

地学環境の遠隔探知 赤外線 の 地 学 へ の 応 用 に つ い て

④

長 谷 紘 和

放射計 (radiometer) およびスペクトロメーターは電磁波 (EMR) の強さをある波長域で測定する装置である。放射計は EMR の紫外線からラジオ波までの波長領域を測定するのに使用されるが、ふつうもっともよく用いられるのは、赤外域の測定に用いられる赤外線放射計 およびマイクロ波領域で用いられるマイクロ波放射計である。

放射計とは、非映像表示型の測定装置に用いられ、映像表示型の場合は撮像装置 (scanner あるいは imager) と呼ばれる。赤外放射計はまたエネルギー量を温度に変換して、温度計として使用することができる。この場合物体の放射率が黒体のそれより小さいので温度が低めに出る欠点はあるが、間接的に測温できるのが最大の利点である。放射計および撮像装置の心臓ともいべきものは、放射エネルギーを電気信号に変換する検出器である。

赤 外 線 検 出 器

赤外線検出器は熱検出器と光検出器の2つに分類できる。両者の特色は

熱 検 出 器……赤外線を熱効果としてこれを受け、受信部の温度上昇が電気信号に変換されるもので、熱電対、ボロメータなどがこれに属する。この型の検出器は分光器用の検出器として古くから実用化されている。

光 検 出 器……入射赤外線は受信部の電子系に吸収されて、電子の他のレベルへの移動が生じ、受信部の電気的性質が変化することを利用する。受信部の半導体物質の進歩によって開発された、比較的新しい型の検出器で、入射赤外線の変化に追随しうる速度はマイクロ秒級できわめて短い。光伝導セル(photoconductive cell)、photovoltaic 検出器、photoelectromagnetic 検出器などがこの中に含まれる。

一般にこれらの検出器は冷却使用することによって有効検出波長領域が長波長側にのびる。常温付近の物体の測温には、液体窒素、液体ヘリウムなどで冷却しなければならない。

検出器の動作性能、あるいは他検出器と比較するためには、知っておかなければならないパラメーターが幾つかある。

i) 感 度 (responsivity) 検出器に W watt/cm² の放射エネルギーが面積 A なる受信面に入射した場合に発生する信号を S ボルトとすると、responsivity R は

$$R = \frac{S}{W \cdot A} \text{ volt/watt} \text{ で与えられる} \quad \dots \text{IV-①}$$

ii) 信 号 雑 音 比 (signal to noise ratio, S/N 比) 雑音には検出器の窮極的な雑音で、検出器周囲部の物体の放射エネルギーを検出器が吸収することによって生じる背景放射雑音 (background radiation noise) の他、光検出器自体が持つ電子運動に伴う雑音が加わる。これらの雑音と対象物体からの信号との比を S/N 比という。S/N 比が 1 になった時対象物体の検出は不可能となる。

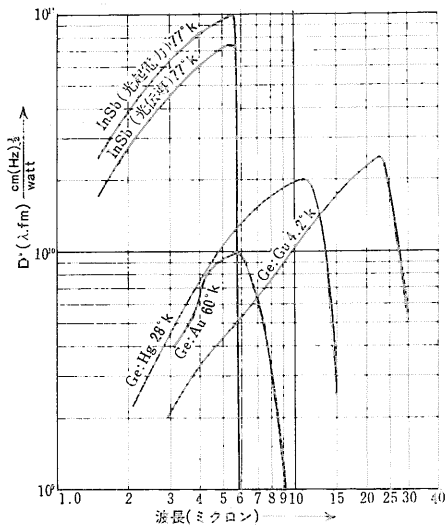
S/N 比は次の式で表わされる

$$\frac{S}{N} = \frac{\text{検出器上のエネルギー}}{N.E.P.} = \frac{NA_0 \rho E_0 T_A}{\sqrt{A \times \Delta f}} \dots \text{IV-②}$$

ここに

- N: 検出器上のエネルギー (光学系を通して与えられるのでこの場合はラジアンズである) watt/cm²·ster
- A₀: 光学系 (対物レンズ、鏡) の面積 cm²
- ρ: 瞬間視野 steradian
- E₀: 光学特性 (レンズの透過率、鏡の反射率あるいはフィルターの透過率などを総合したもの) 無単位
- T_A: 大気の透過率 無単位
- A: 検出器上に入射されるスポットの面積 cm²
- Δf: 信号のバンド幅 cps
- D*: detectivity cm·(cps)^{1/2}/watt (後述)

