受光面積の大きいサーモパイルの交流動作特性

専門会員 中川 靖夫* 専門会員 大谷 文雄*

Characteristics of the Relatively Large Aperture Thermopile on Chopping Operation

Yasuo Nakagawa (Fellow Member) Fumio Ohotani (Fellow Member)

(Department of Electronic Engineering, Faculty of Engineering Saitama University)

ABSTRACT

Very low frequency chopping operation of thermopile, which has relatively large aperture and time constant, has been studied and compared with dc mode.

Amplification of very low frequency (0.1~0.3 Hz) is carried out with a digital lock-in system and a usual dc amplifier.

Under chopping operation, apparent sensitivity falls with frequency increasing, but noise are also reduced, so detectivity at 0.2 Hz is $10^7 \text{ W}^{-1} \text{ cm Hz}^{-1/2}$, which is 1.2 times greater than dc mode. Drift free operation is realised with dc drift component cut off. Linearity and uniformity of receiving area are similar to dc mode.

Temperature coefficient of sensitivity has been improved and obtained value is $-0.15\%/^{\circ}\text{C}$ at $19\sim 29^{\circ}\text{C}$ (about one half of that in dc mode).

1. ま え が き

感度が波長に依存しないで、放射の絶対量を測定できる検出器としては、気中形のサーモパイルが古くから用いられてきており、最近ではレーザなどの放射出力計としてもかなり普及している。サーモパイルは受光面が十分黒化してあれば分光感度を広い波長範囲で一定にできるが、感度そのものは一般にかなり低く、検出能力は Si ホトセルよりも 2~3 けた劣る。また、ある程度、受光面積の大きいものは応答速度が遅く、直流的に使用するためゼロ点移動（ドリフト）が大きい。ドリフトの原因は主として周囲の気温のゆっくりした変動や、照射によるケースの温度上昇などであり、微小放射（たとえば $10^{-5} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 以下）の測定ではそ

れが無視できない大きさとなって、ゼロ点チェックをひんばんに行う必要が生ずる。とくに、空調（冷暖房）を行なっている室内では、温度変動によるドリフトに送風の気流で生ずる部分的な気圧、温度の変化が加算されて測定の重大な障害となる¹⁾ (図 1, 図 2)。

図 2 サーモパイル DC 動作の空調使用時のドリフト ($24 \pm 1^{\circ}\text{C}$)

このような原因によるドリフト、ノイズ（ゆらぎ）を排除するには、入射を断続（チョッピング）させる交流動作が有効なことはよく知られており、サーモパイルでも薄膜の真空封じ形のような小受光面積で、応答速度の速いものは AC 動作で使用するのが普通である。このような小受光面積（たとえば $2 \times 2 \text{ mm}$ ）のサーモパイルは集光の可能な分光測定などにはよく用いられる。交流動作はドリフト・ノイズの除去にはきわめて有利ではあるが、チョッパや増幅系などの安定性や精度の点から、絶対量の測定を高精度で行なうのは困難であり、また、集光系を用いるとそれによる誤差も生じ得る。したがって、広がっている放射の場での絶対測定を行なうときや、分光測定でも受光器の分光感度の精密測定のようにある程度大きな受光面積が必要な場合には、た

図 1 サーモパイル直流通作での応答とゼロ点移動の例

* 埼玉大学工学部電子工学科

たとえば口径10mmくらいの——それゆえに応答速度の違い——ものを直流動作で使用せざるを得ず、その場合には前述したドリフト・ノイズによる測定の困難さがさげられないことになる。

筆者らはこのような問題を解決するために、従来交流動作を全く考慮していなかった Ag-Bi 16対円形口径9.5φ、時定数2sのサーモパイルについて交流動作を検討した。その結果、交流動作はチョッピング周波数を0.2Hz程度にとれば実用可能であって、検出能力は直流動作の理想的状態と同等以上で、空調その他の外的騒乱によるドリフトを事実上ゼロにできることがわかり、高精度の測定が容易に行なえるようになったので報告したい。

2. 受光面積の大きいサーモパイルの応答と雑音

2.1 応答と周波数特性

試料として用いたサーモパイルは Eppley 製円形気中形で、放射測定によく使われるものである。表1にその定格などを示す。

表1 試料サーモパイル (Eppley 気中形) 定格

形 式	Bi-Ag 16対円形石英窓付き
黒 化 材	金 黒
感 度*	0.19 μV・μW ⁻¹ ・cm ² (19°C)
受 光 面 積	9.5 φ (0.71 cm ²)
時 定 数	2 s
内 部 抵 抗	25 Ω
NEI*	1.2×10 ⁻⁷ W・cm ⁻² ・Hz ^{-1/2}
温 度 係 数*	-0.4%/°C (16~24°C)

