

ドップラーソーダの上層風観測装置としての実用性評価*

赤井 幸夫^{*1}・朝倉 一雄^{*2}・片寄 直人^{*3}

要 旨

ドップラーソーダを原子力発電所に設置して1年間の実証試験を行い、上層風観測装置としての実用性を評価した。

高度100 mの風向、風速の年間の欠測率は1.3%と国の「気象指針」で決められた10%以下を十分に満たした。風速に関し、ドップラーソーダによる測定値と気象観測鉄塔に取り付けられた超音波風向風速計による測定値とを比較したところ両者の値は良い相関を示した。また、風速の異常値は降雨時に年間7時間出現したが、その際、特徴的な2山型のスペクトルが観測されることから動作ソフトの改良等によって、異常値を排除できる可能性を示した。一方、風向の比較にみられる1方位のずれが、装置を設置した発電所構内の複雑な地形の影響によるものであることを明らかにした。周波数2,400 Hz、出力150 wのドップラーソーダの送信音は周辺環境への騒音とはならず、観測高度が100~160 m程度であれば比較的小さな出力でも十分に実用可能であることが判った。

1. はじめに

ソーダは、測定対象(大気)に向けて音波を発信し、そこからの反射波を受信、処理して上空の大気の状態を遠隔探査する装置である。ソーダ(sodar)は電波のレーダ(radar)と同様に音波による遠隔探査(sound detection and ranging)から名付けられた通称である。McAllister(1968)は、ソーダによって記録されたエコーパターンと逆転層などの大気の温度成層の状態との関係を明らかにし、音波による大気境界層の構造観測の可能性を示した。上空の風が測れるドップラーソーダは、米国のBeran *et al.*, (1971)によって開発された。逆転層の有無など定性的に大気の状態を把握していたそれまでのソーダに比べ、ドップラーソーダの出現により風向、風速を既存の風速計と同様に定量的な風速値として、しかも同時に複数の高度の風の観測が可能となった。これを契機に、音波による

上層風の遠隔探査手法に関する関心がさらに高まり、フランスやアメリカのメーカによって、実用に供する装置が開発され、製作販売されるようになった。

わが国におけるソーダの開発は郵政省電波研究所によって始められ、観測結果や装置の性能向上などに関する多数の論文が発表された。また、2台の受信アンテナを1台の送受信アンテナから遠方に離して設置し、上空の風を測るバイスタティック型ドップラーソーダは、1978年に日本の商社によってアメリカから輸入され、気象研究所構内において公開された。その後、これと同型式の装置は電力中央研究所や他の機関に納入され上層風の観測に用いられるようになった(赤井ほか, 1986)。さらに、伊藤(1986)らによって、3台の送受信器を1箇所を設置するモノスタティック型ドップラーソーダの開発状況と気象研究所の鉄塔との比較観測結果に関する報告がなされた。

これらを背景に、内外においてドップラーソーダは研究機関や大学、あるいは電力会社などで上層風の観測に使われる例が増えてきている。米国では海洋大気庁(NOAA)によって、高さ300 mの気象観測鉄塔と複数のドップラーソーダによる比較観測が1989年までに3回ほど実施され(Kaimal *et al.*, 1984)、ドップラーソーダの性能が評価された。

* An evaluation of wind measurements in the lower atmosphere by a Doppler sodar.

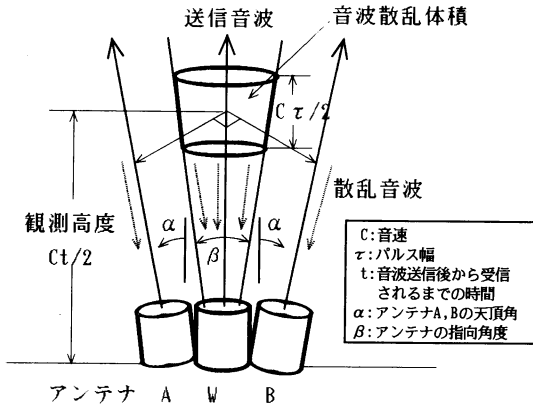
^{*1} Yukio Akai, (財)電力中央研究所.

^{*2} Kazuo Asakura, (財)電力中央研究所.

^{*3} Naoto Katayose, 東京電力(株).

—1992年8月6日受領—

—1993年3月8日受理—



第1図 モノスタティック型ドップラーソーダの原理図。

さて、電気事業では、火力あるいは原子力発電所が建設される前の、環境影響事前調査や安全解析および運転開始後の発電所周辺の大気環境保全や拡散評価を行う立場から、発電所構内の地上付近および上空の気象観測を運転開始前から連続して行っている。原子力発電所の場合は、「発電用原子炉施設の安全解析に関する気象指針」（原子力安全委員会、昭和57年1月、以下本文では「気象指針」と略す）に基づき気象観測が実施されている。このうち、発電所上空の風向、風速の観測は気象観測鉄塔に取り付けられた超音波風向風速計や、パイロットバルーン等により行われているが、鉄塔の建設コストが高い、鉄塔が自然景観と調和しない、バルーンでは連続観測が困難である、などの点で改善の余地が残されている。これに対して、前述したように音波を利用したドップラーソーダの観測技術の進歩が著しいことから、この装置が発電所における気象観測に利用可能であれば、地上から無人で連続して上空の風を測ることができる上に、これまでの方法に比べ観測コストの削減などが期待できる。

本報告は、原子力発電所構内に設置したドップラーソーダの1年間にわたる連続観測結果から、ドップラーソーダの「気象指針」への適合性および装置の性能等を検討し、上層風観測装置としての実用性の評価結果をまとめたものである。

2. 装置の概要

2.1 レーダ方程式

モノスタティック型のドップラーソーダは、第1図に示すように、送受信を兼ねた3台の音波アンテナを用いて、一定時間間隔で短い音のパルスを鉛直上空お

よび斜め2方向の上空に順次送信し、上空大気から散乱してくる音波を受信、解析し上空の風向、風速を求める装置である。一般にモノスタティック型ソーダの受信パワー Pr は単位体積、単位立体角あたりの後方散乱断面積を $\sigma(\pi)$ とすると、次式により与えられる(福島, 1973)。

$$Pr = Pt \cdot \eta_t \cdot \eta_r \cdot \sigma(\pi) \cdot \frac{C\tau}{2} \cdot \frac{Ar}{R^2} \cdot L \quad (1)$$

