

火源探知器(スペクトラム比較方式)について

河 合 道 夫*

1. ま え が き

消防は、その職務の第一目標を人命の早期救出と火災の早期制圧としている。

ところが、近年、建物構造、利用形態の複雑化及び、新建材の使用に伴い、火災発生時、煙の流出が容易に行なわれず、建物内部に濃煙が滞留し、上記の目的がスムーズに遂行できない火災が増加している。

この煙の問題に対処するため、火源を探知するものとして赤外線火源探知器、及び赤外線影像装置(プローブアイ)、煙を消すものとして静電消煙器、の研究或いは開発が行なわれ、これらの物は現在当庁の一部で使用されている。

ここで、本題に関係する赤外線火源探知器で、過去研究、或いは、市販されたもの(以下従来の火源探知器という)について調べてみると、非接触温度測定を目的とした輻射温度計に一部改造を加え火源探知器に流用したもので、煙中での火源探知という点については赤外線を応用しているため、原理上、視力つまり可視光線に対して透過力が優れているが、検出原理が火源探知器に入射する赤外線量の大小を比較するものであるため、煙、視野、放射率等により赤外線の減衰を受けた場合、正確な火源探知(温度測定)が困難であることがわかった。

そこで、今回従来の火源探知器に付随した諸問題を解決する研究を行い、ここにスペクトラム比較方式の原理を採用し、赤外線の諸減衰に対する検出誤差が少なく、さらに高熱高温物体と炎を伴う燃焼物体とをそれぞれ区別して検出することのできる消防用としては非常に効果的と思われる火源探知器(以下、スペクトラム比較方式火源探

知器)を試作したので、これについて報告する。

2. 赤外線とはいかなるものか

今回、試作したスペクトラム比較方式火源探知器、従来の火源探知器、両者とも赤外線を応用したもので、これらを詳述する前に赤外線とはいかなるものかを簡単に説明する。

(1) 赤外線の概要

赤外線は光線であり、レーザ光線の様に特殊な用途ではなく、私達の身近なところで熱線(広義には該当するが、物理学上の狭義の熱線とは異なる)として非常に多く使用されている。

例えば、赤外線ガスストーブ、赤外線電気コタツ、オーブントースター、などにおいて使用されている。

ここで、誤解するといけないのは、赤く光っているのを赤外線と間違ひする事である。これはあくまでも可視光線であり、スペクトル分布的にみてその内側には目には見ることができない赤外線が放射され熱を伝えている。

又、赤外線は熱を伝えるという目的以外にも、可視光線と同様な目的においても身近なところで使用されている。

例えば、赤外線写真、最近開発市販された赤外線自動焦点調整カメラがある。

ここで、赤外線の発生と性質について、少し詳しく説明する。

赤外線は電磁放射であって、温度が絶対零度つまり -273°C 以上にあればどんな物質でも原子と分子の振動と回転により発生する。

赤外線は光源から出て直進する。真空中と同様に空气中、気体、液体、又は固体のような媒質の中でも、赤外線の波長、通過路となる媒質の厚さにより異なるが、伝搬してゆく性質がある。

赤外線は熱線とは異なり、物理的媒質中を熱の対流、又は伝導により運ばれるのではない。赤外線はしばしば熱線（本文では一部に慣用語句として用いている）と呼ばれているが、この用語は正しくは誤った呼び名である。これは赤外線がその通路にある吸収体の中で吸収され物体の原子構造の中で振動、又は回転を生じ熱を発生することから生じたものである。しかし、この性質は他の電磁放射線にも共通である。強い可視光線、レーダービーム、強いX線等においても生ずるものである。この性質を赤外線以外で積極的に応用したのが電子レンジである。

赤外線を周波数で見ると、 $10^{12} \sim 5 \times 10^{14}$ Hz までの範囲にある。これは可視光線より周波数が低く、マイクロ波より高い周波数帯にある。したがって赤外線は可視光線とレーダ波の両者の性質を若干ずつ備えている。つまり赤外線はレンズ、又は鏡により集束され方向づけられる。同時にレーダ波のように可視光線に対して不透明な物質をも通して伝搬されることも可能である。

(2) planckの法則

planckの法則は黒体（すべての温度、すべての波長に対して黒体は理想的な、或いは完全な吸収体であり、放射体である）の放射強度、スペクトラム分布、及び温度の関係を表わしている。

