

大気境界層の気温高度分布の測定のための マイクロ波放射計について(Ⅱ)

堀口 光章・竹久 正人・光田 寧

MICROWAVE RADIOMETER FOR THE MEASUREMENT OF TEMPERATURE PROFILES IN THE PLANETARY BOUNDARY LAYER (Ⅱ)

By *Mitsuaki* HORIGUCHI, *Masato* TAKEHISA and *Yasushi* MITSUTA

Synopsis

The inversion method to retrieve temperature profiles from microwave radiometric observations is examined. Three methods (iterative, library, Brent method) are tested. It is pointed that the information about inflection points of temperature profiles is very important for the inversion. The acoustic sounder will give this information to us.

1. はじめに

地上から高度1000 m程度までの大気境界層における気象現象は、人類の社会活動と直接的な関係が深く、近年の社会活動の複雑化とともに、航空機離着陸時の安全、汚染大気の広域拡散現象、台風等による強風の高層建築物への影響などの関連において、大気境界層における気象要素の高度分布に関する知識の必要性が高くなっている。また、大気境界層は地表面と自由大気との間で運動量、熱、水蒸気等の交換が行われる場所として地球上の気候、気象の形成にとって重要な役割を果している。しかし、その重要性にもかかわらず適当な足場が得られないところから、大気境界層の構造の詳細、特にその時間変化についての観測はあまり行われていない。そのために地上からの遠隔測定技術の開発が求められている。

基本的な気象要素である気温の高度分布を地上から遠隔測定するためにはマイクロ波放射計を利用することが出来るが、その基本的条件についての検討を前年度に行った¹⁾。60 GHz付近の酸素分子吸収帯を用いた放射計によって測定される輝度温度は気温荷重関数と気温の高度分布によって決まる。各高度での気温が地上の放射計で測定される輝度温度にどのように寄与するかを表すのが気温荷重関数であるが、周波数やアンテナの天頂角によって異なる形をとる。従っていくつかの周波数、天頂角について輝度温度を測定すれば気温高度分布の推定が可能である。境界層の非一様を考慮すると大気境界層の気温高度分布測定用のマイクロ波放射計としては、鉛直固定のアンテナを用いた多周波数測定システムが適当であり、測定周波数はおよそ54~60 GHzを用いればよいことを示した¹⁾。今回の研究の目的は、放射計によって測定された輝度温度から気温高度分布を推定する逆変換法についての予備的な検討を行い、より効率的で精度の高い逆変換法の開発を準備することにあつた。なおこの際に、マイクロ波放射計の測定と同時に音波探査装置(Sodar)が利用出来れば、音波探査装置により気温変曲点の情報が得られるから、それを気温の逆変換に利用することにより精度が向上出来る。

2. 逆 変 換 法

地上に置いたマイクロ波放射計によって測定される輝度温度の値から上空の気温の高度分布を推定する逆変換法にはいくつかの方法がある。現実の大気境界層は高度方向にいくつかの層に分かれ、その層内では気温減率一定であると考えてよいことが多い。すなわち気温高度分布はいくつかの変曲点を持ち、その変曲点の間では気温の高度変化が線形であるとして良いということである。いずれの方法による場合でも、原理的にマイクロ波放射計によって得られる情報は周波数の数だけの輝度温度の値のみであるから、得られる気温高度分布に関する情報も数に制限がある。一般に逆変換法による気温高度分布の推定も、とびとびの高度での気温の値を求め、その間の気温高度分布はこれを内挿することになる。現実の気温高度分布がいくつかの変曲点を持った折れ線状の形をしている場合には、マイクロ波放射計による輝度温度の値の測定からこれらの変曲点における気温を逆変換法により求め、後はこれら変曲点の間を線形に結んでやればよい。この場合、この変曲点の高度も未知数とすると、得られる分布型は極めて簡単な形のものになってしまうから、気温高度分布における変曲点の高度は他の測器すなわち音波探査装置 (Sodar) によって測定することが出来るものと考えることにより出発する。

