

サーミスターボロメーター 利用による火源探知機について

大 熊 順 三*
武 居 貢*
篠 田 幸 男*

1. はじめに

濃煙下の火災防衛において燃焼個所を知ることは、千金に値するものであろう。ことに、最近の建築物の変貌は著しいものがあり、特に地下室地下街火災及び無窓階建物火災においては、煙の充満によって燃焼個所を知ることが非常に困難である。したがって、消火に大きな支障をきたすことになり、なんらかの方法で燃焼個所を探知する必要があるわけである。

そこで、当論では煙の充満によって肉眼でみることのできない燃焼物体を探知する火源探知機の原理と性能の研究結果について報告する。

この火源探知機は、燃焼物体から煙を透過して放射される赤外線をサーミスターボロメーターによって検出し、燃焼個所の方向を知るものである。

2. 赤外線の性質等

1. 赤外線の性質

赤外線は、γ線、X線、電波などと同様、電磁波であって放射エネルギーであることに変わりないが、ただその波長が0.75~1,000μの範囲に限られ、可視光線より長くマイクロ波(電波)より短い中間帯にある。

したがって、赤外線は、可視光線と電波の両性質を若干備えている。すなわち赤外線はレンズまたは鏡で光学的に集光あるいは方向づけられる。同時に赤外線は電波のように可視光線に対して不透明な物質(煙、霧等)を透過する。そしてその波長が長い程よく透過する。

2. 物体から放射される赤外スペクトル

赤外線は、温度が絶対零度(-273°C)以上であればどんな物質からでも放射され、そのピーク値の波長は次の式で表わされる。

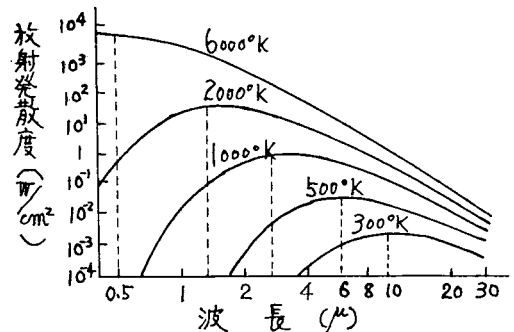
$$\lambda_m \doteq 3000/T (\mu) \dots\dots\dots(1)$$

ただし、T: 絶対温度°K

すなわち、ピーク値の波長は温度が高い程短い。

しかし、これはピーク値であるから物質からはその外の波長の赤外線が放射されていることになる。その状況は第1図に示すとおりである。また、これは放射率1の完全黒体の場合であるので一般の燃焼物体と一緒に考えられないが、木材の放射率は70°Cで0.91と非常に大きく、黒体とほぼ同様に考えてもよいと思う。

第1図 黒体の放射発散度と波長との関係



3. 物体から放射されるエネルギー

Planck の法則によれば、黒体から放射される任意波長の放射エネルギーは、次の式で表わされ、第1図に示すごとくである。

$$W_\lambda = \frac{C_1}{\lambda^5} \left(e^{C_2/\lambda T} - 1 \right)^{-1} (W/cm^2) \dots\dots(2)$$

ここで、 W_λ : 波長λで黒体から半球内に放出する放射エネルギー (W/cm²)

λ: 放出される赤外線波長(μ)

e: 自然対数のベース (2.718)

T: 黒体の絶対温度(°K)

C_1, C_2 : 定数

$$C_1: 3.7 \times 10^{-8} W \cdot cm^2$$

$$C_2: 1.4 \times 10^4 cm \cdot deg$$

この式からもわかるように放射エネルギーは高温物体ほど大きい。

また、(1)と(2)式から黒体のピーク波長時の放射エネルギーは次の式で表わされる。

* 第一研究室

$$W_{\lambda m} = 1.3T^5 \times 10^5 \text{ (W/cm}^2\text{)} \dots\dots\dots(3)$$

