

気象衛星搭載用赤外放射計について*

土 屋 清** 山 香 英 三***

1. ま え が き

自然環境測定のための赤外放射計の利用は、最近急速に高まってきた。観測対象も地面、海面、雲頂温度などの直接観測からさらに大気汚染、海洋汚染などまで範囲が広がっている。これまでの放射計はおもにアメリカで開発されたものが使われていたが、日本でも独自の宇宙開発に関連して、日本の気象衛星に装備するための放射計や、気象衛星やその他の姿勢制御を必要とする衛星のための地平線探知用の放射計の開発が要求されている。そこで本報では、アメリカの気象衛星に使われている赤外放射計の原理や問題点、などについて簡単に述べる。

2. 気象衛星用赤外放射計の必要条件

赤外放射計は、地球表面および大気中から宇宙空間への放射エネルギーをとらえて温度に換算できればよい。対象物の温度は、200~350°K だからおもに10 μ 近傍の幅の広い赤外線を捕捉することになる。ところでこれらのエネルギーは、衛星に到達するまでに、大気中の水蒸気、オゾン、炭酸ガスなどによって吸収される。吸収の少ないのは、0.42~0.70 μ (可視)、3.5~4.2 μ 、8~13

μ 、18~22 μ (大気の窓)の長波領域である(第1図参照)。いっぽう大気を持つこれらの性質をうまく利用すると気温の鉛直分布の推定が可能になる。それで同じ衛星搭載用放射計でも目的に応じたものを開発しなければならない。

たとえば地表面や雲頂温度測定のためには大気の窓領域を使えばよいが、昼間は太陽光線の反射があるので、8~12 μ 、あるいは11 μ 付近のエネルギーだけに感度を持つ放射計が必要である。これは放射計の感知部の前に必要な波長の放射波だけを通すフィルターをつければよい。実際に衛星に積み込むための赤外放射計は次のような条件も満足しなければならない。

- (1) 動作温度……室温で動作し、めんどろな冷却を必要としない。
- (2) 波長感度特性……必要とする波長領域では十分な感度を持ち、できれば感度が波長依存性を持たないこと。
- (3) 大きさと重量……できる限り小型で軽量である。
- (4) 強い衝撃、加重、放射線に耐えられる。

第1表 光電素子とボロメータ素子の特性

(A)	機 構	動作温度	波長依存性	比感度 D* $\frac{\text{cm}\cdot\sqrt{\text{Hz}}}{\text{watt}}$	時 定 数
光 電 素 子	光電効果	5 μ より長波 長は低温	材料による 最大値あり	10 ⁹ ~10 ¹⁰	~10 ⁻⁶ 秒
ボロメータ素子	温度変化	常 温	依存しない	10 ⁷ ~10 ⁸	~10 ⁻³ 秒
(B)	バイアス電源必要		バイアス電源不必要		
光 電 素 子	photoconductive (Ge : Au)		photovoltaic (InSb)		
ボロメータ素子	抵抗変化 (サーミスタ) 容量変化 (誘電体素子)		電圧変化 (焦電型素子)		

* Infrared Radiometers for Meteorological Satellites

** K. Tsuchiya, 気象庁予報課, 気象研究所 (併任)

*** E. Yamaka, 松下電器東京研究所

—1970年3月13日受理—

3. 検出素子の種類と原理

放射計の心臓とも言うべき最も重要な検出素子は第1表のように光電素子とボロメータ素子に大別できる。

3.1 光電素子……半導体には充満帯と導電帯とからなるエネルギー帯や添加不純物によるエネルギー離散値がある。充満帯と導電帯との間(エネルギー禁止帯)よりも大きなエネルギーを持つ放射線を照射すると充満帯の電子はこれを吸収して、電気伝導度が増加する。この場合真性型光電素子と呼ばれ、InSb, Cd_{1-x}Hg_xTe 素子がこの型に属する。いっぽう不純物離散値と導電帯(または充満帯)との差に等しいエネルギー値を持つ放射光線を吸収して生ずる導電帯の電子(または充満帯の正孔)によって電気伝導度が増加する場合には、不純物型光電素子と呼ばれ、Au-doped Ge, Cu-doped Ge などがこれに属する。したがってこれらの真性型および不純物型光電素子はともに特定波長の赤外線に対して最大の感度を持ち、特にそれよりも長波長側では感度の無くなるのがボロメータ素子と異なる点である。

