

# 焦電型検出素子による気象衛星搭載用赤外放射計\*

山 香 英 三\*\* 土 屋 清\*\*\*

## 1. ま え が き

自然環境測定用の赤外放射計の進歩は、最近著しいものがある。観測目的に応じたものも数多くアメリカで開発されており、それらについては前に紹介した<sup>1),2)</sup>。赤外放射計のうち、大気窓領域(8~12 $\mu$ )帯のエネルギーを捕捉する放射計は、表面温度測定のために最も勝れたものの一つである。本報では現在アメリカの気象衛星に搭載されているサーミスター・ボロメータ検出素子よりも勝れた特性を持つ焦電型素子を利用した大気窓領域測定用赤外放射計を開発したので、その概要を報告する。

## 2. 焦電型素子の原理

あらゆる結晶形は11の中心対称型と21の非対称型とに分かれ、後者のうち10の結晶形が自発分極を持っている。この自発分極は、温度の関数であるから、自発分極による表面自由電荷も温度によって変化する(焦電効果)。従って赤外線照射によって結晶素子の温度が変化すれば、表面電荷の変化、すなわち電圧の変化が観測される。これが焦電型素子の原理である。

## 3. 焦電結晶材料の選定

自発分極は外部からの印加電圧によって分極方向を反転できるものが多く、これらは一般に強誘電体と呼ばれるが、焦電素子としては自発分極の温度変化が大きければよく、強誘電体である必要はない。しかし焦電係数の大きい材料は強誘電体に多い。

焦電型検出素子の感度をあげるためには、一定の赤外線入力に対して、(1)先ず素子の熱容量を小さくし、

熱伝導度を抑えて素子の温度上昇をなるべく大きくすること、(2)単位温度変化に対して表面電荷量  $P_s$  の変化すなわち焦電係数  $dP_s/dT$  を大きくすること、が一般的方針となる。検出素子の熱容量は定圧比熱  $C_p$ 、密度  $\rho$ 、面積  $A$ 、厚さ  $d$  の積 ( $C_p \rho A d$ ) で与えられるから材料選択基準は、 $\left(\frac{dP_s}{dT}\right) \cdot (C_p \rho)^{-1}$  の大きなもののなかで光学系と組み合わせ易いように正確な微小形に加工できる加工性のよいものということになる。第一表には種々の誘電体の常数を示してある。

素子の温度を低温から上げて行くと、 $P_s$  は一般に徐々に減少し、ある温度に近づくとき急激に減少してついには消滅する。この温度がキュリ温度  $T_c$  である。TGS(硫酸グリニン)のように  $T_c$  が室温に近いと  $dP_s/dT$  も温度の関数となって感度が変化し、 $T_c$  以上では焦電効果が無くなる。さらに素子を  $T_c$  以上に上げてしまうと多数の自発分極の分域が生じてすべての双極子が同一の方向に揃わなくなるので、 $P_s$  の絶対値が減少する。従ってこの場合再び単一分域化する操作が必要となるが、微少薄片にした素子についての操作には種々の問題点がある。以上の理由から室温近くに  $T_c$  を持つ材料は、実用的な見地から望ましくない。

焦電材料は殆どが絶縁物で焦電素子の抵抗値は  $10^{10} \sim 10^{12} \Omega$  程度である。そのために誘電率  $\epsilon$  が大きいと入力容量が大きくなり、電気時定数(CR)が長くなる。この点から  $\epsilon$  の小さい材料が望ましいことになる。

衛星用材料としては上述の一般的の性質のほかに宇宙放射線や衝撃加重にも耐えられる硬質であることも必要である。良質の結晶を得易いので従来から多くの研究<sup>3)4)5)</sup>が行なわれてきた TGS 結晶は、材料の性能指数(Figure of Merit)  $(dP_s/dT) \cdot (C_p \rho)^{-1}$  の値は大きい、水溶性であること、 $T_c$  が約 50°C で室温に近すぎるという欠点のほかに衛星用素子材料としての前記の条