ここで信号のバンド幅についてもう少し具体的に詳しく述べよう。エアボーンによる赤外線映像は回転する平面鏡による地表の走査によって得られる (後述)。航空機が回転速度に比べて速くなると、地表面で走査されずに残る部分が生じる。この走査と航空機速度はまた航空機の高度によっても違ってくる。高空から



第1図 おもな走外線検出器の D^*
背景放射 = 295°K 視野 2π ステラジアン
(資料出所: 第2図参照のこと)

では瞬間視野によって囲まれる地表の面積も広がるので 鏡の回転速度はゆっくりとなる。これらの走査条件を規定するのがバンド幅 Δf である。次に Δf の計算法を示すが この計算では一般に次のような仮定に立って行なわれている。すなわち 各瞬間視野のエネルギーを記録するのに その瞬間視野が存在する時間の $1/2$ 要するものとする。そうすると 一秒間に走査する瞬間視野の解像要素 (resolution element)

Rは

$$R = \frac{2\pi}{\sqrt{\Omega}} \times (\text{一秒間における鏡の回転数})$$

$$= \frac{2\pi}{\sqrt{\Omega}} \times (\text{一秒間における走査線数}^*) = \frac{2\pi}{\sqrt{\Omega}}$$

$$\times \frac{V}{H\sqrt{\Omega}} = \frac{2\pi V}{\Omega H} \dots\dots \text{IV-3}$$

* 回転鏡が一面の場合

ここに

- $\sqrt{\Omega}$: 瞬間視野 ラジアン
- V: 航空機速度 cm/sec
- H: 航空機高度 cm

故にバンド幅 Δf は $\Delta f = \frac{1}{2} R = \frac{\pi V}{\Omega H} \dots\dots \text{IV-4}$

空中赤外線撮像装置は 上式の条件を満足するものでなければならない。また それは検出器の時定数の範囲内でなければならない。サーミスタなどの熱検出器では時定数が大きいので 空中赤外線撮像装置の検出器として使用されることはほとんどないといえる。

IV-4式をIV-2式に代入すると

$$\frac{S}{N} = \frac{NA_0^2 E_0 T_A}{\sqrt{A \cdot \Delta f} D^*} = \frac{\sqrt{\pi} ND_0 E_0 D^* \Omega T_A}{4F \sqrt{V/H}} \dots\dots \text{IV-5}$$

D_0 : 対物レンズの直径 cm

F: レンズのF数 ($F = \frac{\text{焦点距離}}{D_0}$)

ラジアンS と放射発散強度W (radiant emittance) との関係は前号で述べたように $W = \sigma T^4 = \pi N$ から求められる。故にIV-5式から実際の撮像時における地表面の検出器上におけるエネルギーおよび信号雑音比 (S/N 比) が求められる。一般には S/N 比は数千の単位である。なおこの S/N 比の他に撮像装置の性能を比較するのに noise equivalent temperature difference (NETD) という単位が使われることもある。これは 2つの異なった温度差を区別しうる能力を規定するものであるがここでは省略する。

iii) 雑音等価勢力 (noise equivalent power 略して N.E.P. という)

検出器で検出しうる最小入力を求めるもので 出力中で雑音の占める関係から導びかれる。すなわち N.E.P. は雑音Nボルトに等しい信号Sボルトを与えるような入力の値をいう。この値は いいかえれば雑音の大きさを responsivity で割ったものに等しい

$$N.E.P. = \frac{W \cdot A}{S} = \frac{N}{R} \dots\dots \text{IV-6}$$

iv) detectivity D^*

N.E.P. の逆数を detectivity と規定する。個々の検出器の受光面積の差や帯域の影響を規格化するために実際には次の式が用いられる。

$$D^* = \frac{\sqrt{A \cdot \Delta f}}{N.E.P.} \text{ cm(cps)}^{1/2} / \text{ watt} \dots\dots \text{IV-7}$$

