広げることが難しくなり、産業界へ供給する範囲が狭くなる可能性がある。しかし、現在のサーマルコンバータは、取り扱いに注意しても壊れることがあり、産業界への供給範囲拡大のため、サーマルコンバータの耐久性の向上が必要であった。加えて、従来のサーマルコンバータの使用できる電圧範囲が狭く、範囲の拡張には、レンジ抵抗器が必要となり、使い勝手が悪く、使用範囲の拡張が望まれていた。新たなサーマルコンバータの開発は、交流電圧標準の産業界への標準の安定供給とさらなる普及の目的とも一致する。このように、産業界への校正技術の課題として、校正器物として利用可能なサーマルコンバータの開発が望まれていた。

5 薄膜型サーマルコンバータの開発

国家標準の確立と利用促進技術の開発に対応するため、サーマルコンバータの容易な作製技術の確立と性能の課題を解決する新たなサーマルコンバータの設計を行った。産業界でも使える実用的なサーマルコンバータを開発することで、国家標準の確立と標準の維持、および産業界への高精度な標準の普及が可能となる。

5.1 要素技術課題

4章の交流電圧標準を導くシナリオから、サーマルコンバータの作製は、交流電圧標準体系の確立に十分なメリットがあると考え、新しいサーマルコンバータの開発を行った。この節では、サーマルコンバータ作製の技術課題について述べる。

(1) 作製方法の課題

豆電球型のシングルジャンクション（図5）においては、バルチュエ効果を抑え、ガラス球と熱膨張率が近いプラチナをヒータ線の支柱に使うことが望ましいが、ヒータ線材であるエバノームとの溶接は熟練の職人でないと難しい。また、直径 20 μm の熱電対線をおおよそ 25 μm のヒータ細線の中心に取り付け、真空封入するのは難しく、作製できる職人は世界でも数名である。2005 年からはプラチナ線材を用いたサーマルコンバータの購入ができない状態であった。

図7にみられる薄膜型サーマルコンバータにおいても作製の課題があった。ドイツの国立標準機関であるPTBは、シリコン基板上にヒータ薄膜を形成して薄膜型サーマルコンバータを作製し、標準供給に利用していた。サーマルコンバータの原理は、ヒータ線の発熱の測定であるので、ヒータ膜のまわりの熱的絶縁を確保するため、シリコン基板のヒータ膜直下はケミカルエッチングが施されており、基板の厚さが薄くなっている。しかし、このためヒータ膜に余分なストレスがかかり、ストレス緩和のバッファ膜等が必要である。バッファ層がないと、作製した膜に亀裂が観測されることもあった。このように、サーマルコンバータの作製には、エッチングやバッファ膜作製条件等のノウハウが必要である。加えて、ヒータ膜の温度係数や熱電対膜の出力特性も交直差に影響を与え、温度係数の小さい抵抗薄膜の作製方法や選定した熱電対薄膜の作製技術も必要であった。図7のPTBの薄膜型サーマルコンバータも担当職員の退職とともに入手が難しい状況である。

(2) サーマルコンバータの技術的課題

サーマルコンバータの設計について考察することも重要である。従来のサーマルコンバータの課題としては、構造に起因する作製の難しさと性能が限定されることにあった。従来のサーマルコンバータは交流電圧標準の最高精度を追及するように設計されている。シングルジャンクションサーマルコンバータは 10 kHz 以上の高周波で、不確かさ評価に都合の良い周波数特性を得るため、線長は短い。1 MHz の交流電圧の波長はおおよそ 300 m であるため、数センチのヒータ線は入力周波数の波長の比で考えると ppm のオーダーになる。交流電圧の不確かさを ppm で要求するときは、集中乗数方式で計算できる短いヒータ線のほうが都合が良い。しかし、回路の入力抵抗をかせぎ、ヒータの発熱を観測するため、抵抗値はある程度の大きさが必要であり、ヒータ線は細く、抵抗値は 25 Ω から 90 Ω 程度である。細線であることで、表皮効果の不確かさ評価も容易になる。一方、ヒータ線のまわりは真空のため、細いヒータ線に流せる電流は 10 mA 程度であり、定格電流の数パーセントの過電流を流すとヒータ線が焼き切れる欠点があっ

た。シングルジャンクションサーマルコンバータの構造の変更は難しいため、抵抗値や熱的時定数の変更も難しく、希望の入力電圧を得るために、レンジ抵抗器が必要になったり、3.1節で述べた（II）低周波特性のため、100 Hz 以下で不確かさが大きくなる課題もあった。

従来の薄膜型マルチジャンクションサーマルコンバータ（図7）は、3.1節の（I）熱的交直差を評価するために作製されたのが大きな目的であった。このため、100個の熱電対薄膜がヒータ線沿いに作製されており、周波数が高くなると、取り除くことができないヒータ-熱電対間のキャパシタンスのため、電気的な絶縁は弱くなり、ヒータ線の入力電流が熱電対側の測定系に漏れてしまう^[21]。漏れる電流の大きさは、熱電対の出力を測定する回路に依存するため再現性が悪くなり、不確かさが大きくなる。また、熱電対を多数用いているので、熱電対の抵抗値が10 k Ω 程度になり、熱電対の出力電圧を測定する際のノイズの原因となる。薄膜型マルチジャンクションサーマルコンバータにおいても、ヒータ線に流せる電流は10 mA程度であり、熱的時定数の変更も容易でない。

産業界への利用促進の課題では、校正環境の違いが考えられる。サーマルコンバータの交直差の温度や湿度依存が大きければ、定期的な校正を受けていたとしても、産業界の校正においては、校正結果を最大限に利用できず、普及の妨げになると考えられる。また、交直差の周波数特性が大きいと、ケーブルの長さ、温度変化等の校正条件による校正値のずれを判断するのが難しくなる場合が予想され、交直差の周波数特性の小さいサーマルコンバータが望まれる。

以上のサーマルコンバータの開発技術要素を表1にまとめる。従来のシングルジャンクションサーマルコンバータとマルチジャンクションサーマルコンバータは、取り扱いが難しく、最高精度を必要とする国家標準機関で主に用いられ、産業界では普及はしておらず、3.2節で紹介した4種類の中で、熱型半導体RMSセンサー型が普及している。しかし、熱型半導体RMSセンサー型のサーマルコンバータは、3.1節の（I）～（III）の交直差の原因を直接求める構造ではないため、他の国家標準機関からの交直差の校正が必要となる。熱型半導体RMSセンサー型は校正事業者により、シングルジャンクションサーマルコンバータがマルチジャンクションサーマルコンバータによって校正されて、産業界で利用されている。