また、(2)式を λ について $0 \sim \infty$ まで積分すれば黒体から半球面内へ放射される全エネルギーは、次の式で表わされる。

$$W = \int_0^\infty W_\lambda d\lambda = T^4 \sigma \text{ (W/cm}^2\text{)} \dots\dots\dots(4)$$

$$\sigma : 5.67 \times 10^{-12} \text{ W/cm}^2 \cdot \text{deg}^4$$

すなわち、 W は波長に関係なく黒体光源温度の4乗に比例する。

灰色体では灰色体の放射率を(4)式に乘ずればよい。すなわち、次式で表わされる。

$$W = T^4 \epsilon \sigma \text{ (W/cm}^2\text{)} \dots\dots\dots(5)$$

この場合の放射率 ϵ は完全黒体で1、油煙で0.95、人体で0.99、木材で0.91 (70°C)、アルミニウムで0.02である。

4. 受光エネルギーと距離

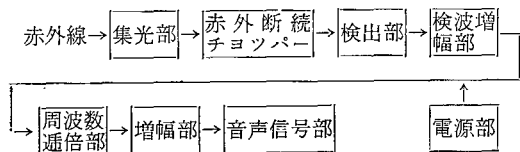
任意受光距離 (d cm) の赤外エネルギーは逆2乗の法則により次の式で表わされる。

$$W_d = W / 2 \pi d^2 \text{ (W/cm}^2\text{)} \dots\dots\dots(6)$$

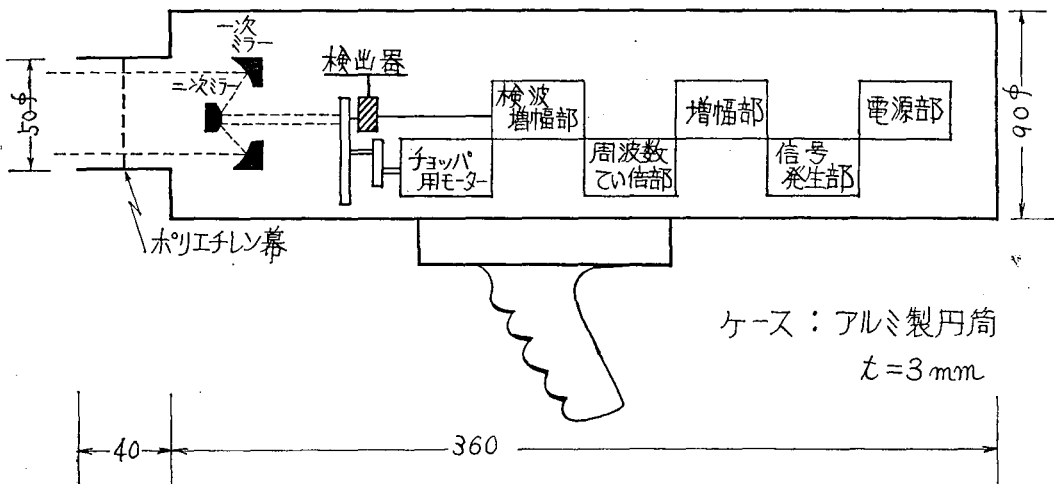
すなわち、光源(点光源)から放射される赤外エネルギーの強さは、光源と検出器の距離の乗に逆比例する。しかし、これは真空中の場合であって火源探知機として使用する場合には、空気および煙がその赤外エネルギーを吸収するため、受光エネルギーは、距離の二乗に逆比例するばかりでなく、さらに減少することになる。

3. 火源探知機の原理

1. ブロックダイアグラム



第3図 構造および概要



すなわち、煙を透過してくるわずかな赤外エネルギーを集光部で点に集め、増幅しやすくするため赤外線断続チヨツパーによって赤外線を 100°C/s に断続し、検出部へ送る。

この検出部は、サーミスターボロメータで赤外線の入射によりその電気抵抗が変化するものである。すなわち、赤外線の入射によりサーミスターボロメータに電気抵抗の変化が発生し、そこに流れる電流の強弱を検波増幅部へ送る。