ここでは三つの方法 (繰返し法, library 法, Brent 法) について検討してみた。なお、一般的に逆変換法として最もよく用いられている統計的逆変換法 (statistical inversion method) など、気温高度分布に関する統計的な既知の情報を必要とする方法はそのような情報が事前に得られている場所での観測にしか適用出来ない。著者等はどのような場所でも観測出来るシステムを考えているので、そのような逆変換法については今回検討しなかった。

2.1 繰返し法

繰返し法 (iterative method) は, Chahine²⁾, Zhao et al.³⁾ 等によってマイクロ波放射計のデータ処理に用いられた方法である。推定する気温高度分布の形は折れ線状をしているとして、気温高度分布の形を決める変曲点の高度とそこでの気温を仮定し、その大気条件の時にマイクロ波放射計によって測定されるべき輝度温度の値を放射伝達方程式 (前報¹⁾ (1), (2) 式) により計算し、実際に観測された輝度温度の値と比較する。そして、両者の輝度温度の値の差をもとにして、新たに変曲点での気温の値を推定しなおす。今までの研究者の場合は変曲点も未知であるからこれを変えることを行って、さらにこの新たに推定された気温高度分布から決まる輝度温度の値と実際に観測された輝度温度の値を比較するというを繰り返す。これを輝度温度の値の差がある収束条件を満たすまで続けて、その結果を求めるべき気温高度分布とする。仮定された気温高度分布をもとに計算された輝度温度の値と、実際に観測された輝度温度の値との差により変曲点における気温の推定値を修正する繰返し計算式として Susskind and Rosenberg⁴⁾ によって提案された次の方法がある。

$$T^{n+1}(z_i) = T^n(z_i) + \frac{\sum_j W_{ij}(T_{Bj}(\text{Obs}) - T_{Bj}^n)}{\sum_j W_{ij}} \dots \dots \dots (1)$$

ここで $T^{n+1}(z_i)$ は $n+1$ 回目の高度 z_i における気温の推定値, $T^n(z_i)$ は n 回目の高度 z_i における気温の推定値, W_{ij} は j 番目の周波数での高度 z_i における気温荷重関数の値, $T_{Bj}(\text{Obs})$ は j 番目の周波数での輝度温度の観測値, T_{Bj}^n は j 番目の周波数での n 回目の気温推定値をもとに計算した輝度温度の値である。

簡単な場合として、現実の気温高度分布が高度 $z_1=300$ m, $z_2=600$ m, $z_3=1000$ m の三つの高度で気温高度分布の変曲点があり、各々で Fig. 1 に T^n で示すような値をとる 3 つの場合を考えた。高度 $z_4 (= 5000$ m) 以上では U. S. Standard Atmosphere, 1976⁵⁾ と同じ気温高度分布をしているとする。マイクロ波放射計の測定周波数は 55, 57, 60 GHz の 3 周波数とした。この気温高度分布に対して各周波数別に地表面における輝度温度を前報¹⁾ に述べた方法で計算した。その結果は各周波数に対して Table 1 に示すような値が得られた。このような輝度温度の組合せから繰返し法により逆に気温高度分布の推定を行ってみた。この

