

## 交流電圧標準の現状

天谷康孝\*

(平成21年11月30日受理)

## A Review of AC Voltage Standard

Yasutaka AMAGAI

## Abstract

The most accurate RMS (RMS: Root Mean Square) measurements of AC voltage are made by comparing the Joule heat of an unknown AC voltage to that of known DC voltage by using a thermal converter. This article reviews the fundamental principles of AC voltage standard measurements and the developments on some basic thermal converters with design and fabrication. Several studies on high frequency character of thermal converters up to 1 MHz are explained. Recent demand to low frequency AC voltage under 10 Hz is also reported.

## 1. はじめに

直流電圧は、ジョセフソン効果と呼ばれる普遍的な物理現象に基づきその値が決められている<sup>1)</sup>。ジョセフソン効果とは、超伝導体で構成されたジョセフソン素子に、周波数 $f$ のマイクロ波を加えると、周波数と電圧の間に、次の関係を持った等間隔の定電圧 $V_s$ がステップ上に発生する現象のことを言う。 $n$ は整数、 $K_J$ はジョセフソン定数と呼ばれる物理定数である

$$V_s = \frac{nf}{K_J} \quad (1)$$

一方、交流電圧は、直流電圧値をもとに導かれる。大別して三つの方法が研究されてきた。一つ目は、矩形波を用いて、直接、正弦波を合成する方法<sup>2)</sup>である。各ステップの直流電圧の値を校正することにより、計算によって正弦波の実効値を求めることが可能である。二つ目は、高分解能なデジタルマルチメータを用いる方法<sup>3)</sup>である。直流電圧モードにて正弦波形を直接計測し、得られた波形から実効値を計算する。交流電圧の周波数が低いほど、測定精度が高い。そのため、最近では、100 Hz以下の低周波数域における交流電圧を決定する有力な方法として注目を集めている<sup>4)</sup>。三つ目は、変換素子を介して、電気エネルギーから熱エネルギーに変換して、実

効値を直接比較測定する方法である<sup>5)</sup>。

これらの三つの方法の中で、最も精度がよく、広い周波数範囲に渡って対応が可能であることから、交流電圧標準には、サーマルコンバータと呼ばれる熱型の変換素子が用いられてきた。サーマルコンバータの研究は、1940年代初頭に開始され<sup>6)</sup>、各国で、高度化に関する研究が重ねられた<sup>7)-10)</sup>。現在では、各国の計量標準研究機関に一次標準器として配備されている。わが国では、1970年代に、40 Hzから100 kHzまでの範囲について10  $\mu$ V/Vの相対不確かさで交流電圧標準が整備された<sup>11)</sup>。その後、1990年代には、産業計測機器の高度化に対応することを目的として、交流電圧標準の見直しが行われ、1  $\mu$ V/V程度の相対不確かさを有する新しい標準器群の開発が行われた<sup>12)</sup>。現在は、これらの標準器を使用し、2001年度に策定された計量標準整備計画に基づき、10 Hzから1 MHzを周波数の基本範囲として、10 mVから1000 Vの範囲まで拡張が進んでいる<sup>13)</sup>。

近年、通商、公正な取引、技術革新、さらに持続可能な社会を実現するための基盤技術として、計測標準の重要性は広く認識されている。しかしながら、現在の基本供給範囲が多様な分野に広がりつつある社会的ニーズの一部しか対応できていないのが現状である。特に、交流電圧標準において、重要性が増しているのが、10 Hz以下の交流電圧標準である。振動計測では、加振器に取り付けられた加速度センサの検出器として交流電

\* 計測標準研究部門 電磁気計測科 電気標準第1研究室

圧計を用いている。しかしながら、これまで、10 Hz以下の交流電圧標準が整備されていなかったため、10 Hz以下の振動測定で用いられる交流電圧計の校正は行われずに振動計測が行われてきた。そこで、NMIJでは、10 Hz以下の交流電圧標準の標準整備を開始することとなった。このような状況を踏まえ、交流電圧標準の現状に関する調査研究を行うこととした。

本論文構成は次のようである。まず、第2章では、サーマルコンバータを用いた交流電圧の測定原理を説明する。第3章では、これまでに開発されてきた代表的なサーマルコンバータを説明する。第4章では、代表的な計量標準研究機関における、交流電圧の標準整備状況と高周波化に関する研究の状況および近年ニーズが増えつつある、10 Hz以下の低周波交流電圧の利用背景とその技術的な課題、研究状況について述べる。最後に第5章で本論文の総括を行う。

## 2. サーマルコンバータを用いた交流電圧決定法の基礎理論

### 2.1 サーマルコンバータ

図1に、単一熱電対型のサーマルコンバータを示す。単一熱電対型のサーマルコンバータは、もっとも古くから研究対象となっているサーマルコンバータのひとつである。図に示すように、ヒータ線と、電気絶縁性セラミックを介してヒータ線の中央部に取り付けられた熱電対から構成される。ヒータ線と熱電対は、導電性のサポート線によって支持され、ガラスの中に真空封入されている。

サーマルコンバータにおいては、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ヒータの温度上昇は、熱電対によって検出される。熱電対からの出力電圧は、ヒータへの入力電圧の2乗に比例する。

交流電圧測定を行うときには、図2に示すように、サーマルコンバータをレンジ抵抗に直列に接続し、アルミニウム製の円柱状のシャーシの中に組み込む<sup>14)</sup>。抵抗器や外部コネクタとの結線には、ハンダが用いられる。シャーシには、二つの働きがあり、電氣的に、サーマルコンバータとレンジ抵抗器の基準電位を与えると共に、熱的なシールドの働きもしている。

### 2.2 サーマルコンバータの交直差

図3には、サーマルコンバータを用いた、交流電圧の電気測定回路の原理図を示した。サーマルコンバータの入力には、直流電圧源と交流電圧源を接続し、出力には、ポテンショメータで調整されたゼロ検出器を接続してい

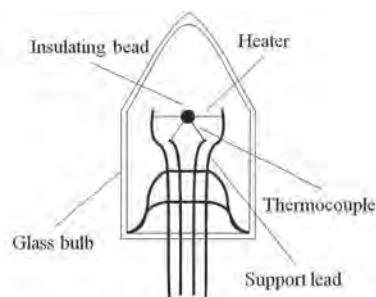


図1 単一熱電対型サーマルコンバータの構造

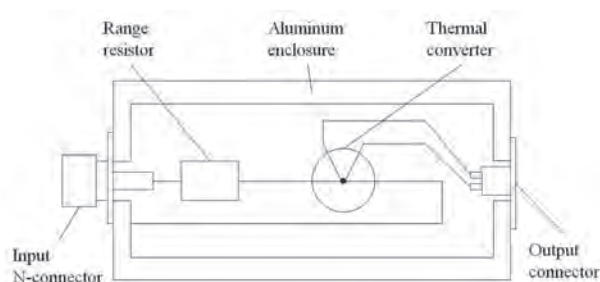


図2 交流電圧用サーマルコンバータの構造

る。

この電気回路において、サーマルコンバータへ直流電圧と交流電圧を交互に加える。直流電圧と交流電圧の切り替えを行った時、熱電対からの出力電圧が変化しなくなるまで、直流電圧を調整する。このとき、直流電圧と交流電圧で、サーマルコンバータの出力電圧は等しいから、ヒータの発熱量は等しくなるはずである。すなわち、直流電圧と交流電圧の実効値が等しい状態にある。直流電圧は、ジョセフソン効果を利用して決定することが可能であるから、サーマルコンバータによる熱を介した比較測定を行うことで、交流電圧の実効値を求めることができる。しかしながら、実際には、サーマルコンバータのヒータ部分で生じる熱電効果によるジュール熱以外の発熱や吸熱、伝熱機構や伝送線路の周波数依存性によって、熱電対からの出力電圧を同じ値に調整しても、入力電圧は等しくはならない。このサーマルコンバータの有する熱電気変換誤差に相当する量は、サーマルコンバータの交直差 $\delta_{AC-DC}$ と呼ばれ、サーマルコンバータの出力電圧が等しい場合( $E_{AC} = E_{DC}$ )の、サーマルコンバータへの入力交流電圧 $V_{AC}$ と入力直流電圧 $V_{DC}$ の値を用いて、次のように定義されている

$$\delta_{AC-DC} = \frac{V_{AC} - V_{DC}}{V_{DC}} \Bigg|_{E_{AC} = E_{DC}} \quad (2)$$

サーマルコンバータを介した熱量の測定に加え、交直

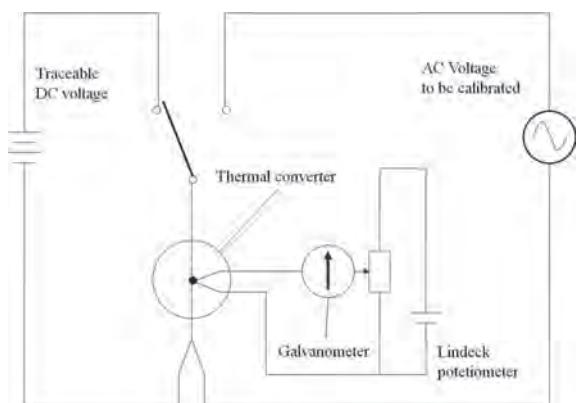


図3 交流電圧測定の原理

差 $\delta_{AC-DC}$ を決定することができれば、交流電圧 $V_{AC}$ の値を決定することができることから、サーマルコンバータの交直差を与えることと、交流電圧を与えることは、ほぼ同じ意味で用いられる。周波数が1 kHzにおけるサーマルコンバータの交直差の値は、 $10^{-6}$ 程度の相対不確かさで決定することができる。一方で、直流電圧は $10^{-9}$ の不確かさを実現している。したがって、精密な交流電圧の計測のためには、サーマルコンバータの交直差を正確に決定することが重要である。