\* Pyroelectric Infrared Radiometer for a Meteorological Satellite

\*\* E., Yamaka, 松下電気株式会社

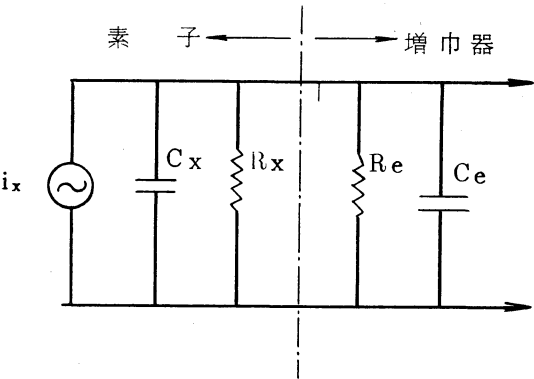
\*\*\* K., Tsuchiya, 気象庁予報部予報課

—1970年3月13日受理—

—1970年3月30日改稿—

第1表 焦電誘電体材料の常数

| 材 料                | 融点<br>(°C) | キュリ<br>温度<br>(°C) | $\epsilon$ | $P_s$<br>( $\frac{\text{Coul}}{\text{cm}^2} \times 10^6$ ) | $\frac{dP_s}{dT}$<br>( $\frac{\text{Coul}}{\text{cm}^2 \cdot ^\circ\text{K}} \times 10^8$ ) | $\frac{dps}{dT} / C_p \rho$<br>( $\frac{\text{Coul} \cdot \text{cm}}{\text{Cal}} \times 10^8$ ) | 備 考                                                                |
|--------------------|------------|-------------------|------------|------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| TGS                |            | 52                | 40         | 2.5                                                        | 3.5                                                                                         | 8.7                                                                                             | 水溶性                                                                |
| BaTiO <sub>3</sub> |            | 120               | ~4000      | 24                                                         | 6                                                                                           | 2.8                                                                                             | 蝶型結晶                                                               |
| LiNbO <sub>3</sub> | 1260       | 1190              | 43         | 71                                                         | 0.6                                                                                         | 0.36                                                                                            |                                                                    |
| SKL                | ~1430      | 145               | ~1200      | 28                                                         |                                                                                             |                                                                                                 | Sr <sub>4</sub> KLiNb <sub>10</sub> O <sub>30</sub>                |
| SBN                | ~1500      | 130               | ~ 500      | 28                                                         | 6                                                                                           |                                                                                                 | Sr <sub>25</sub> Ba <sub>25</sub> Nb <sub>10</sub> O <sub>30</sub> |
| LiTaO <sub>3</sub> | 1650       | 650               | 43         | 50                                                         | 1.9                                                                                         |                                                                                                 |                                                                    |



第1図 焦電型検出素子の等価回路

件を満たさないで適当でない。これに対して酸化物誘電体に、前記の条件を満たすものが多く、特に第一表の酸化物誘電体は焦電係数も大きく衛星用素子材料に適している。LiNbO<sub>3</sub>は結晶の完全性、加工性などに優れ、性能の揃った素子を歩留りよく作れる材料であることがわかった。

4. 焦電型素子の周波数特性

光吸収による素子の温度変化を利用するボロメータ素子は、光電現象を利用する光電素子に比べて一般に応答速度が遅いという欠点がある。そこで焦電型素子の特性を考えてみる。

第1図は焦電型素子の等価回路で、C<sub>x</sub>、R<sub>x</sub>は素子の容量と抗抵、C<sub>e</sub>とR<sub>e</sub>は増幅器入力側のそれで、それぞれ10pF、10<sup>11</sup>Ω、1pF、10<sup>10</sup>Ω程度の場合が多い。周波数f(角周波数ω=2πf)の赤外線が人射したとき熱容量C<sub>p</sub>・ρ・Aと熱伝導BAT(B、Tはそれぞれ単位面積当りの熱放散と絶対温度)との間に熱エネルギーの平衡式(1)が成り立つ。

