

鉛直温度分布放射 (VTPR) データの利用 に関する検討会 (Workshop) に参加して*

神 子 敏 朗**

はじめに

ワシントンの南東 20 km のスーランドにある NESS (National Environmental Satellite Service) の会議室で、7月16日から20日まで、5日間標記の検討会が開かれた。講師は NESS, NMC (National Meteorological Center), および MSL (Meteorological Satellite Laboratory) の中堅幹部または研究者で、ヨーロッパ、オーストラリア、カナダ、南米、日本 (著者と角氏) の23名が聴講した。Dr. Wark がこの会を主宰し、Dr. Bonner, Mr. Werboetzki が、車、ホテル、その他研究のための資料を入手したり、日常業務に関係ある人々と会えるよう斡旋するなど取計ってくれた。

Dr. Cressman および Mr. Johnson (NESS) の開会の辞によると、この会を開いた意図は次の二つに要約される。

1. ITOS E, F, G が VTPR により観測した放射データを、APT と同様、ローカル局に送信し、各国気象台は直接かつ即時に大気鉛直構造を取得できることを宣伝する。

2. 国際間に交換されている SIRS*** (VTPR データの別名) の利用を促進する。

検討会の初日を ITOS E の打ち上げ日に合せ、演出効果が巧妙であると思ったが、皮肉にも ITOS E の打ち上げは失敗した。

講演ならびに討議は、VTPR データの取得、処理方法、clear radiance**** の求め方、VTPR データの天気図解析への利用、天気図 (解析、数値予報により求められた図)、衛星写真による総合会報、各端局における VTPR データの受信、処理であった。

* The Report on International VTPR Workshop

** T. Kamiko 気象庁気象衛星課

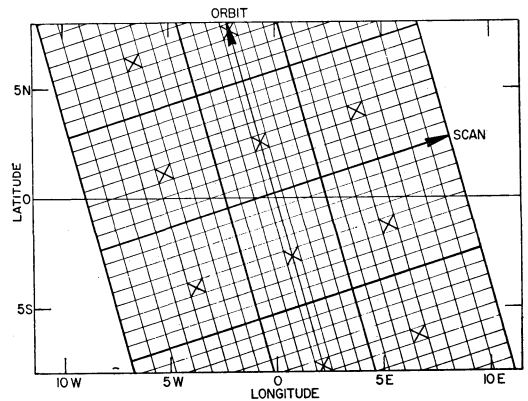
*** Spectrometer Infrared Radiometer Sounding

**** 後述の clear radiance を求める方法の中で定義を述べる。

著者にとってはすべて興味深い問題であったが、ここではデータの利用に際し知っておくべき事項の詳細を述べる。次にこの検討会の一目的である VTPR の直接受信、処理について紹介する。

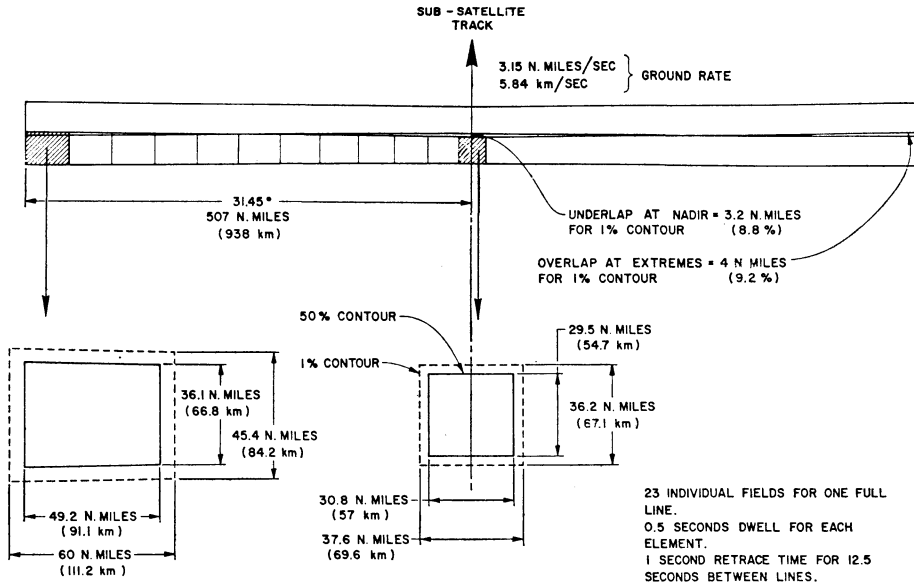
1. 放射測定と VTPR の生データ

VTPR は衛星の軌道に直交する面を左から右へ、23ステップの走査を行う。各ステップにおいてセンサーにより取得されるエネルギーを射出するスポットは、軌道の地球面上への投影に直交ならびに平行な方向に連続している。走査角は直下線から ± 30.3 度であり、緯度49度



第1図 VTPR の走査パターンと走査スポット。
Xに相当する点のデータを求める。

より赤道側では、ギャップがある。1スポットにつき、 15μ 帯辺りの6個の波長領域、 19μ 辺の水蒸気吸収帯、 12μ の窓領域、合せて8個の放射量1組が得られると、走査鏡は次のスポットに向く。23個のスポットのデータが得られると、走査鏡は元の位置に戻る。第1図に VTPR の走査および、スポットが示される。この図の範囲の観測は約5分で終了する。衛星の進行方向に直交する相隣る太い実線に挟まれた領域は8本の走査線により構成されている。この領域を 8×8 , 8×7 , 8×8 個のス



第2図 VTPR の走査スポットの大きさ。スポットの間隙，重複も示される。

ポットからなる三つに分ける。それぞれの面積は第一，三番目が， $700 \times 600 \text{ km}^2$ ，第二番目が $500 \times 600 \text{ km}^2$ である。clear radiance はこれら三つについて求められ，Xにおける値と見做す。走査スポットの大きさを第2図に示す。VTPR のレンズとセンサー間にマスクがあり，視野を 2.136×2.136 度の正方形に限定する。