図1は、黒体の単色放射発散度と波長の関係を表わしている。

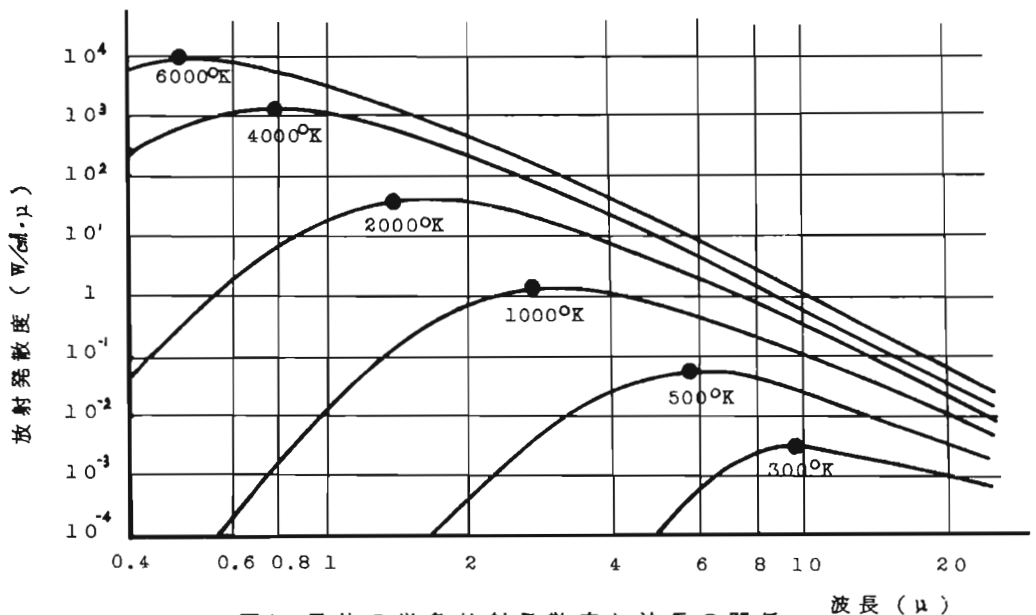


図1 黒体の単色放射発散度と波長の関係

planckの法則

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

$W\lambda$: 単位表面積、単位波長間隔当り波長λで黒体から半球内へ放射される放射線量

T : 黒体の絶対温度 $^{\circ}K$

e : 自然対数のベース = 2,71828

C_1, C_2 : 定数 $C_1 = 3,7402 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{cm}^2$

$C_2 = 1,4385 \text{ cm} \cdot \text{deg}$

このように黒体の温度が上昇すると放射エネルギーの強さも急速に増加することがわかる。又、図1より、我々の日常に存在する温度約0℃～約1000℃の範囲における放射赤外線のピーク波長は約2～約10μである事がわかる。通常この波長領域を赤外線の中でも特に中間赤外線と呼んでいる。

この温度に対する赤外線のピーク波長は次の②式のWienの変位則により求まる。

$$\lambda_m T = K \dots\dots\dots ②$$

λ_m : 放射赤外線のピーク波長 単位μ

K : 定数 $K = 2897 \mu \cdot \text{deg}$

(3) stefan-Boltzmannの法則

stefan-Boltzmannの法則は黒体から放射される赤外線のエネルギー量と温度に対しての法則である。先に黒体の単位波長における放射発散度について述べたが、黒体から半球面内へ発散されるエネルギーは①式で与えられる $W\lambda$ をλについてλ=0からλ=∞まで積分して得られる。

$$W = \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} W_{\lambda} d\lambda = T^4 \sigma \dots\dots\dots \textcircled{3}$$

W： 黒体の全放射エネルギーで放射面で
W/cm²で測る

σ： Stefan-Boltzmann の定数 = 5.673 ×
10⁻¹² W/cm²・deg⁴

前の③式がstefan-Boltzmannの法則である。

全波長領域で積分したのであるから、Wは波長に無関係で、黒体光源の絶対温度の4乗に比例して定まる。

従来の火源探知器は放射エネルギー量の測定を行い、この法則に従い温度の算出を行っている。

(4) 放射率

前の①式、③式はすべて放射率1.0の黒体について導かれたものである。しかし、実際に遭遇するたいていのものは完全な黒体ではない。同じ温度にある黒体よりも放射も吸収も少ないものを灰色体といい、その放射率は常に1より小さい。

物体の放射率は、その物体の放射及び吸収の能率を表わす尺度で、次の様に定義されている。

$$\text{放射率 } \epsilon = \frac{\text{灰色体の全放射エネルギー}}{\text{黒体の全放射エネルギー}} \dots\dots\dots \textcircled{4}$$

したがって、stefan-Boltzmannの法則に従って温度測定を行う方式においては、灰色体の場合放射率を掛けて修正を行わなければならない。この灰色体に適用されるstefan-Boltzmannの法則は

$$W = \epsilon \sigma T^4 \text{ となる。}$$

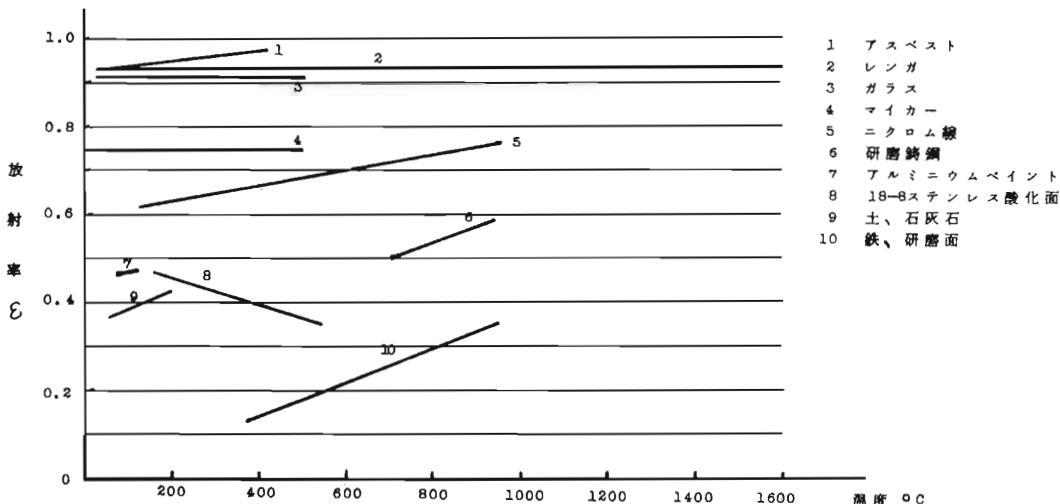


図2 物質の放射率 ε

図2は灰色体の放射率の一例である。

(5) 特殊な赤外線スペクトラム

今までは、planckの法則が適用されるものについて説明した。しかし、ある種の光源においてはplanckの法則に従わず、エネルギースペクトルが、ある波長での線、又はバンドからなる強放射のピークを重ね合わせたものから成っている場合がある。

