

赤外線センサを用いて火源を効果的に検出する研究

有山修平*, 稲村武敏*, 大竹晃行*

概 要

火災現場における濃煙中の火源の位置を把握するための火源探知器具を開発することを目的として、赤外線センサの一つであるサーモパイルを用いて火源を検出する回路を試作し実験した。その結果は次のとおりである。

- 1 サーモパイルの活用は、火源探知に有効な手法の一つと言える。
- 2 サーモパイルを用いた試験回路は、小型軽量であり可動部分もないことから、携帯可能な器具として望ましい性能を有している。
- 3 センサの探知エリアを狭いスポット状とするよりも、細い帯状の探知エリアを用いた測定方法が、より効果的であると考えられる。

1 はじめに

濃煙が充満する火災では、人間の視覚等の感覚だけでは火災の状況把握が十分に行えるとは言えず、科学的な手段により火災室内部の状況を把握し、効果的な放水や隊員進入の可否の判断などを行って火災の早期鎮圧、隊員の安全管理を図る必要がある。

また、壁体内火災やダクト火災などのように、外観から火源の位置を特定することが困難な火災では、消火活動に時間を要するとともに、水損や再燃の危険性が存在している。

このように、火災の早期鎮圧、水損防止及び再燃防止という要請に応えるためには、科学的に火災の状況を把握できる手法が必要であり、その第一段階として火源の有無と方向を探知できる軽便な機器を開発する。

これまで、当研究所において、数次にわたり本課題が取り上げられており、赤外線利用の有効性は確認されているものの、携帯可能な同種器具の実用化には至っていない。

今回は、当時から進展した科学技術を採り入れ、実用性の高い機器の完成を目標とした開発の初年度として、必要性能の検討、本用途に適するセンサの調査等を行い、実験用回路を製作していくつかの実験を実施した。



写真1 ケーシングに収めた試験用回路

2 既往研究

赤外線や紫外線を用いて火源や人体を検出する手段については、当研究所において表1に示すとおり数次にわたって研究がなされている。

*第一研究室

表 1 既往研究の状況

	内 容	備 考
これまでに行われた研究	1 消防科学研究所報 4、5号 (1967、1968年) 「サーミスタボロメーター利用による火源探知機について」 赤外線の入射により電気抵抗が変化するサーミスタボロメーターを使い、赤外線の強弱を電流の強弱に替え、スピーカーから信号音を発生させるもの。 結果： 煙中の肉眼確認距離 1.5mに対し、試作機では 8m以上の確認が出来た。なお、試作機の重量は 2.3kg であり、センサの直前に赤外線を断続させるチョッパー（機械シャッター）を設けている。	○ 赤外線の有効性を確認した。 ○ 機械可動部分がある。 ○ 構成が複雑で小型化に問題を残す。
	2 消防科学研究所報 12～14号 (1975～1977年) 「火災周辺温度分布の研究」 ヘリコプターの機上から、震災火災等の大規模合流火災の状況をとらえる手段として、赤外線映像装置活用の可能性を探ったもの。	○ ヘリ搭載を目的としている。
	3 消防科学研究所報 16、17号 (1979、1980年) 「火源探知器（スペクトラム比較方式）について」 CO ₂ ガスの共鳴放射現象を用い、赤外線波長 3.8μm成分と 4.4μm成分比較を行うもの。 結果： 炎のある火源に対しては目視での検出限界距離 0.6mに対し、試作機は 8mまで可能であったが、炎のない高温物体の検知性能は低かった。	○ 炎が無いと検知できない
	4 消防科学研究所報 31、32号 (1994、1995年) 「煙中の人体検索機器及び火源探知器」 火源探知器のセンサとして、紫外線センサの可能性を探ったもの。 結果： 煙による紫外線の減衰が大きく、利用はできない。 また、赤外線センサによる人体検索機器の可能性についても探っているが、感度が低く利用できない。	○ 火源検出は紫外線センサでは困難である。 ○ この研究では赤外線センサによる火源探知は研究されていない。