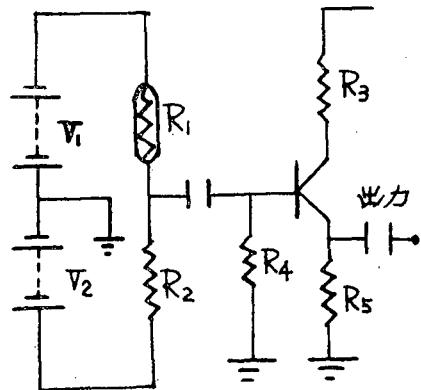
検波増幅部では信号すなわち交流波のみを増幅し直流分を捨てる。

次に 100°C/s の信号を周波数通信部によつて 2,500°C/s に通倍し、さらに増幅し、スピーカーによつて音声信号を発生する。

2. 電子回路

本機の基本回路は第2図に示すとおりである。これ

第2図 電子回路



R_1 サーミスターボロメータ-25°C, 2.5M Ω

R_2 個定抵抗 2.5M Ω

は最も基本的なブリッジ回路で $V_1 = V_2$, $R_1 = R_2$ の

場合においてA点とB点の電位が等しい。したがってB点には電位の変化が生じない。今、入力光によってR₁の電気抵抗が変化(減少)した場合、この回路の電氣的にバランスがくずれ、A点に電位が生ずる。さらに入力光を断続した場合はAC信号を取り出すことができる。

3. 構造および概要

本機の構造および概要は第3図に示すとおりである。なお重量は3.1kgである。

4. 火源探知機的设计上の問題点

本機的设计上の問題点は多々あるが、最も重要かつ特異的な点は集光方法および検出素子である。すなわち本機は、集光部の設計と検出素子の特性が良好であればその目的を達することができる。したがって、ここではこの二点について検討する。

1. 集光方法

赤外線を集光する方法は幾多あろうが大別すると反射系による方法と屈折系による方法の二つになる。そして、一般に反射系は鏡を、屈折系はレンズまたはプリズムを用いている。これらの得失については、第1表のとおりである。なお、この場合の得失は火源探知機としての設計上の得失であって一般的な画質、色収差等については考えていない。

第1表 反射、屈折光学系の得失

長所	反射型	赤外線の無選択性吸収、金属フィルムの非常に高い反射率、コンパクトな光学系で長い焦点距離を得ることができる。
	屈折型	設定と焦点合わせが簡単で組み立てが容易である。熱効果の影響が少ない。
短所	反射型	離軸収差で視野が制限される。二次鏡の防害効果は光学的利得を低下させる。組み立てがむずかしい。
	屈折型	使用する材料により透過する波長の制限および選択吸収効果が大きい。

ここで、最も大きな問題となることは、屈折形の材質による赤外波長制限と吸収効果である。

すなわち、一般的な屈折型、すなわちレンズ系ではその赤外線透過特性は次のとおりである。

ガラス	2 (μ)	まで透過
水晶	3.5 (μ)	"
ほたる石	8.5 (μ)	"
岩塩	15 (μ)	"
カリ岩塩	21 (μ)	"

臭化カリウム……………29 (μ) "

ここで、岩塩、カリ岩塩、臭化カリウム等において湿度によって変形することから工業的にも本機に使用するような大きなものを作ることは不可能である。またガラス、水晶、ほたる石等では長波長の赤外線透過しないため、煙を透過する長波長の赤外線を集光することはできない。

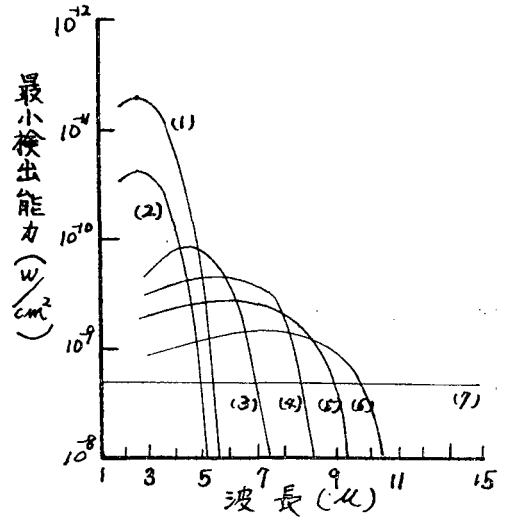
そこで、本機の赤外集光の最も良い方法としては非常に高い反射率をもつ金属フィルムの反射鏡を用いることである。

