

令和元年6月4日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06404

研究課題名（和文）新しい電力計測技術の開発

研究課題名（英文）Development of a high-precision AC power standard using a thermal converter

研究代表者

藤木 弘之（Fujiki, Hiroyuki）

国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・部付

研究者番号：00357906

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：交流電力標準の範囲拡張が可能な基準器（サーマルコンバータ）の開発を行った。現在、交流電力の国家標準は、電圧標準、電流標準、位相標準の個別の国家標準を組み合わせて実現されている。この方法では、校正された交流電圧計、交流電流計、位相計が基準器として用いられるため、電力標準の範囲拡張が難しい。本研究では、サーマルコンバータを用いて、電圧、電流、周波数範囲の拡張が可能な電力標準の技術を開発した。開発した電力標準は、従来の電力標準と良好一致が得られている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

サーマルコンバータを基準とする交流電力標準を開発することで、電力標準の高精度化や範囲拡張が容易になり、再生可能エネルギーを利用した電力の取引に貢献できる成果である。また、重電関係の電気製品の輸出は、製造した国のトレーサビリティが要求されており、本研究は標準体系の整備に寄与する。

研究成果の概要（英文）：We have developed new thin film multijunction thermal converters to realize a reliable AC power standard. At present, the AC power standard is derived quantity composed of voltage, current and phase. Although this method is widely used, it is difficult to extend the range of AC power standards when AC volimeters, AC amperemeters, phase meters are used as references. In this study, the power standards have been established based on the thermal converters, which are capable of extending the range of AC voltages, AC currents and their frequencies. The AC power values obtained from the new method are in good agreement with values obtained from the conventional method.

研究分野：電気計測標準

キーワード：電力 計量標準 精密測定 交流電圧 交流電流 高調波

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

再生可能エネルギーを利用した電力の取引を促進するために、交流電力標準の高精度化や簡便な校正技術の開発が求められている。現在の交流電力の国家標準は、電圧標準( $V$ )、電流標準( $I$ )、位相角標準( $\phi$ )を別々に求めて、有効電力の式( $P = VI \cos \phi$ )に従って組み立てにより確立している。この方法は、日本のみならず、海外の国家標準機関でも一般的な方法である。各標準により校正されたデジタル交流電圧計やデジタル位相計が基準となり、デジタル交流電力計を校正することになる。しかし、デジタル電力計が基準となるため、温度などの外乱の影響や経年変化により、高精度化に限界がある。また、現在の交流電力の国家標準の周波数は 50 Hz、60 Hz のみであり、商用周波数以外のトレーサビリティを確保することは難しい。1 kHz 以上の電力標準の範囲拡張のためには、1 kHz 以上の交流電圧や交流電流の標準が必要なのももちろん、電力測定システムについても浮遊容量などを考慮した測定システムの開発が必要であり、電力の国家標準の校正において、1 kHz 以上の校正を供給している国は極めて少ない状況であった。

一方、パワーコンディショナーは蓄電池、太陽光発電などで得られる直流電力を交流電力に変換するのに用いられ、経済産業省の「スマートグリッドに関する国際標準化ロードマップ」の重要アイテムの一つである。パワーコンディショナーを用いて、直流から交流に変換を行うとき、高調波が発生する。高調波が電路に発生すると、電力ヒューズの加熱溶断、通信機器の妨害・映像の乱れ、電力量計の計量誤差発生・継電器の誤動作の恐れがある。パワーコンディショナーの高調波電力は国際標準化の流れにあり、日本においても、パワーコンディショナーの高調波電力を評価する標準化技術の開発が求められており、任意の電圧、電流で、周波数の拡張が可能な電力標準が求められていた。また、重電関係の電気製品は、輸出のとき、製造した国のトレーサビリティが要求されおり、標準の整備が必要な状況であった。