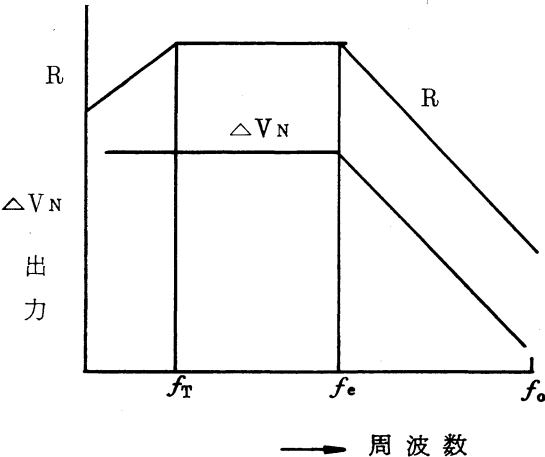
1/2 α I<sub>0</sub> e<sup>iωt</sup> A = C<sub>p</sub>・ρ・A・l・dT/dt + BAT (1)

(α、I<sub>0</sub>、t、jはそれぞれ吸収係数、赤外線強度、時間、jは虚数単位で数学で使うiと同じ)。赤外線による電流i<sub>λ</sub>は、

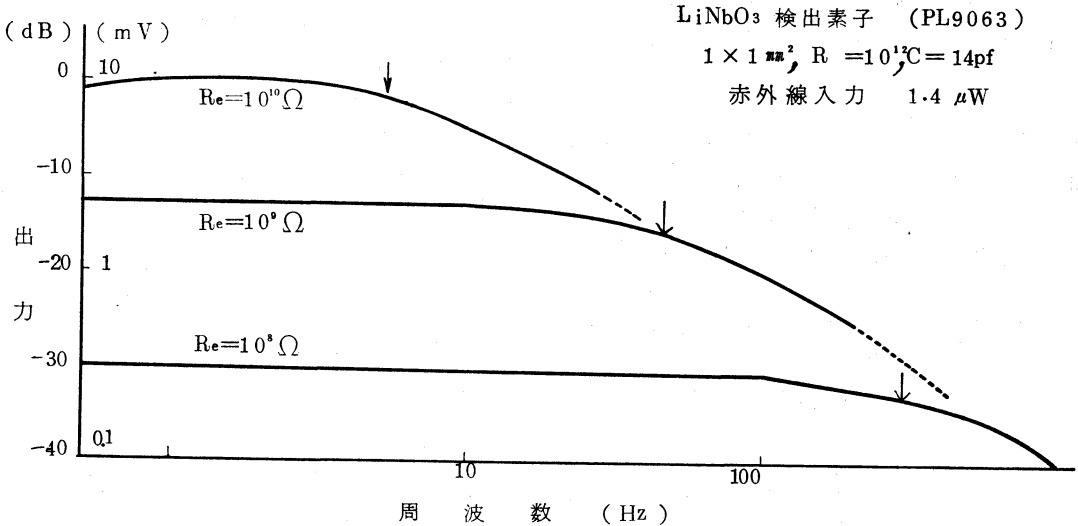
i<sub>λ</sub> = A dP<sub>s</sub>/dT dT/dt (λは波長) (2)

で表わせるのでこれによる素子電極間の電圧V<sub>o</sub>と赤外入力エネルギーAI<sub>0</sub>の比、つまり感度R(V/W)は計算の結果として、

R = ωατ<sub>e</sub> dP<sub>s</sub>/dT (1 + ω<sup>2</sup>τ<sub>T</sub><sup>2</sup>)<sup>-1/2</sup> (1 + ω<sup>2</sup>τ<sub>e</sub><sup>2</sup>)<sup>-1/2</sup> (3)



第2図 焦電型検出素子のRとΔV<sub>N</sub>の周波数特性



第3図 焦電型検出素子の入力抵抗による出力特性の変化

となる。ここで  $\tau_T = C_P \cdot \rho \cdot l / B$  (秒) は熱時定数,  $\tau_e = RC$  (秒) は素子と増幅器入力側の抵抗と容量の並列回路による電気時定数であって前者は1~10秒, 後者は0.01~1秒程度である。

(3)式から感度, すなわち電気信号の周波数特性を考えると

$$f \ll \frac{1}{2\pi\tau_T}, \quad \frac{1}{2\pi\tau_T} < f < \frac{1}{2\pi\tau_e}, \quad f \gg \frac{1}{2\pi\tau_e}$$