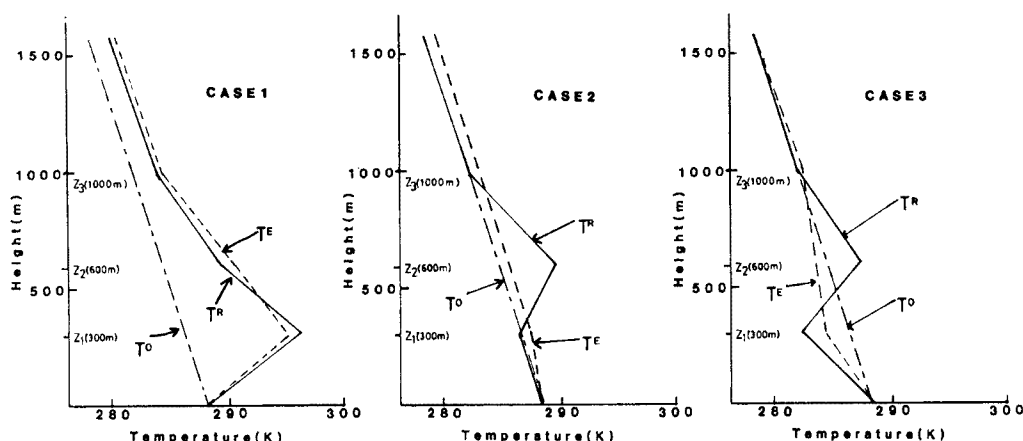


Fig. 1. Test results of the iterative method.

Real temperature profiles (T^R), initial guessed temperature profiles (T^0) and estimated temperature profiles (T^E).

Table 1. The brightness temperature for each frequency. Calculated for model temperature profiles.

Frequency (GHz)	case 1 $T_B(K)$	case 2 $T_B(K)$	case 3 $T_B(K)$
55	282.68	278.89	280.03
57	289.94	284.38	286.18
60	291.05	285.11	287.00

時の最初に仮定する気温高度分布は全層が U. S. Standard atmosphere と同じもの (T^0) と考え、そこから計算を始めた。各ケースに対する逆変換の結果は図に T^E と示す通りで、ケース 1 では 27 回、ケース 2 では 2 回、ケース 3 では 16 回、(1) 式による計算を繰り返した結果である（この場合は真値からの差が 0.2 K となったところで計算を止めている）。ケース 1 では、与えた現実の気温高度分布にかなり近い気温高度分布を推定出来ている。しかしケース 2 と 3 では、推定結果は現実の気温高度分布とはかなりかけはなれたものとなっている。この方法では気温を(1)式により求める最も下の高度 z_1 と最も上の高度 z_3 の間で推定される気温高度分布はほぼ線形の形になってしまう傾向があることがその原因と考えられる。計算式は比較的簡単であるが、複雑な気温高度分布の場合、逆変換は不可能であろう。

2.2 library 法

この方法は考えられる様々な気温高度分布に対して放射計で測定されるべき輝度温度の値の組み合わせを放射伝達方程式により計算しておき、放射計で観測を行った時の気温高度分布として、この library の中で実際に観測された輝度温度の組み合わせに最も近い組み合わせを与える気温高度分布を採用する方法である。実際にはあらゆる気温高度分布を仮定して計算を行うことは不可能であり、気温高度分布を有限個の形に分類して、それに対して輝度温度を計算する。そこで、大気境界層を高度方向にいくつかの層に分け、その層では気温減率一定としてこの気温減率をいくつかの値で与えて気温高度分布の形を決める。ある地表気温に対してこのような多数の気温高度分布の形を与えてその時の輝度温度を計算した library を作っておくことになる。

やはり簡単な気温高度分布が高度 $z_1=300$ m, $z_2=600$ m, $z_3=900$ m に変曲点を持っており、高度 $z_4 (=$

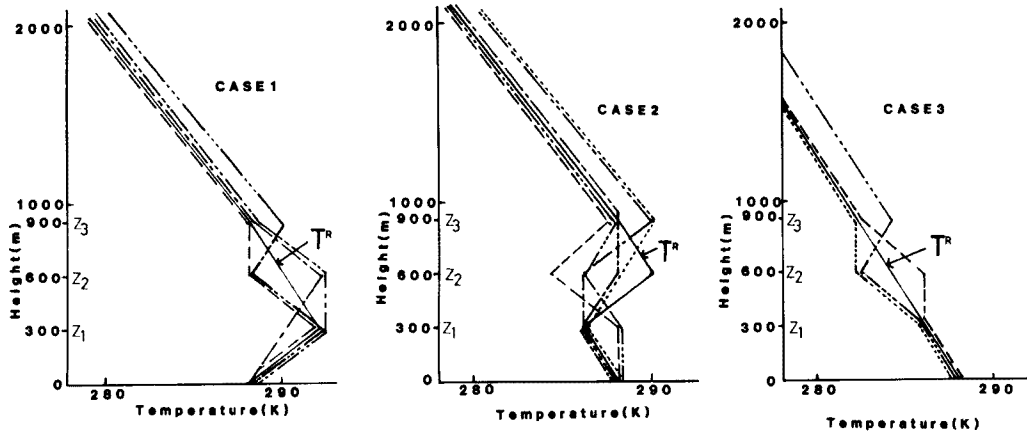


Fig. 2. Test results of the library method.
Real temperature profiles (T^R) and estimated temperature profiles (difference of brightness temperature < 0.5 K).

