

物理法による TOVS 処理システム開発

Development of TOVS Processing System Based on a Physical Method in MSC

竹内 義明*
Yoshiaki Takeuchi

Abstract

A retrieval algorithm based on a physical method is developed for operational TOVS system in MSC. The new algorithm is based on ① establishment of the category which is not suffered by cloud contamination, ② the physical method which includes spectroscopic parameter explicitly, ③ the optimal estimation formula for the inversion of the meteorological parameters such as temperature and dew point temperature, ④ the 12h forecast from the numerical prediction as the first guess. The forecast value is also used for the calculation of the weighting function and the sensitivity functions associated with the meteorological parameters.

The results of the comparison with sonde observations show that the RMS error of the temperature retrievals is improved to 1.5K which is the same order to the forecasting. The bias error of new method is lesser than both that of forecasting and that of operational retrieval. As for the dew point temperature, the absolute value of the bias error is about 2K, and the RMS error is about 5K.

The images of the operational processing for a case study show that the errors, which is caused by the instability of the regression coefficients, appear occasionally. This error is large near the edges of the scan.

The new algorithm solves these problems and express the surface temperature rather reasonably. The image of the dew point depression derived from the new algorithm shows larger contrast between dry area and wet area than initial field.

1. はじめに

気象衛星センターでは1983年以降、NOAA 衛星の TOVS, AVHRR データを処理して、気温と露点の鉛直分布を算出してきた。現在は NOAA-11のデータを毎日、昼夜それぞれ2～3軌道分受信し、鉛直分布算出処理を行っている。しかし、その精度は対流圏中層で約2度、地表付近と圏界面付近では約3度であり、数値予報の初期値としては不十分である。さらに、数値予報課の調査によれば、NESDIS等のプロダクトに比べ、バイアス誤差が大きいことも指摘されている。現在、衛星センターで TOVS データ処理に使用して

いる鉛直分布算出処理アルゴリズムは統計法に基づいたものであり、鉛直温度、露点の算出係数をゾンデと晴天放射とのデータ対から統計的に決定する方法である。この方法は品質の良いデータ対が得られるかどうかによって精度が決まるので精度向上に限界がある。

そこで、気象衛星センターでは1990年度から物理法による鉛直分布算出処理システムの開発を開始した。物理法は観測波長における放射伝達計算を大気透過率等の分光学的データを入れて陽に計算し、より理論的な算出を行う方法であり、既に NESDIS を初めとする各国のシステムに取り入れられている。物理法の特徴は、算出係数を統計的に決定する必要がないため、大

*気象衛星センターシステム管理課
(現在 科学技術庁研究開発局地球科学技術推進室)

Table 1 General components of vertical sounding retrieval algorithm.

処 理	内 容	補 足
〈リアルタイム処理〉		
[受信]	TOVS データ受信	HRPT, DSB データ等
[前処理]	TOVS データ抽出 キャリブレーション ナビゲーション	
[算出準備]	晴天放射量計算 雲除去	衛星天頂角補正, 雲パラメタ (雲量, 雲頂高度等) 抽出を含むこともある。
[算出係数決定]	初期値決定, 算出係数決定	(物理法の場合)
[鉛直分布算出]	晴天放射から鉛直分布への変換	
[品質管理]	不良算出結果の除去	気候値, 初期値等を使用
〈非リアルタイム処理〉		
[コロケーション]	衛星観測放射量とレーウィンゾンデやロケットゾンデの観測による気温, 湿度のデータ対作成	
[算出係数決定]	コロケーションデータから統計的に回帰係数を決定	(統計法の場合)
[精度評価]	解析値, ゾンデ観測値を用いた評価	

量の放射観測-ゾンデ観測対を蓄積する必要がないこと, 極軌道衛星の場合に問題となる走査角補正を理論的に考慮できること, 数値予報値を初期値として考慮できることなどである。第2章では TOVS サウンディングシステムの概要, 第3章では新しく開発した鉛直分布算出アルゴリズムの詳細, 第4章では算出結果と簡単な精度評価の結果を述べる。第5章では結論と今後の課題について述べる。

2. TOVS サウンディングシステムの概要

2. 1 サウンディングシステムの概要と諸外国の情勢

一般に TOVS データを用いた鉛直分布算出システムは Table 1 のようなサブシステムから構成されている。

TOVS データの受信は全球 TIP データ, リアルタイム HRPT データ, リアルタイム DSB データの3つの方法で行われる。このうち全球 TIP データは運用局である NESDIS でのみ受信可能である。地域的に利用できるのはリアルタイム HRPT データとリアルタイム DSB データである。気象衛星センターではリアル

タイム HRPT データを受信して, AVHRR データ, TOVS データを抽出している。

前処理はデータ編集, キャリブレーション, ナビゲーションからなる。予め用意してあるキャリブレーション定数や受信データに含まれるキャリブレーション用データを用いて, カウント値から観測放射量への変換を行う。また, 測器のステッピング角や GTS 経由で入手した TBUS (軌道予測) 情報を用いて, HIRS の各ピクセルと緯経度との対応を計算する。

算出準備は HIRS, MSU, SSU の晴天放射の計算, 衛星天頂角補正等を行う。物理法では算出物理量 (気温, 水蒸気量, 地表温度, 射出率, オゾン量等) の初期値の設定もここに含まれる。MSC では, HIRS ピクセルに含まれる AVHRR データを用いて雲パラメタ (雲量, 最小輝度, 最大輝度, 平均輝度) を算出し, 晴天放射計算に使用している。

算出係数決定は初期値 (物理法) やゾンデ放射コロケーションデータ (統計法) 等から算出係数を決定する。この処理は観測毎に行う場合もあれば, 数カ月に1度だけ行う場合もある。

算出は係数決定処理で求められた係数を用いて晴天放射量 (晴天放射輝度温度), あるいはその初期値から

Table 2 Summary of major system for TOVS processing.

処理システム	システム90	3I	ITPP	LASS	ARM	Eyre(1987)	Susskind(1989)	Aoki(1983)
開発国	アメリカ	ヨーロッパ	アメリカ	イギリス	オーストラリア	カナダ	アメリカ	日本
処理局	NESDIS	ECMWF	世界各国	UKMO	BMRC	AMD	GLAS	JMSC
処理手順	自動	自動	自動	インタラクティブ	自動	自動	自動	自動
初期値	予報値	TIGR	?	予報値	予報値	予報値	予報値	なし
雲除去	AVHRR	φ法	?	Eyre et al. (1987)	?	?	HIRS 輝度修正	AVHRR
算出法	物理法 線型 非逐次法	物理法 線型 非逐次法	物理法 線型 非逐次法	物理法 線型 非逐次法 最小分散法	物理法 線型 非逐次法	物理法 非線型 逐次法 最適評価法	物理法 緩和法 逐次法	統計法
プロダクト	気温, 水蒸気, 雲量, 圏界面, 気温等	層厚 7層	気温, 水蒸気, オゾン量	気温, 水蒸気等	気温, 水蒸気, 雲頂気圧等	気温, 水蒸気, 部分雲量等	気温, 水蒸気, 全オゾン量, 雲 量パラメタ等	気温, 水蒸気, 雲パラメタ等

のずれを算出物理量やその初期値からのずれに変換する。

品質管理は算出結果に対して各種のチェックを行い、異常な算出を除去する。

主な TOVS 処理システムの一覧を Table 2に示す。最近の諸外国の TOVS 処理の情勢は以下の通りである。

1) 統計法から物理法 (修正物理法) へ

統計法は放射輝度 (の気候値等からのずれ) と算出物理量 (の気候値等からのずれ) のコロケーションデータベースを用いて回帰式を作成し、物理量を算出する方法である。一方物理法はある算出物理量の初期値を与え、その初期値に対応する放射輝度を理論的に計算し、それと観測された放射輝度のずれを用いて初期値を修正して、物理量を得る方法である。従って、物理法は初期値が必要だという点で初期値法の一つであるが、初期値の修正に用いる算出係数も理論的に与えられるという特徴がある。最近開発されるシステムはほとんどが物理法を採用している。

2) 算出システムへの数値予報値の導入

物理法の初期値としては気候値を与えたり、鉛直分布と観測輝度温度のデータベースの中から観測輝度温度のパターンが似ているものを使用する。NESDIS のライブラリ法、CNES が開発した 3 I システム (Improved Initialization Inversion Procedure) の TIGR (TOVS Initial Guess Retrieval) データセットがよく

知られている。最近は数値予報の精度が向上しているため、数値予報値を初期値として使用する方向に精力が向けられている。

3) 測定誤差, 初期値誤差情報の利用

物理量を算出する際に初期値の誤差や測定誤差を考慮する最小分散法, 最適評価法の利用が進んでいる。

4) 雲除法 (晴天放射算出), 雲パラメタ算出への AVHRR データの利用

HIRS の水平分解能は衛星直下点で 17.4km であり、ほとんどの場合ピクセル中に雲が混在している。通常、鉛直分布を算出する際には観測放射から雲の影響を除いた晴天放射に補正する (雲除去)。今までは隣接する複数の HIRS スポットの観測値を使用する Smith et al. (1976) や McMillin (1978) の方法が使用されていたが、最近、雲除去に AVHRR データを使用するシステムが増えてきている (3 I システムの CATHIA (Calcul Automatique des Temperatures et Humidites Incluant le AVHRR) データセット等)。MSC では当初からこの手法を採用している (Aoki; 1982)。

5) 算出システム, ソフトの標準化, パッケージ化

TOVS 算出システムをパッケージ化したものとしてウィスコンシン大学が開発した ITPP (International TOVS Processing Package), CNES が開発した 3 I システムがある。いずれもバージョンアップを重ねており、新しくシステムを開発しつつある受信処理局にその全てあるいは一部が利用されている。

6) 他の測器データの付加

DMSP 衛星に搭載されている SSM/T, SSM/I や ERS に搭載される ATSR 等の観測データを算出システムに組み込む計画が進んでいる。

7) インタラクティブシステムの開発

TOVS データおよびその算出結果をディスプレイに表示して、実況監視、短期予報に使用するインタラクティブシステムが開発されている。CIMSS が開発した McIDAS や オーストラリア 領域 McIDAS (ARM) がすでに運用されている。

2. 2 MSC の新システム開発の要点

2. 1 で述べた情勢を踏まえて今回開発した新システムでは次のような変更、改良を行った。

1) 雲の扱い、算出カテゴリの見直し

現行の算出処理においては、部分曇天域での雲除去が算出アルゴリズムの中で重要な位置を占めており、その誤差が算出精度の向上を妨げている。

1994年以降に打ち上げられる予定の次世代 NOAA 衛星ではサウンディング測器の構成は現行の HIRS+MSU+SSU から HIRS+AMSU に変更され、曇天域での算出処理は AMSU を使用することになる。一方、HIRS の役割は晴天域の鉛直分布算出に限られると予想されるので、現在の様に HIRS の観測輝度に雲量補正をして晴天放射を求める必要がなくなる。

以上の様な見通しのもと、新システムでは雲量補正の必要のない領域についてのみ鉛直分布算出を行うことにする。

2) 物理法の導入 (修正物理法)

物理法が統計法と異なる点は、測器の各センサーのフィルター関数で表される波長帯の分光学的データを用いて、理論的に観測されるであろう放射をシミュレーションする点である (前進計算)。この方法では算出物理量 (気温や水蒸気量) と観測放射の間の非線型効果も考慮可能である。ただし、物理法では、前進計算で使用する物理量 (気温、露点の鉛直分布、地表放射率等) をあらかじめ設定しなければならない。物理法と統計法 (回帰法) の特徴を Table 3 に示す。

Table 3 The comparison between physical method and statistical method.

物理法	統計法 (回帰法)
透過関数の誤差の影響を受ける。 放射伝達方程式によって与えられる物理的意味を入れられる。 非線型効果を考慮できる。	透過関数不要 使用法が簡単 多変数解析パッケージを利用可能 ラジオゾンデとのマッチングにより係数データ作成可能 系統的な放射誤差に鈍感 サンプルサイズ、不適当なカテゴリ化による誤差

純粹に分光学的データのみを用いると、さまざまな要因により、観測放射と計算放射の間にバイアスが生じる。このバイアスを除去するため、ゾンデと観測放射のコロケーションを用いて、バイアス量を算出し、放射計算に組み込む (修正物理法)。この放射計算は気温や水蒸気の初期値からのずれと計算放射のずれを結びつける感度行列の計算にも使用する。なお、扱い易さのため、放射計算の結果は現行の輝度から輝度温度に変える。

今回は MSU と SSU のデータは使用していない。理由は、SSU については測器に吸収セルを用いるため、透過率の計算が困難であるため、MSU については

偏光の計算が複雑であるためである。

3) 初期値としての数値予報値の利用

物理法で用いる算出物理量の初期値には気候値、分類されたデータベース、モデルの予報値等を設定できるが、解の非一意性を避けるためできるだけ真の解に近い初期値を設定しなければならない。数値予報の精度が向上した現在では数値予報の結果を使用することにより算出の精度を上げることができる。衛星センターでは数値予報課作成の12時間予報値の緯経度 5°格子点データを入手できるので、これを初期値として使用して算出精度の向上を目指す。

4) インバージョンにおける最適評価法の利用

算出物理量の推定を行う際に、初期値の精度、放射観測の精度、気象学的制約を考慮する最適評価法を用いる。

まとめると、今回開発した物理法による鉛直分布算出アルゴリズムは次の一連の式で表現される。

$$\begin{aligned}
 R_{CAL} &= f(X_0) && \text{: 初期値に対する放射計算 (前進計算)} \\
 A &= (\partial R_{CAL} / \partial X) X_0 && \text{: 感度行列計算} \\
 \Delta R &= R_{OBS} - R_{CAL} && \text{: 輝度温度差 (観測-計算) の計算} \\
 \Delta X &= S_X A^T (A S_X A^T + S_Y)^{-1} \Delta R && \text{: 算出物理量の修正計算} \\
 X &= X_0 + \Delta X && \text{: 算出物理量の修正}
 \end{aligned}$$

ここで、算出物理量 X は、気温、露点の鉛直分布、地表射出率等である。

- また、 S_X : 鉛直分布初期値相関行列
- S_Y : チャンネル間相関係数行列
- A^T : A の転置行列
- X_0 : 算出物理量の初期値

上の計算過程を繰り返せば、初期値に依存しない算

出結果を得ることができるが、計算時間等の制約から修正を 1 ステップだけ行う。そこで、初期値の精度が算出精度の向上に重要である。

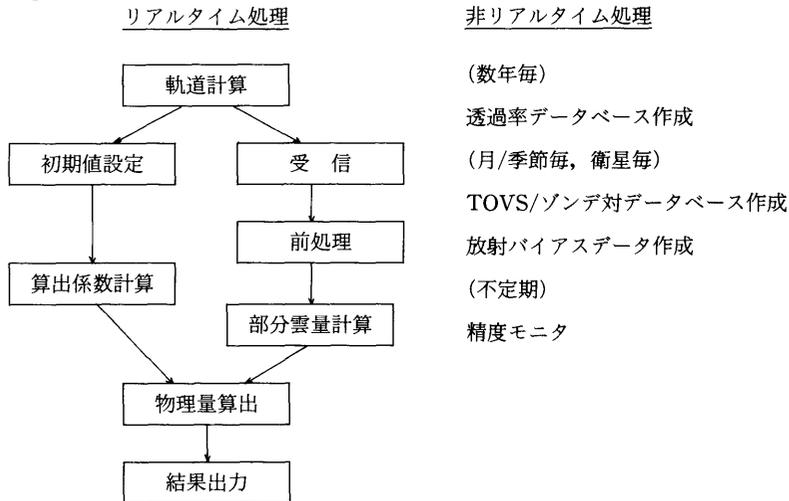
ところで、上の 4 番目の式は数学的にカルマンフィルターで使用される観測更新アルゴリズムに等しい (片山; 1983)。 ΔX は ΔX の線型推定量 ΔX (測定 ΔR の線型演算から求められる推定量) の中で誤差ベクトル $e = \Delta X - \Delta X$ の分散行列に関する任意の 2 次形式を最小化する不偏最小 2 乗推定量 ΔX である。この式の中で、鉛直分布初期値の精度、放射観測の精度、気象学的制約を、 S_X や S_Y をとおして考慮できる。ちなみに修正後の算出物理量の誤差共分散行列は次の式で示され、物理法の精度は S_X' で表現される。

$$S_X' = S_X - S_X A^T (A S_X A^T + S_Y)^{-1} A S_X$$

3. 鉛直分布算出処理のアルゴリズム

新しい TOVS 処理システムの一覧を Fig.1 に示す。この中で軌道計算、受信、前処理 (キャリブレーション等)、部分雲量計算については現行処理と同じである。本節では新規に開発した部分について詳しく説明する。

Fig.1 General flow of improved TOVS processing system in MSC.