さて、サーマルコンバータの熱電対からの出力電圧を、直流を印加した場合と交流を印加した場合とで同じ値に調整することは、困難なことが多いため、交直差を、サーマルコンバータへの入力電圧ではなく、熱電対からの出力電圧を用いて定義すると有用である。電圧を加えることによって生じる、サーマルコンバータの出力電圧の変化量 $E$ と入力電圧 $V$ は次の関係にある

$$E = kV^n \quad (3)$$

$n$ は規格化定数と呼ばれる定数である。多くのサーマルコンバータでは、2である。 $k$ は比例定数であり、サーマルコンバータの入出力特性から決まる値である。式(3)の両辺の対数を取って微分して、両辺を規格化定数 $n$ で割ると、次の関係を得る

$$\frac{1}{n} \frac{dE}{E} = \frac{dV}{V} \quad (4)$$

サーマルコンバータへの入力交流電圧を $V_{AC}$ 、入力直流電圧を $V_{DC}$ 、そのときの熱電対からの出力電圧をそれぞれ $E_{AC}$ 、 $E_{DC}$ とする。サーマルコンバータの入力直流電圧 $V_{AC}$ と入力交流電圧 $V_{DC}$ がほぼ等しい場合には、熱電対からの出力電圧は、ほぼ等しいから、式(4)の関係をj用いて次式を得る

$$\left. \frac{E_{AC} - E_{DC}}{nE_{DC}} \right|_{V_{AC}=V_{DC}} \approx \left. \frac{V_{AC} - V_{DC}}{V_{DC}} \right|_{E_{AC}=E_{DC}} \quad (5)$$

式(2)を見ると分かるように、式(5)の右辺は交直差の定義であるから、交直差 $\delta_{AC-DC}$ は、入力電圧の代わりに出力電圧を用いて、次のように書き換えることができる

$$\delta_{AC-DC} \cong \left. -\frac{E_{AC} - E_{DC}}{nE_{DC}} \right|_{V_{AC}=V_{DC}} \quad (6)$$

実験によってサーマルコンバータの交直差を決定する場合には、式(6)の関係が利用される。

### 2.3 交直差のメカニズムと評価方法

交直差のメカニズムは、図4に示すように、三つに大別される。一つ目は周波数に依存しない交直差、すなわち直流電圧を加えたときに生じる熱電効果である。主に、二次のトムソン効果が支配的である。二つ目は、100 kHz以上の高周波領域で無視できなくなる、寄生インピーダンス、誘電損失および表皮効果である。三つ目は、100 Hz以下の低周波域で顕著となる、熱リップルと呼ばれるヒータの温度振動である。直流電圧による交直差を $\delta_{TE}$ 、高周波での交直差を $\delta_H$ 、低周波での交直差を $\delta_L$ とすると、交直差 $\delta_{AC-DC}$ は、近似的に次のように表すことができる

$$\delta_{AC-DC} \cong \delta_{TE} + \delta_L + \delta_H \quad (7)$$

以下、三つの交直差のメカニズムと評価手法について説明を行う。

#### 2.3.1 直流電圧で生じる交直差

直流での交直差の主な原因は、熱電効果の一種である、二次のトムソン効果である。トムソン効果とは、一様な導体に温度勾配を与えて電流を流すとき、ジュール熱以外に熱が発生あるいは吸収される現象を言う。ここ

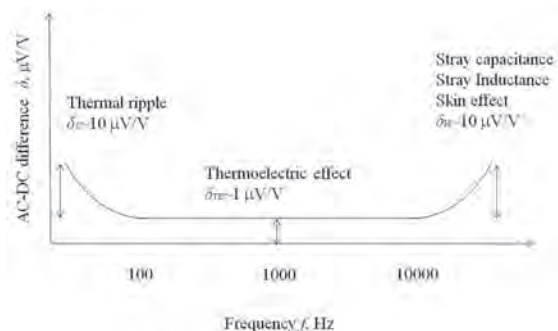


図4 交直差の周波数依存性

で述べる、トムソン効果は、ジュール効果とトムソン効果によって生じた温度勾配によって引き起こされるため、通常のトムソン効果と区別して、二次のトムソン効果と呼んでいる。

図5には、サーマルコンバータへ、直流電圧を加えた場合の、ジュール効果、トムソン効果、二次のトムソン効果によるヒータ線の温度分布を示した。通常のトムソン効果による温度変化は、図5に示すように、左右非対称の温度変化である。そのため、出力電圧の極性の原因とはなるものの<sup>15)</sup>、電流の向きを入れ替え、算術平均を計算することで、トムソン効果による温度分布の変化を打ち消すことが可能である。しかしながら、二次のトムソン効果は、通常のトムソン効果と異なり、電流の向きによらず、常に吸熱または発熱が生じる。したがって、一般のトムソン効果と異なり、二次のトムソン効果は、出力電圧の平均操作を行っても打ち消すことができない。よって、直流電圧印加時に生じる、二次のトムソン効果は、交直差の原因となる。

Hermachは、単一熱電対型サーマルコンバータの交直差に関する理論的検討を行った。その解析結果によると、二次のトムソン効果による交直差は、次の式で与えられる<sup>16)</sup>

$$\delta_{TE} = -\frac{1}{12} \frac{\sigma^2 \theta_0}{\rho \kappa} \quad (8)$$

$\theta_0$ ,  $\sigma$ ,  $\rho$ ,  $\kappa$  は、ヒータ中央部分の温度上昇、トムソン係数、電気伝導率、熱伝導率を表す。固体物理学によれば、一般の金属では、温度が一定であれば、電気伝導率と熱伝導率の比は一定<sup>17)</sup>であるから、式(8)の分母は定数とみなしてよい。よって、二次のトムソン効果による交直差は、温度変化に比例し、トムソン係数の2乗に

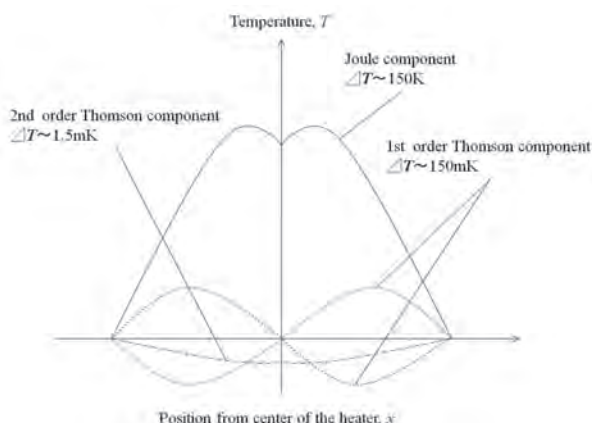


図5 ジュール効果と熱電効果により生じたヒータの温度分布

比例して増加する。式(9)を用いて、エバノーム材の代表的な物性値を入力し計算を行うと、交直差の理論値として約  $2.6 \mu\text{V/V}$  を得ることができる。

交直差の原因は、ここまで説明を行ってきた固体物性にに基づくものに限らない。トムソン効果やペルチェ効果に限らず、ヒータ線の温度勾配を左右非対称にするような原因系は、交直差の原因となることが Inglis<sup>18)</sup> によって指摘されている。Inglisは、単一熱電対型サーマルコンバータや、多熱電対型サーマルコンバータの交直差を詳細に調べ上げ、熱電現象だけでは説明することができない交直差があることを指摘している。彼は、その原因として、ヒータ線の均質性の問題や、ヒータとサポート線の界面の応力など、製造条件に起因するマクロな要因を列挙し、群管理の重要性を指摘している。

従来、実験的に決定することが難しく、その推定には、理論解析に頼ることが多かった熱電効果に起因する交直差であるが、現在では、FR-DC (Fast Reversed-DC) 法と呼ばれる測定手法によって、周波数依存性の交直差とは独立に、直接見積もることができるようになった<sup>19)</sup>。FR-DC法とは、半導体回路により合成された疑似交流波形および疑似直流波形を用いて、サーマルコンバータの熱電効果による交直差を決定する測定方法である。NMIJでは、Sasakiらによって開発された、改良型FR-DC法<sup>20)</sup>を用いて、熱電効果による交直差を周波数による交直差とは別に見積もっている。

近年では、ジョセフソン電圧標準の研究の進展により、発生電圧を高速に切り替えることが可能なプログラマブル素子の開発が行われ<sup>21)</sup>、ジョセフソン効果により発生した定電圧ステップを利用することで、半導体回路を凌駕するFR-DC波形の発生が可能になった。Sasakiらは、この方法によって発生した波形を利用し、より高い精度の測定を実現した<sup>22)</sup>。

### 2.3.2 高周波域での交直差

サーマルコンバータは、通常、同心円状のアルミニウムのシャーシに囲まれ、外部コネクタに接続されている。100 kHz以上の周波数域においては、(a)出力端子間の浮遊容量、(b)導線の残留インダクタンス、(c)導線の残留抵抗、(d)導線とシャーシの間のキャパシタンスが無視出来なくなり、交直差の原因となる。また、高周波においては、一般に、表皮効果、誘電損失、などの現象により、素子の損失が大きくなる。表皮効果とは、高周波の電流や電磁場が導体の表面近くだけに極在し内部に侵入しない現象である。電流の流れる有効断面積が導体の断面積よりも小さくなるので、周波数が高いほど導体の電気抵



抗が大きくなる。誘電損失とは、誘電体に交流電場を加えるとき、電気エネルギーの一部が熱となって失われる現象である。これは、誘電体を形成するイオンの偏移の電場に対する位相の遅れに起因するもので、誘電正接、またはタンデルタと呼ばれる量によって評価される。サーマルコンバータの高周波損失では、ヒータ線における、表皮効果の影響が顕著で、100 kHz以上では、周波数の2乗に比例して、交直差が増加する傾向が見られる。

高周波域の交直差の決定方法としては、パワーメータとの比較<sup>23)</sup>、もしくは、計算可能な幾何学構造の伝送回路を設計し、計算により交直差を求める方法<sup>24),25)</sup>がある。NMIJでは高周波用参照標準器の交直差を決定するために、伝送特性が計算可能な高周波用参照標準器を用いている<sup>14)</sup>。

