赤外線放射温度計 PRT-4 について

田中 邦一*・丸岡 大祐*

Introduction of Infrared Radiation Thermometer Model PRT-4

K. Tanaka, D. Maruoka

1. まえがき

最近の技術の進歩にはめざましいものがある。この中には、光あるいは電波などいわゆる電磁波のさまざまな波長域に対する開発利用がある。これは種々な電磁波波長域の検出装置の開発と小型化の結果にほかならない。特に、この小型化の成功は航空機あるいは人工衛星への搭載を可能にし、空中方式 (Ari bone) による遠隔探査¹⁾を促進させる事となった。日本における遠隔探査については可視域の波長と近赤外域の波長の一部を利用するいわゆる空中写真方式がもっとも広く用いられているが、その他の波長を利用した遠隔探査については通商産業省地質調査所の松野博士等^{2) 3)}による赤外線映像装置の開発と地温探査への応用のほか、気象庁予報課の土屋清博士による赤外線放射温度計を利用した地表温度の測定、あるいは海上保安庁の例等まだ数例を見るにすぎず、ようやく開発利用の緒

についた段階といえよう。

しかるに、純粋な学術的調査のみならず、地域開発海洋開発などに伴う各種土木工事の基礎調査も大型化し、かつ調査にも重点が置かれ、しかもこれらの調査期間は短く、精度は高く、結果は総観的なものが要求されてきている。このような社会的必要性を満足させるには、量的情報と質的情報を同時に提供する空中写真がこの上ないものとしてあらゆる分野で利用されてきたが、新たに温度の情報を得る手段として、アジア航測 K. K. では、空中写真同様空中方式により連続的に地表温度が測定できる赤外線放射温度計 PRT-4 (アメリカパーネス社製) を設備し、空中写真と結びつける事によって遠隔探査の幅を広げる努力を行ってきた。その結果は、種々な分野で応用できるものと思われる。

本稿では、種々な分野での利用に先立ち、赤外線放射温度計 PRT-4 と本機を使って試みた 2~3 の実例

Photo 1
光学ヘッド

Photo 2 本体

* アジア航測生産事業部地質課

について紹介してみたい。

2. 赤外線による温度測定の方法

通常、絶対温度が零度 (-273.16°C) 以上にあるあらゆる物体は、その温度に比例して原子や分子の固有振動を行なっている。同時にこの固有振動によって発生される電磁波を放射している。この放射強度と波長の関係を示したものが Fig. 1 である。これによれば、最大放射を示す波長は、温度が低くなるに従い長波長側に移行しており、すなわち太陽光 (6000°K) ではおよそ 5μ のところにあるが、常温附近の物体 (300°K) では $9\sim 10\mu$ のところにある。

さて赤外線とは、可視光線のプリズム分光によってみられる赤色端以上の長波長、およそ $0.7\mu\sim 1500\mu$ 位までの波長域の電磁波の総称であるが、この赤外線

Fig. 1 電磁波の放射強度と波長の関係

領域のうち $9\sim 10\mu$ 前後の波長を用い、物体からの赤外線放射を検出すれば、その強度差から物体の表面温度を物体に触れる事なしに測定できるわけである。これが赤外線による温度測定の原理である。

この赤外線検出には大別して、熱検出器と光検出器に分類される。このうち熱検出器とは、赤外線の熱効果*に主眼をおいてこれを受け、受信部の温度上昇を電気信号に変えて検出する装置を有するもので、熱電対サーミスタポロメーターがこれに属し、分光器用の検出器として古くから実用化されている。一方、光検出器とは、入射赤外線が受光部の電子系に吸収され、電子が他のレベルへ移動する際生じる受光部の電気的性質の変化を利用するものである。特に最近では、光伝導セル Photovoltaic 検出器, Photoelectromagnetic 検出器等入射赤外線の変化に追随しうる速度がマイクロ秒級の高感度の検出装置が開発されている。