常温の物体からの赤外線を検出するためには、検出素子は常温以下に冷却して、赤外線が入射しないときの導電帯中の電子(または充満帯の正孔)の数を減少するとともに、電子を動きやすくする必要がある。この点もボロメータ素子と異なる。

3.2 ボロメータ素子……赤外線が素子に吸収されると微小温度上昇が生ずる。したがって温度に敏感な物理性質の変化から赤外線の検出が可能になる。抵抗の温度変化を大きくした素子がサーミスタ・ボロメータ素子で、Ni, Co, Fe などの酸化物半導体の混合焼結体から作られる。誘電率の温度変化を大きくした素子は誘電体素子で Ba, Ti, O₃ などが材料として用いられる。

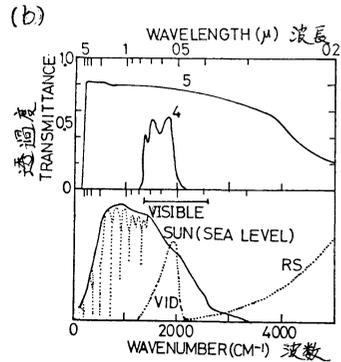
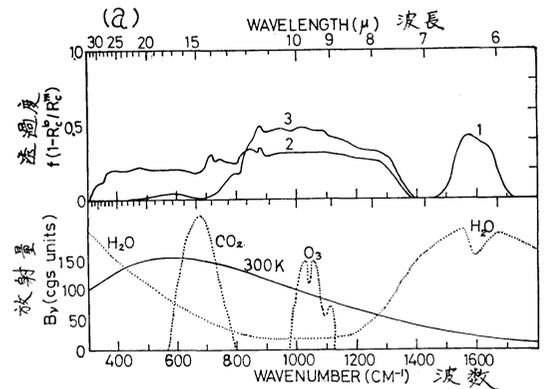
これに対して焦電誘導体では、温度変化により表面電荷が変化する。これを電圧変化として測定するのが焦電型素子である。

ボロメータ素子では入射赤外線は吸収されて素子の温度変化に利用されるだけだから、素子の赤外線吸収が波長に対して依存性を持たないときには、感度が波長依存性を持たない素子を簡単に作れる。もし素子の吸収が波長依存性を持つときには、素子表面にほとんどの赤外線を吸収する吸収膜を塗布すればよい。

ボロメータ素子は、赤外線の入射時の温度の変化分を利用するのだから、動作温度は常温でよい。このことからボロメータ素子は衛星用赤外線検出素子として適している。アメリカの気象衛星タイロスなどに利用されたの

はこのサーミスタ・ボロメータである。

しかしこれは素子の温度変化を利用しているから、感度や時定数が光電素子に比べて劣っている。検出素子から得た直流または低周波の電気信号は、ドリフトや雑音の点から正確に増幅するのが困難だから、より高い周波数で変調し増幅して検波再生するのが望ましい。検出素子に入射する赤外線はこれを機械的のチョッパーで変調し、それに対応した狭帯域増幅器を用いる方法が採用される。また雑音は無秩序な位相を持つから、チョッパーに同期した位相検波方式を用いると、信号対雑音比を大幅に改善できる。



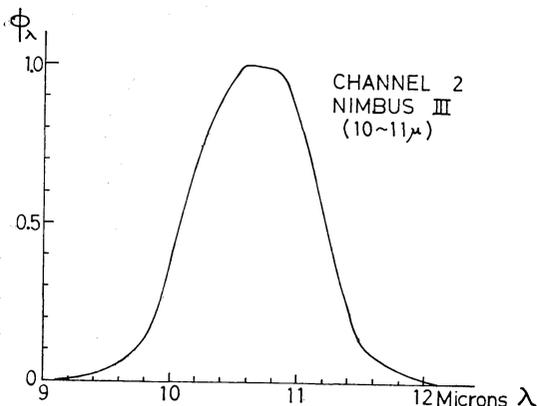
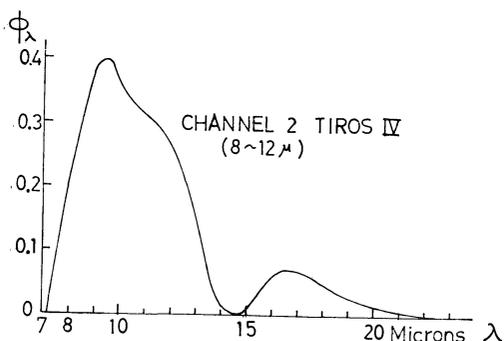
第1図 a 上段：フィルタ、レンズ、チョップ反射板の組み合わせによるチャンネル(1)(2)(3)の総合特性
下段：300°Kの黒体からの放射強度と大気吸収率
b 上段：反射太陽光用チャンネル(4)(5)の特性
下段：海面での太陽光強度。細い帯状の点線は大気による吸収