3 技術論と可能性

(1) 火源の把握方法

火源の存在を把握する方法について、現在の技術で可能性のあるものを分類すると、図1のようになる。

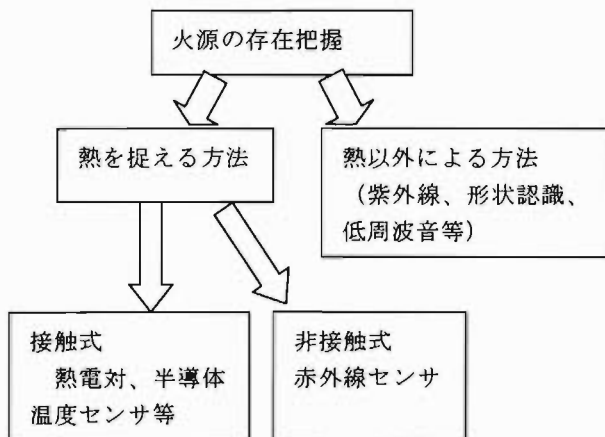


図 1 火源の存在を把握する方法

(2) 実現の可能性

赤外線センサによる放射温度計（以下「放射温度計」という。）は、既に一般的に各方面で用いられている。従って、火源から離れた位置において赤外線センサにより高温部分の温度、位置等を把握できることは明らかである。

次に、赤外線センサを用いて火源探知器具を構成する場合、火災現場という特殊な条件下での使用であるとともに単なる温度測定とは異なる使用形態・使用目的であるため、次の事項を解決する必要がある。

ア 放射温度計は被測定個所が事前に分かっているが、火源探知器具は、その存在や位置が不明な火源について把握できなくてはならない。

イ 通常、放射温度計が使用される環境は空気が清浄な場所であるのに対し、火源探知器具は濃煙を透して火源の位置を把握できなければならない。

(3) センサ部についての調査

赤外線センサは、その動作原理により熱型と量子型に大別される。熱型は赤外線を熱に変換し、抵抗変化や起電力などの形で出力する。量子型は半導体の遷移間エネルギー差吸収により光電導効果やPN接合による光起電力効果を利用して出力する。

それぞれの特徴は表2のとおりである。

表2 赤外線センサの比較

	長所	短所
熱型	常温動作 波長依存性（波長により感度が大きく変化すること）がなく安価	感度が低い 応答が遅い
量子型	感度が高い 応答が速い	冷却が必要 波長依存性がある 高価

(4) 温度と赤外線放射強度、波長

赤外線単位面積（1 cm²）あたりの黒体放射強度は、プランクの公式により

$$W_\lambda = c_1 / [\lambda^5 (e^{c_2/\lambda T} - 1)] \dots\dots\dots (1)$$

によって表される。

ここで、

- W_λ : 放射エネルギー [W/m²・μm]
- λ : 波長 [μm]
- e : 自然対数 = 2.718
- T : 絶対温度 [K]
- c₁ : 第一放射定数 = 3.742 × 10⁻⁸ [W/cm²・μm⁴]
- c₂ : 第二放射定数 = 1.439 × 10⁴ [μm・K]

である。

(1) 式をグラフにすると、図2のようになる。

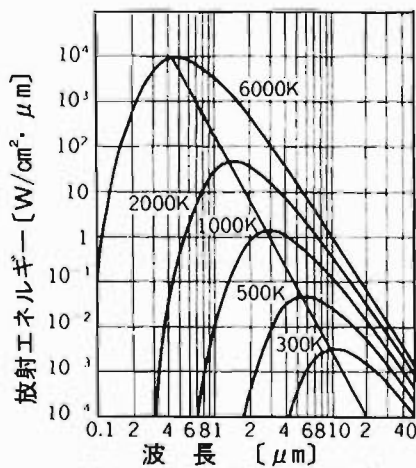


図2 波長と放射エネルギー

図2からわかるとおり、高温では短い波長に、低温では長波長でエネルギーピークが存在する。このことから、一般に高温の検出には短波長が、室温に近い低温部の温度検出では長波長が適している。消防隊が火源の探知を行う場合には、火災最盛期の非常に高温の燃焼物体の探知と、残火処理時などの比較的低温である微小火源の探知という両面の運用が必要となる。このため、使用する赤外線波長は、一般に0℃から1000℃までの測定に良

く用いられている8~14μm程度が妥当であると考えられる。

4 センサの選択

今回の試作回路に使用したセンサは、表2で熱型に分類されるサーモパイルである。可動部分や冷却の必要が無く、価格が安いことから、装備の耐久性、小型化、低価格化の面から有効である。また、応答時間も1/1000秒のオーダーであり、本用途に関しては、応答の遅れは影響を及ぼさない。