3. 1 透過率データベース作成

衛星で観測される放射量を計算するためには、セン

サの応答関数 (フィルター関数)、吸収気体の吸収係数、地表の射出率、大気鉛直分布 (気温、露点)、吸収気体の混合比、衛星天頂角、太陽天頂角、大気の上

縁での太陽放射量が与えられていなければならない。ここでは放射計算に不可欠な大気の透過率データベースの作成について述べる。

3. 1. 1 大気層の分割

衛星で観測される放射量を十分な精度で計算するためには、大気層を細かく分割して鉛直分布を表現しなければならない。この大気層の分割に関する条件を以下に述べる。

条件1：大気の鉛直分布を十分表現できるだけ細かく分割する。

2：透過率、放射計算をする際の差分誤差が小さくなるように細かく分割する。

3：鉛直分布の初期値（数値予報格子点値）や解析値は指定気圧面（1000hPa～10hPa；15レベル）でしか与えられていない。ゾンデを用いた精度評価等にも指定気圧面で分割するのが都合がよい。

4：HIRSの荷重関数を表現できる程度の大気層の数が必要。

5：放射計算に要する時間は大気層数に比例するので、実用的な数に抑える。

以上の条件を考慮した結果、大気層を指定気圧面（1000hPa～10hPa；15レベル）に地表と1hPaを加えて、17レベル、16層で表現し、各層の中では気温、露点温度が線型に変化すると仮定する。地表気圧は、1013.25hPaに固定して透過率データベースを作成する（Fig. 2）。実際に放射計算を行う際には数値予報の予報値や高層実況値として与えられる地表気圧を用いて最下層の透過率を計算し直す。

3. 1. 2 波数間隔の設定

透過率を計算する波数間隔は次の条件を考慮して決めなければならない。

条件1：大気の透過率の波数依存性を精度良く表現できること。

2：測器のセンサのフィルタ関数の形に対応できる程度に細かいこと。ちなみにHIRSのフィルタ関数の半値幅は 4.12cm^{-1} （Ch.1）～ 78.6cm^{-1} （Ch.12）である。

3：放射計算に要する時間は波数間隔に反比例するので、実用的な間隔をとる。

以上の条件を考慮して、波数間隔を 5cm^{-1} の透過率データベースを作成する。波数の小さなチャンネルに対

して 5cm^{-1} というのは条件2を満たすには広すぎるが、計算時間の制約等もあり、これによって生じる放射計算の誤差は後で述べる放射バイアスに含めることで処理する。

3. 1. 3 大気モデルの設定

気体の吸収係数は温度と気圧に依存するのでモデル大気によって与えなければならない。大気層のレベルを気圧で設定したため、吸収係数の気圧依存性は大気層毎に透過率を計算することで考慮できる。

モデル大気の気温は1976AFGL標準モデル大気および、これを $\pm 20\text{K}$ 、 $\pm 40\text{K}$ シフトさせた鉛直分布を与える。露点については、5個の気温の鉛直分布のそれぞれに対して露点差（気温－露点）が0、2、5、9、14、20、27degである7個の鉛直分布を与える。結局、気温と露点の異なる35個のモデル大気に対し、16層の透過率の値を計算する。

吸収気体として、 H_2O 、 CO_2 、 O_3 、 N_2O 、 CO 、 CH_4 、 O_2 の7種類の気体を考慮する。水蒸気の量は露点に従って変えるが、その他の気体の混合比は一定とし、1976AFGL標準モデル大気の数値をそのまま与える。特に、オゾンの量を固定したため、今のところ本システムでは全オゾン量の算出はできない。また、エアロゾル、雲による吸収は考慮しない。

3. 1. 4 透過率モデルの概要

大気中の気体による放射の吸収、射出は波長依存性が強く、放射計算の目的によってこの波長依存性をどの程度考慮するかを適切に決めなければならない。この大気吸収のモデル化は、どのような波数間隔で放射計算を行うかによっていくつかの方法に分類される。例えば、全球予報モデル、放射収支等には赤外放射全体を一括して扱う射出率モデルや個々の吸収帯毎に透過率を求める広バンドモデルが使用される。一方、高精度での放射計算が要求される場合には、吸収線の形を再現できる程十分細かい間隔で透過率を求めるラインバイライン法が使用される。両者の中間として、吸収帯を数個に細分してその波数区間における透過率を求めるのが狭バンドモデルである。TOVSに搭載されているHIRSの場合はその応答関数の中に多くの吸収線を含むが、気体の吸収帯の一部のみを測定しているために、通常狭バンドモデルが使用される。マイクロ波測器であるMSUの場合はラインバイライン法を使用するのが一般的である。

レベル	大気上縁	気圧	気温	露点
17	第16層	1 hPa	T(17)	
16	第15層	10hPa	T(16)	
15	第14層	20hPa	T(15)	
14	第13層	30hPa	T(14)	
13	第12層	50hPa	T(13)	
12	第11層	70hPa	T(12)	
11	第10層	100hPa	T(11)	
10	第9層	150hPa	T(10)	Td(10)
9	第8層	200hPa	T(9)	Td(9)
8	第7層	250hPa	T(8)	Td(8)
7	第6層	300hPa	T(7)	Td(7)
6	第5層	400hPa	T(6)	Td(6)
5	第4層	500hPa	T(5)	Td(5)
4	第3層	700hPa	T(4)	Td(4)
3	第2層	850hPa	T(3)	Td(3)
2	第1層	1000hPa	T(2)	Td(2)
1	地表	Ps hPa	T(1)	Td(1)

Fig.2 The layout of the model atmosphere for radiative transfer calculation (foreward calculation).

気体の吸収には連続吸収と線吸収の2種類があり、連続吸収帯では吸収係数は波数に余り依存しないが、線吸収の吸収係数は波数によって激しく変化する。従って、気体の線吸収をパラメタライズしなければならない。狭バンドモデルには吸収線のパラメタライズの方法によって Elsasser モデル、ランダムモデル、k 分布モデル等が提案されている。

本処理アルゴリズムでは吸収係数の再配列による k 分布モデルを採用した。この方法はある波数間隔内を線吸収の形を表現できる程度に細かい波数間隔に分け、透過率を計算する(ラインバイライン計算)。次にその透過率を大きい順に並べ直し、階段関数で近似する (Fig. 3)。すると元の波数間隔内での透過率がいくつかの小区分の透過率の平均として表現できる。この方

法でラインバイライン法にそれほど劣らない精度で、かつ高速に放射計算を行うことができる。

実際の計算では波数間隔を 5 cm^{-1} 、ラインバイライン計算の波数間隔を 0.0005 cm^{-1} 、波数小区分を10個とした。透過率の計算は鉛直方向だけについて求めておく。その他の方向については光路の長さに光学的厚さが比例することを用いて補正が可能である。

3. 1. 5 透過率データベースの構成

透過率データベースの構成を Fig. 4 に示す。

波数範囲 620-2720 cm^{-1} 、波数間隔 5 cm^{-1} 、
 大気層の数 16層、大気モデル数35(気温5×露点7)、
 波数小区画数 10。

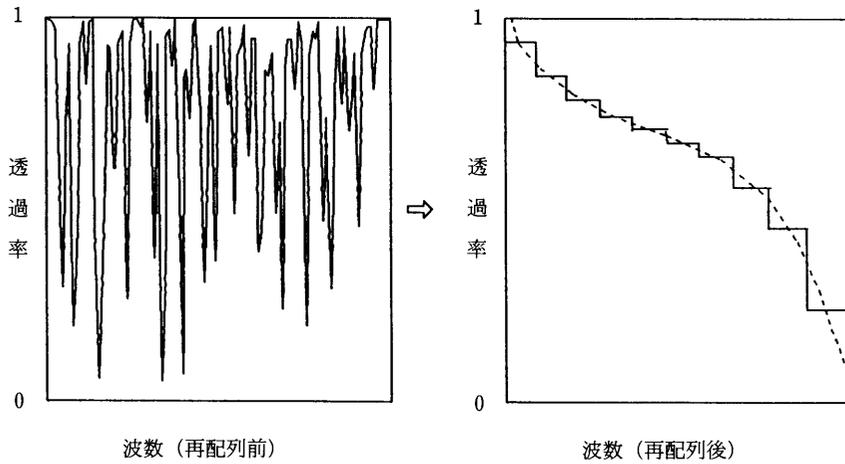
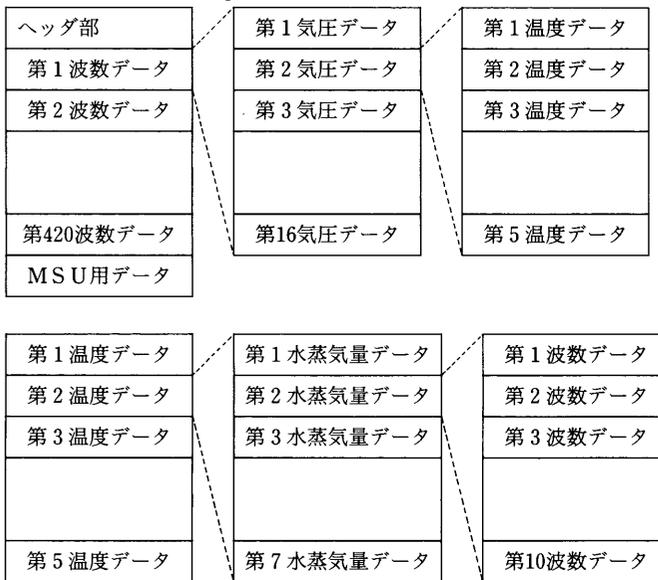


Fig.3 An illustration of k-distribution method.

Fig.4 Structure of atmospheric transmittance database.



大気透過率ファイルのヘッダ部には大気モデルの各レベルの気圧、気温、露点等が格納されており、データ部には、波数間隔 5 cm^{-1} 毎に16層の大気層の35個の大気モデルに対する鉛直方向の透過率が、10個の波数小区画毎に格納されている。

3. 2 放射計算 (前進計算) の手法

前節で作成した大気透過率データベースを用いて行う放射計算の詳細を以下に述べる。この放射計算は放射バイアスデータの作成(3. 3節)、鉛直分布算出係数作成(3. 4節)及び鉛直分布算出(3. 6. 4節)で使用する。

3. 2. 1 放射計算の入出力パラメタ

放射計算の入力パラメタと出力パラメタを以下に示す。

入力パラメタ：地表気圧，気温の鉛直分布，露点の鉛直分布，地表放射率，衛星天角頂角，太陽-地球間距離，大気上縁での太陽放射輝度観測放射量(バイアス補正用)

出力パラメタ：放射輝度温度 (AVHRRCh. 4およびHIRSch. 1-17)

入力パラメタの設定については3. 3節，3. 4節で述べる。下線を付けた入力パラメタは算出物理量である。

3. 2. 2 放射計算のアルゴリズム

放射計算は放射伝達方程式に準じて行すが，積分計算に改良を施した。計算手順は以下のとおり。

A. 透過率データベース入力

大気透過率ファイルのヘッダ部から気温，露点の鉛直分布モデルを入力する。これを用いてE.で述べる透過率の検索を行う。

B. 応答関数および中心波数，輝度温度計算用パラメタ入力

放射計定数ファイルからAVHRRCh.4およびHIRSch.1-17の応答関数および中心波数，輝度温度計算用パラメタを入力する。

C. チャンネル毎にD~Nの計算を繰り返す。

D. 波数毎にE~Kの計算を繰り返す

E. 透過率データベースを検索し，入力パラメタで指定された気温，露点の鉛直分布に合うよう内挿する。次いで透過率を光学的厚さに変換する。

$$\sigma = -\log \tau \quad \tau: \text{透過率} \quad \sigma: \text{光学的厚さ}$$

F. 波数小区分毎にG~Jの計算を繰り返し，大気上縁での放射輝度 R_{ij} ($j = 1, 10$) を求める。G~Jの式の中で添字 ij は省略する。

G. 地表での下向き放射量計算 (太陽放射の寄与を除

く)

各大気層の中で，黒体放射輝度が線型に変化し，吸収物質の混合体は，水蒸気については露点が気圧に線型に変化，その他の吸収気体については一定と仮定する。この仮定のもとで放射伝達方程式を解くと，各層の下縁での下向き放射は次式で近似される。

$$R_{i-1} \downarrow = R_i \downarrow \tau_i + \{B(T_{i-1})(1-\alpha_i) + B(T_i)\alpha_i\} (1-\tau_i) + \{B(T_{i-1}) - B(T_i)\} \left\{ \frac{1+\tau_i}{2} - \frac{1-\tau_i}{1.66\sigma_i} \right\}$$

ここで， $R_i \downarrow$: 第 i 層の上縁での下向き放射輝度 ($W/m^2 sr cm^{-1}$)

τ_i : 第 i 層の拡散透過率 ($= \exp(-1.66\sigma_i)$)

1.66は拡散因子

$B(T_i)$: 第 i 層の上縁での温度に対応する黒体放射輝度

α_i : 第 i 層の吸収気体の分布を表現するパラメタ (CO_2 等混合比が一定の気体の場合は1/2, H_2O のように混合比が下層程大きい場合は α_i は1/2より小さくなる)

σ_i : 第 i 層の鉛直方向の光学的厚さ

上式の第1項は，層の上からの透過放射の寄与，

第2項は，層の中の吸収気体分布に対応する射出の寄与，

第3項は，層の中の気温傾度による射出量の変化の寄与を示している。

大気上縁での下向き放射 $R_{16} \downarrow$ は0とする。

上式を大気上縁から地表まで ($i = 16 \sim 1$) 順次計算する

α_i の計算法： H_2O 以外の気体が主な吸収物質ならば， $\alpha_i = 1/2$

H_2O が主な吸収物質ならば，下式を満たすような α_i を気温，露点の鉛直分布から求める。層の中では露点は気圧に線型に変化していると仮定する。

$$\int_{P_{i-1}}^{P_i} \alpha_i (P_i - P_{i-1}) rw(p) dp = \frac{1}{2} \int_{P_{i-1}}^{P_i} rw(p) dp$$

