

フラット・アレイ型ソーダーについて

On a Flat Array Sodar

花房 龍男*・大和 佳祐**・渡来 靖***

Tatsuo HANAFUSA*, Yoshihiro YAMATO**
and Yasushi WATARAI***

Abstract

The outline of a Flat Array Type Doppler Sodar is discussed and the field test observations with the comparison of the sonic anemometer on the 30m tower are shown.

I はしがき

環境調査などで、上層の風向・風速を測定するためには、①鉄塔などに風向風速計を設置する。②ゾンデなどを利用する。③リモートセンシングを利用する、などの方法がある。それぞれ長所、短所があるが、ここでは、最近開発された小型のフェイズドアレイ型ドップラーソーダーの特徴とその実地試験結果について述べる。

II ドップラーソーダーの原理

大気中に音波を送信すると大気温度や風の微細な変化により、音波の一部はあらゆる方向に散乱するため、音波送信場所にも戻ってくる。音波散乱を与える上空の大気が静止していれば、受信周波数は送信周波数と同じであるが、もし、大気が動いていると、そこでドップラー効果が生じ、

受信周波数は送信周波数と少しずれてくる。ドップラーソーダーはこのずれの周波数（ドップラー偏移周波数）を検出して、上空の大気の動き、すなわち風向・風速を測定するものである。しかし、一方向の送信ではその方向の成分しか測定できないが、3方向に送信して、各成分を観測してベクトル合成すれば簡単に上空の風向・風速を求めることができる（McAllister *et al.*, 1969, 花房ほか, 1996）。

ソーダーによる風向・風速の測定原理について述べる。

乾燥空気中では音速 C は次式で示される。

$$C = (C_p / C_v \cdot R \cdot T)^{1/2} \quad (1)$$

ここで、 C_p は乾燥空気の定圧比熱で $C_p = 1004 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 、 C_v は乾燥空気の定積比熱で、 $C_v = 717 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 、 R_p は乾燥空気の気体定数で

* 元気象庁気象研究所

** 英弘精機株式会社

*** 筑波大学陸域環境研究センター（現：立正大学地球環境科学部）

$R=287.04\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$, T は絶対温度である.

風速変動は散乱断面積に無関係であり, 音波の発信期間 T_p は音速を C とすると一つの波グループ $L_p=C/T_p$ で空気中を散乱していく. 音波の最後の発信時間から t_a 後, グループの初めと終わりの間の空間的な広がり

$$C \times (T_a + t_a) - C \times t_a = L_p \quad (2)$$

で表される.

しかしながら, 受信機に音波が戻るまでの時間が必要なので, 時間 t_a の後, 送信機の位置で受信する後方散乱の信号は $C \times (T_p + t_a) / 2$ から $C \times t_a / 2$ の間になる必要がある. このグループの長さは $C \times (T_p + t_a) / 2 - C \times t_a / 2 = L_p / 2$. 言い換えれば実際の波長 L_p の半分である. これは効果的波長 $L_E (= L_p / 2)$ と呼ばれている.

後方散乱信号の周波数は送信された音波パルスの風速成分によって偏移され, その周波数の偏移は次式で表される.

$$\delta f = -2 \frac{u_r}{c} f \quad (3)$$

$$\delta f_v = -2 \frac{w}{c} f_v \quad (4)$$

ここで, f は送信音波パルスの周波数で, 周波数 f_v と鉛直風速 w については δf_v は w に比例することを意味しており, 添え字 r は方向成分を表わす.

