第5章 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*

5.1 装置の基礎概念

上空に向けて発射された音波パルスが各高度で反射し、XY方向に離れて配置された受信機1、2および発信点での受信機3で、それぞれ f_1 、 f_2 、 f_3 の周波数のずれを測定したとき(図5.1)、風の3方向成分は

$$u = \frac{c}{f} \frac{1}{\cos \theta_1} \left\{ f_1 - f_3 \frac{1 + \sin \theta_1}{2} \right\}$$



Fig. 5.1 General view of the Doppler sodar system.

*吉川友章:応用気象研究部

$$v = \frac{c}{f} \frac{1}{\cos \theta_2} \left\{ f_2 - f_3 \frac{1 + \sin \theta_2}{2} \right\}$$
$$w = -\frac{c}{2f} f_3$$

で与えられる。ここで θ_1 、 θ_2 : 受信機1と2から測定点を仰ぐ角度、c:音速(= 331+0.61T)、 T:気温、f:発信音波の周波数(表参照)。

また、時間間隔s内の平均風速の成分mとその標準偏差のはx成分の場合、分布関数 x(t)より

$$m = \frac{1}{s} \int_{0}^{s} \chi(t) dt$$
$$\sigma = \frac{1}{s} \int_{0}^{s} \chi^{2}(t) dt - m^{2}$$

と定義される。Y、Z成分についても同様に扱われ、これより3次元の平均風速と3方向の乱流パ ラメータが導かれる。

5.2 実地測定

1981年夏、瀬戸内海の海陸風調査に際して、この測定器による気流・乱流の高度分布測定を行 なった。概要は表のようになっており、測定高度は500mまで、測定時間間隔は5秒以上であれば自由 に変えられる。測定は自動的に連続して行ない内蔵電算機により、5秒毎の測定値を2分ぶん(24個) に集積して、平均風向・平均風速(水平と鉛直)、風向変動の標準偏差、水平と鉛直の風速変動標準 偏差を求めた。ただしこれらのデータを磁気テープに収録する際には、さらに5個の平均値をまと めて、10分の平均値と偏差値を求め、1時間にそれぞれ6個の値として保存した。また今回の設定 条件によると、測定は空間的には気層の厚さが53m、断面積が100m上空で約60m²、500m上空で 1,500m² ほどの容積平均値を求めたことになる。

機種 3方向バイスタティック型ドップラーソーダ
使用音波 2,000 Hz、160m sec パルス、250 W
測定時刻 5 sec ごと連続、10分間平均
測定高度 150m~500mの50mごと
時間・場所 1981年8月10日~28日、新居浜海岸
1982年7月24日~8月7日および8月12日~22日、岡山県環境保健センター構内

図 5.2 に1981年に新居浜海岸で測定された毎正時前10分間の平均水平流(矢羽根表示)と鉛直流 (等値線)をとりだし、高度・時間断面図に描いた例を示す。早朝、西よりの風が東よりに急変した のは、夏型気圧配置の一般流が台風外辺の風と入れ替わったもので、下層では陸風が持続して交替

が遅れた。日中は海風と傾度風の向きが近いため、下層と上層のシャーは少なく、100m高度では 海岸に直角に北よりの海風が吹いている。夕方には下層に再び陸風が吹き始め、夜半には全層にわ たる一般流のじょう乱が見られる。これらは同時に同じ場所で行なったパイボールの観測とよく一致 する。

鉛直流については一般流が東から西へ変わるときと、下層に陸風が吹き始めるとき、400~500mに著しい上昇流がみられる。

図5.3に乱流パラメータの例として、σw/uの高度・時間断面を示す。一般に6w/uの値は



Fig. 5.2

An example of the three dimensional wind data observed with Doppler sodar. (Broken line denotes systematic turn of the wind direction, white circles mean calm condition and shadow areas correspond with the descent air stream.)