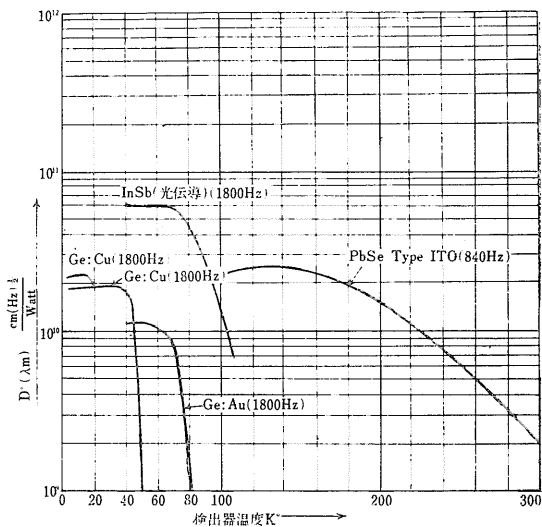
A: 面積 cm^2 Δf : バンド幅

V) 時定数 (time constant, τ)

検出器がどの程度の速さの変化に追随しうるかを示す値である。光検出器ではマイクロ秒単位である。

光検出器の性能は D^* で与えられる。この場合 D^* の値は入射赤外線の波長または光源によってもあるいは交流増幅器系を用いるときの断続周波数 バンド幅などにも左右される。代表的な検出器の波長と D^* との関係を図示すると次のようである(第1図)。

InSb Ge·Au Ge·Hg Ge·Cuなどは検出器として



第2図 おもな走外線検出器の作動温度によるD*の変化
 背景放射=295°K 視野 2π ステラジアン
 [資料出所: Santa Barbara Research Center 資料
 1967による第1図も同じ]

良く使用されている。これらの検出器には波長依存性がある。前述のように冷却剤で冷却すると有効検出波長領域が長波長に伸びる(第2図)。InSbは常温でも検出器として有効であるがD*は小さくなる。われわれが地質目的のために調査を行なう場合、灼熱した火山岩を除いて温度の対象は常温付近にある。このことは放射のピークが9~10ミクロンの波長部にある。大気中で地表からの放射エネルギーの透過率のよい波長域は8~14ミクロンであるから、理想的には8~14ミクロンの波長範囲で有効な検出器が望まれる。この範囲で有効な検出器としてはGe・Hg Ge・Cuなどがあり、アメリカではこれらの検出器が主として用いられている。この検出器は液体ヘリウム温度(4.6°K)で冷却使用しなければならず、液体ヘリウムの高価なわが国ではまだ使用されていない。

日本電気(株)によって設計された地質探査を目的とする空中赤外線撮像装置は、検出器にInSbまたはGe・Au(液体窒素77°Kで冷却使用)を使用している。この場合、常温付近の撮像調査において得られるデータの温度に対する忠実度はGe・Hg Ge・Cuなどに比べて欠けるであろう。検出器の冷却に使用される冷却剤のおもなものを第1表に示した。

赤外線放射温度計 (infrared radiometer)
 非映像型の赤外線放射温度計は次のような系をもっている。電磁波 (EMR) を集束さ

第1表 冷却剤と温度

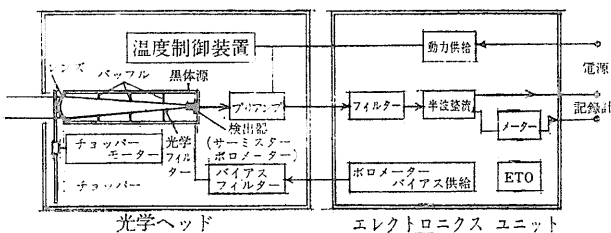
冷却剤の名称	測定条件	温度 °C	温度 °K
液体ラドン	沸点	- 62.0	211.15
炭酸	CO ₂ 固体と蒸気との平衡温度	- 78.5	194.65
キセノン	沸点	-108.6	164.55
オゾン	"	-111.1	162.05
クリプトン	"	-152.0	121.15
酸素	"	-182.97	90.18
アルゴン	"	-185.6	87.55
空気	"	-193.0	80.15
窒素	"	-195.8	77.35
ネオン	"	-246.0	27.15
水素	"	-252.5	20.65
ヘリウム	"	-268.6	4.55