東西方向に θ_E だけ傾斜した周波数 f_E と東方向成分の水平風速成分 u を考えると, 周波数偏移は次のように表される.

$$\delta f_E = -2 \frac{u}{c} f_E \sin(\theta_E) - 2 \frac{w}{c} f_E \cos(\theta_E) \quad (5)$$

東方向, 北方向及び鉛直方向の3つのビームを考え, それぞれ周波数偏移を f_E, f_N, f_V とし, 傾斜を $\theta_E, \theta_N, \theta_V (= \text{垂直})$ とし, 東成分を u ,

北成分を v , 鉛直成分を w とすると, 周波数のずれによる風速は次のようになる.

$$u = -\frac{\delta f_E}{2f_E} \frac{c}{\sin(\theta_E)} + \frac{\delta f_V}{2f_V} \frac{c}{\tan(\theta_E)} \quad (6)$$

$$v = -\frac{\delta f_N}{2f_N} \frac{c}{\sin(\theta_N)} + \frac{\delta f_V}{2f_V} \frac{c}{\tan(\theta_N)} \quad (7)$$

$$w = -\frac{\delta f_V}{2f_V} c \quad (8)$$

もちろん $f_E = f_N = f_V$ である.

東, 北, 西, 南方向のビーム傾斜角 $\theta_E, \theta_N, \theta_W, \theta_S$ で周波数がそれぞれ f_E, f_N, f_W, f_S , とし鉛直方向を f_V としたとき, 対象としている層で3次元風速が各々のビームで等しいと仮定して反対のビームについて平均し, $\theta_E = -\theta_W, \theta_N = -\theta_S$ とすれば,

$$u = -\frac{1}{2} \left[\frac{\delta f_E}{2f_E} \frac{c}{\sin(\theta_E)} + \frac{\delta f_W}{2f_W} \frac{c}{\sin(\theta_W)} \right] \quad (9)$$

$$v = -\frac{1}{2} \left[\frac{\delta f_N}{2f_N} \frac{c}{\sin(\theta_N)} + \frac{\delta f_S}{2f_S} \frac{c}{\sin(\theta_S)} \right] \quad (10)$$

$$w = -\frac{\delta f_V}{f_V} \frac{c}{2} \quad (11)$$

平均化時間 t_{av} を考えると, これは最少解像層 $\Delta Z = t_{av} \times C / 2$ に対応する. フーリエ変換理論から解るように, 時間 t_{av} で可能な最良の周波数解像は $\Delta f = 1 / t_{av}$ である.

ドップラーソーダの鉛直解像と解像可能な最大周波数の間には次のような関係がある.

$$\Delta Z \cdot \Delta f = \frac{c}{2} \quad (12)$$

10m の鉛直解像の場合には周波数解像は 17Hz が可能である. 例えば 2400Hz の場合には $\theta = 29$ 度で鉛直解像 ΔW は 1.2 m/s となり, 風速の解像 Δu は 2.5 m/s となる.

また, 鉛直方向からの受信信号を信号強度の度合いで濃度表示することにより, エコーターンの

情報が得られ、これにより逆転層など上空の大気状態を把握することができる。

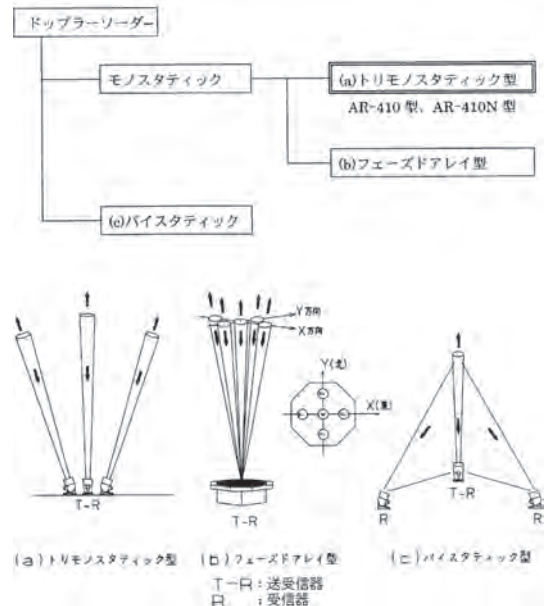
III フェイズドアレイ型ドップラーソーダー(SFAS64)

ドップラーソーダーにはバスタティック型、モノスタティック型、およびフェーズドアレイ型がある(第1図)。バスタティック型は、鉛直上方へ音波を送信し、ある距離離れて設置した受信機で受信するもので、設備面積が比較的広い場所で設置可能なものである。これに対して送受信器を一箇所に設置して行なうモノスタティック型のものもある。