10⁻¹のオーダにあり下層で大きく、上層で小さいが、風向急変を伴う一般流のじょう乱域では、上 空までこの値が大きい。

1982年夏は測定点を岡山平野の中央にある県の環境衛生センター構内に変えて、気流・乱流の特 徴を調べた(図 5.4 上)。南西約20kmの倉敷のパイバルデータ(図 5.4 下)と比較すると、次のこ とがいえる。

(1) 両地点ともほぼ一様な風向が続いたり、ゆるやかに変転する気流系が共通して認められ、各 気流系は明瞭な風向のギャップによって区分される。(図中の2重線)

(2) 気流区分は両地点とも定性的には一致するが、岡山が地上から500mまで、同時に気流系が入れ替わることが多いのに対し、倉敷は下層と上層の間で数時間かかって移行したり、異なる気流系が立体交差することが多い。これは岡山が広い平担地であるのに対し、倉敷は南東近くに丘陵をひかえていることと関係しているらしい。

図5.4に岡山と倉敷で測られた水平流(矢羽根表示)、鉛直流(等値線)、シャーライン(2重線)



Fig. 5.4 An example of the wind data observed over a flat inland field in Jul. 1982. (Double broken line denotes systematic turn of the wind direction.)

-162-

および図 5.5 に図 5.4 と同じ時の岡山の水平方向の乱流パラメータ σ_u 鉛直方向の乱流パラメータ σ_w および風向の乱れ幅 σ_d の高度・時間断面図を示す。前年の新居浜のデータ(図 5.2 等)と比較すると、それぞれ次のことが特徴づけられる。



Fig. 5.5 An example of turbulent parameters over a flat inland field. (Jul. 1982 over Okayama)

新居浜海岸では、朝夕の海陸風の交替あるいは総観スケールの前線通過に対応して、風向急変と 著しい鉛直流が起こり、乱流パラメータが3成分とも大きな値を示した。風向急変は短時間内に全 層で起こり、海風、陸風とも一様に吹くときは乱れは小さい。

岡山では不安定な夏型配置のためもあって、東よりの一般風に南東からの海風が重なっているの が認められるが、陸風は明らかでない。鉛直流は前線の通過前後に著しく大きいが、海風の侵入に 際して顕著でない。むしろ日中の弱い東よりの風系内で上昇流が持続する。測定地が水田地帯の弧 立裸地の南西隅のため、東〜北東の気流のときサーマルプルームが生じるためと思われる。これに 対し、南東風のとき下降流を生じるのは、南東側に6階建ての庁舎(長さ80m、幅20m、高さ25m くらい)があるため、建物によるダウンドラフトが起こっているものと思われる。

乱流パラメータのうち、風向の乱れ(σ_d)と水平風速の乱れ(σ_u)は定性的に一致し、気流系の境界(風向急変)で大きな値を示すが、鉛直流の乱れ(σ_w)はサーマルプルームやダウンドラフトに対応して、特定な時間帯あるいは特定の風向の一様な気流の中で大きくなっている。

5.3 拡散パラメータの検討

拡散パラメータの3成分の相関を調べるため、 σ_w と他の2成分の対応を求めた(図5.6)。一般 にパイバルとゾンデでは拡散パラメータとしてRiとKz しか求められないため、気象条件別にKz とKx、Kyの関係を求めておくことは、パイバル・ゾンデデータの利用価値も高める。岡山ではあ らゆる気象条件の時を合わせて各成分の相関を求めても対応はよくない。しかし特定風系に限定す れば、0.8以上の相関が得られる。なかでもSE風データが弱風から強風に広く分布し、乱れの成 分に特徴があるため図5.6にSE風のときの例を示す。白丸は風向急変直後1時間以内または直前 1時間以内を意味し、斜線は夜間(19時~5時)の値を示す。これより風向急変時に各因子とも大 きな値となりやすいことが認められ、特に σ_d にその傾向が強いが、相関にはあまり関係していな い。また昼夜による相関差も少ない。ただし σ_w と σ_d より σ_w と σ_u の方がやや相関がよい。

