

開口合成ドップラーソーダの米国ボルダーにおける 国際比較観測について

光田 寧・堀口 光章・竹久 正人

THE PERFORMANCE TEST OF A FIVE BEAM PHASED ARRAY DOPPLER SODAR IN ISIE(INTERNATIONAL SODAR INTERCOMPARISON EXPERIMENTS)

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

Synopsis

The present study group has developed a new wind profiling sodar with a phased array antenna. This system is superior to usual ones with parabola reflectors in its portability. The Doppler wind measurement based on five-beam system was used to get free from acoustic refraction effect and contamination of vertical component on the horizontal wind estimation. Measurement of wind speeds, wind directions and the vertical component of turbulence from the sodar are compared with similar measurements from in situ sensors on a 300 m instrumented tower. Results indicate that the sodar measured wind direction accurately and reasonably high precision. The sodar tended to underestimate the wind speed under the high wind condition. The origin of it might be the acoustic reflection from ground objects. The value of the vertical component of turbulence indicates the fairly good agreement between the sodar measurements and in situ sensor measurements especially under the convective conditions.

1. はじめに

ソーダ (Sound Detection and Ranging) は、大気中の乱れによる音波の散乱を利用し、大気境界層内の大気の構造や風速の鉛直分布を観測するための装置である。従来のソーダでは、送受信兼用のホーンとパラボラ反射板を組み合わせる形式の音響アンテナが一般に用いられてきたが、非常に大きなアンテナを複数個用いる必要があり、操作上非常に不便であった。著者等は、開口合成方式による Sodar の開発を昭和59年度より行ってきたが¹⁾²⁾ 今年度になってフィルターの帯域幅をせばめ、ホーンの残響を抑える措置をほどこすという2点を改良し、一応完成された装置として動作させることができるようになった³⁾。そこで1988年に行われた米国での国際比較観測に参加した。

開口合成方式というのは、平面上に配置した複数のホーンからの音波の干渉を用いて音響ビームを形成するアンテナ方式のことであり、この方式を採用することによりホーン1個当たりのパワーが小さくてもホーンの数が多いため全体としてのパワーを大きくすることができ、そのため最大探査距離を伸すことができるようになる。また従来風速の3成分を測定するためにはアンテナは3つ必要であったが、ホーン毎の送受信信号に位相差を与えることにより機械的手段によらず電氣的にビームを任意の方向に向ける事ができるようになり、アンテナ1つで風速の3成分の測定が可能になり、装置の取り扱いが安易になった。

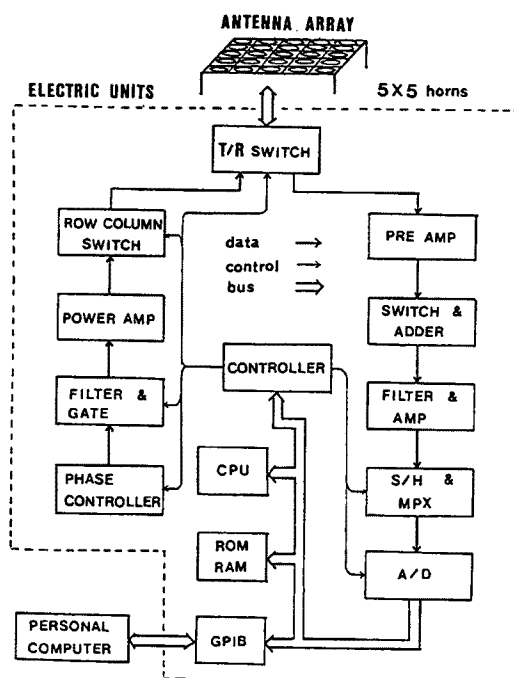


Fig. 1. Block diagram of the wind profiling sodar.

今回完成し、比較観測に持参した開口合成ドップラーソーダ³⁾の基本構成は Fig. 1 に示すようなもので、その主な性能諸元は Table 1 に示した。従来のソーダは、3 ビーム法、即ち鉛直風を測定するための鉛直上向きのビーム、及び水平風速の2成分を測定するための天頂角をもつ2つのビームを持つ型のものであったが、この装置では、開口合成方式の特徴であるアンテナを増設することなくビームの数を増やすことができるという点を利用して5ビーム法を用いている。5ビーム法というのは、鉛直上向きのビーム1つと、天頂角をもつビーム4つを使用する方法である。5ビームを用いる利点は、(1)水平風速を測定するための4つのビームを持つため、測定値に自己矛盾がないかどうかのチェックができること、(2)水平風の発散を計算できること、(3)水平方向の風速の統計量の様性を仮定すれば運動量フラックスを求めることができること⁴⁾などである。