絶対零度を-273.15°Cとしている
 ◎印は検出器の冷却剤として良く使用されるもの

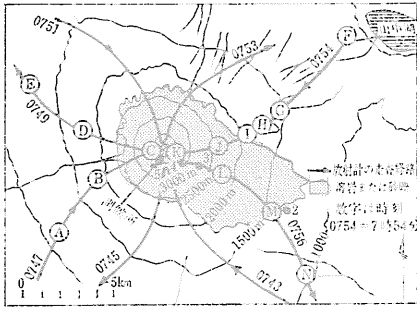
せる光学系EMRの波長を限定するフィルター系、入力を電気信号に変換する検出器、信号の増幅装置、および記録装置である。ここで地質調査所所有の赤外線放射温度計 Model PRT-4 (バーンズ社製) について簡単にご紹介する。本機は野外で使用できるようにコンパクトに設計されている。その構造は第3図に示すように、エレクトロニクスユニットと光学ヘッドからなっている。測温は光学ヘッドを被測温物体に向け、物体からの放射エネルギーを検出する。本機の検出器はサーミスタボロメーターを用いた熱検出器で、黒体洞内に設置され、一定温度(55°C)に保たれている。

入射赤外線は入射部におかれたチョッパーで断続して検出器に入射され、黒体洞の温度と比較されて電気信号に変えられる。この電気信号はさらに光学ヘッドに送られる。電子回路部ではこの信号を増幅して指示メーターに温度が示される。温度表示は一般には華氏であるが、調査所所有のものはセツ氏読みになっている。この放射温度計と同種のPRT-4を積載して、これまでわが国でも幾つかの機関によって航空機による地表面の温度測定実験が行なわれ、公表されている。

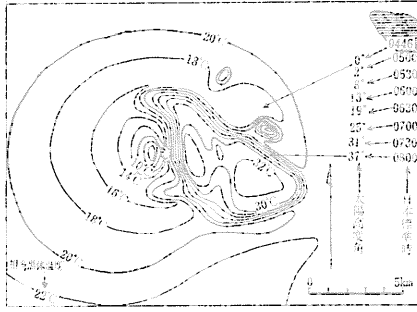
1967年7月11日、気象庁の土屋清氏は朝日新聞社機に塔乗し、朝4時から夕方までの地面、森林、水面、建物などの表面温度のほかに、富士山の山腹表面の地肌温度



第3図 放射温度計の構造 (PRT-4)



第4図a 富士山頂付近の表面温度を測定したコース



第4図b 富士山頂付近の表面温度の分布
(1967年7月11日 土屋清 1968)

測定を行なった。快晴の早朝7時すこしすぎからあかね色に輝きそびえ立つ富士山の各所の温度測定がなされた。氏によれば特に興味深いことは頂上付近の表面温度ですでに朝8時前に東斜面の海拔1,300m以上のところでは高さに無関係に30℃以上の温度になっており頂上近くの反対西側では4℃で水平距離わずか2kmぐらいの差で熱帯と寒帯ほどの差があった。富士山頂上付近の表面温度の分布と測定コースは図のとおりである(第4図a, b)。

赤外線放射温度計による温度は一般に接触温度よりも低く記録される。これは物体の表面が黒体でないこととまた放射エネルギーの大气中の透過ロスに原因する。

物体が黒体放射していると仮定するとき赤外線放射温度計の測定値から真の地表温度を求める式が土屋によって求められた。氏によればまずパラメーターとして減衰係数Dが次のように定義される。

$$D = \frac{\Delta T_{BB}}{\Delta T_s} \dots \text{IV-8}$$

ここで ΔT_s は真の地表面温度の時間および空間的変動である。時間が一定ならば測定した時間内の最大値と最小値の差を示す。 T_{BB} は放射温度計がキャッチした放射量から変換した相対黒体温度である。地表面で特に8~14ミクロンの波長域では物体の放射率は高く黒体に近くなる。たとえば水面は放射率およそ0.98と見積られている。ただし珪長質の岩石はかなり放射率が低い

ΔT_{BB} は ΔT_s に対応する相当黒体温度の変動量である。実測では ΔT_{BB} はつねに ΔT_s よりも小さい。さて次にIV-8式を次のように書きかえる。

$$D = \frac{T_{BB} - T_{CO}}{T_s - T_{CO}} \dots \text{IV-9}$$

T_{CO} は $T_{BB} = T_s = T_{CO}$ を満足するような特別な温度でかりにこれを等価温度と呼ぶ。等価温度とは放射温度計がとらえた放射量から得た相当黒体温度が真の表面温度となる温度である。