5.2 サーマルコンバータの設計と開発

5.1節で述べたサーマルコンバータの技術的課題を解消するため、作製の簡易化等の作製過程の変更が要求される。従来のサーマルコンバータは、ヒータ線と熱電対が一

体となっており、どちらか一方の不具合により、サーマルコンバータとして機能しない問題があった。また、実際の作製においても、ヒータ線と熱電対を同一基板上に作製する場合、どちらかの前段階の作製が成功していても、後の作製過程による影響を受け、劣化・破壊等が起こり、歩留まりが悪くなる可能性がある。これらを改善するため、ヒータと熱電対を別々の基板上に作製するデザインを採用した。これにより、ヒータ線と熱電対の最適な作製条件は互いに影響を受けずに、個々に追及することができ、作製の簡易化と性能の改善が期待される。また、一体型と比べ、位置の制約も少なく、それらの形状や配置等の変更が容易で、構造に依存する周波数特性の改善が可能である。サーマルコンバータの要であるヒータと熱電対を分離したことにより、従来の作製方法と比べて、基板のエッチングの必要はなく、ヒータ膜のストレスの影響による基板からの剥離や特性の変化もなくなる。作製過程も大幅に容易になり、歩留まりの改善が期待できる。

ヒータと熱電対の材料の選定にあたっては、実績のあるNi-Cr系の合金とBi-Sbを採用した。最初に、ヒータ抵抗であるが、抵抗の温度係数が大きいとジュール熱による発熱量が温度によって変化し、交直差の主な原因になるため、温度係数の改善を行った。製膜後のNi-Cr薄膜の抵抗温度係数は、おおよそ100 ppm/Kである。しかし、アニールを行うことによって抵抗温度係数を ± 25 ppm/Kまで小さくすることができる。さらに、抵抗の温度係数を改善するため、窒素雰囲気中でアニールを行い、10 ppm/K以下に改善することに成功した。これは、窒素雰囲気中では、気体の接触による熱伝導によって加熱するため、熱処理の一様性が優れていて、目標とするアニール温度を厳しく制御できたためであると考えられる。ヒータ線の作製は、一度の蒸着で、複数個の基板をセット可能で、従来のサーマルコンバータの作製と比べてヒータを大量生産できるメリットがある。

次に、熱電対膜の作製においては、従来の薄膜型サーマルコンバータの作製方法と基本的に同じであるが、従来型は約100対の熱電対を直列接続しているため、熱電対の抵抗値は数k Ω と大きい。抵抗値を改善するため、図10に見られるように、熱電対の構造を変更した。Bi膜と

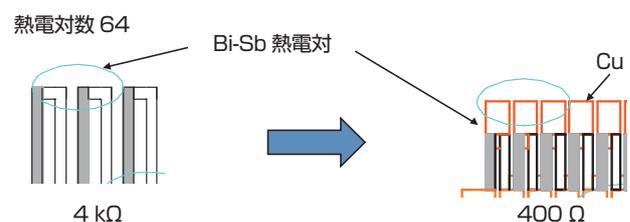


図10 熱電対パターンの改良

表1 サーマルコンバータの開発技術要素

要素技術	開発の要点	設定理由・根拠等	関連する図、表
(1) 作製方法の課題 作製の簡易化	従来の豆電球型サーマルコンバータは職人による顕微鏡下の手作業で、熟練した技術を必要としている。作製方法の簡易化を行う。	サーマルコンバータの作製が難しく、入手困難である。国家標準機関においても、サーマルコンバータを作製できることが限られている。	図5、図12、表2
(2) 作製方法の課題 サーマルコンバータの薄膜化	従来の薄膜化型のサーマルコンバータは、エッチング技術が必要である。また、構造の制約に起因する交直差の不確かさ要因がある。	一般の計測機器でも利用しやすいように、小型化したサーマルコンバータが必要になる。産業界に広く普及させるために、ユーザビリティを考慮したサーマルコンバータが要望される。	図7、図11、図12、図13、表2
(1) 技術的課題 交直差の高周波特性の改善	従来のサーマルコンバータは、ヒータ-熱電対間のストレイのため、ヒータ線の入力電流が熱電対側の測定系に漏れてしまい、高周波領域の再現性が悪く、不確かさの主要要因となっている。	国家標準機器としてのサーマルコンバータは、高い再現性が要求される。校正事業者においても、高周波領域の校正は難しく、高周波特性の改善が望まれる。	図7、図14
(2) 技術的課題 サーマルコンバータのヒータ抵抗の改良	通常のサーマルコンバータのヒータ抵抗値は限定されており、入力電圧が制限される。任意の抵抗値が選択できるようにする。また、低周波領域ではヒータ線の温度変動幅とヒータ線抵抗値の変動幅により、精度が落ちるといった問題がある。ヒータ抵抗の改善を行う。	校正事業者においては、幅広い電圧範囲で使用可能なサーマルコンバータが使い勝手が良い。また、校正に伴う不確かさ要因が小さいことが望まれる。	表2
(3) 技術的課題 熱的交直差の改善	国家標準機関としてのサーマルコンバータの基準は1 kHz 付近の交直差である。1 kHz の交直差が1 ppm 以内であれば、国家標準器として利用可能な高性能のサーマルコンバータとなる。	国家標準器として利用可能なサーマルコンバータは、1 kHz の交直差が1 ppm 以内が望まれている。	図16、図17
(4) 技術的課題 耐久性の向上	サーマルコンバータの定格電流は10 mA と小さく、わずかな過電流により、ヒータ線の断線破壊が起こる。産業現場への普及のため、サーマルコンバータの耐久性を向上させる。	校正事業者や産業界では、大量に校正を実施することも多く、サーマルコンバータが壊れにくいことが望まれている。	図19、表2
(5) 技術的課題 サーマルコンバータの低周波特性の改善	サーマルコンバータの熱的時定数が0.1 s のオーダーの場合、100 Hz 以下の低周波で、交直差が大きくなる。これにより、校正の不確かさが大きくなるため、低周波特性の改善を行う。	商用周波数の交流電圧の不確かさの改善のため、100 Hz 以下の低周波の改善が望まれている。	図17、表2
(6) 技術的課題 熱電対の抵抗の改良	SN 比は出力電圧に比例し、出力抵抗 R の平方根に逆比例する。複数の熱電対の場合、抵抗値が10 kΩになり、検出感度が低減する。検出感度 (SNR) を向上させるため、熱電対の抵抗をできるだけ小さくする。	国家標準として、交直差の値を ppm レベルで評価するとき、検出感度が高いことが必要である。	図10、表2
(7) 技術的課題 サーマルコンバータの交直差の周波数特性	産業界へのサーマルコンバータの普及を考慮したとき、周波数特性のフラットなサーマルコンバータが使い勝手が良い。交直差の周波数特性 (10 Hz ~ 1 MHz) を改善する。	産業現場での校正の際、校正条件の変化による校正値のずれを判断するため、交直差の周波数特性が小さいことが望ましい。	図17、表2
(8) 技術的課題 サーマルコンバータの耐環境を評価	産業現場においては、校正室と異なり、温度や湿度の環境が整っていない場合が、予想される。サーマルコンバータの耐環境を評価し、サーマルコンバータの利用の際の指標とする。	産業現場への標準の利用促進のため、環境に対するサーマルコンバータの安定性の評価が重要になる。	図20、図21