放射量の検定値は $0 \sim 204.8 \text{ m/w (m}^2 \text{cm}^{-1})$ まで得られ， 340°K まで測定できる。センサーで測定されたデータはデジタル化され，10ビットで表現し，スポットの位置は5ビット，パリティ1ビットを加え，1つのスポットに対し16ビット構成となっている。

このデータは他のテレメトリデータ，ソーラープロトンデータと共に，SHF により地上に送られる。通常の運用モードの場合，検定に必要なデータは，鏡が元の位置に戻る間に記録される。また自動検定モードの場合，7分間隔で37.5秒間（3回の走査に相当する）検定値として電圧，宇宙空間，Patch（軌道上にある場合の検定に使用する，蜂巣型の基準器），また衛星の状態解析データを取得し，それらはデジタル化され，地上からの指令により，一軌道につき1回地上に送られる。

2. データ処理と解析

第3図に VTPR データの流れと処理を示した。NOAA 2号が2つの CDA* (Gilmore Creek, Wallops) の可視聴範囲内にあるとき，データは SR (Scanning

Radiometer) レコーダから CDA を経て，NESS¹⁾の処理センターに入る。このデータはモデムで復調され，前処理のため EMR6130 に送られる。VTPR データは他のデータと分離され，磁気テープに書き込まれる。テープ内の情報には次のような処理が行われる。それは第3図の観測位置の決定から品質管理までの部分に相当し，順を追って説明する。

1) 観測位置の決定

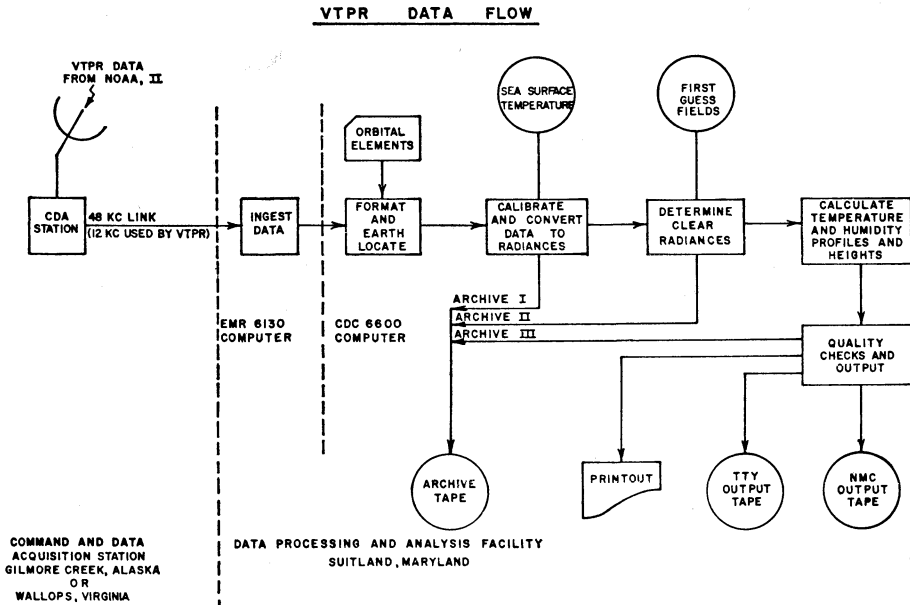
第1図の×：8個の走査線のうち，4番目の走査線上，左から5，12，19番目のスポットに対応する主点の地球上の位置を求める。12番目のスポットは，軌道の地球への投影線上にあるので，主点はスポットの真中にある。他のスポットについては，主線が直下線に対し傾いているので，主点はスポットの中心ではない。これらの位置は姿勢データ（横ゆれ，偏ゆれ），衛星の位置，センサーの取付位置，走査鏡の位置を入力として，Earth location program により決定される。また SR により提供される海面水温の観測点もさきの program により決められる。

2) データ検定の方法 (calibration)

i) 打ち上げ前地上における検定

VTPR の各機器は外部の基準器と対照して検定され

* Command and Data Acquisition



第3図 VTPR データ処理流れ図

る。patch の検定にはスポット 1 と 23 に対応する視野が充されるように、2つの外部の基準器を設置する。測器の温度を一定に保ち、また走査位置を固定し、基準器の温度を 18~34°C 間で変動させ検定を行う。

第2の検定は衛星が、軌道上にある場合に行われる。基準となるのは内部の黒体、および宇宙空間である。VTPR の出力と放射量が 1 次関係にあるとすると、地球の方を走査している場合の出力は、前記の2つの基準値があれば決定できる。両者の関係は次の式で示される。

$$I_{i,j} = a_i + b_i c_{i,j} \quad (1)$$

$I_{i,j}$ 放射量, a_i, b_i 検定係数, $c_{i,j}$ 出力(デジタルカウント), i スペクトル領域, j 宇宙空間か内部黒体の別
VTPR が 1~23 番目のスポットに向いている場合は少し複雑で、 i 領域における a_i, b_i は次の式により決定される。

$$a_i = \sum_{k=0}^3 A_{ik} T_k \quad b_i = \sum_{k=0}^3 B_{ik} T_k \quad (2)$$

ただし $T_0=1.0$, T_1 1次光学系の出力, T_2 2次光学系の出力, T_3 蔽い (shroud) の出力

(2) 式の右辺 2, 3, 4 項はセンサーからの放射フラックスに与える, VTPR の各部分の影響である。 A_{ik} ,

B_{ik} は打ち上げ前に行う熱空洞内でのテストで得られるセンサーからの出力と, T_1, T_2, T_3 など各部分からの出力の回帰関係から求める。また衛星が軌道上にある場合, T_k は 1 走査毎に走査鏡が元の位置に戻る時間に送信される。

また (1) 式の a_i, b_i のチェックは周期的に行われ、鏡が宇宙空間を向いているとき、patch を向いているときの出力は、それぞれ Position code 27, 28 により送信される。(1) 式に入れると

$$0 = a_i + b_i \bar{c}_{i,27} \quad (3)$$

$$B(\mu_i, T_{31}) = a_i + b_i \bar{c}_{i,28}$$

μ_i 波長領域, $\bar{c}_{i,27}, \bar{c}_{i,28}$ は鏡が宇宙空間と patch を向いているとき, μ_i における平均のカウント数, T_{31} は patch の温度, $B(\mu_i, T_{31})$ は μ_i, T_{31} におけるプランクの放射量。

a_i, b_i はさきに述べた 7 分毎に行われる自動検定モードにおいて得られるデータを式に代入して求める。この a_i, b_i により (2) 式の新しい A_{ik}, B_{ik} が得られる。それから通常の運用モードで得られる一次光学系, 二次光学系, 蔽いからの出力を (2) 式に代入することにより, a_i, b_i が更新される。なお電子回路の線形ならびに安定性を検証するため、自動検定モードで得られる階段

第1表 通常の運用モードにおける VTPR データの送信順序, 語数, position code 内容.