サーモパイルは、受光部の温度を周囲に直列に配した熱電対により温度変化を検出する素子で、熱電対が直列に接続されているため、わずかなエネルギーでも検出することができる。また、検出感度に周波数特性は無く、表面に使用されるフィルタ材の波長透過特性にのみ依存する。一般的なフィルタは、広い波長帯域に対し透過特性があり、火源探知に適した波長帯域が含まれるものも多く存在する。以上の理由から、サーモパイル（写真2）が最適と判断した。



写真2 サーモパイル

5 試作実験

単一センサを用いて火源の有無と方向のみを探索する機器を前提として、サーモパイルを用いた高温物体を認識する試験回路を製作し、いくつかの実験を行った。

実験概要、製作した試験回路及び実験条件等は次のとおりである。

(1) 実験概要

ア 実験1

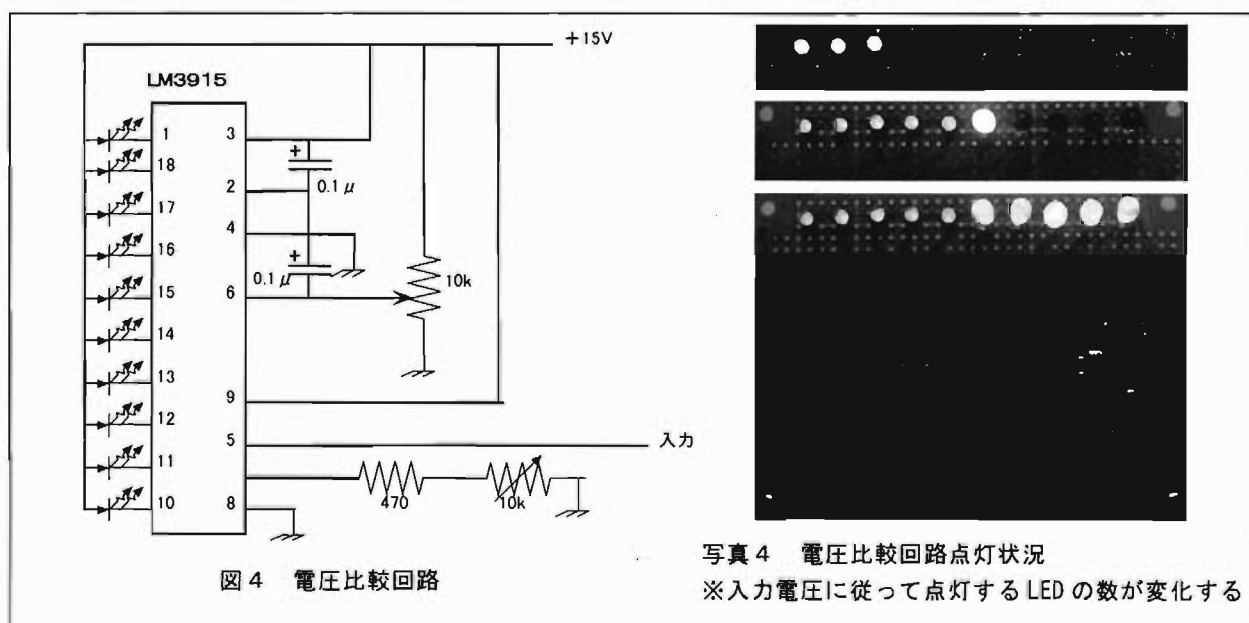
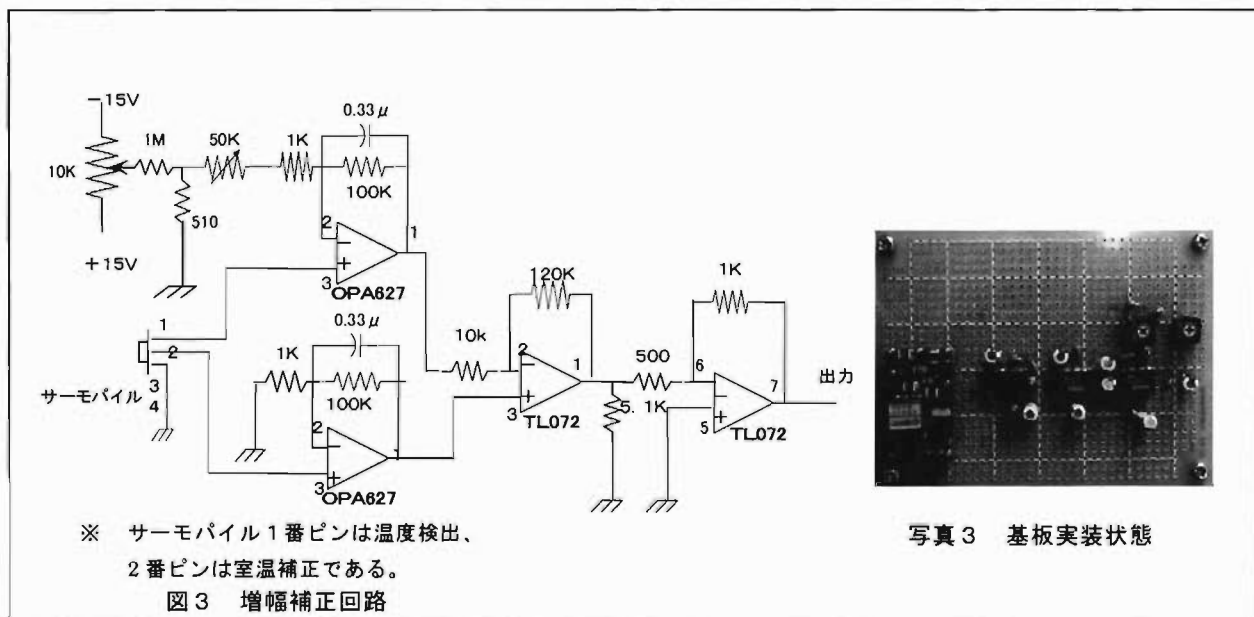
サーモパイルからの電圧を増幅し、かつ、室温補正を行って出力する試験回路を製作し出力される電圧を測定した。(図3、写真3)