5000 m) 以上では U. S. Standard Atmosphere と同じ形をしている場合を考える。マイクロ波放射計の測定周波数は 55, 57, 60 GHz の 3 周波数とし、現実の気温高度分布は Fig. 2 に T^R で示す 3 つの場合を考える。各種の気温高度分布に対する輝度温度の組合せの作成のために高度 z_1, z_2, z_3 間の気温減率は U. S. Standard Atmosphere の気温減率を $-L$ として $2L, L, 0, -L, -2L$ の 5 通りをとる場合があると考えられる。そしてこれらの気温減率から与えられる全ての気温高度分布に対して放射計で測定されるべき輝度温度の組み合わせを計算してみた。一般に放射計の測定精度は悪くて 0.5 K, 良くて 0.2 K 程度である。今この測定精度を 0.5 K とすると Fig. 2 に示すようにケース 1 の場合は 4 通り、ケース 2 では 5 通り、ケース 3 では 3 通りの気温高度分布が同じ輝度温度の組合せから選ばれた。輝度温度の値の差を 0.2 K 以下だとすると、全ケースで輝度温度の組合せと気温高度分布が 1 対 1 対応するように得られた。この場合のように気温勾配の整数倍という大きな差のある場合について見ても 0.2 K ぐらいの精度がないと逆算出来ないことになる。しかも変曲点の情報が得られていない場合はもっと組合せが大きくなるので選択は困難になる。

この方法では、library を作成するのに膨大な計算をしておかなければならないが、一度その library を作成しておけばその後は比較的簡単な手順で計算出来るので、うまくやればマイクロコンピューターによっても観測場所において実時間的に気温高度分布を求めることが可能かも知れない。

2.3 Brent 法

この方法は、気温高度分布の気温変曲点の高度を与え、その高度での気温の値を未知数として、これに基づいた気温高度分布によって計算された輝度温度の値と、実際に観測された輝度温度の値の差を 0 とする方程式：

$$\begin{aligned}
 T_{B1}(\text{Obs}) - T_{B1}(T_1, T_2, \dots, T_n) &= 0 \\
 T_{B2}(\text{Obs}) - T_{B2}(T_1, T_2, \dots, T_n) &= 0 \\
 &\vdots \\
 T_{Bn}(\text{Obs}) - T_{Bn}(T_1, T_2, \dots, T_n) &= 0
 \end{aligned} \tag{2}$$

の解を数値計算により求めるという方法である。ここで $T_{Bj}(\text{Obs})$ は j 番目の周波数での輝度温度の観測値、 $T_{Bj}(T_1, T_2, \dots, T_n)$ は j 番目の周波数での気温推定値をもとに計算した輝度温度の値、 T_1, T_2, \dots, T_n はそれぞれ高度 z_1, z_2, \dots, z_n における気温の推定値である。気温高度分布から輝度温度の値を求める計算は非常に複雑で、それぞれの方程式は非線形になるので、コンピューターを用いた連立非線形方程式の解法を行わなければならない。そのために大型計算機センターの科学用サブルーチンライブラリ (SSL II)

の連立非線形方程式の解法を Brent 法により行うサブルーチンを使用する。Brent 法は、連立非線形方程式の解法を利用者が与える初期値から出発して、解を逐次改良していく反復的手法により行うもので、ニュートン法を改良したものである。先の繰り返し法と本質的には同じである。