### 2. 研究の目的

デジタル電力計が基準となっている電力標準を拡張可能な基準器にすることを研究の目的とする。このため、電力用基準器として用いることができるサーマルコンバータ(図1)と呼ばれる熱-電気変換素子の開発を行った。通常のサーマルコンバータは、ある決まったヒータ抵抗に定電圧を印加するか、定電流を印加することにより、交流電圧標準や電流標準を導いている。サーマルコンバータの温度係数が小さいヒータ抵抗に、交流電圧(または電流)と基準直流電圧(電流)を印加し、ヒータの温度上昇を比較測定することで、交流電圧、または交流電流標準が求められる。サーマルコンバータの原理を電力に応用する提案がなされていたが、図1の従来のサーマルコンバータは、周波数特性を改善するため、ヒータ線幅は 25  $\mu\text{m}$  と細く、集中定数が適応できるようにヒータ線長も短いため、抵抗値(25  $\Omega$ )を変えるのが難しく、電圧や電流範囲も狭い。また、熱効率を良くするため、周りは真空であり、数%の過電流で加熱により壊れる。衝撃にも弱く、取り扱いが難しいため、電力標準に応用されていなかった。本研究では、電力標準用の計算モデルが可能なサーマルコンバータを開発し、拡張可能な電力標準を確立することを目的とする。

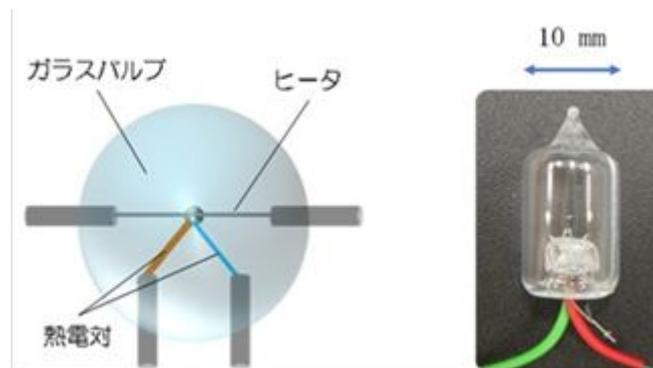


図1 従来のサーマルコンバータの概略図(左)と写真(右)

### 3. 研究の方法

電力標準の構築には、次の二つの開発が必要である。本研究の開発手順として以下の項目を設けて遂行した。

#### (1) 電圧と電流の両方の基準となるサーマルコンバータの開発

サーマルコンバータの電力標準への応用の可能性を今回の第一の目的とするため、周波数範囲は現状の 50 Hz、60 Hz を含む 50 Hz - 1 kHz の範囲で最適化を試みた。サーマルコンバータの計算モデルと実測値の一致を評価するため、ストレート型のヒータ形状のサーマルコンバータを作製した。例えば、交流電流サーマルコンバータの交直差 $\delta_r$ の周波数特性は、次に示されるように計算可能である [1]。

$$\delta_T = R_f G + \omega^2 C^2 R_f^2 / 2 - \omega^2 LC + \Delta R_{sk} / R_f + \delta_{fi} \quad (1)$$

ここで、 $R_f$  はヒータ抵抗、 $\omega$  は角周波数である。 $C$  は浮遊容量、 $G$  は絶縁抵抗の逆数、 $L$  は浮遊インダクタンス、 $\Delta R_{sk}$  は表皮効果による抵抗の変化であり、 $\delta_{fi}$  は熱的交直差である [2]。上記の式で表されるように、交直差の大きさは、抵抗値や抵抗形状により変化する。異なるサーマルコンバータの交直差を計算モデルと比較し、不確かさの大きさを評価する。抵抗の温度依存による影響を軽減するため、ヒータ抵抗は 10 ppm 以下のものを作製する。

#### (2) サーマルコンバータを基準器とする電力計測システムの開発と妥当性の確認

サーマルコンバータを基準とする電力標準を開発し、デジタル電力計を校正できるシステムを開発する (図 2)。図 2 のシステムは、サーマルコンバータを基準として、交流電圧と電流を発生させ、位相計の測定点を発生電力の基準とする測定システムである。図 2 において、高精度の交流電圧発生器と電流発生器は基準信号発生器を用いて同期が取れ、位相の調整が可能である。被校正器 (デジタル電圧計) を介して、従来の電力システムと比較する。