Word no.	No. of words	Position code	Description
1-7	7	26	Primary optics
8	1	26	Zero offset level
9	1	26	Not used
10-16	7	26	1st voltage level
17	1	26	Not used
18-24	7	26	2nd voltage level
25	1	26	Not used
26-32	7	26	3rd voltage level
33	1	26	Not used
34-40	7	26	4th voltage level
41	1	26	Not used
42-48	7	26	5th voltage level
49	1	26	Not used
50-56	7	26	6th voltage level
57	1	26	Not used
58-64	7	26	7th voltage level
65-320	256	27	Space look Filters 1~8 cycling
321-352	32	28	Mirror moving, not used
353-559	207	28	Patch look, filters 108 cycling
560	1	28	Shroud
561-567	7	29	Shroud
568	1	29	Detector
569-591	23	30	Detector
592	1	30	Patch
593-607	15	31	Patch
608	1	31	Not used
End of Calibration			
Normal scan sequence resumes with wpot one, etc.			

第2表 自動検定モードにおける VTPR データの語数, position code, 内容, position code 26が階段状の電圧カウントである.

Word no.	No. of words	Position code	Description
1-7	7	24/25	Primary optics
8	1	24/25	Not used
9-16	8	1	Spot 1, filters 1-8
17-24	8	2	Spot 2, filters 1-8
25-32	8	3	Spot 3, filters 1-8
33-40	8	4	Spot 4, filters 1-8
41-48	8	5	Spot 5, filters 1-8
49-56	8	6	Spot 6, filters 1-8
57-64	8	7	Spot 7, filters 1-8
65-72	8	8	Spot 8, filters 1-8
73-80	8	9	Spot 9, filters 1-8
81-88	8	10	Spot 10, filters 1-8
89-96	8	11	Spot 11, filters 1-8
97-104	8	12	Spot 12, filters 1-8
105-112	8	13	Spot 13, filters 1-8
113-120	8	14	Spot 14, filters 1-8
121-128	8	15	Spot 15, filters 1-8
129-136	8	16	Spot 16, filters 1-8
137-144	8	17	Spot 17, filters 1-8
145-152	8	18	Spot 18, filters 1-8
153-160	8	19	Spot 19, filters 1-8
161-168	8	20	Spot 20, filters 1-8
169-176	8	21	Spot 21, filters 1-8
177-184	8	22	Spot 22, filters 1-8
185-192	8	23	Spot 23, filters 1-8
193	1	24/25	Not used
194-195	2	24/25	Shroud
196	1	24/25	Not used
197-199	3	24/25	Secondary optics
Flyback time			
200	1	24/25	Primary optics
1-7	7	24/25	Primary optics

状の電圧カウント (Position code 26) を使用する.

自動検定モード, 通常の運用モードで得られるデータの送信順序, 語数, position code, 内容はそれぞれ第1表, 第2表に示した.

3) 第一近似値*の設定

区域毎に第一近似値の求め方が異なるが, 温度の鉛直分布の第一近似から内挿により, 100個の気圧高度(第3表)における温度が得られる. 第3表の気圧は1000~

* first guess

0.01mb 間を気圧の2/7乗のスケールで等間隔に分けたものである. 混合比の第一近似は次のように求めた. NMC で北半球については, 地表と500mb面間の平均湿度を求めている. さきの温度の鉛直分布から飽和混合比の鉛直分布を求め, それと相対湿度の積として混合比の鉛直分布が求まる. 500mb面より上では P^3 に比して混合比を減少させる.

第3表 VTPR を求めるさいに使われる100個の気圧高度

Level	Pressure (mb)	Level	Pressure (mb)	Level	Pressure (mb)	Level	Pressure (mb)
1	.010000	26	11.672352	51	103.802787	76	394.471232
2	.022509	27	13.151729	52	110.709757	77	412.264246
3	.043472	28	14.780413	53	117.938919	78	430.623266
4	.075634	29	16.504959	54	125.499127	79	449.558960
5	.121989	30	18.392029	55	133.399315	80	469.082061
6	.185758	31	20.428391	56	141.648495	81	489.203370
7	.270375	32	22.620917	57	150.255758	82	509.933752
8	.379474	33	24.976580	58	159.230270	83	531.284137
9	.516882	34	27.502455	59	168.581278	84	553.265520
10	.686604	35	30.205717	60	178.318103	85	575.888960
11	.892818	36	33.093637	61	188.450141	86	599.165579
12	1.139871	37	36.173585	62	198.986865	87	623.106566
13	1.432267	38	39.453026	63	209.937822	88	647.723168
14	1.774667	39	42.939518	64	221.312631	89	673.026699
15	2.171881	40	46.640713	65	233.120986	90	699.028533
16	2.628863	41	50.564355	66	245.372655	91	725.740107
17	3.150709	42	54.718280	67	258.077476	92	753.172921
18	3.742652	43	59.110411	68	271.245360	93	781.338533
19	4.410059	44	63.748763	69	284.886288	94	810.248566
20	5.158426	45	68.641437	70	299.010313	95	839.914701
21	5.993379	46	73.796622	71	313.627558	96	870.348681
22	6.920666	47	79.222593	72	328.748216	97	901.562308
23	7.946158	48	84.927709	73	344.382547	98	933.567446
24	9.075845	49	90.920415	74	360.540883	99	966.376016
25	10.315836	50	97.209237	75	377.233623	100	1000.000000