### 2.3.3 低周波の交直差

100 Hz以下の周波数域においては、ヒータ線の温度が、加えた交流電圧周波数の2倍の周波数で変動する。この温度変動をサーマルコンバータの熱リップルと呼んでいる。低周波数では、熱リップルの交直差への影響が無視できなくなる。熱電対への熱の流入を無視した低周波モデルを用いたHermachの解析によると、低周波での交直差は次のように表すことができる<sup>6)</sup>

$$\delta = -\frac{25\left(\rho - \kappa - \frac{2d\varepsilon\sigma}{a\kappa_0}T_0^2l^2 + \frac{B}{2A}\right)\theta_0\alpha^2}{(2\pi f)^2l^4}. \quad (9)$$

ここで、 $\rho$ および $\kappa$ は、ヒータ材料の電気抵抗率と熱伝導率の温度係数、 $\varepsilon$ は輻射率、 $\sigma$ はステファン-ボルツマン定数、 $d$ はヒータ径、 $a$ はヒータ断面積、 $\kappa_0$ は熱伝導率、 $\alpha$ は熱拡散率、 $T_0$ は雰囲気温度、 $l$ はヒータの半分の長さ、 $f$ は交流電圧周波数、 $A$ および $B$ は熱電対の係数、 $\theta_0$ はヒータ中央部分の温度変化である。式(9)から、低周波域では、ヒータ線の温度変化が小さい程、交直差が小さくなる。また、交直差は、ヒータ長が長い程小さくなる。そこで、低周波では、特殊な素子設計を行ったサーマルコンバータを基準とした比較測定を行うことによって交直差を決定する。加えて、印加電圧を、公称電圧の半分以下の電圧として、温度上昇を抑える工夫を行う。過小な不確かさ評価の可能性を皆無にするために、公称電圧値で測定した場合の交直差を、測定モデルにおける仮定の不完全性に伴う不確かさとして考慮している。

## 2.4 交直差の比較校正原理

サーマルコンバータの交直差の比較校正を行う場合、

交直差 $\delta_S$ が既知のサーマルコンバータと、校正対象物の比較測定が行われる<sup>26)</sup>。2つの交直変換器を並列に接続し、互いの交直差の差 $\delta_C$ を測定する。このとき、校正器の交直差 $\delta_X$ は次のようになる

$$\delta_X = \delta_C + \delta_S. \quad (10)$$

$\delta_S$ は一次標準器の有する交直差である。 $\delta_S$ の値はすでに分かっているから、比較測定を行い、 $\delta_C$ を求めることで、校正が可能である。ここでは、比較測定法の代表的な方法である、2DVM法と、Differential法の説明を行う。これらの方法は、サーマルコンバータを用いた交流電圧計の校正にも用いられている重要な測定方法である<sup>27)</sup>。

### 2.4.1 2DVM法

2DVM法の電気回路の模式図を図6に示す。標準器がTVCS(S)で、校正器物がTVCS(X)である。二つの交直変換器は並列に接続され、直流電圧源および交流電圧源から電圧が供給される。交直変換器の出力電圧は、2台のナノボルトメーターによって測定される。そのため、入出力特性の異なる二つのサーマルコンバータを比較測定するときには有用な方法である。

二つの交直変換器の入出力特性を図7に示す。出力電圧 $X_{DC}$ および $S_{DC}$ は、 $V_{DC}$ を入力したときに、校正器、標準器の出力電圧を表す。同じように、 $X_{AC}$ 、 $S_{AC}$ は、 $V_{AC}$ を入力したときの校正器、標準器の出力電圧を表す。 $V_X$ および $V_S$ は出力電圧が、 $X_{DC}$ および $S_{DC}$ である入力交流電圧である。SとXの交直差の差 $\delta_{X-S}$ は定義から、次の式で表すことができる

$$\delta_{X-S} = \frac{V_X - V_S}{V_{DC}} \Bigg|_{\substack{S_{AC}=S_{DC} \\ X_{AC}=X_{DC}}}. \quad (11)$$

ここで、直流入力電圧 $V_{DC}$ の出力電圧と値が近くなるように調整した交流入力電圧 $V_{AC}$ を入力する。このとき、入出力特性が線形であると近似できるから、 $V_X$ および $V_S$ を次のように表現することができる

$$\begin{aligned} V_X &= V_{AC} + \frac{X_{DC} - X_{AC}}{k_x}, \\ V_S &= V_{AC} + \frac{S_{DC} - S_{AC}}{k_s}, \\ k_x &= \frac{\Delta X}{\Delta V}, \\ k_s &= \frac{\Delta S}{\Delta V}. \end{aligned} \quad (12)$$

ここで、 $\Delta X$ および $\Delta S$ は、入力電圧と出力電圧の比であ

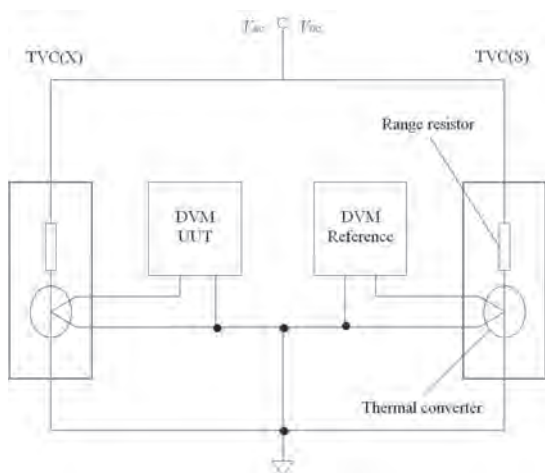


図6 比較測定法2DVM法の電気回路

り、入出力曲線の傾きに相当する。以上より、交直差の差 $\delta_{X-S}$ は次のようになる

$$\delta_{X-S} \cong \frac{S_{AC} - S_{DC}}{n_S S_{DC}} - \frac{X_{AC} - X_{DC}}{n_X X_{DC}},$$

$$n_X = \frac{(\Delta X / X_{DC})}{(\Delta V / V_{DC})},$$

$$n_S = \frac{(\Delta S / S_{DC})}{(\Delta V / V_{DC})}. \quad (13)$$

$n_X$  と  $n_S$  は規格化指数である。入出力電圧が2乗特性であるようなサーマルコンバータでは約2である。フルーク792Aに代表される、熱型の実効値検出用ICセンサの入出力特性は線形であり、規格化指数は約1となる。NMIJをはじめ、各国の計量標準研究機関での比較校正試験では、この2DVM法が用いられている。

### 2.4.2 Differential法

Differential法の電気回路の模式図を図8に示す。Differential法は、デジタルマルチメータDVM(D)によって、TVC(X)とTVC(S)の出力電圧差を測定することによって、比較測定を行う方法である。2DVM法は、出力電圧の平均値を2台のデジタルマルチメータで測定するのに対し、出力電圧の差を測定するために、DVM(D)の分解能は最も高いレンジに設定しなければならない。Differential法では、交直差の差は、次のように表すことができる

$$\delta_{X-S} \cong \frac{D_{AC} - D_{DC}}{n_S S_{DC}} - \frac{S_{AC} - S_{DC}}{n_X X_{DC}} \left( 1 - \frac{\Delta X}{\Delta S} \right). \quad (14)$$

ここで、 $D_{AC}$ 、 $D_{DC}$ は、TVC(X)とTVC(S)の交流出力電圧

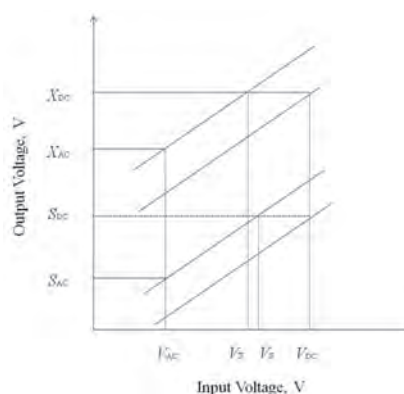


図7 サーマルコンバータの入出力特性

および交流出力電圧の差である。

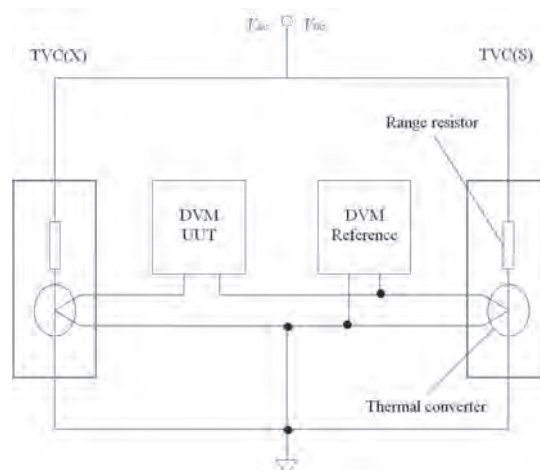


図8 比較測定法Differential法の電気回路

## 2.5 電圧範囲拡張の原理

### 2.5.1 高電圧への拡張原理

サーマルコンバータの定格電圧を超える電圧範囲においては、分圧用のレンジ抵抗をサーマルコンバータに直列に接続し、定格電圧を上げていく。この場合の交直差は、レンジ抵抗器込みのものである。交直差の評価は、すでに校正が行われているサーマルコンバータを用いて、比較校正法を行って、順次電圧範囲を拡大する<sup>6)</sup>。この方法は、ステップアップ法と呼ばれる。

ステップアップ法で交流電圧範囲の拡大を行う場合、レンジ抵抗器とサーマルコンバータの電圧依存性がないことが必要条件である。しかしながら、1000 Vの高電圧領域では、レンジ抵抗器からの発熱が無視できなくなり、非線形性が生じる。その結果、出力電圧に対し、入力電圧依存性が生じる。Kinard<sup>28)</sup> や Fujiki<sup>29)</sup> は、独自のレンジ

抵抗を開発し、高電圧領域での交直差の電圧依存性を改善した。また、電圧依存性の少ない薄膜型のサーマルコンバータの開発研究の報告も行われている<sup>30)</sup>。この研究では、ヒータ材料と抵抗温度係数と熱電対材料の熱起電力の温度係数を適当に組み合わせることによって、出力電圧の入力電圧依存性を改善している。このサーマルコンバータを用いて、10 Hzから30 Hzの低周波域における、1000 Vまでの不確かさの再評価が行われている。