2. 国際比較観測の概要

今回の比較観測の正式名称は、ISIE (International Sodar Intercomparison Experiments) といい、米国コロラド州ボルダーのBAO (Boulder Atmospheric Observatory)⁵⁾で行われた。Fig. 2 はBAO周辺の地形図である。BAOは、およそ西経105°北緯40°海拔高度1600 mのところにあり、西に30 km程のところにロッキー山脈が横たわっている。BAOには高さ300 mの気象観測塔があり、10 m・22 m・50 m・100 m・150 m・200 m・250 m・300 mの各高度に超音波風速温度計やプロペラ式風向風速計が設置されている他、気温、気圧、湿度などのセンサーも各高度毎に備わっている。今回の比較観測は、これらの観測塔に設置されている測器によって測定される風向、風速の平均値及び統計量と、ソーダによって測定されるそれらの諸量とがどの程度合致するのかを調べようとするものであった。特に市販機については、環境局の大気拡散の調査用としての仕様をどのように決定するかを調べる目的

Table 1. System parameter of the wind profiling sodar

Operating frequency	1400 Hz
Number of horns	5×5
Maximum output power	1500 Watts (electric)
Antenna aperture	0.64 m ²
Zeith angle of steering beams: θ	23°
Beam width	17°
Pulse length	100, 350 msec
Pulse repetition period	4, 8 sec
Range resolution	30 m
Doppler frequency estimation	FFT/ Simple Homodyne Com- plex Covariance

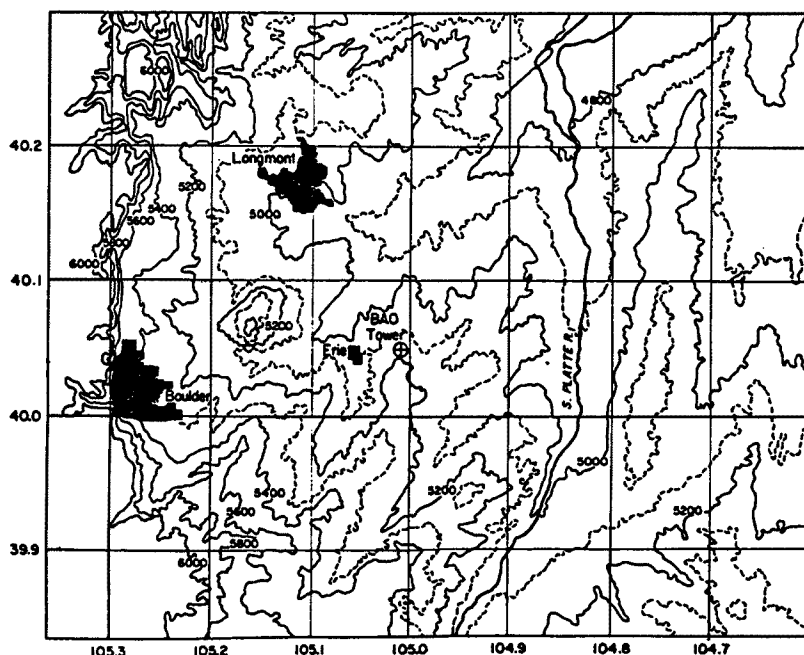


Fig. 2. Contour map of the area around the Boulder Atmospheric Observatory. Marking around the frame are the latitude(N) and longitude(W).

もあったようである。

観測に参加したソーダは全部で6機であり、内訳は市販機が3機と、研究用又は開発中のものが3機であった。それぞれを紹介すると市販機は、XONTECH, AERO VIRONMENT および REMTECH のもので、XONTECH はビーム数3の開口合成方式、AERO VIRONMENT と REMTECH はトリプルモノスタティック方式であった。研究用又は開発中のものは、著者らの開発したソーダと、REMTECH のバイスタティック方式のものと、トリプルモノスタティック方式のものである。送信周波数はいずれも 1400 Hz-1600 Hz であった。ここでモノスタティック方式というのは、送信用と受信用に同一のアンテナを用いる方式であり、トリプルというのは3成分を測定するため3つのアンテナを用いることを意味している。これに対し、バイスタティック方式とは、送信用のアンテナと受信用のアンテナの2つを用いその間に基線を 100 m 程とする方式である。トリプルモノスタティック方式の場合、上空へいく程各ビームの間隔が広がり、水平方向に風速の場が一様であるという仮定をしないと風速の3成分が正しく求められないが、装置のセッティングに広い場所を必要としないという利点がある。Fig. 3 に各ソーダの配置を示す。