Sb 膜の間に Cu 膜を挟むことで、接触抵抗が格段に小さくなり、我々の抵抗値は 4 k Ω から 400 Ω に改善することに成功した。また、熱電対膜を基板の両面に作製し、出力値を上げる試みを行った。このため、熱電対膜作製では次の 8 回の蒸着が必要となる。フィルム基板の表面に、① Bi 膜作製、② Sb 膜作製、③ 引き出し電極の Cu 膜作製、④ Bi-Sb 間の Cu 膜作製の順序で、マスク蒸着法によって成膜したのち、フィルム基板を裏返しにして、表と同様、⑤ Bi、⑥ Sb、⑦ 引き出し電極の Cu、⑧ Bi-Sb 間の Cu 膜作製のように、8 回のパターン形成が必要となる。複雑な熱電対膜の作製も一度に複数個の作製ができるように、図 11 のような蒸着治具を開発した。これにより、熱電対膜の位置合わせが容易になり、歩留まりの改善に貢献し、大量生産が可能な作製方法を確立した。

図 12 は、今回開発した薄膜型サーマルコンバータの構造である。ヒータ抵抗と熱電対は上述のように別々に製作され、仕様適合したヒータ抵抗と熱電対膜が、サーマルコンバータの製作に利用される。熱電対が製膜された 12 μm 厚のポリイミド膜は、アルミナ製のフレームに支持される。ヒータが製膜された窒化アルミチップをフリップチップボンディング法でポリイミド膜上に接続する。前述のように、ヒータ抵抗のアニールが独立して行えるので、アニー

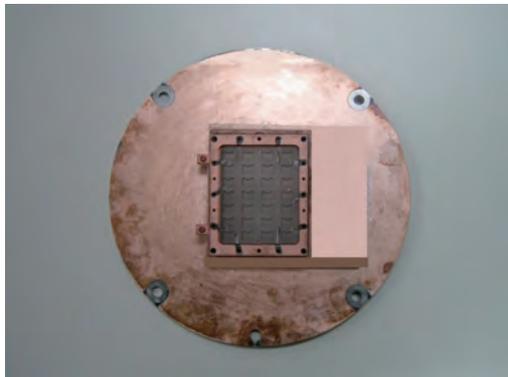


図 11 熱電対膜作製のための長方形の蒸着治具

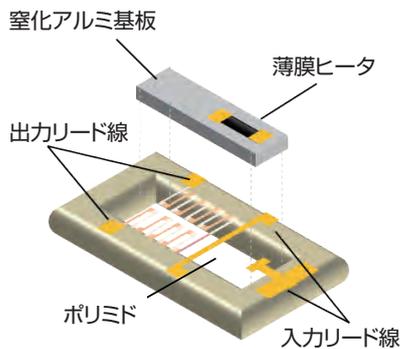


図 12 薄膜型サーマルコンバータ模式図

ルはポリイミド膜上に取り付ける前に行われ、端子や熱電対等の他の構造に熱的な影響を全く与えることがない。これにより、最適なアニール条件を適用でき、作製の簡易化にも貢献している。ヒータ抵抗と熱電対がマウントされたアルミナフレームをアルミナでカバーし、サーマルコンバータが完成する。図 13 は開発したサーマルコンバータの写真である。素子の大きさは、2 × 1.5 cm であり、計測器内部に組み込むことも可能である。

次に、性能の改善について述べる。サーマルコンバータの構造と特性は密接であるので、5.1 節の技術課題を解決できるように構造の設計を行った。ヒータ基板として、過電流によるヒータ線の劣化・破壊の対策のため、熱伝導率が高い窒化アルミ基板を採用している。窒化アルミはヒータ熱の伝熱の役割も果たし、真空封入されている熱的絶縁状態のヒータ構造より耐久性が格段に向上し、電流範囲の拡張が可能である。この構造の場合、直流電圧と交流電圧の比較は、ヒータ線の温度を直接測定するのではなく、

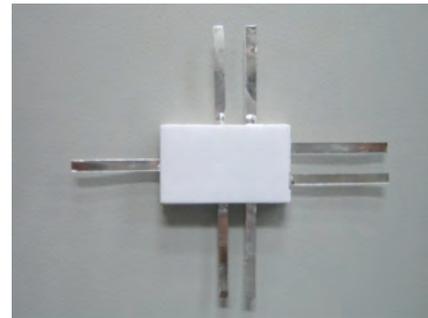
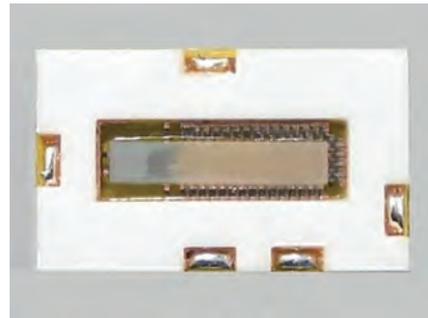


図 13 薄膜型サーマルコンバータ素子内部（上）と薄膜型サーマルコンバータ素子外観（中）、および、サーマルコンバータ用金属ケース（下）

窒化アルミ基板の温度上昇を測定することになる。このことにより、定格 200 mA のサーマルコンバータが可能となった^[22]。

ヒータの抵抗値はヒータ形状や面抵抗の調整により従来より容易に変更できる。ヒータの長さは、0.1 mm ～数 mm まで変更可能で、ヒータの製膜中に抵抗の大きさをモニターし、希望の抵抗値を得られるようにした。これにより、ヒータの抵抗値は、1 Ω ～ 2 k Ω まで選択可能である。2 k Ω のサーマルコンバータの場合、電圧拡張のための分圧用の抵抗器が必要なく、20 V まで印加可能である。ヒータ形状においても、周波数特性の計算が可能な構造であるストレート型や熱的交直差を抑える U 字型等任意の形状が可能である。抵抗値の変更と合わせて、交直差の見積もりのための周波数特性の異なる複数のサーマルコンバータが作製可能である。

熱電対の配置は、ヒータ線と熱電対間とのストレイの影響を抑えるため、図 5 にみられる従来のヒータ線の近傍に配置する構造から、ヒータ線の入力 hi 側から離れた配置とした。熱電対をヒータ線の Lo 側に配置することで、電位差が小さくなり、漏れ電流を減少することができる。このため、ヒータ線は図 14 に示されるように基板の一部にとどめており、熱電対はヒータ線のない部分の窒化アルミ基板の温度上昇を観測する。従来の薄膜型サーマルコンバータはヒータ線まわりが熱的絶縁であり、ヒータと熱電対間の配置を離すことができなかった。

次に、低周波領域の交直差を改善するために、サーマルコンバータの熱的時定数の設計を行った。熱的時定数とは、薄膜サーマルコンバータの出力電圧の応答特性を示す値で、低周波域では温度振幅の周波数特性を決めるパラメータである。サーマルコンバータの交直差は、入力電圧周波数 f が低くなると、ヒータ線で発生するジュール熱は、倍周波数 $2f$ で 0 から最大パワーまで振動する。入力周波数 f が、ヒータ線の熱時定数の逆数 ($1/\tau$) と比較して十

