

ドップラーソーダの開発と大気境界層観測への応用*

伊藤 芳樹¹⁾・渡辺 好弘²⁾・水越 利之³⁾
 花房 龍男⁴⁾・吉川 友章⁴⁾・内藤 恵吉⁵⁾
 小平 信彦⁶⁾

要旨

大気境界層上部までの風の観測を目的として高出力のモノスタティック型ドップラーソーダを開発し、気象研究所気象観測用鉄塔(タワー)での測定値など従来の測定法で得られた結果との比較を行った。タワーで得られた資料との風向風速値の比較では高度 200m までの 4 高度の各々約 2,800 データについて、風速の相関係数は 0.8~0.95、風速差の標準偏差は風速 5 m/s 以下で 0.7~1.2 m/s、風速 5 m/s 以上で 1.2~2.3 m/s 程度となった。風向差の標準偏差は風速 2 m/s 以上で 10~30°であった。超音波風速計との鉛直風速の比較では観測時間 (sampling duration) 60 分の標準偏差 σ_w の相関係数は約 0.9 となった。

ソーダで測定した風向風速、鉛直風速、エコー強度を同時に連続して表示することにより、接地逆転が解消する過程や対流混合層の鉛直流の特徴がよく把握できることがわかった。

1. はじめに

大気拡散の予測や環境アセスメントに関連して、地上から高度 1 km くらいまでのいわゆる大気境界層の気象観測を行う地上ベースのリモートセンシング装置として、近年音波を使ったドップラーソーダが注目されている。

音波によって大気境界層を探索しようという試みはオーストラリアの McAllister (1969) によって初めて試みられ、熱気泡、放射逆転、内部波動などを観測することに成功した。それ以後米国の NOAA—Wave Propaga-

tion Laboratory (WPL) をはじめ世界各地で試作が開始され、我国においても電波研究所、京都大学、公害資源研究所、気象研究所などで種々の用途への応用が試みられている。

音波は屈折率の変動領域、即ち気温や風速の変動領域を通過する時にそのエネルギーの一部が散乱される。そこでソーダは音響パルスを大気中に送信し、その散乱波を解析することにより気象要素の測定を行っている。

現在次のような項目の測定が試みられている。

(i) 風向風速および鉛直成分とその標準偏差

(ii) 温度急変層の位置と高さ

(iii) 温度および風速変動の構造定数 (C_T^2 , C_V^2)

このうち第 (ii) 項についてはファクシミリ記録上で逆転層などのモニタリングができる装置が実用化されている。第 (iii) 項は現在の技術では測定が困難であり、第 (i) 項の風向風速測定ができるシステムの利用が最も注目されている。

1979年に米国ボルダーで実施された低層大気と比較観測には WPL をはじめドップラー風速が測定できる 5 システムのソーダが参加して、高度 200m までの成分風速測定値についてタワーで得られた資料との比較を行った (WMO, 1980)。その結果、タワーの測定値との対応は

* Development of a Doppler sodar and some applications to the observational study of atmospheric boundary layer.

1) Yoshiki Ito, 海上電機㈱.

2) Yoshihiro Watanabe, ㈱日本気象協会.

3) Toshiyuki Mizukoshi, 東京電力㈱.

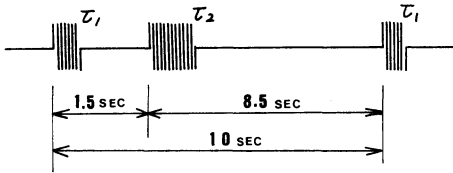
4) Tatsuo Hanafusa, Tomoaki Yoshikawa, 気象研究所.

5) Keikichi Naito, 東海大学開発技術研究所.

6) Nobuhiko Kodaira, ㈱リモートセンシング技術センター.

—1986年2月13日受領—

—1986年7月3日受理—



第1図 混合パルス送信方式. パルス繰返し周期10秒の場合を示す. τ_1 は低高度測定用短パルス, τ_2 は高高度測定用長パルス.

信号処理に問題のある一部のソーダを除いて良好であることが実証され, その後高度400~500mくらいまでを対象としたシステムが実用化されるようになった. Xontech社(米)のものは日本の電力中央研究所などで評価を行ってきており, Remtech社(仏)のものは欧州の電力施設などで実績をあげてきている.

今回我々は高度800~1,000mくらいの大気境界層上部までを測定対象としたシステムを試作し, 風向風速と鉛直成分およびその標準偏差について気象研究所気象観測用鉄塔(タワー)やパイボールの風の資料との比較観測を行ったので報告する.

2. 装置の概要

2.1. 特徴と性能諸元

一般に音波の後方散乱を利用するモノスタティック方式のソーダの受信パワー P_r は次式で与えられる(福島, 1973).

$$P_r = P_t \cdot \eta_t \cdot \eta_r \cdot \sigma(\pi) \cdot \frac{C_r}{2} \cdot \frac{A_r}{R^2} \cdot L \quad (1)$$

ここで P_t は送信パワー, η_t , η_r は各々送・受信変換効率, $\sigma(\pi)$ は単位体積・単位立体角当りの後方散乱断面積, C は散乱体内での平均音速, τ はパルス幅, R は探査距離, A_r はアンテナ有効面積, L は音波の減衰損失である.

今回製作した装置(以下本器という)は大気境界層上部までを測定対象としているので, 探知能力を向上するために(1)式における P_t と τ を従来器に比べて増大して受信パワー P_r の向上を図った. τ の増大は高度分解能の低下につながるもので, 第1図のように低高度では短パルス幅(τ_1), 高々度では長パルス幅(τ_2)で探査する方式を採用した. これにより低高度で良好な高度分解能を維持し, 高々度で探知能力を向上することができる.

本器では P_t を最大900Wとし, 高度200m以下で, τ_1 を150msec, それが高で τ_2 を500msecに設定し

第1表 ドップラーソーダ仕様. 下線部は通常使用する諸元.

項目	仕様
測定方式	3方向型モノスタティック方式
送信周波数	<u>1600, 800Hz</u>
送信出力	<u>300, 600, 900W</u>
パルス繰返し周期	5, <u>10sec</u>
パラボラ反射器直径	1.8mφ
送信パルス幅	150msec, 500msec, 混合パルス送信方式
風速レンジ	30m/sec
測定対象高度	50~1000m(プログラマブル)
測定項目	1) 高度別平均風向(θ) 風速(U)
	2) " 成分風速(Vx, Vy)
	3) " 鉛直成分(W) 標準偏差(σw)
	4) エコー強度

た. 第1表に本器の仕様一覧を示す.

