

Selected Article

一般論文

最速のサーモパイルを搭載した放射温度計 IT-460

中田 嘉昭, 猪原 優

物体の表面温度を非接触で測定する手法として、測定対象物の表面から放出される赤外線量を計測する放射温度計がある。HORIBAの放射温度計は各種ラインナップしてさまざまな用途に対応しているが、動体の計測用途や、急激な温度変化を観測する用途においては応答速度の高速化が望まれていた。放射温度計の応答速度は内部に搭載している赤外線センサの応答速度に依存している。我々は、赤外線センサとして主にシリコン半導体プロセス技術を使って微小構造を作るMEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術を使った、特徴的な感熱部を有するサーモパイルを構成し、更にセンサ構造・光学系・信号処理系を最適化することで、室温以下の温度を測定できる放射温度計としては最速の応答速度を実現した。

はじめに

絶対零度以上の温度を持つすべての物体からは、その温度に見合った赤外線が放出されている。この赤外線量を測定することでその物体の表面温度を知ることができ、衛生上、接触測定を嫌う食品業界や接触式温度計では測定できない機械類の稼働部などの温度測定に放射温度計が用いられている^[1]。

しかし従来の放射温度計は応答速度が数百msであり、飲料メーカーなどの高速にサンプルが移動する生産ラインに要求される数十msという応答速度には対応できないという課題があった。放射温度計の応答速度は内部に搭載されている赤外線センサであるサーモパイルの応答速度に依存している。そこで我々は赤外線センサの開発から着手し、最速の応答速度を誇るサーモパイルを開発した。本稿ではセンサ技術及び、そのセンサを搭載した高速応答放射温度計IT-460(図1)の性能・特徴について報告する。



図1 高速応答放射温度計IT-460

製品の概要

IT-460の最大の特徴はその応答速度であるが、その他にも警報出力機能や、ゲート入力によるピークホールド・ボトムホールド、移動平均機能等を備えており、広範な用途に対応できるように配慮した仕様となっている。図2にIT-460の基本構成を示す。

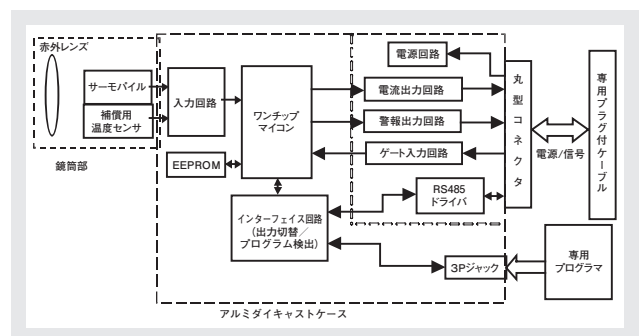


図2 IT-460の基本構成

外部とのインターフェイスとしてシリアル通信ポートを装備しており、出力スケール、移動平均時間、警報レベルの設定変更や放射率^{*1}の設定、出力の読み出し等ができる。また専用のプログラムを使用することでこれらの操作を更に簡単にすることができる。

*1: ある温度の物体表面から放射されるエネルギーと、同温度の黒体(放射されたエネルギーを100%吸収する仮想物体)から放射されるエネルギーの比率。黒体では1、完全反射体では0になる。

高速応答サーモパイル

サーモパイルの原理

放射温度計には、サーモパイルと呼ばれる熱型の赤外線センサが主に用いられている。サーモパイルは図3に示すように熱電対をその温接点を内側に向けて数個から数十個直列に繋いだ構造をしている。温接点のある薄膜部は熱容量が小さく、また冷接点のあるシリコン基板（ヒートシンク）の熱コンダクタンスは大きいので、赤外線が入射すると温接点と冷接点の間で温度差が発生する。サーモパイルは赤外線の入射による温度差を熱起電力²として捉えるセンサである。