この種の光源の例としては、今回スペクトラム比較方式火源探知器の炎検出に応用する有機化合物の高温気体炎、及びある種の放電灯がある。

(6) 逆2乗の法則

逆2乗の法則は光源と受光面の距離と受光面で受けるエネルギーの強さの関係を示す法則である。

図3は逆2乗の法則を説明するための図である。

黒体の点光源Sと受光面積の等しい、例えば、1cm²の2つの検出器D₁、D₂を考え、それぞれ光源Sから距離d、2dだけ離れた位置にあるものとする。Stefan-Boltzmannの法則より、Sにより半球面内に放射される全赤外線エネルギーは、放射面の単位面積当りW watt/cm²である。したがって、D₁、D₂が存在する半径d、半径2dの半球面が受ける全赤外線エネルギーはどちらもSから放射される全赤外線エネルギーWに等しい、したがって

$$D_1 \text{ の受ける赤外線エネルギー } = \frac{W}{2\pi d^2} = W$$

$$D_2 \text{ の受ける赤外線エネルギー } = \frac{W}{8\pi d^2} = \frac{W}{4}$$

となる。点光源から検出器までの距離を半分にする

ると、その検出器の受ける赤外線エネルギーは4倍となることがわかる。これが逆2乗の法則で、点光源から放射される放射線の強さは点光源と検出器の間の距離の2乗に逆比例するということを表わしている。

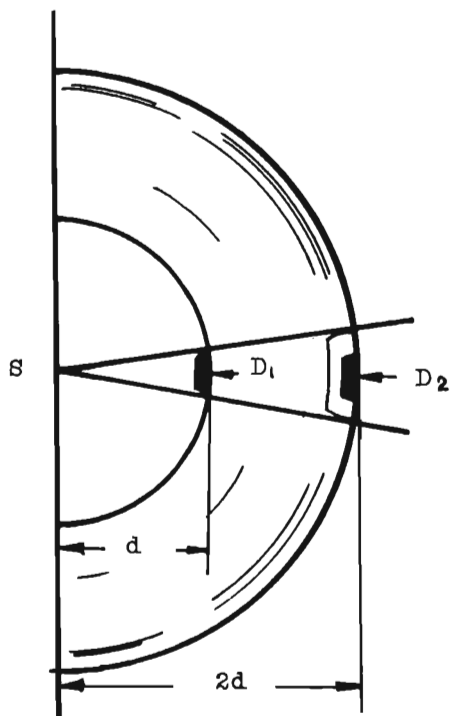


図3 逆2乗の法則

3. 従来の火源探知器

今回研究のスペクトラム比較方式火源探知器の説明に入る前に、比較として、従来の火源探知器の概要と問題について簡単に説明する。

(1) 従来の火源探知器の概要

従来の火源探知器の火源探知原理は次の様であ

る。

火源から放射される赤外線エネルギーは、③式のStefan-Boltzmannの法則に示されるように温度が高くなるにつれて大きくなる。従って、火源から放射される赤外線を捕らえ電気信号に変換し③式のStefan-Boltzmannの法則の逆変換を行えば温度が分かる。このような方法により火源探知(温度測定)が行なわれている。

このような測定方法はカメラの露出計などで一般的に用いられている。

図4は、従来の火源探知器の一例のブロック図である。

図4におけるリニアライザーは入射エネルギー量と赤外線受光素子を含めた系が、温度に対して直線性を有していないので、温度に対して比例した形で温度表示メータを駆動するために用いている。

(2) 従来の火源探知器の問題点

ア 放射率による誤差

2(4)に説明したように測定しようとする火源(放射物体)は通常完全な黒体ではなく放射率が1.0以下の灰色体である。この放射率は物質、表面の加工度、温度により異なるものである。したがって正しい温度測定を行うには被測定物体の放射率を知り補正を行う必要がある。工業的に輻射温度計を使用する場合には被測定物体自体がわかっているので問題はないが、消防活動において火源探知器を用いる場合は煙により被測定物体そのものがわからないため放射率の補正ができず、温度誤差がまともにでてくる。