簡単な場合として、気温高度分布が高度 $z_1=300$ m, $z_2=600$ m, $z_3=900$ m に変曲点を持ち、Fig. 3 のような分布を示し、高度 $z_4 (=5000$ m) 以上では U. S. Standard Atmosphere と一致しているとする。測定周波数は 55, 57, 60 GHz の 3 周波数とする。現実の気温高度分布のモデルとして与える気温高度分布に対して輝度温度を計算し、この輝度温度の値から Brent 法により気温高度分布の逆変換を行ってみた。解を求める時の初期値とする気温高度分布はここでも全層で U. S. Standard Atmosphere を与えた。その結果、反復 2 回で気温変曲点での気温の推定値と実際のものとして与えた気温の値の差が 0.01 K 以下となり、実際の気温高度分布に非常に近いものを解として得ることが出来た。この方法は繰り返し法に比べて複雑な形をした気温高度分布でも比較的正しい解を与える。ただし、数値計算プログラムが複雑なのでかなりすぐれた処理能力を持った大型のコンピューターを使用しなければならず、現地において、観測場所で実時間的にマイクロコンピューターにより気温高度分布を求めることは困難であろう。もっともここで行った逆変換では気温高度分布における変曲点の高度は与えられるものとしている。もし気温高度分布の変曲点の高度がわかっていなければ正しい気温高度分布を求めることは困難である。

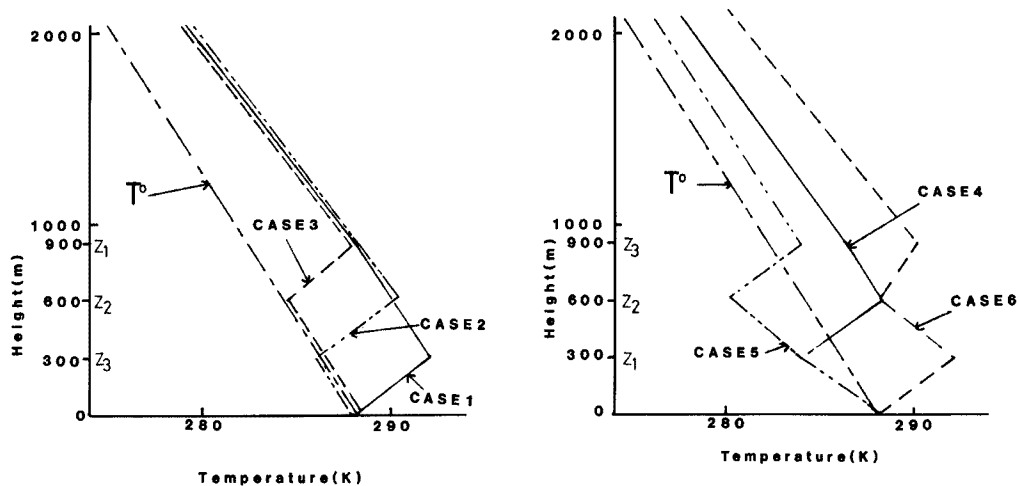


Fig. 3. Test results of the Brent method.

Real temperature profiles and initial guessed temperature profiles (T^0). Estimated temperature profiles are almost equal to the real temperature profiles.

3. 実際の場合のシミュレーション

上に述べたように Brent 法を用いると比較的うまく逆変換が出来そうである。そこで実際にラジオゾンデによって観測された気温高度分布をこの Brent 法によってどの程度正しく推定することが出来るかについてシミュレーションを行ってみた。実際にラジオゾンデによって観測された気温高度分布として Fig. 4 に T^R で示す 1986 年 12 月 1 日 21 時、館野で観測された大気条件を用いた。この気温高度分布をしている時に、周波数 55, 56, 57, 60 GHz の四つの測定周波数を持つマイクロ波放射計により観測を行ったとする。まず音波探査装置による気温高度分布の変曲点の高度に関する情報がない場合を想定し、この Brent 法により逆変換を行ってみた。気温高度分布の変曲点の高度がわからないため、まず高度 $z_1=300$ m, $z_2=600$ m, $z_3=900$ m, $z_4=1200$ m の四つの高度に変曲点が存在すると仮定し、初期値として与える気温高度分布は U. S. Standard Atmosphere と同じものとした。その結果（反復 2 回、輝度温度の値の差 0.01 K 以下）は Fig. 4