第2表 中解像度赤外放射計の特性

捕捉波長域	特性とそれから得られるもの
(1) 5.7~6.9 μ	H ₂ Oの基礎吸収率, 水蒸気量
(2) 7.5~30 μ	長波長放射, 5番目の短波領域のものと併用して地球大気の熱収支
(3) 7.5~12 μ	大気の窓領域, 地表面や雲頂温度
(4) 0.55~0.75 μ	可視領域, アルベード
(5) 0.2~5.5 μ	太陽からの放射線, アルベード
(6) 14.8~15.5 μ	CO ₂ の吸収帯, 成層圏の温度

第3表 ニンバス2号と3号のMRIRの各チャンネルの測定波長幅. 第2表に示したものと異なるもののみを示す.

	ニンバス2号	ニンバス3号
(1)	6.4~6.9 μ	6.5~7.5 μ
(2)	5~30 μ	20~23 μ
(3)	10.5~11.5 μ	10~11 μ
(4)	0.2~4.0 μ	
(5)	14~16 μ	14.5~15.5 μ



第3図 タイロス4号とニンバス3号の窓領域チャンネルのスペクトルレスポンス.

4. アメリカの気象衛星用赤外放射計

詳しいことは参考文献を参照していただくこととしてごく簡単に特徴などをししておく。

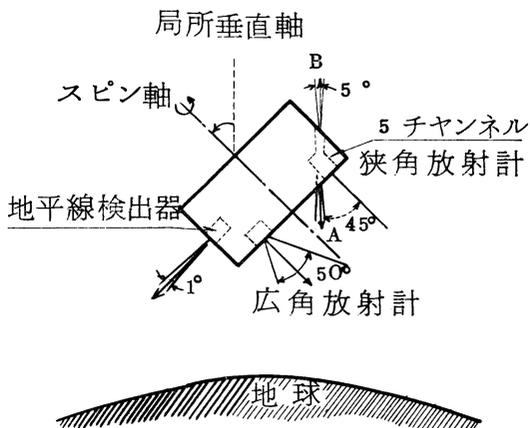
4.1 中解像度赤外放射計 (Medium Resolution Infrared Radiometer, 略して MRIR)

タイロスシリーズ, ニンバスシリーズで使われている. 赤外検出器にはサーミスタ・ボロメータが使われ, その前面におくレンズ系やフィルターの作用で第1表のような波長特性を持たせてある (第1図参照). なお視野角は3~5°で, 1000km から真下を見たときの視野は80~100kmの直径の円になる.

なお第2表に示したMRIRの波長幅は, ニンバスシリーズとタイロスシリーズの衛星では少しばかりの差があり, 同じシリーズに属するものでも, 少しの差がある. その1例を第3表に示す.

第2図はタイロス4号とニンバス3号の窓領域測定用チャンネルの有効スペクトル感応度 (effective spectral response) を示したものである. NASA で発表している users' guide にはタイロス4号では8~12 μ , ニンバス3号では10~11 μ ということになってはいるが, 実際にはその両側でもかなりの spectral response がある.

第3図はタイロスに搭載されたMRIRの衛星内の位置と衛星の姿勢を示したものである. 衛星の回転軸と放射計の軸は45度の傾斜で, 常にAかBが地球か宇宙空間をさすようになっていて, 地球の赤外放射量を宇宙空間の温度 (宇宙空間の温度は一定と仮定できる) に対して絶対値として測定できる. しかしこの方法では衛星と地球の相対的な位置で, ある場合には, 放射計が地球のほうばかり向いていて, 測定した資料が長い連続したもの