* は実測値。

応答特性は図1(a)からわかるとおりで、99%出力に達する時間は約12秒である(公称時定数2s)。入射の断続周波数を変化させたときの応答の振幅(p-p値)は図3のとおりである。このときの入射は方形波であるが、出力は0.1Hz以上では正弦波に近くなる。これはサーモパイルが電氣的には高域シャ断フィルタとなるためである。それゆえ、実効値としての出力(基本波成分)は方形波出力のときはp-p値の $\sqrt{2}/\pi$ であるが、正弦波のときには $1/2\sqrt{2}$ となる。交流感度 S_a を(1)式のように定義すると、

図3 試料サーモパイルの周波数特性

この試料では0.25Hzで振幅が直流応答の1/2になるので、感度は直流の36%になる。

$$S_a = V_{rms}/0.5E_{p-p} \quad (V \cdot W^{-1}) \dots \dots \dots (1)$$

E_{p-p} : 入射断続パワーのp-p値(方形波)

V_{rms} : 出力p-p値× $\sqrt{2}/\pi$ (方形波), × $1/2\sqrt{2}$ (正弦波)

2.2 雑音特性

直流動作の状態、ある程度の外部騒乱の影響を含む雑音(ノイズ)を YHP 5420A デジタル・シグナル・アナライザで解析した。雑音のスペクトラムの例を図4に示す。雑音は白色成分と1/f成分の混合とみられ、1/f成分は0.2Hzくらいから目立ってくる。また、0.25Hz付近には固有ノイズ(共振)が多少ある

図4 サーモパイル雑音のスペクトラム (Δf=0.08Hz, OdB=1μW・cm⁻²)

らしいことが数回のくり返し測定から認められた。1/f成分はドリフトが主体と思われ、0.02Hz以下では相当大きくなっている。0.1Hz以上の雑音のレベルは、帯域幅を1Hzとしたとき入力換算で $10^{-7} W \cdot cm^{-2}$ 程度と考えられた。したがって1/f成分(ドリフト)が除去できて、雑音レベルがこの程度であるならば交流動作は十分に利用価値があると考えた。

2.3 交流動作の条件

以上の測定結果からみた、このサーモパイルの交流動作の条件は次のようになる。

- (1) 下限周波数は、1/f雑音の増加と実用測定時間を考慮すると0.1Hz程度。
- (2) 上限周波数は感度の周波数特性からみて0.3Hz程度。
- (3) 1/f雑音のシャ断には低域シャ断フィルタ (HPF) が必要。
- (4) 0.25Hzの固有振動に注意する。

3. 交流動作のための増幅器²⁾³⁾

3.1 増幅の方式

0.1~0.3Hzのような超低周波の信号を、アナログ的に安定に測定・表示しようとする、系の時定数がきわめて大きくなって測定が実用的でなくなるので、デジタル的な測定回路を用いることにした。図5にそのブロックダイアグラムを示す。

図5 増幅・検波システムのブロックダイアグラム

サーモパイルからの断続交流信号は、直流増幅器(これまでサーモパイルの直流増幅に使用していたもの、高域シャ断周波数約0.7Hz)を経て低域シャ断フィルタにはいり、直流分と1/f雑音をシャ断して検波(整流)される。検波器は同期検波方式で、チョッパからの参照信号で水銀リレーを駆動して、全波整流を行なう。整流出力は簡単な高域シャ断フィルタを経てデジタル積分器(VFコンバータとカウンタ)にはいる。デジタル積分器のゲートは、同期整流器と連動して信号周期 T (リセット時間 ΔT を含む)の間ONとなって、一周期の信号を積分して表示する(図6)。このような方式にすると信号は一周期ごとに計数表示さ

図 6 増幅・検波システム各部の信号波形

れ、周波数 $0.1 \sim 0.3 \text{ Hz}$ ならば $10 \sim 3.3 \text{ s}$ おきにサンプリングした結果が得られるので、応答速度はフィルタ回路だけが問題になる。

なお、この系ではチョッパを動作させない状態で直流増幅器の出力を測定して、直流動作で入射を求めておき（サーモパイルは直流動作で校正されている）、引き続きチョッパを動作させて交流出力が測定できるので、交流動作の感度を容易かつ正確に求めることができる。

