

Readout

HORIBA Technical Reports

特集 赤外線ではかる

July 1993 ■ No.7

焦電形赤外線センサ

Pyroelectric Infrared Sensor

松本浩一・岡本一隆

Koichi MATSUMOTO, Kazutaka OKAMOTO

(Pages57-63)

株式会社 堀場製作所

焦電形赤外線センサ

Pyroelectric Infrared Sensor

松本 浩一・岡本 一隆
Koichi Matsumoto, Kazutaka Okamoto

【要旨】

快適で安全な生活空間を提供する各種センシングデバイスへの要求は、信頼性はもとより高感度、高機能、高速応答など多岐にわたっている。当社では、多年にわたり培ってきた単結晶育成、真空蒸着などの赤外線技術を駆使し、焦電効果を利用した赤外線センサを開発、人体検知用として販売するとともに、非分散形赤外線ガス分析計をはじめ各種の計測機器に搭載し、種々な分野で御使用いただいている。

本稿では、機能材料としてチタン酸ジルコン酸鉛(Lead Zirconate Titanates : PZT)系強誘電体セラミックスを使用した焦電形赤外線センサの原理や構造を述べ、当社の高感度化・高機能化への取り組みの一端を紹介する。

Abstract

Many requirements are placed on the various sensing devices used for providing comfortable and safe living spaces: reliability, high sensitivity, high functionality, and high response. HORIBA has applied extensive know-how in infrared technologies such as single-crystal growth and deposition in developing a pyroelectric infrared sensor, and is marketing this for detecting the human body. It also incorporated in various measuring devices such as non-dispersion type infrared gas analyzers, and is being used in various fields. This paper describes the principles of operation and construction of pyroelectric infrared sensors using Lead Zirconate Titanates, PZT type ferroelectric ceramics as their functional material, and introduces HORIBA's involvement in improving the grade and functions of pyroelectric infrared sensors.

1. はじめに

赤外線センサは、19世紀初頭に赤外線が発見されて以来一般には軍事用として注目されてきたが、急速なエレクトロニクスの発達により、他のセンシングデバイスと同様私達の身近なものとなりつつある。とりわけ熱型赤外線センサの出現がこれに大きく寄与している。

赤外線センサは、大きく分けて半導体材料の光電効果*1を利用した「量子型」と、素子に吸収された赤外線による熱変化を利用した「熱型」に分類される。焦電形は熱型に属し、室温で動作し、波長依存性をもたないこと、安価なことを特長とする。また熱型ではあるが高感度で、応答速度が速い点で優れている。

*1 光電効果

物質が光を吸収して自由電子を生じ、電気伝導度が変化したり起電力が現れたりする現象をいう。

赤外線センサの具体的な用途としては、赤外線センサの視野を人が横切ると人体から放射される赤外線を検知する侵入者警報器や自動ドア、自動照明スイッチなどがある。また燃焼物から発する赤外線のゆらぎを検知して炎センサともなる。さらに、ランベルト・ベールの法則を用いたガス濃度計や放射温度計など応用分野は広い。

2. 焦電形赤外線センサの動作原理

センサの心臓部である焦電素子には、強誘電体*2の特長を生かして信号を取り出す方向に自発分極*3を持つようあらかじめ分極処理を施しておく(図1)。ところで自発分極の値は素子温度の関数となっており、自発分極によって生じる素子の表面電荷は、素子温度に変化がなければ図2(A)に示すように周囲の浮遊電荷によって中和されている。この素子に入射する赤外線量が増加すると、そのエネルギーは熱に変換されて素子の温度を上昇させ、自発分極の値が変化する。その結果、素子表面には過渡的に不要な浮遊電荷が残り、図2(B)に示すように素子と並列に接続した負荷抵抗には電荷の流れが観測される。このように赤外線の変化に追従して生じる電流を焦電流、この現象を焦電効果という。

- *2 強誘電体
自発分極が、周囲の電場によってその方向を反転する事ができる結晶を示す。
- *3 自発分極
電場をかけなくても自然に電荷の分布が存在している状態をいう。