ここで， $rw(p)$: 水蒸気の混合比

H. 地表での下向き太陽放射フラックスの計算

$$R_H = B(5500K) (6.960 \times 10^8 / D_{ES})^2 \cos \theta_H \exp(-\mu_H \Sigma \sigma_i)$$

ここで, R_H : 地表での下向き太陽放射フラックス ($W/m^2 \text{ sr cm}^{-1}$)

$B(5500K)$: 太陽の表面温度に対応する黒体放射輝度 ($W/m^2 \text{ sr cm}^{-1}$)

6.960×10^8 : 太陽半径(m)

D_{ES} : 太陽地球間距離(m)

θ_H : 太陽天頂角

μ_H : 太陽天頂角余弦の逆数

σ_i : 第 i 層の鉛直方向の光学的厚さ

I. 地表での上向き放射量計算

地表での太陽放射の反射は等方的(ランベルト反射)であると仮定する。

$$R0 \uparrow = \epsilon B(T0) + (1-\epsilon)(R_H/\pi + R0 \downarrow)$$

ここで, $R0 \uparrow$: 地表での上向き放射輝度 ($W/m^2 \text{ sr cm}^{-1}$)

ϵ : 地表の射出率

$B(T0)$: 地表温度 $T0$ に対応する黒体放射輝度 ($W/m^2 \text{ sr cm}^{-1}$)

R_H : 地表における下向き太陽放射フラックス ($W/m^2 \text{ sr cm}^{-1}$)

$R0 \downarrow$: 地表における下向き放射輝度 ($W/m^2 \text{ sr cm}^{-1}$)

J. 大気上縁での放射量計算

G. と同じ仮定のもとで, 各層の上縁での上向き放射は次式で近似される。

$$R_i \uparrow = R_{i-1} \uparrow \tau_i + \{B(T_{i-1})(1-\alpha_i) + B(T_i)\alpha_i\} (1-\tau_i) - \{B(T_{i-1}) - B(T_i)\} \left\{ \frac{1+\tau_i}{2} - \frac{1-\tau_i}{\mu\sigma_i} \right\}$$

ここで, $R_i \uparrow$: 第 i 層の上縁での放射輝度 ($W/m^2 \text{ sr cm}^{-1}$)

τ_i : 第 i 層の光路に沿った透過率 ($= \exp(-\mu\sigma_i)$)

$B(T_i)$: 第 i 層の上縁での温度に対応する黒体放射輝度 ($W/m^2 \text{ sr cm}^{-1}$)

α_i : 第 i 層の吸収気体の分布を表現するパラメタ

σ_i : 第 i 層の鉛直方向の光学的厚さ

μ : 衛星天頂角余弦の逆数

上式の第1項は, 層の下からの透過放射の寄与,

第2項は, 層の中の吸収気体分布に対応する射出の寄与,

第3項は, 層の中の気温傾度による射出量の変化の寄与を示している。

上式を地表から大気上縁まで ($i = 1 \sim 16$) 順次計算する。

K. 波数小区分での放射輝度の総和

k 分布モデルで用いた波数小区分毎の, 大気上縁での放射輝度の総和をとる。

$$R\nu = \Sigma R\nu_j$$

ここで, $R\nu$: 波数毎の放射輝度 ($W/m^2 \text{ sr cm}^{-1}$)

$R\nu_j$: 波数小区分毎の放射輝度 ($W/m^2 \text{ sr cm}^{-1}$)

L. 波数積分

波数毎の放射輝度をセンサの応答関数を荷重関数として積分する。

$$R = \frac{\int \phi\nu R\nu}{\int \phi\nu} = \frac{\Sigma \phi\nu R\nu}{\Sigma \phi\nu}$$

ここで, R : 放射輝度 ($W/m^2 \text{ sr cm}^{-1}$)

$\phi\nu$: 応答関数

$R\nu$: 波数毎の放射輝度 ($W/m^2 \text{ sr cm}^{-1}$)

M. 放射量→輝度温度変換 (NOAA TM NESS107-Rev. 1;1988参照)

放射計定数ファイルの中の変換用パラメタを使用する。

$$T^* = C_2 \nu_c / \log(1 + C_1 \nu_c^3 / R)$$

$$T_{CAL} = (T^* - b) / c$$

ここで, T_{CAL} : 放射バイアス補正前輝度温度 (K)

T^* : 有効輝度温度 (K)

- b, c : 変換係数
- R : 放射輝度 ($W/m^2 sr cm^{-1}$)
- C_1, C_2 : 定数 $C_1 = 1.911 \times 10^{-8} W/m^2 sr cm^{-4}$, $C_2 = 1.4388K/cm^{-1}$
- ν_c : 変換周波数 (cm^{-1})

N. コロケーションデータベースに対する観測輝度温度と計算輝度温度の間に観測輝度温度と衛星天頂角依存性を持つバイアスがあるので、次の式を用いて残差を除去する。

$$T_{CALC} = T_{CAL} + \alpha (T_{OBS} - T_{OBS0}) + \beta (\mu - \mu_0) + \gamma$$

- ここで、 T_{CALC} : 放射バイアス補正済計算輝度温度 (K)
- T_{CAL} : 放射バイアス補正前計算輝度温度 (K)
- α, β, γ : 放射バイアス補正係数
- T_{OBS} : 観測輝度温度 (K)
- T_{OBS0} : 基準観測輝度温度 (K)
- μ : 衛星天頂角余弦の逆数
- μ_0 : 基準衛星天頂角余弦の逆数

$\alpha, \beta, \gamma, T_{OBS0}, \mu_0$ の計算は放射バイアスデータ作成の項で述べる。

3. 2. 3 放射計算の高速化, 効率化

放射計算, 特に感度計算 (気温, 露点の鉛直分布を

微小量変化させた時の輝度温度変化量) を行うときには, 頻繁に放射計算を繰り返さなければならない。そのため, 以下の工夫をして放射計算の高速化を図る。

- AVHRR の場合, 吸収係数が余り変化しないので3つおきの応答関数を使用
- AVHRR の場合, 応答関数の寄与が全体の0.05以下の波数では放射計算を行わない。
- HIRS の場合, 応答関数の寄与が全体の0.01以下の波数では放射計算を行わない。
- 波数区分 $10cm^{-1}$ 毎に放射計算を行う。
- 透過率が, 0.995以上のときは1.000, 0.005以下のときは0.000とみなす。

以上の工夫により, 1つの鉛直分布に対して, AVHRRCh.4, HIRSCh.1~17全ての輝度温度の計算をcpu時間0.4msecに抑えることができる。

3. 2. 4 太陽光の影響について

太陽が天頂にあり, 大気の吸収がなく, 地表が反射率1 (射出率0) で等方反射の時の輝度温度を Table 4に示す。通常 $10\mu m$ 付近では, 地表の射出率は0.97程度なので, 実際の影響は4 K程度, $5\mu m$ 付近では, 地表の射出率は0.90程度なのでその影響は30K程度である。これに大気の吸収や太陽天頂角が大きいことを考慮すれば, 影響はさらに小さくなる。今回は調査の立場から地表の放射の影響を受ける HIRS の Ch.5-10, 13-15, 17, AVHRR の Ch.4は太陽光の影響を考慮して放射計算を行う。

Table 4 The estimates the effect of solar radiance, where we assumed the sun at zenith, no absorbing gas, ground reflectivity of 1(emissivity is 0) and Lambert reflection.

波長 (μm)	波数 (cm^{-1})	TBB (K)
4.5	2222	279
5.0	2000	252
10.0	1000	129

3. 3 放射バイアスデータ作成

放射モデルを用いて計算した輝度温度はさまざまな要因による誤差を含んでいる。2章で述べたチャンネル間共分散行列や, 観測輝度温度と計算輝度温度の差

を求めるときには, この誤差の影響を最小限に抑えるために, 実測値とのバイアスを除去しておかねばならない。そのため, 放射観測と高層観測, ロケット観測のコロケーションデータベースを作成し, バイアス補正係数とチャンネル間共分散行列を算出する。

3. 3. 1 観測放射と計算放射の相違の諸要因

放射計算には様々な要因によって誤差（バイアス誤差，RMS 誤差）が生じる。衛星観測の輝度温度とゾンデ観測から計算した輝度温度の比較をした場合の誤差要因は以下の3つに大別される。

A. 入力パラメタの不備

どんなに精緻な放射モデルを用いても入力パラメタが不十分であれば、観測値との一致は得られない。

A. 1 ゾンデ観測の誤差

10hPa 以上の気温や300hPa 以上の水蒸気量の観測はゾンデ観測から得られない。また、ゾンデ観測は衛星搭載測器の水平分解能で規定される領域の気温や水蒸気を代表していない場合がある（例えば、前線帯、気団の境界等）。

A. 2 コロケーション（時間，空間内挿）の誤差

時間差：NOAA-11を例にとると、日本付近の衛星通過時刻は06UT，18UT 頃なので、ゾンデの観測時刻と一致しない。

距離差：衛星観測地点とゾンデ観測地点とが異なることにより、正しい気温、露点を与えられない。コロケーションをとる時の距離の基準に依存する。衛星の軌道計算の誤差もこの中に含まれる。

海陸差：日本の場合、海岸線付近に高層観測点があるので、地表や大気の下層を観測するチャンネルの輝度温度計算に誤差が生じやすい。

A. 3 射出率の誤差

地表射出率は波長，海陸，地表状態等によって異なるが、衛星搭載測器の各チャンネルの波長における射出率の観測値は得られない。

A. 4 雲の混入

衛星観測視野に雲が混入している場合に観測放射量は大きな影響を受けるが、ゾンデ観測では雲頂高度，雲量等のデータは得られない。コロケーションをとる時の雲量のしきい値を厳しくすることで対応せざるをえない。

B. 放射モデルの誤差

放射モデルの誤差を細分すると次のようになる。

B. 1 透過率の誤差，透過率計算に用いた仮定（吸収物質の混合比，気温の鉛直分布等）の誤差

B. 2 放射計算アルゴリズムの誤差（鉛直差分，エアロゾルなしの仮定，オゾン量一定の仮定，太陽光に対する等方反射の仮定等）

B. 3 応答関数の誤差

B. 4 衛星天頂角補正の誤差

C. 放射測定誤差（センサの温度分解能，キャリブレーション誤差）

3. 3. 2 放射/ゾンデ/ロケットゾンデコロケーションデータベース作成

衛星センターに ADESS 回線経由で配信された高層資料，本庁高層課から入手したロケットゾンデデータ，および TOVS の各センサーの輝度温度を対にする。この際，太陽光の影響，気温の日変化の影響をできるだけ避けるため，昼軌道と夜軌道について別個にコロケーションを行う。

放射/ゾンデコロケーションデータは，輝度温度の観測点と高層観測点の距離が 0.5deg 以内，かつ雲量が0.05以下の時の輝度温度と高層観測のデータ対である。また，放射/ゾンデ/ロケットゾンデコロケーションデータは，輝度温度の観測点と緯里の距離が 0.5deg 以内の時の輝度温度と高層観測（緯里のロケットゾンデ観測と仙台の高層観測）のコロケーションを行う。コロケーションの基準に用いる雲量は各 HIRS ピクセル内の AVHRRCh.4輝度温度分布にしきい値法を施して得られた部分雲量である。詳細は青木・中島（1983）を参照されたい。

放射/ゾンデ/コロケーションデータは対流圏を観測するセンサの放射バイアス，チャンネル間共分散行列計算に使用し，放射/ゾンデ/ロケットゾンデデータは成層圏を観測するセンサ（HIRSCh. 1～3）の放射バイアス，チャンネル間相関行列計算に使用する。調査用に作成した放射/ゾンデコロケーションデータ，放射/ゾンデ/ロケットゾンデコロケーションデータの例を Table 5, Table 6 に示す。

2章で述べた様にこれらのコロケーションデータは放射モデルのバイアスや誤差を見積もるためのみに用いられるので膨大なデータ量を必要としない。ただし，測器の経年変化や大気構造の季節変化に追従するために定期的な更新が必要であり，今後の調査が必要である。

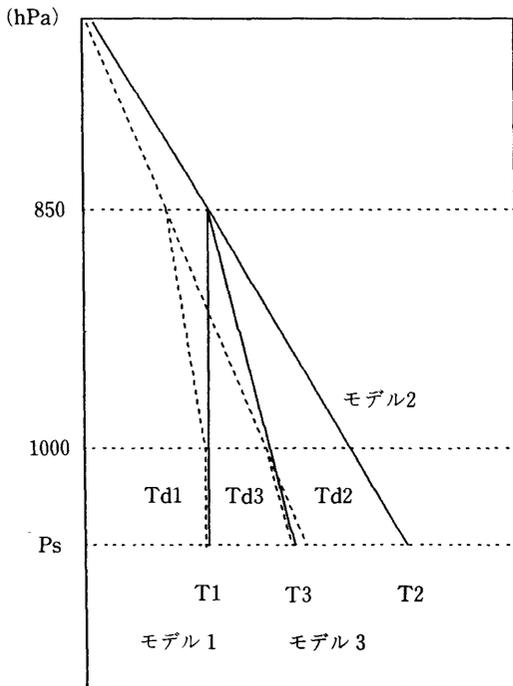
Table 5 Example of sample of collocation data of rawin sonde and HIRS channels which sound the middle and lower level of clear atmosphere. Observation time is 06UT.

日付	1990	9/4	10	19	20	27	30	10/1	8	合計
観測所数		6	7	8	12	5	5	8	7	58
累積地点数		21	24	37	37	18	20	20	24	201

Table 6 Example of sample of collocation data of rawin sonde, rocket sonde and HIRS channels which sound the stratosphere. Observation time is 06 UT.

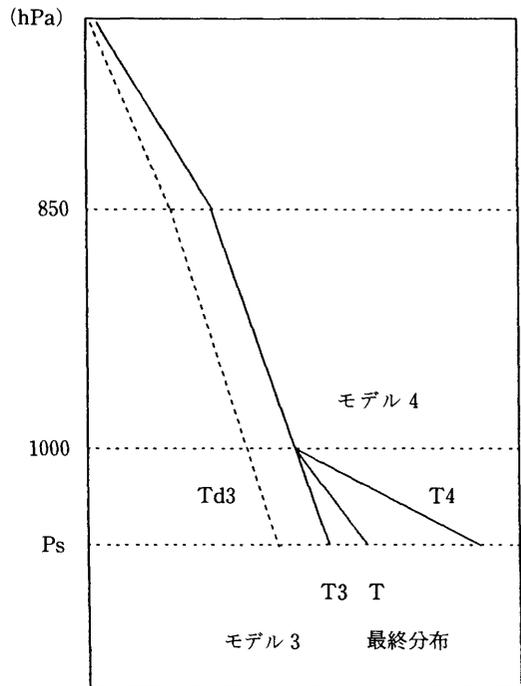
日付	1990	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	SEP	合計							
		21	28	21	11	18	25	10	16	23	20	28	11	25	5	合計
データ数		1	5	1	3	2	4	5	2	4	4	6	4	2	4	52

Fig.5 Method of the estimation of lower vertical profile initial value at stage 1.