i) 北緯18度以北

第一近似には NMC における解析ならびに予報値を利用する (第4表). VTPR の観測時間が予報時間と異なる場合は、内挿により求める。また観測点における値は、それを囲む4つの格子点における値から内挿する。10mb 面より高い層については、チャンネル1, 2で観測した放射量と、さきに求めた10, 30, 50mb 面における温度との相関関係から求める。

ii) 北緯18度と南緯18度間の熱帯

ある適当な2ヶ月間のラジオゾンデ観測資料の平均値を第一近似とする。また混合比の第一近似はそれと温度の相関関係から求めた次の回帰式から求める。

$$W^* - \bar{W} = [H][T^* - \bar{T}]$$

ただし W^* 混合比の第一近似, T^* 温度の第一近似値, \bar{T} , \bar{W} , H はルーチン観測から前もって求めた平均温度, 平均混合比, 回帰係数行列。

iii) 南緯18度以南

第4表 VTPR を求めるさいに使われる NMC のデータ

Field	Analysis interval	Forecast interval
Pressure:		
tropopause	12 hr	12 & 18 hr
Temperature:		
tropopause	12 hr	12 & 18 hr
1000 to 100mb (10 levels)	12 hr	12 & 18 hr
70 to 10mb (4 levels)	24 hr	—
Relative humidity:		
tropopause	12 hr	—
boundary layer	12 hr	12 & 18 hr
Heights		
850mb	12 hr	12 & 18 hr

VTPR 資料と高層資料を使用した数層の客観解析を行って得たデータを第一近似値とし、湿度は熱帯と同様に求める。

4) Clear radiance を求める方法

雲のない場合には、VTPR が観測した各チャンネルの放射量から、温度の鉛直分布を求めることができる。雲のある場合には、それより低い層からの放射量が得られないので、原理的には、そこにおける温度分布は得られない。しかし以下にのべる方法により、雲のない場合の放射量 (clear radiance) を推定し、それから温度の鉛直分布を推定することになる。雲に蔽われている区域における放射量は次式で示される。

$$I(\mu_i) = NI_{cy}(\mu_i) + (1-N)I_{clr}(\mu_i) \quad (1)$$

N は雲量、単位 1/10, $I_{cy}(\mu_i)$ 雲のある区域の放射量, $I_{clr}(\mu_i)$ 雲のない区域からの放射量, μ_i i 番目の波長領域の表示

$I_{cy}(\mu_i)$ はさらに次のように書き直すことができる。

$$I_{cy}(\mu_i) = \epsilon(\mu_i)I_{cld}(\mu_i) + [1-\epsilon(\mu_i)]I_{clr}(\mu_i) \quad (2)$$

第2項は雲が完全な黒体でないため、雲の下方からもたらされる放射量, $\epsilon(\mu_i)$ 射出率, $I_{cld}(\mu_i)$ 完全な黒体からの放射量

(2) を (1) に代入すると

$$I(\mu_i) = \alpha(\mu_i)I_{cld}(\mu_i) + [1-\alpha(\mu_i)]I_{clr}(\mu_i) \quad (3)$$

なお

$$\alpha(\mu_i) = N\epsilon(\mu_i) \quad (4)$$

VTPR で用いているスペクトル領域では、雲が灰色放射体であるとする、 α は波長に無関係となる。

α の異なる二つのスポットを考え、 $I_{cld}(\mu_i)$, $I_{clr}(\mu_i)$ は両スポットでおなじ値をとるとすると、それぞれのスポットに対し次の式が得られる。

$$I_1(\mu_i) = \alpha_1(\mu_i)I_{cld}(\mu_i) + [1-\alpha_1(\mu_i)]I_{clr}(\mu_i) \quad (5)$$

$$I_2(\mu_i) = \alpha_2(\mu_i)I_{cld}(\mu_i) + [1-\alpha_2(\mu_i)]I_{clr}(\mu_i) \quad (6)$$

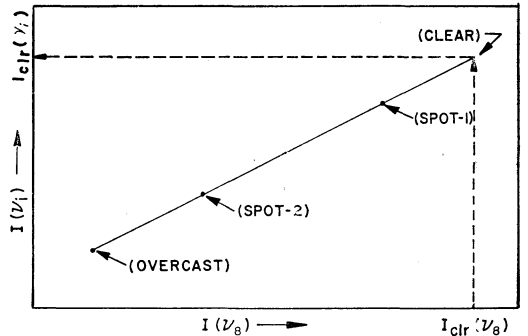
この両式から $I_{cld}(\mu_i)$ を消去すると、

$$I_{clr}(\mu_i) = I_1(\mu_i) + [I_2(\mu_i) - I_1(\mu_i)][1 - \alpha_2(\mu_i)/\alpha_1(\mu_i)]^{-1} \quad (7)$$

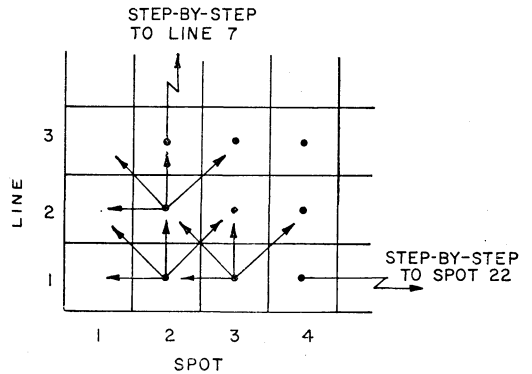
窓領域について (7) 式を適用し、また

$$\alpha_2(\mu_i)/\alpha_1(\mu_i)$$

は波長領域に無関係であることを考慮して、



第4図 Clear radiance の決定方法、横軸 窓領域の放射量、縦軸 CO₂ 吸収帯の各チャンネルにおける放射量



第5図 Clear radiance を求める場合の対となるスポットのとり方

$$\alpha_2(\mu_i)/\alpha_1(\mu_i)$$

を消去すると、次の式が得られる。

$$\frac{I_{clr}(\mu_i) - I_2(\mu_i)}{I_{clr}(\mu_8) - I_2(\mu_8)} = \frac{I_{clr}(\mu_i) - I_1(\mu_i)}{I_{clr}(\mu_8) - I_1(\mu_8)} \quad (8)$$