ここで、 Pt : 送信パワー、 $\eta_t \cdot \eta_r$ はそれぞれ送受信変換効率、 C は音速、 τ はパルス幅、 Ar はアンテナの有効面積、 R は探査距離、 L は音波の大気による減衰損失であり、 $L = e^{-2aR}$ で表され、 a は周波数と相対湿度によって決まる音の減衰量である。探査距離 R は、音波送信後から受信するまでの時間 t と音速 C から

$$R = \frac{Ct}{2} \quad (2)$$

により求められ、鉛直方向に音波を送信した場合には観測高度 Z と一致する。斜め方向の場合には、さらにアンテナの天頂角 α を考慮して観測高度は、

$$Z = \frac{Ct}{2} \cos \alpha \quad (3)$$

により求められる。

2.2 風速の測定方式

上空からの受信信号は、サンプリング周波数を 7,040 Hz (fs)、サンプリングデータ数を 1,024 個 (Ns) とする FFT (高速フーリエ変換) によって周波数解析される。求められた FFT パワースペクトルから次の方法を用いて風速を求めた(伊藤ほか, 1986)。

① ドップラー周波数 (fd) の算出

スペクトル密度が最大となる周波数 fp をはさむ合計 5 点のスペクトルから次式により重心を求め、ドップラー周波数を推定する。

$$fd = \frac{\sum_{i=p-2}^{p+2} fi \cdot S(fi)}{\sum_{i=p-2}^{p+2} S(fi)} \quad (4)$$

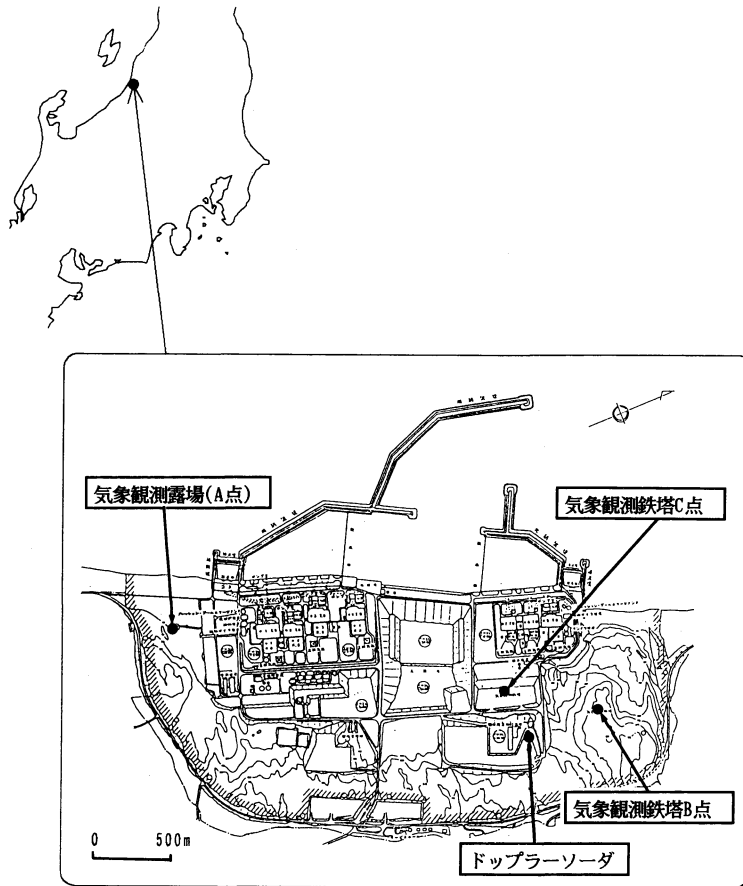
② スペクトルの信頼度の判定

音波送受信毎のスペクトルに対して

$$\gamma = \frac{S(fp)}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S(fi)} \quad (5)$$

を設定し、 γ が約 10dB 以上のスペクトルを風速の演算に用いる。

ただし、 $S(fp)$: スペクトル密度のピーク



第2図 柏崎刈羽原子力発電所の構内図。

ドップラーソーダの設置場所およびA, B, C気象観測点の位置を示す。

S (fi) ; 個々のスペクトル密度

n ; 送信周波数 f_0 を中心とした $\pm 10\%$ 以内のデータ個数③ fd に対する風速 V_j (音波送信方向のベクトル成分) の算出

$$V_j = \frac{C(fd - f_0)}{2f_0} \quad (6)$$

ただし, f_0 は送信周波数

j はアンテナの番号

④ 平均風速の算出

各アンテナ方向成分風速の観測時間内の平均値を次式により求める。

$$\bar{V}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_{ji} \quad (7)$$

ただし, 観測時間内に γ が 10 dB 以上のデータ数が

20% に満たない場合には, その時間の観測は欠測となる。

また, 水平風速は鉛直風速および風速の音波送信方向成分をベクトル合成することにより算出される。(7) 式 $\bar{V}_j$ について $\bar{V}_1, \bar{V}_2$ を天頂角 α で斜め上方に音波を送信して求められた音波送信方向の風速ベクトル成分, $\bar{V}_3$ を鉛直風速とし, 2 台のアンテナの方位角をそれぞれ A, B とし, かつ, A, B は直交に近くなるように配置し, 方位北を 0° とした場合, 風速の東西成分 $\bar{V}_x$ と 南北成分 $\bar{V}_y$, さらに風速 $\bar{U}$ と風向 $\bar{\theta}$ は次式により求められる。

$$\begin{aligned} \bar{V}_x = \{ & \bar{V}_1 \cos B - \bar{V}_2 \cos A + \bar{V}_3 \cos \alpha \\ & (\cos A - \cos B) \} / \sin \alpha \sin(B-A) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\bar{V}_y = \{ \bar{V}_1 \sin B - \bar{V}_2 \sin A + \bar{V}_3 \cos \alpha$$

第1表 ドップラーソーダの仕様と動作条件

	仕 様	観測条件
周波数	1.6 2.4 3.2 4.8 kHz	2.4 kHz
出 力	0~900 W	150 W
パルス幅, 方式	10~900 msec, 混合パルス可	50, 100 msec の混合パルス
パルス周期	3, 5, 10 sec 切り替え	5 sec
観測高度	20~1,000 m	25, 40, 60, 80, 100, 120 140, 180, 200, 220, 240 m
平均化時間	2~60 min	10 min
風速レンジ	30 m/s	同左
観測項目	風向, 風速, 鉛直風速 以上の標準偏差 エコー強度	同左
消費電力量	2,600 VA (最大)	同左

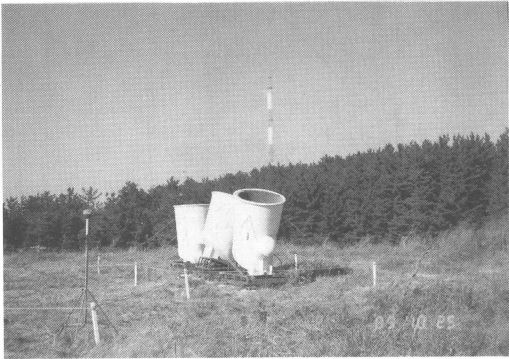


写真1 ドップラーソーダの設置状況.