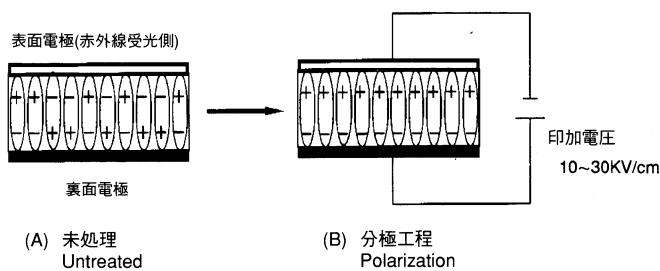


図1 分極処理
Polarization processing

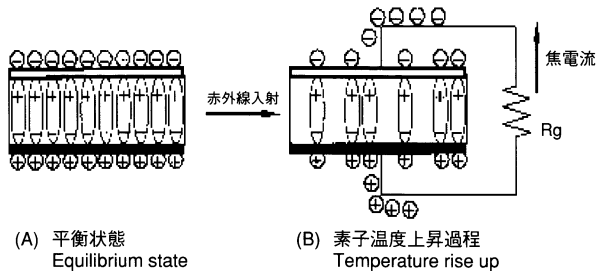


図2 動作原理
Principle of operation

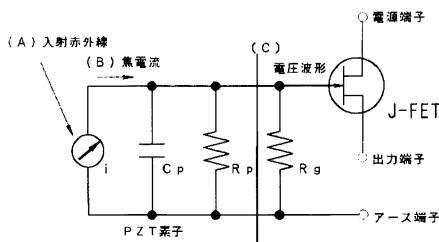
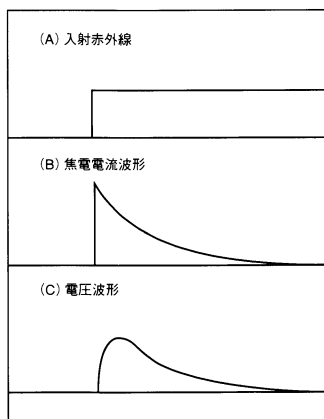


図3 センサ内部等価回路
Equivalent circuit

焦電形赤外線センサは、焦電流により負荷抵抗両端に生じた電圧で入射赤外線量を検出するのだが、焦電素子のインピーダンスが $10^{12}\Omega$ と高いため外乱影響を受け易い。そこで焦電素子を金属パッケージに封入し、同時にインピーダンス変換用のJ-FETも組込んでいる。センサ内部の等価回路を図3に示す。図中の R_p は焦電素子自身の抵抗を、 R_g は並列に接続した負荷抵抗($10^9\sim 10^{11}\Omega$)を示す。図3のように構成されたセンサに、ステップ状の赤外線が入射した場合の入射赤外線、焦電流波形、電圧波形の関係を図4に示す。この時の出力電圧のピーク値(V_p)は(1)式で、ピークに到達するまでの時間(T_p)は(2)式でそれぞれ与えられる。



$$V_p \propto K \cdot \tau_e \cdot \theta^{1/(1-\theta)} \quad \dots\dots(1)$$

$$T_p = \tau_e \cdot \ln \theta / (\theta - 1) \quad \dots\dots(2)$$

図4 等価回路点における波形
Waveform at equivalent circuit point

ここで、Kは焦電材料固有の値で性能指数と呼ばれ、焦電係数を α 、比誘電率を ϵ 、体積密度を d 、質量比熱を c とすれば(3)式で表される。

$$K = \alpha / (\epsilon \cdot d \cdot C) \quad \dots\dots(3)$$

また θ はセンサの電気時定数と熱時定数の比(τ_e/τ_t)を示す。ここで注目すべき点は出力の大小は性能指数と時定数の両パラメータに関連するものの、波形は時定数によってのみ決定されることである。また、計測を目的としたような一定の角周波数で変調した場合の電圧感度 R_v は、出力電圧 V_0 と入射赤外線エネルギー I_0 の実効値の比、(4)式で定義される。

$$\begin{aligned} R_v &= V_0 / I_0 \\ &= \eta \cdot \alpha \cdot A \cdot R \cdot \omega \cdot G^{-1} \quad \dots\dots(4) \\ &\quad \cdot (1 + \omega^2 \cdot \tau_e)^{-1/2} \cdot (1 + \omega^2 \cdot \tau_t)^{-1/2} \end{aligned}$$