気温 露点
(実線) (点線)

Fig.6 The same as in Fig.5 except stage 2.



気温 露点
(実線) (点線)

3. 3. 3 放射輝度温度計算における地表付近の日較差の考慮

衛星観測と対にされるゾンデデータは、00UTと12UTの観測値を衛星観測時刻に線型内挿している。ところで、地表付近(特に陸上)では地表温度、気温の日較差が大きく、ゾンデデータの内挿値は衛星観測時刻の実際の気温と異なる。特にNOAA-11のように日本付近を06UT, 18UT帯に観測する衛星では、この日較差の影響が放射計算の結果に重大な支障を及ぼす。そこで、バイアス計算、チャンネル間相関行列計算をする際に、AVHRRデータを用いて、以下のように地表、および下層の気温、露点の値を変更する。

まず2つのモデル大気を仮定する (Fig.5)。

[モデル分布1] T1, Td1

地表および1000hPaの気温が850hPaの気温に等しく、

地表および1000hPaの露点と同レベルの気温を越えない分布。

[モデル分布2] T2, Td2

850hPaより低い高度の気温分布が乾燥断熱減率で、

地表および1000hPaの露点と同レベルの気温を越えない分布

モデル分布1, 2に対してそれぞれAVHRRのCh.4の輝度温度TA1, TA2を計算する。この結果とAVHRRCh.4の平均輝度温度TAを用いて、次のように元の気温、露点の鉛直分布を修正する。

$$T(1000hPa) = T1(1000hPa) + \{T2(1000hPa) - T1(1000hPa)\} \frac{TA - TA1}{TA2 - TA1}$$

$$T3(Ps) = T1(1000hPa) + \{T(1000hPa) - T(850hPa)\} \cdot \frac{Ps - 1000}{1000 - 850}$$

$$Td(1000hPa) = \min(Td(1000hPa), T(1000hPa))$$

$$Td3(Ps) = \min(Td(Ps), T3(Ps))$$

ただし、TAがTA2より大きい時は、モデル分布2

の850hPaの気温をさらに高く設定し直して再計算する。

次に、地表気温、露点の修正を行う (Fig.6)。前段で得られた鉛直分布を[モデル分布3] T3, Td3, 地表温度のみを10K上げた鉛直分布を[モデル分布4] T4, Td4(=Td3)として、それぞれAVHRRのCh.4の輝度温度TA3, TA4を計算する。この結果とAVHRRの平均輝度温度TAを用いて、次のように元の気温、露点の鉛直分布を修正する。

$$T(Ps) = T3(Ps) + \{T4(Ps) - T3(Ps)\} \frac{TA - TA3}{TA4 - TA3}$$

$$Td(Ps) = \min(Td3(Ps), T(Ps))$$

こうして、AVHRRのCh.4の平均輝度温度を与える鉛直気温、露点分布が得られる。バイアス計算ではもとのゾンデの内挿値ではなく、この補正をした鉛直分布を使用する。3. 6節で述べる鉛直分布算出の際も、数値予報誤格子点予報値を時間、空間内挿した鉛直分布値に上記の処理を施したAVHRR輝度補正済鉛直分布を初期値として用いる。

3. 3. 4 ゾンデデータから気温、露点を与えられないレベルがある場合の対処

ロケットゾンデとのコロケーションデータベースを扱うときには1hPaの気温まで完全に与えられているが、高層観測データには1hPaの気温は無く、100hPaよりも高い高度での気温も与えられていない場合が多い。このような時には、1976AFGL標準モデル大気の値をそのまま使用する。

また、対流圏上層では露点のデータが得られないので、100hPaの露点温度を193K(-80°C)と仮定し、これと露点温度が得られている最大高度の露点の値を用いて高度(気圧の対数)で線型内挿して中間の層の露点温度を与える。

3. 3. 5 最上層の気温設定について

放射/高層/ロケットコロケーションデータのバイア

Table 7 Bias error and RMS error between the brightness temperature calculated from rocket sonde and those observed by HIRS.

ロケットゾンデ気温	E Δ T (バイアス)			σ Δ T (RMS)		
	Ch.1	Ch.2	Ch.3	Ch.1	Ch.2	Ch.3
T(1hPa)	-2.39	-2.36	-2.30	1.963	0.808	0.606
T(2hPa)	0.00	-1.32	-1.59	1.955	0.772	0.712
{T(1hPa) + T(2hPa)}/2	-1.19	-1.83	-1.94	1.349	0.675	0.609

ス計算 (HIRSch.1~3) において、最上層の気温を次の3通りに設定して、輝度温度計算値と観測値を比較した。

1. $T(17) = T(1hPa)$
2. $T(17) = T(2hPa)$
3. $T(17) = \{T(1hPa) + T(2hPa)\} / 2$

その結果、Table 7のようなバイアス誤差と RMS 誤差が得られた。結論として輝度温度計算値と観測値の分散を最も小さくできる3式を用いて最上層の気温を設定する。

3. 3. 6 射出率の設定

射出率についてはデータがないので、AVHRRCh.4とHIRSch.1~12に対して0.97、HIRSch.13~17に対して0.90を設定する。

3. 3. 7 放射バイアス計算

3. 3. 3から3. 3. 6で設定した気温、露点及び地表射出率を入力として、3. 2. 2のA~Mのアルゴリズムに従って放射バイアス補正前計算輝度温度を求める。この値と観測輝度温度の間にはバイアス誤差があり、このバイアスには観測輝度温度と衛星天頂角に対する依存性があることがわかったので、放射バイアスを次式の形で与える。

$$T_{OBS} - T_{CAL} = \alpha (T_{OBS} - T_{OBS0}) + \beta (\mu - \mu_0) + \gamma$$

ここで、 T_{OBS} : 観測輝度温度
 T_{CAL} : 放射バイアス補正前計算輝度温度
 μ : 衛星天頂角余弦の逆数
 α, β, γ : 補正係数
 T_{OBS0} : 基準観測輝度温度 (観測輝度温度のコロケーションデータベース平均)
 μ_0 : 基準天頂角余弦の逆数 (天頂角余弦の逆数のコロケーションデータベース平均)

補正係数 α, β, γ は最小自乗法を用いて決定する。補正係数の一例を Table 8 に示す。この放射バイアスの原因は、3. 3. 1 で述べた要因のうち、射出率の誤差と放射モデルの誤差によるものと考えられるが、詳細については今後の検討が必要である。

3. 3. 8 チャンネル間共分散行列計算

各コロケーションデータについて放射バイアスを考慮して計算して、なおかつ残った放射バイアス補正済計算輝度温度と観測輝度温度の差の共分散行列を計算し、鉛直分布算出係数の作成時に使用する。この行列は各チャンネルの輝度温度観測の誤差 (精度) を表現しており、観測ノイズの共分散行列とも呼ばれる。共分散行列の要素は次の式で計算される。共分散行列の一例を Table 9 に示す。

Table 8 Example of parameters to be used in the correction of calculated radiance for observation time 06UT.

チャンネル	1	2	3	4	5	6	7	8
α	0.58	0.02	0.14	0.15	0.12	0.11	0.11	0.10
T_{OBS0}	229.67	218.62	217.55	232.70	248.43	259.15	272.48	293.86
β	-4.29	0.25	0.34	0.20	0.56	0.40	1.10	-0.05
μ_0	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18
γ	0.52	-0.90	-1.38	0.34	-0.45	0.01	0.04	0.28

チャンネル	9	10	11	12	13	14	15	16	17
α	0.44	0.15	0.49	0.62	0.06	0.08	0.12	0.33	0.19
T_{OBS0}	272.66	286.77	260.53	243.38	278.13	267.88	249.78	230.67	291.83
β	4.40	1.57	6.84	7.59	-1.45	-0.36	1.27	5.60	-3.31
μ_0	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18
γ	4.97	-0.16	2.45	2.62	-2.72	-1.81	-4.75	-2.35	-4.05

Table 9 Example of the covariance matrix between channels of HIRS for observation time 06UT. Diagonal elements are the variance and non-diagonal elements are the correlation. The elements which do not appear on this are zero.

4	.105																
5	.071	.090															
6	.048	.094	.132														
7	-.012	.055	.102	.169													
8	-.005	.008	.020	.043	.021												
9	.116	.013	-.061	-.176	-.051	.478											
10	.045	.048	.125	.213	.061	-.255	.317										
11	.014	.108	.155	.246	.041	-.255	.319	.980									
12	.148	.081	.006	-.050	-.024	.122	-.138	.422	.769								
13	.033	.011	-.006	-.043	-.006	.102	-.070	-.091	.019	.066							
14	.029	.024	.014	-.008	-.001	.049	-.028	-.025	.013	.040	.037						
15	.049	.048	.040	.011	-.001	.061	-.005	.050	.060	.027	.030	.058					
16	.082	.066	.045	-.010	-.003	.109	-.016	.067	.118	.020	.021	.037	.170				
17	.048	-.041	-.082	-.174	-.038	.323	-.215	-.236	.068	.139	.042	.018	.039	.533			
4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17				

チャンネル

$$S_{ij} = E \{ (T_{Obsi} - T_{CALi})(T_{Obsj} - T_{CALj})^T \}$$

ここで、E[*] : *についての平均

(T_{Obsi}-T_{CALi}):チャンネル i についての観測誤差ベクトル

3. 4 鉛直分布算出係数の作成

鉛直分布算出係数を計算するためには初期値分布及び個々の算出物理量を微小量変えた初期値分布に対する放射計算を行う必要がある。そこで計算時間を節約するために、あらかじめいくつかのピクセル、ライン上での算出係数を計算しておき、実際に鉛直分布を計算するときには算出係数を個々の算出地点に内挿して使用する。

新システムの算出物理量は29個で、内訳は以下のとおりである。

気温 : 地表~1 hPa まで17層

露点 : 地表~150hPa まで10層

地表射出率: 短波長 (Ch.1~Ch.12) と長波長 (Ch.13~Ch.17) の2種類

算出に使用したセンサ、チャンネルはHIRSのCh.1~Ch.17の計17チャンネルであり、地表温度及び下層の気温・露点の初期値決定用にAVHRRCh.4を使用する。

3. 4. 1 数値予報課作成格子点予報値データ抽出、編集

気象報ファイルから衛星観測時刻を挟む12時間毎の数値予報課作成格子点予報値データを抽出する。編集領域60N-10N, 110E-170E, 5°格子。編集要素は地表気圧, 1000hPa~50hPaの気温, 1000hPa~400hPaの相対湿度である。水蒸気データは相対湿度として与えられているので、Tetenの式を利用して露点温度に変換する。

$$(7.5 \times (T_d - 273.2) / (T_d - 35.9))$$

$$E_s = 6.11 \times 10$$

ここで、E_s:飽和水蒸気圧, T_d:露点温度

3. 4. 2 鉛直分布初期値/算出係数作成ポイント決定

あらかじめ、NOAAの軌道を予測し、HIRSのピクセル、ラインに対応する緯度、経度を求める。ただしラインについては正確な受信観測開始時刻を予測できないため、仮の値である。算出係数を作成するポイントの間隔は計算時間によって制約を受ける。現在は20ライン毎で各ラインの第2, 15, 28, 41, 54ピクセルについて算出係数を計算する。

3. 4. 3 鉛直分布初期値設定

3. 4. 2で決めたポイントに対し、衛星天頂角、太陽天頂角、太陽地球間距離を求める。さらに格子点

予報値データを内挿して、鉛直分布の初期値を設定する。予報値のないレベル(30-10hPa)については解析値を使用する。1 hPaの気温の初期値は、1976AFGL標準大気モデルの値をそのまま利用する。

3. 4. 4 鉛直分布初期値相関行列設定

鉛直分布初期値相関行列 S_x は鉛直分布初期値の精度や、気象学的制約を表現する行列である。この行列には以下の3つの要素が入っている。

1. 初期値の精度 (S_{x1})

$$|\Delta X_i|^2 = \sigma_i \quad X_i = T_j(j = 1,17; i = j) \\ T_d(j = 1,19; i = j+17) \\ \epsilon_j(j = 1,2; i = j+27)$$

2. 初期値の鉛直シアアの精度 (S_{x2})

$$|\Delta(X_i - X_{i+1})|^2 = \sigma_{2i} \quad X_i = T_j(j = 1,16; i = j) \\ T_d(j = 1,9; i = j+17)$$

3. 飽差の修正量が初期値の飽差を越えないという条件。この条件により、露点が気温を越えてしまうことを防げる。(S_{x3})

$$|\Delta(T_i - T_{di})|^2 = |T_i - T_{di}|^2 \quad (i = 1,9)$$

このうち、3. は気温、露点の初期値によって決まる。また、1., 2. については初期値やゾンデ値の有無によってあらかじめ決められた値を設定する (Table 10)。

以上3つの要素を合わせた鉛直分布初期値相関行列は

$$S_x = (S_{x1}^{-1} + S_{x2}^{-1} + S_{x3}^{-1})^{-1}$$

で計算される。

Table 10 Summary of parameter to be used for the calculation of correlation matrix of the error in the initial vertical profile.

	物理量	レベル	$\sigma^{1/2}$ (K)	
			初期値あり	初期値なし
1. 初期値精度	気温	1~2	4	4
		3~17	1	4
	露点	1~2	4	4
		3~10	2	4
	射出率	長波長	—	0.01
短波長		—	0.05	
2. 初期値鉛直シアア精度	気温	1~15	2	2
	露点	1~9	2	2

3. 4. 5 鉛直分布算出係数作成

2章で述べた鉛直分布算出係数(輝度温度差から気温、露点、地表射出率修正量への変換係数)を計算する。まず、鉛直分布の初期値に対する輝度温度を計算する。次に、鉛直分布の気温を1K上げた時、露点を1K下げた時、射出率を0.01変化させた時の輝度温度の変化量を計算する(感度行列の計算)。

これに、チャンネル間相関係数行列と、鉛直分布初期値相関行列を加えて次の式で鉛直分布算出係数を決定する。

$$C = S_x A^T (A S_x A^T + S_y)^{-1}$$

上式の適用において、全てのチャンネルを用いて全

ての変数に対する係数を一挙に求める従来の手法では、上層に感度をもつチャンネルが下層の気温算出に使用されたり、逆符号の大きな値の係数が生じる等の問題点があった。この問題を解決するために、Rotated regression等の手法が提案されている(Crosby, 1989)。

本システムでは、係数の作成に際して、全ての変数に対する係数を一挙に求めるのではなく、各チャンネルの応答関数を吟味した上で、各物理量に対して使用するチャンネルをあらかじめ指定し、算出係数を決めるようになっている。従って、行列 $A S_x A^T + S_y$ の次元は使用チャンネル数に等しく、逆行列計算の際の不安定性が解消でき、計算時間節約にもなる。

変数毎の使用チャンネルの一覧を Table 11に示す。

Table 11 Diagram of HIRS channels to be used for the calculation of sensitivity matrix and the retrieval of vertical profile and emissivity. Each number denotes as follows:

- 0 : the channel which is not used for the calculation of the sensitivity matrix.
- 1,2,3,4 : the channel for the calculation of the sensitivity matrix,
- 1,2,3 : the channel for the retrieval in clear region,
- 2,3 : the channel for the retrieval in lower cloud region,
- 3 : the channel for the retrieval in stratosphere.