観測期間は1988年8月28日から9月24日までであったが、最初の1週間はセッティングに費やされた。観測期間の気象条件は変化が激しく、明け方 0°C 近くまで冷え込む日もあり、また日中 35°C 以上になる日もあった。時には激しい雨をとまって 15 m/s 程度の強風が吹くこともあり、一方おだやかな快晴が続くこともあった。

比較する項目としては、風向、風速の20分間の平均値と標準偏差が用いられた。毎朝9時に、それ以前24時間のデータを比較観測の主催者である NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) に渡し、それとひきかえに、その間の観測塔で得られたデータのハードコピーを見ることが許された。特に市販機は、メンテナンス以外には参加者側は装置の調整、保守を行ってはいけないことになっていた。これに

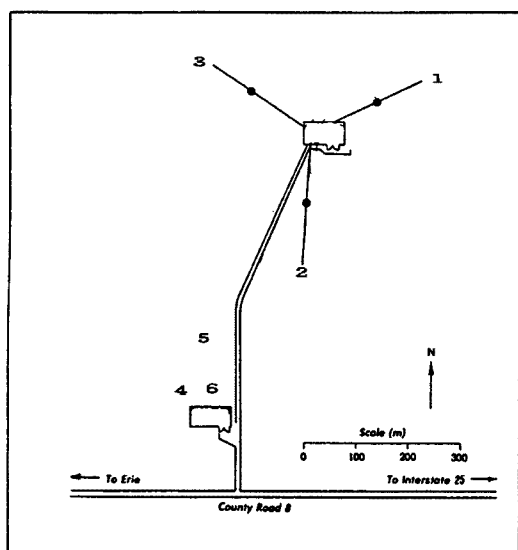


Fig. 3. The sketch of BAO. The numbers indicate the position of the sodars. 1: XONTECH 2: AERO VIRONMENT 3,4: REMTECH(triple-monostatic) 5: REMTECH(bistatic) 6: Disaster Prevention Research Institute+Kaijo Denki.

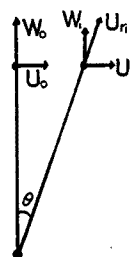


Fig. 4. Geometry of the antenna beams for two-beam method and for three-beam method.

対し、開発中のものはパラメータやソフトウェアの変更などが許されていた。各ソーダとも送信周波数が1400 Hz-1600 Hz と狭い範囲に集中しているが、特に相互に妨害し合うということとはなかった。

著者らが開発したソーダは、今回の比較観測では開発中の装置として参加したが、比較観測の期間中一度も修理、調整の必要はなかった。最大探査高度は観測塔の高さと同じの300 mとし、サンプリングは30 m・60 m・90 m・120 m・150 m・180 m・240 m・300 mの8高度として観測を行った。

3. 比較観測の結果

実際の比較観測の期間は3週間程であったが、1988年3月現在で観測塔のデータのうち入手しているものは9月10日から9月13日の4日分だけなので、今回の報告書はこの4日間のデータに基づいて書かれたものである。なお平均化時間は全データとも20分間である。

3.1 平均風速の比較

従来のドップラーレーダーやドップラーソーダでは、風速を求めるのに主に2通りの方法がある。以下にそれらについて簡単に説明する。直接測定されるアンテナの視線方向の風速 (U_n) は水平風速 (U_i) と鉛直風速 (W_i) を用いて次のように表わせる。(Fig. 4)

$$U_n = U_i \sin \theta + W_i \cos \theta \quad (\theta: \text{天頂角}) \quad (1)$$

ここで水平風速は鉛直風速よりも充分に大きいと仮定して

$W_i = 0$ とすると、

$$U_n = U_i \sin \theta \quad (2)$$

となる。この場合、もし鉛直風速が0.5 m/s程度吹いているとすれば、天頂角が23degの場合水平風に1.2 m/sの誤差を生じることになる。この方法を用いれば水平風速の2成分を求めるのに2つのビームがあればよ

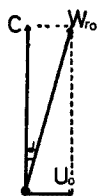


Fig. 5. Vertical pointing beam path (W_{r0}) refracted by the horizontal wind (U_0). C is the sound speed.