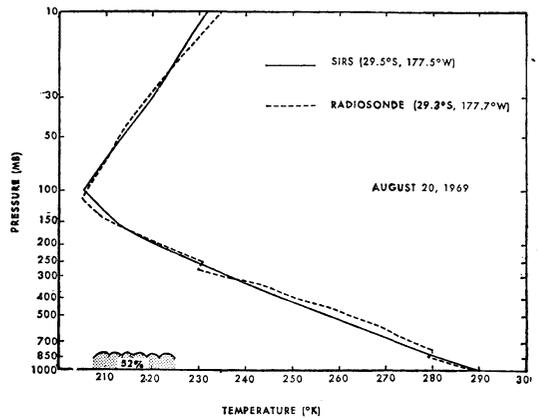
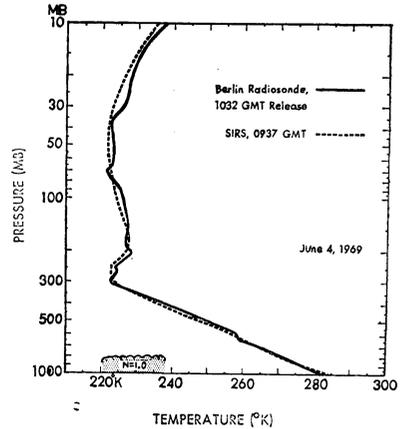
第2図 タイロス2号の放射計の位置と軸方向.

になってしまい (Closed Mode), 地球上のどこを観測したのかわからなくなってしまふ場合があつて, 解析が著しく困難になることがあつた。

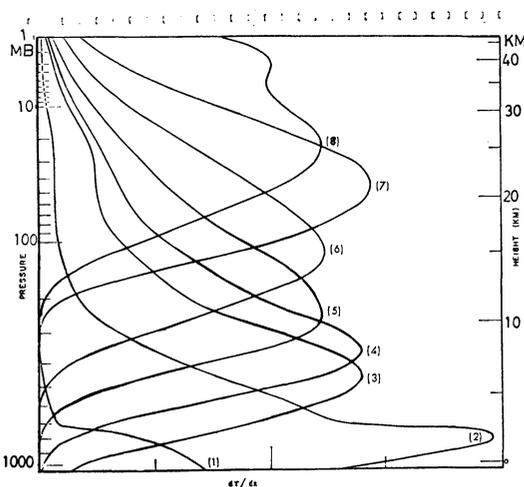
ニンバス・シリーズではこの欠点が除去された。すなわち衛星の進行方向に直角に反射鏡を回転させて, 宇宙空間→地球→宇宙空間→衛星内部温度→宇宙空間→地球というふうにすることにより, どこからどこまでが地球を走査したものであるかがはっきりわかるようにしてある。このようにすることによって地球上のどこを観測したものが容易にわかるようになった。

4.2 高解像度赤外放射計 (High Resolution Infrared Radiometer, 略して HRIR)

大気窓領域である3.5~4.2μ帯に高い感度を持つ光電素子 (PbSe) を 200°K 近くに冷却して作動させている。解像度は非常によく, 1000km 高度から測定したとき, 衛星直下点では約 8 km の解像度がある。この波長では, 昼間は少しばかりではあるが太陽光線の反射も含まれてしまうので, 夜間しか使えない。ニンバス2号からはこの測定値を APT 装置で送画されるようになったが, 夜間の雲分布は非常にはっきりわかるようになった。現在活躍している ITOS (改良型タイロス) にも装備されていて, APT 装置により送画されている。これを DRIR (Direct Readout Infrared Radiometer) と言っている。なお現在飛んでいるニンバス3号では, 地球の昼間の側では0.7~1.3μ帯に感ずるように切り換え



第5図 ニンバス3号の SIRS 資料から得た値とゾンデによる観測値との比較 (Smith ら 1969)。実線は SIRS の資料, 破線はラジオゾンデから得たもの。



第4図 SIRS の8個のチャンネルのスペクトル間隔に対する Weighting Function. 各チャンネルは, 約 6 km の厚さの空気からの放射を捕捉する。(Smith ら1969)

られる。重量は約 8 kg, 使用電力は 8 ワット, 測定温度可能範囲は 210~330°K, 精度は 260°K で 1°K である。

光電素子の冷却は放射冷却装置による。これは非常によく反射する金メッキしたピラミッド型の囲いの底に黒色の冷却板をとりつけてある。計画では 196°K (-77°K) の温度に保つことになっているが, 現在飛んでいるニンバス3号では -61.2°K (3月上旬現在) になっている。

なお測定型式は 4.1 で説明した走査方法で, 昼間衛星が南から北に移動しているときには地球を東→西へ, 夜間北から南に移動しているときには西→東に走査する。

4.3 衛星赤外分光計 (Satellite Infrared spectrometer, 略して SIRS)

気温の3次元分布を得る目的で作られた。今後に大きな期待が持たれている。現在行なわれている実験の結果

についても紹介しておこう。

大気中の CO₂ 15μ 吸収帯というのは、分子回転単位間の吸収である Q 枝によるもので、波数にして、669, 678, 691, 699, 703, 709, 750cm⁻¹ の 7 個の放射体から成立している。これらの放射線が衛星にはいる赤外線への割合が大気圧の関数として計算されたので、これらの放射帯を分解能の高い大型分光計で分離して測定すれば、鉛直方向の気温がわかるわけである。