ここで、放射率による誤差の例として実際の温度800℃の鉄の研磨面の場合の誤差を求めてみる。

鉄の研磨面の放射率は約0.3であるから、補正

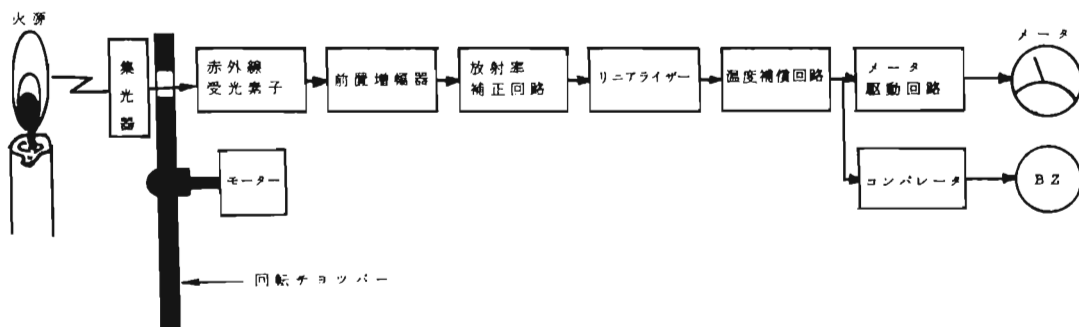


図4 従来の火源探知器(輻射温度計)のブロック図

を行わない場合の表示温度は次の計算により求める。

$$\sqrt[4]{0.3 \times (800+273)} = 521+273$$

表示温度は521℃であり真の温度に対し279℃と大幅な誤差を生ずる。

イ 視野と被測定物体の大きさによる誤差

被測定物体が火源探知器の視野を完全に満たす場合は2(6)の逆2乗の法則に示されるように、受光面に到達する赤外線エネルギーの強さが受光面と被測定物体の距離の2乗に反比例する事と、図5に示されるように視野内に納まる被測定物体から放射される赤外線エネルギー量は温度が一定ならばその被測定物体の面積に比例し、この面積は受光面と被測定物体の距離の2乗に比例する事から、距離と受光素子に入射するエネルギー量の関係は、距離の項に対して互いに打ち消し合っており、入射するエネルギー量は距離に関して影響を受けない。

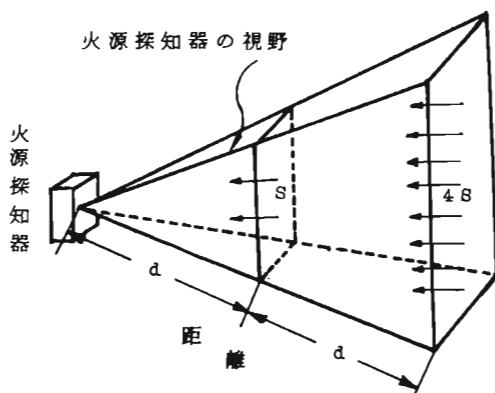


図5 距離と被測定物体の面積の関係

つまり、距離に対しては途中に減衰させる要因となるものが無ければ距離の補正は必要ない。

ところが、近距離において丁度視野を満たす被測定物体を遠距離から温度測定しようとするとき探知器の視野を完全に満たさなくなり、受光素子に入射するエネルギー量が少なくなって真の温度より低く指示されることになる。

例として、真の温度が800℃の黒体で視野の10%しか満たさない場合について考えてみる。

$$\sqrt[4]{0.1 \times (800+273)} = 330+273$$

よって表示温度は330℃となり、真の温度に対して470℃の誤差を生ずる。この計算は被測定物体の周辺の温度を絶対零度と仮定した場合であり、

実際には被測定物体の周辺は常温と考えた方が良く、これ程の差は出ないと思われる。

このことから、正確に探知できる火源の大きさは火源探知器の視野（立体角）によりおのずから限定されてしまう事になる。

(3) 赤外線通過媒質による減衰によって生ずる誤差について

赤外線は可視光線に比べてその透過性はすぐれている。しかし、この赤外線においても減衰が無い訳ではなく、その波長が短くなるにつれて可視光線のようにその程度は弱い減衰を受けるようになる。

火源探知器が用いる赤外線の波長は約1.5～約10μmの所謂中間赤外線と呼ばれる部分である。この中間赤外線は、透過率においては可視光線よりかなり優れているが、遠赤外線やマイクロ波のような飛び抜けた透過性は有していず、水蒸気、煙粒子、その他の浮遊物により吸収や散乱が起き減衰を生ずる。

この減衰により前述の諸減衰と同様に測定温度誤差を生ずる。

(4) その他の問題

ア 約1.5μm～10μmの広い波長帯域に感度を有する受光素子を必要とする。

イ 受光素子の素子自体の温度に対する感度変化があり冷却装置の付加、或いは回路的に温度補償を行う必要がある。

4. スペクトラム比較方式

スペクトラム比較方式火源探知器は被測定物体から放射される赤外線をエネルギー量として取扱うのではなく、スペクトル分布の特質を補えることにより炎の有無の検出、及び温度測定を行うものである。

(1) CO₂ガスの共鳴放射現象

図6は図1に炎を伴う場合のスペクトル分布を加え、ピークの波長成分に対して他の波長成分を%表示したものである。

図6からわかるように炎を伴わない放射物体から放射される赤外線のスペクトル分布はplanckの法則に従い、ピーク波長を境にして両側にだらかに下降するように分布している。