イ 実験2

サーモパイルの受光部分に赤外線が集中するよう反射鏡を製作し、サーモパイルの感度上昇を測定した。

ウ 実験3

電圧比較回路（コンパレータ）ICを利用してコンパレータ入力電圧に応じてLEDが順次点灯する回路を試作し、前アの試験回路と接続して、熱源までの距離とLED点灯の対応状況を観測した。(図4、写真4)



(3) 実験条件

サーモパイル：オプトエレクトロニクス株式会社製 TPS434

サーモパイルフィルタ透過波長：5.5μm以上

電圧測定器：HEWLETT PACKARD社製 5420A

熱源（実験1、2、3）：投影形、縦10cm横5cm、温度80℃の金属製

熱源（実験3）：100V、480Wの電気ストーブ

6 実験結果の分析と検討

(1) 実験1

サーモパイルから熱源までの距離を40cmとし、サーモパイル受光軸と熱源の角度を変化させた結果は図5のとおりであり、50%以上の出力が得られたのは、受光軸からの角度が約25度以内の時であった。

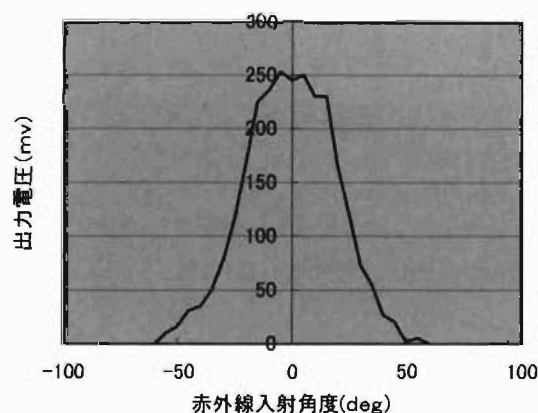


図5 入射角度と出力電圧

(2) 実験 2

実験 1 に使用した回路のセンサ部分に反射鏡を設置した。実験 1 の結果を実験 2 と比較したグラフを図 6 に示す。受光軸上の熱源については、出力電圧が 0.78dB 上昇し、その 50%以上の値となる範囲は受光軸から約 13 度以内まで狭まった。