T_{CO} がわかりある1か所で真の表面温度 T_s がわかればIV-8式のDが計

算できる。このDを使って他の場所の真の表面温度 T_s が次のように非常に簡単に計算できる。すなわち

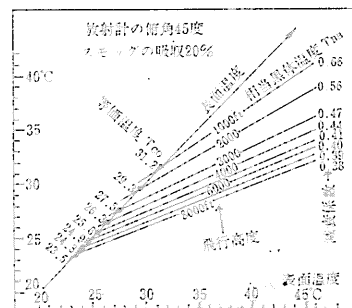
$$T_s = T_{CO} + (T_{BB} - T_{CO}) / D \dots \text{IV-10}$$

なおここでDも T_{CO} も大气中のスモッグの吸収係数が一定であると仮定しても飛行機高度hと赤外線放射温度計の角度 η の関数となる。したがってDと T_{CO} をhと η の関数としてあらわせば真の表面温度 T_s が求まることになる。今スモッグの吸収20%放射温度計の角度45度に対する T_{CO} とDの値を示せば図のようになる(第5図)。

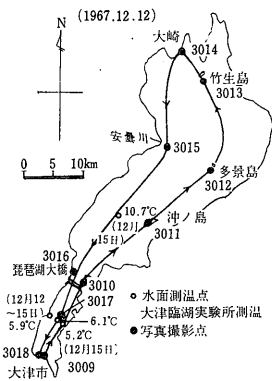
この図で飛行機の高度2,000フィート(約608m)放射温度計の測定温度が35℃とするとこのときの T_{CO} が29.3℃でDは0.56だから真の表面温度 T_s はIV-10式から $T_s = 29.3 + (35 - 29.3) / 0.56 = 39.5^\circ\text{C}$ となる(土屋清 1968)

次にご紹介するのは同じく1967年12月12日アジア航測K.K.によって行なわれた琵琶湖における水温測定実験の例である。測定は12時01分~12時29分の28分間にわたり琵琶湖を一周するコースで行なわれた。結果の一例は図のとおりである(第6図a, b)。

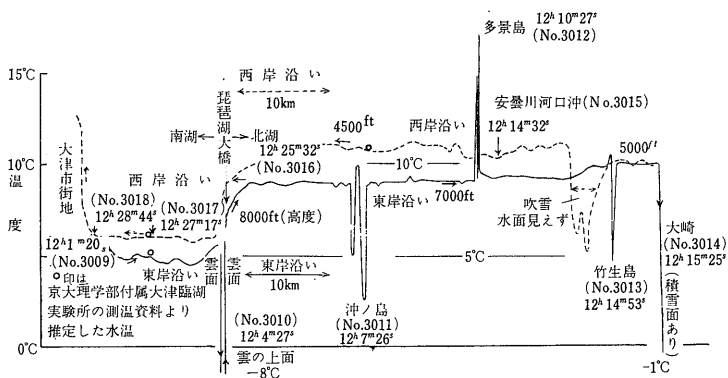
この実験でも赤外線放射温度計によって示された温度は京都大学大津臨湖実験所の测温データから推定した



第5図 飛行高度と表面温度
(土屋清 1968)



第6図a 琵琶湖測温飛行コース



第6図b 琵琶湖水面温度測定値(1967年12月23日)12h2m~12h29m

〔田中邦一 丸岡大祐 1967による〕

水温よりもいくらか低い値を示している(田中邦一 丸岡大祐 1968)。

以上の測温例でも分かるように 温度値が実測値より低く記録されることは原理的な欠点であるが さらに現在市販されている放射温度計の欠点は 瞬間視野が2度とかなり広いことである。したがって航空機高度たとえば高度1,500m からの瞬間視野は測定半径26.25mの円錐状となり 測温はこの瞬間視野の平均エネルギー(ラジアン)の記録値となるので 温泉などの小規模の熱異常はとらえられないうらみがある。しかし遠隔的に物体表面の温度を測定し得ることから 次に述べる赤外線撮像装置との併用によって定量的な精度を高めることができよう(第7図)。