なお η は素子受光面での放射率、Aは素子受光部電極面積、Rはセンサ等価回路での合成抵抗、 ω は変調角周波数、Gは熱伝導率である。

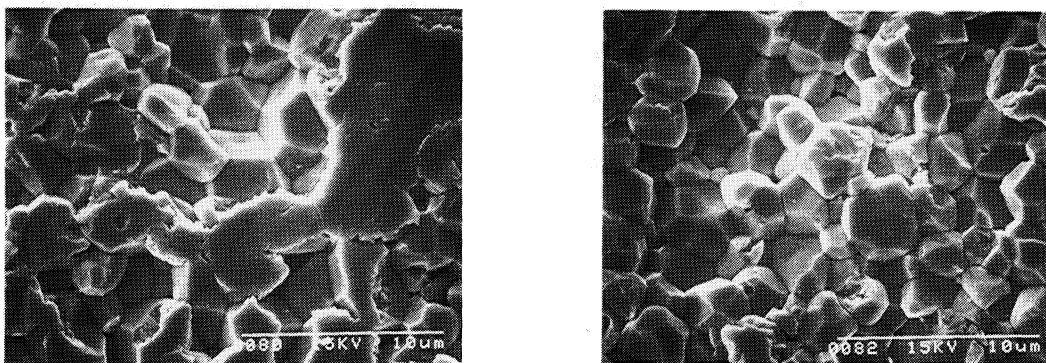
以下、センサ主要部品の特徴と高感度化の要因について紹介する。

2.1 焦電材料の選定と増感処理

焦電材料は形態から大きくセラミックス、単結晶、高分子の3つに分けられ、それぞれ代表的なものにチタン酸ジルコン酸鉛(PZT)、タンタル酸リチウム(LiTaO₃)、ポリ弗化ビニリデン(PVDF)がある。当社ではPZTを使用しているがこれは焦電係数、性能指数が高いだけでなく、とくに加工性を重視しているためである。なお、PZTとはPb(Zr_{1-x}Ti_x)O₃の頭文字を用いた総称であるが、焦電係数、静電容量、キュリー点*4等の特性を向上させるために種々の元素を固溶*5させた組成としている。

通常セラミックスの場合、ある大きさの母材から所望の素子小片に切断するのだが、図5(A)に示すように切断後の素子表面結晶粒は押しつぶされており、分極処理の効果を減少させている。この不具合な部分(以下加工変質部と呼ぶ)をしかるべき手段にて除去した後の状態を図5(B)に示す。加工変質部はなくなり、PZTセラミックス本来の結晶粒が見られるようになっている。また、この除去処理は焦電効果を効率よく活用するだけでなく、素子表面での赤外線の放射率向上にも大きな役割を果たしている。

- *4 キュリー点
強誘電体が常誘電相へ転移する温度をいう。
- *5 固溶体
複数の結晶が均一な固相を成している混合物をいう。



(A) 加工後
After slicing

(B) 加工変質部除去後
After removal of area deteriorated by slicing

図5 PZT素子表面のSEM像
SEM image of PZT device

図6にこの加工変質部除去前後の赤外線領域の透過率ならびに反射率を示す。透過率、反射率ともに低減され、素子部分における赤外線が効果的に吸収されていることがわかる。この処理によるセンサの感度増加は著しく、実表面積の増加による実効放射率の向上が主要な要因と判断している。