2.2. 構成

第2図に本器のハードウェアの構成をブロック図で示す. 各部の機能は次のとおりである.

(i) 制御器

送信周波数, 送信出力, 測定間隔などを制御し所定の音響信号を発信する機能と, 受信々号を増幅, 波形整形する機能をもつ. 受信々号はここでA/D変換され, 制御・ステータス信号とともにデジタルデータとして信号処理装置へ伝送される.

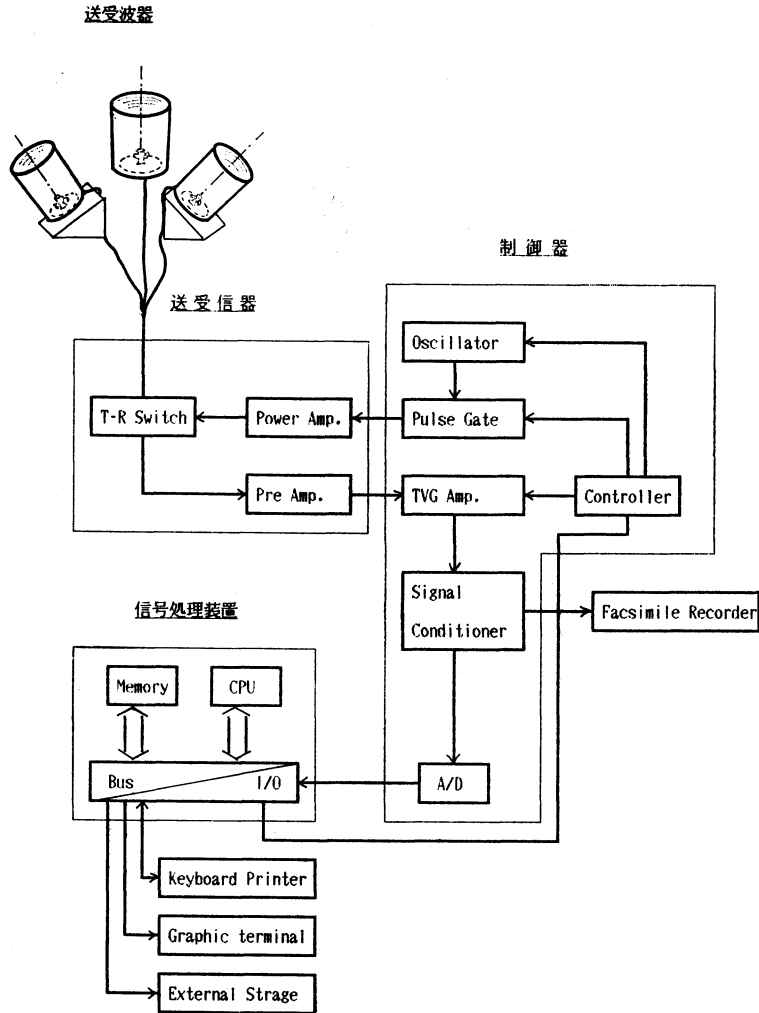
(ii) 送受信器

制御器からの送信々号を電力増幅する機能と送受波器で集音された散乱受波信号を前置増幅する機能をもつ. また3台の送受波器の送受信切替もここで行う.

(iii) 送受波器

電気音響変換器, パラボラリフレクタ, および外部音響雑音の混入と送信音響信号の遺漏防止のための遮音板からなる. 送受波器は第3図(a)および(b)に示すように, 地上の1点に配置し上空の3方向に音響ビームを向けるモノスタティック方式と, 測定対象高度程度の間隔で地上に3台の送受波器を配置し上空の同一方向に音響ビームを向けるバイスタティック方式がある.

前者はビーム幅8~10°程度のペンシル状ビームを使用しているために, 地上の反射や雑音が混入しにくいという利点がある反面, 3方向のビームの測定する空間が異なるという欠点がある. また後者は同一空間の測定ができ, 温度変動だけでなく風速変動による散乱も受信できる利点があるが, 上下に広いファンビームを使用するので雑音が混入しやすいとか, あるいは送信音波が拡散



第2図 ドップラーソーダ機器ブロック図。

するという欠点がある(穂田ら, 1984)。本器では設置面積や設置の容易さなどの実用面での利点も考慮しモノスタティック方式を採用した。

(iv) 信号処理装置

16ビット CPU (LSI-11/23) を内蔵し、制御器からのデジタル信号を周波数解析して風向風速などの演算処理を行う。結果はプリント出力、グラフィック画面への風向風速プロフィール表示および受波スペクトルなどの中間処理結果を含めての外部記憶装置 (MT, ハードディスク) への収録ができる。

逆転層などの温度成層はその生成、消滅の過程がファクシミリ記録の濃淡によりモニタできる。

2.3. 演算処理

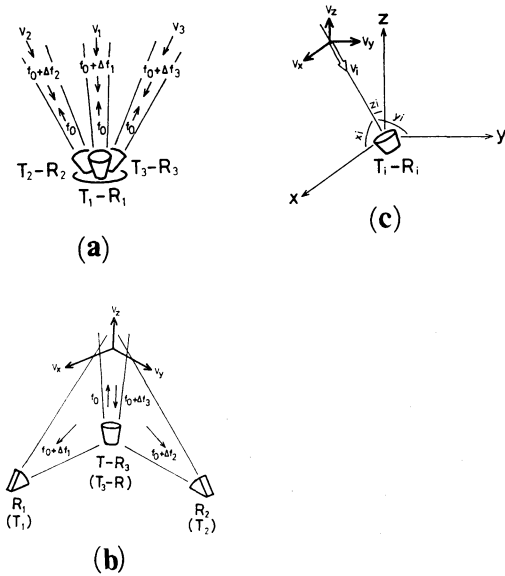
信号処理装置での演算処理は

- (i) ドップラー周波数偏移の検出
- (ii) 信頼度の判別
- (iii) 風向風速などの演算

の順に行う。

ドップラー周波数偏移の検出方法にはFFT法やComplex covariance法など種々の方法がある(Ito *et al.*, 1985)が、以下では受波の全スペクトル密度が得られるFFT法による方法を示す。