熱検出器は波長特性が一様であるが、光検出器は比較的短波長の赤外放射線に対しては高い検出能力を持つが、長波長に対して感度は落ちるといわれている。

3. 赤外線放射温度計 PRT-4 の機構

本機はアメリカ、パーネス社製の赤外線放射温度計であり、特に携帯用に供せられるようバッテリー出力によって作動できるよう、また全体的にコンパクトに設計されている。本機の形体は写真 1 と 2 に示されるように、本体のエレクトロニクスユニット (電子回路部) と光学ヘッド (感温部) からなっている。Fig. 2 は本機の構造を詳しく示したものである。これを用いての測温は、先ず光学ヘッドを被測温物体に向け、物

* 物体の温度に比例して放射される電磁波のエネルギーは、他の物体にあたると一部は反射し、一部は透過するが、ある波長部分は吸収されて発熱する。特に、この効果が赤外線波長域では強くあらわれる。このため赤外線はしばしば熱放射線と呼ばれている。

Fig. 2 放射温度計の構造 (パーネス社製 Model PRT-4)

Fig. 3 大気中の選択吸収の様子

体からの放射エネルギーを検出する。検出素子はサーミスターボロメーターを用いた熱検出器で黒体錐状洞の底部についている。入射孔より入った赤外線はあらかじめ一定 (55°C) に保たれた黒体錐状洞から放射される赤外線と入光部チョッパーによって対比され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内部にあるプリアンプで増幅され、本体の電子回路部に送られる。電子回路部では、この信号を増幅して指示部のメーターに華氏 (°F) で示されるようになってい。と同時にその信号を取り出してオシログラフ等に記録することもできる機構を有している。

本機が利用している赤外線波長域は 8~14 μ で、測定可能な温度範囲は -12°C~+44°C である。スペクトルバンドが 8~14 μ に限定されているのは、赤外線の大気中の選択吸収をさけ空中からの遠隔探査ができるようにしてあるからである。Fig. 3 は大気中を伝わるスペクトルの選択吸収の様子を示すものであるが、図から分るように 14 μ 以上では非常に大きい吸収を示す。吸収帯と吸収帯の間の波長領域は“大気の窓”(Atmospheric window) と呼ばれ実際の測定対象となる部分であり、本機が用いているのもこの“大気の窓”の波長域に他ならない。この波長域の選択はフィルターによってなされ、短い波長の除去はアンチモナイドインゲウムにより、長い波長の除去はイラトランによってなされている。

以上が大体本機の機構であるが、本機的主要な性能をまとめると次の通りである。

温度測定範囲	-12°C~+44°C
精 度	0.2°C
測 定 距 離	30 cm~無限長
応 答 測 度	50 ms
観 測 視 野 角	2°
重 量	3 $\frac{1}{2}$ pond
光学ヘッド 本 体	13 $\frac{1}{4}$ pond
定格電圧その他	115 V AC $\pm 10\%$
	50c/s $\pm 5\%$

4. 本機の特徴

本機の構造については大体おわかりいただけたと思うが、この機械の特徴については充分理解し使用しないと、その効果を半減させることにもなりかねないので、本機の特徴について箇条書にまとめておく。

- (1) 赤外線の放射強度を検出することにより、あらゆる物体の表面温度を物体に触れずに遠隔測定できる。
- (2) 本機の検出する赤外線波長域は 8~14 μ のいわゆる“大気の窓”の部分に限定されていることから、大気中の水蒸気や炭酸ガスによる吸収を減少させ雲、海面、地表面などの最高温度放射をとらえることができる。
- (3) 温度の測定は、スポットによるメーター読定と同時に、オシログラフ等の自記記録により連続測定もできる。
- (4) 測定精度は 0.2°C と高く、また応答速度が 50 ミリ秒と比較的早いこと、さらに小型で軽量であることその他 (2), (3) の特徴と合せ空中探査に利用できる。
- (5) しかし、航空機に搭載しての調査は、航跡に沿った温度分布であると同時に、観測視野角が 2° であることから Table 1 に示すように飛行高度に比例した場所的な平均温度である。
- (6) 空中からの調査では、単に記録紙からだけでは測定位置の決定はできない。