最近開発され、実用化されたフェイズドアレイ型(フラットアレイ型)は、フラットアレイアンテナを使用したもので、送受信器が一体となっており、小型化され、設置等が非常に便利になっている。フェイズドアレイ型ドップラーソーダー(SFAS64)の最大測定設定高度は500m、最小測

定高度は10mで、主な特徴は次の通りである。

- ①送受信器が一体となっているので、設置が非常に簡単である。

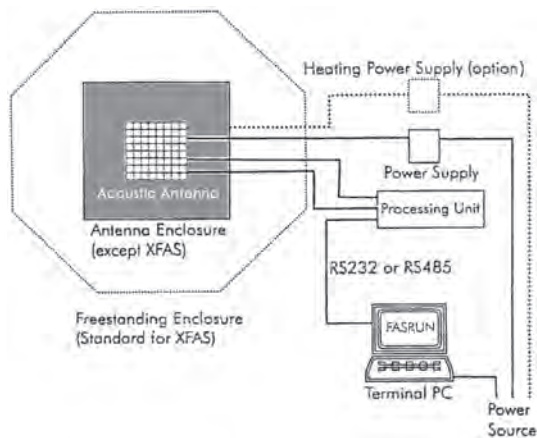


第1図 ドップラーソーダーの分類図

第1表 SFAS64型ソーダーの仕様

項目	SFAS64	備考
エレメント数	64個	ピエゾ素子
周波数	2850 ~ 4750 Hz	設定可
出力	2.5 W	設定可
使用周波数	80 波長から最大 10 波長選択	設定可
送受信アングル	0°、± 22°、± 26°	9 ビーム設定可
垂直測定層	最大 100	設定可
垂直測定厚み	5 ~ 100 m	設定可
最低測定設置高度	10 m	最低層高度
最大測定設定高度	200 m ~ 500 m	マルチ周波数モード時
平均時間設定	1 分 ~ 60 分	パラメータ設定による
水平風速精度	0.1 ~ 0.3 m/s	マルチ周波数モードにおいて
垂直風速精度	0.1 ~ 0.3 m/s	マルチ周波数モードにおいて
風向精度	2 ~ 3°	風速 2 m/s 以上
水平測定範囲	- 50 ~ +50 m/s	
垂直測定範囲	- 10 ~ +10 m/s	
動作温度範囲	- 35 ~ +50°C	アンテナ、プロセッシングユニット
電力	± 18VDC700W ピーク	
	平均 80 ~ 350 W	
サイズ	0.44 × 0.46 × 0.13 m	音響エンクロージャ無し
重量	11.5 kg	

- ②送信周波数を複数発信して、その中で1番SN比の良いものを選択する方法が採用されているので、データの取得率の向上が期待できる。
- ③機器全体が簡素化されているので持ち運び



第2図 SFAS64型ソーダーのブロックダイアグラム



第3図 送受信機

が便利である。

- ④測定高度、間隔等が簡単に変更可能である。
- ⑤開発されて間もないので、強風、豪雨、耐久性などの資料がまだ不十分である。

また、主な仕様を第1表に示し、ブロックダイアグラムを第2図に示す。

送受信機は64個(8×8)のスピーカーから構成され(第3図)、音波は第2表に示すように9方向に約2秒ごとに発射される。したがって1回の観測時間は約20秒である。この間は風の状態が定常であると考えられる。

IV SFAS64による実地観測

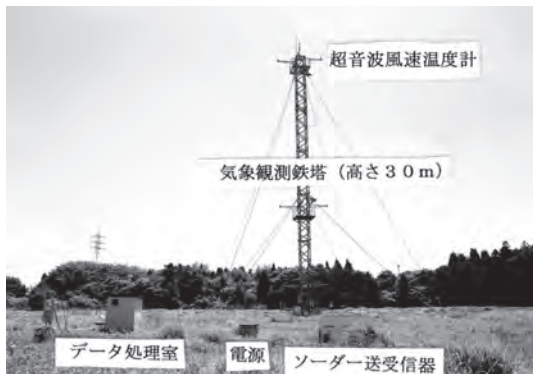
筑波大学陸域環境研究センターの協力でSFASドップラーソーダーの実地試験を行なったので、その観測結果について述べる。