ドップラーソーダの測定値から直接Kzを求めるには、モーメンタムの拡散として

$$Kz = -u'w' / \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)$$

を使えばよいが、現時点では u'w' を求めるようプログラム化されていないため u'w' $\approx (u'^2)^{\frac{1}{2}} \cdot (w'^2)^{\frac{1}{2}}$ と仮定し、 $(u'^2)^{\frac{1}{2}} \geq (w'^2)^{\frac{1}{2}} \varepsilon \sigma_u \geq \sigma_w$ から導く方法を採用した。 $\sigma_u \geq \sigma_w$ からの換算も分布関数が 記録されていないため、詳細は不明であるが、正規分布の中央部分を矩形とみなせば近似的に $u' \approx \frac{50}{68} \sigma_u$, $w' \approx \frac{50}{68} \sigma_w$ が使える。ここでは変化傾向だけをみるため、

$$K_{Z} \sim \sigma_{u} \cdot \sigma_{w} \left(\frac{\Delta u}{\Delta z} \right)$$

を求めた。その際、 $\triangle z$ を50 mとし、 $\triangle u / \triangle z$ は上下二層を合わせて100 mの値を求めた。その



Fig. 5.6 Correlations between three dimensional components of the turbulent parameter. (white circles denote the case in one hour or less before or after a systematic wind turn and black circles mean the case in an uniform wind field. Slanting lines on some circles mean the data in the night time (19-5 local time)

結果は図 5.7 のようになり、絶対値が 100を越える所があってやや大きすぎる感じがあるが、換算 係数として(50/68)² ~ 0.54 を考慮するとほぼ妥当なレベルになる。3日間の変化傾向から、 風系や前線との対応を求めると一般に日中の風向がENEのとき大きな値が続き、SEのとき、と き折団塊状の値を示す。風向急変の最中あるいは直後に全層にわたり大きな値となることが多い。



Fig. 5.7 Cross-section of Kz over Okayama in Jul. 1982

SW域では概して値が小さい。これらは測定点が広い水田地域の中にあり、NE方向に200m×150 mくらいの裸地のグラウンド、SE方向に長さ80m、高さ25m、幅20m くらいの庁舎があること を考えると、日中のサーマルプルームや庁舎のダウンドラフトとして説明づけられる。

5.4 あとがき

ドップラーソーダは気流・乱流を3次元的に自動測定でき、パイボールや低温ゾンデでは得られ ない要素も測れる利点がある。また気球を飛ばして測る方式は、いつも流されながら異なる点の値 を測るため、山岳や都市などの局地現象への寄与を識別することが難しいのに対し、ドップラーソ ーダは常に上空の同一点の値を測るため、地形効果や熱的効果の検証に適している。

今後、測定高度を1,000m以上に延ばすことができれば、各方面で役立つものと思われる。

参考文献

- Balser, M., C. A. Mc Nary, A. E. Nagy, R. Lovel and D. Diskson, 1975: Remote wind sensing by acoustic radar. Jour. Appl. Met., Vol. 15, pp.50-58.
- Balser, M., C. A. Mc Nary and D. Anderson, 1976: A remote acoustic wind sensor for air port approaches. Jour Appl. Met., Bol. 15, pp. 665-668.
- Balser, M. and D. Netterville, 1980: Measuring wind turbulence with doppler-acoustic radar. Report of Xonics Technology, Inc.

Beran, D. W. 1974: Remote sensing wind and wind shear system. Report No. FAA-RD-74-3.