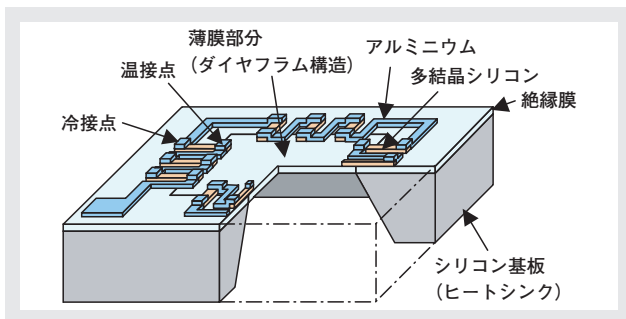


図3 サーマパイルの構造

サーモパイルの中でも図3に示すタイプのサーモパイルは、シリコン半導体プロセスにおいて配線材料として用いられるアルミニウムと多結晶シリコンとで熱電対を構成しており、量産性に優れ、高性能・多機能化しやすい等の特徴を有する。これらの特徴を活かして、我々はアドレス選択や信号処理の一部をチップ内蔵のICで行うことができる64画素サーモパイルアレイを世界で初めて実用化し、二次元放射温度計アイスクエアとして製品化を行った^[2]。

一方で従来の有機フィルムタイプの厚膜感熱部を持つサーモパイルを搭載しているスポットタイプの放射温度計は、その応答速度に課題があった。そこで我々はサーモパイル開発の次なるターゲットとして、放射温度計の応答速度の高速化を目指し、高速応答サーモパイルの開発に着手した。

*2: 異種金属の接点間の温度差によって発生する電位差。

感度と応答速度の関係

熱型の赤外線センサの感度と応答速度は、感熱部の熱

容量Cとヒートシンクである基板との熱コンダクタンスGによって決定される。熱時定数 τ は式(1)で表され、応答速度を速くしようとする、熱容量は小さく熱コンダクタンスは大きくする必要があり、一方で熱コンダクタンスを大きくすると感度が低下するというトレードオフの関係がある。

$$\tau = C/G \dots \dots \dots (1)$$

ダイヤフラム構造のサーモパイルで説明すると、感熱部である薄膜部のサイズを小さくすれば基板との熱コンダクタンスが大きくなって応答速度は速くなるが、感熱部の到達温度が低くなるために感度は小さくなってしまふ(図4)。

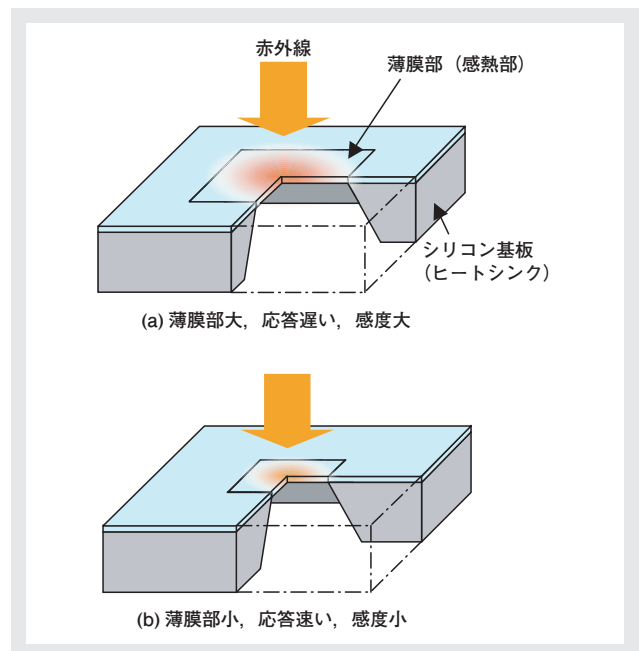


図4 サーマパイルの感度と応答速度の関係

高速応答サーモパイルの特徴

飲料メーカーなどのサンプルが高速に移動する生産ラインでは1サンプルに対する測定可能時間が30~40 msしかなく、放射温度計に対しては10 ms以下(95%応答)の応答速度が要求されていた。この目標を達成するためには、サーモパイル単体での応答速度を2 ms(63%応答)以下にする必要がある。しかし前述した通り、応答速度と感度にはトレードオフの関係があり、応答速度を2 msまで速くしようとする感度が実用レベルに達しないという問題があった。