後方に見える気象観測鉄塔の標高 160 m の位置に超音波風向風速計を取り付けて風向, 風速の観測が行われている. ドップラーソーダの設置場所からの地上高 100 m が標高 160 m に相当する.

$$(\sin A - \sin B) \} / \sin \alpha \sin (A - B) \tag{9}$$

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

$$\overline{\theta} = \tan^{-1} (\overline{V_x} / \overline{V_y}) \tag{11}$$

3. 観測の実施

発電所にドップラーソーダを設置する場合、観測に影響を与える可能性のある気象条件として降雪や強風等が考えられる。そこで、冬季の豪雪や季節風による強風が予想される日本海沿岸にある東京電力柏崎刈羽原子力発電所を観測地点に選定した(第2図)。観測は平成元年10月から1年間連続して実施した。

発電所構内では山の上に建てられたB点の気象観測鉄塔により排気筒出口と同じ高さの標高 160 m (地上

高 78 m) の風向、風速を観測している。従って、今回の観測では主として、ドップラーソーダによる風向、風速についても標高 160 m (ドップラーソーダの設置場所からの地上高 100 m) の観測値について評価した。

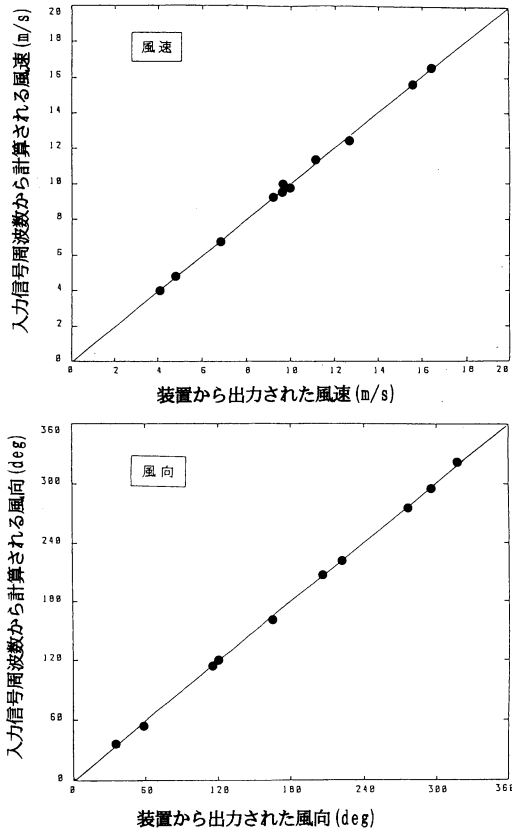
使用したドップラーソーダは、一般に市販されている国産のモノスタティック型ソーダであり、改造はしていない。この装置の開発については、1986年8月号の本誌で詳細に述べられている(伊藤ほか, 1986)。ドップラーソーダのアンテナの設置状況を写真1に、また、ドップラーソーダの仕様と今回の観測で採用した動作条件を第1表に示す。ドップラーソーダを定格出力の900wで作動させると、最高 1,000 m 程度までの風を測ることが可能であるが、今回の観測では高度 100 m を目標としたため出力を絞り 150w とした。このため送信音の大きさも低減され、送信音は設置場所から 300 m 程度離れるとほとんど聞こえなくなり、500 ~ 600 m ほど離れた敷地境界では全く聞こえなかった。

1年間を通した連続観測においても、発電所周辺からドップラーソーダの動作音に対する苦情等はなかった。

また、観測に先立ちドップラーソーダの動作確認として、既知の周波数の音波信号を使用した校正を行った結果、第3図に示すように実測値と計算値は良く一致し、ドップラーソーダの演算装置は正常に作動していることが確認された。

4. 観測結果

4.1 観測データの欠測



第3図 既知の音波周波数信号によるドップラーソーダの校正結果。

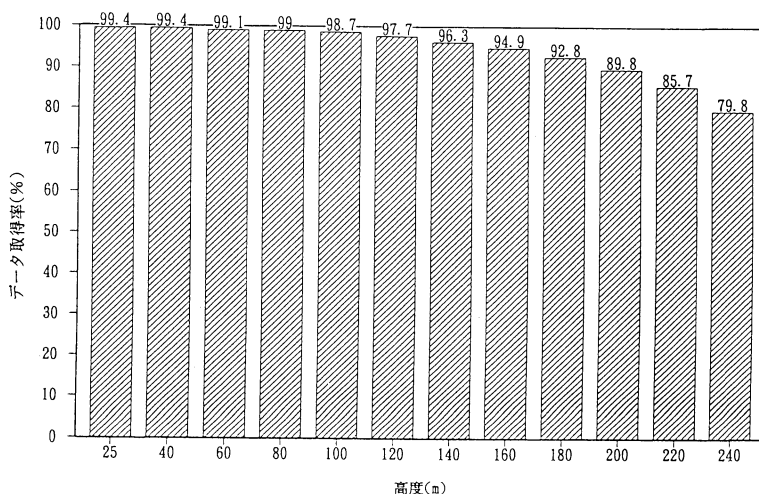
既知の音波周波数信号をアンテナに入力した時、装置から出力される風向、風速と計算による風向、風速の比較を示す。

4.1.1 欠測率

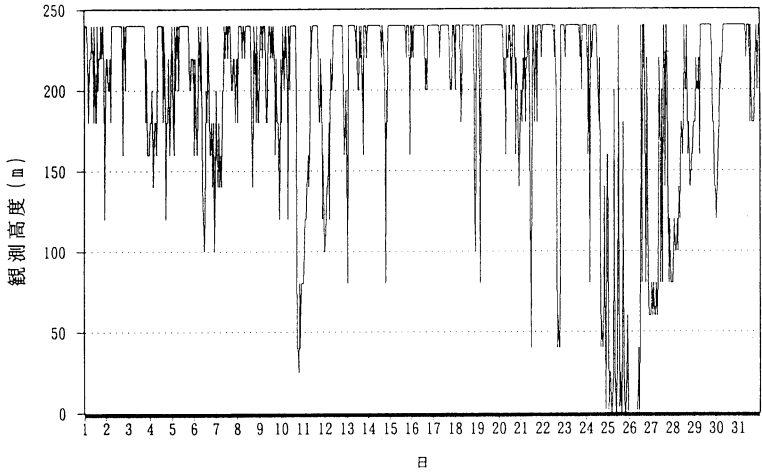
ドップラーソーダの観測高度を、目標とする地上高100 mを含む25 mから240 mに設定した。ドップラーソーダの年間の稼働時間8308時間のうち、高度160 mの風向、風速は約95%、240 mの風向、風速は約80%得られた(第4図)。なお、目標とした高度100 mの場合にはデータの取得率は98.7%であった。すなわち年間の欠測率は1.3%となり、「気象指針」に定められている欠測率の規準値である10%を大幅に下回った。また、「気象指針」で30%以下と定められている、連続した30日間における欠測率の年間の最大値は10.4%であり、これも規準値を下回った。なお、高度100 mの欠測は第5図に示すように冬季1月の下旬に集中していることが判明した。