物理量	チャンネル																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
気温																	
1	0	0	0	0	0	0	0	1	4	4	0	0	4	4	0	0	4
2	0	0	0	0	0	0	0	1	0	4	0	0	4	4	0	0	4
3	0	0	0	0	0	4	1	1	4	4	4	0	4	4	0	0	4
4	0	0	0	0	4	1	1	4	0	4	4	4	4	4	4	0	0
5	0	0	0	0	2	2	4	0	0	0	4	4	0	4	4	0	0
6	0	0	0	0	2	2	0	0	0	0	4	4	0	0	4	4	0
7	0	0	0	4	2	0	0	0	0	0	4	4	0	0	4	4	0
8	0	0	0	2	2	0	0	0	0	0	4	4	0	0	4	4	0
9	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0	4	4	0	0	0	4	0
10	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	4	0
11	0	3	3	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0
12	4	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0
13	4	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0
14	3	3	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0
15	3	3	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0
16	3	3	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0
17	3	3	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0
露点																	
1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	1	4	0	1	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	1	4	0	1	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	4	4	0	1	1	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	2	4	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	2	2	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	2	2	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	2	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	2	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	2	0	0	0	0	0	0
射出率																	
短	0	0	0	0	0	0	1	1	4	4	0	0	0	0	0	0	0
長	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	0	0	1	

これによって物理的に意味のない（感度行列の要素が0であるチャンネルを用いて気温、露点を算出するような）算出係数を除くことができる。

3. 4. 6 係数カテゴリの設定

現行の TOVS 処理では算出係数のカテゴリを晴天域 (AVHRR あり), 晴天域 (AVHRR なし), 曇天域, 上層の 4 つに設定, 曇量0.92以下の場合は晴天域

として処理されている。そのため, 晴天域カテゴリに分類されるピクセルの中にほとんどの場合雲が存在し, 雲域放射を晴天放射に補正する時に雲による放射の誤差がデータに混入している。算出精度を向上させるためにはこの誤差は致命的と言える。そこで新システムでは雲域の晴天放射算出の誤差を回避するために, 次の3つのカテゴリで算出係数を求める (Fig. 7)。

1. 晴天域: 曇量が0.5以下の領域について全層

Fig.7 Renovation of category for retrieval. Upper part shows the categories of the operational system. Lower part shows the categories of new system. Double lines denotes cloud and a vertical profile is retrieved only in the unhatched region.

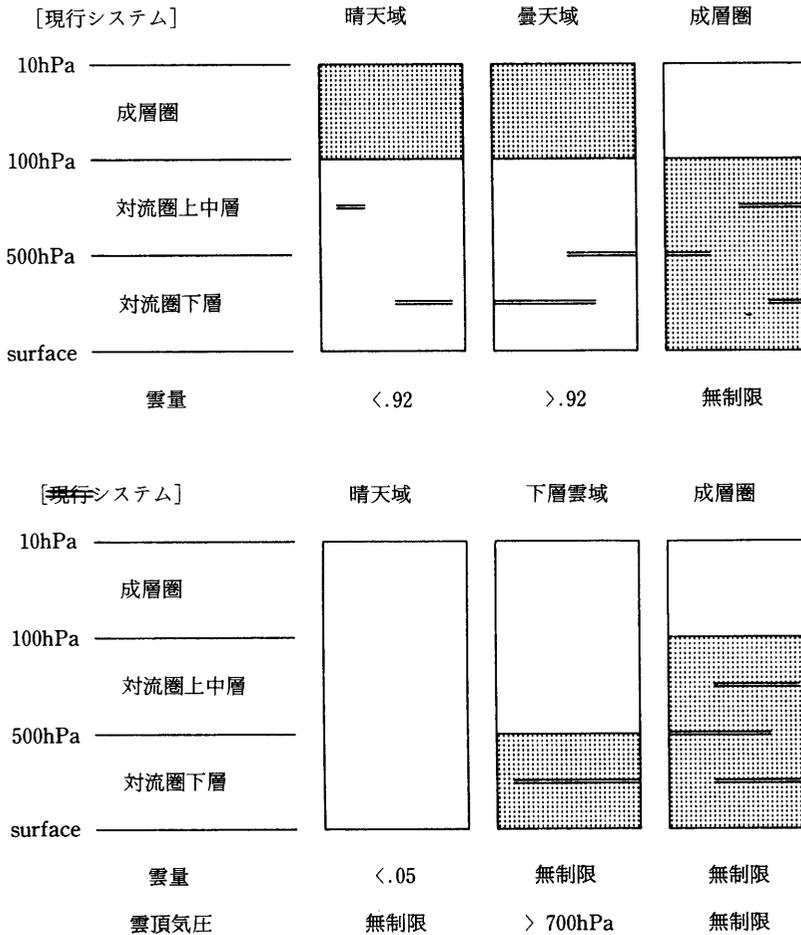


Table 12 Classification criterion of retrieval categories.

カテゴリ	基準		算出パラメタ
	雲量	AVHRR 最小輝度温度	
1 晴天域	0.05以下	——	全層の気温, 露点, 地表射出率
2 下層雲域	——	700hPa 気温より高い	500hPa より高い高度の気温, 露点
3 上層雲域	——	——	100hPa より高い高度の気温

の気温, 露点, 射出率を算出
 2. 下層雲域: AVHRR の最小輝度温度が700hPa

の気温より高い領域について500
 hPa より高い高度の気温, 露点を算

出

3. 上層雲域：1, 2 以外の領域で100hPa より高い気温を算出

このようにカテゴリを設定することにより、ほぼ完全な晴天域でしか全層の気温、露点は求まらないが、一方下層雲に完全に覆われている領域でも中上層の気温、露点を求めることができる。こうして雲の影響を受けない範囲での鉛直分布算出が可能になる。各カテゴリの鉛直分布算出に使用するチャンネルはそのカテゴリに存在する雲の影響を受けないもののみを使用する (Table 12)。

3. 5 鉛直分布算出前処理

鉛直分布算出の前処理として、1) HRPT データ受信・記録、2) HRPT データ編集、キャリブレーション、3) 生データ品質管理、4) ナビゲーション、部分雲量パラメタ (部分雲量、雲頂温度等) 計算、などの処理が必要であるが、これらについては現行システムをそのまま使用するので、詳細については TOVS データ処理システムの解説 (気象衛星センター, 1983) を参照されたい。

3. 6 鉛直分布算出

3. 6. 1 係数カテゴリの決定

HIRS のピクセル内に含まれる部分雲量と AVHRR の最小輝度温度を用いてどのカテゴリの係数を使用するか決定する。基準は 3. 4. 5 を参照のこと。

3. 6. 2 鉛直分布初期値作成 (格子点予報値の内挿)

格子点予報値を HIRS ピクセル位置に空間内挿、衛星観測時刻に時間内挿して、鉛直分布初期値を作成する。露点のないレベルに対しては、100hPa の露点を 190K と仮定し、露点のあるレベルまで線型内挿する。さらに、格子点予報値を線型内挿しただけでは地表付近の気温の日変化を表現できないので、HIRS ピクセル内の AVHRR Ch.4 の平均輝度温度を用いて下層の初期値を修正する (3. 3 節参照)。ただし、この処理は晴天域カテゴリのみに対して行う。射出率は 3. 3. 6 で設定した値を使用する。

3. 6. 3 鉛直分布算出係数抽出、内挿

各 HIRS ピクセルのピクセル番号と緯度、および 3. 6. 1 で決定したカテゴリを用いて近傍 4 点の算出係数を抽出し、ピクセル位置に内挿する。

3. 6. 4 鉛直分布算出

3. 6. 2 で計算した鉛直分布初期値を入力として、3. 2. 2 の A~N のアルゴリズムに従って、放射バイアス補正済計算輝度温度を求める。次に観測輝度温度と放射バイアス補正済計算輝度温度の差に、3. 6. 3. で抽出した鉛直分布算出係数をかけ合わせて気温、露点、射出率の修正量を計算する。これを鉛直分布初期値に加えて、算出結果とする。

3. 6. 5 品質管理

算出された鉛直分布に対して以下のチェックを行う。

1. 算出された各気圧レベルの気温と初期値との差が 4 K 以上の場合、不良とする。
2. 露点が気温より大きい場合は露点を気温の値に直す。
3. 気温の鉛直分布が乾燥断熱減率を超えた場合、乾燥断熱減率を越えない様に修正する。

4. 算出結果と精度評価

4. 1 算出地点数

現行システムと新システムの算出地点数は以下の理由により大きく異なる。

- 1) 現行システムは鉛直分布の算出は HIRS4 ピクセル (2 ライン×2 ピクセル) 毎に行う。一方、新システムでは HIRS 各ピクセル毎に鉛直分布を算出する。
- 2) 現行システムでは HIRS1 ラインあたり 56 ピクセルのうち、走査端を除いた 52 ピクセル (100hPa より低い高度)、48 ピクセル (70hPa より高い高度) しか算出しない。一方、新システムでは 56 ピクセル全てについて算出する。
- 3) 現行システムでは部分雲量が約 92% 以下なら 100 hPa より低い高度の算出を行うが、新システムでは 3. 4. 6 で述べたカテゴリ毎に算出するので、対流圏下層の算出が少なく、対流圏中層の算出は多くなる。例として 3 月上旬の試験処理における算出地点数は、1 つの軌道につき平均 5512 個であった。その内訳は晴天域カテゴリが 1407 個 (26%)、下層雲域カテゴリが

2275個 (41%)、成層圏カテゴリが1831個 (33%)であった。通常半日毎に2~3軌道の受信があるため、全算出数は12000個程度となる。数値予報の初期値として使用するときにはかなり精選して使用することが必要であろう。

4. 2 算出例

1991年3月17日のNOAA-11の昼軌道について処理した結果をFig8~Fig.17に示す。図の左上は00UT、12UTの数値予報課作成の5°×5°格子点データを衛星通過時刻に内挿して作成した解析値、右上は気象要素算出気圧面に近い平均射出高度をもつチャンネルのHIRS/2画像、左下は統計法(現行システム)による算出結果、右下は物理法(新システム)による算出結果である。水蒸気量を表す変数として、解析値と物理法は露点差(赤:乾燥,青:湿潤)で示されているが、統計法は鉛直水蒸気量(赤:湿潤,青:乾燥)で示されており、右のスケールとも一致していないことに注意されたい。また、1000hPaについては解析値がないので、代わりに予報値を用いた。以下に気温と水蒸気量にわけてそれぞれの特徴を列記する。

4. 2. 1 気温

1) 1000hPa, 850hPa (Fig.8,9): 物理法は統計法に比べ、雲域では算出できないものの、晴天域であれば走査端でも妥当な算出が行われ、滑らかな気温分布が得られている。特に、物理法ではAVHRRch.4を用いて地表温度の日変化を鉛直分布算出に反映しているため、中国ボツ海湾付近に明瞭に見られるように気温の海陸差が表現される。一方、統計法では00UTと12UTのゾンデ観測を観測時刻に内挿した値を用いているので気温の日変化の影響は表現できない。ただし、850hPaでもかなり大きな気温の海陸差が算出されているので、3. 3. 3で述べた下層大気の気温の推定方法を改良する必要がある。

2) 700hPa (Fig.10): HIRSの鉛直分布能が低いため、700hPa付近に荷重関数のピークを持つch.7も地表の影響を受けている。しかし、物理法の結果は地表の影響を除去していることがわかる。また、統計法による結果の画像には走査端で不良算出が見られる。それに対し、物理法では統計法より広い走査角範囲で算出しているにも関わらず不良結果は特に見られない。

3) 500hPa (Fig.11): 物理法ではカテゴリ設定を変更したため、下層雲域でも良好に算出している。解析値と比較すると、物理法の方が中国大陸、ルソン島周辺、沿海州から北海道付近でより良く算出していることが分かる。

3) 300hPa (Fig.12): このレベルでは統計法の結果にノイズが目立つ。一方物理法の算出は良好で、35°Nに沿った傾圧帯も良く表現されている。

4) 100hPa (Fig.13): HIRS画像には電流変動による周期変動が重なっているが、物理法の結果には余り影響していない。また、100hPa以上のレベルでは全てのピクセルについて算出していることに注意されたい。

4. 2. 2 水蒸気

ここでは、主に物理法による水蒸気量算出の結果について述べる。

1) 850hPa (Fig.14): 物理法は解析値に比べ、乾燥域を過大評価しており、露点差が14deg以上の領域が中国東北区から黄海にかけて広がっている。Fig.15の700hPaの解析値と比較して分かるように、上層の水蒸気分布に影響されていると思われる。HIRSの鉛直分解能が低いことによる算出の限界であろう。一方、湿潤域は北海道東方沖の低気圧とこれから伸びる前線に沿った分布を良く表現している。なお、晴天域で算出できる露点差の最小値は2deg程度である。

2) 700hPa (Fig.15): 物理法の算出結果は解析値と良く合っている。例えば、低気圧に伴う湿潤域は700hPaでは30°N以北であり、その先の前線帯に対応してやや湿潤な領域(露点差~10deg)がルソン島まで伸びている。

3) 500hPa (Fig.16): このレベルでは、低気圧の中心付近や華南から伸びる湿潤域並びに低気圧後面、華中及び父島付近の乾燥域を良く表現している。また、統計法は天頂角補正の不良のため、走査角の端で水蒸気量を多く見積もっている。

4) 400hPa (Fig.17): 低気圧中心付近や30°Nに沿って伸びる湿潤域等が良く表現されている。解析値に比べ乾燥域が過大に評価されている。

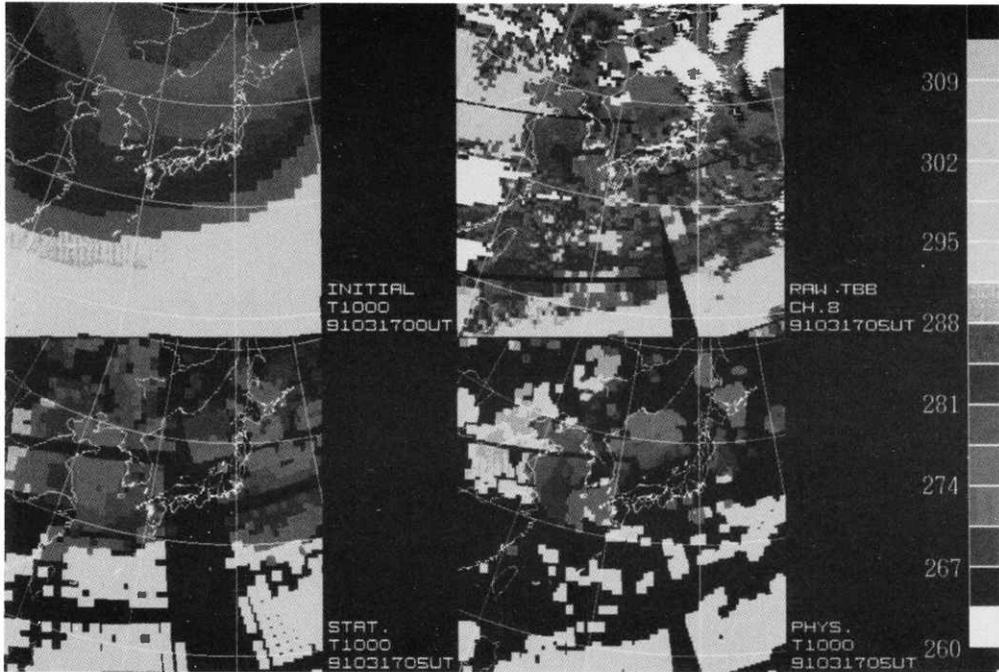


Fig.8 Results of temperature retrievals at the level of 1000hPa. The images are initial field (upper left), raw brightness temperature (upper right), the retrieval with statistical method (lower left) and the retrieval with physical method (lower right). The HRRT data used for these retrievals is of NOAA11 at .06UT 17.MAR.1991. . .