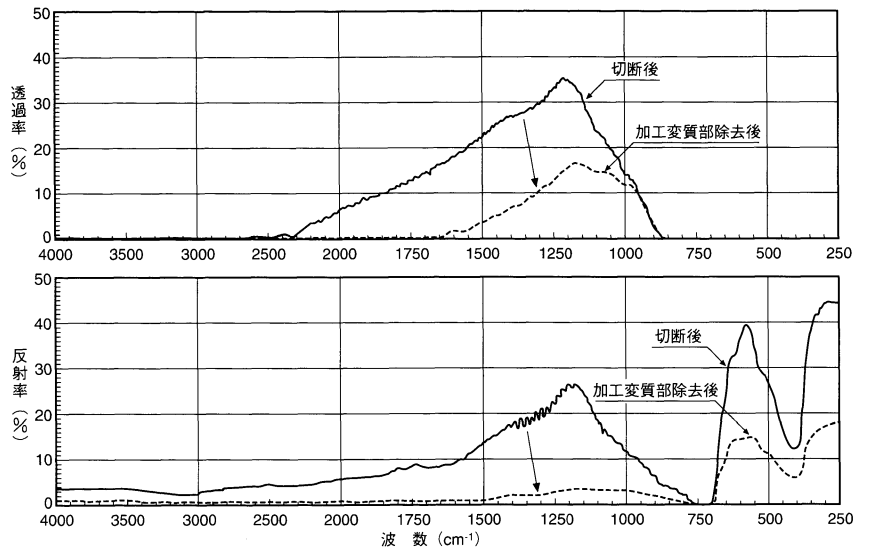


図6 PZT素子の赤外線透過率と反射率
Infrared transmittance and reflectance of PZT device

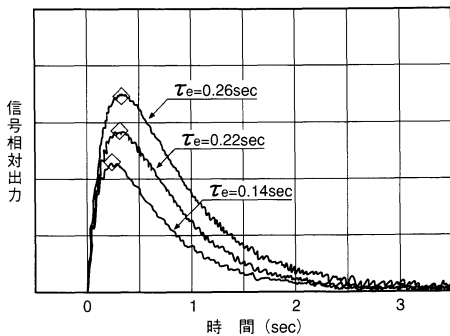


図7 電気時定数による応答波形の変化
Change in response waveform by electrical time constant

2.2 電気時定数及び熱時定数の設定

既述のとおり、信号出力の波形や周波数特性は、電気および熱の2種類の時定数によってのみ決定される。電気時定数はセンサに内蔵する負荷抵抗の値で制御している。電気時定数を変化させた場合にセンサから出力される実際の波形を図7に、式(1)、(2)を用いた計算結果との相関を図8に示す。また人体検知の場合には、検知エリアの大きさと人の移動速度(0.3~3.0m/sec)に加え、検知器設置環境の熱的揺らぎを考慮して0.1~0.2Hzに最大感度を有するよう設定している(図9)。また、熱時定数は、素子周辺への熱伝導と熱輻射を極力抑制するよう、主に素子形状とその支持方法により制御している。