この式から、 $[I_{clr}(\mu_i), I_{clr}(\mu_8)]$ と $[I_1(\mu_i), I_1(\mu_8)]$, $[I_2(\mu_i), I_2(\mu_8)]$ の3点が直線上にあることになり、これを第4図に示す。 $I_{clr}(\mu_8)$ はSRにより求めた表面温度 (窓領域の放射量に相当)、大気中の温度、湿度の鉛直分布の第一近似などから近似的な値を求めることができるので、この図から $I_{clr}(\mu_i)$ を求めることになる。ただし $I_{clr}(\mu_i)$ を計算するさい、後に述べるような天頂角の差による補正を行う。

5) 処理方法

あるスポットと、それに相隣る4個のスポット (第5図) を対とすると、第1図の太線で囲まれた区域には、CO₂ 吸収帯の6個の波長域毎に、49×4 : 196個の clear

radiance が求まる。雲層が単一の場合、 $I_{clr}(\mu_i)$ の分布は対称的となり X 点における値としては、荷重平均により、 $I_{clr}(\mu_i)$ の真の値を推定できる。この荷重は $I_{cer}(\mu_i)$ の変動の逆数に比例し、次により与えられる。

$$W_m = U_m / \sum_{m=1}^M U_m \quad (9)$$

ただし

$$U_m = [I_1(\mu_8) - I_2(\mu_8)] / \{ [I_{clr}(\mu_8) - I_1(\mu_8)]^2 + [I_{clr}(\mu_8) - I_2(\mu_8)]^2 \} \quad (10)$$

(9), (10) で m は 1 つのスポットに対応し、 M は平均のさいの組の数である。

数個の雲層が存在する場合、分布は非対称となり、分布モードから $I_{clr}(\mu_i)$ を求めることになる。ある区間内の分布からモードが決まるが、区間のとり方によりモードは変動する。これを避けるため、 $I_{clr}(\mu_i)$ の分布と、平滑関数とのたたみこみ (convolute) を行い、得られた分布のモードに対応する値を $I_{clr}(\mu_i)$ にとった。ここで色々の平滑関数をとって試したが、自由度 4 の χ^2 分布を選んだ。なお 1 および 2 チャンネルについては、雲の影響が少ないので、荷重平均をとる。値の選択にさいし、荷重平均からとるか、モードからとるかは、2 つの値を比較して決める。2 つの値が一致する場合には、分布は対称であるとし、荷重平均をとっている。そうでない場合にはモードをとる。両者の差が $1 \text{ mW}/(\text{m}^2\text{cm}^{-1})$ あるいは未満の場合、両者は一致するとする。また次のようなチェックも行う。

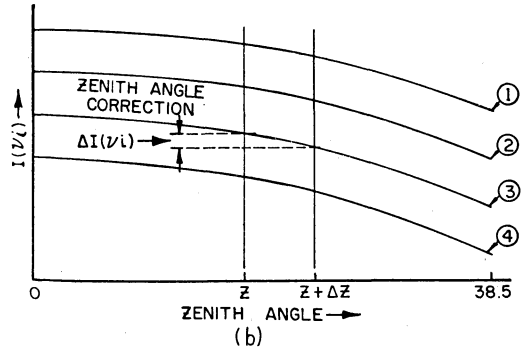
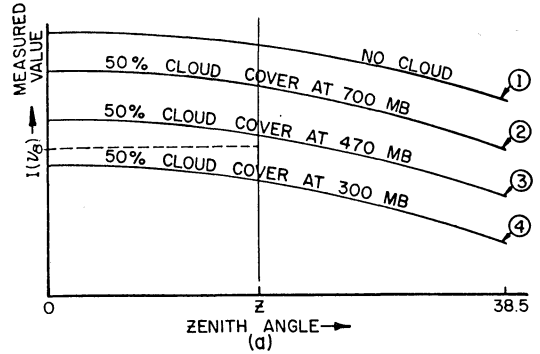
a. 窓領域の放射量の測定値が、第一近似値により算出した窓領域の放射量に一致、あるいは越える場合、そのスポットには雲がないと仮定する。そのようなスポットが 1 つあるいはそれ以上ある場合、 $I_{clr}(\mu_i)$ には測定値自身をとる。

b. 1 つあるいはそれ以上のスポットが clear でない場合で、しかも近接のスポット間における窓領域の放射量の差が、 $1.0 \text{ mW}/\text{m}^2\text{cm}^{-1}$ より小さいとき、一方の $I_{clr}(\mu_i)$ は使用しない。

c. clear なスポットがなく、また 7×7 の領域で、 $I_{clr}(\mu_i)$ が 25 個未満の場合、鉛直分布を求める計算はとりやめる。

d. 7×7 の領域で、各スポットの値を比較し、かつ平均値を求める前に天頂角の差による放射量の補正を次のように行う。

温度の鉛直分布の第一近似、海面水温の第一近似値を



第 6 図 (a) 雲のない場合と雲量 50% の場合における天頂角対窓領域の放射量、縦軸 放射量、横軸 天頂角
(b) CO_2 吸収帯の各チャンネルの放射量と天頂角の関係①②③④は (a) 図におなじ天頂角の差による放射量の補正を示す。

用い雲のない場合と、700mb, 470mb, 300mb 面に、雲が 50% がある場合の 4 つについて放射量を計算し、また天頂角の異なる場合についても算出し、第 6 図の 4 つの曲線が得られる。測定された窓領域の放射量により、6(a) 図から雲の高さを決定する。それに相当する曲線を用い 6(b) 図から放射量に対する天頂角の補正を行う。第 1 図の X における値を求めるためには、すでに clear radiance が求められているので、雲のない場合の曲線を使用して $I(v_i)$ を求める。