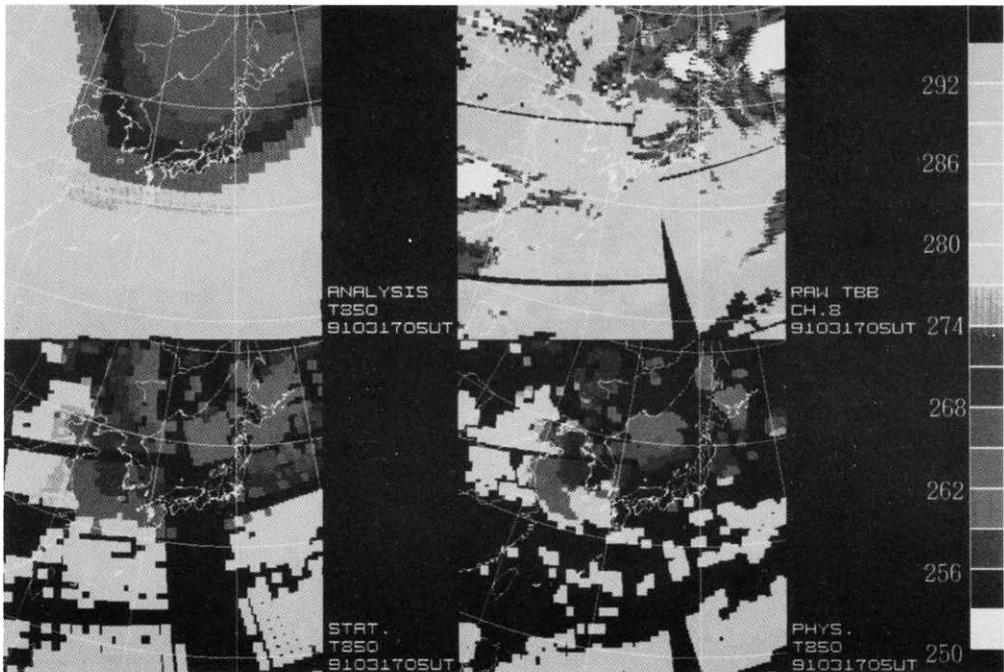


Fig.9 The same as in Fig.8 except for 850hPa.

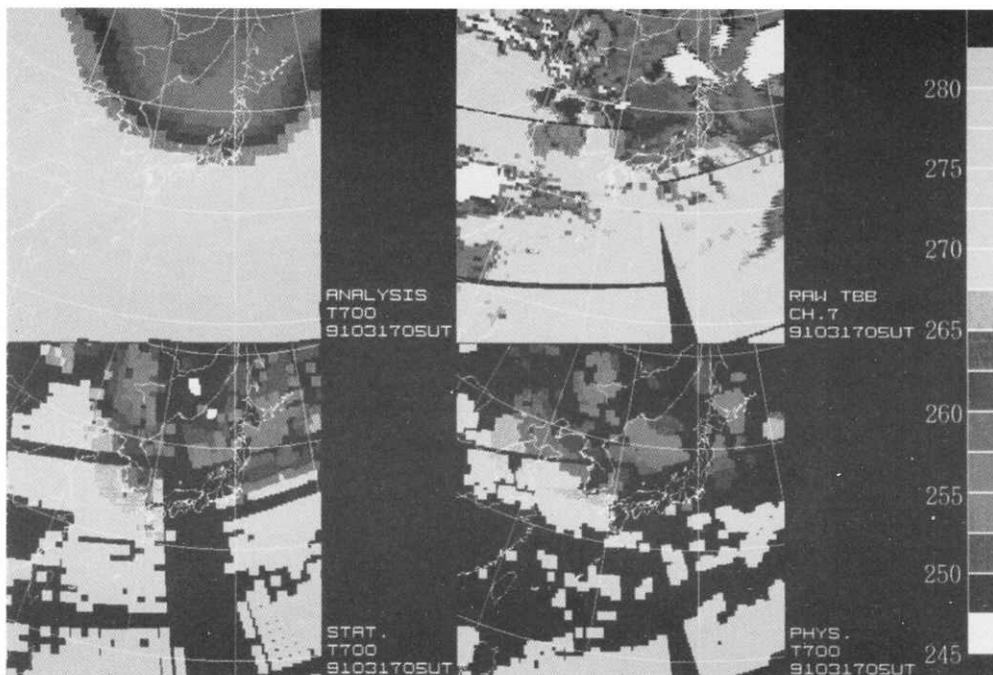


Fig.10 The same as in Fig.8 except for 700hPa.

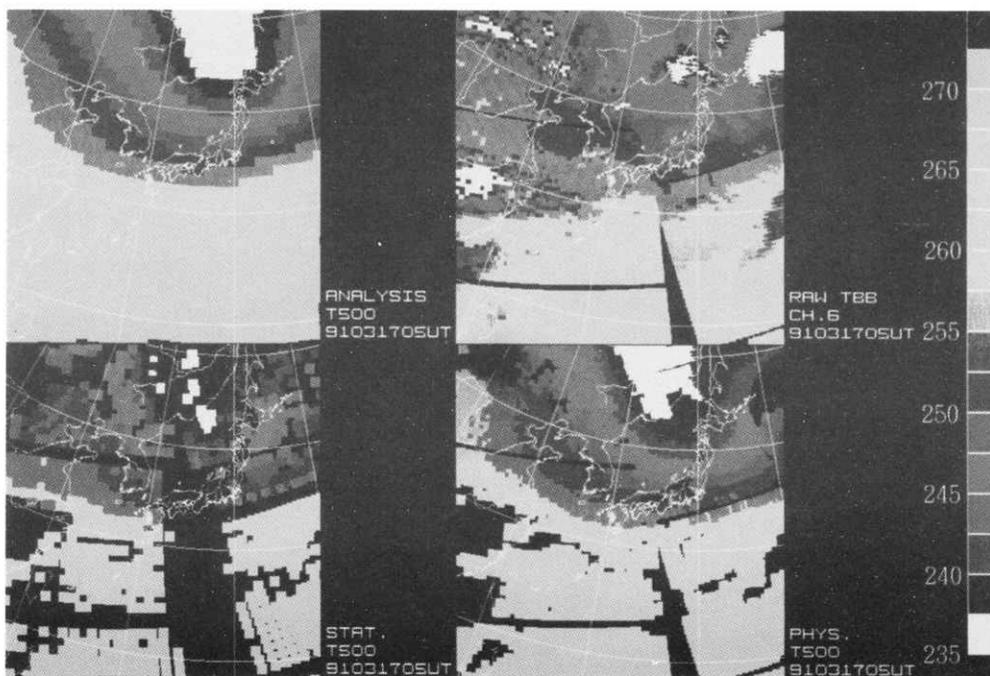


Fig.11 The same as in Fig.8 except for 500hPa.

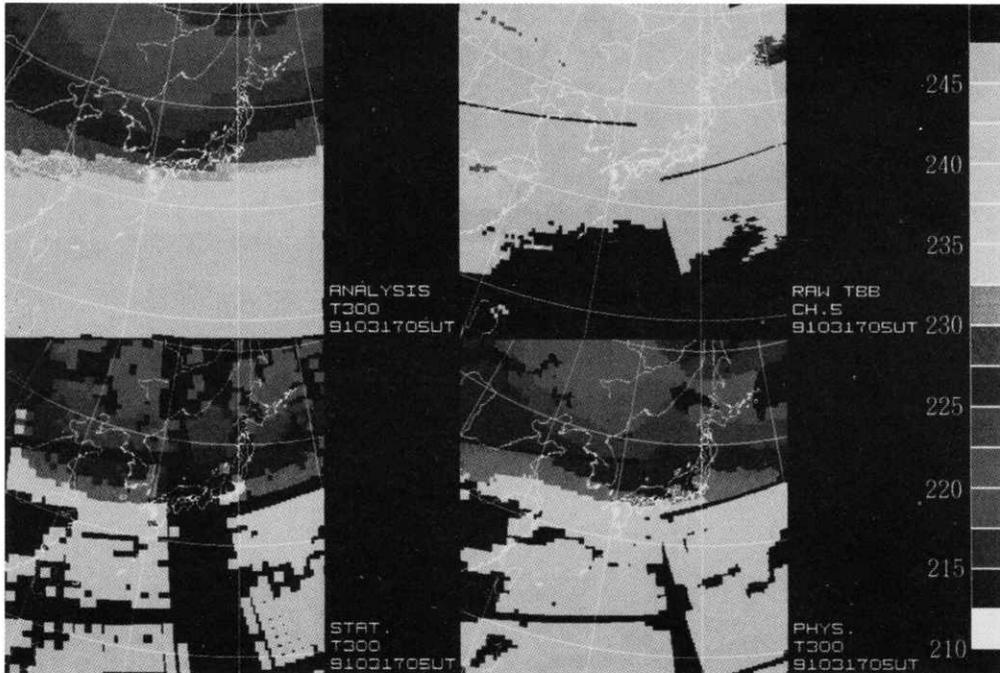


Fig.12 The same in Fig.8 except for 300hPa.

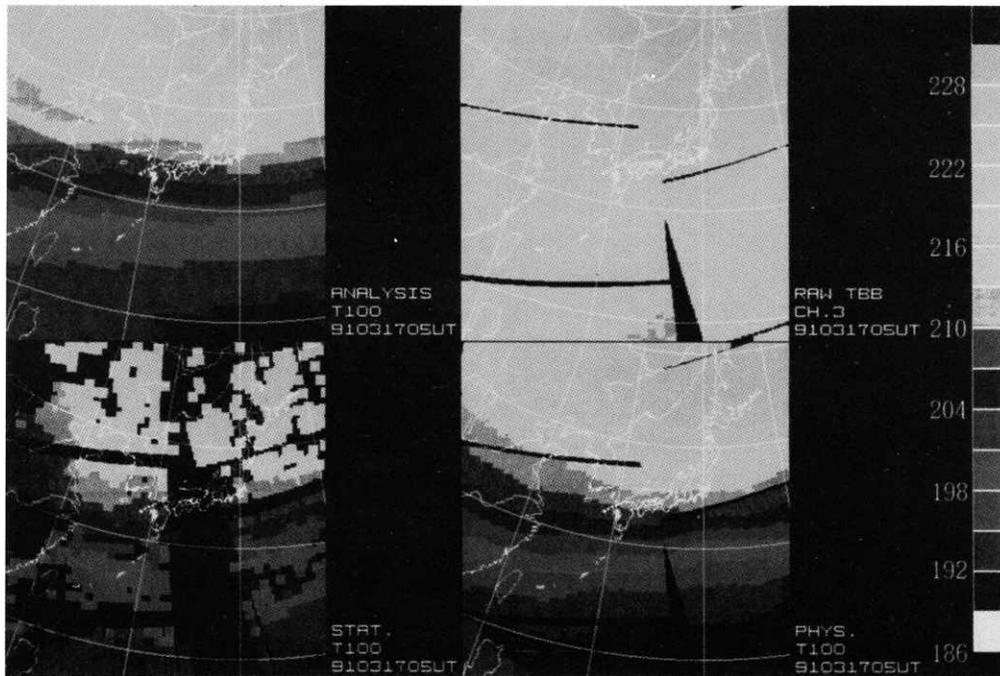


Fig.13 The same in Fig.8 except for 100hPa.

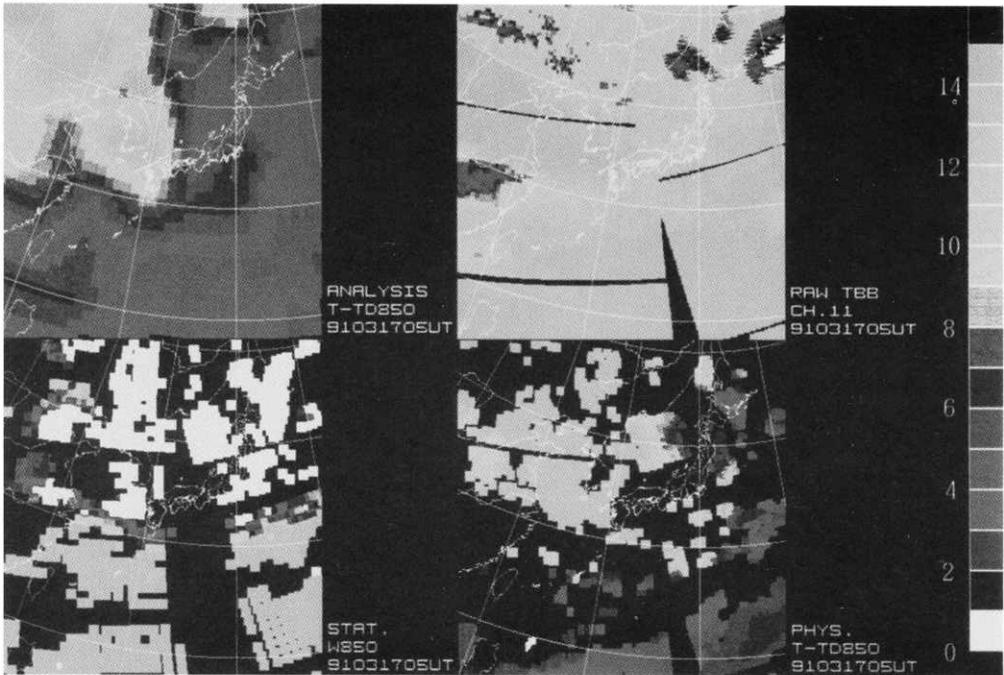


Fig.14 Results of water vapor retrievals at the level of 850hPa. The images are analysis field of dew point depression (upper left), raw brightness temperature (upper right), the retrieval of precipitable water with the statistical method (lower left) and the retrieval of dew point depression with the physical method (lower right). The scale righthand shows dew point depression The HRPT data used for these retrievals is of NOAA11 at 06UT 17 MAR 1991.