4.1.2 降雪時の欠測状況とその要因

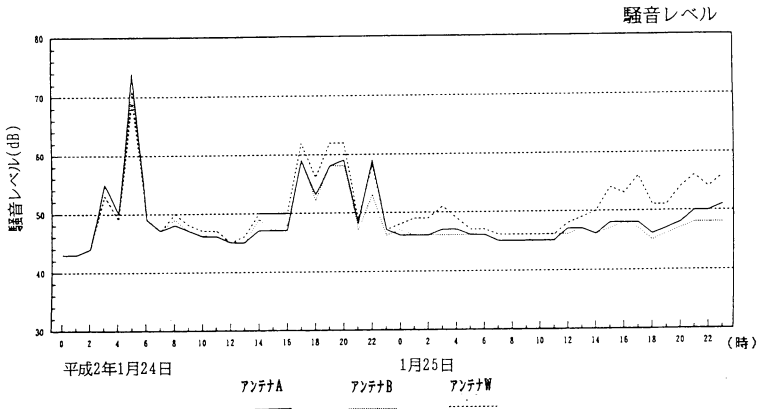
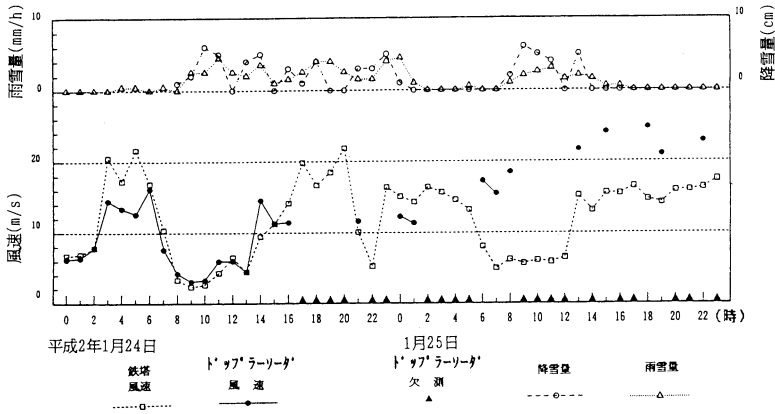
欠測が多く生じた1月24日～1月25日は第6図に示すように強風を伴い多くの積雪があった。最大の降雪量は毎時6 cm(1月24日10時、1月25日9時)であり、1月24日20時に気象観測鉄塔B点の10分間平均風速は21.8 m/sを記録した。降雪は1月25日12時まで続いた。1月25日に撮影した写真2から判るように、音波アンテナの防音壁内面の発泡ウレタン、パラボラ面及びスピーカホーン開口部分にかなりの着雪が認められた。このような強風下では、観測場所周辺の騒音レベルが上昇すると考えられる。ドップラーソーダは3台のアンテナによって騒音レベルを記録しており、この騒音レベルの観測結果を第6図の下段に示した。通常、騒音レベルはアンテナ3台が近接して



第4図 年間の観測高度別データ取得率



第5図 最高観測高度の時系列変化 (平成2年1月).



第6図 降雪時 (平成2年1月24日, 25日) の気象条件および騒音レベル.

設置されていることから3台のアンテナによる値はほぼ同じとなる。1月24日の5時前後は降水量の記録から雪が降り始めた時間帯であり、まだ積雪はなく、強風が原因とみられる騒音により騒音レベルが70 dBを越えており、3台のアンテナによる騒音レベルはほぼ同じ値を示している。これに対して、積雪量が増加したと推察される1月25日から26日にかけては強風にも係わらずA、Bのアンテナの騒音レベルはほとんど50 dBを越えていない。この要因は、アンテナ内部への着雪によって、ホーン開口部が着雪により塞がれ、受信能力が極度に低下したためであると考えられる。なお、このような状況下では送信能力も低下しており、1月24日～1月27日には装置は正常に作動していない

かったものと考えられ、気象観測鉄塔との比較データから削除した。本観測で使用したドップラーソーダには、パラボラ面に付着した雪を溶かすためのヒータ(300W/1台)は取り付けられているが、防音壁内壁に貼り付けられた発泡ウレタンやスピーカホーンの部分にヒータは取り付けられていない。したがって今後、パラボラ面に付けられたヒータの融雪能力の増強やヒーターの装着箇所を考慮し、アンテナ内部に入った雪をすべて溶かすことにより、降雪時の欠測を遁減することが可能である。

4.1.3 その他の欠測

降雪がなくても観測高度が低下し、高度100 mの風向、風速が欠測するような場合が希にみられたがその1例を第7図に示す。観測高度の低下や風向、風速の欠測は、①強風時、②降雨時そして③強風でかつ降雨がある場合に多く生じており、観測高度が低下する場合には騒音レベルの上昇、S/N比の低下がみられた。

ドップラーソーダの欠測は、観測時間10分間内に、(5)式に示した受信信号のS/N比が10dB以上のデータ数が20%未満の場合に生じる。欠測や観測高度の低下を防ぐ実現可能な手段としては、S/N比を向上させることが有力な対策となる。S/N比を向上させるためには、前述したレーダ方程式の左辺、受信パワーを増大させる必要があるが、これは同方程式の右辺の送信パワーの上昇、パルス幅の拡大そしてアンテナ有効面積の拡大等によって可能である。たとえば送信パワー