Table 1 飛行高度と測定半径との関係

飛行高度	測定半径
750 m	13.13m
1500	26.25
2250	39.38
3000	52.50
3750	65.63

5. 2~3 の実験についての報告

本機の野外でのテストに先立ち、先ず前節で述べた (6) の点をカバーする事を考え、空中写真と同調させるよう計画し、若干の改良を加えた。先ず、測定点を求めるために空中写真の撮影時の光軸と平行な赤外線入射光が、得られるよう撮影機に孔をあけること。次に温度の自記記録装置の撮影時と同調したマークをも同時に記録できるよう改良を加えること、この二点がそれであり、これらはアジア航測 K K 器材整備室の小山

Fig. 4 測定のための系統図

氏と運航部の滝沢，中村，一ノ渡の各氏を中心に進められた。この結果，飛行機からの温度測定は Fig. 4 に示すような系統によって行なわれることとなった。

また実験を始めるに際して，赤外線放射温度計は，各温度に温めたウォーターバスの水面に向けて補正した。

遠隔操作によって物体の温度を測る場合，理想物体である黒体** (black body) と一般物体である灰色体 (gray body) の全放射強度の比である放射率 (emissivity) が重要である。というのは，本来，赤外線放射温度計の補正は，黒体の放射強度によってすべきである。しかしながら黒体のように放射率が 1.0 という物体は理想物体であるから，放射率がこれに最も近い自然物体を選んで補正しなければならない。現在分っているものでは，良く磨かれた銀板の放射率が 0.1 より小さく，白金黒はもっとも黒体に近いということである。そのほか自然物体である岩石や樹木などの放射率に関しては基礎資料は乏しく，詳しい事は分らないが，水面はこれらのなかでもっとも黒体に近い散乱面を持った自然物であるといわれており，Brunt, Geiger, Brooks 等によると $7\sim 15\mu$ の幅の中で水面の放射率は約 0.98 であると報告されている。そこで，本機の補正には，ウォーターバスで温めた水面に光学ヘッドを向けて行ったわけである。

A. 大島におけるテスト

最初の実験は 1966 年 8 月 14 日に，伊豆七島の一つである大島で行なった。温度の測定と撮影は Fig. 5 に示すようなコースで，13 時 20 分～30 分の間に行なわれ

** 黒体とは，入射した放射線のすべてを完全に吸収し，また放射する物体をいう。

Fig. 5 大島の撮影コース

た。この時の飛行高度は 1350 m であった。Fig. 6 はこの時の結果を示すものであるが，これによると，海面上では大体 23°C ，森林地帯では約 24.5°C ，熔岩，砂漠地帯では $26\sim 27^{\circ}\text{C}$ ，極度に温度が高い所は裸地，畑地，道路，民家の所に出現しており，大体 27.5°C 前後を示していた。この実験に際しては地上における温度の測定は行なわなかったため地上のそれとは対比できないが，当日の大島測候所の気象観測資料をまとめて，Table 2 に示しておく。この表の中で，地温のデーターをみると午前 9 時から午後 3 時の間で $27.7^{\circ}\text{C}\sim 28.8^{\circ}\text{C}$ の変化をしているが，撮影時前後でも 28.5°C 前後はあるものと推定される。この結果と赤外線放射温度計による測定結果とを比較すると，後者による測定の方が若干低い値を示している。

Table 2 大島の気象資料
(昭和 41 年 8 月 14 日)

気 圧	1010.7 mb		風 速	平均	3.5m/sec	
気 温	平均	25.3°C		最大	8.5m/sec	
	最高	27.4°C		最小	0.5m/sec	
	最低	23.1°C				
			地 温			
露 点	22.6°C					
湿 度	平均	87%	9 時	27.7°C	28.3°C	
	最低	72%		15 時	28.8°C	28.3°C