が成立する低, 中, 高の周波数に対して  $R$  はそれぞれ  $f$  に比例, 無関係, 反比例となる (第2図)。

いっぽう素子の雑音  $\Delta V_N$  が抵抗  $R$  による熱雑音で決まる理想条件を考えると,

$$\Delta V_N = \sqrt{4RTk(1 + \omega^2\tau_e^2)^{-1/2}}$$

$$(k \text{ は Boltzmann 定数}) \quad (4)$$

であり,  $f \gg \frac{1}{2\pi\tau_e}$  では  $f$  に反比例する, 従って出力

信号  $S$  と雑音出力  $N$  が高周波数側で共に  $f$  に反比例して減少することになるので,  $S/N$  は増幅器自体の雑音が問題となるような高い周波数  $f_0$  までは一定であることになる。

そこで  $f_0 = \frac{1}{2\pi\tau_e}$  まで一定の増幅度を持ち,  $f > f_0$  の高周波側では増幅度が  $f$  に比例して増大する増幅器 (High Frequency Boost Amplifier) を用いれば, 出力信号と  $S/N$  の両方が  $f_0$  まで一定の赤外線検出器が作れることになる。このような特性は, 焦電型素子が抵抗

変化型ではなくて, 電荷量が増加する容量素子であるために, 出力信号が (3) 式, 雑音出力が (4) 式のような周波数特性を持つことに起因する。

焦電型素子の周波数特性を改善する他の方法として, 増幅器側の入力抵抗を小さくする方法がある<sup>9)</sup>。このとき  $f_0$  は  $\frac{1}{2\pi CR}$  に従って高周波側に移動するので, 第2図に従って出力信号, 雑音出力の両者が周波数に無関係な領域もこの  $f_0$  まで拡大されることになる。しかしこの場合は方法が簡単だけに第3図に見られるように出力が低下するのはやむを得ない。

以上の2方法で焦電型素子では簡単に広い周波数帯域のとれる点がサーミスタ・ボロメータ素子にない特徴であって高い周波数まで使える素子といえる。

## 5. 検出器の製作とその特徴

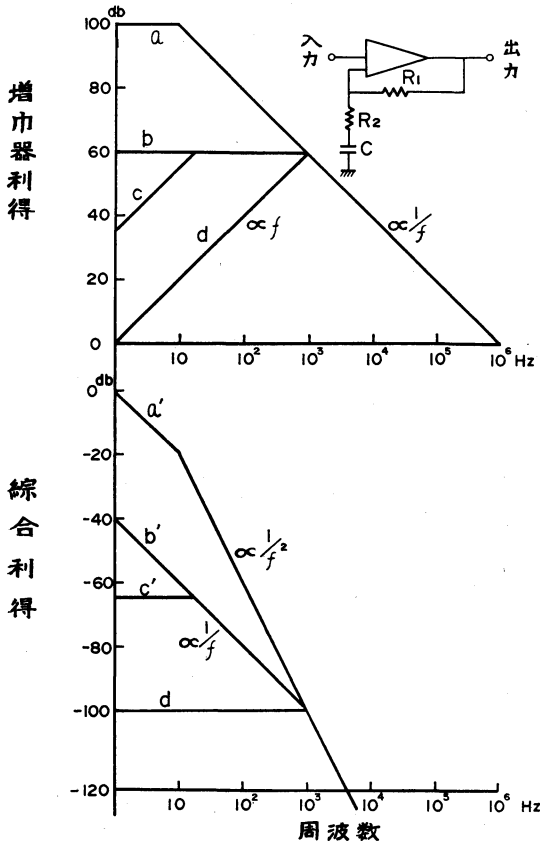
検出素子としては, 単一分極操作の済んだ単結晶を分極軸に垂直に切断し, 15~20 $\mu$  の厚さまで研磨する。大きさは光学系との組合せを容易にするために  $1 \times 1 \text{ mm}^2$  を選んだ。次に金属電極を両面に蒸着する。支持方法としては熱容量や熱放散から種々のものが考えられるが, 耐震性を考えて石英柱台に接着し, その高さを変えることによって必要な熱放散係数を得ることができた。