1969年4月14日に打ち上げられたニムパス3号(現在も活動中)では Fastie-Ebert 型分光器と8個のサーミスタ・ボロメータの組み合わせ(1個は大気の窓である 11μ 帯を使用して地表面を測定し、境界値として使用)ている。波長幅でいうならば8個のスペクトル帯は、11.12, 13.33, 14.01, 14.16, 14.31, 14.45, 14.76, 14.95μ に中心を持ち、それぞれが約 0.1μ の幅の中のエネルギーを測定することになる。それらのエネルギー量の割合は標準大気のもとでは第4図のようになっている。

この測定値から実際に気温の次元分布を求めることは、Inversion Problem と言われ、理論的な研究が

Wark and Fleming (1966), Twomey (1966), などによってなされている。概略は次のようである。

衛星の放射計に到達するエネルギーは(4.1)式で表わせる。

$$I(\nu_i) = B[\nu_i, T(P_s)] \tau(\nu_i, P_s) - \int_1^{\tau(\nu_i, P_s)} B[\nu_i, T(P)] d\tau(\nu_i, P) \quad (4.1)$$

$i=1 \dots 7$

I は衛星の測定した波数のエネルギー、 B は波数 ν_i 、気圧 p 、温度 T に対する Planck 常数、 τ は気圧 p のレベルから衛星までの透過度で、添字の S は下の境界を表わす。前にも述べたように 11μ の窓領域のチャンネルの値から下層の境界値が得られる。

(1) 式の解は discrete な形(4.2)をとる。

$$B[\nu_r, T(p_j)] = \bar{B}[\nu_r, T(p_j)] + \sum C_{ij} \Delta I(\nu_i) \quad (4.2)$$

ここで ν_r はあるスペクトル間の規準波数、 \bar{B} は解のベースに使われる気温観測値の統計サンプルの平均 Planck 常数、 ΔI は観測値とサンプルゾンデ観測の平均値が持つであろう Planck 常数との差で、 τ は気圧の指数である。 C_{ij} は Westwater と Strand (1968) のマトリックス $S_r A^T H^{-1}$ と同じものである。

(4.1) は雲の影響がはいっていない。雲の影響を考慮すると次のようになる。

$$I(\nu_i) = N \{ B[\nu_i, T(p_c)] \tau(\nu_i, p_c) - \int_i^{\tau_c} B[\nu_i, T(p)] d\tau(\nu_i, p) \} + (1-N) \{ B[\tau_i, T(p_s)] - \int_1^{\tau_s} B[\nu_i, T(p)] d\nu(\nu_i, p) \} \quad (4.3)$$

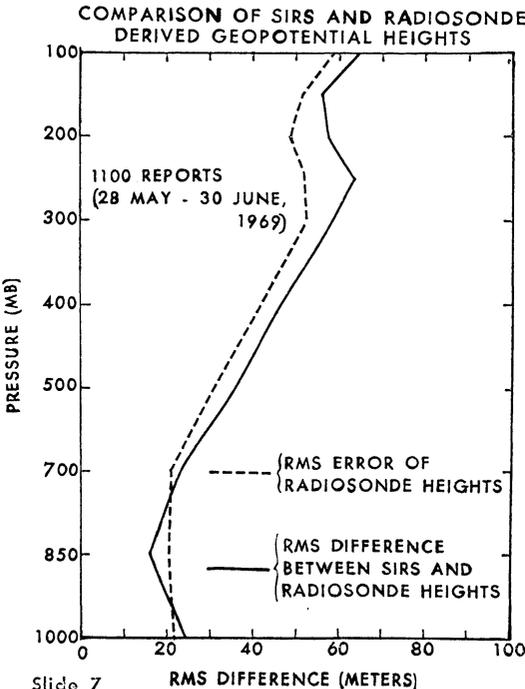
添字の C は雲を意味し、 N は雲量である。現在アメリカでやっている実際の解法では、CO₂ の混合比は一定で、体積当り 0.0315 と仮定しており、下層は黒体と仮定している。

第5図には SIRS の測定値から求めた気温の鉛直分布とゾンデ観測による気温の鉛直分布を示す。

また第4表には SIRS の観測値とゾンデ観測の観測値との相関を示す。

第6図には SIRS 資料から決めた高度とゾンデ観測によるジオポテンシャル高度誤差の幾何平均を示す。

この SIRS の資料は予報の基礎になる初期値天気図の解析精度を向上させるから当然予報の精度も向上する。第7図aとbは、アメリカの ESSA でテストした SIRS 資料を利用した場合としない場合の、アメリカ西



第6図 SIRS 資料およびゾンデ観測から得たジオポテンシャル高度の誤差の幾何平均 (Smith ら, 1969).