3.2 フィルタの特性

$1/f$ 雑音のシャ断には、低域シャ断フィルタ（HPF）が有効であり、一方、サーモパイルと直流増幅器は高域シャ断特性を持つので、これらの組み合わせで、増幅系全体は帯域フィルタの機能を持つことになる。したがって、HPF の特性は系全体の周波数特性が、チョッピング周波数を中心とした帯域特性になるように選定する必要がある。また、シャ断特性をシャープにしすぎると時間的な応答が悪化するので、予備実験を行なって減衰特性 12 dB/OCT 程度が適当であることを見いだした。図 7 に試作し

図 7(a) 低域シャ断フィルタの特性

図 7(b) 低域シャ断フィルタ (I~III) と組み合わせたサーモパイルの周波数特性

た HPF の特性と、サーモパイル、直流増幅器を含めた系全体の周波数特性を示す。図 5 の同期整流器の後の高域シャ断フィルタ (LPF) はシャ断周波数 $0.2 \sim 0.4 \text{ Hz}$ (時定数 $1 \sim 0.5 \text{ s}$) で、整流に伴う雑音を抑制して積分の精度をよくするのに効果がある。

4. サーモパイル交流動作特性の測定

表 1 の定格のサーモパイルを直流動作、および前述した増幅系で交流動作させたときの特性を以下に示す。サーモパイルは直流動作では、周囲の騒乱（風、振動など）の影響をきわめて受けやすいので、測定はすべて無風に近い状態で、振動などの影響をさけて行なった。また、室内のわずかな気流の乱れも雑音になるので、サーモパイルは木箱に入れてしゃへいして周囲温度も極力一定に保った。しかし交流動作にすると気流と温度の影響はほとんど除去できることがわかったので、交流動作時は木箱によるしゃへいは行なわなかった。

4.1 検出能力（感度と雑音）⁴⁾⁵⁾

前述の(1)式で定義した感度、および雑音の入射パワー換算値 (NEI) を測定した。NEI は直流動作では(2)式、交流動作では(3)式によった。

$$NEI_{dc} = \frac{E_{p-p}}{V_{dc}} \cdot \frac{\Delta V_{rms}}{\sqrt{\Delta f}} \quad (\mu W \cdot cm^{-2} \cdot Hz^{-1/2}) \dots\dots(2)$$

$$NEI_{ac} = \frac{0.5 E_{p-p}}{V_{rms}} \cdot \frac{\Delta V_{rms}}{\sqrt{\Delta f}} \quad (\mu W \cdot cm^{-2} \cdot Hz^{-1/2}) \dots\dots(3)$$

ここで、 E_{p-p} は入射の放射照度の ON-OFF 幅、 ΔV_{rms} は指示のゆらぎ（指示計器：DVM）の標準偏差である。 Δf は測定系の雑音帯域幅で、直流動作では指示 DVM の積分ゲート時間（4 s）の逆数である。交流動作では交流増幅部帯域 Δf_a と直流増幅部帯域 Δf_d の合成で、通常は $\Delta f_d \gg \Delta f_a$ のため Δf_a を無視するが、この測定系では $\Delta f_a \approx 2\Delta f_d$ なので合成帯域幅 Δf は Δf_a (積分時間 T の逆数) の 0.7 倍程度となった。

感度の測定は、入射 $50 \sim 80 \mu W \cdot cm^{-2}$ のレベルで行ない（ハロゲン電球使用）、NEI は暗状態のゆらぎから求めた。NEI を求めるための ΔV_{rms} は、暗出力 5 点の読みの標準偏差を 1 組のデータとした $10 \sim 60$ 組の幾何平均である。なお増幅系自身の雑音は無視できた。

図 8 感度と雑音の入力換算値 (NEI) の周波数特性

測定結果は図 8 のとおりで、感度は周波数の上昇につれて低下するが、NEI は周波数 0.2 Hz 付近で最小で直流動作よりも良好であって、したがって S/N は 0.2 Hz 付近で最良になる。感度の低下は増幅器の利得増加で十分カバーできるので、結局、交流動作はチョッピング周波数 0.2 Hz 付近で、ドリフトのない状態での直流動作を上回る検出能力が得られることになる。

4.2 ドリフト

交流動作のドリフトはきわめて少なく、周波数 0.2 Hz のとき数十分について雑音の幅以下であって、測定室内を空調してもその影響はほとんどなく、空調の有無で NEI に有意な差を認めることはできない。

図 9 ドリフトの交流動作、直流動作比較
(a) 空調なし、やや風あり (b) 空調実施、無風

これに対して直流動作では、わずかの温度変化でも雑音振幅の $\frac{1}{10}$ 倍のドリフトが生じ、空調実施時のドリフトの幅は入力値換算で $1 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ (雑音の 100 倍) に達し、変化率は最大 $2 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{min}$ になるので測定の重大な障害となることが多い。図 9 にやや温度変化のある状態 (空調なし) と、空調を実施した状態での直流、交流両動作のドリフト (暗状態) を図 5 に示した測定系で同時測定した結果を示す。交流動作の安定性は明らかで、雑音、ドリフトを総合して交流動作が全く有利なことがわかる。