また、システムの妥当性の確認のため、従来の電力標準とも比較できるようにマイクロポテンシオメータと抵抗分圧器 [3] 及びレンジ抵抗器 [4] の開発も行った。現在の電力の国家標準においては、交流電圧と電流を校正して、電力標準が求められている。交流電圧については、レンジ抵抗と電圧用サーマルコンバータを組み合わせ、電圧を校正するシステムを構築した。交流電流は交流シャント抵抗と交流電圧を基準として求めているため、シャント抵抗の交流電圧標準が必要となる範囲の低電圧交流電圧標準の高精度化も行った。

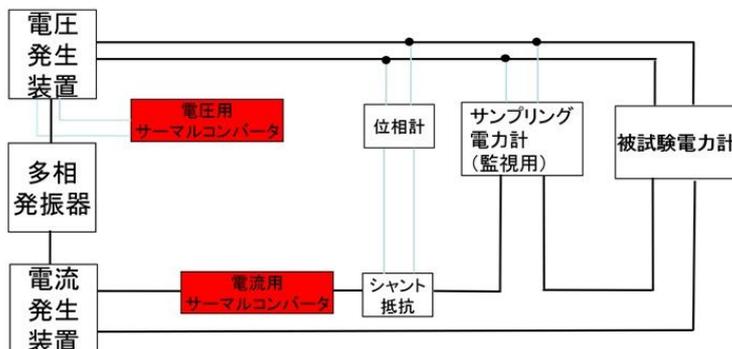


図 2 電力測定装置略図

### 4. 研究成果

#### (1) サーマルコンバータの開発

サーマルコンバータの作製については、入力が 10 V と 0.1 A まで印加可能なサーマルコンバータを開発した。サーマルコンバータは、100 Hz 以下の低周波では、ヒータの温度が入力交流電圧・電流の周波数変化に追従することにより、正確な温度測定が難しくなる [5]。また、交流印加時のヒータ抵抗値の温度変化の影響でも不確かさが大きくなる。電力標準の測定システムで、10 V の交流電圧標準の基準として用いることができる薄膜型サーマルコンバータを開発した (図 3)。



図 3 薄膜型サーマルコンバータ

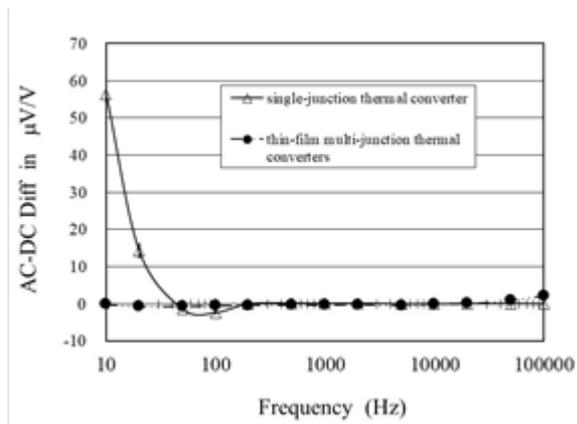


図 4 サーマルコンバータの交直差の周波数特性

サーマルコンバータの直流から交流への変換誤差 (交直差) を評価することで、交流電圧が導かれることになる。ヒータ線は、熱伝導率の高い窒化アルミ基板上に作製しており、放熱板の役目により、従来と比べて約 4 倍耐久性が向上した。低周波の不確かさ改善を行うため、

アニーリングを工夫することで、ヒータ抵抗の温度係数を 10 ppm 以下に改善し、熱リップルの影響を抑えた。また、窒化アルミのサイズを調整し、最適な熱的時定数のサーマルコンバータを開発した。図 4 はサーマルコンバータの交直差の周波数特性である。図の白三角は、従来型の測定結果で、低周波領域で熱リップルの影響により、交直差が大きくなっている。図の黒丸は、開発した薄膜型サーマルコンバータの結果で、周波数特性が小さく、不確かさの大きさの改善に成功した。結果として、10 V, 50 Hz の交流電圧の交直差の不確かさは従来の 12 ppm から 4 ppm に改善した。