受信信号のパワースペクトルは第4図に示すように、ビーム軸方向の風速によってドップラー偏移を受けた周



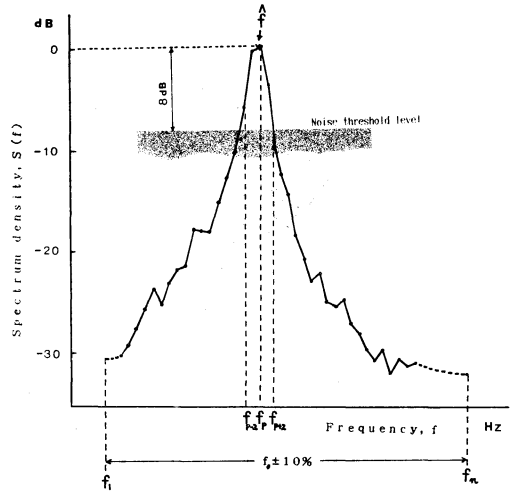
第3図 ドップラーソーダ送受波器配置。(a)はモノスタティック方式、(b)はバイスタティック方式の配置図。(c)はモノスタティック方式のドップラー風速測定方法を示す図 (Ito et al., 1985).

波数 \hat{f} のまわりに、風速の乱れに応じた拡がりをもったものと考えられる。本器の場合、受信々号のサンプリング周波数 f_s を 3,520 Hz とし、サンプリングデータの数 N を 512 個としているので、パワースペクトルは FFT 法により f_s/N 即ち約 6.8 Hz 毎に離散データとして得られる。

受信々号の S/N 比が低い場合には、ノイズスペクトルの影響により、スペクトル密度 $S(f_i)$ をナイキスト周波数帯域内で単に加算平均するだけでは、 \hat{f} の算定値は低周波側のノイズ成分のために一般に過小評価される。これを防ぐためには、例えば $S(f_i)$ の最大値から一定のレベル (K dB とする) 以内のデータのみを平均する方法などが考えられる (Sirmans and Bumgarner, 1975)。 K は信号とノイズのスペクトル比を基準に決めればよい。

本器ではこれを簡便に行うために、 $S(f_i)$ が最大となる周波数 f_p をはさむ合計 5 点のスペクトルから次式のように \hat{f} を推定した。

$$\hat{f} = \frac{\sum_{i=p-2}^{p+2} f_i \cdot S(f_i)}{\sum_{i=p-2}^{p+2} S(f_i)} \quad (2)$$



第4図 受信信号パワースペクトル。北向き傾斜アンテナの高度 100m の例。縦軸のスペクトル密度はピーク値を 0 dB とした。

この方法によれば第4図のような実測スペクトルをあてはめた場合、その拡がりに応じて K の値が 5~10 dB に相当することになる。

高い高度からの受信々号は減衰し、スペクトルピークは明瞭でなくなる。一方ソーダは可聴音域を使用しているのでノイズレベルは外来音響雑音によって規定される。また対象とする大気散乱領域で風速場が異常な不規則性を持ったとき、これも我々の場合ノイズとなる。そこでスペクトル領域で次式のような S/N 比を表すパラメータ γ を定義し、 γ の値によって測定した信号の信頼度を判別した。

$$\gamma = \frac{S(f_p)}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S(f_i)} \quad (3)$$

ここで n は周波数解析範囲内 (本器では送信周波数 f_0 を中心とした $\pm 10\%$ 内) のスペクトルデータ個数である。実験により探査 1 回毎のスペクトルの場合、 γ の基準値として約 8 dB とすれば良好な判定ができたので、この値以上の受波信号を用いて風向風速などの演算を行った。この γ の基準値は前述の K に相当する値に対しても妥当なきい値と思われる。第4図中にスペクトルピークと雑音のスレシヨールレベルの比で表現されるこの基準値を例示した。

このような処理の有効性は、個々の受信パルスにおいてスペクトル (標本スペクトル) を求めると、平均風速

に対応する周波数偏移の位置付近で顕著なピークが必ずしも存在せず、スペクトルが丘状に変化したり、ピークが数カ所に現れたりする場合があることからわかる。これは外来雑音のみならず音響パルスの占める大気領域でガストが卓越したり、逆に静穏になったり、また回転する顕著な渦が存在したりする場合に予想されることである。このような場合には音響パルスの占める領域がエネルギーを保有する乱流成分のスケールより小さいため、平均風速が抽出されにくくなるものと考えられる。従って我々の処理は、そのような風速場の変動のために物理的に不相当と考えられる標準スペクトルが得られた場合でも、前述の基準((3)式の r)によって除外して平滑化を行い集合平均的なドップラースペクトルを求めることができる。

ドップラーソーダで測定されるドップラー風速は音波の散乱領域の速度であり、これが大気中の風ベクトルとともに移動しているとして風速を算出する。第3図(c)で示されるようなモノスタティック方式のビーム軸方向の風速3成分 V_1, V_2, V_3 から、時間平均することにより測定空間を均質とみなして風速の東西成分 V_x 、南北成分 V_y および鉛直成分 V_z が次式により求めることができる (Ito *et al.*, 1985)。

$$\begin{pmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{pmatrix} = -\mathbf{A}^{-1} \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{pmatrix} \quad (4)$$

ここで

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \cos x_1 & \cos y_1 & \cos z_1 \\ \cos x_2 & \cos y_2 & \cos z_2 \\ \cos x_3 & \cos y_3 & \cos z_3 \end{pmatrix} \quad (5)$$

である。 $\cos x_j, \cos y_j, \cos z_j$ はそれぞれアンテナ j ($j=1, 2, 3$)の x, y, z 軸への方向余弦であり、 V_j はアンテナに向かう風を正とし、 V_x は西風を正、 V_y は南風を正とする。

(2)式から得られる各アンテナの受信々号のドップラー周波数偏移 $\Delta f_j (= \hat{f}_j - f_0)$ と V_j の関係は

$$V_j = \frac{C}{2} \frac{\Delta f_j}{f_0} \quad (6)$$

で与えられる。

3. 既往の測定法との比較

3.1. 平均風向風速値の比較

モノスタティック式ドップラーソーダのアンテナ配置(第3図(a))において、本器では2台のアンテナを天頂角 α 、方位角を各々 A_1, A_2 に設置し、残る1台を鉛