4.3 直線性

入射放射照度比 10 : 1 について、出力の直線性テストをメッシュスクリーン減光板によって、直線性既知のシリコンホトセルと比較しながら、周波数 0.1 Hz, 0.2 Hz で行なった結果を図 10 に示す。0.1 Hz, 0.2 Hz とともに 10 : 1 での直線性からのはずれは幅 1 % 以内であって、問題はないと考えられる。

図 10 サーモパイル交流動作の直線性

4.4 受光面の感度の一様性

150 W ハロゲン電球から約 100 mm はなして 1 φ のピンホール

をおき、 $f=150 \text{ mm}$ の色消しレンズでサーモパイルの受光面上に等倍のスポットを投影して、これを受光面内で垂直、水平方向にほぼ 1 mm おきに移動して感度の分布状態を測定した。なお、レンズの近傍に赤外カットフィルタをおいて、可視放射だけが入射するようにした。入射パワーは約 $25 \mu\text{W}$ である。

図 11 受光面の感度分布

測定結果を等感度図として図 11 に示す。直流、0.1 Hz, 0.2 Hz でそれぞれ最大感度位置の変動が見られるが、不均一さはいずれも 10 % 程度で、一様性としては大差ないことがわかる。なお、Stair らは交流動作時にサーモパイル受光面の感度分布が大幅に変動する例を報告している⁷⁾。この実験では周波数がきわめて低いこともあって、そのような現象は認められなかったが、周波数によって分布に多少の変化は生じており、黒化材 (金黒) の局所的な熱伝導の異なりなどが、その原因の一つであると考えられる。

4.5 温度特性

サーモパイルの感度は、一般に $-0.1 \sim -0.4 \text{ }^\circ\text{C}$ の温度係数を持つとされている⁸⁾。この実験に用いた試料、直流動作での温度係数は周囲温度 $16 \sim 24^\circ\text{C}$ で $-0.4 \text{ }^\circ\text{C}$ であった。交流動作で温度係数を測定した結果は、周波数 0.2 Hz で周囲温度 $19 \sim 29^\circ\text{C}$ のときに $-0.15 \text{ }^\circ\text{C}$ となって、直流動作より良好な結果が得られている。この理由は明らかでない。温度特性は室温全体を変化させ、温度平衡に達したことを確認して測定している。

4.6 応答の時間的特性

約 $45 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ のステップ入射を与えたときの応答特性を、直流動作と周波数 0.2 Hz, 0.1 Hz の交流動作について求めた結果を図 12 に示す。出力が定常値の 99 % に達するまでの時間は直流動作では約 12 s であるが、交流動作では周波数 0.2 Hz で 25 s, 0.1 Hz では 30 s であり直流動作の 2 ~ 2.5 倍である。この遅れの

図 12 応答特性

原因は主として低域シャ断フィルタの時定数と思われる。しかし、実際使用にあたっては交流動作はドリフトがほとんどなく、直流動作での使用のように、測定 1 回ごとに入射を ON-OFF してゼロチェックをする必要がないので、応答の遅れによって測定時間が大幅に増加することはない。

5. 実用テスト結果

チョッピング周波数 0.2 Hz で、モノクロメータからの単色光をサーモパイル（定格は表 1 参照）へ入射させて、受光器の分光感度測定を行なう状態で、空調実施状態での安定性と再現性を測定した。モノクロメータの出射単色光の波長は 390~760 nm で、受光面の放射照度は 0.5 E_{p-p} で 3~11 $\mu W \cdot cm^{-2}$ である。出射単色光の放射照度分布を均せい化するために、光ファイバ光ガイド⁸⁾（素線径 0.25 mm の束、プラスチック）をとおして受光面を照射し、均せい度を 90% 以内にしている。モノクロメータは G-250 で、単色光の半値幅は 6.7 nm 一定、光源は JC・24 V・150 W ハロゲン電球（22 V 点灯）で、 $f=38$ mm の石英単玉レンズで集光入射している。