したがって、本機では第3図のような反射鏡(一次ミラー、二次ミラー)を用いた。

2. 検出素子

赤外線を検出するには、赤外線をよく吸収する素子が必要である。そしてこの検出素子は数多くあるがその感知する波長の範囲がそれぞれ異なる(第4図参照)

第4図 赤外検出素子の種類と特性



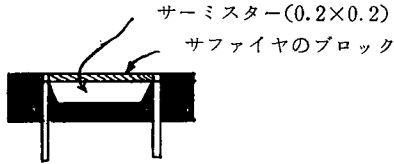
- (1) 硫化鉛
- (2) "
- (3) テルル鉛
- (4) セレン化鉛
- (5) インチウムアンチモン
- (6) ゲルマニウム
- (7) サーミスターボロメーター

この感知範囲の広いものにサーミスターボロメーターがある。サーミスターボロメーターは、煙の中をよく透過するといわれる長波長の赤外線すなわち10~15μの赤外線にもよく感知する。このことは第4図からも明らかのように他の素子に比べて非常によい特性をもっている。そこで本機は赤外検出素子に米図パウンス社製サーミスターボロメーターを使用したのでこのことについて簡単に説明しておく。

(1) サーミスターボロメーター検出器の概要

この検出器はマンガン、ニッケル、コバルト酸化物など多結晶の厚さ10μのサーミスター素子で広範囲の赤外線に感知する。また、この素子の裏面にはサファイヤブロックをはりつけ熱の放散効果を良くしている。その概要は第5図のとおりである。

第5図 サーミスターボロメーター模擬図



(2) サーミスターボロメーターの電気抵抗とバイアス電圧

サーミスターボロメーターは、赤外線の吸収度合いによってその電気抵抗が変わるものである。そしてその抵抗値は、素子の受光面積によって異なるが、ここでは受光面積0.2×0.2mm、25°Cにおける電気抵抗2.5MΩ(1°Cに対して4%の電気抵抗が変化する)のものを用いた。なおバイアス電圧は仕様にもとずいて90Vとした。

(3) 時定数

サーミスター素子とその熱吸収部、すなわちサファイヤブロックとの間で熱の早いやりとりがなされる。しかし実際には、赤外線入射の変動とそれによる出力電圧の変動の間にはタイムラグがある。

この熱的な遅れのため、チョッピングを早くしても検出部の出力電圧を最大にできない理由がある。本機は時定数 $\tau=3.0\text{ms}$ のものを使用し、そのチョッピング周波数を $100^\circ/\text{s}$ とした。なお時定数とチョッピング周波数との関係は次の式で表わされる。

$$\tau \approx 156/f \text{ [ms]}$$

f : チョッピング周波数 $^\circ/\text{s}$

(5) ノイズ等価電力

赤外線検出素子にもノイズはつぎのである。最小の信号レベルはS/Nによってきめられるが、赤外線検出素子のS/Nは温度、チョッピング周波数で異なる。そこで全回路の無入力時の出力電圧と信号発生時の出力電圧について後の特性の項で述べることにする。

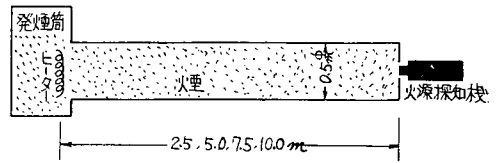
5. 火源探知機の性能実験

1. 実験装置

実験装置は半径50cm、長さ(距離)2.5m、5m、7.5m、10mの黒色円筒で、その一端に火源を設け、他の一端に火源探知器を設け、円筒内部に発煙筒の煙を充

満させる。その概要は第6図のとおりである。

第6図 実験装置



2. 発煙筒について

ここで使用する発煙筒は、その主成分の六塩化エタン、酸化亜鉛、亜鉛等の酸化反応によって発生する塩化亜鉛と空気中の水分との反応によって白煙を発生するものである。

3. 火源の温度と種類

ここで使用する火源は、100V400Wの一般電気コンロを使用し、引加電圧によって温度を変える。

4. 煙の濃度測定について

この場合の煙濃度は、無煙の状態で完全暗室中、光源2Wの電球から0.5m離れた位置で光電池で受光し、このときの起電流値を100として発煙筒の煙を充満させたときの起電流減少値をパーセントで示したものである。