1. 観測場所と観測方法

観測場所は筑波大学陸域環境研究センターの圃場で、第4図に観測状況を示す。高さ30mの気象観測鉄塔の頂部に設置されている3次元超音波風速温度計で観測された、風向・風速の30分間平均値とドップラーソーダーの観測値との比較を中心に解析を実施した。観測は2006年8月から2007年3月末まで断続的に日中のみ行った。今回は2006年8月4日～8日の5日間のデータについて解析を行った。

第2表 音波の発信方向と発信数

Identifier	Beam directions SFAS	
	Main beam	Mirrored beam
Vertical	0° (vertical)	
N	24° north	19° south
E	24° east	19° west
S	24° south	19° north
W	24° west	19° east



第4図 観測状況図

2. 解析結果

1 測定高度

最大測定高度を第3表に示す。ハッチのついた時間は測定高度が200mに届かない時間帯を示す。最大高度を200mに設定したがほとんどのケースで、200mまで観測されているが、夕刻になると測定可能な測定高度が低くなる傾向が全ての日に認められるので、その原因の追究が必要である。

2 超音波風速温度計値との比較

鉄塔の30mに設置されている超音波風速温度計による値(30分平均値)との比較を行なった。時間変化と散布図を第5図及び第6図に示す。第6図からわかるように、値はほぼ直線的に並んでいるが、両者の間には比較的大きな差がある場合が見られる。この原因としては、超音波風速温度計は空間の1点での瞬間値を測定するのに対し、ドップラーソーダはある程度の空間的な平均を約2分かけて測定をしているので両者の測定方法は原理的に異なっていることが挙げられる。両者の間の差の原因となるものとして、①場の定常性、②風速の高度分布等が考えられる。

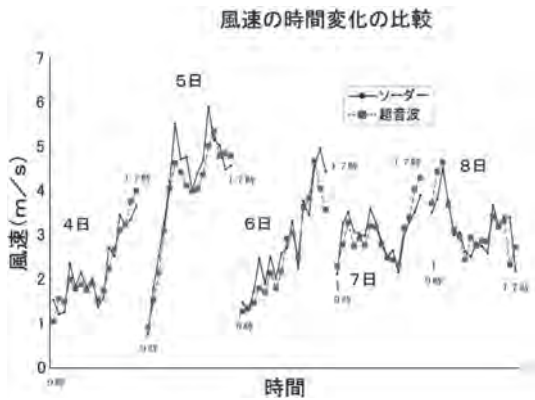
場が比較的定常と考えられる風速が比較的強い場合(30分平均風速が両方とも3m/s以上)の相対比を示したのが第7図である。

明らかに風向による違いによって相対比の違い

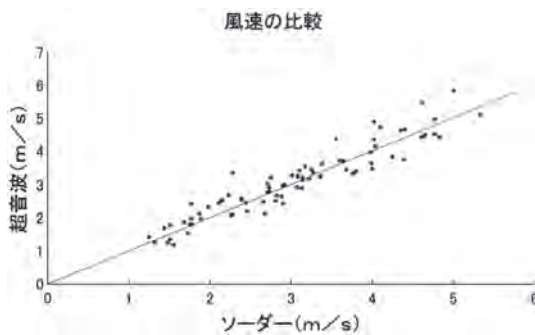
第3表 最大測定高度 (m) <設定: 200 m>

	8月4日	5日	6日	7日	8日
9時	200	200	200	200	200
	200	200	200	200	200
	200	200	200	200	200
	200	200	200	200	200
10時	200	200	200	200	200
	200	200	200	200	200
	200	200	200	200	200
	200	200	200	200	200
11時	200	200	200	200	200
	200	200	200	200	200
	200	200	200	200	200
	200	200	200	200	200
12時	200	200	200	200	200
	200	200	200	200	200
	200	200	200	200	200
	200	200	200	200	200
13時	200	200	200	200	200
	200	200	200	200	200
	200	200	200	200	200
	200	200	200	200	200
14時	200	200	200	200	175
	200	200	200	200	200
	200	200	200	200	185
	200	200	200	200	155
15時	200	200	200	200	170
	200	200	200	200	140
	200	200	200	180	145
	200	200	200	165	165
16時	200	200	200	200	190
	200	200	200	200	200
	200	185	200	200	170
	200	160	200	200	180
17時	170	155	200	200	180
	200	135	200	200	160
	200	165	170	200	190
	125	200	145	105	200
	165	200	200	200	175
	150	190	200	185	190
17時	130	200	145	200	150