いので、この方法を「2ビーム法」と呼ぶ。

またさらに鉛直なビームで鉛直風速を測定し、

(1)で $W_0 = W_1$ とすると、

$$U_{r1} = U_1 \sin \theta + W_0 \cos \theta \quad (3)$$

となる。この場合は、高度 300 m では U_1 を測定している点と W_0 と測定している点は 127 m 離れていることになり、それだけの離れた点で鉛直風速が同一であると仮定していることになる。この方法によると、3つのビームから水平風速の2成分を見積もることになるので「3ビーム法」と呼ぶ。

さらに鉛直上向きのビームが水平風によって向きを変えられる効果 ((6)式) を考えると、鉛直上向きのビームの視線速度 W_{r0} は (Fig. 4 Fig. 5)

$$W_{r0} = W_0 \cos \alpha + U_0 \sin \alpha \quad (4)$$

となり、ここで $U_0 = U_1$ と仮定すると

$$W_{r0} = W_0 \cos \alpha + U_1 \sin \alpha \quad (5)$$

$$\alpha = \sin^{-1}(U_1/C) \quad (C: \text{音速}) \quad (6)$$

となる。(5)式中の W_0 を(3)式に代入して水平風速を算出する。この場合、水平風速が 10 m/s のときで 0.7 m/s の誤差となる。この方法を「鉛直風補正3ビーム法」と呼ぶ。

今回持参したソーダではこれらの方法の全ての方法で計算して見ることが可能で、Fig. 6・Fig. 7・Fig. 8にそれぞれ2ビーム法・3ビーム法・鉛直風補正3ビーム法で求めた西風成分と、観測塔に設置された超音

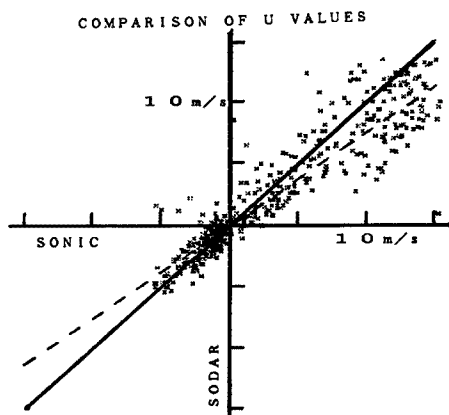


Fig. 6. Scatter diagram of sonic anemometer measured U -components of wind velocities versus sodar measured U -components of wind velocities using two-beam method. Dashed line is regression line.

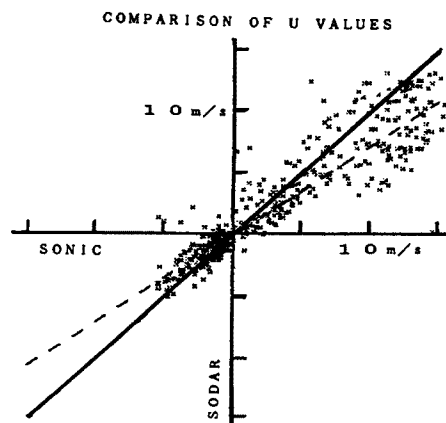


Fig. 7. Same as in Fig. 6., but using three-beam method.

Table 2. Sodar wind speed estimated by three methods compared with reference wind speed

	Bias(m/s)	Com.(m/s)	Stv.(m/s)	Cor.
2-beam method	-0.76	2.74	2.64	0.89
3-beam method	-0.72	2.55	2.45	0.91
Vertical velocity corrected 3-beam method	-0.94	2.68	2.51	0.91

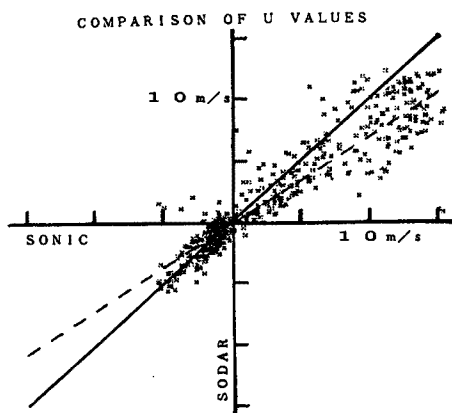


Fig. 8. Same as in Fig. 7., but using vertical velocity corrected three-beam method.

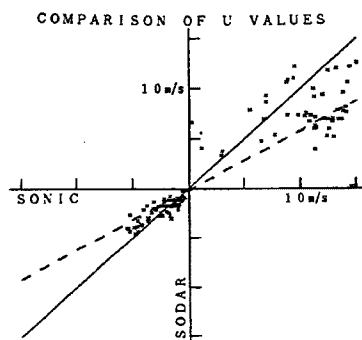


Fig. 9. Same as in Fig. 6., but for the cases that the absolute values of vertical velocities surpass 30 cm/s.

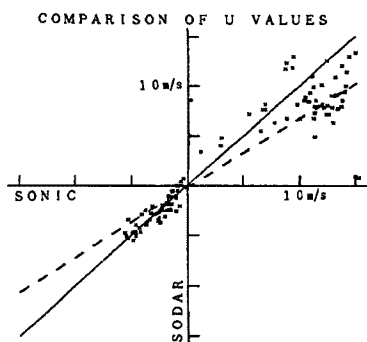


Fig. 10. Same as in Fig. 7., but for the cases that the absolute values of vertical velocities surpass 30 cm/s.