なお光の通る煙層の厚さ(m)を考慮した下記の煙濃度についても併記しておく。

$$C_s = \frac{1}{l} \log_e \frac{I_0}{I}$$

ここで C_s ………煙の濃度

l ………光の通る煙層の厚さ(m)

I_0 ………煙のない場合の光の強さを示す電流値

I ………煙を通しての光の強さを示す電流値

5. 火源探知機の感知特性実験

第6図の実験装置において火源の種類、煙濃度別の感知距離は、第7図のとおりである。

ここで 実線 (————) 700°C

一点鎖線 (— · — ·) 550°C

二点鎖線 (— · · —) 450°C

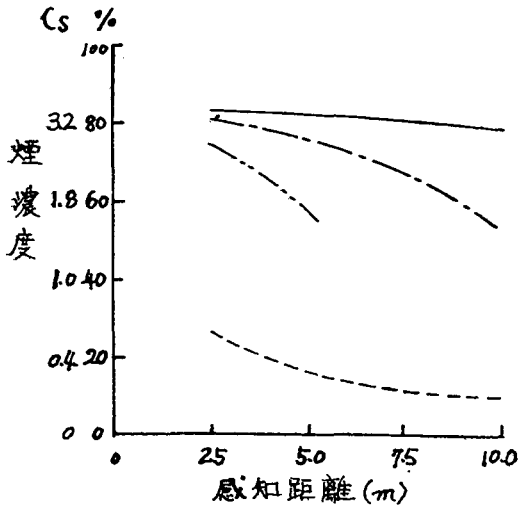
点線 (·····) 肉眼感知

参考 550°Cの火源に対し空気中で65m遠方から感知する。また65°Cの火源に対して1mの遠方から感知する。

6. 性能実験に対する考察

第7図感知特性で示すように火源550°C(一般電気こんろ100V、400W)では大気中で探知距離65mに対して煙濃度80%中で2.5m、75%で5m、67.5%で7.5m、55%で10mとそれぞれ減衰が非常に激しい。

第7図 感 知 特 性



また、火源の温度が低い場合(450°C)、近距離においてはその煙濃度にあまり影響ないが遠距離(5 m以上)では煙濃度に大きく影響される。

さらに、火源の温度が高い場合(700°C)は、煙濃度と感知距離にはほとんど影響ない。しかし、この感知特性は10mまでであり、10m以上の特性は不明である。しかしながらこの曲線の形状から15~20mあたりまでゆるやかに減衰するものと思われる。

なお、この減衰状況は火源の放射エネルギーの強さに大きく影響されることは論ずるまでもないところであるが、この実験では、小火源を使用したため、実験条件として非常にきびしいものである。

また、模擬火災においても実験したが、煙が不安定でしかもその煙を必要濃度まであげることができないためデータを得ることができなかった。しかし間口2×2 m、奥行8 mの半密閉小屋の角に木材燃料(薪¼束程度)を燃焼させ、発煙筒(前実験に使用したものと同一小型 2,000 g入、白色)5本と発煙させ火源から8 m離れた位置で容易に感知することができる。

また、この場合、肉眼での確認距離は1.5 mである。したがって、火源探知機の特長としては薪¼束程度燃焼した場合、肉眼で火源を確認するより5倍以上の距離の遠方から探知することができる。