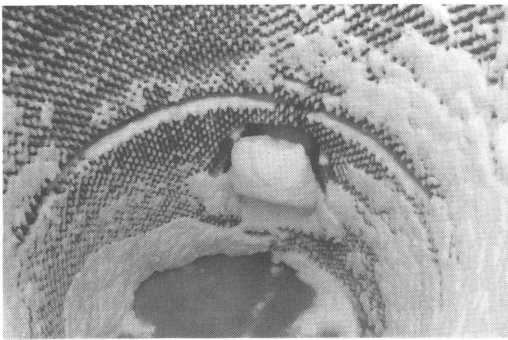
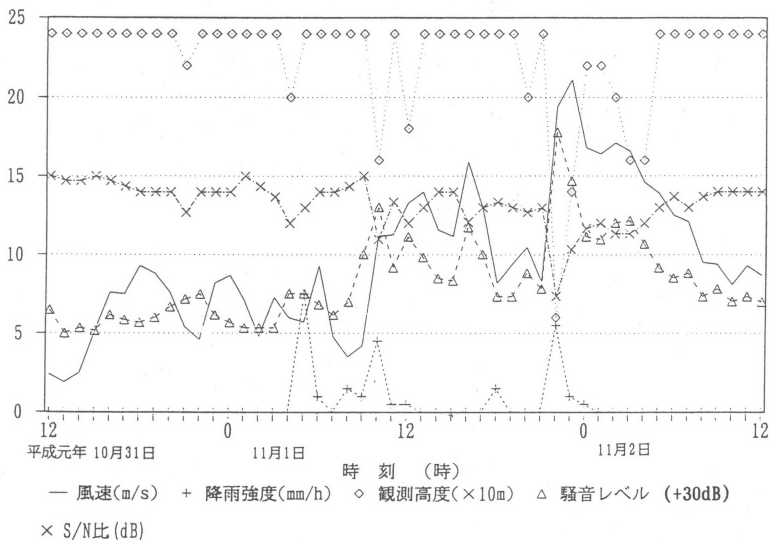
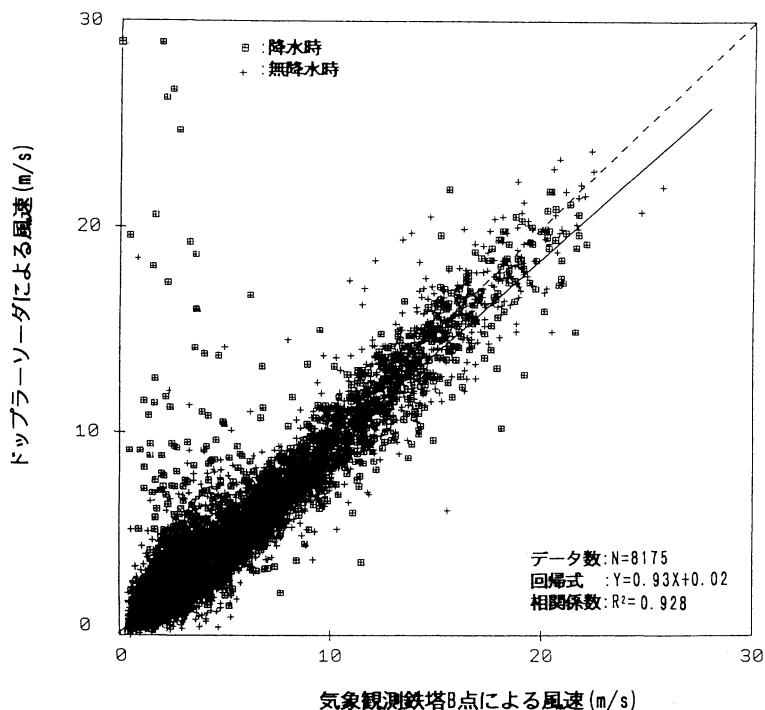


写真2 アンテナ内部の着雪状況 (平成2年1月アンテナW)。



第7図 降雪がない場合に観測高度が低下する状況 (平成元年10月31日から11月2日)。



第8図 ドップラーソーダと気象観測鉄塔による風速の比較 (標高 160 m).
 ドップラーソーダの風速は鉛直風速を考慮しないで計算した。地上
 高はドップラーソーダが 100 m, 気象観測鉄塔B点が 78 m.

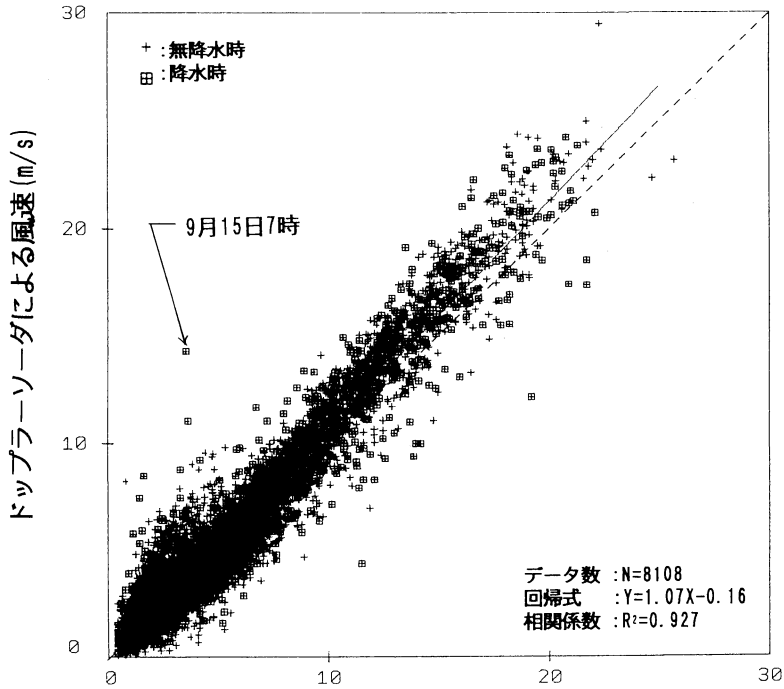
を 900W, アンテナの直径を2倍にすると理論的には受信パワーを 14dB 上昇させることができる。受信パワーの 14dB の上昇は、レーダ方程式中の L の定数 a を 0.003 (大気による音の吸収により 100 m あたり 2.5dB 減衰するとした) とすると、同一の大気状態であれば観測高度はほぼ 100 m まで延びることになる。以上から、高度 25 m の年間の欠測率が 0.2% 程度であることを考慮すると、アンテナ面積の拡大、送信出力の増大によって年間を通して高度 100 m の欠測は更に減少する。また、強風の場合には、アンテナの風切り音や、周辺樹木のざわめきによっても S/N 比が低下するため、設置に際しては、アンテナに直接強風が当たりにくい場所や周辺に高い樹木の無い場所を選択することも、観測高度を低下させないためには効果がある。