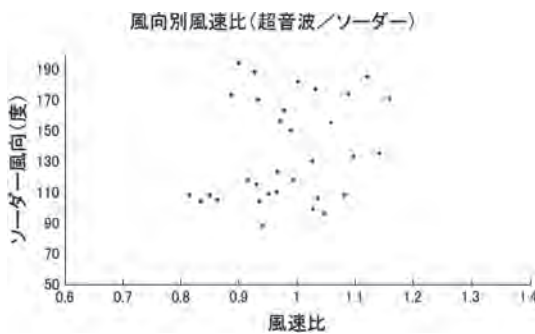
が認められる。したがって風上の条件によって風速の高度分布に差が発生し、一点観測値と空間平均値との間に違いが出てきたものと考えられる。空間平均と一点観測値の比較には注意が必要である。



第5図 風速変動の時間変化の比較



第6図 ソーダー値と超音波値の比較



第7図 相対値の風向依存性

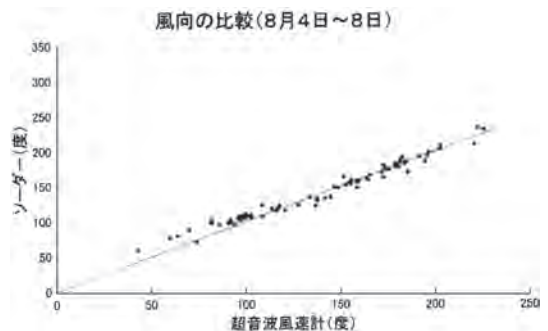
3 風向の比較

風速を無視して両者の関係を図示したのが第8図である。全体としては、両者はよく一致している。

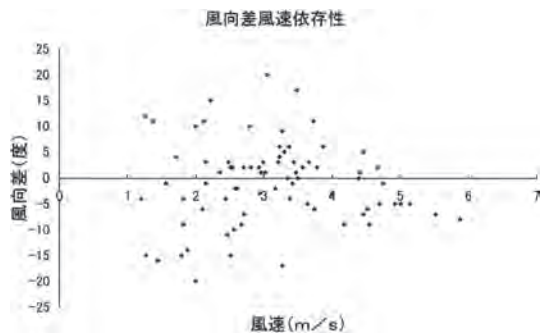
ソーダーの風速を基準に両者の風向差を見ると(第9図)、当然ではあるが風速が小さい時、両者の間のばらつきが大きく、風速が増加するにつれて一致する傾向が見られるが、必ずしも0とはなっていない。この結果が機器の設置誤差によるものか、あるいは1点の観測値と空間値の差によるものかは、より詳細な観測を行って確認する必要がある。

V 今後の課題

今回の観測の結果から、特に顕著な両者の機器による差は認められなかった。今後は、強風時や



第8図 風向比較図



第9図 風向差の風速（ソーダー値）依存性

降雨時にデータが正常に取得できるかどうかを調査する必要がある。

文献

花房龍男・菊池幸雄・伊藤芳樹・小玉 亮・安達隆史・永沼 剛・有沢有三・竹内清秀 (1996): Evaluation of doppler sodar data for diffusion study. *Preprints of 13th*

International Clean Air & Environment Conference. Clean Air Society of Australia, 489-494.

McAllister, L. G., Polland, J. R., Mahoney, A. R. and Shaw, P. J. R. (1969): Acoustic sounding -A new approach to the study of atmospheric structure. *Proc. IEE*, **57**, 579-587.

(2007年6月4日受付, 2007年8月30日受理)