6. 総 合 考 察

1. 原理設計上の問題

ここで原理設計上特に再考察しなければならない点はないと思われるが、さらに感度をあげる条件について述べる。

(1) 反射型ミラーの大きさと感度

第3図の反射型ミラーでその見掛けの面積の大きい

ほど感度の高いことは当然であるが、ミラーの大型化によってむやみに集光することは一般大気中の赤外エネルギーにも感知することになる。そこで、火源探知機としては一般大気中(日光の照射中)で無感知、燃焼物だけに感知することが必要である。その点本機は太陽に直接向けた場合を除くほか、屋内照明中および日光の照射中において無感知で、約70°C以上の物体及び燃焼物体から放射される赤外線に感知する。

現使用の反射型ミラーは一次ミラーが半径3.0 cm、二次ミラーが半径1.5 cmでそのみかけの面積は5.3 cm²である。これは仕様にもとずいて製作したものであるがまだ若干一次ミラーを大きくし、感度をあげることができると思われる。また、このミラーはアルミ被膜の蒸着によるものであるが、金の被膜を使用すれば可視光線を若干吸収し、赤外線をよく反射することから、さらに小型でより感度をあげることができると思われる。

(2) ノイズについて

この火源探知機の無入力時の出力電圧は約1 Vであり、最小信号発生電圧は3 Vである。したがって、その信号発生電圧を2 Vほどにすることによりさらに感度を上げることができる。ただ、この場合、サーミスターボロメーター素子の必要最小赤外エネルギーは極めて小さく、その立ち上がり特性は急激で、その特性が大きく変化するとは思えない。

2. 煙中の赤外線の減衰

このことは、本論の最も重大な最もむづかしい問題である。すなわち、赤外線は煙の粒子の大きさ、種類およびガス等によつてその透明度が異なり、発煙時の諸要素が多く、残念ながら煙による赤外線の減衰度は不明である。しかし、一般に同じ赤外線でも波長の長い赤外線は煙に対して比較的透明であるといわれている。しかし、煙は多種多様な物質の集合体で、いかなる赤外波長が透過するか不明である。したがって、感知素子としては全赤外波長に感知することが理想である。

本機はサーミスターボロメーターを使用しており、非常に広域の赤外線を感知し、70°C程度の高温物体から放射される長い波長の赤外線をも感知する。

この意味において本機は、煙を透過してくる赤外線を感知する火源探知機として適性であるといえる。しかし、長赤外波長といえども、煙に対して全く透明というわけではない。すなわち、第7図からも明らかに煙の濃度によつてエネルギー分布が異なる。なお同じ濃度でも火源が大きいかほど、感知距離も長くなる。しかし、使用した発煙筒の煙は赤外線を比較的よく吸収する塩化亜鉛を主成分としているため、実火災時の煙と比較することは必ずしも当を得ていないが、実験条件としてはきびしいものといえる。

7. む す び

この火源探知機は、サーミスターボロメーターを利用しているため、煙に対して透明であるといわれる長波長の広域な赤外線、すなわち遠赤外線に非常によく感知する。したがって火源探知機として使用するには適性であるといえる。

感知特性は実験結果でも明らかのように、火源の温度、大きさ等によって異なるが550°C (100V, 400W 一般電気こんろ)では煙濃度75%で5m, 50%で10mで感知し、700°C火源では煙濃度80%中約10mで感知する。また、一般燃焼物(薪¼束程度)では煙濃度80%中で10m以上の位置から感知することができる。さらにこの場合肉眼では距離10mの火源確認濃度限界が10%であることおよび模擬火災実験で肉眼確認距離

1.5mに対し火源探知機では8m以上(最高測定距離8mのセットのため8m以上の感知特性実験不能)に感知することから、実火災時においても相当効果があるものと思われる。しかし最終的には煙の濃度に関係なく、20~30mの遠方から感知することが必要であろう。本機は、その性能の点で十分なものとはいえないが消防用個人装備として一応満足できるものであると考える。

最後に、本機製作に当たって旭産商株式会社、桂賢治氏の御協力をいただいたことに対し、ここに深く感謝する。

参 考 文 献

Henry L. Hanckforth 著, 和田正信, 中野朝安共訳:
赤外線工学, 近代科学社(昭和38)。