4.2 観測値の妥当性

ドップラーソーダによる風向、風速の計算式 (8), (9) 式において、鉛直風速 $\bar{V}_z$ は微弱であるとし計算に使用しない場合もある。そこで、今回の観測結果についてもまず鉛直風速を考慮しないで風速を求め、気象観

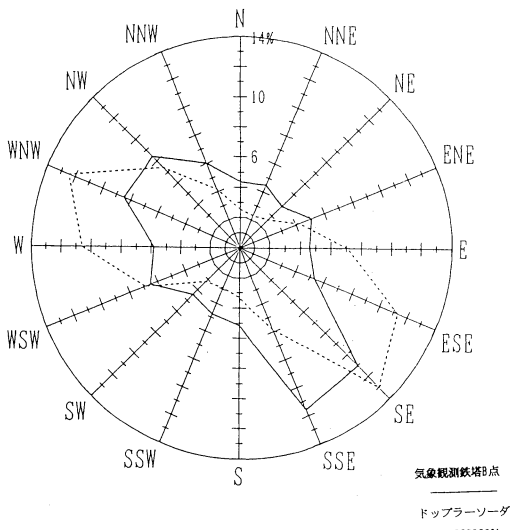
測鉄塔B点による風速と比較した。その結果を第8図に示すが、主に低風速時において鉄塔による風速に比べドップラーソーダによる風速が極めて大きなデータが一部みられた。図にも示されるように鉄塔とドップラーソーダの風速の差が大きくなる場合は降水時に多く、降雨強度も比較的強い場合が多かった。さらに、ドップラーソーダによって 5m/s を越えるような鉛直速度が観測されていることが判った。このことから、ここでみられた異常値の要因として、傾斜した2台の水平風速を観測するアンテナによっても降雨の落下速度を含んだ速度成分が観測され、これが水平方向の風速成分として計算されたためであると推察した。

次に、風向、風速の計算に鉛直風速を考慮した場合の風速の比較を第9図に、また風向については、両者による風配図を重ねて第10図に示す。風速の比較結果にみられるように鉛直速度を考慮しない場合に比べ大きなばらつきが減少しており、鉛直速度を考慮した風向、風速の演算を行うことにより大部分の異常値を除くことが可能であった。しかし、数は少ないもののドップラーソーダによる風速が気象観測鉄塔B点に比べて



気象観測鉄塔B点による風速 (m/s)

第9図 ドップラーソーダと気象観測鉄塔による風速の比較 (標高 160 m).
 ドップラーソーダの風速は鉛直風速を考慮して計算した. 地上高は
 ドップラーソーダが 100 m, 気象観測鉄塔B点が 78 m.



第10図 ドップラーソーダと気象観測鉄塔B点による風向の比較 (標高 160 m). 地上高は
 ドップラーソーダが 100 m, 気象観測鉄塔B点が 78 m.

大きく観測される場合がみられる. また第10図の風向の比較結果からは1方位の差異もみられ, ここでは, ドップラーソーダと気象観測鉄塔B点との風速の差が大きくなる場合と風向のずれについて, その原因・対策等について考察した.

4.2.1 風速異常値の検討

第9図に示した地上高 100 m の風速の比較結果にみられるばらつきには二通りある. 一つは風向別にみられる両地点の風特性によるもので, 風向別に両者を比較すると, それぞれの風向では第2表の風向別相関係数の値にみられるように良い相関が得られている. また, 第11図に風向別回帰直線の傾きの最大, 最小を示すが, 観測点はこの直線の回りおよびこの範囲内にばらつくため, 結果として第8図の比較図に示したようなばらつきとして示されたものである. もう一つのばらつきは第9図に示した9月15日7時のデータのように気象観測鉄塔B点による風速との差が大きい観測値である.

年間を通じて、風向別の回帰直線からの差が大きい(5m/s 以上) 場合を抜き出すと 7 時間(毎正時 10 分前の平均値)の観測値がこれに該当した(第 3 表)。観測総数が 8000 時間を越える内の 7 時間と数は極めて少ないが、ここではこれらの出現状況や対策などについて検討した。

第 3 表の結果からも判るが、異常と思われる観測値が出現する場合には降雨を伴う場合が多く、しかも 1 時間当りの降雨量が 6 mm や 7.5 mm と多量の雨が観測されている例もみられる。また、異常値を観測した

時間とは一致していないが、その前後の時間に降雨が観測されている例もみられ、降雨観測場所とドップラーソーダの設置場所が約 2.5 km 離れていることを考慮すると、異常値の出現と降雨の関係は強いと思われる。9 月 15 日 7 時のドップラーソーダによる風速は気象観測鉄塔 B 点の風速に比べ 10m/s 以上も高くなっており、この時間帯には強い降雨があった。また、騒音レベルも 60dB~70dB に達していることが判った。既に述べたように、風速の演算に鉛直風速を考慮することによって、降雨による異常値をほとんど排除することが可能であったが、この場合には排除できなかった例である。そこで、異常値が観測された時の音波受信信号のスペクトルを調べた。第 12 図に 9 月 15 日の 7 時およびその前後のスペクトルを示した。なお、ここで示したスペクトルは、音波送信毎の受信スペク

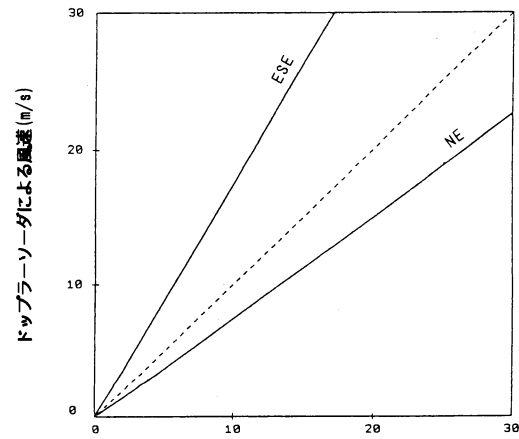
第 2 表 風向別回帰式

風向	A	B	R ²	N
NNE	0.069	0.786	0.895	366
NE	0.045	0.753	0.856	316
ENE	0.269	0.812	0.810	412
E	0.788	1.059	0.663	371
ESE	0.266	1.753	0.768	432
SE	0.473	1.009	0.882	893
SSE	-0.242	1.015	0.937	938
S	-0.065	0.912	0.888	418
SSW	-0.007	0.760	0.911	387
SW	0.056	0.780	0.903	360
WSW	-0.126	1.007	0.947	528
W	0.339	1.071	0.967	472
WNW	0.134	1.127	0.967	688
NW	-0.160	1.127	0.975	684
NNW	-0.067	1.081	0.970	489
N	-0.100	0.990	0.948	354
合計	-0.161	1.069	0.927	8,108