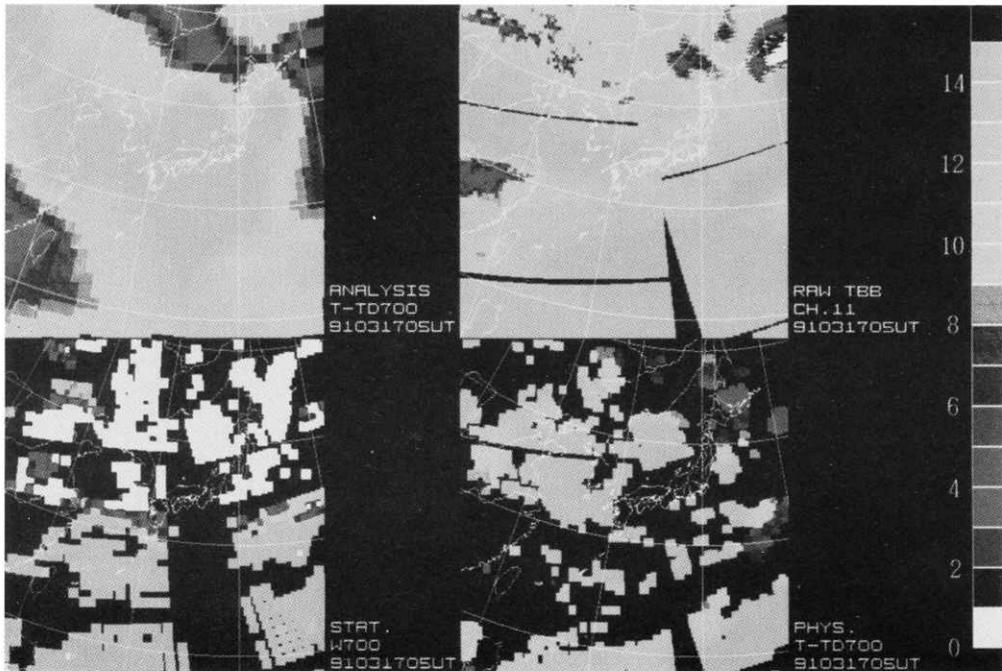


Fig.15 The same as in Fig.14 except for 700hPa.

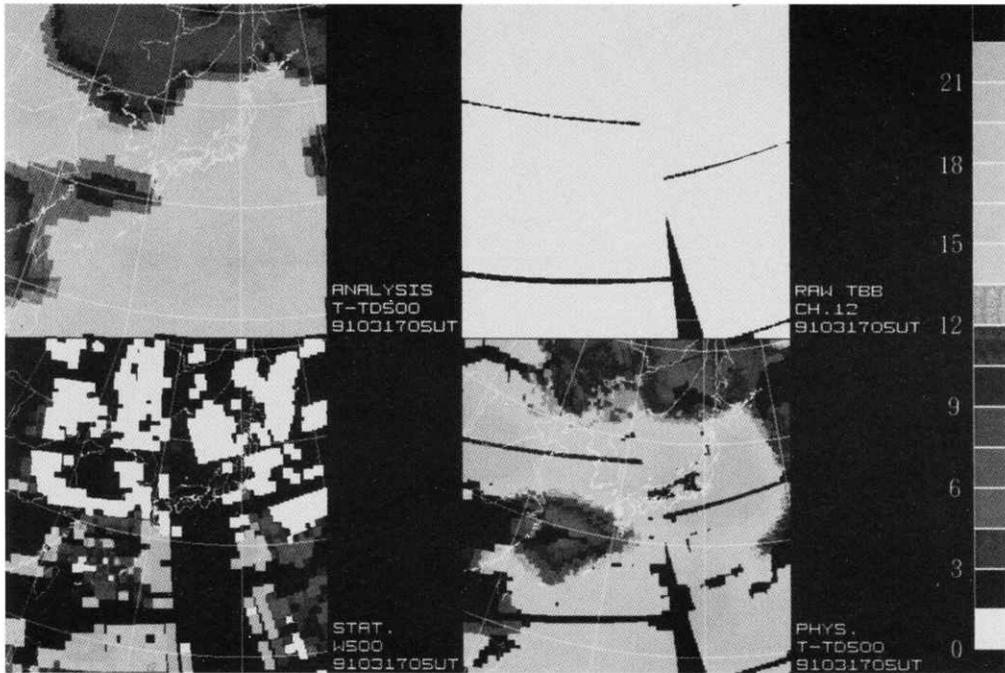


Fig.16 The same as in Fig.14 except for 500hPa.

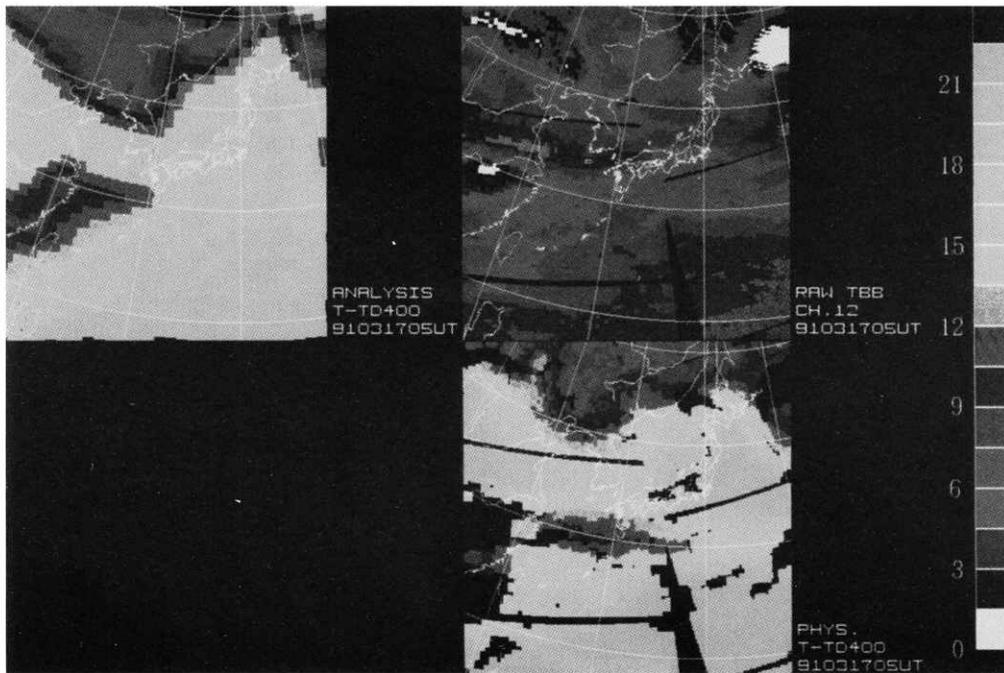


Fig.17 The same as in Fig.14 except for 400hPa.

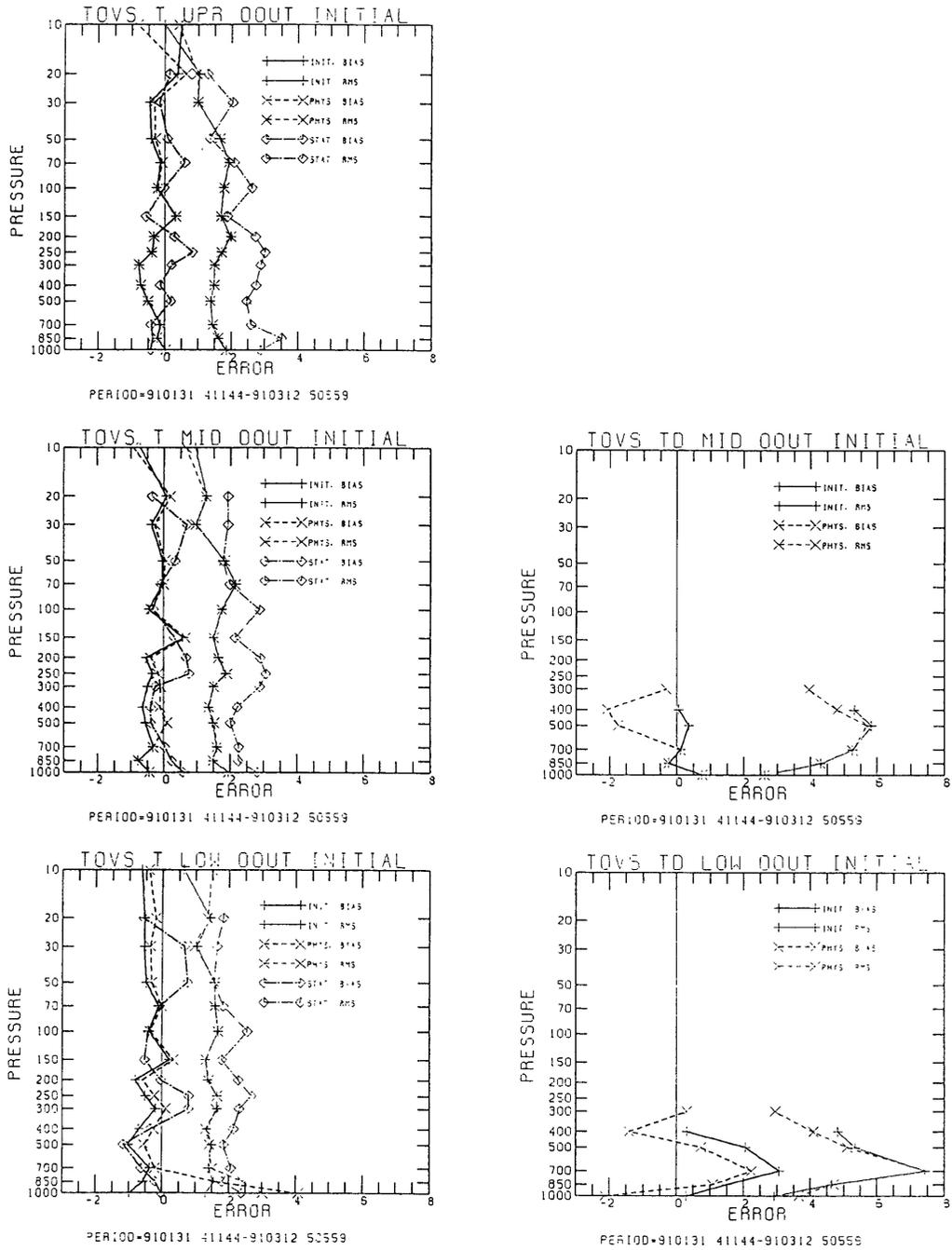


Fig.18 RMS error and bias error of initial value, retrieval with physical method and statistical method.

4. 3 精度評価

4. 3. 1 ゾンデデータとの比較

数値予報値(00UT)をゾンデ観測点に空間内挿した値,それを初期値として物理法で算出した値及び統計法の算出値を,00UTと12UTのゾンデ観測を衛星観測時刻に内挿したデータと比較した(Fig.18)。図の上段,中段,下段はそれぞれ成層圏カテゴリ,下層雲域カテゴリ,晴天域カテゴリに対応している。図の左側は気温,右側は露点についての結果である。

気温についての主な特徴は次の通りである。

1. 物理法の RMS 誤差は1K~1.8K (700hPa より高い高度)で,統計法の RMS 誤差1.3K~3.5K に比べ改善されている。
2. 物理法の RMS 誤差は初期値の RMS 誤差とほとんど同じである。
3. 物理法のバイアスは1.1K 以内であり,統計法の1.8K 以内よりも改善されている。予報値のバイアスと比較しても若干改善されている。
4. 850hPa と1000hPa の気温は日変化の影響により大きな正のバイアスをもっている。
5. 700hPa より高い高度では初期値のバイアス誤差を改善している。
6. 例外として150hPa (圏界面付近)では物理法,初期値共に正のバイアスをもっている。これは予報モデルや HIRS の鉛直分解の悪さによるものと考えられる。
7. 統計法のバイアスは正負まちまちの符号をとり,その絶対値も1K 程度と大きい。

露点については,統計法は水蒸気を鉛直水蒸気量の形で算出しているので比較ができない。従って,初期値と物理法の比較のみを示す。

1. 露点はバイアスが2K 程度と大きく, RMS 誤差は4~6 K 程度もある。300hPa の算出については比較的良好な結果が得られているが,これは主に地表の影響を受けない HIRSch12を算出に使用しているためと考えられる。
2. 下層雲域,上層雲域カテゴリでは統計法の精度が晴天域カテゴリに比べ,劣化するのに対し,物理法では晴天域とほぼ同様な精度,特徴が見られる。

4. 3. 2 算出の改善率

全算出地点数の内で,物理法の算出値とゾンデ観測値の差の絶対値が,初期値或いは統計法の算出値とゾンデ観測値の差の絶対値よりも小さくなる地点数の割合を,物理法の初期値或いは統計法に対する改善率として定義する。改善率が,0.5を越えれば物理法によって改善,0.5以下であれば改悪されたと判断することができる。例として1991年1月31日から3月12日までの00UT帯の改善率を Fig.19に示す。図の配置は Fig.18と同じである。+印は初期値に対する改善率を,×印は統計法に対する改善率である。

気温については初期値に対する改善率は150hPaを除いた500hPaより高い高度で0.5を越えている。晴天域カテゴリの下層(700hPaより低い高度)では改善率が0.5以下であるが,これは主にゾンデと衛星の観測時刻の差によるものと考えられるので必ずしも算出精度が良くないとはいえない。150hPaの改善率が良くないのは圏界面に近く,算出が困難であるためであろう。また,下層雲域,上層雲域カテゴリでの成層圏気温の算出に関しては,初期値を改善しているとはいえない。

統計法に対する物理法の改善率は,晴天域,下層雲域カテゴリで0.5を越えており,物理法が統計法より優れていることを示している。ただし,上層雲域では物理法の優位性は明らかではない。水蒸気量の算出に関しては晴天域カテゴリの700hPa~400hPaで改善率が0.5を越えている。

Fig.20に初期値とゾンデとの気温のずれが1K以上,露点のずれが2K以上ある場合の改善率を示す。図の配置及び記号は Fig.19と同じである。気温の算出については,明らかに統計法よりも8割以上のケースに対し改善されていることがわかる。また,初期値に対しても700~300hPa,50~30hPaで顕著な改善を示している。露点の方も,850hPa以上で初期値を改善していることがわかる。

5. 結論および今後の課題

物理法に基づいた鉛直分布算出プログラムを開発した。格子点解析値と比較した結果,気温分布については,下層気温について地表温度の日変化に対応した算出が可能になったこと,走査角補正が統計法に比べ優れていること,カテゴリ変更により500hPaより高い高度の算出数(算出範囲)が多くなったこと,統計法でしばしば見られるノイズがないこと等の結果が得ら