B. 名神高速道路と伊勢湾における実験

第 2 回目の実験は，1967 年 9 月 25 日に行なわれた。今回のテストは京都大学防災研究室の奥田博士の指導により，同研究室との協働によりすすめられた。実験は名神高速道路，木曾三川下流域，伊勢湾，名古屋市街地を選び，地表からの放射をとらえる目的で，早朝日の出前後から開始し，赤外線放射温度計による測定

と同時に地上による測定を行なった。しかし、結果はあまり良いものではなく、温度の記録は、温度以外の振動と共鳴したような記録となり、解析には苦勞させられた。中でも多少良好な記録を得た所と地上のそれと比較すると、名神高速道路面上の場合も木曽三川下流域の水面上の場合も赤外線放射温度計の方が2~3℃低い値を示すようであった。

C. 高野山における実験例

この実験は、1967年11月8日に、和歌山県高野山地域を対象にし、特に地表被覆状況による表面温度への影響を知ることが目的として行なった。測定はほぼ午前11時30分から午後零時30分までの約1時間にわたって行ない、測定方向は東西に1コースとそれに直角に南北に1コースを選び、それぞれの測定値を得た。

解析方法としては、温度測定と同調して撮影された航空写真上に、飛行基線を含めて地上で約100mの幅を持っていると思われる区域について、針葉樹林、針葉樹低木林(含植栽地)、広葉樹林、広葉樹低木林、針広混交林、伐採跡地、その他(野原、畑、裸地)の7分類と、それに河川の判読を併せて行なった。その結果についてはTable 3に示すとおりである。

この表の温度測定値をそのまま地表被覆物独自の温度とするには、問題もあり、とりわけ地形の温度への影響はかなり大きいと思われるが、概して言えることは次のとおりである。

1. 伐採跡地とそれに比較的類似していると考えられる広葉樹低木材に高温度が見られる。
2. しかし、針葉樹低木林では低温度を示しているが、これはサンプルが非常に少ないのでなんとも言えない。
3. 広葉樹と針葉樹を比較した場合、広葉樹の方が温度が高い。
4. 林分内における最高温度と最低温度の較差は、針葉樹林もしくは、針広混交林に小さく、伐採跡地が最大である。

D. 琵琶湖における実験例

この実験は、1967年12月12日に行なわれた。今回の実験も第2回の実験同様に京都大学防災研究室の奥田博士の指導のもとに進められた。測定は、12時01分~12時29分の間わずか28分間でFig. 7に示すように琵琶湖を一周するコースの観測を終えた。その結果についてはFig. 8に示す。今回の実験でも、赤外線放射

Fig. 6 大島の測定結果

Table 3 高野山における測定結果

樹 種	コース	最高	最低	較差	平均	樹 種	コース	最高	最低	較差	平均
		°C	°C	°C	°C			°C	°C	°C	°C
広 葉 樹	C—1	14.01	11.49	2.52	12.79	針 葉・広 葉 混 交 林	C—1	12.33	11.17	1.16	11.75
	C—2	14.55	12.07	2.48	13.31		C—2	13.80	12.13	1.63	12.97
	総平均	14.29	11.79	2.50	13.05		総平均	13.31	11.81	1.50	12.56
広 葉 樹 低 木 林	C—1	16.10	12.14	3.96	14.12	伐 採 跡 地	C—1	15.41	12.06	3.35	13.76
	C—2	15.21	13.07	2.14	14.15		C—2	16.64	12.05	4.59	14.34
	総平均	15.75	12.51	3.24	14.13		総平均	15.87	12.05	3.82	13.98
針 葉 樹	C—1	13.89	11.32	2.57	12.60	そ の 他 (野原・田畑 裸地)	C—1	15.24	11.75	3.49	13.50
	C—2	14.05	12.28	1.77	13.17		C—2	15.00	14.20	0.80	14.60
	総平均	13.95	11.68	2.27	12.81		総平均	15.21	12.05	3.15	13.64
針 葉 樹 低 木 林	C—1	13.20	9.50	3.30	11.55	河 川	C—1	—	—	—	12.09
	C—2	—	—	—	—		C—2	—	—	—	12.54
	総平均	13.20	9.90	3.30	11.55		総平均	—	—	—	12.28