- Beran, D. W. et al., 1974: Operational test results of acoustic doppler wind shear detector, 6th Conference on Aerospace and Aeronautical Meteorology, Nov. 12-15, 1974 (Amer. Met. Soc.), pp. 412-417.
- Beran, D. W. and F. F. Hall, Jr., 1974: Remote sensing for air pollution meterology, Bulletin of American Meteorological Society, Vol. 55, No. 9, pp. 1087-1105.
- Fukushima, M., 1975: Status of sodar observation in Japan. Journal of Radio Research Laboratories, No. 109, pp. 151-164
- Gaynor, J. E., 1977: A coustic doppler measurement of atmospheric boundary layer, velocity structure functions and energy dissipation rates. Jour. Appl. Met., Bol. 16, PP. 148-155.
- Kaimal, J. C. and D. A. Haugen, 1977: An acoustic doppler sounder for measuring wind profiles in the bourdary layer Jour. Appl. Met., Vol. 16, pp. 1298-1305.

西宮 昌,赤井幸夫,1977:音波探査による下層大気の風の観測,電力中央研究所,278026

福島 圓, 1975:ソーダ観測の現状,日本音響学会誌, 31巻7号, pp.458-562

吉川友章,佐藤純次,1979:ドップラーソーダによる気流と拡散パラメータの鉛直分布の測定,大 気汚染学会予稿集,503

付 録

- 1. 各種の測定による拡散パラメータの算定式
 - (1) パイボールと低層ゾンデによる Kz

$$K\mathbf{z} = \begin{cases} \boldsymbol{\ell}^{2} \left[\begin{pmatrix} \partial \mathbf{u} \\ \partial \mathbf{z} \end{pmatrix}^{2} + \begin{pmatrix} \partial \mathbf{v} \\ \partial z \end{pmatrix}^{2} \right]^{\frac{1}{2}} (1 + \alpha \operatorname{Ri}) & \operatorname{Ri} \leq 0 \\ \\ \boldsymbol{\ell}^{2} \left[\begin{pmatrix} \partial \mathbf{u} \\ \partial \mathbf{z} \end{pmatrix}^{2} + \begin{pmatrix} \partial \mathbf{v} \\ \partial z \end{pmatrix}^{2} \right]^{\frac{1}{2}} / (1 - \alpha \operatorname{Ri}) & \operatorname{Ri} > 0 \end{cases}$$

$$\ell = \frac{K_0 (Z + Z_0)}{1 + K_0 (Z + Z_0) / R}$$

$$\alpha = -3.0 \quad R = E (R_0) Ug / f \quad E = (R_0) \approx 0.00027$$

$$R i = (gd\theta / dz) / \theta \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right]$$

(2)
$$\gamma \gamma \eta \gamma \gamma \kappa \gamma \nu - \gamma \kappa \xi \delta Kz$$

 $Kz = \overline{w'^2} \int_0^t R(\xi) dt$
 $R(\xi) = \overline{\frac{w'(t)w(t+E)}{\overline{w'^2}}}$

(3) ドップラーソーダによる σ
 mi を方向 i の受信音波ピータと発信周波数のずれ、x(t)を m の時間分布関数とすると

$$\sigma_{i}^{2} = \frac{1}{T} \int_{0}^{T} \chi^{2} (t) dt - m_{i}^{2}$$

これをN回測定して重合平均すると

$$\sigma_{\rm s}^2 = \frac{1}{N} \left(\Sigma \sigma_{\rm i}^2 - \Sigma_{\rm N} m_{\rm i}^2 - \overline{m}_{\rm i}^2 \right)$$

2. ドップラーソーダのMT収録仕様

ドップラーソーダのデータは内蔵の電算機によってリアルタイムに処理され、指定された気象要素が即座に印字されるとともに、MTに収録される。その内容と配列は表 5.1のようになっている。

まず始動の際にインプットする基本データが示され、内蔵電算機の計算にとり入れられる。その 内容は、気温(音速を決めるのに各測定時の値が必要であるが、±10m、誤差にして1/30以下を 容認するなら、月平均値を見こして与えれば十分)、測定点の最低高度、同じく最高高度、高度間隔、 発信音波のパルス時間、1回のデータ処理をする時間間隔(各要素はこの間の重合平均値として算 出される)、音波の発信時間間隔となっている。さらに測定点の配置に関するパラメータが4個、す