第4表 SIRS の測定値とラジオゾンデの観測値との相関 (700個, 35°W~55°N; 1969年5月29日~6月15日) (Smith ら1969 による)

高度(mb)	最高の単相関係数		重相関係数
	SIRSチャンネル	単相関	
1000	1 (11.1μ)	0.97	0.98
850	2 (13.3μ)	0.91	0.93
500	3 (14.0μ)	0.92	0.96
250	4 (14.2μ)	0.63	0.76
200	5 (14.3μ)	0.87	0.92
100	6 (14.4μ)	0.95	0.97
50	7 (14.8μ)	0.89	0.91
30	8 (14.9μ)	0.77	0.81

第5表 VTRP のフィルター特性

フィルター番号	中心部の波数 (cm ⁻¹)	Half Power の波数 (cm ⁻¹)	1/10Power の波数 (cm ⁻¹)	註
1	668.5±0.5	3.5±0.5	10.5±1.5	Q ブランチ
2	677 +2,-1	10.0±2.5	20 ±5	
3	695 ±1	10.0±2.5	20 ±5	
4	708 ±1	10.0±2.0	20 ±4	
5	725 ±1	10.0±1.0	20 ±2	
6	747 +2,-1	10.0±2.5	20 ±5	
7	532 ±5	10.0+3.0,-1.0	20 ±2	H ₂ O吸収帯 大気窓領域
8	835 ±0	10.9±1.0	20 ±2	

方の太平洋上の初期値と24時間予報である。この図からもわかるように、SIRS 資料利用による初期値の改良により、予報結果がかなり改良されることがわかる。このことは数値予報モデルの改良に当ってはきわめて重要な役割を果たすであろう。

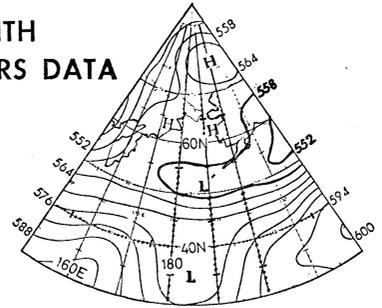
なお、今のところこの方法では最大の誤差が対流圏下部では雲のためにおこり、圏界面でも若干の誤差があり、気温の逆転は検出できない。精度は70%は1.5~2.0°Cのところにはいっている。なお第8図は SIRS の構造図である。

4.4 鉛直気温分布測定用放射計 (Vertical Temperature Profile Radiometer, 略して VTPR)

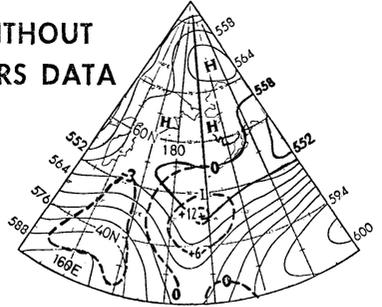
ITOS の D と E につけられ、地表から30kmまでの鉛直気温分布を測定する。測定するのは八つのスペクトル間隔で、15μCO₂ 吸収帯6個と大気窓領域である12μ帯と19μH₂O 吸収帯である。