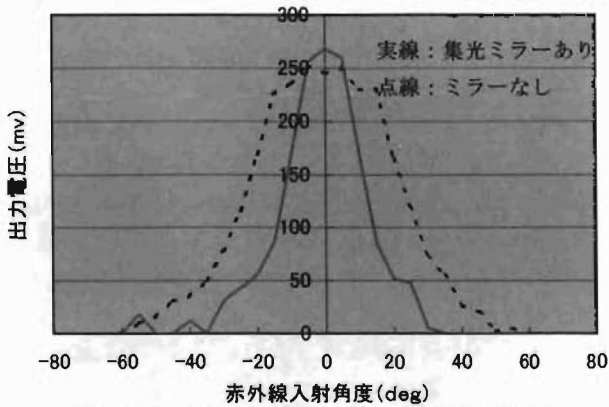


図 6 反射鏡の有無による出力電圧の比較

(3) 実験 3

実験 1 で使用した回路に、電圧比較回路 (コンパレータ) IC を用いた回路を接続した。LED は試験回路の出力電圧に応じて点灯し、室温で 0 個、熱源から 10cm の距離で 10 個点灯するように調整した。投影形縦 10cm 横 5 cm 温度 80°C の熱源の場合、距離 1.2m までの熱源を感知することが可能であった。また、100V 480W 放熱板温度 270°C の電気ストーブでは、距離 6.3 m まで感知可能であった。(写真 5)

本実験により感知可能とした距離は、LED が 10 個中 2 個以上点灯した場合とした。



写真 5 測定状況

7 考察

(1) センサへの赤外線入射角度

実験 1 の結果から、赤外線を効率よく集光させるには、サーモパイルへの赤外線入射角度が 25 度以内になるよう光学系を設計する必要がある。

(2) 反射鏡

実験 2 の結果は、多少の出力電圧の上昇は確認できたものの、際立った効果は観測できなかった。これは、製作した反射鏡 (アルミ製) を簡易的に製作したため、その表面に、製作過程で生じた凹凸があり、反射率が低下しているためと推測される。しかし、より高精度の反射鏡を用いれば、反射率も向上し、更なる効率的な集光が見込まれる。

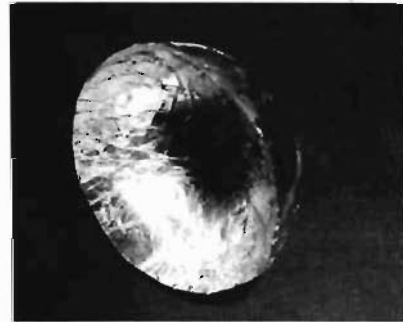


写真 6 製作した反射鏡

(3) 感知可能距離

実験 3 は、センサに集光装置を取り付けずに行った測定であり、効率的な反射鏡を取り付けることにより、感知可能距離は更に伸びることが推測される。

(4) 理想の感知エリア

絶対温度 T の黒体から単位面積あたりに放射されるエネルギー P は、(1) 式を波長 λ で 0 から ∞ まで積分して得られる。(ステファン-ボルツマン式)

$$P = \sigma T^4 \quad [\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}] \quad (2)$$

ここで、

$$\sigma = 5.673 \times 10^{-12} \quad [\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}] \quad (\text{ステファン} \cdot \text{ボルツマン定数})$$

この、入射エネルギー P を全て受けた時のサーモパイルの出力電圧 V_s は、

$$V_s = R \cdot \eta \cdot P \quad [\text{V}] \quad (3)$$

ただし、 R はサーモパイルの感度、 η はフィルタの透過率である。

サーモパイルは、視野内の平均温度を出力する。しかし、火源が小さいほど、視野内に占める火源以外の面積が増大する。つまり、センサに入射するエネルギーが減少してしまうため、(3) 式の P が減少することになり、火源の実際温度よりも、より低い温度としての信号が出力されることになる。このことから、正確な温度測定には、被測定物がサーモパイルの視野全体を覆うように感知エリアを設計する必要があり、感知エリアが狭ければ

狭いほど、誤差の少ない温度検出が出来る。一方、消防隊員が現場で使用する状況下では、被測定物である燃焼物体の有無や方向が不明の状態であり、探知エリアが狭ければ、探知すべき空間内に存在する火源を捉えるのが難しい。また、疑わしい空間内の全ての部分を測定しようとする場合にも、手間と時間を要することになる。この場合、探知エリアは広いほど測定は容易に行えることになる。

この相反する条件を互いに満足させるには、細い帯状の探知エリアを用いることが有効な手法と言える。この帯状のエリアを、長さ方向と直角方向に動かすことにより、短時間かつ容易に広い範囲の探知を行うことが可能である。また、帯の幅を狭くすることにより、微小な火源が探知エリアに占める面積も増加するため、火源探知の信頼性が向上する。(図7)