これに対し、炎を伴う（有機化合物の燃焼炎）物体においてはplanckの法則には従わず変則的な

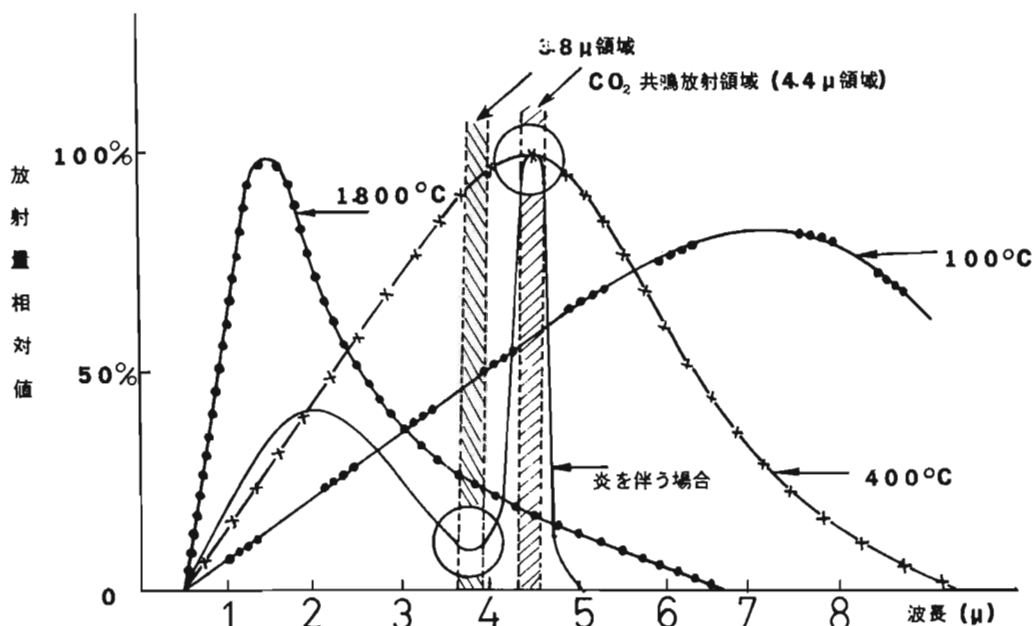


図6 温度と放射量相対値の関係

凹凸を持って分布をしている。

このような分布は有機化合物の燃焼により発生した赤外線が同じく燃焼により発生した高温CO₂ガスに共鳴吸収され、再度約4.4μのCO₂共鳴放射振動数の赤外線として放射されるからである。この現象をCO₂共鳴放射現象という。

(2) 検出原理

放射された赤外線のスペクトル分布より温度、炎の有無の測定及び検出を行うには、多波長にわたって放射エネルギー成分を測定し、コンピュータで解析するのが最も正確であるが、機構的と複雑になり可搬性のある火源探知器としては向かない。そこで今回は図6のCO₂ガス共鳴放射波長4.4μと約3.8μの2つの波長成分を検出し、両者の量を比較する事により炎の有無及び温度測定を行った。

図6からわかるように、4.4μにピークを持つ約400℃を境にして、温度がこれより下がるに従ってピーク波長が長い方に、反対に温度が上がるに従って短い方に移動する。

このピーク波長の移動は4.4μ成分と3.8μ成分の比を取ることにより推測することができる。

約400℃以上の場合は図6でわかるように3.8μ成分が4.4μ成分より大きく $\frac{3.8\mu\text{成分}}{4.4\mu\text{成分}}$ の値は1以上となる。

反対に約400℃以下の場合は $\frac{3.8\mu\text{成分}}{4.4\mu\text{成分}}$ の値は1以下となる。

つまり、この $\frac{3.8\mu\text{成分}}{4.4\mu\text{成分}}$ の値は約400℃を境にそれぞれ上下するに従って1を中心として上下にずれてゆく傾向がある。

次の式⑤および表1はこの様子を詳しく示したものである。

3.8μ成分と4.4μ成分の比は次の式において求める。

$$W_R = \frac{W_{3.8\mu}}{W_{4.4\mu}} = \frac{\frac{C_1}{\lambda_{3.8\mu}} (e^{C_2/\lambda_{3.8\mu} T} - 1)^{-1}}{\frac{C_1}{\lambda_{4.4\mu}} (e^{C_2/\lambda_{4.4\mu} T} - 1)^{-1}} \quad \text{.....⑤}$$

ここで $W_{3.8\mu}$: 波長3.8μの単位面積当りの放射量

$W_{4.4\mu}$: 波長4.4μの単位面積当りの放射量

$\lambda_{3.8\mu}$: 3.8μ成分の波長(μ)

$\lambda_{4.4\mu}$: 4.4μ成分の波長(μ)

C_1 : 定数 $C_1 = 3.7402 \times 10^{-12}$ W/cm²

C_2 : 定数 $C_2 = 1.4384$ cm/deg

T : 絶対温度

表1 温度と W_R の関係

温度℃	W_R	温度℃	W_R
0	0.3417	900	1.3098
100	0.5215	1000	1.3501
200	0.6984	1100	1.3849
300	0.8438	1200	1.4151
400	0.9625	1300	1.4414
450	1.0135	1400	1.4646
500	1.0598	1500	1.4851
600	1.1399	1600	1.5034
700	1.2066	1700	1.5198
800	1.2625	1800	1.5345

このように温度の上昇に伴い、 3.8μ 成分と 4.4μ 成分の比 W_R が増加することがわかる。

この W_R の値を利用して温度表示を行うには、この W_R の値に従ってそのまま温度値を刻印するか、或いは W_R の値を温度に対して直線化するリニアライザーに通しデジタル表示又は表示メータ上に等間隔表示を行う。

次に消防にとって非常に重要な問題である炎の検出であるが、図6でわかるように 4.4μ の CO_2 共鳴放射領域における放射成分が 3.8μ 成分と比べて非常に大きくなっている。この場合、先程のように W_R を求めると1以下となり低温物体の場合と同じ傾向を示している。ところが、炎を伴う場合の W_R の値は0.1以下程度であり、通常、火源探知器を使用する場合の最低測定温度と思われる $0^\circ C$ のときの $W_R=0.317$ よりはるかに小さくなっており、 W_R の値が0.1以下に下がっている場合は炎を伴う燃焼物体を検出している事がわかる。