これは1個の焦電型デテクターの前で回転する車輪の

WITH SIRS DATA

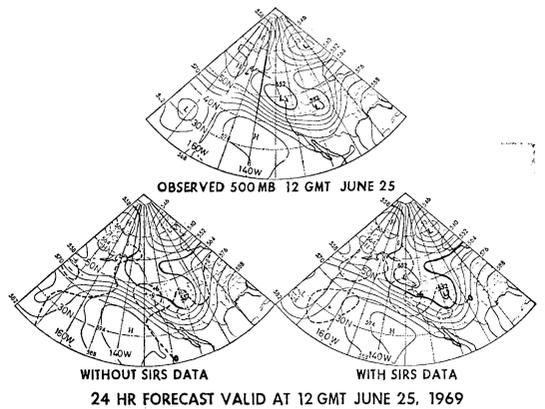


WITHOUT SIRS DATA



500MB ANALYSES JUNE 24, 1969

a 500mb 初期値。上段は従来のものに SIRS 資料を入れて解析したものであり、下段は SIRS 資料を利用しないもの。1969年6月24日, 12GMT

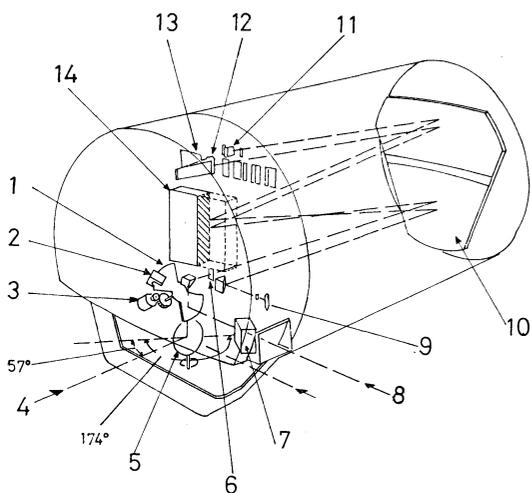


b 24時間予報図(下段)と実況図(上段)。下段左側は SIRS 資料を利用しない初期値によるもの、右側は SIRS 資料を利用した初期値によるもの。SIRS の資料を利用した初期値からの予報では二つの低気圧が予想されている。

第7図 SIRS 資料を利用した場合と利用しない場合の初期値にもとづく予報例 (Smith ら1969, WMO 報告による)。

第6表 IRIS “B” の特性

項目	数値	項目	数値
スペクトル範囲	500~2000cm ⁻¹ (5~20μ)	作動温度	
スペクトル分解能	5cm ⁻¹	光学的 Module	250±2.5°K
視野角	円形. 8度	Electronic Module	298±25°K
1100km高度からの視野	約直径150km	重量	
反射鏡の移動	0.2cm	光学的 Module	23.13ポンド
“ 速度	0.0183cm/sec	Electronic Module	9.13ポンド
感知部 (Detector)	Si	大きさ	
ビーム・スプリッター	KBr	光学的 Module	15.3×12.75×8.43インチ
		Electronic Module	8×65×6.5インチ
		消費電力	平均16W



第8図 SIRS の構造図

1. チョッパー, 2. 標準位相検出器, 3. チョッパーモーター, 4. 地球からの入射線, 5. 地球用鏡, 6. 入力スリット, 7. 黒体炉, 8. 宇宙空間からの入射線, 9. 波長較正用ランプ, 10. 1次鏡, 11. 波長較正用検出器, 12. 検出器, 13. 出口スリット, 14. 回析格子

周辺に8個のフィルターをとりつけることによって達成される。それらのフィルター特性は第5表に示すとおりである。

八つの一連の測定は地球上の同一地点を測定しなければならない。車輪の回転速度は2回転/分で、この時間にも衛星は移動する。この影響を除くために、フィルターは、ラセン状にとりつけてある。瞬間的な視野角は2.63°×2.735° (1% power point) である。2.63°は衛星の移動方向に対してである。8個のチャンネルによ

る連続測定で一つの VTPR 資料ができ上がるが、この1枚の資料 (“フレーム” と定義されている) の範囲は約1400km 高度からの測定で、衛星の直下点では28×32 (カイリ)² である。

VTPR はまた走査用鏡でも資料が集められる。これは8個全部のチャンネルによるサンプルが集められたあとで、一時には1ステップ移動するようにプログラムして行なわれる。この衛星軌道に対して直角方向の走査は、23個のフレームから成っている。すなわち直下が1枚と、軌道の両側に各11枚である。真下ではフレームとフレームの間に少しばかりのすきまができるが、端の方では少しばかり重複する。

23個のフレームのあとで、走査用鏡が元に戻る (1秒で)。したがって走査の時間は、0.5秒×23+1=12.5秒である。

なお VTPR のメカニズムの概略は、望遠鏡で放射を集め、フィルターを通してデテクターに焦点を結びせる。一つのフィルターから次のフィルターに変わるときにはチョッパーで切断する。Calibration のチェックは、10分ごとに宇宙空間 (無放射) と衛星に内蔵した300°K の黒体を測定させることによって行なわれる。

4.5 超高解像度赤外放射計 (Very High Resolution Radiometer, 略して VHRR)

改良型タイロス (ITOS) に搭載予定で、0.55~0.75μ の可視光を Si 検出器で、10.5~12.5μ の赤外部を Cd Hg Te 検出器 (100°K 近くに冷却) で検知する。これらの素子は従来のものに比べて感度が2桁近く改良されるので、解像度も1桁近くよいことになる。このため1972年からは従来のビデオカメラは廃止されることになっている。なおこの測定値は Real time system (即