分に高くない場合、ヒータの温度にも倍周波数 $2f$ の振動が生じる。シングルジャンクションサーマルコンバータの時定数は 0.1 s ～ 1 s 程度であり、100 Hz 以下の低周波数領域においては熱リップルの影響が無視できなくなる。我々が開発した薄膜型のサーマルコンバータの熱的時定数の大きさは、窒化アルミ基板のサイズを変更することで 0.3 s ～ 4 s まで調整が可能である。1 例として、時定数が 2 s のときの基板の大きさは、0.3 mm × 1.5 mm × 8 mm となる。従来のサーマルコンバータの熱的時定数はその構造と密接な関係があり、独立した変更が難しかったが、我々は大幅な構造の変更なく、熱的時定数の変更が可能にした。前述のヒータ線の抵抗の温度係数を改善と合わせて、サーマルコンバータの交直差の周波数特性の改善が可能となる。

6 薄膜型サーマルコンバータの特性評価

開発したサーマルコンバータの性能としては、国家標準器で使われるような高性能を維持しつつ、耐久性の向上と使い勝手を良くして、産業界へ普及させることを目標としている。この章では、開発した薄膜型サーマルコンバータ^[23]の特性評価について述べる。

最初に、従来型の薄膜型と同じ形状のサーマルコンバータを試作した(図 15)。図 15 にみられるように、ヒータ膜と熱電対膜はシリコン基板の代わりに、ポリイミド膜上に作製した。熱電対はヒータ線に沿って配置されている。試作品の交直差の周波数特性を図 16 に示す。1 kHz 付近の交直差は、おおよそ 5 ppm であり、表 1 の (3) 技術的課題を満たしていない。国家標準器として、1 kHz 付近の交直差は 1 ppm 以内を目指しているが、この交直差の原因としては、ヒータ線上の熱の流入が異なり、ポリイミド膜状のヒータ線の熱の分布が不均一になっているため、熱的交直差が観測されていると考えられる。また、交直差の周波数特性も考慮した構造ではないため、1 MHz で 10 ppm 以上の交直差が観測されている。

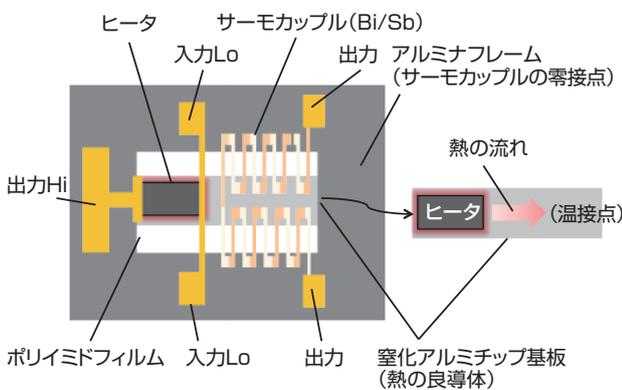


図 14 薄膜型サーマルコンバータ配置図

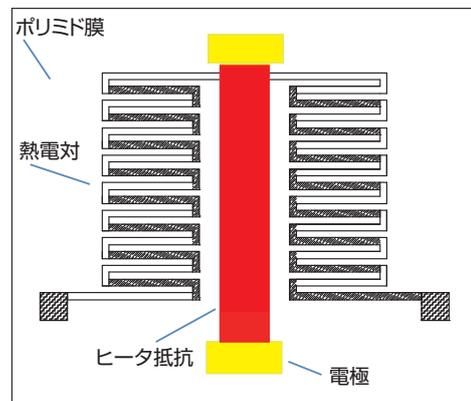


図 15 薄膜型サーマルコンバータのプロトタイプ模式図

次に、新型のサーマルコンバータ（図 10）の特性を紹介する。図 17 はサーマルコンバータの 10 Hz から 1 MHz の交直差の測定結果である。図の点線が従来のサーマルコンバータで、実線が今回開発したサーマルコンバータである。1 kHz 付近の交直差は、ヒータの不均一が改善したことで、1 ppm 以下に改善している。交直差の周波数特性においては、抵抗値や浮遊容量等を考慮した、交直差の周波数特性のモデル計算を行った。サーマルコンバータの形状を設計に従い作製することで、1 MHz においても図 16 と異なり、10 ppm 以下を達成した。また、我々のサーマルコンバータは、表 1 の (5) 技術的課題の交直差の低周波特性の原因となるサーマルコンバータの熱的時定数やヒータの抵抗値や形状、配置を自由に変えることができるので、熱的時定数が適切になるように窒化アルミ基板のサイズを調整し、抵抗の温度係数を、5 ppm/K 以下に改善している。これにより、図 17 の実線にみられるように、10 Hz から 1 MHz の広い周波数範囲で、交直差を 10 ppm

以内に抑えたサーマルコンバータを作製することが可能となった。従来のサーマルコンバータでは、図 17 の点線のように、低周波特性が大きく、また、高周波領域の交直差も大きい。産業現場では、0.1 % 程度の交直差の不確かさでも良いことも多く、今回開発したサーマルコンバータを用いることにより、交直差の値を 0 とみなすこともでき、表 1 の (7) 技術課題に示したすべての課題をクリアした。

図 18^[23] は、表 1 の (1) 技術的課題交直差の高周波特性を評価した図である。図 18 (a) は、図 15 にみられる試作品である従来型の熱電対がヒータ線に沿った配置のサーマルコンバータの周波数特性である。図 18 (a) の白四角は、熱電対出力回路にローパスフィルターを入れた場合の測定結果で、黒丸はローパスフィルターなしの結果である。測定結果の差は、ヒータ-熱電対間の電気的絶縁が十分でないことを示している。この交直差は熱電対の測定回路に依存するため、不確かさの主要要因となり、校正事業者が利用する場合には、評価する必要がある。一方、図 18 (b) は、