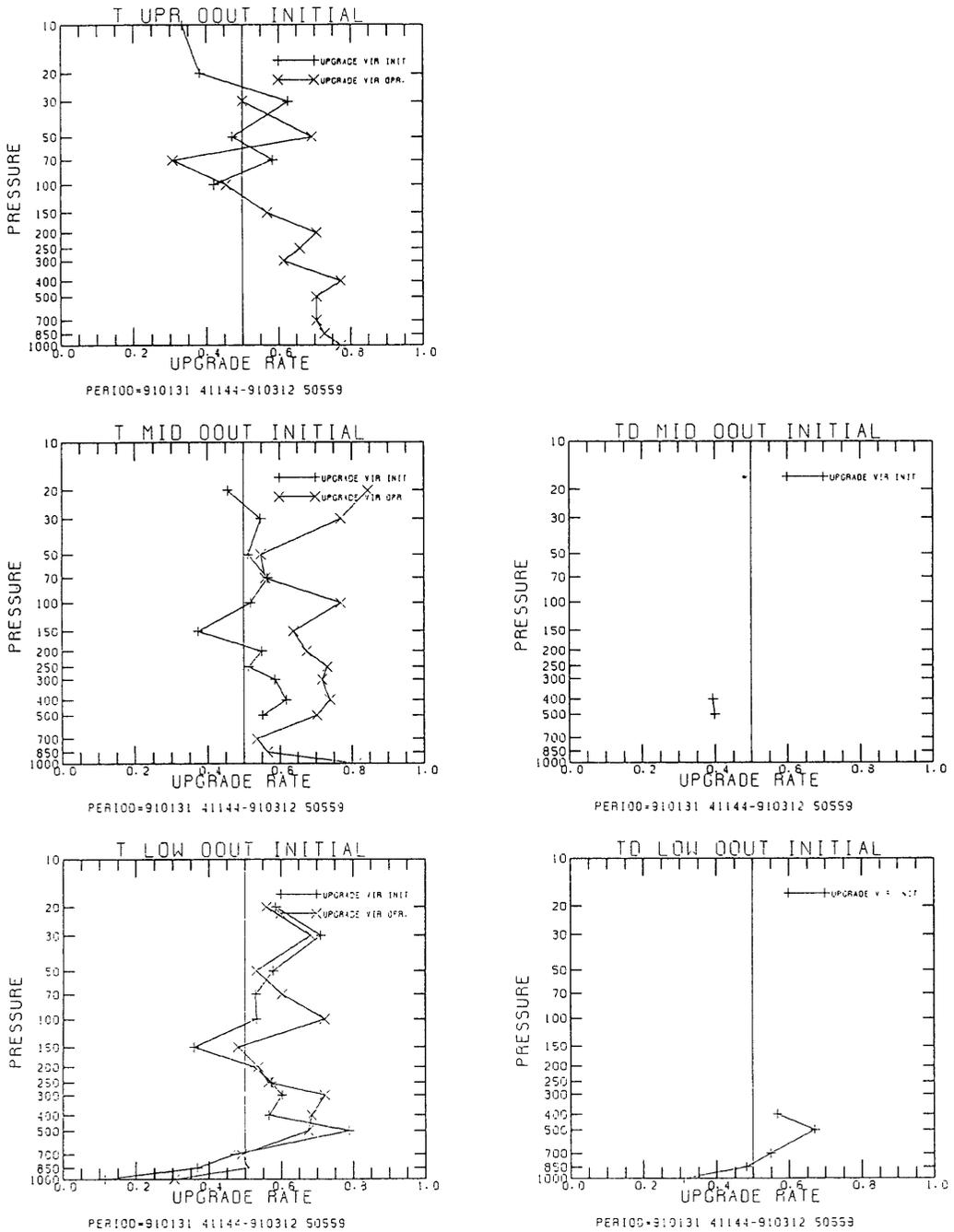


Fig.19 Fraction of the case with improvement in retrievals with physical method via initial profile and statistical method.

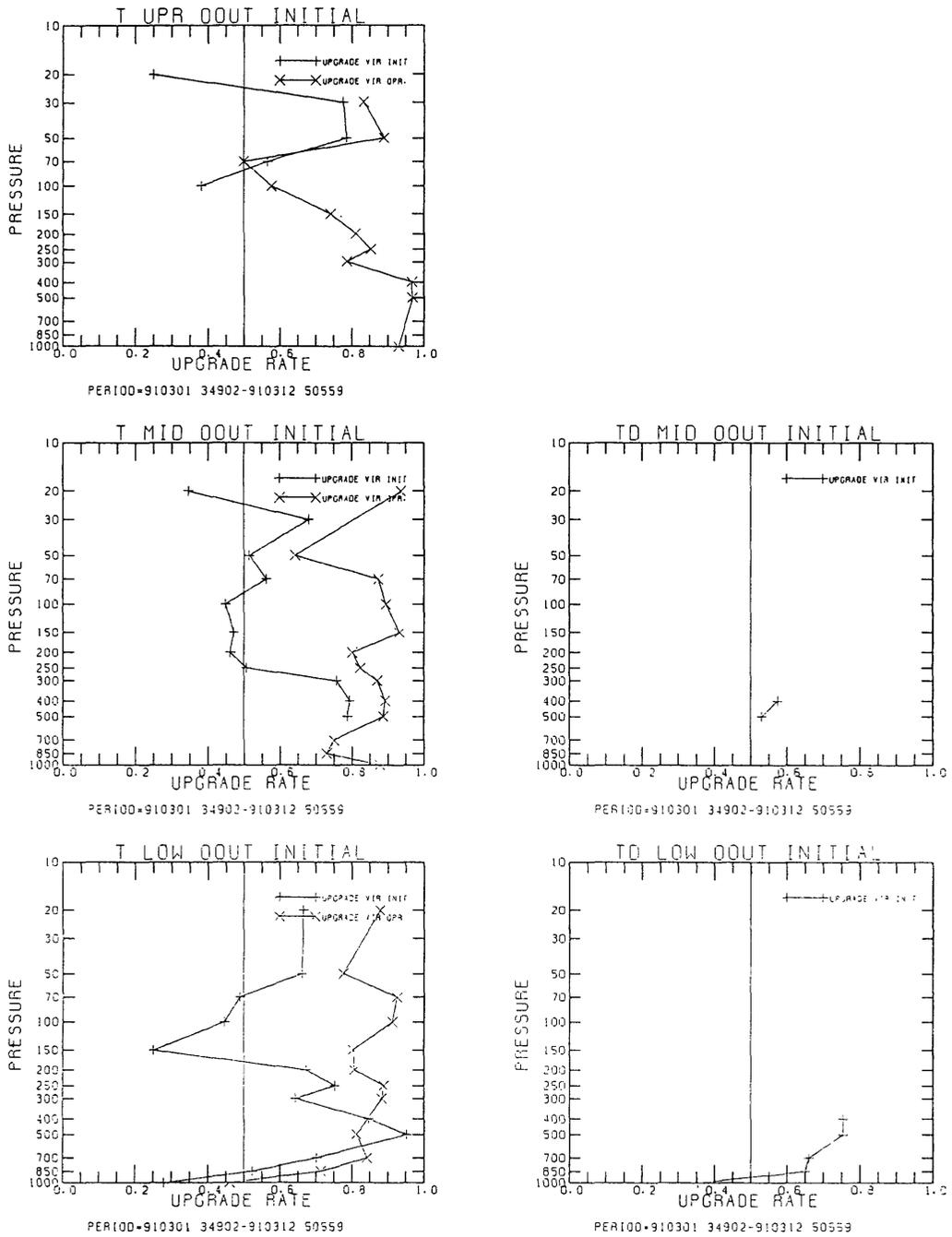


Fig. 20 The same as in Fig. 19 except in the case where the error of initial profile is large.

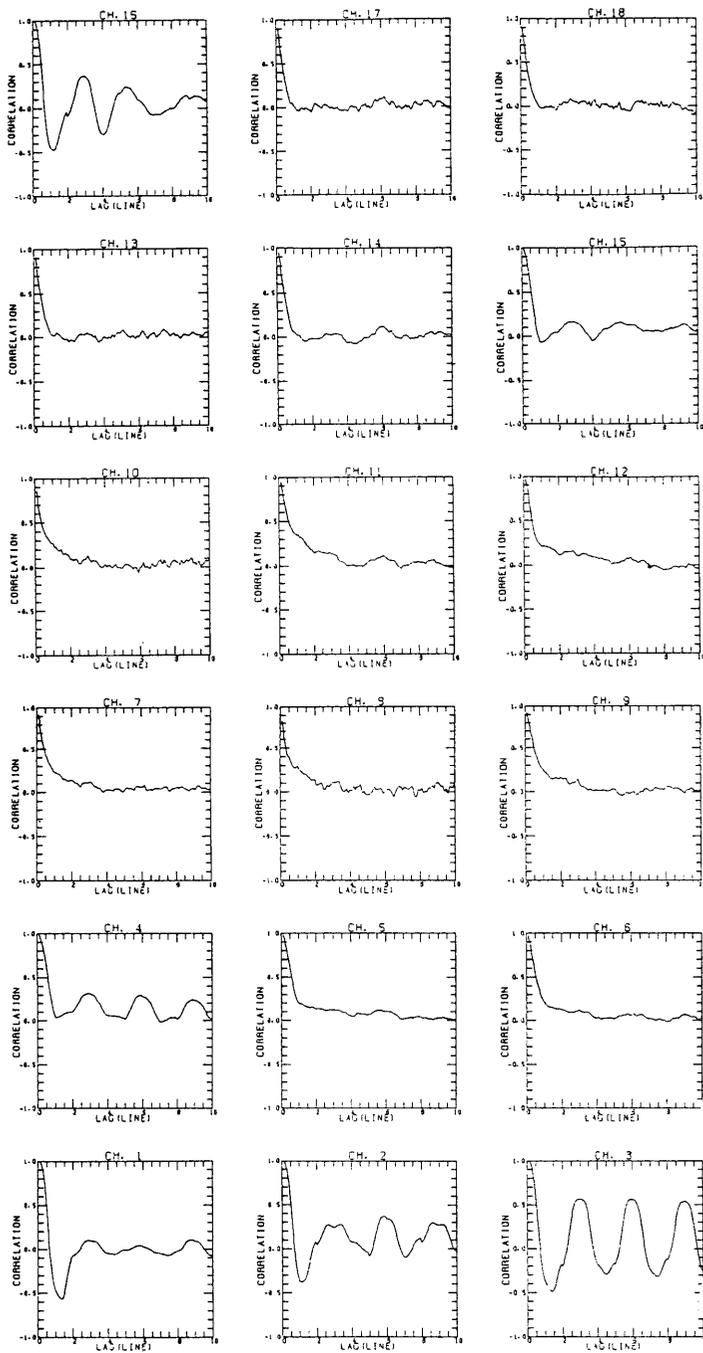


Fig.21 Lag correlation of HIRS radiance. Abscissa is lag measured by line.

れた。水蒸気については、走査角に余り影響を受けずに下層から上層まで良好な算出が得られた。ただし、850hPaの気温に地表の影響が入っていること、乾燥域が解析値よりも強く算出される等の問題点も見いだされた。

精度の点では、現行の統計法に比べRMS、バイアス誤差共に改善された。数値予報の精度と比較するとRMSはほぼ同程度だが、バイアス誤差が改善された。特に700-200hPa, 50-20hPaの気温, 300hPaの露点について良好な結果が得られた。従って鉛直分布算出処理を、今回開発した方法に変更することが望まれる。物理法の有効性調査と改良のため、季節毎の精度評価、数値予報のインパクト実験が今後の課題である。

その他、以下の様な改良項目、新規開発項目がある。

1) MSUの導入

現在の算出システムには曇天域のカテゴリがないためMSUを用いて曇天域の鉛直分布算出をする。そのために、MSUの輝度温度の放射計算ルーチンを作成しなければならない。MSUの輝度温度の計算にはアンテナパターン補正や地表射出率補正を考慮する必要がある。開発に際してはNOAA-K以降に搭載されるAMSUへの対応が容易になるように配慮する必要がある。

2) バイアス補正量の定期更新

現在バイアス補正量は1990年9月のコロケーションデータを用いて決定した値を使用しているが、バイアス補正量は季節によって、あるいはセンサーの劣化によって変化する可能性がある。従って季節、あるいは月毎にバイアス補正量を再決定する必要がある。また、バイアス補正量が地理的にも変化しているという報告もあるので検討を要する。

3) 生データの補正

HIRSの観測データには測器の電流の周期変動によるノイズが含まれていることが知られている。Fig.21はHIRSの観測輝度温度のch.1-18のライン方向ラグ相関である。明らかにch.1-4, 11, 12, 15, 16には約3ラインのラグの位置に正の相関が見られる。このノイズをフィルタリングして除去すれば、大気上層の鉛直分布算出精度を向上させることができるであろう。また、HIRSch.1についてはランダムノイズが顕著なので平滑化処理を施してこれを除去しなければならない。

4) オゾン量の算出

いくつかの典型的な場合についてオゾンの鉛直分布

を与えて、HIRSch.9の透過率を計算しておき、全オゾン量の算出を試みる。

5) HIRSch.18, 19の利用

HIRSのch.18, 19の波長は雲と雪の識別に利用できることが知られている。鉛直分布算出の際の地表温度や地表射出率の設定、カテゴリの選択に利用できる可能性がある。

6) 標高データの利用

標高データを利用することにより、地表気圧の初期値をよりよく設定することができる。

6. 謝辞

本庁数値予報課には、開発方針の示唆および技術情報提供(数値モデルで使用している露点温度と混合比の関係式)、本庁高層課にはロケットゾンデデータの資料提供、気象研究所物理研究部青木忠生氏にはFAS-COS2プログラムの提供および多大な助言、東北大学理学部大気海洋変動観測研究センター中島映至氏(現東京大学気候システム研究センター)には吸収線パラメタデータの提供、についてお世話になった。

7. 参考文献

- Aoki, T. (1982) An improved method to retrieve the clear radiance from partially cloudy spots of radiometer on board satellite. *J. Meteor. Soc. Japan*, 60, 758-764.
- 青木忠生・中島忍 (1983) HIRS各視野での緯経度および部分雲量の計算; 気象衛星センター技術報告 特別号 TOVSデータ処理システムの解説. P 57-66.
- Chedin, A. and P. Menzel (1989) A report on the fifth TOVS study conference. Toulouse-France, 1989, 61pp.
- Chedin, A. et al. (1989) Local and global applications of the "31" system. 28pp.
- Chedin, A. et al. (1989) The technical proceedings of the fifth international TOVS study conference, Toulouse-France, 1989, 445pp.
- Crosby, D.S. et al. (1989) Rotated regression: A general method of using prior information in multiple regression. the 11th conference on probability and statistics, AMS, 210-213.
- 片山徹 (1983) 応用カルマンフィルタ. 朝倉書店, 198 pp.

- McMillin, L.M. (1978) An improved technique for obtaining clear radiances from cloud contaminated radiances. Mon. Wea. Rev., 126, 1590-1597.
- NOAA (1988) Data extraction and calibration of TIROS-N/NOAA radiometers, NOAA-TM-NESS 107 Rev.1, 58pp.
- Smith, W.L. and H.M. Woolf(1976) The use of eigenvectors of statistical covariance matrices for interpreting satellite sounding radiometer observations, J. Atmos. Sci., 33, 1127-1140.

8. 略語表

AMSU	: Advanced Microwave Sounding Unit
ATSR	: Along Track Scanning Radiometer with Microwave
AVHRR	: Advanced Very High Resolution Radiometer
CATHIA	: Calcul Automatique des Temperatures et Humidites Incluant le AVHRR
CIMSS	: Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies
CSIRO	: Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization
DMSP	: Defence Meteorological Satellite Program
DSB	: Direct Sounder Broadcast
GTS	: Global Telecommunication System
HIRS	: High Resolution Infrared Radiometer Sounder
HRPT	: High Resolution Picture Transmission
ITPP	: International TOVS Processing Package
MSU	: Microwave Sounding Unit
SSEC	: Space Science and Engineering Center
SSM/T	: Special Sensor Microwave/Temperature
SSM/I	: Special Sensor Microwave/Imager
SSU	: Stratospheric Sounding Unit
TIP	: TIROS Information Processor
TOVS	: TIROS Operational Vertical Sounder
3I	: Improved Initialization Inversion