回帰式: $Y = A + BX$

相関係数: R^2

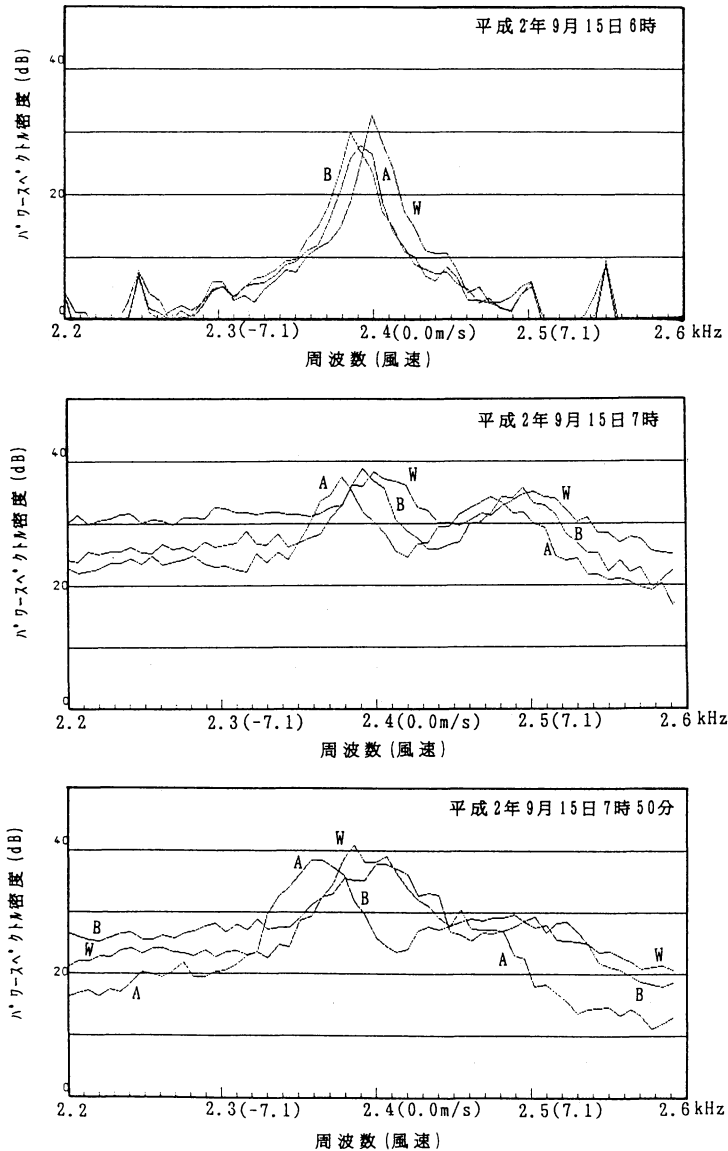
(注) 風向は気象観測鉄塔 B 点の観測値による



第 11 図 ドップラーソーダおよび気象観測鉄塔 B 点による風速の比較における風向別回帰直線の傾きの最大値および最小値。

第 3 表 風向別回帰直線からの差が 5 m/s 以上の結果。

観測時刻	風速差 (m/s)	風速 (m/s)			風 向		雨雪量 (mm/h)
		鉄塔	ドップラーソーダ		鉄塔	ドップラー ソーダ	
			水平風速	鉛直風速			
平成元年11月19日15時	-5.7	24.7	22.3	-0.4	WNW	WNW	0.0
平成元年11月19日21時	-7.3	21.7	17.3	0.6	WNW	WNW	0.5
平成元年12月31日 8 時	-6.2	21.7	18.4	0.6	WNW	WNW	1.0
平成 2 年 6 月21日11時	5.2	1.7	8.4	-3.2	ESE	E	7.5
平成 2 年 8 月17日 9 時	7.3	0.9	8.2	-2.7	NNW	WNW	0.0
平成 2 年 9 月15日 7 時	10.7	3.6	14.2	0.0	WSW	WSW	6.0
平成 2 年10月 4 日22時	8.1	3.7	11.0	-1.3	SW	SW	3.5

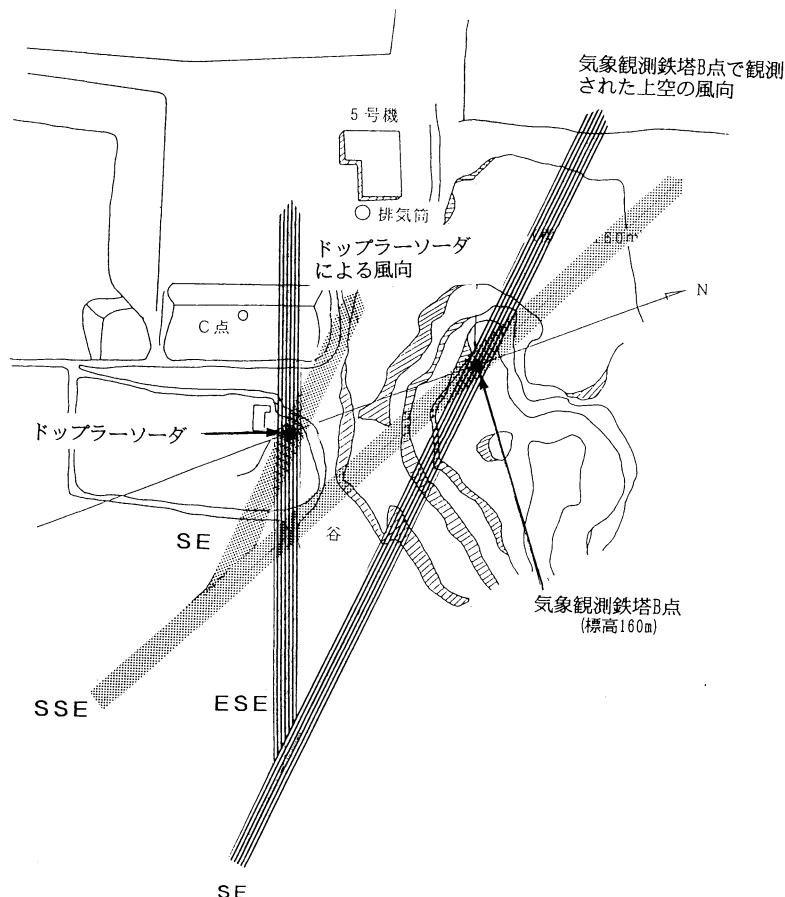


第12図 異常値が出力された時刻およびその前後のパワースペクトル。

異常値が出力された9月15日7時のスペクトルは、ピークが2つあり、前後のスペクトルの形状から右側のピークは降雨の落下速度によるものと推定できる。

トルを示したのではなく10分間の平均値であるため、個々の最大ピークの位置とは必ずしも一致するものではないが観測状況は推察できる。これから異常値の出現した7時のスペクトルは、6時にみられるような正常なスペクトルに比べ、ノイズレベルの上昇とスペクトルのピークがA、B、Wの各アンテナ成分とも2山みられる。前後の時間の観測結果からは、図中のほぼ中央部のスペクトルのピークが風速に対応したも

