大気境界層における気象要素の 遠隔測定システムの開発*

光 田 寧**

Remote Sensing Technique in the Atmospheric Boundary Layer Yasushi MITSUTA

1. はじめに

地上から高さ 1000 m ぐらいまでの高さの範囲は大気と地面の境界をなす層であるところから大気境界層と呼ばれている。この層は人類の生活が主に行われている空間であり、人間社会活動の環境条件を支配するものである。そして近年の技術の進歩に関連して、汚染物質の大気中の拡散、高層建築物への風の影響、航空機離着陸時の安全性などの理解のために大気境界層での気象要素の高度分布を測定し、理解することの必要性が急速に増大している。これらの問題の重要性については1989年6月に米国ボルダーにおいて下部対流圏のプロファイリングに関するシンポジウムが4日間にわたって行われ、約120編もの論文発表があったことからみても明らかであろう。この会議の報告は米国気象学会より出版されているのでそれを見ていただければ研究の現状を知っていただけるであろう。

このような地面近くでの観測の問題点は、まず現象の規模が小さく、変化の速度が比較的速いにもかかわらず、観測をする足場が得られないことである。地上数 100 m まで観測可能な気象観測塔は非常に高価なこともあって、現在世界でも10か所程度しかない。また、気球や航空機を用いたのでは連続的な観測が困難である。したがって、最近では新しい技術の進歩と共に大気境界層を地表

からの遠隔測定により連続的に測定しようということが考えられるようになった。

このような大気境界層の遠隔測定のための努力は最近始まったばかりのものであり、未だに決定的な手法というものは得られていない。著者等の研究グループでもこのような線に沿っての研究を始めた。その目的は大気境界層の気象要素の高度分布を連続的に地上から遠隔測定するためのシステムを完成しようということにある。

遠隔測定の手段としては、電波、光、音波その他いろいろなものを用いることが考えられているが、本研究グループではできるだけ簡単に行うことができるということを考えて、風は音波をアクティブに用い、気温湿度については電波をパッシブに用いる手法を採用し、その開発に努力しつつある。

2. 京都大学防災研究所において計画中の大気境界層における気象要素の遠隔測定システムの概要

本研究において開発を目途しているシステムは、地上から約 1000 m ぐらいまでの境界層内の風向、風速、気温、湿度の高度分布を数 10 m 間隔で連続的に測定しようとするもので、風向風速用にはドップラーソーダ、気温分布と湿度分布についてはマイクロ波放射計を用い、資料の解析に当たっては地表面での測定値をも考慮に入れてすべてをミニコンピュータを用いて総合的に判断し、必要なプロファイルを得ようとするものである。そのおのおのの要素についてまず簡単に説明したい。

*原稿受付 1990年1月19日

**京都大学防災研究所

2.1 風向風速および気温変動状況を測定するためのドップラーソーダ

ソーダと呼ばれる装置は、電波を用いたレーダに対して音波を用いた探査装置であり、その原理はほとんど同じである。ソーダすなわち Sodar はレーダの RAdio Direction And Ranging の RAdio を SOund に置き換えたものである。音波の場合、空中に特に雨滴や雲粒子のような反射体が無くても大気中の気温の乱れから反射波が帰ってくるので、その反射強度によって大気中の気温変動の大きさを、その反射周波数のドップラシフトから探査軸方向の風速分値を求めることができるという特色を持っている。上空での風速分布を求めるには最低値三つの方向の風速分布を求め、上空での一様性を仮定して風速の3方向成分の高度分布を計算することができる。

本研究グループでは10年ほど前からこのドップラーソーダについて開発を進め、他の方法に比して研究が最も進んでいる。現在は、音波シグナルを三方向に出すのに一つの開口合成方式のアンテナで行うことができ、その資料解析方法を改良した新しいシステムを完成している²⁾。そのシステムの概要は表1に示すようなもので、全体のブロックダイアグラムは図1に示すようなものである。音響アンテナは直径16 cmほどのホーンを25回正方形に配列したものであり、これを五つずつに並列にし5組に少しずつ位相の異なった信号を供給し、軸から傾いた方向に高ビームを送出し、受信の場合は逆に位相差を付して合成して方向性を出すという開口合成方式を用いている。これは電波のレーダにおいてすでに実用化されているものである。またドップラー周波数の検出はFFT

表1 開口合成式ドップラーソーダの諸元

Operating frequency	1400 Hz
Horn array	5×5
Maximum output power	1500W(electric)
Antenna aperture	0.64 m ²
Zenith angle of steering beams	23°
Beam width	17°
Pulse length	100, 350 ms
Pulse repetition period	4, 8 sec
Range resolution	30 m
Doppler frequency estimation	FFT/Simple Homodyne Complex Covariance

図1 開口合成式ドップラーソーダのブロックダイアグラム

図2 開口合成式ドップラーソーダの音響アンテナ

による方法と Complex Covariance 法による解析との二つが選べるようになっている。アンテナの外観は図2に示すとおりである。

この装置により高さ1000 m ぐらいまでの風向風速の分布を5分間平均ぐらい毎に連続的に測定できると同時に、気温の変動の不連続な点、たとえば逆転層の高さなども検出し、マイクロ波放射計のデータ解析の参考として用いる。

2.2 マイクロ波放射温度計

この装置は、大気中の酸素の電磁放射スペクトルにおいて 60 GHz 付近にあるスペクトルピーク周辺の六つほどの波長について、天空からのこれらの波長のミリ波の放射量が大気の高さとその高度分布によって決定されることを利用して、天頂方向からこのような電波の放射強度を測定し、周波数の違いによる吸収の差を利用して各周波数別の受信強度の値から気温の高度分布を求めようとするものである³⁾。この計算では積分方程式を解く必要があるのをこれを簡単に解くためには少し考えた方策を用いる必要がある。