刻方式)で世界中の利用者が受信できるようになるが、送信周波数が1.690~1.695 GHzのUHF帯になるので、従来のAPT受信装置のアンテナでは受信できない。この放射計による測定値の解像度は非常によく、1400kmの高度からの測定で約1.2kmである。

4.6 地平線検出器 (Horizon Sensor, 略してHS)

測器とは言えないかも知れぬが気象衛星のように姿勢制御を必要とする衛星には不可欠のものである。

地球が300°Kに近い温度であるのに対して宇宙空間は0°Kに近いので、衛星に搭載した赤外放射計の視野が周期的に地平線を横切るようにすれば、地球に対する衛星の姿勢がわかる。このためには赤外の全波長領域でもよいが、15 μ のCO₂吸収帯を使うと、下層大気中の気象条件に左右されなくてよい。

4.6 赤外干渉分光計 (Infrared Interferometer Spectrometer, 略してIRIS)

気温、水分やオゾンの大規模スケールの鉛直分布を得ることを目的に開発された。Michelson型の干渉計でTexas Instruments Inc.で作られたもので、その特性は第6表のとおりである。

5. あとがき

遠隔測定のための放射計の進歩はめざましいものがある。本報で紹介したものは、そのうちほんの一部で、内容も器械部分ではおもにDetectorの部分のみにしてある。本報を書くにあたって、参考文献をいろいろな所でいちいちあげなかったが、参照したものは全部参考文献のところに掲載してある。器械についてさらに詳しい専門的な知識を得たいむきは、参考文献の(6)、(9)、(12)やアメリカのJournal of the Optical Society of AmericaやApplied OpticsとかNASAの技術報告書(手に入りにくい)などがよい。衛星の放射資料から気温や水蒸気の鉛直分布を求める問題については、むしろ放射の専門の方々に紹介して頂いたほうがよいが、参考文献の(10~16)などもよい。

なお現在広く使用されているサーミスタ・ボロメータ素子よりも有効であると考えられる焦電型素子を利用した放射計の開発をしたので、別の機会に専門的な立場から詳しく報告する予定である。

謝 辞

最後にこの稿を書くに当ってご助言をいただいた気象庁の神子敏郎技官に感謝します。

参考文献

- 1) 関原 疆, 1969: 気象衛星の将来計画, 天気, **16**, 13~19.
- 2) 土屋 清, 1968: 気象衛星の現状とその利用, 新しい気象学, 13~22.
- 3) —, 1969: 日業気象学会低高度気象衛星の現状とその利用, 天気, **16**, 1~9.
- 4) 渡辺和夫, 1969: 静止衛星の現状とその利用, 天気, **16**, 10~12.
- 5) 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.
- 6) Bandeen, W.R., 1962: TIROS II radiation data users data manual, NASA, 13 pp.
- 7) Hanel, R.A. and D.Q. Wark., 1961: TIROS II radiation experiment and its physical significance, J. Opt. Soc. Amer., **51**, 1394-1399.
- 8) Kirk, R.T. et al, 1967: Infrared horizon definition, NASA, CR-722.
- 9) Sabatini, R.R., 1969: The NIOMBUS III users' guide, NASA, 238 pp.
- 10) Smith, W.L., 1968: An improved method for calculating tropospheric temperature from satellite radiometer measurements, Month. Weather Rev., **96**, 387-396.
- 11) —, Woolf, H.M., and D.Q. Wark., 1969: Temperature and geopotential height analyses obtained from NIMBUS III infrared spectrometer (SIRS) measurements, WMO 25 pp.
- 12) Staff members of the Aeronomy and Meteor. Div., NASA, 1963: TIROS IV radiation data catalog and users manual, NASA, 250 pp.
- 13) Wark, D.W. and H.E. Fleming, 1966: Indirect measurement of atmospheric temperature profiles from satellite, Month. Weather Rev., **94**, 351-362.
- 14) —, and D.T. Hilleary, 1969: Atmospheric temperature: Successful test of remote probing, Science, **165**, 1256-1258.
- 15) Westwater, E.R. and O.N. Strand, 1968: Statistical information content of radiation measurements used in indirect sensing, J. Atmospheric Sci., **25**, 750-758.
- 16) Yates, H.W., 1969: Results and status of indirect satellite instrumentation development, Private communication.