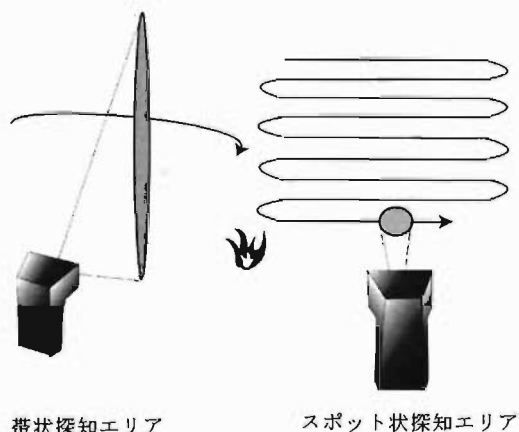


図7 探知エリアごとの測定イメージ

また、帯状の探知エリアを、縦・横方向に探知することにより、それぞれが強く反応する部分から、微小な高温部分の位置特定も可能である。(図8)

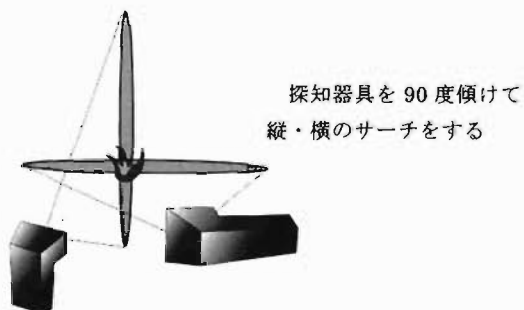


図8 微小火源の位置特定イメージ

8 まとめと展望

(1) センサとしてサーモパイルを選定した試験回路は、大きさが72mm×95mmの基板が2枚(コンパレータIC回路を含む)、質量は約70g(電池除く)であった。これは、消防隊員が使用する機器として、小型軽量化が十

分可能なものである。また、精度の高い集光部分を付加することにより、実用に耐える性能の実現も期待できる。以前からの課題であった、機械式可動部や重量等の課題も存在しないことから、サーモパイルの活用は、火源探知に有効な手法の一つと言える。

(2) 消防隊が災害現場において、単一のセンサを用いて、空間内を広い範囲に測定をする場合には、センサの探知エリアを、狭いスポット状にした方法では困難である。帯状の探知エリアを帯の長さの直角方向に移動させる測定方法が、より有効であると考えられる。

(3) 探知エリアは、広すぎると他の部分からのノイズを多く拾う結果となることから、微小な火源に対応するためには、帯状の視野の探知エリア幅を細くする必要がある。

(4) 本研究は、平成15年度において今回の結果を踏まえた試作品の製作を予定している。今回は、サーモパイル素子利用の有効性と可能性を検証したが、比較的安価な高性能素子の開発は、絶えず進んでおり、それらの活用も視野に入れて、消防活動に耐えうる機器の開発を目標とするものである。

〔参考文献〕

- 1) 消防科学研究所報 第4、5号
- 2) 消防科学研究所報 第12~14号
- 3) 消防科学研究所報 第16、17号
- 4) 消防科学研究所報 第31、32号
- 5) 工業調査会 センサ/計測モジュール活用技術百科、平成8年6月、P101~P102
- 6) 工業調査会 これでわかるセンサ技術、2000年5月
- 7) トランジスタ技術 特集センサ応用システム設計技法、CQ出版社、1997年7月
- 8) トランジスタ技術編集部編 温度・湿度センサ活用ハンドブック、CQ出版社、1989年8月
- 9) 谷本茂 電子展望別冊 オペアンプ実戦技術、昭和55年5月
- 10) エレクトロニクスライフ 特集 OP アンプの機能別基本回路とその応用、日本放送出版協会、1995年5月
- 11) 辻内順平 工学概論I 基礎と幾何光学、理工学基礎講座11、朝倉書店、2002年11月
- 12) 久野治義 赤外線工学 社団法人電気情報通信学会 1994年3月

RESEARCH TO DETECT FIRE SOURCES EFFECTIVELY WITH AN INFRARED SENSOR

Shuhei ARIYAMA *, Taketoshi INAMURA *, Teruyuki OHTAKE*

Abstract

With the purpose of developing a device for locating fire sources amid dense smoke, we created a circuit for fire detection using a single infrared sensor thermopile and conducted experiments. The results are as follows:

1. The use of a thermopile is an effective method for detecting fire sources.
2. The experimental circuit made from a thermopile is small, lightweight, and has no movable parts, making it ideal for use as a hand-held device.
3. When taking measurements with the sensor, a detection area in the shape of a narrow band is more effective than a spot-shaped area.

*First Laboratory