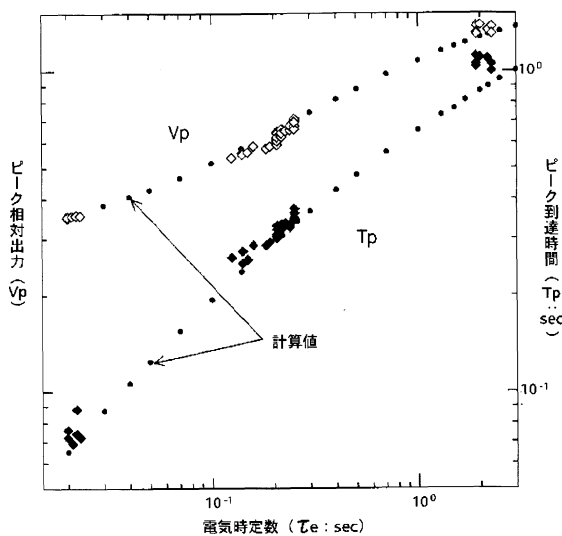


図8 τ_e と V_p , T_p との相関
Correlation between τ_e and V_p , T_p

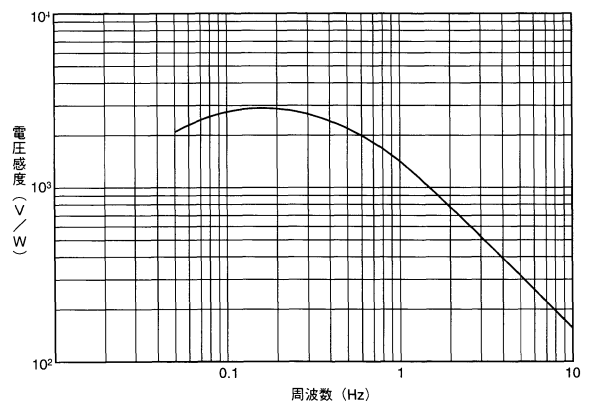


図9 電圧感度の周波数特性
Frequency characteristics of voltage responsivity

2.3 光学フィルタの選定

物体から放射される赤外線の特徴は、プランクの法則など^{*6,7,8}により知ることができる。例えば人体から放射される赤外線の場合には、 $10\mu\text{m}$ 付近にピークをもつ連続的なスペクトルを示すことから、太陽光や照明器具のような短い波長の光を遮断する窓材($6\mu\text{m}$ カットオンフィルタ)を選定する(図10)。当社では、検出対象とする物体の温度情報と、光学フィルタの透過スペクトルからセンサに入射する赤外線エネルギー量を演算処理し、個々の用途に最も適した透過特性の光学フィルタを設計・生産している。

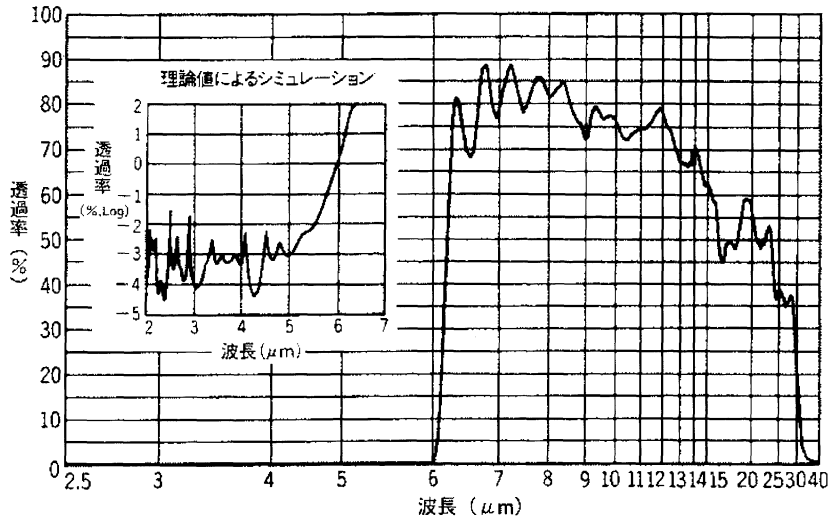


図10 $6\mu\text{m}$ カットオンフィルタの分光特性
Spectral characteristics of $6\mu\text{m}$ cut-on filter

3. センサの構造

人体検知用センサの構造を図11に、外形寸法の一列を図12に示す。気密封止と電磁シールドのため TO-5 金属パッケージに収納されている。金属パッケージに開口部を設けそこに光学フィルタを具備し、赤外線透過窓とする。この光学フィルタの基材は半導体材料のシリコン(Si)であるが、樹脂接着ではこの部分でシールド効果が減衰する。当社ではRFスパッタリングで金属パッケージとフィルタ基材間に金属薄膜を形成し、十分な導通を確保している。

PZT素子上には2組の受光部を形成し、分極処理の方向が相反するように接続し、信号出力させている。これにより光学系を介して入射する赤外線には2組の受光部がそれぞれ機能するが、同相で影響を及ぼすセンサ周辺の温度変化や機械的な衝撃などの外乱には出力しない。

負荷抵抗は、アルミナ基板上に厚膜印刷法を用いて焼成されており、J-FETは同基板下面に表面実装されている。

4. センサ機能への新たな提案

水や空気同様、赤外線もごく身近に存在する人に優しい波であり、今後も活用されていくであろう。しかしセンササイドからすれば、検知対象周辺には不要な赤外線が多く存在しているのだから、常に選択性を意識しておく必要がある。

これまでも可視光影響の低減(図13：特許出願中)や指向性の改良(図14：実用新案権取得済)について提言してきたが¹⁾、ここでも更に新たな方策を提案したい。

*6 プランクの法則

温度 T (K) の黒体から放射される単位面積、単位波長当たりのエネルギー量 W_λ ($\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{cm}^{-1}$) を示す。

$$W_\lambda = C_1 \cdot \lambda^{-5} \cdot [\exp(C_2 / \lambda \cdot T - 1)]^{-1}$$

$$C_1: 3.74 \times 10^{-12} (\text{W} \cdot \text{cm}^2)$$

$$C_2: 1.438 (\text{cm} \cdot \text{K})$$

*7 ステファン・ボルツマンの法則

温度 T (K) の黒体から半球内へ放射される全エネルギー量 W ($\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$) を示す。

$$W = \sigma \cdot T^4, \quad \sigma: 5.673 \times 10^{-12} (\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-4})$$