C—1 [北→南] 始 11時47分 終 11時53分

C—2 [東→西] 始 12時25分 終 12時31分

温度計による測定と同時に海上における測温は実施しなかったが、京都大学理学部付属大津臨湖実験所の測温資料より推定した水温とを比べると赤外線放射温度計による方が若干低い値を示している。

以上、本機の利用を前に行なった実験の一例を紹介したが、これらの結果はいずれ各々の機関でまとめられ公にされると思う。この一連の実験の結果を総観すると、赤外線放射温度計による観測値は実際の温度より低く示されるという事をのぞけば、大変良好で4項の「本機の特徴」に示した諸点が実証されたわけだ。

さて、この温度計による測定値が絶対値より低くすぎることに關して、筆者等は何度も地上におけるテストを繰返したが、その結果は、わりあい正しい値を示す事から、飛行機に搭載した時だけあらわれる現象、すなわち、大気中を通過する赤外線の減衰に起因するものと推論していた。大気中を通過する赤外線の減衰に關しては、前述した選択吸収のほか、霞、霧、雲、煙霧などによる散乱によるものと温度、気圧その他によるものがある。このうち吸収に關しては Fig. 3 に示された結果をもとに一応無視して考え、大気中の散乱によるものと推論したわけだが、実際には、大気中の水蒸気は場所によっても時間によってもかなり変動するので、水蒸気による吸収は無視できないかも知れない。しかし、今までの実験資料だけでは、これ以上推論する事は難かしい。

その後、気象庁予報課の土屋清博士の研究が、この問題に対し、解決の糸口を与えてくれた。この結果、我々が当初意図していた事が本格的に実施できるようになったわけである。

Fig. 7 琵琶湖測温飛行コース

6. む す び

以上、赤外線放射温度計の機構と本機を用いての観測例を紹介してきたが、最後に、本機の今後の利用面について若干の知見を述べむすびにしたい。

1. 地熱調査

a. 地熱資源の開発

広大な地域における常温付近の微弱な温度をある広がりを持ってとらえられる事は、単に地質学、

地球物理学の問題だけでなく温泉探査や地熱発電のための地熱資源の開発の予察的な問題解決のために大きな効果果しうる。

b. 火山における熱異常調査

温度測定範囲が $+44^{\circ}\text{C}$ までである事から、活火山火口内のまたはその周辺の温度については測定不可能であるが、赤外線映像装置と併用すれば、赤外線映像装置の欠点である reference temperature を把える事ができる。

2. 農業への応用

a. 土壌温度の測定

農作物の生育と生育期間の土壌の温度の変化には密接な関係があるが、これらについても最近農地が大規模化して来ており、なかなか正確に把えがたい。こういう場面でしばしば役立たせうる。また大規模なパイロットファームの開発に際しての土地条件（環境）の調査に利用しうる。

b. 農業用水路、河川の温度調査

水田において、特に灌漑用水の水温は水稻の収穫量の多少に影響を及ぼす。これらについても灌漑用貯水池等の水温を正確に把えられる事ができれば、用水路や“ぬるめ”の構造を再検討できるだろう。

3. 陸水・海洋学と漁業への応用

水面は様な散乱面とみなす事ができるので、かなり精度の高い水温分布図を描ける。この事は湖流や湾流の推定も可能ならしめるし、暖水塊・冷水塊の分布も正確に把えられる。結果として、水温によって生活場所を変える魚類の探知の予察に

Fig. 8 琵琶湖水面温度測定値 (1967. 12. 12) 12 h 2 m ~ 12 h 29 m

も貢献しうる。また汀線付近の湧泉の探知や河川水の河口からの分散状態についても、海水との温度差から正確に把握されるであろう。これは海苔のような沿岸漁業の指針に役立つ。