### 2.5.2 低電圧への拡張原理

低電圧領域では、サーマルコンバータの入力インピーダンスが数10 Ωであることから、電子機器の内部抵抗を考慮する必要がある<sup>31)</sup>。また、入力電圧が小さいため、サーマルコンバータの出力電圧が低く、測定ばらつきが大きくなる問題があるため、マイクロポテンショメータ<sup>32),33)</sup>、抵抗分圧器<sup>34)</sup>、アンプ、デジタルマルチメータ<sup>35)</sup>を用いた方法が考えられている。NMIJでは、通常比較校正が可能な抵抗分圧器を用いた方法で、電圧の拡張が行われる。N型コネクタに直接接続が可能な円盤型のディスク抵抗が用いられている<sup>36)</sup>。

## 3. 主要なサーマルコンバータ

1940年代に単一熱電対型のサーマルコンバータの研究が始まってから、現在まで、様々なサーマルコンバータが開発されてきた。代表的なサーマルコンバータを表1に示した。ここでは、それぞれのサーマルコンバータの特徴を説明する。

### 3.1 単一熱電対型サーマルコンバータ

1940年代にHermach<sup>6)</sup>らが、単一熱電対型のサーマ

ルコンバータを用いて初めて交直差の測定を行った。Hermachらは、交直差の原因は、二次のトムソン効果であることを指摘している。その後も、Widdis<sup>15)</sup>らによっても熱電現象の交直差への影響の研究が進み、1 kHz近傍での交直差の原因が熱電現象であるとの認識が固まった。

これらの解析結果をもとに、ヒータ線の材料探索研究が始まり<sup>41)</sup>、ヒータ線のトムソン効果の抑制、ヒータ線およびヒータサポート線のペルチェ効果の抑制に成功した。数100 μV/Vであった交直差は、数μV/Vにまで低減された。

1970年代には、Inglis<sup>42)</sup>によって、二次のトムソン効果を精密に測定する研究が行われた。この精密測定から、熱電現象だけでは、1 kHz近傍の交直差を説明することはできず、製造条件に起因するヒータ線の不均一性が交直差に寄与しているとの指摘がなされた。これらの結果をもとに、作製したサーマルコンバータは1 μV/V以下の交直差を持つと推定され、多熱電対サーマルコンバータの比較測定やFR-DC法を用いた熱的交直差の実験的評価によってその妥当性が実証された<sup>43)</sup>。

### 3.2 多熱電対型サーマルコンバータ

二次のトムソン効果は、ジュール発熱により生じたヒータの温度分布があるために生じる現象である。したがって、温度分布を小さくすれば、二次のトムソン効果を抑制することが可能であると考えられる。そこで、Wilkins<sup>37)</sup>やKlonz<sup>38)</sup>らは、熱電対をヒータ線のまわりに多数配置して、単一熱電対型のサーマルコンバータでは放物線状であった温度分布を平坦化した多熱電対型サーマルコンバータを開発した。図9にはPTBのKlonzが開発した多熱電対型のサーマルコンバータを示

表1 主要なサーマルコンバータ

Year	Thermal converter	Author	Reference
1952	Single Junction Thermal Converter	F. L. Hermach (NBS)	6)
1966	Multijunction Thermal Converter	F. L. Hermach M. Klonz (PTB)	37),38)
1986	Solid State IC Sensor	L. L. Szepesi (Fluke. co. Ltd.)	39)
1989	Thin Film Multijunction Thermal Converter	M. Klonz (PTB)	40)

す。副次的な効果として、出力起電力が増加している点もこのタイプの特徴である。測定感度が向上する点で出力電圧が向上することは好ましい。Wilkinsらは $1\mu\text{V/V}$ 以下の交直差を実現した。Klonzらは、最適な熱電対の配置、ヒータや熱電対材料の探索研究を行い、多熱電対型サーマルコンバータの最適化を行い、 $1\text{kHz}$ 付近で、 $1\mu\text{V/V}$ 以下の交直差が実現されたとの報告が行われた。一方で、構造上の複雑さから、静電気で壊れやすいことや高周波特性が悪化する問題が指摘された。

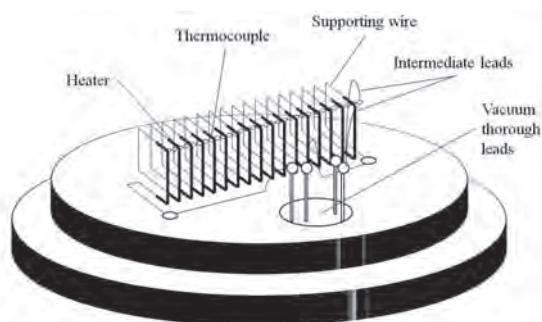


図9 多熱電対型サーマルコンバータの構造

### 3.3 熱型実効値検出用ICセンサ

1980年代の初頭に、バイポーラトランジスタのベース、エミッタ間の接合電圧を熱電対の代わりに温度検出素子として用いた熱型の実効値検出用IC<sup>39)</sup>が開発され、市販の交直比較器や、交流電圧メータに組み込まれている。

ベース-エミッタ間の電圧と温度の関係は次のように表すことができる

$$V_{be} = \frac{kT_{be}}{e} \ln(I_c) \quad (15)$$

$V_{be}$ はベース-エミッタ間電圧、 $k$ はボルツマン定数、 $T_{be}$ はベース-エミッタ接合部分の温度、 $e$ は素電荷、 $I_c$ はコレクタ電流である。すなわち、ベース-エミッタ間の電圧が接合部分の温度に比例する。

熱型の実効値検出用ICセンサの回路図を図10に示す。薄膜抵抗と、トランジスタおよび差動アンプより構成される。薄膜抵抗とトランジスタは、それぞれ、シリコンチップの上に形成される。周囲との熱絶縁性を配慮して、温度センサ部分と電極の接合には、ワイヤーボンディングが用いられている。このタイプのサーマルコンバータの特徴は、熱電対型のサーマルコンバータに比べ、出力電圧が高いこと、温度応答が優れていること、熱的安定性に優れていることが挙げられている。測定精度も、国家標準として用いられているサーマルコンバータに近

づきつつあり、市販の二次標準器として活躍している。

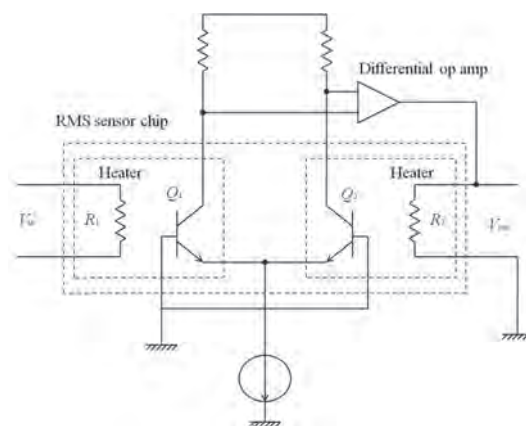


図10 熱型実効値検出用ICセンサの電気回路図

### 3.4 薄膜型サーマルコンバータ

多熱電対型サーマルコンバータを標準器として用いるには、静電気によって、熱電対部が壊れやすいことや、複雑な構造から高周波特性が悪化する問題が残っていた。そこでKlonzら<sup>40)</sup>は、フォトリソグラフィ、エッチングなど半導体の微細加工技術を利用して、シリコン基板上に多熱電対型のサーマルコンバータを開発した。代表的な構造の薄膜型サーマルコンバータを図11に示した。シリカ基板に、ヒータと多数の熱電対をスパッタや真空蒸着法によって形成する。熱電対の高温部は、ヒータ側に、低温部分は、シリコン基板上に左右対称に形成されている。ヒータ部分は薄く、熱電対の低温部側は選択的に厚くしており、熱浴の働きをもたせている。立体型の多熱電対サーマルコンバータに比べて素子のサイズが小型化したことにより、高周波特性が改善され、高機能、高信頼性の素子が実現された。

また、基板の厚みは、エッチング工法によって、設計が可能である。この部分の厚みや構造を最適化することで、熱的な時定数の制御が可能であることもKlonzら<sup>44)</sup>によって示され、低周波側の交直差を低減させる上で有効な手法と考えられている。さらに、薄膜技術は、材料の選択の幅も広げている。熱電対の材料は、低熱伝導率、高いゼーベック係数、高い電気伝導率の特徴を有することが望ましい。そこで、これまでゼーベック係数が大きなBi-Sb系の合金や、熱電材料 $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ の検討も行われている<sup>45)</sup>。

薄膜型のサーマルコンバータの研究では、これまで多くの蓄積がある半導体の微細加工技術を応用しているため、例えば、膜厚の制御や、微細なパターン設計が可能である。また、手作業で作成されていた従来のサーマ