(3) スペクトラム比較方式の利点

ア 従来の火源探知器が受光素子に入射する赤外線エネルギー量の大小により火源の探知を行っているのに対し、この方式は探知器に入射する赤外線の波長スペクトルの比による炎の探知、温度の測定を行っているため、従来の火源探知器における諸減衰による誤差が生じにくい。

イ スペクトラム比較方式の火源探知器は約 3.8μ と約 4.4μ の2波長成分の測定しか行っていないため狭帯域に感度を有する赤外線受光素子でよい。

ウ 高温物体の検出において、消防活動に最も

重要となる燃焼物体をまだ燃焼に至っていない高温物体から区別して検出できる。

(4) スペクトラム比較方式の欠点

ア 表1でわかるように高温度になると温度分解が悪くなる。これを防止するには3波長以上の赤外線を検出しマイクロコンピュータ等で処理する必要がある。

イ 狭帯域の2波長の赤外線を検出するためのフィルターを必要とする。

5. 試作した火源探知器

(1) 動作概要

図7は本研究で試作したスペクトラム比較方式火源探知器のブロック図である。

火源等の被測定物体から放射された赤外線はまず集光器により集束され 4.4μ と 3.8μ の2種類の通過波長の光学フィルターをもった波長選択チョッパーの一方のフィルターを通り単一スペクトルの赤外線として赤外線受光素子に到達する。

ここで入射した赤外線のエネルギー量に応じた電気信号に変換される。このときの電気信号量は非常に微弱なため後続の前置増幅器において増幅される。このとき、これらの回路は 3.8μ 成分、 4.4μ 成分の両成分に使用されており、各波長成分の区別はまだされていない。この各波長成分を区別するため、波長選択チョッパー部分に設けられている位置センサーとアナログスイッチを用いて、現在、使用されているフィルターの波長に従って選択的に各波長成分に分割かつ保持される。

(注) このように1つの受光素子を用いてフィルターの選択により2波長成分に分割するのは各波長毎に受光素子を用いると各受光素子の性能からくる変換効率のバラツキが生ずるが、これを防止するためである。

次に、各波長成分に分割された信号はバッファ回路において低インピーダンス化されセンサー部から信号処理部へと導かれる。

信号処理部に導かれた各波長成分の信号は赤外線の過大入力による回路の飽和を防ぐため、及び後段の割算器の精度を上げるために、両波長成分に対し同一の増幅率制御が行えるプログラマブルゲインアンプを用いたオートゲインコントロールアンプを経て割算器に導かれ割算が行なわれる。

割算器の出力 W_R (⑤式の 3.8μ 成分と 4.4μ 成分

の比)の値により後段の各回路は概ね次の様な動作を行い各表示がなされる。

ア 炎の検出

W_R の値が概ね0.2以下に下がった場合、炎検出用のコンパレータがONになり赤色のLEDが点滅し電子ブザーがピ、ピ、ピ……と警音を発する。

イ 高温物体の温度表示

表1の W_R の値でわかるように商の値 W_R は

温度に対して直線でないため、 W_R の値に比例した形でメーターを振らせるとメーターの有効利用範囲が狭くなる。そのため450℃以下の表示は必要とみなし関数発生回路により W_R の値が1(約450℃)を超過した分のみを出力し、その出力をメーター駆動アンプにより増幅し温度表示メーターを振らせている。