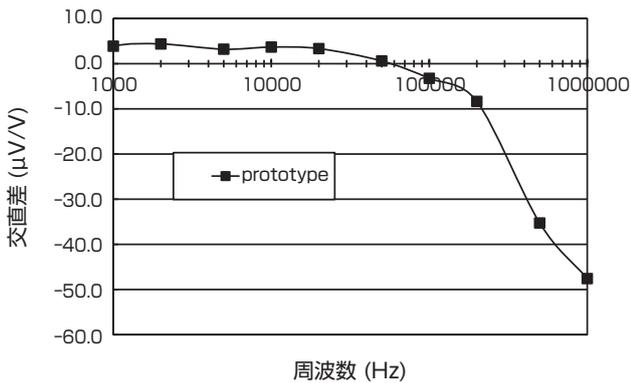


図 16 プロトタイプの薄膜型サーマルコンバータの交直差の周波数特性

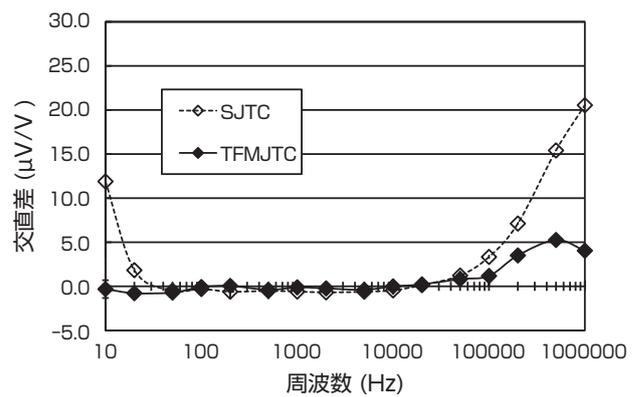


図 17 シングルジャンクションサーマルコンバータ (SJTC) と薄膜型サーマルコンバータ (TFMJTC) の交直差の周波数特性

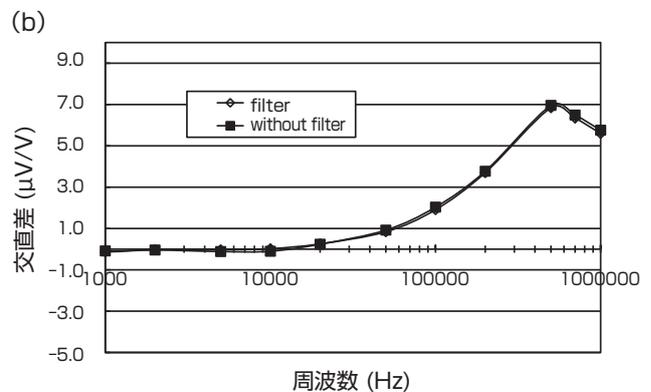
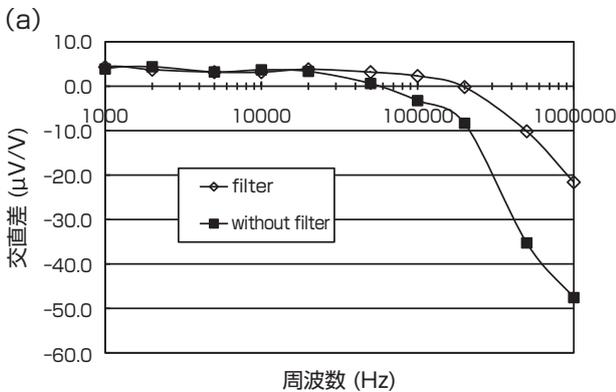


図 18 マルチジャンクションサーマルコンバータの高周波特性。
熱電対出力にローパスフィルターを用いた場合 (◆) とローパスフィルターなしの場合 (■)
(a) 従来の熱電対がヒータ線に沿った配置のサーマルコンバータの測定結果
(b) 新型の薄膜型サーマルコンバータの測定結果

開発したサーマルコンバータの結果で、フィルターがあるときとない場合で、同じ周波数特性が得られ、1 MHzの高周波で、両者の差は測定値のばらつきの範囲内である。熱電対をゼロ電位電極付近に移動したサーマルコンバータに対し、同様な良好の結果が得られており、校正事業者が利用する際の使い勝手が向上している。

耐久性の向上が望まれる1例として、高周波用サーマルコンバータが考えられる。インピーダンスマッチングの影響を考慮する必要がある1 MHz以上の交流電圧標準においては、50 Ωのサーマルコンバータの校正が要求される。しかし、従来のサーマルコンバータは定格電圧が0.5 Vと十分でないため、50 Ω以外のサーマルコンバータを用いて校正されていた。我々は、ヒータ熱の放熱の役割を果たす窒化アルミ基板を用いたことにより、従来の定格電圧の5倍の電圧範囲で使用可能となった。図19^[24]はヒータの抵抗値を50 Ωに調整したサーマルコンバータの1 MHzから

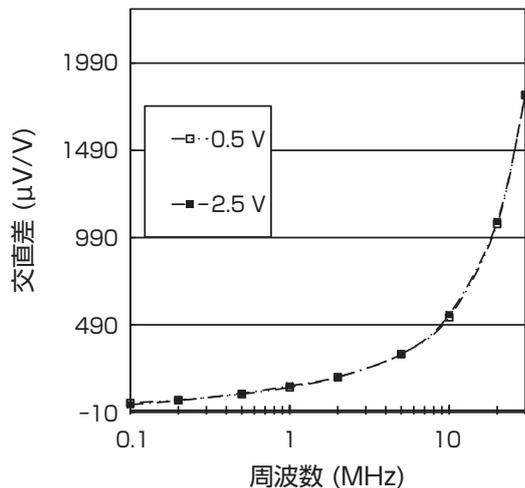


図19 ヒータ抵抗50 Ωの薄膜型サーマルコンバータの電圧依存

100 MHzの交直差の電圧依存を示しており、電圧依存は極めて小さい。短い時間であれば、0.5 Aの電圧を印加しても壊れることはなく、耐久性が格段に向上した。

校正室の校正環境は、温度、湿度とも環境条件が整えられているが、産業現場では、十分に安定した温度、湿度環境でない場合も想定される。耐環境性の評価として、温度と湿度を変えて、交直差の測定を行った。図20^[25]は、IEC規格に従い、温度を変化させて測定を行った結果である。温度変化に対して、薄膜型サーマルコンバータの交直差は検出感度の範囲内で変化が観察されなかった。また、周囲温度を15℃まで温度を下げて同様の測定を行い、15℃から35℃における交直差の温度依存性は、1 ppm以下であることが明らかになった^[25]。湿度環境に対する安定性を明らかにするため、IEC規格に従い、湿度特性の評価を行った。図21^[25]に湿度特性の評価結果と恒温槽内の相対湿度を測定した結果を示す。図21に示すように、湿度試験における交直差の変化率は、1 ppm以下である。この結果より、薄膜型サーマルコンバータが十分な湿度に対する安定性を有すると考える。参考文献25に見られるように経年変化も従来のサーマルコンバータと同様に極めて安定しており、今回開発したサーマルコンバータは産業現場でも十分に利用可能であると考えられる。

従来のサーマルコンバータと開発したサーマルコンバータの性能の比較を表2にまとめる。

7 交流電圧標準の今後の展開と課題

開発したサーマルコンバータは、現在、ニッコン株式会社で製品化されている。これまでのところ、年間おおよそ100個販売され、10カ国以上の標準機関で使われている。新型のサーマルコンバータは、表2に示されるように国家標準として使われていた代表的な従来のサーマルコン