同様に、交流電流用のサーマルコンバータのヒータも熱伝導率の高い窒化アルミ基板上に作製した。従来の真空封入されている熱的絶縁状態のヒータ構造の定格電流(10 mA) を超える電流範囲の拡張が可能である。今回、ヒータ抵抗が 10 のサーマルコンバータを作製した。定格電流は 100 mA であり、交流電流の周波数特性は、(1)式で表される。(1)式において、表皮効果を計算から見積もるのは難しいので、表皮効果の影響が小さい 200 以上のサーマルコンバータを作成し、その周波数特性を基準として、比較測定により、10 のサーマルコンバータの周波数特性を求めた。なお、(1)式の計算モデルで作成したサーマルコンバータの交流電流の周波数特性について、交流電流の国際比較に参加しており、国際整合性を確認している。図 5 は 50 mA と 100 mA のサーマルコンバータの交直差の周波数特性を示している。100 mA まで電流依存が小さく、シャント抵抗なしで電流範囲の拡張が可能である。

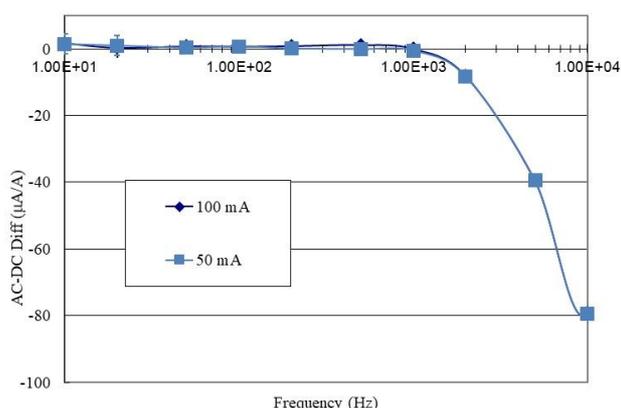


図 5 交流電流用サーマルコンバータの交直差の周波数特性

## (2) サーマルコンバータを基準器とする電力計測システムの開発と妥当性の確認

現在の電力の国家標準は日本電気計器検定所(JEMIC)から標準供給がなされており、前述のようにデジタル交流電圧と電流を校正して、電力標準が求められている。今回開発したサーマルコンバータの基準は、10 V, 0.1A であるが、国家標準の電力標準は、100 V, 5 A である。範囲が違うため、妥当性確認のため、交流電圧と交流電流が校正できるシステムの開発を行った。交流電圧については、電圧用サーマルコンバータのみを用いて電圧計を校正できるのは 10 V までであり、それ以上の電圧については、分圧用のレンジ抵抗器とサーマルコンバータ素子の組み合わせにより、電圧が校正される。サーマルコンバータ素子とレンジ抵抗器を組み合わせることで、任意の電圧と周波数の交流電圧標準が可能となり、範囲拡張も容易となる。国家標準で利用可能な高性能のレンジ抵抗器は市販されていないため、薄膜型レンジ抵抗器の作製を行った。現在のところ、薄膜型レンジ抵抗器は我々のグループのみで作成可能である。図 6 は作製した薄膜型レンジ抵抗器である。開発したレンジ抵抗器を用いた 100 V の交流電圧交直差の結果を図 7 に示す。図 7 に見られるように、100 V と 200 V の電圧依存は無視できるほど小さく、周波数特性も小さい。薄膜型レンジ抵抗器の開発により、100 V の不確かさは約 20%改善した。