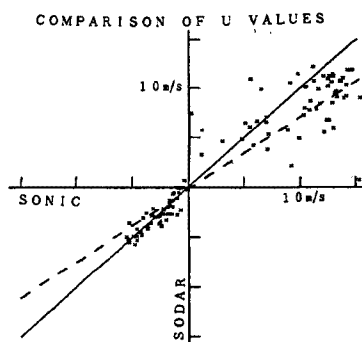


Fig. 11. Same as in Fig. 8., but for the cases that the absolute values of vertical velocities surpass 30 cm/s.

波風速計で測定された西風成分の相関図を示した。また Table. 2 にそれぞれの方法で比較した場合の相関係数, Bias, Comparability, Standard deviation を示した。ここで Bias(B), Comparability(C), Standard deviation(S)は次のような式で表される⁶⁾⁷⁾。

Table 3. Same as in Table 2., but for the cases that the absolute values of vertical velocities surpass 30 cm/s

	Bias(m/s)	Com.(m/s)	Stv.(m/s)	Cor.
2-beam method	-1.78	4.49	4.12	0.83
3-beam method	-1.42	3.85	3.58	0.87
Vertical velocity corrected 3-beam method	-1.47	3.69	3.38	0.88

$$B = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - S_i) \quad (7)$$

$$C = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - S_i)^2 \right]^{1/2} \quad (8)$$

$$S = (C^2 - B^2)^{1/2} \quad (9)$$

ここで N は比較したサンプル数, Y_i はソーダの i 番目の観測値, S_i は塔に設置された超音波風速計の i 番目の観測値である。

Table. 2 から Bias, Comparability, Standard deviation, 相関係数ともに, わずかではあるが 3 ビーム法が最も良いことがわかる。しかし, 3 ビーム法よりもさらに補正をほどこした鉛直風補正 3 ビーム法ではかえって悪い結果を出している。この期間の観測値の大部分は, 鉛直風が弱く (0.1 m/s 以下), 2 ビーム法で求めた風速値と 3 ビーム法で求めた風速値との間に大きな差が出なかったため相対的に誤差が大きくなったことも考えられる。そこで **Fig. 9**・**Fig. 10**・**Fig. 11** に鉛直風速が 0.3 m/s 以上の場合だけを選び出して **Fig. 6**~**Fig. 8** と同様の図を作ってみた。この場合, **Table. 3** から明らかなように鉛直風を考慮に入れて水平風速を算出する方法 (3 ビーム法, 鉛直風補正 3 ビーム法) の方が 2 ビーム法よりも明らかに超音波風速計の測定値とよく合致する。そして 3 ビーム法よりもわずかではあるが, 鉛直風補正 3 ビーム法の方がよく結果を出しており, 少なくとも鉛直風が強い場合にはこれまで述べてきたような補正が有効であることがわかる。

Fig. 12 に, 3 ビーム法によって算出した成分風速から求めた風速と超音波風速計での測定値の相関図を示

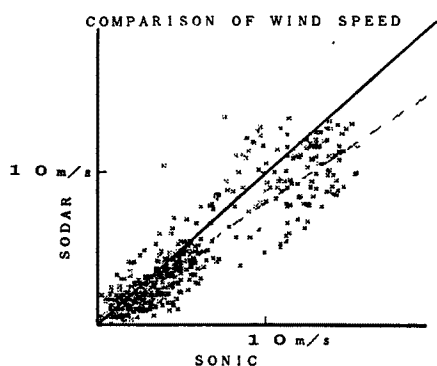


Fig. 12. Scatter diagram of sonic anemometer measured wind speeds versus sodar measured wind speeds. Dashed line is regression line.

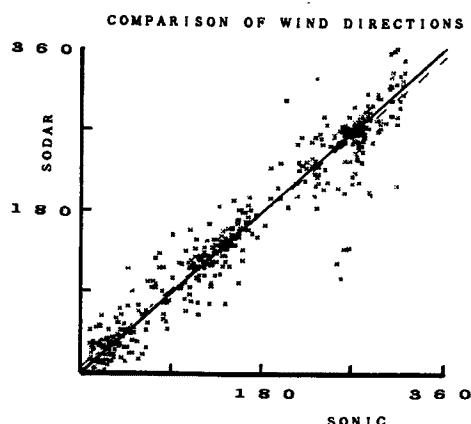


Fig. 13 Same as in Fig. 12., but for the wind directions.