エ 高温物体の検出

高温物体の温度表示の部分で説明した関数

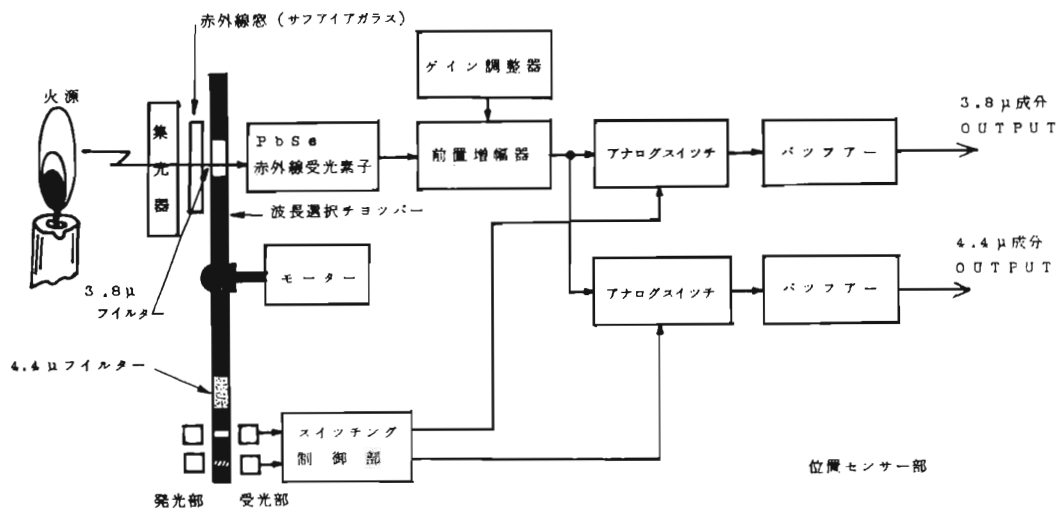


図7-1 スペクトラム比較方式火源探知器のブロック図〈センサー部〉

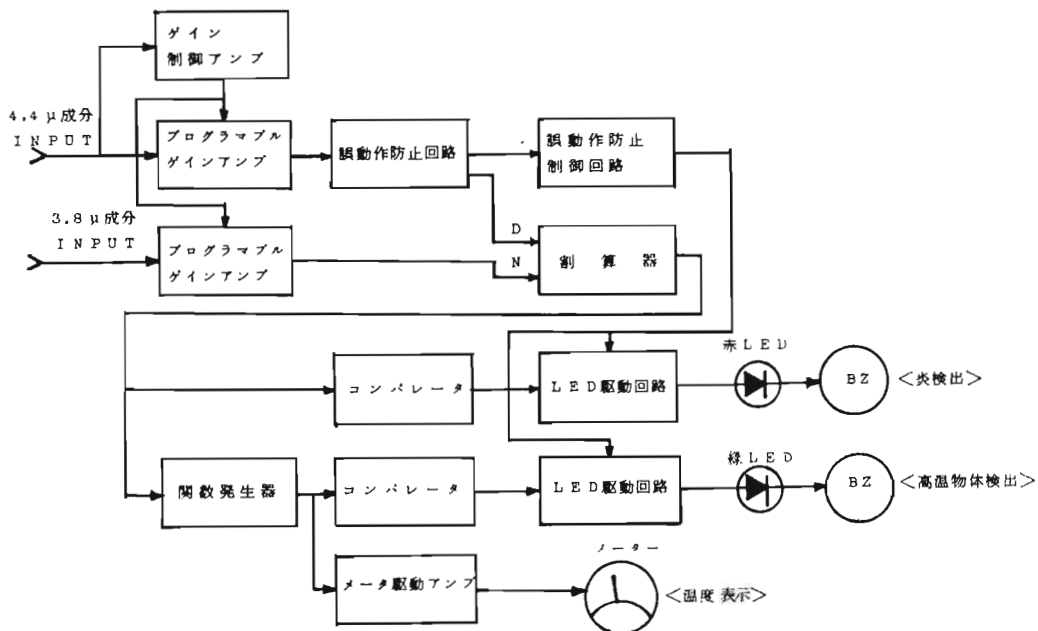


図7-2 スペクトラム比較方式火源探知器のブロック図〈信号処理部〉

(注1) ブロック図における各誤動作防止回路は入射赤外線が小さい場合、S/Nが悪化し誤動作を起こすようになるが、これを防止する働きをしている。

(注2) 前記説明に用いた各値は説明しやすい

(2) 回路図

なお、火源探知器の性能に直接関係のない定電圧回路、ACモータ駆動用インバーターの回路図は省略する。

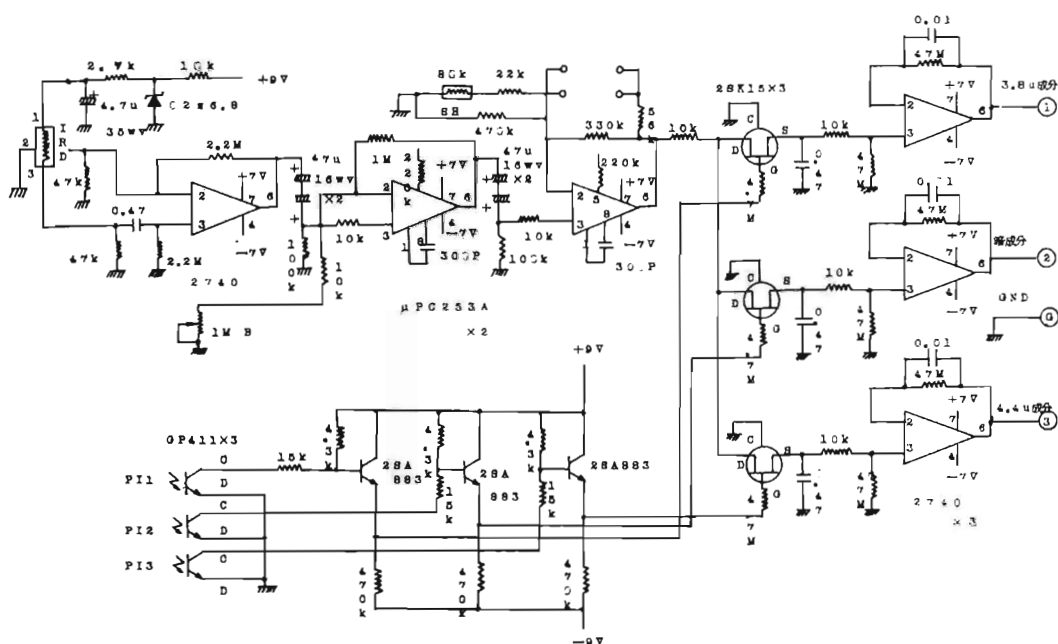


図8-1 スペクトラム比較方式火源探知器の回路図〈センサー部 その1〉

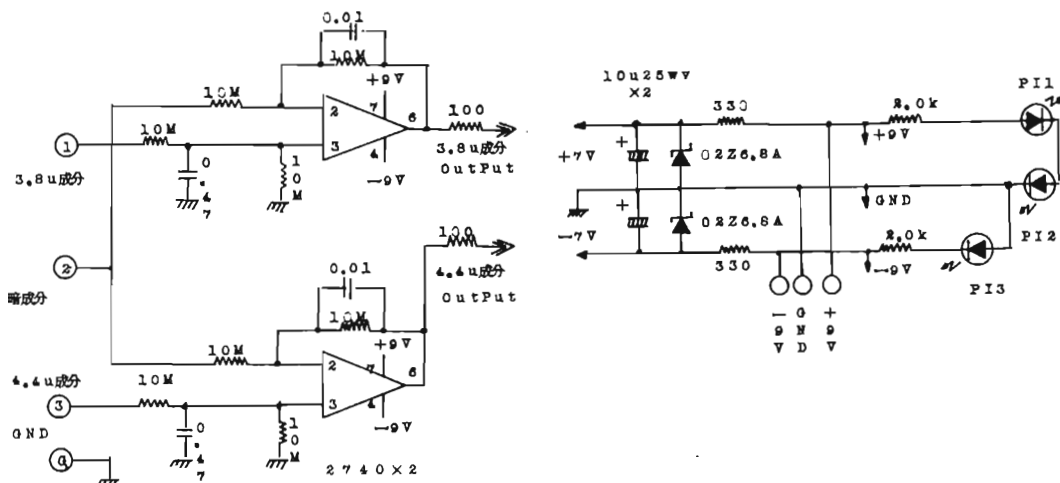


図8-2 スペクトラム比較方式火源探知器の回路図〈センサー部 その2〉

(3) 外観図及び操作方法

操作方法

- ① 信号処理部を肩に掛ける。
- ② 電源SWを入れる。
- ③ センサー部を手で持ち、探知しようとする方向に向ける。