ルコンバータに比べて製造が容易である。サーマルコンバータの研究の主流は、薄膜型多熱電対型サーマルコンバータに移っている<sup>46)</sup>。

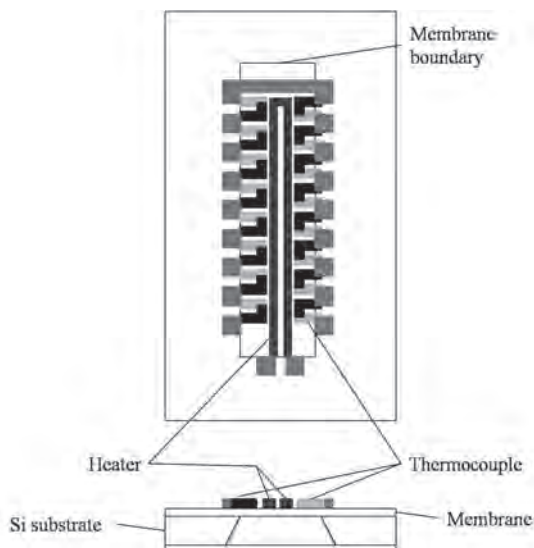


図11 薄膜型サーマルコンバータの構造

### 3.5 その他のサーマルコンバータ

サーマルコンバータの出力応答の改善を目的として、サーミスタ<sup>47)</sup>、抵抗温度計<sup>48), 49)</sup>、超伝導転移エッジセンサ<sup>50)</sup>を、熱電対の代わりに温度検出器として利用したサーマルコンバータが開発されている。また、非接触式の温度計である、赤外線センサを用いた薄膜型のサーマルコンバータも開発されている<sup>51)</sup>。このサーマルコンバータは、熱電対、サーミスタ、抵抗温度計などの接触式の温度計と比べて、熱の流出が少なく、応答がよい。また、構造上、ヒータと温度センサ間の浮遊容量などが無視できるから、高周波域において有利な構造であると考えられている。同じように、熱の散逸を防ぐことを目的に、ヒータ抵抗を電氣的に二つ並列に並べたサーマルコンバータが開発されている<sup>52)</sup>。ヒータの一方は、温度測定対象、もう一方のヒータは帰還回路を構成し、温度平衡を保つことが可能である。非接触式のセンサと同じように、平衡に達するまでの時間が短い特徴を持つ。最近では、モノポーラ型デバイス的一种である、電界効果トランジスタを利用したサーマルコンバータの報告がある<sup>53)</sup>。

## 4. 交流電圧標準の研究状況

### 4.1 各国計量標準研究機関の標準供給範囲

NMIJ (National Metrology Institute of Japan), PTB

(Physikalisch-Technische Bundesanstalt), NIST (National Institute of Standards and Technology), NMIA (National Metrology Institute of Australia) の交流電圧標準の供給範囲とその校正能力の概要を図12に示した。電圧の供給範囲は異なるが、周波数は、どの機関も10 Hzから1 MHzまでの範囲で交流電圧の供給が行われている。これらの計量標準研究機関も含め、各国のより詳細な校正能力は、BIPMのAppendixCに登録されている<sup>54)</sup>。

### 4.2 高周波化の研究状況

交流電圧標準の基本標準範囲の整備のため、高周波交流電圧標準の研究が各国の計量標準研究機関で行われている。1 MHz近傍での不確かさの低減を目指した研究に加え、近年では、1 MHz以上の拡張を目指した研究も行われ始めている。パワーメータによる校正可能な周波数範囲は10 MHz以上であることから、1 MHzから10 MHzの領域は世界的に見ても交流電圧標準が確立されていない。産業界から1 MHz以上の交流電圧の校正を求める声も出ている。ここでは、NMIJ, PTB, NIST, NMIAの高周波化に対する、最近の取り組みについてここで述べることにする。

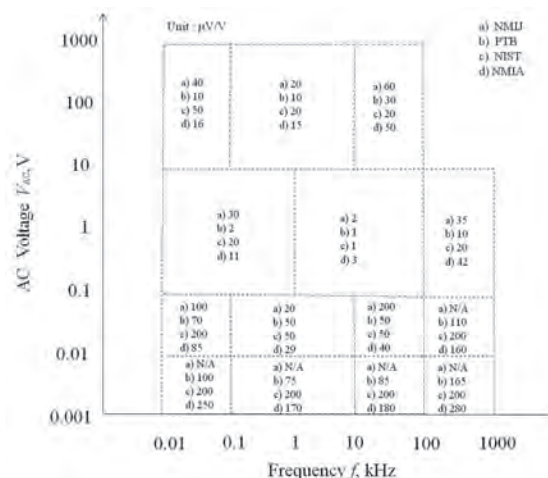


図12 代表的な標準研究機関の交流電圧の供給範囲と測定能力

#### 4.2.1 NMIJの高周波化の研究状況

現在、NMIJでの高周波特性の交直差の測定は、単一熱電対型サーマルコンバータを用いて作製された高周波用標準器をもとに行われている<sup>14)</sup>。NMIJでは、幾何学的構造から電気特性が推定可能な電気回路を作製し、計算によって、交直差を推定する。図13には、高周波用標準器の構造、図14には、その分布定数回路を示した。レンジ抵抗には、Pt-Ir系の精密合金の細線が用いられ、U字型に配置されている。形状が既知であるから、回路

のインピーダンスを計算から求めることができる。計算によれば、浮遊インピーダンスが原因の1 MHzでの交直差は4.9  $\mu\text{V}/\text{V}$ と見積もられている。この交直差は、周波数の2乗に比例し、1 MHz以上で交直差として顕著になる。一方、サーマルコンバータの高周波損失では、表皮効果が無視できない。解析によると、サーマルコンバータのPt-Irヒータ線での表皮効果による交直差は、計算により、2.8  $\mu\text{V}/\text{V}$ と見積もられている。浮遊容量や残留インダクタンスから見積もられる交直差とほぼ同じ値である。高周波用参照標準器の1 MHzの交直差の理論値は、ここまで述べた、浮遊インピーダンスと高周波損失の和として、10  $\mu\text{V}/\text{V}$ 以下と見積もられている。

最近、Fujikiらによって、高周波用の薄膜型サーマルコンバータの開発が行われた<sup>55)</sup>。薄膜型サーマルコンバータでは、入出力間の電磁氣的干渉が大きいことが指摘されていたため<sup>56)</sup>、Fujikiらはヒータと熱電対を分離し、電磁氣的干渉を改善可能な構造を提案した。図15には、サーマルコンバータの構造を示す。ヒータと熱電対を分離した構造では、ヒータと熱電対間の熱拡散長の設計が重要である。これは、熱伝導性がよく電気絶縁性の高い窒化アルミセラミックスの上にヒータを形成することで解決された。現在では、歩留まり向上のために、製造プロセスの改善が進められ、国産の一次標準器として期待が高まっている。今後、NMIJでは、50 MHzへの周波数

域の拡張<sup>57)</sup>が展開される予定である。

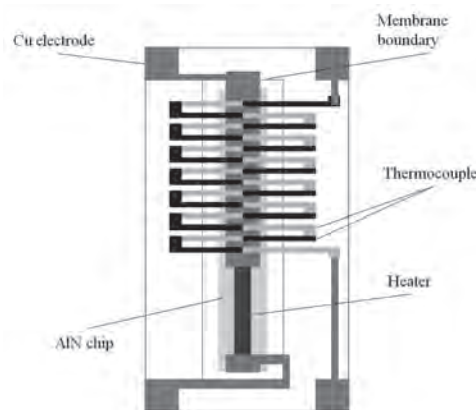


図15 熱電対とヒータ分離した高周波用新型サーマルコンバータの構造

#### 4.2.2 PTBの高周波化の研究状況

PTBでは現在1 mVから1000 V、周波数で10 Hzから1 MHzの範囲で交流電圧標準が確立されている。標準には、薄膜型多熱電対型サーマルコンバータが用いられている。PTBでは、立体型多熱電対型サーマルコンバータの開発<sup>38)</sup>、薄膜型多熱電対型サーマルコンバータの開発<sup>40)</sup>、FR-DC法による熱電効果による交直差の絶対測定方法の開発<sup>49)</sup>に代表される、交流電圧標準の基礎となる重要な研究を行っている。国際比較でも、先導的な役割を果たしている。

近年では、薄膜型サーマルコンバータによる、1 MHz以上の高周波領域への拡張を目指し、水晶ウェハを薄膜型サーマルコンバータの基板に用いた研究が行われている<sup>58)</sup>。薄膜型サーマルコンバータでは、(1)ヒータと熱電対との間で生じる浮遊容量、(2)シリコンチップの残留抵抗、(3)表皮効果、(4)誘電損失が交直差の主な原因である。そこで、誘電損失の小さな水晶ウェハを基板に用いることで、(4)の誘電損失による交直差が低減できることが期待される。シリコンやシリカに比べて、誘電損失は約一桁小さい。1 MHzの交直差の測定を行い、交直差は10  $\mu\text{V}/\text{V}$ と推定されている。この値は、伝送回路モデルの計算値とよく一致している。この交直差の値は、従来開発された薄膜型サーマルコンバータに対し、約1桁小さな値である。また、世界で初めて、薄膜型サーマルコンバータの100 MHzまでの交直差の評価を行った<sup>59)</sup>。高周波化の先駆的な研究事例の報告である。

#### 4.2.3 NISTの高周波化の研究状況

NISTでは高周波用薄膜型サーマルコンバータの研究、

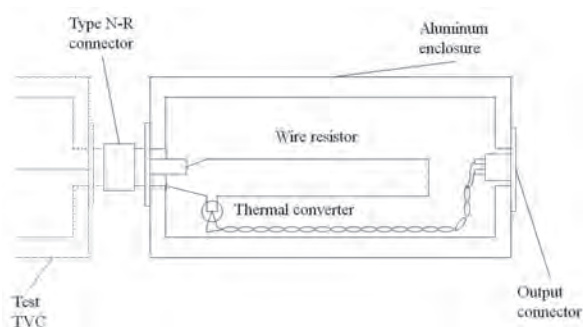


図13 高周波用サーマルコンバータの構造

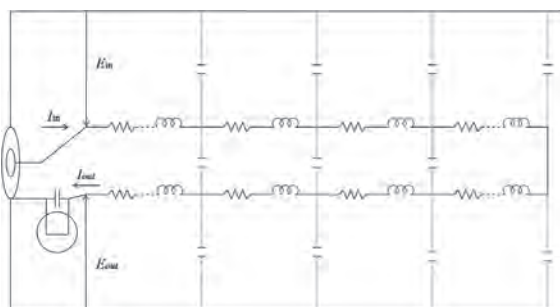


図14 高周波用サーマルコンバータの分布定数回路

BIVD (Binary Inductive Voltage Divider) による高電圧域への拡張の研究, 超伝導転移エッジセンサを用いたCTTS (Cryogenic Thermal Transfer Standard) の研究が行われている<sup>60)</sup>. 薄膜型のサーマルコンバータで問題となっていた, 機械的な強度を高めるために, SiO<sub>2</sub>とSi<sub>3</sub>N<sub>4</sub>が交互に積層された基板 (SiO<sub>2</sub>-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-SiO<sub>2</sub>) を用いて薄膜型サーマルコンバータを作成した<sup>61), 62)</sup>. この構造では, SiO<sub>2</sub>層には圧縮の応力が加わっているが, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>層には, 引っ張り応力が加わっているため, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>層は, 応力緩和層の役目を果たす. その結果, 素子の機械強度が向上する. 薄膜サーマルコンバータの製造プロセスの研究も行われ, エッチング工法や, パッケージング方法の検討も報告されている<sup>63)</sup>.

