

問題 最近、人が近づくと自動的に電灯がつくような装置が、あちこちで見られるようになってきた。よく観察すれば、それらの装置が、静的な状態には反応せず（つまり、人が存在することを感知するのではなく）、その動的な変化のみに（つまり、人が入ってきたときだけ）反応していることに気づくであろう。実は、それらに使われているセンサは、人感センサなどと俗称されているが、ある種の誘電体に備わっている焦電効果 (pyroelectric effect)、すなわち、熱によって電気分極が生じる（表面電荷が現れる）現象を利用したものである。体温があるがゆえに人が発している熱輻射線（おもに赤外領域）をとらえて電気信号に変換するのである。

焦電効果は、厳密には1次効果と2次効果に分けられる。1次効果は、温度によってその電気分極の度合いが変化する純粋な焦電効果と呼べるものであるが、2次効果は、圧電効果 (piezoelectric effect) との相互作用によって現れるものである。すなわち、温度による熱膨張で、素子内に熱応力が発生し、それが圧電効果を介して電気分極となって現れるのである。

図3は、焦電センサの構造を示したものである。圧電素子と同様に材料の対向する面に電極が設けられており、一方の面には、熱輻射線をよく吸収するようにコーティングが施されており、もう一方の面からは、逆に熱が速く逃げるような構造となっている。このような構造にすることで、素子内に生じる熱膨張の違いが助長され、2次効果がより顕著に現れるようになる。

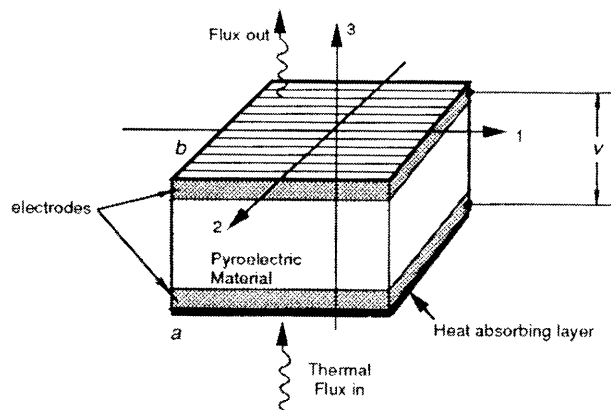


図3 焦電センサの構造

以下は、この焦電センサの基本回路とその応答特性について述べた文章である。括弧に当てはまる数式を示しなさい。また、下記の問いに答えなさい。

いま、焦電センサの体積平均温度を T としよう。焦電効果は、温度 T の変化が表面電荷 Q の変化として現れるとして、次式で表現できるとしよう。

$$\Delta Q = K_p \Delta T \quad (1)$$

なお K_p は、その比例定数である。温度の時間的な変化を問題とするのであれば、式(1)は、

$$\frac{dQ}{dt} = i_s = K_p \frac{dT}{dt} \quad (2)$$

と書けることになる。すなわち、焦電センサを、温度の時間変化に比例した電流 i_s を発生する一種の電流源と見なすことができる。図4には、センサをその等価回路で示している。

一方、素子の温度上昇は、熱容量を C_t とすれば、一方の面から赤外線吸収によって流入する単位時間当たりの熱量 W と、対向面から逃げていく熱量（温度に比例し、熱伝達抵抗 R_t に反比例する）の差として、次の微分方程式で記述できる。

$$C_t \frac{dT}{dt} = W - \frac{T}{R_t} \quad (3)$$

式(2)と式(3)から、単位時間あたりの流入熱量 W と結果として生じる電流 i_s の関係は、ラプラス変換で、

$$\frac{i_s}{W}(s) = \boxed{\phantom{\frac{K_e s}{\tau_i s + 1}}} \quad (4)$$

と表現できる。この焦電センサを、図4に示したようにオペアンプに接続して用いるものとするれば、この回路の電流 i_s と電圧出力 e_o の関係は、ラプラス変換で

$$\frac{e_o}{i_s}(s) = \boxed{\phantom{-\frac{K_e s}{(\tau_i s + 1)(\tau_e s + 1)}}} \quad (5)$$

と表現できる。結局、赤外線として入ってきた熱 W と出力電圧 e_o の関係は、

$$\frac{e_o}{W}(s) = -\frac{K_e s}{(\tau_i s + 1)(\tau_e s + 1)} \quad (6)$$

で与えられる。ここで、 $K_e = \boxed{}$ 、 $\tau_i = \boxed{}$ 、 $\tau_e = \boxed{}$ である。

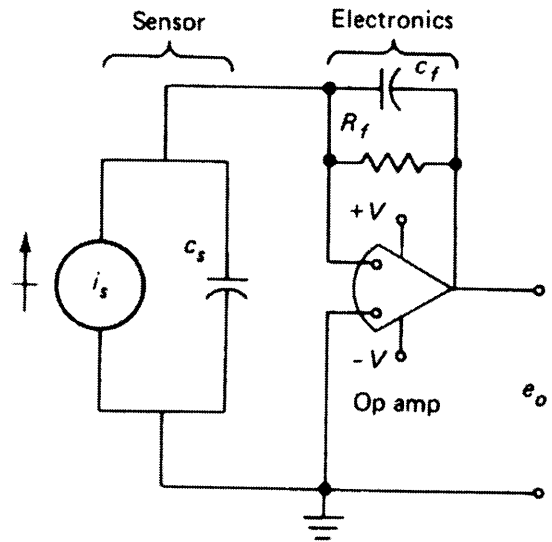


図4 焦電センサの回路

問： 式(6)で与えられる伝達関数の周波数特性（振幅特性のみ）を、両対数グラフとして示しなさい。ただし、 $K_e = 1$ 、 $\tau_i = 0.1$ 秒、 $\tau_e = 10^{-3}$ 秒とする。なお、曲線の平坦部、折れ曲がりの位置、直線部の勾配を、値として書き入れること。