焦電型素子の抵抗は  $10^{10} \sim 10^{12} \Omega$  と非常に大きいので, これに用いる前置増幅器は入力抵抗  $R_e$  を大きくすることが必要で, しかも低雑音であること, 特に入力回路を短かくして誘導を避けること, 端子の漏洩抵抗を高くすることなどが重要になる。このために電界効果型ト

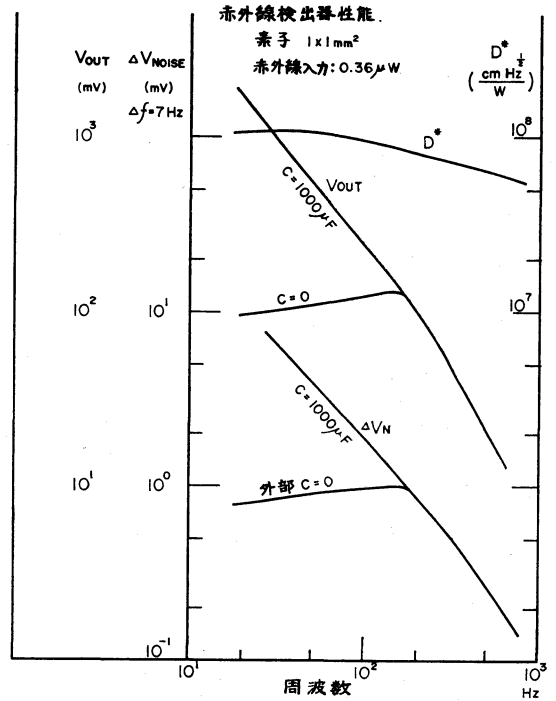
ランジスタ (FET) を初段に使った前置増幅器を開発してこれを素子と一緒に小型ケース内に真空封入して小型化した。

前節に述べた High Frequency Boost Amplifier としては、低周波帯域で負帰還をかけた演算増幅器 (Operational Amplifier) を組込んである。演算増幅器に負帰還をかけないいわゆる開ループ利得は第4図aで示される。これの利得が一定である周波数帯域と利得の安定性とを増すために、 $R_1$  と  $R_2$  による負帰還をかけた場合の利得は同図のbで示され、増幅利得は  $R_1/R_2$  で決定される。帰還回路に  $C$  を挿入すると、同図cのように  $f \approx 1/2\pi CR_2$  から低周波にかけて利得が  $1/f$  で減少し High Frequency Boost Amplifier となる。

既に前節で述べたように  $f \gg 1/2\pi\tau_e$  では素子の電気信号は  $1/f$  で減少する。素子の信号を有効に取り出すために FET の入力抵抗は、なるべく大きくするので、 $1/2\pi\tau_e$  は 1 Hz 程度となり、使用周波数帯域では電気



第4図 演算増幅器と総合利得の周波数特性



第5図 開発した焦電型赤外線検出器の性能

信号は  $1/f$  で減少すると考えてよい。従って第4図 a, b, c の周波数特性を持った演算増幅器による総合特性はそれぞれ第4図 a', b', c' のようになる。

特に帰還回路  $R_1$  と  $R_2$  とによる一定利得領域の最高周波数が  $1/2\pi CR_2$  に等しくなるように選んだ場合は、演算増幅器の利得特性は第4図dのように山型となり、総合特性は、第4図d'のように  $f=1/2\pi CR_2$  まで一定で、これよりも高波側では  $f^2$  に反比例して減少する。このことは演算増幅器よりも前の回路で発生する雑音についても全く同様である。

衛星用検出器に入る信号は、ある特定の周波数帯域を持っていると考えられるので、総合特性としてはこの帯域で一定の利得を持ち、それ以上の周波数ではなるべく急激に利得が減少してその雑音を抑制できることが望ましい。その意味で第4図 d' 特性は衛星用検出器として望ましいと言える。第5図に製作した  $LiNbO_3$  素子を用いた検出器の性能を示す。  $1/2\pi CR_2$  を 100Hz に選んであるが第4図 d' の特性が実現されていることがわかる。入力信号が一定の周波数だけを持ち、帯域幅を持たせるよりも出力を増大させる方が望ましい時には、検出器の外部に簡単に  $C$  を並列に追加して  $1/2\pi CR_2$  を