6) 透過率

全透過率は炭酸ガス、オゾン、水蒸気それぞれの透過率の積と仮定する。炭酸ガスの透過率は Drayson の方法に基づき、米国の標準大気に対する透過率を算出し、また各層で標準大気からそれぞれ ± 10 , ± 20 , $\pm 30^\circ\text{C}$ 異なる大気について算出しておく。この計算値を使って、鉛直方向における温度の鉛直分布の第一近似に対応

する値に調整する。オゾンによる透過率は全緯度、全季節おなじ補正值を採用した。水蒸気の吸収スペクトルは吸収線と吸収帯を含む。100mb より低い層には R. McClatchey の求めた平均分布を用いて、吸収線毎に算出し、100mb より高い層にはバンドモデルを用いた。吸収線における吸収は、気圧、温度、混合比の期待される値毎に、100個の各層で (第3表)、構造は一様であるとして、線毎に計算される。吸収帯における吸収は水蒸気量の2乗、温度の5ないし6乗の逆数に比例するとした。他の気体による吸収帯の広がりによるものは、水蒸気量に比例するとした。水蒸気による全体の吸収は、吸収線と吸収帯によるそれぞれの透過率の積として算出した。

7) 温度分布の求め方

温度の鉛直分布の第一近似、clear radiance を用い、放射伝達の式を通じて温度分布を求める。ただし最小2乗法により、下のように修正した式を用いる。この式の導入方法については、S. Fritz et al. (1972) の論文を参照されたい。

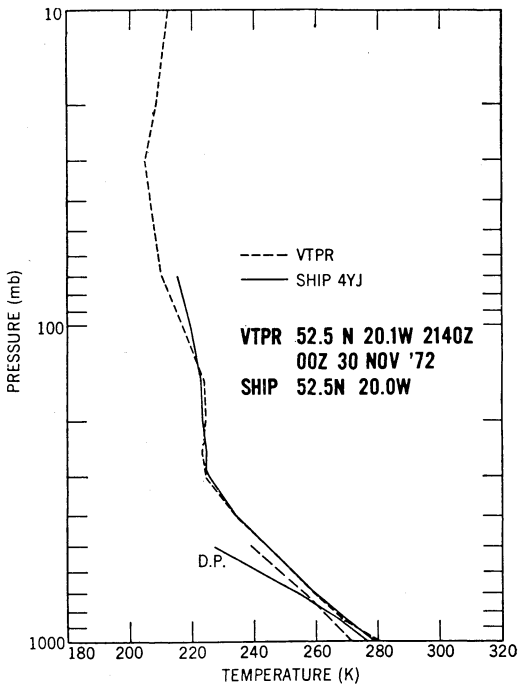
$$B_r(T) = B_r(T^*) + (c)(R_r - R_r^*) \quad (10)$$

ただし $C = SA^T(ASA^T + N)^{-1}$

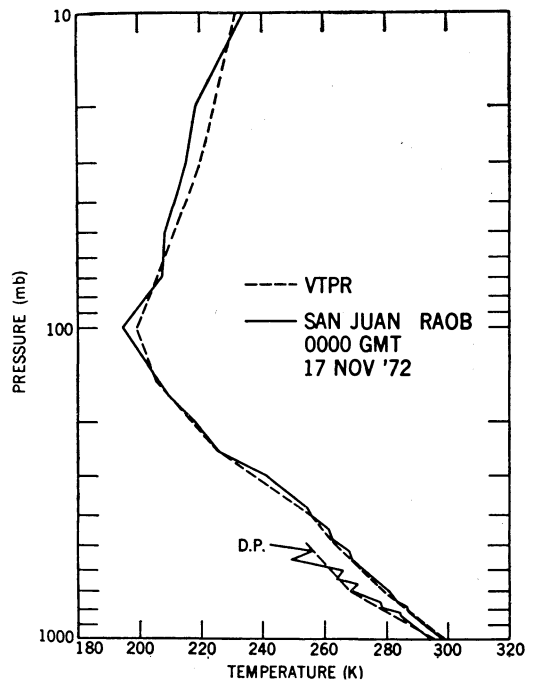
$B_r(T^*)$ は、波数700cm⁻¹において、温度の鉛直分布の

第1近似を用いて得られる100個 (第3表関連) のプランク関数で、第3表に示す気圧高度におけるもの。 R_r は CO₂ 吸収帯の6個の波数において測定された放射量。 R_r^* は表面温度の第1近似、温度の鉛直分布の第1近似、透過率などを放射伝達の式に代入して算出した放射量、なお R_r, R_r^* とともに、同一の黒体温度、波数 700 cm⁻¹ をプランク関数に代入して正規化する。 S は典型的なラジオゾンデ観測資料を用いて算出した、波数 700 cm⁻¹ における100個のプランク関数の変動行列、 A は 6×100個ある荷重関数 $\delta\tau/\delta x$ の行列である。ただし τ は、温度、混合比の鉛直分布の第1近似から求められた透過関数、 $x = -\ln p$: 気圧、 A^T : A の転置行列、 N 測定誤差の行列である。

(10) 式により解は測定された放射量と、温度の鉛直分布の第1近似から算出された放射量の差の一次結合と、温度の鉛直分布の第1近似の和として求められることになる。なお測定誤差 N が大きいとき、解は温度の鉛直分布の第一近似に近ずき、また温度の変動が小さい場合も同様である。なお C は温度にはほぼ無関係であるので、一定として計算を行う。このようにして $B_r(T)$ から温度が求められ、また層厚も得られることになる。各等圧面高度は、北半球の予報領域では、NMC に