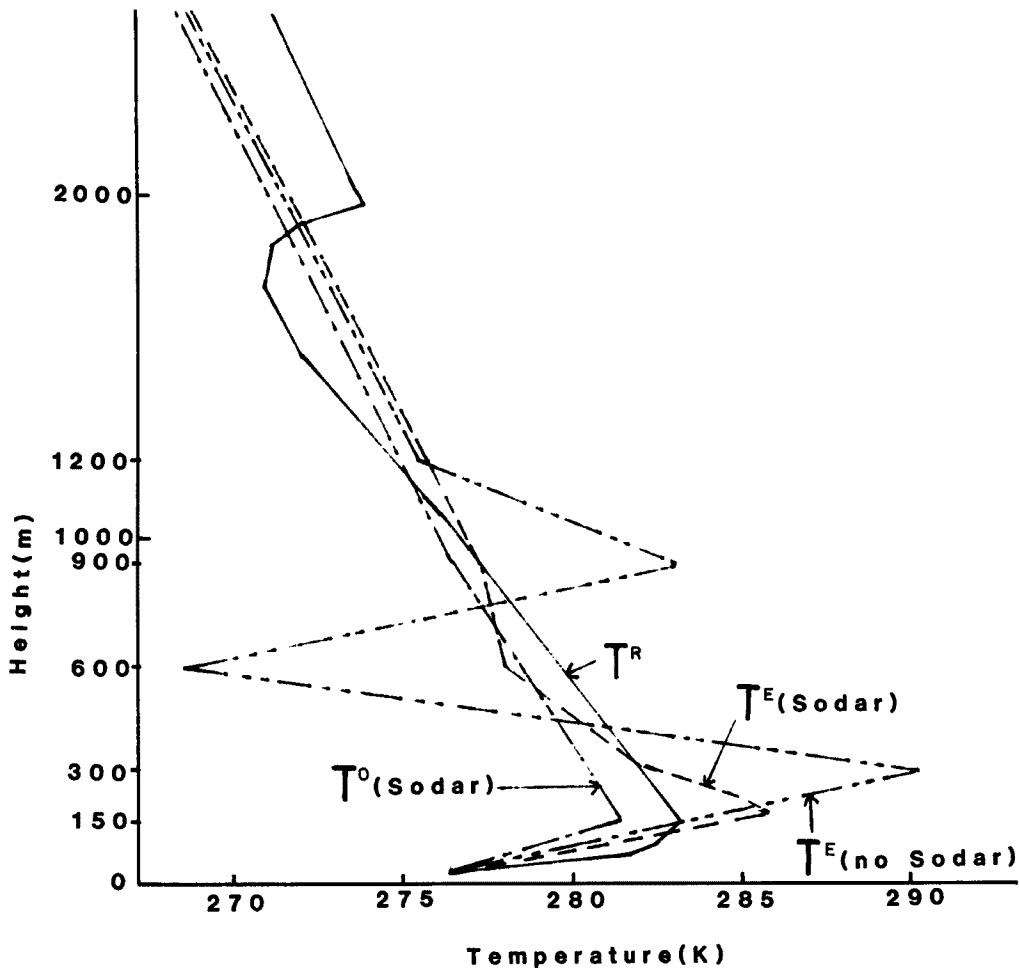


Fig. 4. Test result of the inversion (Brent method) for the temperature profile at Tateno 2100 JST Dec. 1, 1986.

Real temperature profile (T^R), estimated temperature profile (no Sodar, T^E), initial guessed temperature profile (Sodar, T^0) and estimated temperature profile (Sodar, T^E).