この装置の仕様およびブロックダイアグラムは表2および図3に示すようなものであり、装置の外観は図4に示すとおりである。この装置は現在恒温恒湿室内で各周波数毎のキャリブレーション

図4 マイクロ波放射温度計の概観

を行っているところである。

表2 マイクロ波放射温度計の諸元

Type	50 GHz-band, multi-channel radiometer (6 channel)
Frequency	54.4/55.2/56.0/57.0/58.0/60.0 $\pm$ 0.05 GHz
Dynamic range	Brightness temperature 5 K~400 K
Precision	0.5 K
Antenna	Cassegrain antenna (ϕ 0.6 m parabolic reflector)
Local oscillator	Gunn oscillator
Modulation frequency	30 Hz
IF bandwidth	80 MHz
Integration time	30 sec
Output	analogue output: 4 mA~20 mA digital output: RS-232C
Electric power supply	AC100 V $\pm$ 10%
Size	main unit: 390 H $\times$ 300 W $\times$ 300 D electric power unit: 270 H $\times$ 200 W $\times$ 350 D

2.3 マイクロ波放射水分計

この装置はマイクロ波放射温度計と同様に 22GHz 付近の H₂O の放射スペクトルピークと 32GHz 付近の二つの波長について天空放射を測定し、大気中の全水蒸気量および全雲水量を測定する装置である。この装置は、マイクロ波放射温度計とほぼ同じ構造で周波数のみ異なったもので多周波数にすれば高度分布をも知ることができるのであるが、ここでは境界層内の全

図3 マイクロ波放射温度計のブロックダイアグラム

量についてのみ知れば良いと考えて2波長のみを用いている。この波長の組合せは米国の L. D. Nelson が見出したものである。この装置については現在計画中である。

2.4 地表気象要素測定装置

これは高さ 8 m 程度のマストを立てて、その頂上で風向、風速、気温、湿度を測定し、気象要素プロファイルの最下端を実測によって修正し、解析の精度の向上を計るための装置である。この感部としては通常気象庁などで気象観測に用いる計測器を用いている。

2.5 データ処理装置

この装置はおのおのの検出装置から得られた信号を集め、解析し、最終的に必要な風向、風速、気温、湿度の大気境界層中のプロファイルを求める。本体は HP 9300 シリーズのミニコンピュータを用いたもので、これに必要な記憶装置および演算装置を付加する。

この装置の最も大きな問題点は、マイクロ波放射計の各周波数毎の放射強度の出力からインバース法を用いて気温分布を求めるところにある。積分方程式を解く形になるが、周波数の数が少ないので気温分布を一意的に決定することが困難な場合が多い。そこで、ソーダによる気温逆転層の高さや不安定層の高さなどの情報を同時に用いて気温プロファイルの変曲点の高さをソーダの観測信号から条件として与えてやることによって、気温推定の精度を向上しようというのが本システムの従来のものにはなかった大きな特色である。そのための解析ソフトウェアの開発は大型計算機を用いて行い、大型計算機で測定をうまく行ってから、ミニコンで使用するように改造する予定で現在作業を進めている。

3. 今日まで得られた成果

先にも述べたとおり、ドップラーソーダの開発が現在のところ最も進んでおり、現在の一つ前の形式のドップラーソーダを用いて積雲が頭上を通過する時の境界層内の風の分布およびその変化を調べ、大きな積雲の通過時に雲から下方に延びる上昇流域があり、その直径は雲のそれよりも小さいことおよびそこに流入する境界層内の気流は低

Tr は天空高度で温度の高い部分に雲がある（雲層約 1400 m）。 u' , v' は水平面内、 u' , w' は鉛直面内の各高度列の変動成分を示す。14^h15^m 頃水平面では回転が鉛直面では上昇が見られるのが雲の対流に連らなった対流を示す

図5 ドップラーソーダで測定した雲の下での対流

気圧性の回転をしていることなどを発見している⁴⁾。その時の様子は図5に示すようなものである。

4. 将来の計画

最近できあがったマイクロ波放射温度計と、すでにあるドップラーソーダおよび地表気象要素測定装置を用い、試験観測を行いながらデータ処理装置のソフトウェアを完成させて実際の観測を早急に開始したい。最初は世界気候変動研究計画（WCRP）に関連した雲の下での境界層内での対流の構造を明らかにする研究に重点をおく予定である。

その間に、水蒸気および水の観測のためのマイクロ波放射計を開発購入し、またドップラーソーダの強風観測能力の拡大を計って、一般的な大気境界層の構造の研究のための測定システムを完成させ、各種の目的の研究に応用することを考えている。

引用文献

- 1) American Meteorological Society, Lower Tropospheric Profiling: Needs and Technologies (1988) 260.
- 2) Y. Ito, et al: Development of Wind Profiling Sodar (1989), Jour. Atmos. Ocean, Tech, 6-7, 1989-10, 779-784.
- 3) 光田寧他 (1989) : マイクロ波放射温度計とソーダの組合せによる大気境界層の遠隔測定法の開発, 京都大学防災研究所年報, 32B-1, 1989-4, 361-368.
- 4) Y. Mitsuta, and S. Uchida (1985) : Convective Motion in the Cumulus Subcloud Layer, Journ. Appl. Meteor, 24-9, 1985-9, 993-1000.