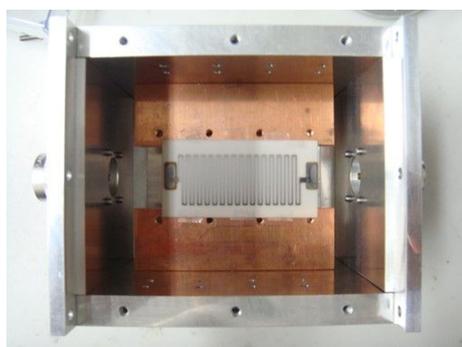


図 6 薄膜型レンジ抵抗器

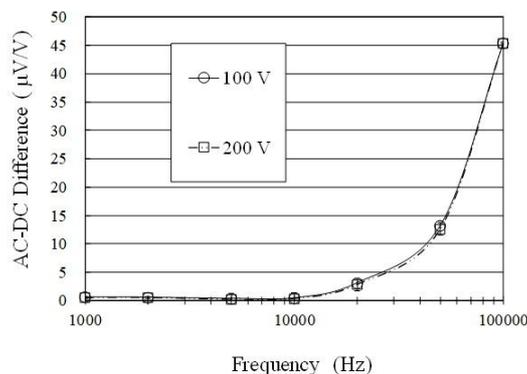


図 7 100 V 用の交流電圧交直差の結果

電力の国家標準の交流電流は、サーマルコンバータでなく、交流シャント抵抗と交流電圧を基準として求めているため、シャント抵抗の電圧の計測で必要となる 100 mV 以下の低電圧交流電圧標準の高精度化を行った。100 mV 以下の交直変換標準では、サーマルコンバータのヒータの発熱が小さいので、抵抗分圧器(RVD)とアンプ付きサーマルコンバータの組み合わせにより、交流電圧標準を求めた。図 8 は開発した RVD であり、円盤抵抗と抵抗器で構成される。円盤抵抗を用いることにより、高い周波数まで RVD に接続するサーマルコンバータの入力交流電圧特性が維持される。RVD の電圧依存は小さく、RVD の交直差を求めることで、アンプ付きサーマルコンバータの交直差を見積もることができる。図 9 は 100 mV の交流電圧交直差の結果であり、開発した RVD はマイクロポテンシオメータを用いた方法と良い一致を示している。結果として、低電圧範囲の不確かさを約 20%改善し、高精度の交流電流評価が可能となった。

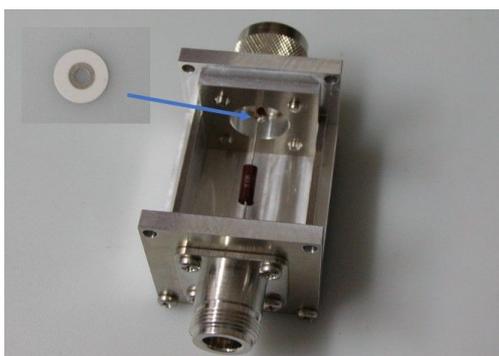


図 8 抵抗分圧器 (拡大写真は円盤抵抗)

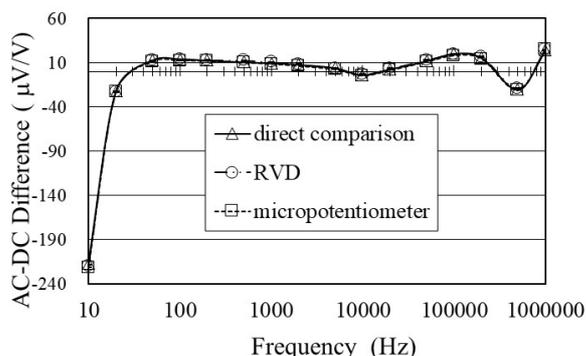


図 9 100 mV の交流電圧交直差の周波数特性

サーマルコンバータを用いた電力測定システムを開発した(図 2)。電圧及び電流発生器は電圧用サーマルコンバータと電流用サーマルコンバータを参照して校正された値を出力する。また、電圧と電流は多相発信器の信号を参照としてそれらの位相を任意に調整することが可能である。このシステムにおいて、被校正器の電力計に入力される点を被校正器の定義点として、校正を行った。今回は、10 V、0.1 A、及び 100 V、5 A、周波数は 60 Hz の力率 1 の電力校正システムを構築した。これらの電圧、電流、周波数について、値の確認のため、従来の組み立て式による測定も行った。表 1 は、市販のデジタル電力計を被校正器として校正した結果である。表 1 に見られるように、新しく開発した電力測定システムと JEMIC の校正結果は良い一致が得られた。