*8 ウィーンの変位則

ある温度での放射エネルギーのピーク波長 λ_T (μm) を示す。

$$\lambda_T = B/T, \quad B: 2898 (\mu\text{m} \cdot \text{K})$$

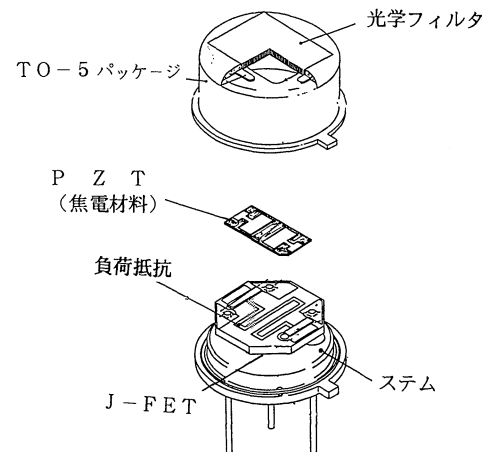


図11 パイロエレクトリック検出器：IPシリーズの内部構造
Internal structure of pyroelectric infrared sensor IP series

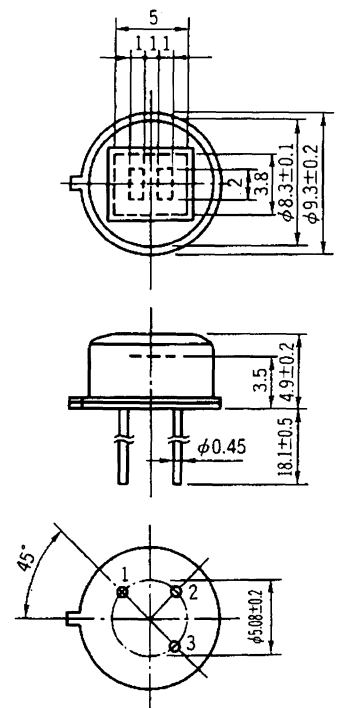


図12 IP-240外形寸法
External dimensions of IP-240

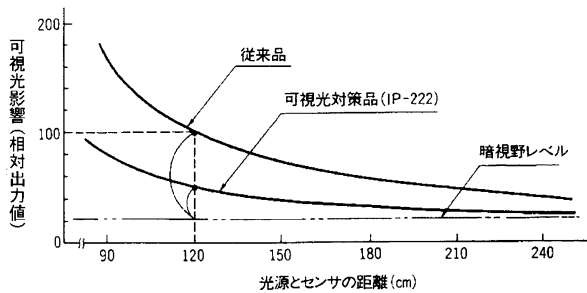
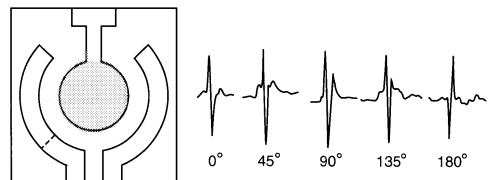
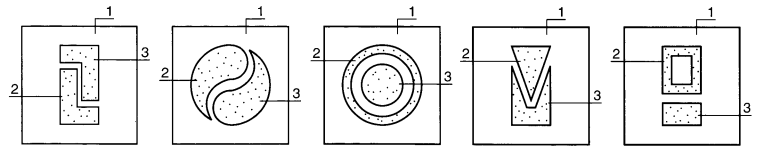


図13 可視光対策の効果
Effectiveness of visible light countermeasure



(A) 信号出力例
Example of signal output



(B) パターン例
Example of element pattern

1. 素子
2. 受光面 (1)
3. 受光面 (2)