直上方向きとした。 A_1, A_2 は直交に近くなるように配置するものとし、方位北を基準(0°)として地上の反射源となる高い建物や音波の送出方向を考慮して任意に選択できる。この場合(5)式の方法余弦は

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \sin \alpha \sin A_1 & \sin \alpha \cos A_1 & \cos \alpha \\ \sin \alpha \sin A_2 & \sin \alpha \cos A_2 & \cos \alpha \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

で表されるので、東西成分 V_x と南北成分 V_y は

$$V_x = \frac{1}{\sin \alpha \sin(A_2 - A_1)} \{V_1 \cos A_2 - V_2 \cos A_1 + V_3 \cos \alpha (\cos A_1 - \cos A_2)\} \quad (8)$$

$$V_y = \frac{1}{\sin \alpha \sin(A_1 - A_2)} \{V_1 \sin A_2 - V_2 \sin A_1 + V_3 \cos \alpha (\sin A_1 - \sin A_2)\} \quad (9)$$

となる。風速 U と風向 θ は

$$U = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} \quad (10)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{V_x}{V_y} \quad (11)$$

である。(8)、(9)式で鉛直成分の寄与を表す V_3 を含む項は、測定の目的によっては時間平均することにより省略して2台のアンテナで U, θ の測定を行えるが、例えばアンテナの天頂角 α を 25° とすると鉛直成分の2倍程度の値が水平風速に寄与することがあるので、弱風で鉛直成分が大きい場合には誤差に注意を要する。

ドップラーソーダの10分間平均の風向風速測定値の高度200mまでの4高度について、タワーとの比較観測結果を示したのが第2～3表である。観測にあたってはソーダをタワーから北へ約300m離れた地点に設置し、傾斜アンテナは天頂角 25° で1台は方位北向きに他の1台は西向きとした。またソーダのパルス繰返し間隔は10秒であるので、3方向の各アンテナの20回の測定から平均風速を算出し、タワーの風車型風速計の10分間平均値と比較した。

第2表は1984年8月から1985年3月までに筑波学園都市で測定されたソーダとタワーの10分間平均風速値の月別の相関係数であり、第3表は風速および風向について両者の偏差を風速別に示してある。第2～3表からわかるように風速の相関係数は11月を除き0.8～0.95、風速差は風速が大きくなるにつれて増大する傾向をもち、風速差の標準偏差は風速5m/s以下で0.7～1.2m/s、風速5m/s以上で1.2～2.3m/s程度である。また風向差の標準偏差は風速2～10m/sで $10 \sim 30^\circ$ 、風速10m/s以上で $6 \sim 10^\circ$ となっている。11月の各高度と1月の200m高度で相関が低下しているのは、ソーダ風速がタワー

第2表 ソーダとタワーで測定された風速の月別相関。1984年8月～1985年3月の10分間平均値の相関。N：データ数，R：相関係数。

年・月	50m	100m	150m	200m
1984年8月	N=278 R=0.89	N=278 R=0.95	N=277 R=0.97	N=277 R=0.96
9	N=457 R=0.87	N=457 R=0.88	N=454 R=0.82	N=451 R=0.76
10	N=566 R=0.86	N=566 R=0.76	N=558 R=0.89	N=552 R=0.87
11	N=285 R=0.71	N=286 R=0.71	N=286 R=0.69	N=285 R=0.64
12	N=404 R=0.80	N=401 R=0.86	N=396 R=0.87	N=373 R=0.82
1985年1月	N=187 R=0.89	N=187 R=0.87	N=167 R=0.86	N=151 R=0.64
2	N=340 R=0.93	N=338 R=0.91	N=316 R=0.89	N=289 R=0.87
3	N=343 R=0.81	N=322 R=0.87	N=304 R=0.91	N=302 R=0.89
データ数計	N=2860	N=2835	N=2758	N=2680

で測定された風速に比べて小さいためである。これは大気中の気温や風速の分布によって音波の伝播経路が変化し、接地逆転が発生した時などに地上の建物などによる反射エコーが出やすくなるためと考えられる。これに対してはアンテナの設置方位に注意し、天頂角を小さくして地表付近のサイドローブを抑制するなどの対策が有効と考えられる。

測定値を比較した高度でソーダの測定対象となる散乱体は高度および水平方向に20～30mの空間拡がりをもつので、塔上の空間の1点で測定されるタワーの風速計とは異なるが、空間の均質性が保たれているためか約300m離れて設置された両者の測定値は比較的良好一致を示している。

第5図はソーダとタワーで得られた風向風速の時間変化比較例である。1984年12月12日11時から13日17時までの間に風速は1～11m/s、風向はNWとSEの間で明瞭に変化しているが、両者の時間変化の傾向と値はよく合っている。

第6図はパイボール観測で得られた測定値とのプロフィールの比較例である。パイボールは毎正時に放球し、150m/minで上昇する気球を高度50m間隔にセオドライトで読み取って、測定高度の風向風速を内挿し算出した。ソーダの測定値は毎正時から毎時10分までの10分間平均値である。パイボールは各高度について気球が通過する短時間の風向風速を示しており、上空では観測点より流された地点での測定値となるが、高度方向には数

第3表 ソーダとタワーで測定された風速、風向測定値について風速別に比較したものの、N：データ数，V：タワーとソーダの風速差の平均値(m/s)，S：風速差の標準偏差値(m/s)，D：風向差の標準偏差値(°)