近年, NISTでは, PTBで開発された水晶ウェハを用いた薄膜サーマルコンバータの高周波特性を改善するために, 基板のエッチングプロセスの研究を行っている<sup>64)</sup>. 薄膜基板としては, 誘電損失係数が小さく, 膜厚が薄いことが好ましい. 従来, 水晶ウェハのエッチングにはウェットエッチングのみが用いられ, 基板の厚みは20 μmと報告されていた. この研究では, ウェットエッチングにより, 20 μmまで薄くした基板を, さらにCHF<sub>3</sub>とO<sub>2</sub>ガスを用いて20 nm/minのエッチングレートで, ドライエッチングを行っている. ドライエッチングは, ウェットエッチングに比べて, 異方性が強いエッチング方法であり, 薄膜型サーマルコンバータの熱浴の加工に対しては好ましいプロセスと言える. 100 MHzまでの高周波特性を評価し, ウェットエッチングのみの時に比べ, 高周波での交直差が低減していることを報告している. 更に, エッチングを行うことで生じた, 基板のハンドリングの問題と歩留まり低下の問題を, 熔融石英を基板に用いることで解決している. 熔融石英を基板材料に用いることで, 高周波における周波数特性を損なうことなく, 素子の機械的強度の向上が可能である<sup>65)</sup>.

#### 4.2.4 NMIAの高周波化の研究状況

高周波特性は, 主に, 寄生インダクタンス, 寄生キャパシタンス, 表皮効果, ヒータでの誘電損失によって決定される. NMIAでは, これらの寄生成分に起因する交直差を推定可能なサーマルコンバータを作製し, 計算によって高周波特性を決定している<sup>66)</sup>. この方法では, キャパシタンス等の寄生成分をLCRメータにて直接測定しているため, 不確かさの大部分が, 寄生成分の測定の不確かさによって決まってしまう. そこで, 各成分の決定手法をさらに発展させた研究報告も行われている. この方法によれば, 電圧実効値が1 Vから4 V, 周波数

1 MHzで5 μV/V以下の不確かさの実現が可能であるという<sup>67)</sup>.

#### 4.3 低周波化の研究状況

近年, 1 Hzから10 Hzの低周波数域の交流電圧計の校正要求が出ている. 校正が必要とされている交流電圧計は, 振動計の校正試験の際に, 10 Hz以下の低周波振動信号の検出器の用途に用いられている. 現在, NMIJで対応可能な周波数範囲は10 Hz以上であるから, このようなニーズに対応できずにいる. 振動試験のJIS規格を見ても, 試験規格範囲に10 Hz以下の記述がすでに見られる<sup>68)</sup>. 調査によれば, 世界的に見ても, 10 Hz以下の交流電圧標準は確立されていないのが現状である.

図16には, 現在の交流電圧計の校正が対応可能な範囲と, 校正要求がある産業分野を示した. 気象庁の地震観測や予兆観測に用いられる地震計の校正で用いられる交流電圧計は, 1 Hzから160 Hzの範囲で校正が必要である. また, 原子力発電所の振動モニタリングに用いられているサーボ加速度計では, 4 Hzから200 Hzの範囲で交流電圧計の校正が必要になっている. 原子力発電所では, 振動管理が法律で義務付けられており, 安全性の観点から, 測定に利用される機器は, トレーサビリティの確保が厳しく問われている. さらに, 工場や風力発電所からの公害振動測定のために用いられている騒音計では, 1 Hzから80 Hzの範囲で校正が必要とされている. また, 地震防災システムが開発され, 今後, 地震計が, 各工場にも配置されていく可能性が高い. このシステムでは, 気象庁からの地震警報では, 手遅れとなる直下型地震にも対応可能で, 地震の被害から工場を守ることができるという. このように, 私たちの安全で健康な生活に欠かすことができない産業分野において, 交流電圧標準の整備が必要になっている.

サーマルコンバータの特徴のひとつは, 波形依存性が

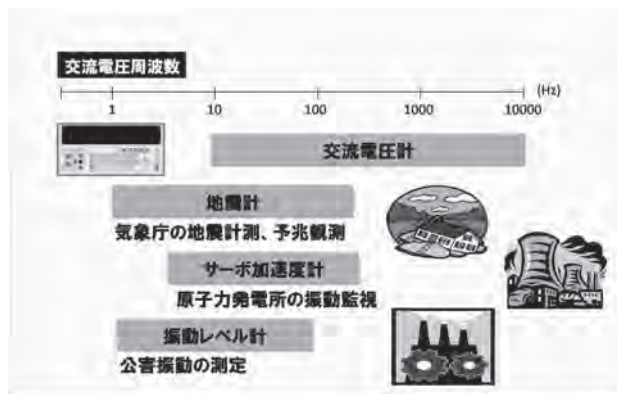


図16 交流電圧の校正範囲と低周波交流電圧標準のニーズの比較



ないことである。すなわち、サーマルコンバータに入力された交流電圧は、熱に変換された後、時間的に平均化されるため、熱電対からの出力は直流的であった。しかしながら、低周波域では、平均化が行われず、熱電対の出力は交流的である。サーマルコンバータに、角周波数 $\omega$ の正弦波を電気抵抗が $R$ の電気抵抗に入力したとき、ヒータで消費される電力は次の式であらわされる。電力は、直流電圧のジュール熱の項に、印加電圧の2倍の周波数で振動するジュール熱の項が重畳された関数で表わされる。電圧の振動周期に、熱が追従できるような低周波数域では、2項目の交流成分が熱電対の出力電圧に明瞭に観測されるようになる

$$\begin{aligned} P &= \frac{E_m^2 \sin^2(\omega t)}{R} \\ &= \frac{E_m^2}{R} \left( \frac{1 - \cos(2\omega t)}{2} \right) \\ &= \frac{E_m^2}{2R} - \frac{E_m^2 \cos(2\omega t)}{2R} \end{aligned} \quad (16)$$

すでに述べたように、低周波では、熱リップルが、交直差の不確かさの主要因である。そのため、低周波域においては、熱リップルそのものを抑制し周波数特性の優れたサーマルコンバータを開発することや、熱リップルの交直差への影響を精密に解析することが重要である。これまでの調査によれば、サーマルコンバータの低周波域の研究は次の3つのカテゴリに大別される。すなわち、熱リップルの改善に関する研究、熱的位相法の研究、熱現象の解析的研究である。

#### 4.3.1 熱リップルの改善に関する研究

サーマルコンバータの熱的時定数は、ヒータの熱容量 $C_H$ と熱コンダクタンス $G_H$ の比として次のように定義される

$$\tau = \frac{C_H}{G_H} \quad (17)$$

熱容量 $C_H$ の次元は[J/K]であり、熱コンダクタンス $G_H$ の次元は、[W/K]であるから、次元解析を行うと、時定数 $\tau$ は、時間[s]の次元となる。式(17)によれば、ヒータの熱容量が大きく、素子の熱コンダクタンスが小さいほど、熱的時定数が大きい。熱的時定数が大きいことは、熱平衡状態に達するまでの時間が長いことを意味する。そのため、熱的時定数を大きくすることで、熱リップルを低減させることが可能である。薄膜型サーマルコンバータで、熱的時定数を制御する方法として、ヒータの下

部にシリコンチップの熱浴を作製する方法が提案された。これは、シリコンのエッチングの異方性<sup>69)</sup>を有効に利用した方法である。この方法により、熱リップルの観測される周波数が、低周波側にシフトしたことが報告された<sup>44)</sup>。

ジュール熱の収支計算によれば<sup>70)</sup>、サーマルコンバータのヒータで発生した熱は、熱電対への熱伝導、熱放射および対流で放散していく。そのため、式(17)に現れた熱コンダクタンス $G_H$ は、次のように近似的に表わすことができる

$$G_H \cong G_c + G_a + G_r \quad (18)$$

$G_c$ は熱伝導、 $G_a$ は対流伝達、 $G_r$ は熱輻射による熱コンダクタンスである。薄膜型サーマルコンバータでは、対流による熱の放散が全体の約8割を占める。したがって、一般に空气中で測定されることが多い薄膜型のサーマルコンバータも、真空中で測定を行うことによって熱的時定数を長くすることが可能である<sup>71)</sup>。

#### 4.3.2 熱的位相法に関する研究

サーマルコンバータに独立に、正弦波と余弦波を入力すれば、ヒータで発生する熱は入力した周波数によらずに一定になる。すなわち、次の関係が成り立つ

$$p = p_0(\sin^2(\omega t) + \cos^2(\omega t)) \quad (19)$$

Chao<sup>72)</sup>らによって考案されたこの手法は、Ilya<sup>73)</sup>によって詳細な検討が行われた。彼は、二つのヒータが近接した多熱電対型サーマルコンバータを作製し、これに正弦波と余弦波を加え、0.01 Hzから100 Hzまでの周波数特性を評価した。交直差は、0.2 Hz程度で飽和する傾向を示し、0.01 Hzでの交直差は、約13  $\mu\text{V/V}$ と見積もられている。低周波で有効な測定方法と考えられているデジタルマルチメータを用いる方法およびステップ近似した正弦波を基準電圧として用いる方法との比較検討が行われ、よく一致することが報告されている。近年では、Sasakiらによって、高安定なプログラマブルジョセフソン電圧発生装置を交流電圧発生源として、より精密な評価が行われた<sup>74),75)</sup>。この報告によれば、低周波用に開発された薄膜型サーマルコンバータは、1 Hzから10 Hzの周波数範囲で交直差が1  $\mu\text{V/V}$ 以下であるという。