- (ア) 高温物体を検出した場合はピーと警告音が発せられ、同時に緑色のLEDが点灯する。
又、大まかな値であるが温度表示メーターにより温度の確認ができる。
- (イ) 炎を伴う燃焼物体を検出した場合はビ、ビ、と警告音を発し、同時に赤色のLEDが点滅する。
- ④ 使用后、バッテリーチェックメーターにより、バッテリーの電圧が規定の電圧より下がってないか調べる。規定の電圧より下がっている場合は電源SWを切り充電を行う。
- ⑤ 電源SWを切る。

6. お わ り に

本研究で試作した火源探知器については、1978年度は動作、機能試験の段階で修了した。この試験において、炎の検出、高温物体の検出とも十分に行なわれていることが確認された。なお検出限界距離についての実験は行なわなかったが、30m離れた位置において、ろうそくの炎、線香の束の検出が可能であった。

今後の研究は、現在、本研究の火源探知器がそれ自体の温度変化により誤動作する要素を含んでいるので、この点の改善を行い、同時に性能試験を行い消防活動に供し得る物かを調べる予定である。

性能等の結果報告については1979年度に実験を実施し次号にて報告する予定である。

※参考文献

赤外線工学 和田 正信訳

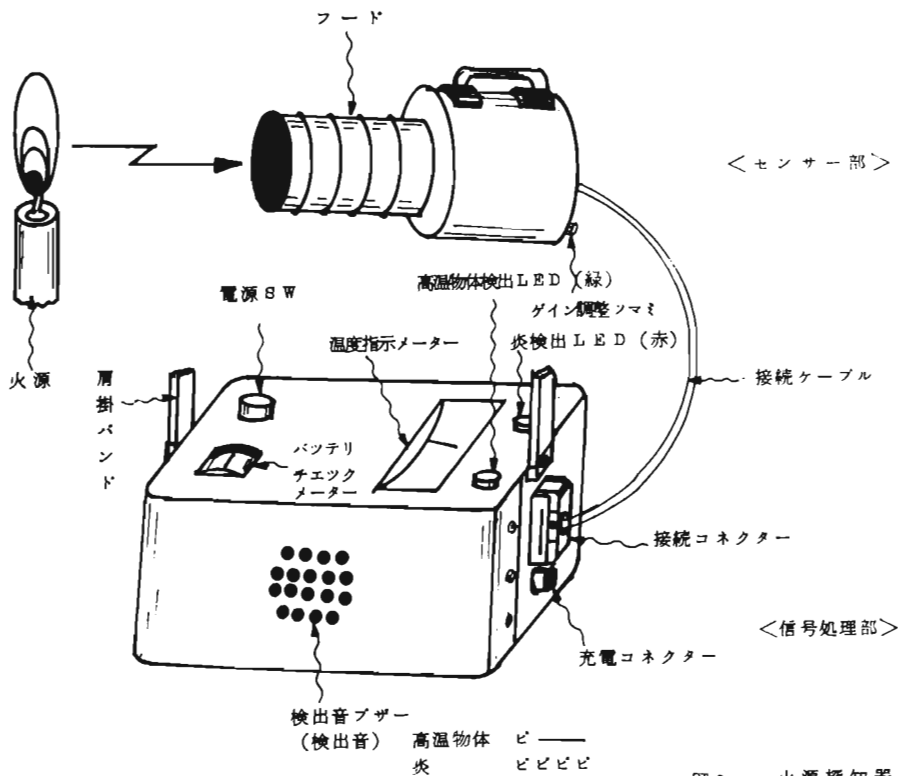


図9 火源探知器の外観図

図9 火源探知器の外観図