Selected Article 一般論文 最速のサーモパイルを搭載した放射温度計 IT-460

そこで我々は感度と応答速度の性能を両立させるべく図5のような構造を考案した。この構造の特徴は、感熱部である薄膜部を短冊状に細長くすることである。薄膜部とヒートシンクであるシリコン基板との熱コンダクタンスは短辺方向のサイズによって規定されるので応答速度を速くすることができる。一方で長辺方向に熱電対の段数を増やして配置することで、感熱部の到達温度が低くなることによる感度低下を補うことができる^[3]。この薄膜部のサイズについては熱解析シミュレーションを用いて初期設計を行い、試作センサで確認して最適化を行った。更に我々が開発したセンサは、受光部の形状を汎用性の高い擬似的な円形にするために、短冊状の薄膜部を3列配置した構造とし、合計144段の熱電対を構成した。また冷接点に赤外線が入射することによる感度低下を防ぐために、感熱部以外の表面部には反射膜を形成した。これらの構造によって、応答速度2 ms(63%応答)と実用レベル感度を両立させた高速応答サーモパイルを完成させることができた。

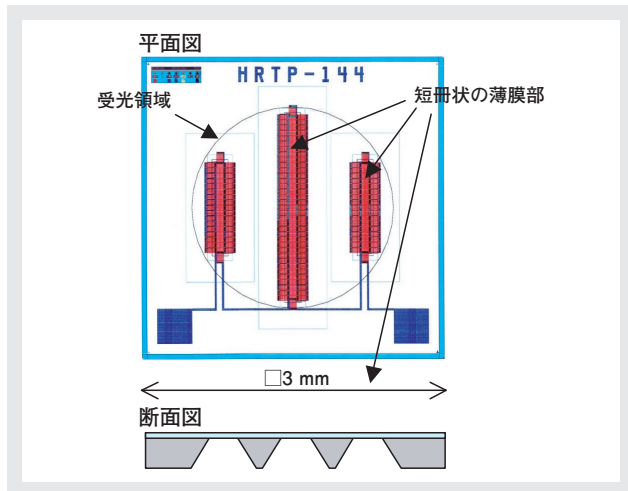


図5 高速応答サーモパイル概念図

光学系の特徴

高速応答サーモパイルは、その構造上受光領域が比較的大きくならざるを得ない。指示値のふらつきと視野特性が満足できる効率的な集光を行うため、光学シミュレーションと実験による検証を行い、図6のようなレンズとミラーを組み合わせた光学系を構築した^[4]。集光ミラー^[5]はセンサ受光面にできるだけ近づける必要があるため、センサパッケージにおいても窓とサーモパイルチップの距離が小さくなるような専用設計を行った^[6]。これら

の高速応答サーモパイルに最適化した光学系によって、測定精度 $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (0~200 $^{\circ}\text{C}$)、測定再現性1 $^{\circ}\text{C}$ 以内という高精度測定が可能となった。

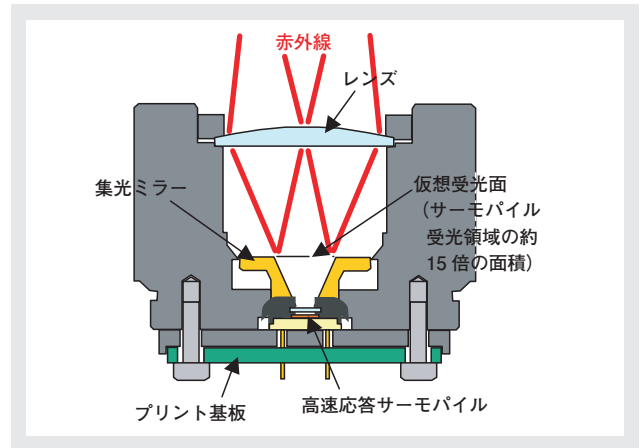


図6 IT-460の光学系

製品の仕様と性能

高速応答サーモパイルと、それに最適化した光学系・信号処理系を組合わせた、高速応答放射温度計IT-460の応答特性を図7に、その測定系を図8に示す。製品の目標仕様10 ms以下(95%応答)に対して約8 msの応答を示しており、目標を達成することができた。なお、出力信号が階段状に変化しているのは、IT-460のサンプリングレートを1 msとしているためである。