高度風速(m/s)	50m	100m	150m	200m
1～2	N=503 V=-0.7 S=0.8 D=53	N=425 V=-0.7 S=0.7 D=49	N=371 V=-0.6 S=0.8 D=45	N=371 V=-0.6 S=0.8 D=45
2～3	N=656 V=-0.3 S=0.8 D=34	N=533 V=-0.3 S=1.0 D=31	N=480 V=-0.2 S=0.9 D=33	N=429 V=-0.2 S=1.0 D=34
3～4	N=536 V=0.1 S=0.9 D=24	N=450 V=0.1 S=2.2 D=25	N=411 V=0.1 S=1.0 D=26	N=409 V=0.1 S=1.2 D=22
4～5	N=397 V=0.3 S=1.1 D=20	N=405 V=0.3 S=1.0 D=19	N=348 V=0.3 S=1.2 D=20	N=331 V=0.3 S=1.4 D=23
5～6	N=216 V=0.7 S=1.3 D=23	N=329 V=0.6 S=1.2 D=23	N=318 V=0.5 S=1.5 D=19	N=297 V=0.5 S=1.7 D=19
6～8	N=160 V=0.6 S=1.7 D=20	N=320 V=0.7 S=1.4 D=14	N=348 V=0.6 S=1.5 D=16	N=355 V=0.7 S=1.9 D=18
8～10	N=78 V=0.7 S=2.1 D=19	N=86 V=0.8 S=2.1 D=10	N=109 V=0.6 S=1.9 D=12	N=125 V=0.4 S=2.3 D=12
10～	N=66 V=0.8 S=1.8 D=8	N=134 V=0.7 S=2.5 D=6	N=126 V=0.6 S=2.4 D=8	N=117 V=0.5 S=2.1 D=10

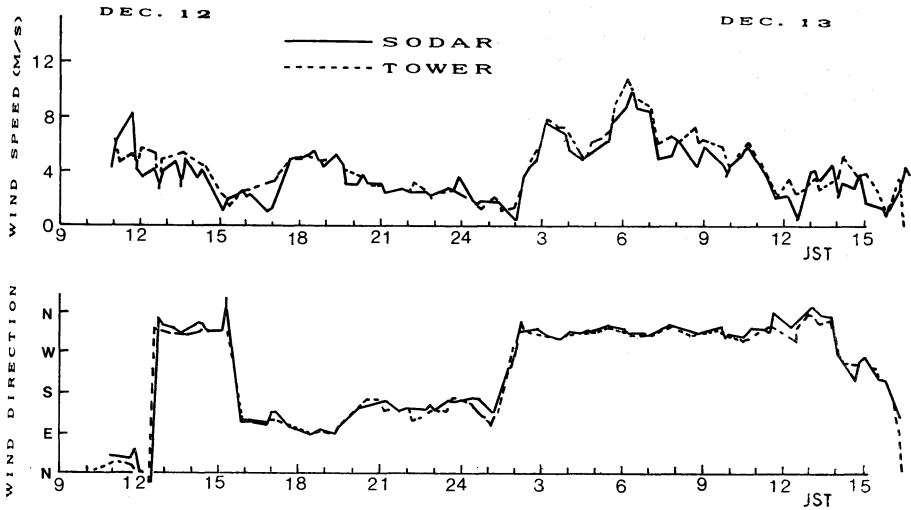
10mの平均となる点ではソーダに近い性質をもつと考えられる。第6図をみると1984年8月31日の早朝から夕方までのほぼ1時間毎のプロフィールは、13時10分のように各高度とも2m/sの差がある例もあるが、風速勾配や風向プロフィールの屈曲点などはよく対応している。

第4表はソーダ、タワー、パイボールの各測定手法間の測定値の差異を調べるために、風向風速の標準偏差と風速の相関係数について比較したものである。いずれの手法間でも風速差の標準偏差は0.7～1.3m/s程度で、高度100m以上で相関係数は0.9以上となった。風向差の標準偏差は20～30°くらいである。ソーダとパイボールの風向差が3者の中では小さいが、有意な差ではないと思われる。

3.2. 乱流測定値の比較

風速の鉛直成分 $W(W_z)$ からその標準偏差 σ_w は

$$\sigma_w = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (W_i - \bar{W})^2} \quad (12)$$



第5図 ソーダとタワーで測定された風速，風向の時間変化による比較，1984年12月12～13日の高度100mの例。

で求められる。ここで W_i は測定毎の，また \bar{W}_i は平均の鉛直成分であり， N は観測時間内の測定回数である。

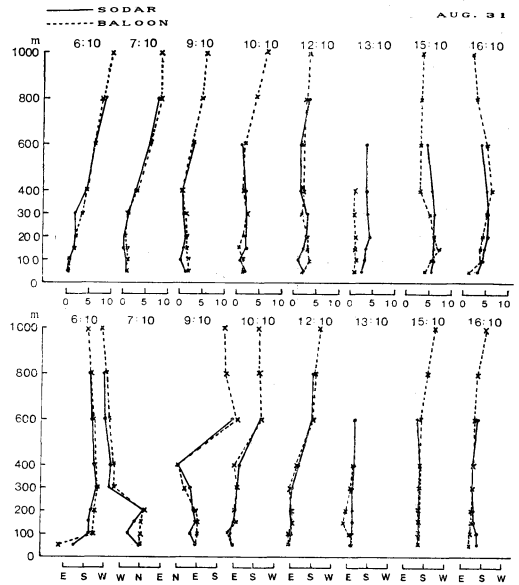
第7図(a)はタワーの超音波風速計とソーダで測定した σ_w の時間変化を比較したものである。タワーで測定した σ_w は観測時間60秒でアナログ演算したものを30秒毎にサンプリングした後，観測時間10分の処理を行ったものであり，ソーダで測定した σ_w は30秒毎に得られた鉛直成分の標準偏差である。風向風速に比べると変化傾向に差異が目立つが，観測時間10分の σ_w と鉛直成分の平均値 \bar{W}_i から次式で

$$N' = 6 \text{ および } \tilde{W} = \frac{1}{N'} \sum_{i=1}^{N'} \bar{W}_i \text{ とすると}$$

$$\tilde{\sigma}_w^2 = \sigma_w^2 + \frac{1}{N'} \sum_{i=1}^{N'} (\bar{W}_i - \tilde{W})^2 \quad (13)$$

観測時間60分の鉛直成分の標準偏差 $\tilde{\sigma}_w$ を求めることができる。第7図(b)のように相関散布図上にプロットすると， $\tilde{\sigma}_w$ が小さい値のときソーダの方がタワーの値より大きくなる傾向があるものの，相関係数は0.91となっている。

鉛直成分の測定値は水平風速によるビームの屈折の影響や機器誤差のため (Spizzichino, 1974) 本器の場合，20 cm/sec 程度の不確かさをもつものと思われる。測定繰返しを短かくし，周波数を高くすることによりこれらの誤差は小さくできる。



第6図 ソーダとパイボールで測定された風速，風向のプロファイルの比較，1984年8月31日の例。

3.3. 探査高度について

受信々号の信頼度を(3)式によって判別し，良好なデータが観測時間全体の観測数の20%以上に達した測定を有効として探査可能な高度(探査高度)を算定した。装置の探査高度は(1)式で表される受信パワー P_r

第4表 ソーダ, タワー, パイボールの測定値の相互比較. (a) はソーダとタワー, (b) はソーダとパイボール, (c) はタワーとパイボールの比較である. 1984年10月18~19日. 風速 1.0 m/s 以上について比較した.