図14 指向性を改良したパターン
Pattern after modifying directivity

4.1 自己判定機能

侵入者警報や火災検知等のセキュリティ分野では、不慮の事態への迅速な対処と情報化社会の高度な保安システムへの対応が必須となる。ここに提案するのは、検知システムの機能を遠隔操作で確認できるいわば「自己判定機能」に適応したセンサである(特許出願中)。この種の検知器は、定期的に人体や模擬的な炎を用いて動作確認を行うのだが、これには多大な工数を要する。本提案のセンサでは通信回線を利用し、遠隔操作によってこの定期点検の簡略化を意図している。その構成は焦電素子上に薄膜抵抗(発熱体)を形成し、この抵抗に通信回路から模擬入力に相当するパルス電圧を加え、動作確認するものである。図15に人の動きを想定したパルス電圧とその信号波形を示す。

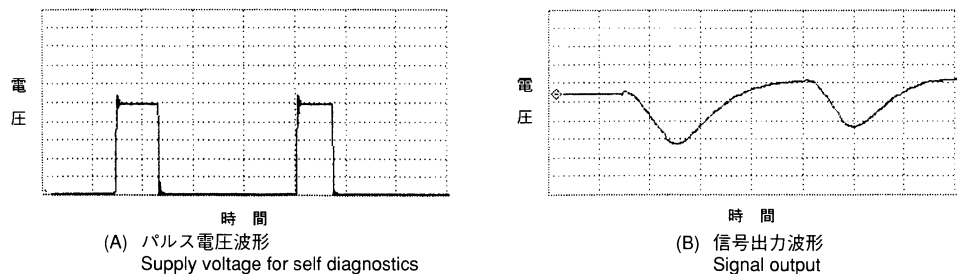


図15 自己判定機能による信号出力波形
Signal output waveform by self diagnostics function

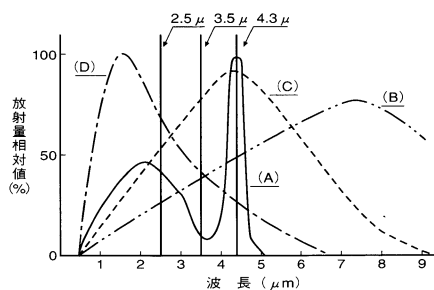


図16 3点計測による炎検知方式
Flame detection method by 3-point measurement

(A) 炎のスペクトル
(B) 100°Cの黒体放射
(C) 400°Cの黒体放射
(D) 1800°Cの黒体放射

4.2 的確な炎検知のためのスペクトル処理

炎の多くは固形のすすを含んでおり、2~2.5 μ m付近にピークをもつ赤外線を放射する。同時に多量に発生するCO₂ガスからも4.3 μ mにCO₂固有のスペクトルが観測される。これを特定波長領域での温度上昇やCO₂の4.3 μ mに限定した計測では、例えば太陽光や高温物体との区別は難しい。そこで図16のようにすすとCO₂ガスのスペクトルに加え炎独特の谷間の波長を計測する、確度の高い炎検知を提案したい(特許権取得済)。平成3年5月には消防法施行規則の改正により、赤外線輻射を用いた炎検知器が認可された。この分野での応用製品開発においても光学フィルタを含めた赤外線センサの活躍が期待される。

5. おわりに

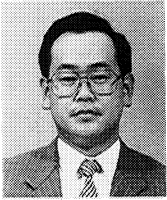
センサの新たな応用製品展開として、小型かつ廉価な計測器分野への期待が大きく、センサの基本特性を生かすには周辺部品のラインアップが必須の条件と成りつつある。今後、この分野へも独自の提案を繰り広げたい。

本稿では焦電形赤外線センサに重点をおいて解説してきたが、計測機器への応用例は本号掲載の各報を、「人の動き」を検知する赤外モジュールに関しては文献¹⁾を参照願いたい。

最後に、焦電形赤外線センサの応用分野がより一層開拓されることを期待すると共に、本稿が製品企画の一助となれば幸いである。

参考文献

- 1) 操谷俊之, 高田秀次:Readout, No 4, P.83-90(1992)



松本 浩一

Koichi Matsumoto

開発センター 課長
1978年入社
赤外線検出器の研究開発
に従事



岡本 一隆

Kazutaka Okamoto

開発センター 主任
1986年入社
赤外線検出器の研究開発
に従事