第7図 VTPR とラジオゾンデ資料の比較



第8図 第7図におなじ、ただし San Jan 付近

ける数値予報から得られる 850mb 面高度を参照して計算する。他の区域では、1,000mb 面の高さを 0 とし、さきの層厚から各等圧面高度を求める。

第 7 図に高緯度、第 8 図に熱帯におけるラジオゾンデ観測資料と VTPR の比較を示す。(10) 式の右辺第 2 項は、各気圧面における荷重関数 (各波長毎に異なる) と各波長域の放射量の積の形をとっている。荷重関数の分布は嘉納 (1972) の第 4-1 図のように広い範囲に分布しているので、第 2 項の鉛直分布は滑らかになることが考えられる。温度の鉛直分布は、(10) 式の左辺のプランク関数から求められるので、右辺第一項の鉛直分布、それから得られる温度の鉛直分布は、第一近似に顕著な屈曲がなければ、逆転などの微細構造は得られないことになる。

8) 水蒸気分布

19 μ の領域で測定された放射量と、すでに求めた温度の鉛直分布を用い、次の式により推定する。

$$w = w^* + c\varphi \quad (11)$$

w , w^* は混合比で、後者は鉛直分布の第 1 近似、 φ は通常の高層観測資料により前もって求めた経験的直交関数、 c は 535cm^{-1} の波長帯で水蒸気量を w として算出した放射量と、測定された放射量の差が、測定誤差の標準偏差の 2 倍内にあるように決定する。

φ は統計的に求められるので平滑な関数形をしている。また放射量の計算のさい、温度分布が正確にわかっていることを必要とするなど、上記の方法による精度には限界がある。

9) データの品質管理

User に送られる前に、以下に示すように色々のテストが行われるが、基準に入らないデータがあると、それを含む 100mb 面までのすべてのデータは破棄する。

a. 対流圏内で、指定気圧面と特異点等で限られる層の減率が、超断熱でないかを調べる。

b. 各チャンネルにつき、放射量の初期値と実測値の差が、次の値を超えるときは温度分布の算出はしない。

チャンネル 1, 2	15mW
チャンネル 3, 4, 5, 6, 7	5 mW
チャンネル 8	7 mW

c. buddy check (周辺のデータとの比較) NMC の数値予報で得られた初期値と、VTPR データの各気圧面高度の差を、500km 範囲内のすべての点について求める。VTPR データ (clear radiance) はその範囲内で他に 1 スポット以上なければならぬ。他になければそ

のデータは破棄する。またあるスポットにおける高度差が、その周辺の数スポットにおける高度差またはその平均値と比較し、次の範囲内になれば破棄する。

±200m	他のスポット	1 個
±100m	〃	2 個
±75m	〃	2 個以上

陸上のデータは陸地の高さに関する補正を行う。なお通常観測の時間に観測した VTPR データのうち、上記により取除かれたものは、地理的な偏倚を知るため表示する。

10) 計算機による天気図解析に使用するさいのデータの品質管理

NMC には、NESS から、各国向けのデータとおなじものが送られてくる。00Z の天気図には、1801Z 以降に観測された VTPR データを使い、12Z の天気図には、0601Z 以降のものを使用する。また VTPR の観測時が 00Z または、12Z と異なる場合には、NMC の数値予報から得られる予想高度の時間変化を用い、00Z ないしは 12Z の値に修正する。

過去の経験によると、850mb 面の予報は、発達中の低気圧や、速く移動する気圧系の付近では、誤差が大きい。そこで 00Z, 12Z における地上天気図の解析結果を用い、1,000mb の高度を求める。次に VTPR データから得られる温度から層厚を算出し、各等圧面高度を求める。

また VTPR データを使って判った誤差は、陸上、雲層の厚い場合でしかも軌道の東側で大きい。衛星内の鏡がこれらの区域を向いている時、放射計の記録の変動が大きいようである。

3. ローカル局における VTPR 生データの直接受信ならびに温度の鉛直分布の推定

1) ITOS によるデータの送信と受信に必要な機器 ITOS F (本年 11 月頃打ち上げ予定)、G のビーコン送信には、二つの副搬送波チャンネルの他に、デジタルデータ伝送用のチャンネルがあり、次のデータを含む。

生の VTPR
太陽プロトン モニター
衛星内の時計による時間のカウント
衛星の内部状態

3 つのデータ チャンネルのため、136.77 MHz の搬送波を位相変調している。デジタルデータの転送速度は 512bit/sec である。ノイズの振分け可能な状態で受信するためには、利得が 20 デシベル以上のアンテナを必要と

する。今後の計画としては790マイルの高度をとり、地方時9時に赤道を南下する衛星と、825マイルの高度を飛び、地方時15時に赤道を北上する衛星を運用する。これにより、VTPR データは全球につき、1日4回得られることになる。

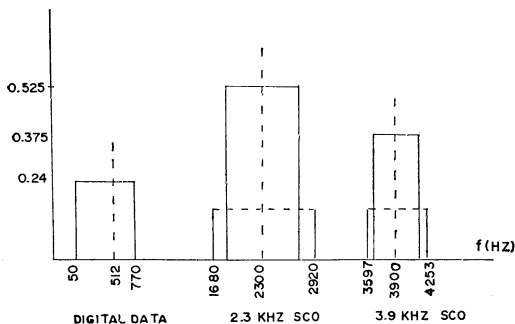
受信アンテナの特性については、前に述べたが、デジタル データ受信のため、次の機器が必要である。相当する市販の機器名も示す。

- a. 前置増幅器 Aertrech Industries モデル A1339
- b. 受信器 Microdyne Corporation モデル1100-AR
位相変調器 Microdyne モデル1150
- c. Diversity Combining Microdyne モデル3600-DC (A)
- d. Low Pass Filter 1024Hz bandwidth
- e. ビット同期制御装置 Monitor モデル318
- f. データ Commutator EMR モデル2746
- g. ミニコン TEMPO II

アンテナを除き、以上の価格は3万ドル位である。

2) VTPR やその他 デジタルデータのフォーマット

第9図に位相変調後の3つのチャンネルの占有するスペクトルを示す。デジタルデータは、衛星の内部で発生され、ビーコン送信器により、リアルタイムで送信するため、SR レコーダーのトラック上に記録される。このさいデジタルプロセッサにより、VTPR と他のサブシステムからのデータは、一つの連続した直列のビットストリームに作られる。



第9図 NOAA “3号” のビーコンによる変調スペクトル(デジタルデータ) 縦軸 偏差(ラジアン)