す。ソーダと観測塔との距離が650 mあることを考えるとよく合っていると言える。各統計量は、Biasが-0.9 m/s, Comparabilityが2.2 m/s, Standard deviationが2.0 m/s, 相関係数が0.87となっている。Fig. 12からわかる通り、全体としてソーダは風速を平均して10%ほど小さく見積もっている。このことの原因として、地表の物体によって送信音波が反射されそれを受信してしまうこと、送信後もホーンに残響がありそれを受信波としてとらえてしまうことなどが考えられる。

3.2 強風時における平均風速の測定値の誤差について

一般に強風時には周囲雑音が大きく、また送信音波の減衰も大きいと考えられ、しかも強風時には雨や雪を伴うことが多く、ソーダのデータの信頼度及び最大探査高度が低下しがちである。特に雪片は、ソーダの送信する音波程度の周波数でもかなり強く反射するのでノイズの原因となると考えられる。

今回の報告の時点では、前述した通り観測塔のデータが4日分しか得られておらず、10 m/s以上の強風が観測されたのは9月10日の正午ごろから深夜にかけてのおよそ半日だけであった。そのときの天候は曇りで、にわか雨があった。Fig. 12からもわかる通り、ソーダの方が強風時には風速を2-3 m/s程小さく見積もっている。特に誤差の大きい時は雨がホーンに当る音や、雨滴からの音波の反射の影響を受けたものと思われる。しかし、探査高度300 mでもS/N比にして5 dB以上はあり、強風時(10-15 m/s)においても欠測はなかった。また東向きビームと西向きビーム及び北向きビームと南向きビームの視線速度の大きさの違いも0.5 m/s以内であり、どれか1つのビームだけ特に誤差が大きいということとはなかった。従って前節で述べたような点をチェックしてアンテナを改良し、ソフトウェアの方も改良すれば強風時における信頼度をも向上させることができると考えられる。

3.3 平均風向の比較

ソーダで測定した20分間の平均風向と、超音波風速計の風向の測定値との相関図をFig. 13に示す。ここで超音波風速計が観測塔の風下側にあるとき、即ち風向が320degから10degの時はデータとして使わなかった。各統計量は、Biasが1.7deg, Comparabilityが25deg, Standard deviationが24deg, 相関係数が0.97となっており、観測塔とソーダの距離(650 m)を考慮すれば風向は非常によく合っていると見てよい。

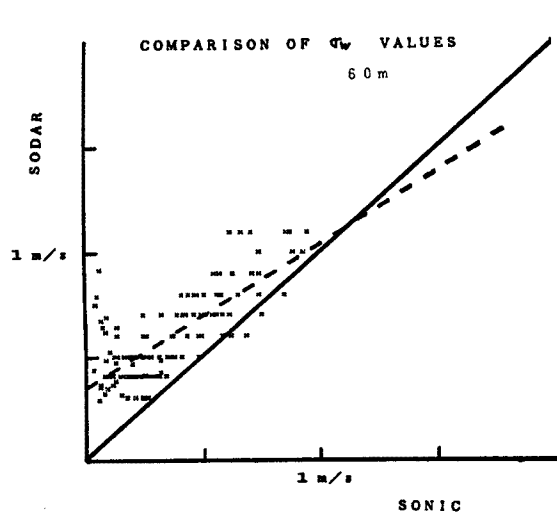


Fig. 14. Same as in Fig. 12., but for the vertical component of turbulence. Measuring height is 60 m.

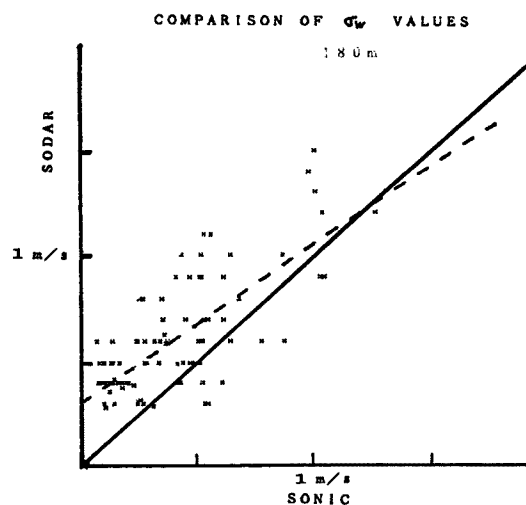


Fig. 15 Same as in Fig. 14., but the measuring height is 180 m.