赤外線撮像装置 (infrared scanner)

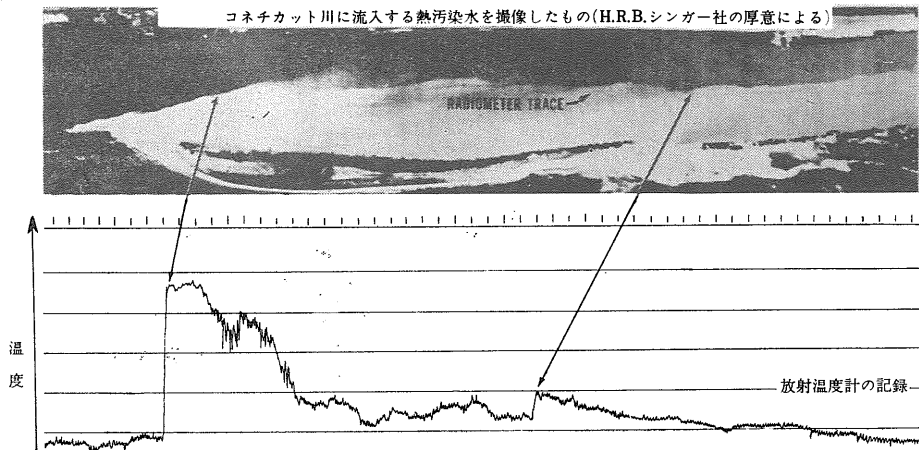
赤外線撮像装置は前節で述べた赤外線放射(温度)計と同様 EMR を集束させる光学系 EMR の波長を限定するフィルター系 EMR を電気信号に変換する検出器 信号の増幅装置を備えている。さらに増幅された

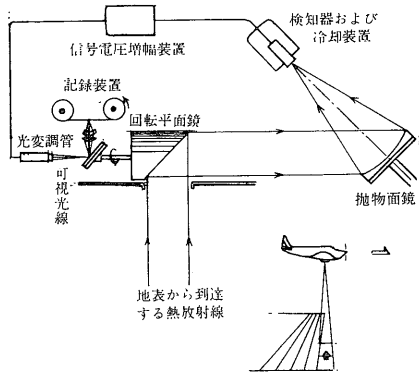
信号は映像変換管 (image converter tube) によって可視域に変換され これがフィルム上に あるいは磁気テープ上に記録される。特に入射 EMR の瞬間視野をできるだけ絞ってスポット状の瞬間視野をつくりそれによってある領域を走査させると その領域の放射エネルギー強度分布図が得られる。われわれが地学目的のために短時間で広い地表の放射エネルギー強度分布図を得るには 空中探査 (airborne) 形式をとるのがもっとも適していると考えられる。この場合走査の方法は 地表面に対して45度に傾斜した回転平面鏡によって一方向の走査を行ない 他方向は航空機の進行によってカバーする。その原理は図のようである(第8図)。

このようにして得られる赤外線映像は地表面の放射強度 (radiance) の分布図であり 厳密さにあまりとらわれないならば それは地表面の温度映像といえることができる。最終的に陽画として表現された映像の暗い部分は相対的に低い温度をあらわし 明るい部分は相対的に高い温度を示している(第7図参照)。

第7図 赤外線映像撮影と放射温度計による測定を同時に行なった例

コネチカット川に流入する熱汚染水を撮像したもの(H.R.B.シンガー社の厚意による)





第8図
空中赤外線撮像装置原理図

日本電気 IRV-III 型赤外線撮像装置

1960年7月 日本電気では 赤外線撮像装置 (infravision) の開発研究が開始され 1964年 公表されたものとしては わが国はじめての赤外線撮像装置 IRV-I 型が完成した(谷崎仁ら 1965). この装置は実験室用に設計されたもので 放物面鏡の光軸と45度の角度をなす回転軸の先に回転平面鏡がとりつけられ 平面鏡を 400 rpm に1回の割合で揺動させて 楕円渦巻状に視野を走査するものである。

この装置を用いて行なった地熱地帯における熱異常の撮像実験は成功で本誌にも紹介された(地質 ニュース No. 133, 142 および 196号)

この地熱異常を映像として面的にとらえる実験の成功と 1963年 アメリカ地質調査所の W. A. FISCHER らによって行なわれた ハワイ キラウエア火山の空中撮像実験の成功とによって 日本電気(株)ではただちに空中赤外線撮像装置 IRV-II 型(proto type)の試作開発が行なわれ これを改良した IRV-III 型が完成した(第9図) なおわが国では日本電気(株)と相前後して 富士通(株)

(旧神戸工業)においても空中赤外線撮像装置の開発が進められた. IRV-III 型の装置仕様のおもなものは次のとおりである.