(a) ソーダとタワーの測定値比較

高度 (m)	データ数	風速測定値		風向測定値
		相関係数	差の標準偏差値(m/s)	差の標準偏差値(度)
50	102	0.85	0.7	34
100	102	0.94	0.7	33
150	99	0.94	0.9	33
200	97	0.93	1.2	31

(b) ソーダとパイボールの測定値比較

高度 (m)	データ数	風速測定値		風向測定値
		相関係数	差の標準偏差値(m/s)	差の標準偏差値(度)
50	24	0.78	1.0	23
100	25	0.94	0.9	25
150	25	0.93	1.1	19
200	24	0.92	1.4	26
300	27	0.96	1.0	28
400	16	0.96	1.3	20
600	10	0.87	0.8	30

(c) タワーとパイボールの測定値比較

高度 (m)	データ数	風速測定値		風向測定値
		相関係数	差の標準偏差値(m/s)	差の標準偏差値(度)
50	24	0.86	0.8	35
100	28	0.93	0.9	30
150	27	0.93	1.1	36
200	30	0.94	1.2	20

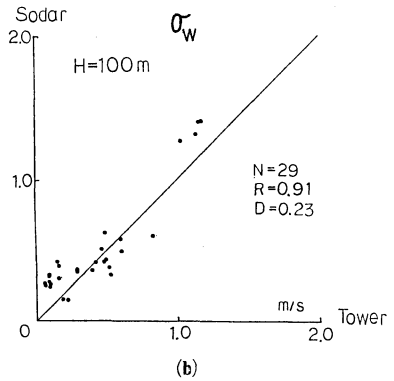
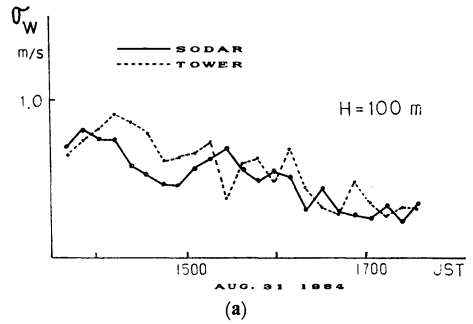
と装置周辺の音響雑音の強さ P_e の比 P_r/P_e に依存する. また (1) 式の後方散乱断面積 $\sigma(\pi)$ は等方性乱流の下では次式で表される (Little, 1969).

$$\sigma(\pi) = 0.0039k^{1/3} \cdot \frac{C_T^2}{T^2} \quad (14)$$

ここで k は音波の波数, C_T^2 は温度変動の構造定数, T は散乱体内の温度である. これらのこと及び (1) 式や音波の吸収減衰の温度・湿度依存性などを考えると測定条件として

- (i) 装置周囲の音響雑音レベルが高い
 - (ii) 音波長スケールの温度変動が小さい
 - (iii) 低温低湿で音波の吸収減衰が大きい
- などの時には探査高度は低下する.

第5表は筑波学園都市で観測した風向風速の月別取得

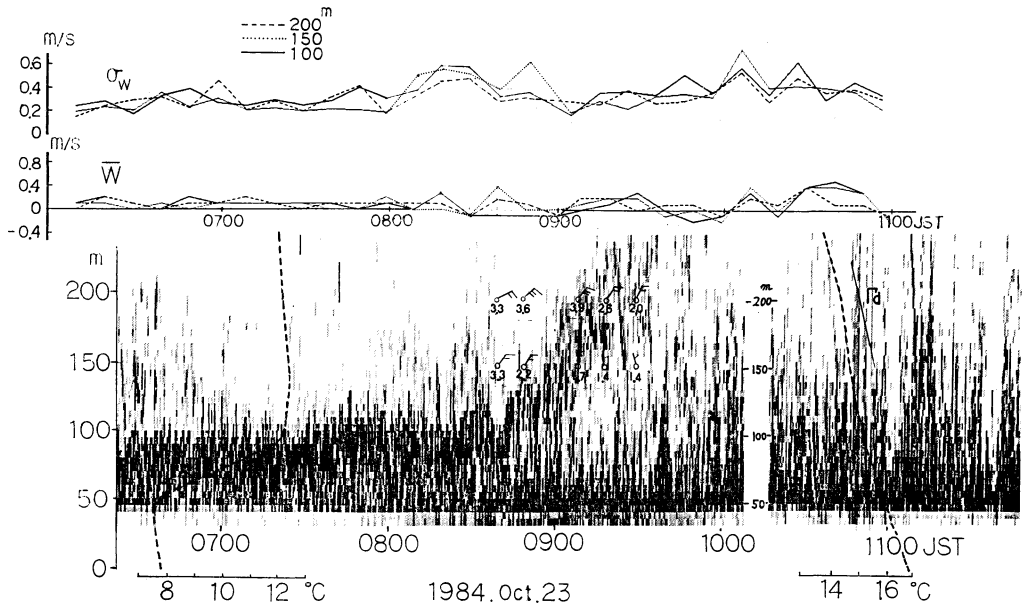


第7図 ソーダとタワーで測定された鉛直風速の標準偏差 σ_w . (a) は時間変化による比較, (b) は観測時間 60 分とした時の相関散布図.