Table 4. Sodar measured vertical component of turbulence compared with reference vertical component of turbulence

	Bias(m/s)	Com.(m/s)	Stv.(m/s)	Cor.
σ_w (60 m)	0.24	0.29	0.15	0.75
σ_w (180 m)	0.20	0.28	0.19	0.75
σ_w (60 m) (convective)	0.17	0.22	0.14	0.79

3.4 鉛直風速の標準偏差の比較

これまで行われてきた同様の比較観測⁷⁾においても平均風向、平均風速の測定値は、ソーダとその他の計測器の間でよい一致が得られており、むしろこれからの課題は、乱流量の測定精度を高めることにある。今回の解析では、乱流量のうちでは最もゆるい仮定のもとでソーダによって見積もることのできる鉛直風速の標準偏差について超音波風速計のデータと比較した。Fig. 14・Fig. 15 は、20分平均の鉛直風速の標準偏差についてのソーダの測定値と超音波風速計の測定値の相関図である。ここで Fig. 14 ではソーダの測定高度は 60 m、Fig. 15 では 180 m である。各統計量を Table. 4 に示す。超音波風速計は 10 Hz でサンプリングしており、これに対してソーダは 0.05 Hz のサンプリングである。さらに空間的にも超音波風速計は数十 cm の平均であるのに対し、ソーダは 1 辺が 30 m 程の空間からエコーを受けている。このためソーダでは特に高周波成分の変動をとらえることはできないと考えられる。これらのことと、ランダムエラーが重なって Fig. 14・Fig. 15 に見られるようなエラーが生じたと思われる。Fig. 16 は、Fig. 14 に示した内の convective なケースだけを取り出してプロットしたものである。Table. 4 からわかる通り、Fig. 14 よりも高い相関が得られている。これは、convective な条件では変動に対する低周波数成分の寄与が大きくなり⁸⁾、ソーダのように粗いサンプリングの測器でもとらえやすいことと、変動そのものも大きくなり、相対的にランダムエラーの割合が小さくなることが原因であると思われる。また J. E. Gaynor⁹⁾ らが他のソーダのデータを解析した結果得られた値 (Bias = -0.01 m/s, Comparability = 0.23 m/s, 相関係数 = 0.45) よりも Bias の値は大きくなっているが、全体としてより高い相関が得られており、鉛直風速の標準偏差については、特に convective な条件下ではかなり精度のよい測定ができることを示している。

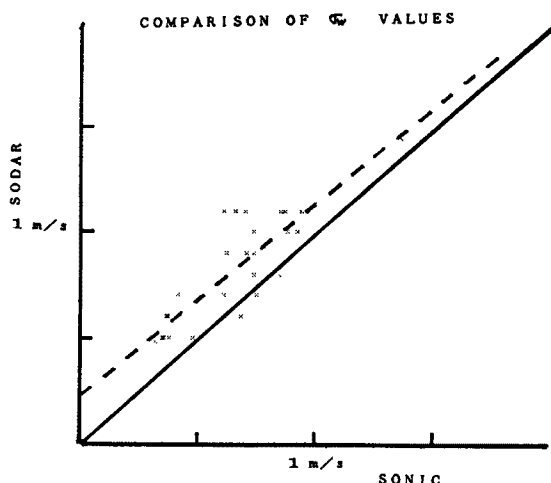


Fig. 16. Same as in Fig. 14., but for the convective conditions.

3.5 ソーダの相互風較、及びパイロットバルーンとの比較観測

これまで述べた ISIE とは別に、1989年2月に潮岬の風力実験所で、中国環境科学研究院が開発したトリプルモノスタティックドップラーソーダー HK-11 との比較観測をおこなったので、それについても簡単に報告する。この比較観測ではパイロットバルーンによる風向、風速の観測も並行しておこなおうとしたが、パイロットバルーンの機械の故障のため2回分のデータしか得られなかった。風向については、ここでは示さないが3種の測器とも数 deg 以内の差で合致した。Fig. 17 に1989年2月26日9時及び10時の風速のプロファイルを示す。ソーダの平均化時間は20分であるのに対しパイロットバルーンは瞬時値を測定しており、

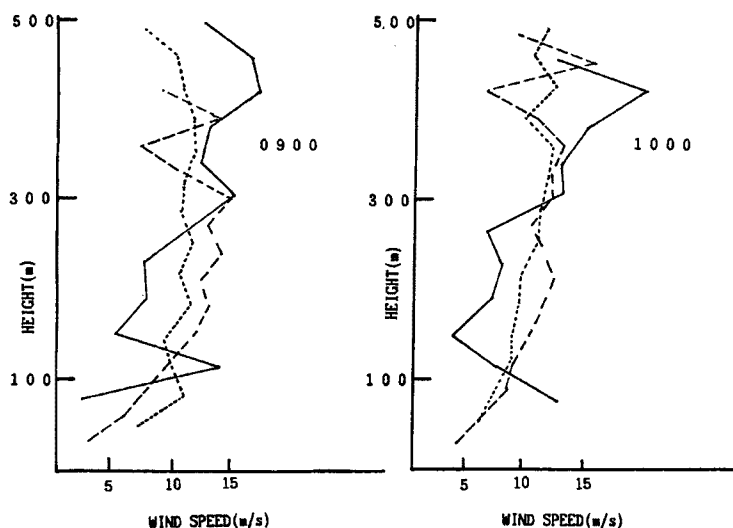


Fig. 17. Wind speed profile at 0900 and 1000 in February 26, 1989, measuring by pilot balloon (solid line), HK-11 (dotted line) and our sodar (dashed line).