○総合性能

視野	45度
瞬間視野	0.172度=9.0×10 ⁻⁶ ステラジアン
解像度	260本
最小検出温度差	1℃
適応航空機高度	0.5~3km
適応航空機速度	150~350km/h

○光学的性能

対物レンズ (Si)	f=368mm F数2.6
検出器 (Ge : Au)	D* = 3×10 ⁹ cm(cps) ^{1/2} /watt
使用赤外線波長域	1~10μ

○電気的性能

映像増幅器	120db 10cps~30kcps
所要電力	DC 24~28 ボルト 300 ワット以下

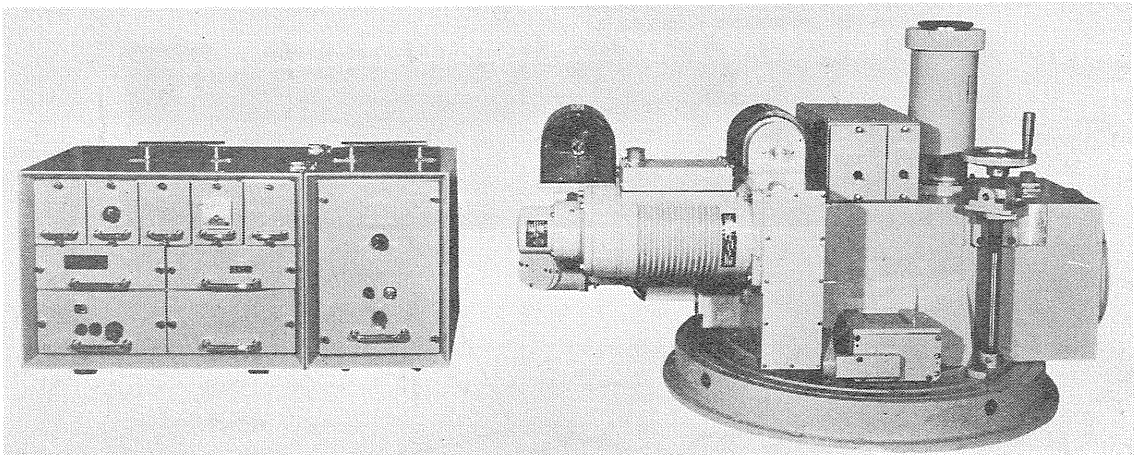
○その他

表示	70mm幅フィルム
冷却方式	液体窒素貯蔵式 77°K (連続動作 4時間以上)
重量	90kg

「パッシブ赤外線撮像装置の研究試作」試験研究終了届書. 日本電気(株) 1968年 による

映像のジオメトリー

エアボーン方式による映像撮影は走査が連続的に行なわれるために 航空機の縦ゆれ 横ゆれ および片ゆれの三大揺動運動によって常に影響される(この点については最近では安定装置の改良によって揺れの影響は非常にわずかとなっている) ほか 次に示すような特殊なジ