#### 4.3.3 熱現象の解析的研究

低周波域で交直差は、サーマルコンバータのヒータにおける伝熱機構の違いにより生じる。したがって、解析では、もっぱらジュール効果による内部発熱を考慮した



熱伝導方程式が扱われてきた。

はじめ、単一熱電対型サーマルコンバータを対象とした解析が Hermach<sup>6)</sup> によって行われ、式(9)に示す解析解が与えられた。Takeishi<sup>76)</sup> は、0.01 Hz から 10 Hz までの単一熱電対型サーマルコンバータの過渡現象の周波数依存性を解析するために、一次元熱伝導方程式を、摂動法により解き、実験結果との比較を行っている。この解析では、従来ほとんど議論が行われてこなかった、熱リップルを観測しうる上限周波数を解析的に与えている。オシロスコープで、0.1 Hz から 10 Hz までの過渡現象を観測し、解析結果と一致することが確かめられている。Oldham ら<sup>77)</sup> は、低周波域の交直差を見積もるために、サーマルコンバータの入出力曲線から得られる実験多項式を用いた、半経験的な手法を提案した。つまり、入出力曲線を理論解析によらず、実験値で代用し、サーマルコンバータを電気回路のブラックボックスのように扱っている。この方法により、単一熱電対型サーマルコンバータおよび薄膜型サーマルコンバータ<sup>78)</sup> の 10 Hz 以下の低周波の交直差を見積もり、実験結果との比較を行い、よく一致することが報告されている。

最近になって、Bubanja ら<sup>79),80)</sup> は、単一熱電対型サーマルコンバータの低周波特性のさらに詳しい理論解析を行った。彼は、これまで考慮されなかった熱電対への熱伝導を加味したモデルを提案し、10 Hz 以下の低周波特性の解析を行った。このモデルは、従来のモデルに比べ、実験結果を良く説明することができるが、100 Hz 以下の周波数では、実験値と比較し、100  $\mu\text{V}/\text{V}$  以上の不一致が見られる。この問題を解決するために、解析的手法では考慮することが難しかった、熱電対やセラミックベッドの熱容量等の温度特性を加味した数値解析モデルを構築し、熱時定数や低周波特性をより詳しく解析する試みも行われている<sup>81)</sup>。

一方、Laiz ら<sup>82)</sup> は、有限要素法を用いて、より複雑な構造を有する薄膜型サーマルコンバータの低周波特性の解析を試みている。彼らの解析によれば、低周波での交直差は、素子の熱容量で決定される熱的時定数と熱輻射等に起因する温度依存性によってほぼ決定されると結論している。計算によると、薄膜型サーマルコンバータでは、ヒータ下部に形成された熱浴が最も温度が高く、輻射源となっている。そこで、輻射率の低いアルミニウムや銀を熱浴の表面に蒸着する方法を提案している。また、温度依存性の解析から、適当な温度依存性を持つ熱電対とヒータ抵抗薄膜を組み合わせる手法を提案している。この計算結果に基づく提案は、その後、彼らによって、実証実験が行われ<sup>71)</sup>、前者の熱輻射を抑制する方法

および後者の、ヒータの電気抵抗率と熱電対のゼーベック係数の温度係数を利用して、交直差を補償する方法の有効性が示されている。この周波数特性が改善されたサーマルコンバータを用いて、10 Hz での交直差の見直しが行われた。

## 5. 総括

本稿では、サーマルコンバータを用いた交流電圧標準の導出、交直差のメカニズム、交直差の測定方法など基本的な内容を説明した後、標準整備計画の基本範囲である、100 mV から 1000 V、10 Hz から 10 MHz の交流電圧標準の整備状況を述べた。次に、各国の計量標準研究機関で行われている交流電圧標準の高周波化に関する研究事例を紹介した。さらに、最近、振動計測の低周波化に伴い、10 Hz 以下の交流電圧計の校正にニーズがあることを述べ、技術的な課題と最近の研究事例を紹介した。10 Hz 以下の低周波域の交流電圧標準は、ニーズがありながらも、世界的に標準が確立されていないのが現状である。決定的な測定手法は開発されておらず、低周波交流電圧標準の確立に向けたさらなる研究が必要である。また、交流電圧標準の低周波化の研究は、次世代量子交流電圧標準<sup>83)</sup> との整合性を確認する観点からも重要な研究課題であると考えられる。

## 謝辞

低周波交流電圧標準のニーズや研究状況を調査するにあたり、振動計測に関する貴重な資料を提供して頂いた、産業技術総合研究所 計測標準研究部門 音響振動科 強度振動標準研究室 大田明博室長、石神民雄主任研究員に感謝致します。また、貴重なご助言とご鞭撻を賜りました、産業技術総合研究所 計測標準研究部門 電磁気計測科 中村安宏科長、電気標準第1研究室 藤木弘之主任研究員に深く感謝致します。電磁気計測科の皆様には貴重なご意見を頂きました。末筆ながら、ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 大江武彦：“量子電気標準の現状と研究開発動向”，産総研計量標準報告，Vol.6, No.2, pp.119-127,2007
- 2) N. M. Oldham：“A calculable transportable audio-frequency AC reference standard”，*IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol.36, No.1, pp.320-329,

- 1987
- 3) *Operating, Programming and Configuration Manual*: Hewlett-Packard, 1994
  - 4) W. G. Kurten Ihlenfeld and E. Mohns: "AC-DC transfer measurements of highest accuracy with synchronous analogue-to-digital conversion", *Metrologia*, Vol.41, pp.111-115, 2004
  - 5) 電気学会編: 電気計測器, 社団法人電気学会, 1966
  - 6) F. L. Hermach: "Thermal converters as AC-DC transfer standards for current and voltage measurements at audio frequencies", *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, Vol.48, No.2, pp.121-138, 1952
  - 7) F. L. Hermach: "AC-DC comparators for audio-frequency current and voltage measurements of high accuracy", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol.25, No.4, pp.489-494, 1976
  - 8) B. D. Inglis: "AC-DC transfer standards-present status and future directions", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol.34, No.2, pp.285-290, 1985
  - 9) B. D. Inglis: "Standards for AC-DC transfer", *Metrologia*, Vol.41, pp.191-199, 1992
  - 10) M. Klonz: "Current developments in accurate AC-DC transfer measurements", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol.44, No.2, pp.363-366, 1995
  - 11) S. Iwamoto and H. Hirayama: "AC/DC thermal converters of the ETL", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol.23, No.4, pp.326-329, 1974
  - 12) H. Sasaki, K. Takahashi, M. Klonz, and T. Endo: "High-precision AC-DC transfer standards at ETL", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol.42, No.2, pp.603-607, 1993
  - 13) 藤木弘之: "交直変換標準の現状と今後の展開", NMIJ 直流・低周波電気標準クラブ第4回クラブ研究会
  - 14) 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
  - 15) B. D. Inglis: "Errors in AC-DC transfer arising from a DC reversal differences", *Metrologia*, Vol.17, pp.111-117, 1981
  - 16) F. C. Widdis: "The theory of Peltier- and Thomson-effect in thermal AC-DC transfer devices", *The Institution of Electrical Engineers Monograph*, No.497, pp.328-334, 1962
  - 17) C. Kittle: *Introduction to Solid State Physics*, 7th ed., Wiley, New York, 1996.
  - 18) B. D. Inglis and C. C. Franchimon: "Current-independent AC-DC transfer errors in single-junction thermal converters", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol.34, No.2, pp.294-301, 1985
  - 19) M. Klonz and R. Zirpel: "Improving speed and accuracy of AC-DC transfer using a Fast Reversed DC", *1990 CPEM Conference Digest*, pp.68-69, 1990
  - 20) H. Sasaki: "Development of a Fast-Reversed-DC current source", *1994 CPEM Conference Digest*, pp.386-387, 1994
  - 21) C. A. Hamilton, C. J. Burroughs, and R. L. Kauz: "Josephson D/A converter with fundamental accuracy", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol.44, No.2, pp.223-225, 1995
  - 22) H. Sasaki, H. Yamamori, H. Fujiki, K. Takahashi, and A. Shoji: "Measurement of thermoelectric effects in thermal converter using a NbN/TiN/NbN Josephson junction array", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol.52, No.2, pp.359-262, 2003
  - 23) D. L. Holloway: "The precise measurement of RF power and voltage using coaxial calorimeters and microcalorimeters", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol.33, No.2, pp.269-275, 1984
  - 24) J. R. Kinard and T. X. Cai: "Determination of AC-DC difference in the 0.1-100 MHz frequency range", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol.38, No.2, pp.360-367, 1989
  - 25) D. X. Huang, M. L. Chen, and S. Z. He: "RF-DC differences of coaxial thermal standards", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol.39, No.2, pp.313-317, 1990
  - 26) K. Takahashi: "An accurate AC-DC voltage transfer standard test system using the differential and the dual-channel method", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol.42, No.2, pp.630-634, 1993
  - 27) K. Takahashi: "An AC voltmeter calibration system by differential and a two-DVM method", *1992CPEM Conference Digest*, pp.72-73, 1992
  - 28) D. X. Huang and J. R. Kinard: "AC-DC differences of high voltage thermal converters", *Proc. Meas. Sci. Conf.*, Anaheim CA, 1992
  - 29) H. Fujiki: "Improvement of the voltage dependence of