3) データの構成

VTPR の鏡が、軌道に直角に、地球を一回走査して、元の位置に戻るまでの時間 (12.5sec) 内に得られるデ

ータ (1 フレーム) は 400 語で、下記の情報が含まれている。なお一語は16ビットで構成され、15ビットでデータを1ビットはパリティである。

- a. 同期 最初の2語
- b. Time Code 3, 4番目, 2語のうち24ビットが、衛星内の時計で算出したフレーム開始時間を示す。これは衛星打ち上げ後の経過時間
- c. 太陽プロトンモニター20語
- d. TLM 衛星の内部状態178語 奇数番号目
- e. VTPR 198語 偶数番号目, VTPR 1語の構成
データ10ビット, 位置情報5ビット, パリティ1ビット。

鏡は1走査間に23個のステップングを行い、8個のフィルタにより規定される8個のスペクトル領域の放射量が各スポットについて、それぞれ取得される。送信順序は Q, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8のチャンネルで、このうち Q は 668cm^{-1} の CO_2 吸収帯, 8は窓領域である。この結果、 8×23 個の184個の放射データが得られる。このデータの前後におよび後にある7語ずつは、蔽い, 第1, 第2光学系の出力である。

4) ローカル局における鉛直温度分布の算出

各ローカル局でも前出の受信設備があれば、現在NESSが取得しているデータと同様なものが得られる。したがって、大型計算機と数値予報があり、また2のデータ処理と解析で紹介した方法をプログラムに組めば、温度湿度の鉛直分布を求めることができる。しかしITOS F または G などから直接受信できる施設を備える前に、NESS から前もって、ITOS による放射資料を取得し、(10) 式のCを算出しておく必要がある。このような作業には時間、労力がかかるので、各ローカル局の便宜を計るため、NESS は次の4つの資料を各国に送付するそうである。

- a. 検定係数 a_i, b_i
各波長領域、各スポットにおけるデジタルカウントと a_i, b_i などを、(1) 式に代入すれば一連の放射データが得られる。
- b. 軌道オーバーレイ
- c. 軌道が赤道を交叉する点の経度と時間
- b, c を使ってスポットの位置を決定する。
- d. 温度分布を求める場合に使われる下記の帰帰係数行列 C の各要素

15個の等圧面における温度を求める式は下に示されるが、その前に放射データから、clear radiance を求めな

ければならない。

$$t = Ci$$

これを展開すると次のようになる。

$$\begin{pmatrix} t_1 \\ t_2 \\ \vdots \\ t_{15} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{1,1} & c_{1,2} & c_{1,3} & \cdots & c_{1,8} \\ c_{2,1} & c_{2,2} & c_{2,3} & \cdots & c_{2,8} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ c_{15,1} & c_{15,2} & c_{15,3} & \cdots & c_{15,8} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \vdots \\ i_8 \end{pmatrix}$$

なお t は15個の等圧面における温度ベクトルで、添字 1, 2, ..., 15 はそれぞれ、1000, 850, 700, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 20, 10mb を示す。また i は8個のチャンネルにおける clear radiance ベクトルである。

4. むすび

VTPR データは資料のない海洋上の天気図解析を容易にし、かつ向上させることは疑いない。William Bonner は、VTPR データを使用した場合とそうでない場合について、プリミティブモデルによる予報結果を比較した。両者の差は余り明確ではないようである。彼によるとモデルが不完全であるためかも知れないと述べている。

VTPR データの精度の限界としては、数値予報の結果を初期値として、観測された放射量を参考として、データを求める点にある。また雲のある場合、近隣のスポットで同様な放射特性をもつ雲が一層存在するという仮定のもとにデータが求められている。また水蒸気による放射の吸収量は、温度、湿度が正確に求められていないと、正しい値は算出できない。このため大気下層のように温度、水蒸気量の変動の大きい区域では、実測との誤差が大きくなることが予想される。

このようなデータの推定に関する制約なしに、大気鉛直構造を求める実験がニンバス5号のITPR, NEMS (Nimbus E, Microwave Sounding) により行われており、Smith (1973) が、その概要を印刷物で提供してくれた。それによると、まず窓領域の 3.9μ と 11μ の2つ

を使って海面水温を求める。また Microwave は雲を透過する性質を利用し、Clear radiance という概念を導入しなくても、大気温度、湿度の鉛直分布を推定できる。これらの手法の詳細については述べないが、将来の現業用衛星にこのような測器が搭載され、メソスケールの現象の解析や研究に大いに貢献するものと思われる。

おわりに

報告の大部分は、VTPR の User's Guide ともなる L. Mcmillin et al. (1973) Satellite Infrared Sounding from NOAA Spacecraft から抜粋したが、不明な部分については、A. Werbowetshi 氏に助言を頂いた。また気象庁総務課能登技官に閲読をお願いした。両氏に深く感謝の意を表す。また VTPR 利用の検討会に参加の機会に与えて下さった寺内気象衛星課長に深く感謝します。

文献

- 1) Fritz, S., Wark, D.Q., et al. 1972: Temperature Sounding from Satellites, NOAA Tech. Rep. NESS 59. 1-49.
- 2) 嘉納宗晴, 1972: 放射測定およびそれによる気象要素の推定, 気象研究ノート, 111号, 気象衛星特集号, 53-80.
- 3) Bonner, W.D., 1973: Impact of VTPR data. Presented at International VTPR Workshop. 16-20, July 1973.
- 4) Smith, W.L., Staclin, D.H., and Houghton, J.T., 1973: Intercomparison and Amalgamation of NIMBUS-5 Infrared and Microwave Temperature Profile Data. 1-7. To be published.
- 5) Smith, W.L., Woolf, H.M., and Hayden, C.M., 1973: Meteorological Extractions from the NIMBUS-5 ITPR Experiment. 1-11. To be published.
- 6) Mcmillin, L.M. et al., 1973: Satellite Infrared Soundings from NOAA Spacecraft. NOAA Tech. Rep. NESS 65, 1-112.