低域側に移動させればよく、 $1000\mu\text{F}$  を外部容量に用いたときの变化も第5図に示してある。

真空封入した検出器の赤外線透過窓として  $\text{Ge}$  単結晶板 (厚さ  $1\text{mm}$ ) を使用しているから、 $2\sim 30\mu$  の範囲にわたって感度は波長によらない。衛星用として  $8\sim 12\mu$  や  $15\mu$  帯だけを使用する場合は適当なフィルターを前面に置くか  $\text{Ge}$  窓自体に多層蒸着膜フィルターを付けばよい。さらに感度を必要とする場合は  $\text{Ge}$  結晶の半球型レンズを窓材として使用すれば、その集光作用により感度がやく1桁増大する。

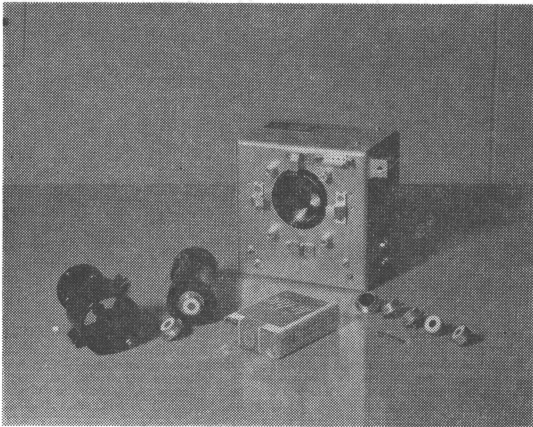


写真 衛星用に開発した検出素子、前置増幅器との組合せ、光学系と組合した地平線検出器

写真は前述の検出素子と前置増幅器を同一ケース内に真空封入した赤外線検出器その他を示す。一緒に写っている煙草から大きさの概要がわらう。

## 6. サーマistor・ボロメータ素子の比較

赤外線検出素子としての性能評価は、NEP (Noise Equivalent Power) または  $D^*$  (Detectivity) で示される。前者は雑音出力に等しい出力信号を与えるのに要する赤外線入力強度で、NEP が小さいほどよい素子を示す。後者は  $\sqrt{A}/\text{NEP}$  だから逆に  $D^*$  値の大きいほど勝れた素子ということになる。われわれの開発した焦電素子の  $D^*$  は  $5 \times 10^7 \sim 10^8$  程度で同一面積のサーミスター素子の  $2 \sim 5 \times 10^7$  に比較すれば勝れている。

焦電型素子は第4節で説明したように容量素子としての特性から高い周波数まで  $S/N$  が一定であることに特徴がある。これを利用して前節で述べたような低周波帰還型演算増幅器と結合して、特定周波数まで感度と  $D^*$  が一定であるような検出器を作ることができた。いっぽうサーミスター素子では雑音は  $\sqrt{f}$  に反比例して減少す

るので、 $S/N$  は  $\sqrt{f}$  に反比例して悪くなる。従って焦電型素子のほうがより高い周波数まで使用できる点でも勝れている。

さらにサーミスター素子は、抵抗変化を利用しているために電気信号に変換するためのバイアス電源を必要とし、その大きさは感度を上げるため  $\pm 100\text{V}$  程度の電圧であることが多く、衛星内の  $\pm 10\text{V}$  程度の共通電源を利用できないので別電源を必要とする。いっぽう焦電型素子はバイアス電源を必要としないので使用に便利である。