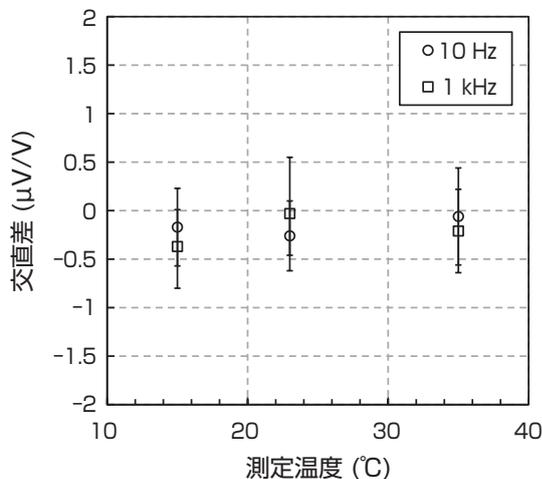


図20 薄膜型サーマルコンバータの温度特性

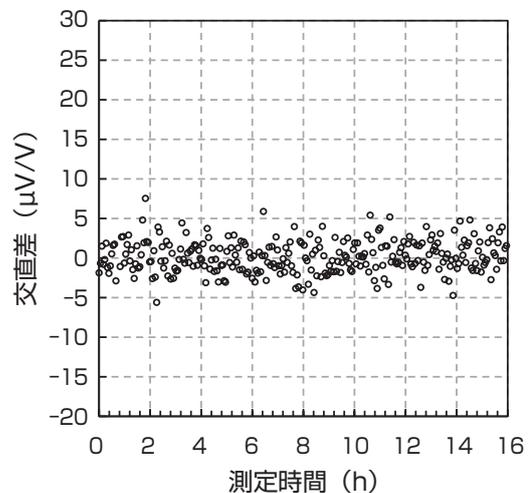


図21 薄膜型サーマルコンバータの湿度特性

表2 サーマルコンバータの比較

交直変換器	豆電球型	薄膜多対熱電対型	新型薄膜サーマルコンバータ
作成方法	手作業で1個ずつ作製	微細加工	微細加工
構造	三次元でヒータと熱電対が真空ガラス封入	ヒータと熱電対が同一基板	ヒータと熱電対が別の基板で独立に作製可能
[特徴]			
ヒータ抵抗	25 Ω, 90 Ω	90 Ω	1 ~ 2000 Ω
定格電流	10 mA	10 mA	200 mA
熱電対の数	1対	100対	68対
熱電対の抵抗	8 Ω	10 kΩ	400 Ω
出力電圧	7 mV	80 mV	35 mV
時定数	0.3 s	2 s	2 s
ヒータ抵抗の温度係数	10 ppm	10 ppm	5 ppm
ヒータ-熱電対の絶縁抵抗@1 MHz	高	低	高
低周波数特性@10 Hz	~10 ppm	< 1 ppm	< 1 ppm
熱的交直差	~1 ppm	~0.1 ppm	~0.1 ppm
高周波特性@1 MHz	> 10 ppm	> 10 ppm	< 10 ppm

バータの性能を満たしている。我々のサーマルコンバータは、ヒータの定格電流が大幅に改善され壊れにくくなっている。しかし、ヒータ線に大電流が流せるようになったことで、ヒータの発熱が大きい場合、熱電対への影響が予想される。熱電対膜は、ビスマスとアンチモンを用いており、ビスマスの融点が 271.3 °C と低い。大電流を流せるように改善されたが、長期使用では、加速試験の結果、熱電対の劣化が予想されている^[26]。20 mA 程度では、ヒータの発熱による影響は小さく、20 年以上の連続通電使用が可能であるが、大電流を流した場合、熱電対の劣化により、10 年以下に寿命が短くなってしまふ。開発したサーマルコンバータの特徴である大電流が流せる利点を十分に発揮するため、熱電対の改良を考えている。

また、低周波領域の交流電圧標準は産業界から要望があるが、現在の供給範囲は 4 Hz までである。今後 0.1 Hz まで拡張するため、開発したサーマルコンバータの熱的なモデルの解析を行っている。現在、真空封入したサーマルコンバータの開発を行っており、さらなる低周波特性改善を行い、範囲の拡張を行う予定である^[27]。

サーマルコンバータの今後の応用であるが、オーストラリアの国立標準研究所が我々の開発したサーマルコンバータを利用して電圧の標準でなく電力の標準への応用を試みている^[28]。広く用いられている交流電力標準は、電圧、電流、位相の組み立て量であるが、オーストラリアの提案している電力標準は、サーマルコンバータを基準として確立しようとする電力標準である。日本の商用周波数の電力標準は、日

本電気計器検定所が指名計量標準機関 (DI: Designated Institute) となっているが、現在、日本電気計器検定所と共同で、開発したサーマルコンバータを用いて、特定標準器^{用語2}の不確かさ改善を計画している。

もう一つのサーマルコンバータの応用の可能性として、図 22 で見られるような脱着可能な小型化した伸介器を組み込んだ計測器の開発が考えられる。薄膜型サーマルコンバータは小型化と耐久性アップを実現したため、交流電圧関連の測定機器の基準デバイスとして使用できる可能性がある。通常交流電圧の校正と同じように安定したサーマルコンバータを基準として、交流電圧の出力値を常にサーマルコンバータにフィードバックさせる機能を開発することで、高精度な交流電圧を利用することができる。サーマルコンバータを複数個内蔵することで、値の確認も行う。このような取り外し可能な伸介器を内蔵した計測器を開発す

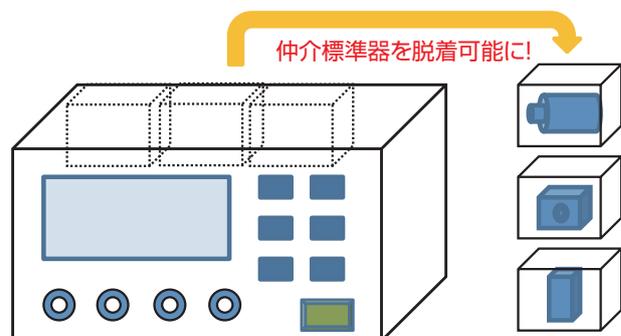


図 22 脱着可能な伸介器を組み込んだ計測器の開発

ることで、産業現場でのトレーサビリティ確保の負担が軽減できる可能性がある。従来の校正は、複数の電流量が計測できる計測器を校正機関に持ち込んで校正を行っているが、取り外し可能な仲介器を校正することで、他の電流量の測定に影響を与えることなく、校正ができることになる。これにより、より高精度な電気標準の利用促進を行っていきたいと考えている。

謝辞

当研究開発の製品化に多大のご協力をいただいたニッコム株式会社の皆様に厚く御礼申し上げます。

用語の説明

用語1: 上位標準器: 標準のトレーサビリティは、国家標準（一次標準）を上位として、国家標準から校正を受ける校正事業者の標準（二次標準）、二次標準から校正を受けている校正事業者の標準（実用標準）、校正事業者から校正を受けている一般のユーザーの計測器で成り立っている。校正先の標準器は上位標準器と呼ばれている。

用語2: 特定標準器: 日本の計量法で定められている一次標準のことを特定標準器（国家標準）と呼んでいる。特定標準器から校正を受ける校正器物は、特定二次標準器と呼ばれる。