このためパイロットバルーンの測定値は各高度間でばらつきが大きくなったものと思われる。ソーダ間では風速の測定値はよく合っており、10 m/s以上の強風であるがISIEの解析結果のような風速を過小評価する傾向はなかった。ここでは2例しかデータが得られていないのではっきりしたことは言えないが、ISIEの後に風速を算出するソフトウェアを一部改良したためとも考えられる。**Fig. 17**をさらに詳しく見ると、高度250 m以下ではソーダの測定値がパイロットバルーンによる測定値より大きな値を出しており、それ以上の高度では逆の傾向があるが、データ数が少ないため原因は分からない。

4. 結語

ソーダは、大気境界層内の風向、風速を連続して経済的に遠隔測定する機械としてさかんに使用されるようになってきている。今回の比較観測では、高さ300 mの気象観測塔に設置されている超音波風速計によって測定される20分間平均の風向・風速及び鉛直風速の標準偏差とソーダの観測値がどの程度合致するかを調べた。観測塔とソーダの距離(650 m)を考えると、よく合致している。特に、鉛直風速の標準偏差については、高い相関が得られた。しかし、10 m/s以上の強風時には、平均風速を10~20%ほど小さく見積もってしまうという結果が出ており、この点に関しては、3章で述べたような理由(地上の物体からの反射、ホーンに残響)などが考えられるので、今後そのような点についてチェックしていかねばならないであろう。また、拡散モデルに応用するためには乱流量のプロファイルを知ることが必要であるが、ソーダによってこれらの値をどこまで正確に見積もることができるか、またそのためにはどのような補正が有効であるかについても検討していく予定である。

なお、この比較観測全体についてはNOAAから報告書が出されることになっており、参加各測器間の比較等は、その報告が公表されてから詳しく検討をすることになっている。

謝辞

本装置の製作及び比較観測に際して協力して頂いた、海上電機株式会社の伊藤芳樹氏に感謝の意を表したい。

参 考 文 献

- 1) 村林 成・光田 寧：合成開口方式による音波探査装置の可能性，京都大学防災研究所年報，第28号 B-1，1985，pp. 437-447.
- 2) 村林 成・光田 寧：開口合成ドップラーソーダの実用化，京都大学防災研究所年報，第29号 B-1，1986，pp. 251-259.
- 3) Ito, Y., Y. Kobori, M. Horiguchi, M. Takehisa and Y. Mitsuta : 1989, Development of wind profiling sodar, J. Atmos. Ocean. Tech., Vol. 6, (to be published).
- 4) I. M. Reid : 1987, Some aspects of Doppler radar measurements of the mean and fluctuating components of the wind field in the upper middle atmosphere, J. Atmos. terr. phys., Vol. 49, No. 5, pp. 469-484.
- 5) J. C. Kaimal and J. E. Gaynor : 1983, The Boulder Atmosphere Observatory, J. Appl. Meteor., Vol. 22, pp. 863-880.
- 6) P. L. Finkelstein, J. C. Kaimal, J. E. Gaynor, M. E. Graves and T. J. Lockhart : 1986, Comprison of wind monitoring systems. Part I. In situ sensors, J. Atmos. Ocean. Tech., Vol. 3, pp. 583-593.
- 7) P. L. Finkelstin, J. C. Kaimal, J. E. Gaynor, M. E. Graves and T. J. Lockhart : 1986, Comparisn of wind monitoring systems. Part II : Doppler sodars, J. Atmos. Ocean. Tech., Vol. 3, pp. 594-604.
- 8) J. C. Kaimal, J. C. Wyngagrd, Y. Izumi and O. R. Cote : 1972, Spectral characteristics of surface-layer turbulence, Quart. J. R. Met. Soc., 98, pp. 563-589.
- 9) J. E. Gaynor and L. Kristensen : 1986, Errors in second moments estimated from monostatic Doppler Sodar winds. Part II : Application to field measurements, J. Atmos. Ocean. Tech, Vol. 3, pp. 529-534.