今回は妥当性確認のため、市販のデジタル電力計を用いており、不確かさの大きさは国家標準とくらべて若干大きい。実際の特定二次標準器を被校正器として用いることで、高精度化にも取り組んでいきたい。また、前述しているように、電圧、電流の拡張は、サーマルコンバータを参照しているため、他の電圧値、電流値にも拡張が可能である。周波数について、今回のシステムでは 10 kHz 程度まで拡張可能である。サーマルコンバータは安定しており、現在のデジタル標準器と比べて、温度などの外乱の影響や経年変化の影響が小さく、高精度化が期待される。また、校正のメンテナンスが簡易になり、検査機器の現場校正も可能になることが期待される。電圧、電流、周波数の範囲拡張も予定しており、パワーコンディショナーの普及に不可欠な高調波の評価にも応用ができる。

表 1 デジタル電力計の校正結果

力率 1、60 Hz				
	産総研		JEMIC	
表示値	校正値	拡張不確かさ	校正値	拡張不確かさ
W	W	ppm	W	ppm
1.0000	0.9999	50	0.9999	100
500.000	499.99	70	499.99	60

< 引用文献 >

[1] H. Fujiki: Development of thin-film multijunction thermal current converters with increased rated current, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 62 (6), 1853-1858 (2013).  
 [2] B. D. Inglis: A method for the determination of AC-DC transfer errors in thermoelements,

*IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 27 (4), 440-444 (1978).

[3] N. M. Oldham and R. M. Henderson, "New low-voltage standards in 358 the DC to 1-MHz frequency range," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 40, 359 no. 2, pp. 368-372, Apr. 1991, 360

[4] H. Fujiki: Improvement of the voltage dependence of high voltage AC-DC transfer differences at NMIJ, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 57 (9), 1992-1997 (2008).

[5] 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.*, vol. IM-36, pp. 320-329, 1987.

## 5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 4 件)

Hiroyuki Fujiki, Yasutaka Amagai, Kenjiro Okawa, Establishment of High-Voltage AC-DC Voltage Transfer Standards in 1-100-kHz Range at NMIJ, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 68, pp. 1921-1926, 2019. 査読あり

DOI: DOI: 10.1109/TIM.2018.2877858

Hiroyuki Fujiki, Yasutaka Amagai, Kenjiro Okawa, Development of Thin-Film Resistors Fabricated on an AlN Substrate for High-Voltage AC-DC Transfer Standards, *CPEM Dig.*, pp. 1-2, Jul. 2018, 査読あり

DOI: 10.1109/CPEM.2018.8500961

Hiroyuki Fujiki and Yasutaka Amagai, Extension of AC-DC Transfer Standards From 100 Down to 2 mV Using RVDs, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 66, pp. 1364-1371, 2017. 査読あり

DOI: 10.1109/TIM.2017.2653519

Hiroyuki Fujiki and Yasutaka Amagai, Low-voltage AC-DC transfer standards at NMIJ, *CPEM Dig.*, pp. 1-2, Jul. 2016, 査読あり

DOI: 10.1109/CPEM.2016.7540633

[学会発表](計 3 件)

Hiroyuki Fujiki, Yasutaka Amagai, Kenjiro Okawa, Development of Thin-Film Resistors Fabricated on an AlN Substrate for High-Voltage AC-DC Transfer Standards, 2018 Conference on Precision Electromagnetic Measurements, 8 - 13 July, Paris, France (2018).

藤木 弘之, 天谷 康孝, 電力標準用サーマルコンバータの開発, 電気学会, 平成 29 年電気学会全国大会, 2017 年 03 月 15 日, 富山大学 (2017)

Hiroyuki Fujiki, Yasutaka Amagai, Low-voltage AC-DC transfer standards at NMIJ, 2016 Conference on Precision Electromagnetic Measurements, 10-15 July, Ottawa, Canada (2016).

## 6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：藤木 弘之

ローマ字氏名：Fujiki Hiroyuki

所属研究機関名：国立研究開発法人産業技術総合研究所

部局名：計量標準総合センター

職名：総括企画主幹

研究者番号(8桁)：00357906

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。