に T^E (no Sodar) で示した通りで実際の気温高度分布とは非常にかけはなれたものが得られる。実際の気温高度分布における変曲点は高度 150 m があるので、今度は気温高度分布における変曲点の高度が正しく音波探査装置などによって調べられているとしてこれを与えて計算してみた。すなわち高度 $z_1=150$ m, $z_2=300$ m, $z_3=600$ m, $z_4=900$ m を変曲点とし、高度 $z_1=150$ m 以下は接地逆転層であるとした。すると Fig. 4 に T^0 (Sodar) で示した様な気温高度分布の形を初期仮定値として与えることが出来る。こうして行った逆変換の結果 (反復 2 回, 輝度温度の値の差 0.01 K 以下) は, Fig. 4 に T^E (Sodar) で示したものの様に比較的实际の気温高度分布に近い形を解として与えてくれた。この結果は気温高度分布の逆変換の時に音波探査装置などによる気温変曲点に関する情報が非常に大切であることを示している。

4. 結 語

以上の気温高度分布の逆変換法に関する予備的な検討結果をまとめると次のようになる。繰り返し法では、複雑な気温高度分布の逆変換は不可能である。しかし計算式が比較的簡単なので、小型で移動が容易なマイクロコンピュータでも処理を行うことが出来、現地で実時間的に気温高度分布の概略の推定を行うこ

とは可能である。library 法では、library を作成するのに膨大な計算をしておかなければならないが、一度その library を作成しておけばその後は比較的簡単な手順で計算出来るので、マイクロコンピューターによって観測場所において実時間的に気温高度分布をある程度求めることも出来る。しかし膨大な library が必要である。Brent 法は、繰り返し法に比べて複雑な形をした気温高度分布でも比較的正しい解を与える。ただし、数値計算プログラムが複雑なのでかなりすぐれた処理能力を持ったコンピューターを使用しなければならず、現地において、観測場所に移動可能なマイクロコンピューター程度により気温高度分布を求めることは困難である。気温高度分布の逆変換に際しては、音波探査装置などによる気温変曲点に関する情報が非常に大切である。

今後の検討課題としては次のようなことがある。まず、今回用いた逆変換法についてさらに詳細な検討を要する。特にラジオゾンデで観測された気温高度分布に対する逆変換の有効性について、幾つものケースについてそれぞれの方法で逆変換法を行いその結果の検討を行う必要がある。また、ここに示したものの以外に提案されている別の逆変換法についても検討を行う必要がある。以上のような検討を積み重ねることにより、観測場所でマイクロコンピューターにより実時間的に気温高度分布の推定が出来るような比較的容易で有効性の高い逆変換法を開発することが可能となる。

また今回の研究では水蒸気および雲による吸収と放射による、放射計で測定される輝度温度への影響は考慮しなかったが、実際には特に低い周波数において、放射計で測定される輝度温度の値にその影響が生じる。そこで、水蒸気と雲による吸収と放射がこの程度の周波数範囲で気温高度分布の逆変換にどの程度影響するかについても検討を要する。

参 考 文 献

- 1) 堀口光章・光田 寧：大気境界層の気温高度分布の測定のためのマイクロ波放射計について，京都大学防災研究所年報，第30号B-1，1987，pp. 271-278.
- 2) Chahine, M. T.: Inverse problems in radiative transfer: Determination of atmospheric parameters, *J. Atmos. Sci.*, Vol. 27, 1970, pp. 960-967.
- 3) Zhao, B. -L., H. Yin, C. -D. Hu, H. -X. Li, J. -L. Du, Y. -J. Zhu, Y. -J. Wang and S. -M. Shi: Studies on the ground-based microwave radiometer and its measurements of the lower atmospheric temperature profiles, *Acta Meteorologica Sinica*, Vol. 39, 1981, pp. 441-451 (in Chinese).
- 4) Susskind, J. and A. Rosenberg: Temperature retrievals from TIROS-N, *Remote Sensing of Atmospheres and Oceans*, A. Deepak, ed., Academic Press, 1980, pp. 45-64.
- 5) U. S. Committee on Extension to the Standard Atmosphere: U. S. Standard Atmosphere, 1976, U. S. Government Printing Office, Washington, D. C., 1976, p. 227.