## 7. 結論と今後の問題点

以上のことから焦電型素子は、感度周波数特性、簡便さなどの点から、サーミスター素子よりも気象衛星搭載用の赤外線検出器として勝れていることがわかる。

この検出器は、 $\text{LiNbO}_3$  結晶から作った素子を高入力抵抗をもった FET 増幅器と低域帰還型演算増幅器と一緒に真空封入して小型で使用が容易で、必要とする周波数まで一定の感度と  $D^*$  を有し、それ以上の不必要な高域側での雑音を急減することができるので従来のアメリカの衛星で使われているサーミスター放射計よりも勝れたものであると期待される。

筆者の1人 (山香) は最近アメリカの気象衛星センターで Barnes 社の赤外放射計の製作を担当していた技術者と意見を交換する機会があったが、彼もこれからの衛星用赤外放射計として常温用としては焦電型素子が勝れているという意見であった。しかしアメリカでは気象衛星がますます大型化し、そのために冷却型の光電素子を用いた放射計の搭載が可能になり、高分解能を目指すことになるだろうとのことであった。そこで今後研究すべき点についてもふれておこう。

衛星の大きさに制限があり、冷却型のものが使用できない場合や高感度を必要としない場合は常温で使用できる焦電型放射計がよい。第2節で述べたように、 $(dPs/dT) \cdot (1/C_p\rho)$  のより大きな材料を使用すれば性能はさらに大きく改善できる。この値が大きく、加工性に勝れた良質の誘電体結晶の開発が必要である。

他方衛星に搭載できる冷却器では  $100^\circ\text{K}$  が限度と考えられ、検出すべき赤外線波長が  $10\mu$  から  $15\mu$  ぐらいであるから  $\text{Cd}_{1-x}\text{Hg}_x\text{Te}$  や  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$  結晶による光電素子が最も有望と思われる。これらは結晶母体の光電効果だから吸収係数が大きいので素子を薄くでき応答速度が良いという利点がある。難点は結晶の製作技術が  $\text{Ge Au}$  などの赤外線素子に比べて困難なことである。冷却装置

とともにその技術開発が必要である。

不必要な波長領域の赤外線を除く雑音を少なくする近接赤外線の分離のためフィルターの開発も必要である。狭い領域の赤外フィルタは多層蒸着膜が用いられているが日本でも早急にその製作技術を完成する必要がある。さらに高分解能が必要な場合は回析格子が必要であるが、小型、軽量、耐震性に重点を置いて開発すべきであろう。

以上述べたように光学系との組合せを容易にできる  $\text{LiNbO}_3$  結晶を使用しての  $1 \times 1 \text{ mm}^2$  の正確な素子を製作する技術は十分に実用に堪えるまでに確立できたと考えてよい。

おわりに論文のまとめにあたって御助言を頂いた東京

航空気象台の神子敏朗予報官、気象研の村井潔三、加納宗靖の両博士に謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 土屋 清・山香英三, 1970: 気象衛星搭載用赤外放射計について, 天気, **7**, 265-272.
- 2) 山香英三, 1970: 焦電効果と赤外検出器への応用, 電子材料, **9**, 155-160.
- 3) H.P. Beerman, 1967: Pyroelectric infrared radiation detector. Ceramic Bulletin, **46**, 737-740.
- 4) J.H. Ludlow et, al. 1967: Infra-red radiation detection by the pyroelectric effect. J.of Scientific Instrument, **44**, 691-696.
- 5) 高見勝巳他, 1968: 焦電効果を利用した赤外線検出器, 応用物理, **37**, 147-156.

#### 気象学会および関連学会行事予定

| 行 事 名                                                                               | 開催年月日           | 主催団体等      | 場 所   |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|------------|-------|
| 北海道支部研究会                                                                            | " 3月9日          | 北海道支部      | 北海道大学 |
| 春季講演会                                                                               | " 3月25日         | 日本気象学会     | 海洋研究所 |
| 海洋と気象のシンポジウム                                                                        | " 4月6日          | 日本気象学会, 他  | 気象庁   |
| 日本気象学会総会<br>および春季大会                                                                 | " 5月24日<br>~29日 | 日本気象学会(東大) | 気象庁   |
| THIRD INTERNATIONAL<br>CONFERENCE ON WIND<br>EFFECTS ON BUILDINGS<br>AND STRUCTURES | " 9月6~11日       | (気象学会後援)   | 東 京   |