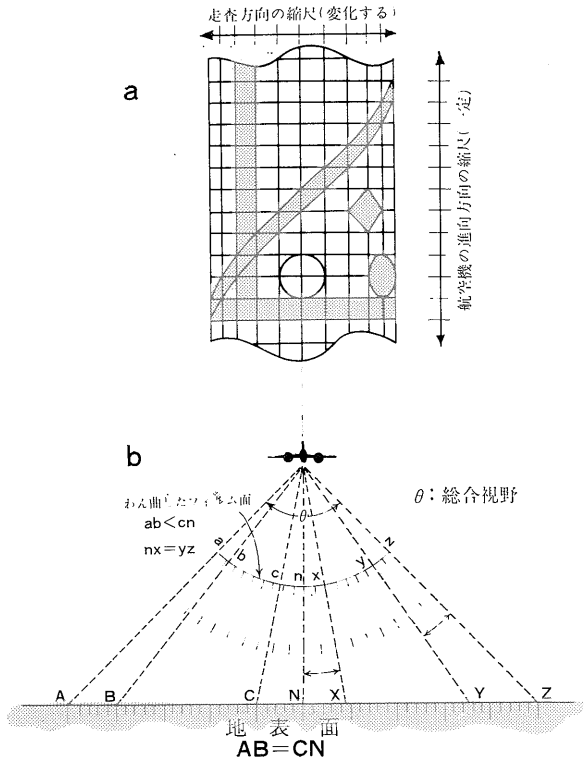


第9図 空中赤外線撮像装置 (IRV-III型) [日本電機(株)提供]

オメトリーを示す。第10図は映像の周辺部の瞬間視野の広がりを示すもので映像の上では走査方向に像の歪みが大きくなる。総合視野の広い(たとえば Daedalus 社の撮像装置の場合は120度ある)装置によって得られる映像をそのままモザイクして結び合わせることは不可能である。周辺部の像の広がりをさらに詳しく示したのが第11図である。

他に航空機が偏流の影響を受けて進行する場合地表上の点の位置は第12図に示すようにずれる。

これらの性質から赤外線映像は計測用には不向きでありわれわれ地質家が使用する場合でも直線状に延びる断層線が映像上には曲がって表現されるなどの影響があるから注意を要する。(筆者は応用地質部)

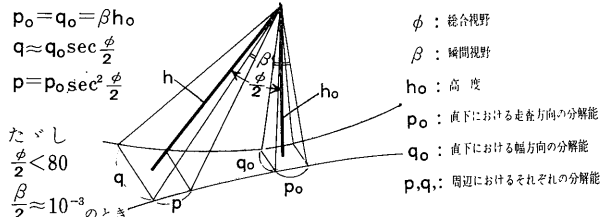


第10図 赤外線映像のジオメトリーを示す図 a, b (資料出所は第12図参照) と典型的な映像例 c (ミシガン州下の農地の目における映像 (9.5—14マイクロン) 農道のゆがみに注意 [デダルス社の厚意による])

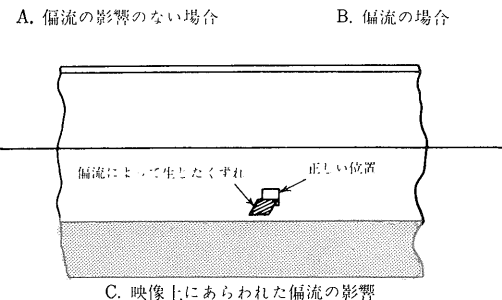
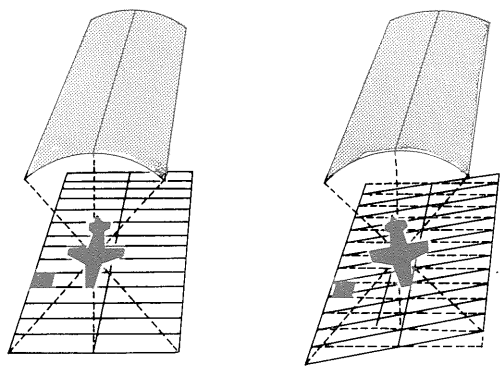
引用文献

Bramson, M. A., 1968, Infrared radiation : Plenum Press, 623 p.
 日本電気(株), 1968 パッシブ赤外線撮像装置の研究試作 35 p.
 Reeves, R. G., and others, 1968, Remote sensing : American Geological Institute, 179 p.
 Santa Barbara Research Center, 1967, Infrared detection : diagram
 田中邦一 丸岡大祐 1968 赤外線放射温度計 P R T-4 について : 写真測量 vol. 7, no. 2 pp. 90—97
 土屋清 1968 空から地表温度をはかる : 科学朝日 6月号, pp. 89—94

訂正 地質ニュース No. 198 46頁のIII-9式の説明でφの値が 5.6686 w/cm²·deg⁴ となっておりますが これは 5.6686×10⁻¹²w/cm²·deg⁴ のあやまりです。 おおびして訂正します。



第11図 周辺部の映像のひろがり



第12図 偏流の影響による像のずれ (Stingelin 1968による第10図も同様)