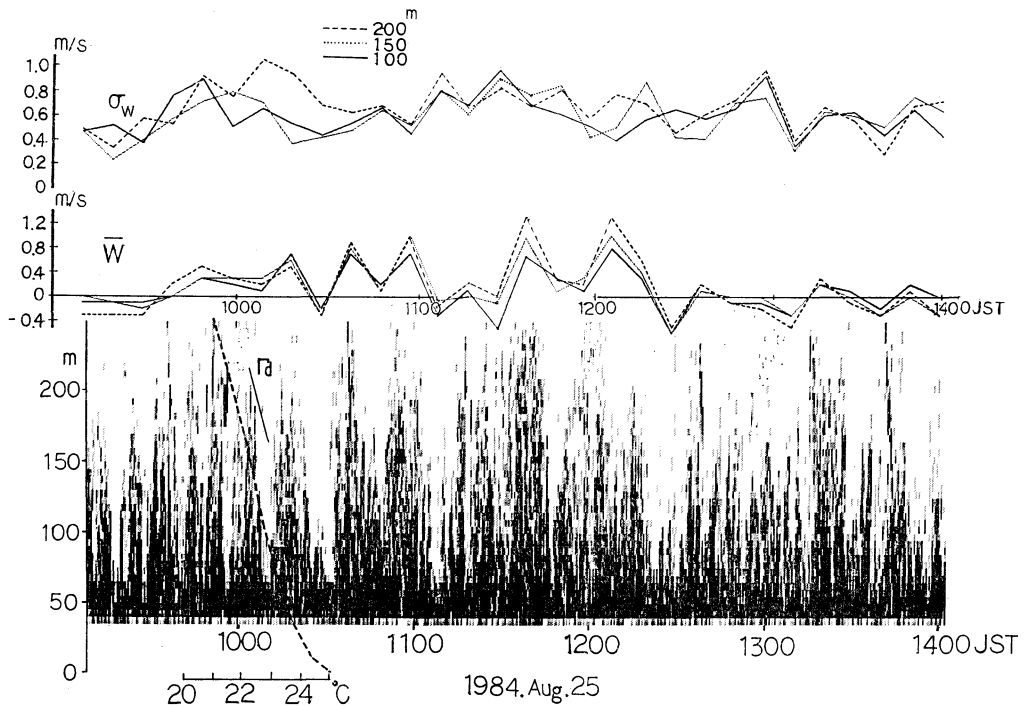
第5表 月別データ取得率(%). 1984年8月~1985年3月. 測定高度 50 m に達しない異常な場合は除いた.

月 高度(m)	8	9	10	11	12	1	2	3
50	100	100	100	100	100	100	100	100
100	100	100	100	100	99	100	99	95
150	100	100	99	100	98	91	93	89
200	100	99	98	100	92	82	85	88
300	99	99	96	92	82	71	80	79
400	87	93	88	81	58	41	61	73
600	59	75	53	42	17	11	27	46
800	26	45	23	16	5	3	7	16
1000	6	12	9	7	1	1	0	2
全 数	458	462	584	309	456	207	347	357

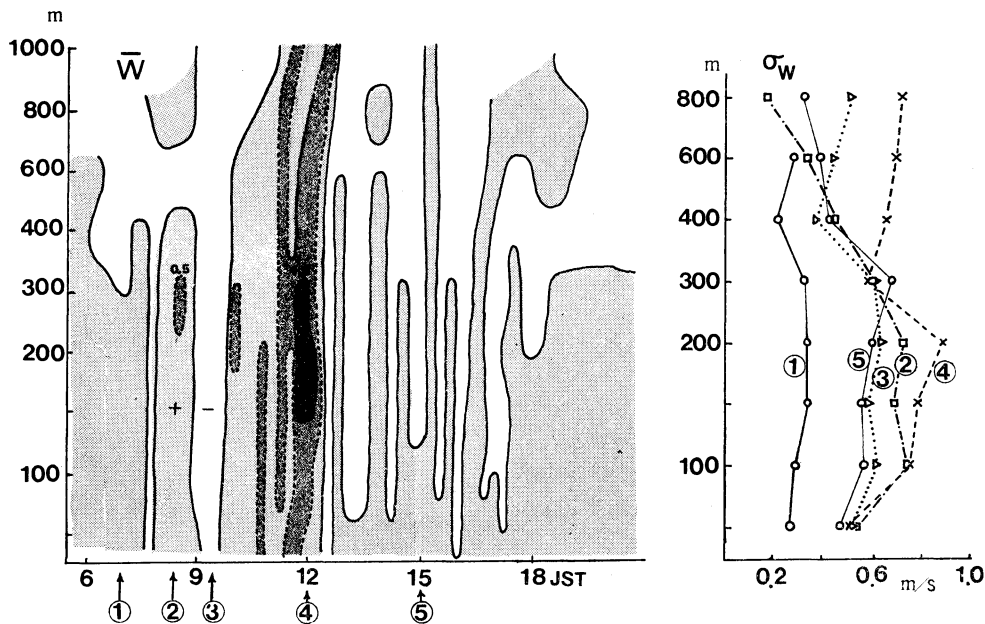
率を百分率で示したものである. 先にあげた条件より推定されるように, 一般に低温低湿で気温の乱れが小さい冬季に探査高度が低下していることがわかる. 冬季を除けば高度 400m まで80~90%, 高度 800m まで20~40%



第8図 接地逆転の消滅過程の観測. 1984年10月23日の例. エコー強度の濃淡表示の上に時間軸を合わせてソーダで測定した \bar{W} と σ_w の100~200 m 測定値を対応させたもの. 気温プロファイルは低層ゾンデにより測定した.



第9図 対流混合層の観測. 1984年8月25日の例.



第10図 1984年8月25日(第9図と同日)の \bar{W} の時間空間分布(左)と丸囲み数字で示す時刻における σ_w のプロファイル図(右).