図 13 0.2 Hz の交流動作で分光測定に用いたときの入力と S/N の例

図 13 に波長 390~760 nm の受光面入射と S/N の一例を示す。S/N は (4) 式で計算した。

$$S/N = \frac{\bar{V}_E}{\sqrt{\Delta V_D^2 - \Delta V_E^2}} = \frac{\bar{V}_E}{\Delta V_N} \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 $\bar{V}_E$ は照射時の読みの平均と暗状態の読みの平均の差、 ΔV_E と ΔV_D は、それぞれ暗状態と照射時の読みの標準偏差である*。読みの数は各々 5 回である。測定の不確かさは S/N の逆数と考えてよく、図 13 の場合では $\pm 0.33 \sim 1.1\%$ になる。 ΔV_N の雑音帯域幅 1 Hz 当たりの値 $\Delta V_N / \sqrt{\Delta f}$ は、入射に換算して $1.1 \times 10^{-7} W \cdot cm^{-2}$ で、4.1 で求めた NEI よりわずかに大きい。このような測定を 6 回行なったときのばらつきを図 14 に示す。

図 14 分光測定を 6 回行なったときの相対値の再現性

これは、各々 1 回の測定の読みの総平均値で、規格化した相対値**の間の標準偏差である。このばらつきは $\pm 1\%$ 以内にはいつている。6 回の測定は 1 回ごとにサーモパイルを取りはずして再

* 普通 S/N は $V_E / \Delta V_E$ としている。しかし最終的に用いる値は照射時と暗状態の差であるから、暗状態の雑音を加算すべきである。

** 各々の測定の波長ごとの値を $V_{\lambda 1}, V_{\lambda 2}, \dots, V_{\lambda n}$ として、それらを $\sum V_{\lambda i} / n = \bar{V}$ で規格化した値、各回ごとに $\bar{V} = 1,000$ とする。

セットしており、絶対値のばらつきは $\pm 2.5\%$ 程度であった。これは主として位置の再現の不確かさによると思われる。

この 6 回の測定は 3 日にわたって行ない、空調による温度変動は $\pm 1^\circ C$ 程度であったが、相対値の再現の幅はほぼ雑音の幅におさまっていて、直流動作時に比べて安定性、再現性は格段に良好になっていることがわかった。なお、1 回（10 波長）の測定に要する時間は約 25 分で、直流動作時の 2/3 以下に短縮することができた。

6. 結 び

従来、直流的に用いられていた受光面積の大きいサーモパイルの交流での使用を検討して、感度および雑音の周波数特性を吟味して適正なチョッピング周波数を見だし、増幅・検波にはディジタル積分形の同期検波回路を用いて、実用的で精度の高い測定を可能とした。

交流動作によってドリフトは事実上ゼロとなり、室内の気流の乱れなどによる騒乱にも安定となって、しゃへいケースなしで空調使用下でも数 $\mu W \cdot cm^{-2}$ の入射の精密測定が行なえるようになった。交流動作では見かけの感度は低下するが、チョッピング周波数の選択、増幅器の帯域幅の制御によって雑音を低減させて、直流動作での理想的な使用状態と同等以上の検出能力が得られた。直線性、受光面の感度の均一性も直流動作時との差はみられず、温度特性は直流動作時より良好であった。交流動作での応答時間は直流動作時の 2~2.5 倍遅くなる。しかし、ドリフトによるゼロ点移動がないので、入射の ON-OFF をひんばんにする必要がなく、応答の遅れは実用的にはそれほど障害にはならない。

放射の絶対感度を、交流動作の検出器に直接に目盛付けことは一般に精度上の困難があるが、本報の方法によると測定系を指示計器接続点の切り換えだけで交直両用にできるので、動作を交・直交互として、一つのサーモパイルで直流動作を standard に、交流動作を reference として、交流動作に目盛り付けができるので絶対測定を容易に行なうことができる。

以上、受光面積、時定数の大きなサーモパイルが交流的に使用することができ、それによって検出器としての諸特性をそこねることなく、直流動作時に問題となっていた取扱い上の欠点をほぼ解消できることを示した。今後さらに使用条件を検討して、検出能力、安定性の一層の向上をはかるべきであると考えている。

文 献

- (1) 伊藤和喜：電総研調査報告 No. 177 (昭48) 第 5 章
- (2) 内田, 南：分光研究 23 (昭49) 196
- (3) 横井与次郎：リニア実用回路マニュアル (昭50) ラジオ技術社 第 7 章
- (4) R. C. Jones: Proc. IRE 47 (1959) 1481, 95
- (5) C. Motchenbacher, F. Fitchen, 齊藤ほか訳：低雑音電子回路の設計 (1977) 近代科学社 第 1 章, 第 7 章
- (6) CIE Wasington (1967) E-1.2 Appendix 1, Eppley 社カタログ
- (7) R. Stair et. al.: Appl. Optics 4 (1965) 703
- (8) 中川, 大谷：昭55照明学会全国大会94 (昭55)

(受付1980年9月5日)