参考文献

- [1] B. D. Inglis: Standards for AC-DC transfer, *Metrologia*, 29 (2), 191-199 (1992).
- [2] F. L. Hermach: Thermal converters as AC-DC transfer standards for current and voltage measurements at audio-frequencies, *J. Res. Nat. Bur. Stand.*, 48 (2), 121-138 (1952).
- [3] M. Klonz and T. Weimann: Accurate thin film multijunction thermal converter on a silicon chip, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 38 (2), 335-337 (1989).
- [4] B. D. Inglis: A method for the determination of AC-DC transfer errors in thermoelements, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 27 (4), 440-444 (1978).
- [5] H. Sasaki and K. Takahashi: Development of a high-precision AC-DC transfer standard using the FAST-Reversed DC method, *Researches of the Electrotechnical Laboratory*, No. 989, (1999).
- [6] C. J. van Mullem, W. J. G. D. Janssen and J. P. M. de Vreede: Evaluation of the calculable high frequency AC-DC standard, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 46 (2), 361-364 (1997).
- [7] H. Laiz, M. Klonz, E. Kessler, M. Kampik and R. Lapuh: Low-frequency AC-DC voltage transfer standards with new high-sensitivity and low-power-coefficient thin-film multijunction thermal converters, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 52 (2), 350-354 (2003).
- [8] F. L. Hermach and E. S. Williams: Thermal converters for audio-frequency voltage measurements of high accuracy, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 15 (4), 260-268 (1966).
- [9] M. Klonz: AC-DC transfer difference of the PTB multijunction thermal converter in the frequency range from 10 Hz to 100 kHz, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, IM-36 (2), 320-329 (1987).
- [10] H. Dinter, M. Klonz, A. Lerm, F. Volklein and T. Weimann: AC-DC-mV-transfer with highly sensitive thin-film multijunction thermal converters, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 42 (2), 612-614 (1993).
- [11] J. R. Kinard, D. X. Huang and D. B. Novotny: Performance of multilayer thin-film multijunction thermal converters, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 44 (2), 383-386 (1995).
- [12] D. Matson: Using a linear thermal transfer standard for high-precision AC/DC transfers, *CPEM '90 Conference digest*, 64-65 (1990).
- [13] H. Fujiki: Improvement of the voltage dependence of high-voltage AC-DC transfer differences at NMII, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 57 (9), 1992-1997 (2008).
- [14] R. L. Swerlein: A 10 ppm accurate digital AC measurement algorithm, *Proc. NCSL Workshop and Symp.*, 17-36 (1991).
- [15] P. S. Filipinski, R. F. Clark and D. C. Paulusse: Calorimetric thermal voltage converter as a wideband calculable standard of AC-DC difference, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 48 (2), 387-390 (1999).
- [16] G. M. Free, T. E. Lipe, J. R. Kinard and J. E. Sims: Characterization of RF-DC transfer difference for thermal voltage converters with built-in tees in the frequency range 1 MHz to 1 GHz, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 56 (2), 341-345 (2007).
- [17] R. Behr, L. Palafox, G. Ramm, H. Moser and J. Melcher: Direct comparison of Josephson waveforms using an AC quantum voltmeter, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 56 (2), 235-238 (2008).
- [18] B. N. Taylor and T. J. Witt: New international electrical reference standards based on the Josephson and quantum Hall effect, *Metrologia*, 26 (1), 47-62 (1989).
- [19] M. Maruyama, C. Urano and N. Kaneko: New drive system for programmable Josephson voltage standard using pulse packet bias, *CPEM 2012 Conference digest*, 50-51 (2012).
- [20] I. Budovsky, D. Georgakopoulos, T. Hagen, H. Sasaki, and H. Yamamori: Precision AC-DC difference measurement system based on a programmable Josephson voltage standard, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 60 (7), 2439-2444 (2011).
- [21] P. S. Filipinski and M. Boecker: Experience with high-output-resistance MJTC AC-DC transfer standards at high frequencies, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 52 (4), 1314-1319 (2003).
- [22] H. Fujiki: Development of thin-film multijunction thermal current converters with increased rated current, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 62 (6), 1853-1858 (2013).
- [23] H. Fujiki: New thin-film multijunction thermal converter design for improved high-frequency performance, *IEEE Sensors Journal*, 7 (9), 1243-1247 (2007).
- [24] H. Fujiki: Development of Thin-Film Multijunction Thermal Converters With a Novel Structure, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 60 (7), 2725-2729 (2011).
- [25] Y. Amagai, H. Fujiki, K. Shimizume and S. Hidaka: Improved stability of thin-film multijunction thermal converter, *Electrical Engineering in Japan*, 188 (1), 18-26 (2014).
- [26] H. Fujiki, Y. Amagai, H. Sasaki, K. Shimizume, K. Kishino and S. Hidaka: Improved performance of a thin-film multijunction thermal converter, *CPEM 2014 Conference digest*, 48-49 (2014).
- [27] Y. Amagai, H. Fujiki, K. Shimizume, K. Kishino and S. Hidaka: Low-frequency characteristics of a thin-film multijunction thermal converter under vacuum, *CPEM 2014 Conference digest*, 50-51 (2014).
- [28] I. Budovsky: AC-DC transfer standard for mains- and audio frequency power, *EURAMET TCEM SC LF meeting*, (2013).

執筆者略歴

藤木 弘之（ふじき ひろゆき）

1998年九州大学大学院理学研究科物理専攻博士後期課程修了。博士（理学）。同年九州大学工学部ベンチャービジネスラボラトリ勤務を経て、1999年工業技術院電子技術総合研究所入所。2001年産業技術総合研究所計測標準研究部門電磁気計測科研究員。2012年電磁気計測科応用電気標準研究室室長として現在に至る。この論文では、交直変換標準の立ち上げと標準供給の利用促進、および、薄膜型サーマルコンバータの開発と評価全般を行った。



天谷 康孝（あまが い やすたか）

2004年東京理科大学大学院基礎工学研究科修士課程修了。博士（工学）。同年TDK株式会社勤務を経て、2009年産業技術総合研究所に入所。2013年電磁気計測科応用電気標準研究室主任研究員として現在に至る。この論文では、IEC規格に基づき、サーマルコンバータ素子の温度、湿度、圧力の耐環境性に関する評価を担当した。現在、低周波への拡張と交流プログラマブルジョセフソン電圧とサーマルコンバータを組み合わせて、交流電圧を高精度に校正するシステムの開発も行っている。



佐々木 仁（ささき ひとし）

1979年北海道大学大学院理学研究科物理学科修士課程修了。博士（工学）。同年工業技術院電子技術総合研究所標準計測部に入所。2001年産業技術総合研究所。エレクトロニクス研究部門主任研究員として現在に至る。この論文では、薄膜型サーマルコンバータの熱解析、周波数特性解析を担当し、主要部分の設計を行い、実用化に貢献した。



査読者との議論

議論1 全体について

コメント（田中 充：産業技術総合研究所フェロー）

この論文の主旨に照らせば、標準供給体制の社会的・産業的・国際的な視点からの技術構成方式については十分に詳細に記載されています。ただ、わかりやすさの点から、供給体制を構成する国家標準器への対応と産業界の校正技術への対応の相違点あるいは類似・共通点がまだ十分に明確には示されていないと言えます。それぞれの課題を集約して記載することが必要です。