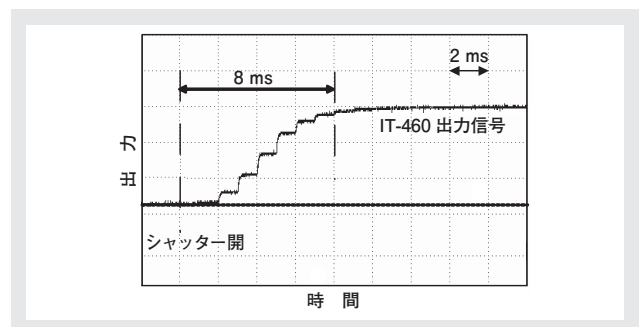


図7 IT-460の応答特性

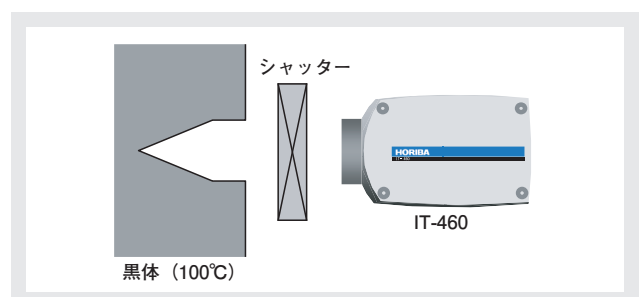


図8 応答特性の測定系

最後に、IT-460の主な仕様を表1に示す。設置型の放射温度計の今後のシリーズ展開を考慮して、アルミダイキャスト製の堅牢な構造とし、また防滴構造にすることで、極めて広範な設置環境に対応できるようにした。

表1 IT-460の主な仕様

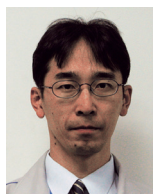
応答速度	10 ms以下(95%応答)
測定温度範囲	-30~300 °C
放射率設定	0.12~1.20
測定波長	8~16 μm
測定精度	±2 °C以内(0~200 °C)
再現性	1 °C以内
測定視野	φ15/50 mm
信号処理機能	各種ホールド、警報出力
アナログ出力	4~20 mA 電流出力(12ビット)
シリアル通信	RS485による各種設定・読出し
警報出力	オープンドレイン出力
電源	DC12~24 V
消費電流	200 mA以下
動作温湿度範囲	0~55 °C(35~85%RH)
外形寸法	135×75×54 mm
質量	約700 g

おわりに

以上、新しい概念の高速応答サーモパイルと、それを搭載した放射温度計IT-460について紹介した。IT-460はその高速応答性能を活かして、飲料メーカーの生産ラインなど、高速に移動するサンプルの温度管理を初めとし、急激な温度変化を観察する必要があるさまざまな分野での活躍が期待されている。

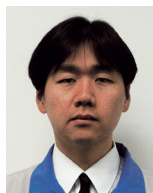
参考文献

- [1] 野村俊行ほか、ハンディ放射温度計IT-540シリーズ, Readout, **17**, 65-68 (1998).
- [2] 中田嘉昭ほか、2次元放射温度計アイスクエア(ii-1064), Readout, **25**, 39-43 (2002).
- [3] 中田嘉昭、サーモパイル型赤外線センサ, 特開2005-308551 (2004).
- [4] 大須賀直博, 特願 2007-162613.
- [5] 古川泰生, 特願 2007-162610.
- [6] 岡本一隆, サーモパイル型赤外線検出器, 特開2005-201734 (2004).



中田 嘉昭

Yoshiaki Nakata

開発センター
応用技術開発部
ジョブリーダー

猪原 優

Masaru Inohara

製品化設計部
電気設計チーム