のデータ取得率が期待できる。

第5表の観測期間の送信出力は 600 W であったが、我々の実験では送信出力 600 W と 900 W の間では探査高度に顕著な差異はなく、300 W では 200m 程度探査高度が低下する場合があった。また傾斜アンテナの天頂角は第5表では 25° で行ったが、例えば 15~20° 程度に小さくして、音波の伝播時の減衰と地表付近のサイドローブを抑制することも探査高度の向上につながる事がわかった。

4. 大気境界層の観測

ソーダを用いた大気境界層の研究は日本においても、初期に Fukushima *et al.* (1974) が気候学的立場でエコー・パターンの分類を試みてから、最近、Mitsuta・Uchida (1985) が行ったドップラーソーダによる sub-cloud layer の対流活動の観測への応用など種々行われている。林・横山 (1982) はエコー強度から求められる C_p^2 の分布にも着目しており、吉川 (1984) は拡散パラメータの算定を行った。また空港でのウインドシア監視に関連した亀田ら (1984) の実験やライダを併用した小林ら (1982) の観測など多岐にわたっている。

以下ではドップラーソーダで得られた情報から、接地

逆転が解消する過程と対流混合層の鉛直流を観測した例を示す。

第8~9図は鉛直向きアンテナのエコー強度をドットマトリックスの濃淡で表したものの上に時間軸を一致させて、ソーダで測定した風速の鉛直成分 \bar{W} とその標準偏差 σ_w を対応させたものである。

第8図は秋季の早朝から日中にかけて接地逆転が解消して対流が発達していく過程を示したものである。午前7時のゾンデによる観測では高度 50~100m の間で 4°C に達する気温逆転があるが、ソーダのエコー強度には、これに対応する接地状エコーが下部から暖められて崩壊し、層状エコーとなって午前8時30分から9時30分にかけて高度100~250m くらいまでもち上げられていく様子がわかる。層状エコーが通過する前後で \bar{W} と σ_w が静穏な状態から大きな変動へと移行するとともに、風速は 3 m/s 以上から 1~2 m/s に弱まっている。午前10時50分のゾンデの観測では気温逆転は解消し、気温勾配はほぼ乾燥断熱減率となっている。

このような層状エコーの上昇も 200m くらい以上になるとエコーが消滅してしまうことが多い。これは混合層のエントレインメントが気温勾配の強い下層ではゆっくりと進み、温位勾配の小さな安定層に達すると急速に進

むためと思われる。

第9図は夏季日中の対流がよく発達した時のものである。午前10時に放球したゾンデによって得られた気温プロファイルによると、地表から高度50mの間に約 1.6°C 低下する超断熱減率となっており、熱ブルーム状エコーが10数分程度の間隔で立ち上がっている。 \bar{W} , σ_w ともに変動は大きく、熱ブルームの上昇が起こった時に \bar{W} が上昇流を示す対応が認められる。第10図はこの日の6時から20時の間の高度1,000mまでの \bar{W} の時間空間分布と σ_w の図中の時刻におけるプロファイルを示したものである。12時頃に高度150~300mに1m/s以上の上昇流が現われており、それに対応して σ_w も高度200mで約0.85m/sの最大値をとっている。これはまた熱ブルーム状エコーの上端付近の高度でもある。 σ_w の日変化は朝夕に小さく日中に大きくなるが、その中でも上昇流域で大きく(第10図中の②と④)、下降流域で小さくなっている(同図中の③と⑤)。

これらの例でもわかるように、ドップラーソーダを連続運転して測定した風向風速、鉛直成分、エコー強度を同時に表示することにより、ソーダ設置点での時間高度断面の気象要素の変化を視覚的にとらえることができる。このことは接地逆転や混合層などの大気状態やウィンドシアをリアルタイムで監視することに有効であることを示している。

5. まとめ

高出力型のドップラーソーダを開発し、気象観測塔などとの測定値の比較を行った。その結果は次のとおりであった。

- (i) ソーダとタワーの風速値の相関係数は0.8~0.95、風速差の標準偏差は風速5m/s以下で0.7~1.2m/s、風速5m/s以上で1.2~2.3m/s程度であった。
- (ii) 風向差の標準偏差は風速2~10m/sで $10\sim 30^{\circ}$ 、風速10m/s以上で $6\sim 10^{\circ}$ であった。
- (iii) 超音波風速計との鉛直風速の標準偏差 σ_w の比較では観測時間60分で相関係数が約0.9となった。
- (iv) ソーダ、タワー、パイポールの相互間で風速の相関係数、風速差および風向差の標準偏差に有意な差はなかった。
- (v) 装置の風向風速データ取得率は冬季を除くと高度400mまで80~90%、高度800mまで20~40

%となった。これはアンテナ天頂角を小さくしたり、音響出力の増大によりさらに向上すると予想される。

またソーダで測定した風向風速、鉛直風速、エコー強度を同時表示することにより、接地逆転の解消時の逆転層の上昇とその前後の乱流の変化や対流混合層の上昇下降流の時間空間分布と乱流の対応の特徴がよく把握できることが示された。

文 献

- 穂田 巖・岡田芳隆・高橋克己・田端 功・内藤恵吉・宗像明夫・横田良夫, 1984: ドップラーソーダによる低層風の観測法の開発, 研究時報, 36, 23-39.
- Fukushima, M., K. Akita and H. Tanaka, 1974: Sodar probing of small-scale ordered motions appeared in the atmospheric planetary boundary layer, J. Meteor. Soc. Japan, 52, 428-439.
- 福島 圓, 1973: ソーダによる対流圏観測, 気象研究ノート, 116, 483-497.
- 林 正康・横山長之, 1982: 日本気象学会1982年春季大会予稿集, 41, 113.
- Ito, Y., S. Murabayashi and Y. Mitsuta, 1985: Development of a sodar for the study of planetary boundary layer, Bull. DPRI Kyoto Univ., 35, 1-20.
- 小林博和・西宮 昌・宮川 実・赤井幸夫, 1982: 日本気象学会1982年秋季大会予稿集, 42, 85.
- Little, C.G., 1969: Acoustic methods for the remote probing of the lower atmosphere, Proc. IEEE, 57, 571-578.
- McAllister, L.G., J.R. Pollard, A.R. Mahoney and P.J.R. Shaw, 1969: Acoustic sounding—A new approach to the study of atmospheric structure, Proc. IEEE, 57, 579-587.
- Mitsuta, Y. and S. Uchida, 1985: Convective motion in the cumulus subcloud layer, J. Climate Appl. Meteor., 24, 993-1000.
- Sirmans, D. and B. Bumgarner, 1975: Numerical comparison of five mean frequency estimators, J. Appl. Meteor., 14, 991-1003.
- Spizzichino, A., 1974: Discussion of the operating conditions of a Doppler sodar, J. Geophys. Res., 79, 5585-5591.
- 吉川友章, 1984: ドップラーソーダによる気流と乱流パラメータの3次元測定, 気象研究所技術報告, 11, 159-171.
- WMO, 1980: Instruments and observing methods, Report No. 3, Lower tropospheric data compatibility, Low level Intercomparison experiment.