4. 気象学への応用

都市気温分布とスモッグの性質、あるいは山腹斜面温度と雲の発生機構の解明にも多に役立つだろう。また森林内の小気候、特に造林地の適地適木の決定や保護の資料として利用できるだろうし、冬季、山腹斜面に形成される冷気湖の発達等の解明にも、また夏には、南方洋上の海面温度と台風の発生機構の解明や地表面における熱収支の問題解決等、その応用範囲は非常に大きいものと思われる。

5. 災害調査への応用

a. ナダレと雪面温度の解明

冬季、日本の 80% は雪におおわれる。同時に毎年ナダレの災害が発生し、鉄道や道路が大きな被害を受けるが、これらの機構を解明するにも大に役立つと思う。

b. 流氷と海難防止のために

オホーツク海の流氷は、冬季北方海域において、漁業に従事する者にとっては危険なものであるが、この流氷の予報にも利用できるだろう。

c. 熱害調査

最近の工場地帯の拡大は、スモッグとならんで、工場排水による河川、あるいは港湾の汚濁問題を引き起し大きな公害となってきている。そのうちでも特に、冷却水の排水による熱汚染の把握とその機構の解明にも利用できるだろう。

d. 路面温度への影響

日本もいよいよ高速自動車の時代に入ったといわれ、各都市を結ぶ高速道路の建設も急ピッチで進められているが、路面温度と交通工学的問題や早朝、路面に発生する霧等交通災害の問題に対しても未だ知られざる面が多い。これらの問題解決のためにも本機は大に利用できるものと思う。

以上、筆者等の浅識において、今後の利用面について羅列してみたが、この他にもいろいろの分野において利用できるのではなかろうか。

このように、連続的に広がりを持つ広範な地域の地表面温度を短時間に測定できるという事は、単に気象学上、海洋学上、あるいは地質学や地球物理学上画期的な方法であるばかりか、熱汚染やナダレ、スモッグ等の災害調査のためにも大に活用できよう。更に、新産都市の建設や、パイロットファームの開発等の建設に伴う環境調査のための基礎資料にもこの方法を駆使し、研究調査される事が望まれる。同時に本機の観測結果から絶対温度を決定する方法についても更に多くの実験が必要だろうし、測定のための航法などに関する問題についても今後取り組まねばならない。これらに向かって一步一步基礎資料の蓄積をはかる事も必要である。

謝辞 本稿をまとめるにあたって、装置の改良に当られたアジア航測 K. K 器材整備室の小山氏に、また撮影ならびに航法の問題に対して研究された同社運航部の滝沢、中村、一ノ渡の各氏に謝意を表する。

また、温度の補正や野外実験において種々御指導下さった京都大学防災研究所の奥田博士に謝意を表する。

赤外線放射温度計に関する文献

- 1) 松野久也：遠隔探知方式について 1-1, 論評写真測量 Vol. 6 No. 2, pp. 29~33, 1967.
- 2) 松野久也, 長谷紘和：熱線写真について, 写真測量 Vol. 5 No. 2, pp. 22~28, 1966.
- 3) 土屋 清：空から地表温度をはかる, 科学朝日 1968, 6月号 pp. 89~94.
- 4) Barnes. R.C.: Model PRT-4 Portable Radiation Thermometer Barnes Engineering Cohtd. Pefense and space division, Stamford Connecticut. 1966.
- 5) 小山幸雄, 黒岩五郎：赤外線放射温度計及びその記録装置などの取扱説明書, アジア航測 K K 技術文献綴, pp. 1~2, 1967.
- 6) Carl F. Konoshi: Water and Cloud temperatures measured from V-2 Aircraft, Bulletin American Meteorological Society Vol. 45 No. 9, pp. 581~586, Sep. 1964.
- 7) Donald H. Lenschon, John A. Dutton: Surface Temperature Variation Measured from on Airplane over Several Surface Types Journal of Applied Meteorology Vol. 3, pp. 65~69, Feb. 1964.