回答（藤木 弘之）

この研究では、国内の交流電圧標準の体系の確立を目的としています。この目的のためには、ご指摘いただいたように、国家標準器への対応と産業界の校正技術の開発が必要であります。初稿の文章では、国家標準器として、交流量子標準と交直変換標準の選択も意識して書いていました。交流量子標準は国家標準器のみの対応が主ですが、サーマルコンバータは国家標準器と産業界の校正技術への対応を兼ねていますので、それぞれの課題が混在した文章構成になっていました。4章の文章構成を見直し、国家標準器への対応と産業界の校正技術への対応の課題を区別し、それぞれ独立した節に改訂しました。これにより、交流電圧標準体系の確立には、“国家標準の確立” + “新しい標準器の開発” + “利用促進技術の開発”

が必要であることが理解しやすくなったと考えております。また、サーマルコンバータの開発の必要性については、国家標準の範囲拡張にサーマルコンバータが必要であったことと、交流電圧の標準供給にも、交流電圧計による供給のみでなく、サーマルコンバータを校正器物として用いることにメリットがあることを追記しました。技術的課題をまとめた表1の記載内容も再検討し、国家標準器として必要な技術と産業界への標準供給のために必要な技術がわかるように整理しました。

議論2 シナリオの範囲について

コメント（田中 充）

“国際相互承認と産業界からの要望に対応するため、2001年から交直変換標準の国内体系の範囲拡張を進めている。”の文章では、この論文が書かれた2015年段階でも供給体制が完成していないこととなりますが、シナリオとの関係でそれで良いか確認してください。

また、“開発したサーマルコンバータは、現在、ニッコン株式会社で製品化されている。これまでのところ、年間おおよそ100個販売され、10か国以上の標準機関で使われている。今後も継続して利用していただけるように、サーマルコンバータ自体のさらなる性能改善を考えている。”の文章では、10か国以上の標準機関は現在の性能で満足していないと読者は想像するのですが、それで良いのでしょうか？シナリオで確定したこの研究開発の範囲と、今後の課題範囲とを区別してはどうでしょうか？

回答（藤木 弘之）

（前者の指摘については、）交流電圧標準の整備は、国際的な範囲は終了しております。国内の交流電圧標準の要望として、国際的には整備されていない、10 Hz以下の交流電圧標準の要望があります。しかし、2001年の整備計画で目標としていた範囲は完了していますので、文章を修正しました。

（また後者の指摘については、）開発したサーマルコンバータの最大の特徴は、従来のサーマルコンバータと比べて、ヒータ線に大電流が流せるようになったことです。しかし、ヒータ線に大電流が流せるようになったことで、ヒータの発熱により、従来のサーマルコンバータでは影響がなかった熱電対に影響がでてきました。今回の開発したサーマルコンバータでも十分に国家標準のサーマルコンバータとして使用できますが、熱電対の影響を改善することで、大電流が流せるという最大の利点を生かすことができると考えております。この内容に沿って文章を修正しました。

議論3 比較すべき技術要素について

コメント（田中 充）

要素技術候補の得失について議論していることは重要ですが、その一部についてはリストしながらも、必要十分な説明が欠けています。全体の構成方式として実際に採用されたものの正当性を否定するものではありませんが、客観性の観点からこれらについても加筆することが適切だと思います。

回答（藤木 弘之）

初稿では、サーマルコンバータ開発の要素技術候補として、3章に記載してあるワイヤー多熱電対型サーマルコンバータと熱型半導体RMSセンサーの具体的な記述を省略していました。この論文では、交流電圧標準の国内の標準体系を確立することを目的としており、国家標準器の開発と利用促進技術を兼ねたサーマルコンバータの開発を目指していましたので、国家標準器に特化したワイヤー多熱電対型サーマルコンバータと標準供給の校正器物に特化している熱型半導体RMSセンサーの記載は、全体の文章も長いこともあり、名前の紹介に留めておりました。各要素技術の候補の説明があったほうが、専門家以外の読者にもわかりやすくなると思え、上記の要素技術候補の内容も追記しました。

議論4 製品化シナリオの記述強化について

コメント（羽鳥 浩章：エネルギー技術研究部門副研究部門長）

背景から研究開発のシナリオまでの部分は、非常に丁寧に説明されています。一方で、実際の開発過程から製品化に至る部分については、やや説明が箇条書き的であり、挙げられた技術開発要素が比較的多いこともあって、専門外の読者にはややわかりにくいように思っています。

回答（藤木 弘之）

サーマルコンバータの技術開発要素については、専門の学術論文にならないように簡単な技術紹介に留めていました。サーマルコンバータの製品化についてですが、従来のサーマルコンバータは、作製技術が難しく大量生産が困難であることと、過電流などの操作ミスにより簡単に破壊されることから、産業現場に近い校正室では、製品として普及していませんでした。製品化のためには、国家標準としても使える性能であることに加えて、サーマルコンバータの耐久性の向上と使いやすくなることが重要であると考えていました。この研究のサーマルコンバータの開発に必要な技術要素を初稿の要素技術課題の節と表1に記載していましたが、説明が足りない箇所があったと反省しています。サーマルコンバータの開発に関する文章の構成を見直し、各要素技術の説明とそれに対応する課題解決のための取り組みの内容を加筆しました。各技術要素の説明については、レビューアの質問コメントを参考にして、この論文と表1を修正し、図、表を追加しました。

議論5 技術要素の効率的整理について

コメント（羽鳥 浩章）

サーマルコンバータの開発技術要素について、目標・指標とその設定理由が表1に示されています。これに対し、実際に開発した薄膜型サーマルコンバータについては、5章に開発経緯、6章にその特性が述べられていますが、技術要素が多岐に渡るため、読者にわかりにくいかと思います。製品化につながった重要技術要素とその開発経緯を整理し、明確に示すことが構成学的に重要な意味をもつことから、表1に示された技術要素に対して、実際に行った開発の要点と、その結果としての特性を図表にまとめてははいかがでしょうか。

回答（藤木 弘之）

サーマルコンバータの開発の動機は、交流電圧の国家標準の供給範囲の拡張と不確かさの改善のために、高性能なサーマルコンバータが必要であるが、その入手が困難であることでした。また、交流電圧標準と交直変換標準の校正器物が異なるため、交流電圧標準の普及のためには、新しい標準器の開発も必要であると考えていました。サーマルコンバータの開発では、その特性がいろいろな要素技術の複合で決まるため、最初の文章では、各要素技術の説明が点在し、専門家以外には、読み難い論文となっていました。開発経緯と重要技術要素を整理するため、文章の構成を見直し、新しいサーマルコンバータの開発の意義については4章にまとめて記載し、4章に記載していた要素技術を5章に移行しました。表1の重要技術要素について、開発の内容とその理由を開発経緯に対応できるように表1とこの論文の文章を修正、加筆しました。加えて、従来のサーマルコンバータと開発したサーマルコンバータの特徴の比較ができるように表2を作成し、重要要素技術に関連する図番号を表1に記載しました。