- high-voltage AC-DC transfer differences at the NMIJ”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol.57, No.9, pp.1992-1997, 2008
- 30) H. Laiz, M. Klonz, E. Kessler, M. Kampik, R. Lapuh: “Low-frequency AC-DC voltage transfer standards with new high-sensitivity and low-power-coefficient thin-film multijunction thermal converters”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol.52, No.2, pp.350-353, 2003
- 31) P. Simonsaon and K.-E. Rydler: “Loading errors in low voltage AC measurements”, *1996CPEM Conference Digest*, pp.572-573, 1996
- 32) N. M. Oldham, S. Avramov-Zamurovic, M. E. Parker, and B. C. Waltrip: “Low-voltage standards in the 10Hz to 1MHz Range”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol.46, No.2, pp.395-398, 1997
- 33) P. S. Filipiski, R. L. Rinfret: “Calibration of a low-voltage AC-DC transfer standard”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol.47, No.5, pp.1067-1071, 1998
- 34) K.-E. Rydler and P. Simonsaon: “High accuracy low-voltage AC-DC transfer standards”, *1994CPEM Conference Digest*, pp.382-383, 1994
- 35) N. M. Oldham, R. M. Henderson: “New low-voltage standards in the DC to 1-MHz frequency range”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol.40, No.2, pp.368-372, 1991
- 36) H. Fujiki: “Extension of AC-DC transfer standards from 1 V down to 10 mV at NMIJ”, *CPEM2006 Conference Digest*, pp.206-207, 2006
- 37) F. L. Hermach, J. R. Kinard, and J. R. Hastings: “Multijunction Thermal Converters as the NBS primary AC-DC transfer standards for AC current and voltage measurements”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol.36, No.2, pp.300-306, 1987
- 38) M. Klonz: “AC-DC transfer differences of the PTB multijunction thermal converters in the frequency range from 10 Hz to 100 kHz”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol.36, No.2, pp.320-329, 1987
- 39) L. L. Szepesi: “Recent developments on solid state thermal voltage converters”, *Proc. Measurement Science Conference*, pp.9-13, 1986
- 40) M. Klonz and T. Weimann: “Accurate thin-film multijunction thermal converters in silicon chip”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol.38, No.2, pp.335-337, 1989
- 41) F. L. Hermach: “Thermal converters for audio-frequency voltage measurements of high accuracy”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol.15, No.4, pp.260-268, 1966
- 42) B. D. Inglis: “A method for the determination of AC-DC transfer errors in thermoelements”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol.27, No.4, pp.440-444, 1978
- 43) M. Klonz, T. Spiegel, H. Sasaki, K. Takahashi, and B. D. Inglis: “Fast reversed DC: Basic reference for AC-DC transfer”, *1996CPEM Conference Digest*, pp.501-502, 1996
- 44) M. Klonz and T. Weimann: “Increasing the time-constant of a thin film multijunction thermal converter for low frequency application”, *1990CPEM Conference Digest*, pp.134-135, 1990
- 45) S.-L. Jung, D.-S. Eun, D.-W. Kiim, S.-H. Kong, J.-H. Lee, J.-K. Shin, and J.-H. Lee: “Fabrication of low-frequency AC-DC thermal converter with thermal mass”, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol.44, No.7B, pp.5755-5758, 2005
- 46) R. F. Wolffenbuttel, C. J. van Mullem: “The relationship between microsystem technology and metrology”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol.50, No.6, pp.1469-1474, 2001
- 47) F. C. Widdis: “The indirectly heated thermistor as a precise AC-DC transfer device”, *Proc. IEE*, Vol.103, part B, Nov., 1956
- 48) M. Klonz and T. Weimann: “A thin-film AC-DC thermal converter with VO<sub>2</sub> resistive sensing”, *2008CPEM Conference Digest*, pp.580-581, 2008
- 49) F. L. Katzmann: “A thermoresistive AC-DC transfer element”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol.35, No.2, pp.580-584, 1986
- 50) T. E. Lipe, J. R. Kinard, and C. D. Reintsema: “Improvements in the NIST cryogenic thermal transfer standard”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol.50, No.2, pp.326-329, 2001
- 51) F. L. Katzmann and M. Klonz: “Fast thin-film isothermal AC-DC converter with radiometric sensing”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol.44, No.2, pp.391-394, 1995
- 52) F. L. Katzmann: “A new isothermal multijunction differential thermal element provides fast settling AC to DC

- converter”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol.38, No.2, pp.346–350, 1989
- 53) W. Guilherm K. Ihlenfeld: “Field-effect transistor thermal converters: a promising device for AC-DC transfer and AC power measurements at higher frequencies”, *Sensors and Actuators A*, Vol.115, pp.1–7, 2004
- 54) Bureau International des Poids et Mesures, BIPM calibration and measurement capabilities of National Metrology Institutes database, <http://kcdb.bipm.org/AppendixC/>
- 55) H. Fujiki, N. Kasai, H. Sasaki, A. Shouji, S. Nakano, N. Nishiya, and H. Hidaka: “High-performance thin-film multijunction thermal converter developed at AIST”, *2004CPEM Conference Digest*, pp.459–460, 2004
- 56) P. S. Filipiski, and M. Boecker: “Experience with high-output-resistance MJTC AC-DC transfer standards at high frequencies”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol.52, No.2, pp.1314–1319, 2003
- 57) H. Fujiki, and Y. Amagai: “Frequency characteristics of calculable thin-film multijunction thermal converters above 1 MHz”, *2010CPEM Conference Digest*, pp.62–63, 2010
- 58) L. Scarioni, M. Klonz, D. Janik, H. Laiz, and M. Kampik: “High-frequency thin-film multijunction thermal converter on a quartz crystal chip”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol.52, No.2, pp.345–349, 2003
- 59) L. Scarioni, M. Klonz, T. Funck, E. Kessler: “New generation of crystal quartz thin-film multijunction thermal converters”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol.55, No.6, pp.2281–2285, 2006
- 60) AC-DC Difference and DC Voltage Home Page at NIST, [http://www.acdc.nist.gov/acdc.nist.gov/Home\\_Page.html](http://www.acdc.nist.gov/acdc.nist.gov/Home_Page.html)
- 61) J. R. Kinard, D. X. Huang, and D. B. Novotny: “Performance of multilayer thin-film multijunction thermal converters”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol.46, No.2, pp.383–386, 1995
- 62) J. R. Kinard, D. B. Novotny, T. E. Lipe, and D. X. Huang: “Development of thin-film multijunction thermal converters at NIST”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol.46, No.2, pp.347–351, 1997
- 63) T. F. Wunsch, J. R. Kinard, R. P. Manginell, O. M. Solomon, T. E. Lipe, and K. C. Jungling: “A new fabrication process for planar thin-film multijunction thermal converters”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol.50, No.2, pp.330–332, 2001
- 64) L. Scarioni, T. E. Lipe, and J. R. Kinard: “Design and fabrication of MJTCs on quartz substrate at NIST”, *2008CPEM Conference Digest*, pp.648–649, 2008
- 65) T. E. Lipe, J. R. Kinard, and L. Scarioni: “Development of MJTCs on fused substrates at NIST”, *2010CPEM Conference Digest*, pp.95–96, 2010
- 66) I. Budovsky, and B. D. Inglis: “High-frequency AC-DC differences of NML single-junction thermal voltage converters”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol.50, No.1, pp.101–105, 2001
- 67) T. Hagen, and I. Budovsky: “Single-junction thermal voltage converters with reduced uncertainties at frequencies up to 1 MHz”, *2008CPEM Conference Digest*, pp.652–653, 2008
- 68) JIS E 4031:2008, 日本規格協会
- 69) K. E. Bean: “Anisotropic Etching in Silicon”, *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol.25, pp.1185–1193, 1978
- 70) M. Klonz, H. Laiz, and E. Kessler: “Development of thin-film multijunction thermal converters at PTB/IPHT”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol.50, No.6, pp.1490–1498, 2001
- 71) H. Laiz, and M. Klonz: “A simulation tool for the AC-DC transfer difference of thermal converters at low frequencies”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol.48, No.6, pp.1155–1160, 1999
- 72) S. Chao and Y. Zhang: “A VLF AC-DC voltage comparator from 0.01 to 20Hz”, *1992CPEM Conference Digest*, pp.64–65, 1992
- 73) I. Budovsky: “Very low frequency AC-DC transfer standard”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol.44, No.2, pp.367–369, 1995
- 74) H. Sasaki, H. Yamamori, T. Yamada, H. Fujiki, and A. Shoji: “Evaluation of low-frequency of a thermal converter using a programmable Josephson voltage standard”, *2008CPEM Conference Digest*, pp.654–655, 2008
- 75) H. Sasaki, H. Yamamori, T. Yamada, H. Fujiki, A. Shoji, I. Budovsky, and K. Shimizume: “Evaluation of low-frequency of a thermal converter using a programmable Josephson voltage standard”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol.59, No.11, pp.2930–2935, 2010
- 76) T. Takeishi: “Characteristic of vacu-thermojunctions at ultra-low frequency”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol.50, No.2, pp.330–332, 2001



- tation and Measurement*, Vol.34, No.1, pp.34-41, 1985
- 77) N. M. Oldham, and S. Avramov-Zamurovic: “Exploring the low-frequency performance of thermal converters using circuit models and a digitally synthesized source”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol.46, No.2, pp.352-355, 1997
- 78) S. Avramov-Zamurovic, and N. M. Oldham: “Low-frequency characteristics of thin-film multijunction thermal voltage converters”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol.47, No.1, pp.387-89, 1998
- 79) V. Bubanja: “The AC-DC difference of single-junction thermal converter”, *Journal of Engineering Mathematics*, Vol.38, No.4, pp.33-50, 2000
- 80) V. Bubanja, M. D. Early, and H. Sasaki : “Characteristics of single junction thermal converters”, *2000CPEM Conference Digest* , pp.228-229, 2000
- 81) Y. Amagai, and Y. Nakamura : “An analysis of low frequency properties in a thermal converter”, *2010CPEM Conference Digest* , pp.26-27, 2010
- 82) H. Laiz, and M. Klonz : “Dynamic non-linear electro-thermal simulation of a thin-film thermal converter”, *Microelectronics Journal*, Vol.30, pp.1155-1162, 1999
- 83) M. Maruyama, T. Yamada, H. Sasaki, H. Yamamori, C. Urano, and N. Kaneko : “Generation of AC waveforms using NbN-based programmable Josephson voltage standard system with a 10-K cooler”, *2010CPEM Conference Digest* , pp.8-9, 2010