のであり、風速の演算も中央部のスペクトルに対して行われるべきであり、その場合2m/s程度の風速が出力されるはずである。ところが9月15日の7時には、Aのアンテナに対するスペクトル風速が9.7m/s、同様にBが10.5m/sであり、音波送信毎のスペクトルに対応した風速演算が右側のスペクトルピーク付近を対象に計算されていることが判った。ただし、Wの鉛直風速については中央部のスペクトルピークから計算され



第13図 地形の影響により予想される気流の変化.

た 0.04m/s が出力されていた。これらの風速ベクトルから式(8), (9), (10)により計算すると前述したように気象観測鉄塔B点に比べ 10m/s 以上も高い風速値が得られた。ここで、鉛直風速も右側のスペクトルピークから計算される値として仮に 8.0m/s を計算に使うと計算される風速は 3.6m/s となる。このように、鉛直速度も右側のスペクトルを用いると降雨による風速異常値の出現をおさえる効果があるが、本来、ここで示した例では常に中央部のスペクトルピークを対象に風速の演算を行うべきである。実際には、風速演算ソフトウェアの改良等によりスペクトル選択機能をもたせ、2山型のスペクトルが出現した場合においても、正確な風速値に対応したスペクトルを選択させることにより異常値の出現を抑えることが可能である。第3表に異常値が出現した7日間の観測結果を示すが、ほとんど2山型のスペクトルが観測された。降雨時のノ

イズレベルの上昇は、降雨がアンテナパラボラ面をたたく音によるものであり、またピークが2山出現するのは、風速と降雨の落下速度の双方のスペクトルによるものである。

以上のように降雨と異常値との出現について述べたが、柏崎の観測期間中の降雨時間は1,200時間を越えており、このうち異常値として抜き出したデータは7時間にとどまっていることから、ほとんどの降雨は観測に影響を与えないこともここで明らかにされたといえる。

4.2.2 ドップラーソーダと気象観測鉄塔B点による風向のずれに関する検討

ドップラーソーダおよび気象観測鉄塔B点の風向の比較から予想される風の流線を地形上に作図すると風向頻度がずれる方位において、第13図のようになる。本図からは、ほぼ山の頂上付近(標高 82m)より、さ

らに上空の高所（標高 160 m）で観測された B 点の風向に対して、山の中腹近く（標高 60 m）のドップラーソーダ設置点上空の風向が山地の影響によって 1 方位ずれて観測されることが推察される。

その他の要因としては、観測場所が約 500 m 離れていることやドップラーソーダの設置場所付近に存在する、谷、発電所建屋など複雑な地形の影響が無視できない。

5. あとがき

原子力発電所構内において 1 年間ドップラーソーダの実証試験を行い、観測データを解析・評価した結果、本装置は原子力発電所の上層風観測装置として十分な実用性を有していることが確かめられた。

近年、内外で上層風の観測にドップラーソーダが使われるようになってきている。これは、鉄塔建設に比べ観測コストが低廉なこと、ゾンデのように航空機の飛行への影響がないこと、人手が要らない上に連続観測が可能なこと、また観測データは信頼できるなどの多くの特徴を有しているためである。特に、欧米での普及が著しく、フランスでは既に多くの原子力発電所において、ドップラーソーダが鉄塔に替わる装置として設置される例が増えている (Gland, 1982)。また、アメリカでは多数の原子力発電所において、緊急時の大気拡散評価のための上空の風向、風速がドップラーソーダによって観測されている (Thuillier, 1987)。

本研究では、わが国の気象指針に照らし、ドップラーソーダの欠測率は十分に低いことを明らかにした。また、風向、風速の観測値の妥当性を確かめるために、気象観測鉄塔による観測値と比較した。ドップラーソーダと気象観測鉄塔の観測点は約 500 m 離れていることやドップラーソーダの観測値は空間的、時間的な平均値であるのに対して気象観測鉄塔による観測値は小さな空間の時間平均値を観測しており、両者の観測値は完全に一致するものではないが、通年の比較結果から良い相関関係が得られた。ドップラーソーダはこのような測器の特性を把握して使えば、十分に実用的な測器であるといえる。しかし、わずかな数ではあ

るが観測データが欠測する場合あるいは異常値が観測される場合もみられたが、これらはソフトウェア、ハードウェアの改良等によって充分対応できるもので、今後装置の普及とともに一層の性能向上が進められ改善されていくものと期待される。

謝 辞

本研究は、電力 10 社および電源開発による共通研究として進められました。本研究を実施するにあたり、多大な御協力を頂きました関係各位に厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 赤井幸夫, 朝倉一雄, 小林博和, 西宮 昌, 1986: 音波による下層大気の観測手法, 電力中央研究所総合報告, 225.
- Beran, D.W., C.G. Little and B.C. Willmarth, 1971: Acoustic Doppler measurements of vertical velocities in the atmosphere, *Nature*, 230, 160-162.
- 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.
- Gland, H., 1982: Acoustic sounding data as meteorological input in dispersion estimates, 13th International Technical Meeting on Air Pollution Modeling and its Application.
- 発電用原子炉施設の安全解析に関する気象指針, 1982: 原子力安全委員会.
- 伊藤芳樹, 渡辺好弘, 水越利之, 花房龍男, 吉川友章, 内藤恵吉, 小平信彦, 1986: ドップラーソーダの開発と大気境界層観測への応用, 天気, 33, 8, 19-29.
- Kaimal, J.C., J.E. Gaynor, P.L. Finkelstein, M.E. Graves and T.J. Lockhart, 1984: An evaluation of wind measurements by four Doppler sodars, NOAA Report, PB-85-115301.
- McAllister, L.G., 1968: Acoustic sounding of the lower troposphere, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 30, 1439-1440.
- Thuillier, R.H., 1987: Real-time analysis of local wind patterns for application to nuclear-emergency Response, *Bull. Amer. Met. Soc.*, 68, 9, 1111-1115.