なわち、基本点(発信、鉛直成分受信点)から受信機1までの距離、基本点から受信機2までの距離、基本点と受信機1の海抜高度差、基本点と受信機2の海抜高度差、受信機2(南北成分用)の 位置の真北からのずれ角度(右まわりを正とする)、受信機1と2のなす角の90度からのずれが入力 される。これで指定時間(ここでは120秒)ごとの平均値が出力されるが、今回は気象庁の風の平 均時間が10分であることや、MTの容量を考慮して、最後のコメントで10分の平均値にまとめるよ う指示してある。

これより気流と乱流パラメータが一定の配列で収録される。すなわち、測定月、日、年、時刻、 分、平均化時間が入ったあと、150mから500mまで50mごとに、高度、平均風向、平均水平風速、 平均鉛直風速、風向変動幅標準偏差、水平風速変動標準偏差、鉛直風速変動標準偏差の値が繰返さ れる。

なお、パイボール、低層ゾンデ等による特別観測期間中は、ドップラーソーダはここに示した例 のように毎10分ごとの値を連続測定したが、その他の期間は1時間に1回、毎正時前10分間の平均 値を測定するように指示した。 LI LI Connand ok

TEHPERATURE	20	DEG C
MININUM ALTITUDE	150	NETERS .
MAXINUN ALTITUDE	500	NETERS
ALTITUBE SEPARATION	50	NETERS
PULSE LENGTH (LONG)	160	MSEC
AVERAGING TIME	120	SEC
PULSE REP INTERVAL	5.0	SEC
GEOMETRY PRINT OPTION	4	
BASE TO RECEIVER I	235	METERS
BASE TO RECEIVER 2	305	METERS
HEIGHT OF RECEIVER 1	0	NETERS
HEIGHT OF RECEIVER 2	.0	NETERS
ROTATION ANGLE	35	DEG
SEPARATION ANGLE	٥	DEG
SUNHATION PERIOD	10	HIN.

7/2	1/82	131	0	10)-HIN.	AVE.	7/2	1/82	141	0	14	0-NIN.	AVE.
ALT	DIR	V	٧Z	53	SV	SZ	AL T	DIR	V	٧Z	58	SV	SZ
· #	DEO	A/SEC	N/SEC	368	H/SEC	N/SEC	. N	DEG	#/SEC	N/SEC	DEB	M/SEC	A/SEC
150	102	4.1	0.3	8.2	0.5	0.4	150	105	4.7	0.1	5.9	0.7	0.4
200	105	7.4	0.5	6.1	1.0	0.5	200	110	5.8	0.2	4.5	0.7	0.5
250	107	8.5	0.5	÷5.8	0.9	0.4	250	113	6.5	0.2	7.0	1.0	0.6
300	107	10.0	0.5	3.1	0.9	0.2	300	113	7.5	0.1	5.7	1.0	0.5
350	110	10.0	0.5	4.8	1.4	0.4	350	114	8.5	0.1	5.3	. 1.1	0.5
400	112	11.7	4.8	7.6	1.3	0.4	400	118	10.2	0.1	3.8	0.8	0.5
450	114	12.7	0.7	4.7	1.3	0.5	450	120	11.5	0.1	2.9	0.5	0.5
500	114	12.4	1.2	4.1	0.3	. 0.5	200	127	12.4	0.2	2.1	0.4	0.4

7/24/82 13:10		10	10-MIN. AVE.			7/24	/82	141	10	10	AVE.		
ALT	BIR	Ŷ	٧Z	· 50	SV	SZ	ALT	DIR	V	٧Z	58	SV	SZ
N	926	#/SEC	K/SEC	DE8	N/SEC	N/SEC	ň	DES	M/SEC	N/SEC	9E8	M/SEC	R/SEC
150	161	5.4	0.2	4.5	1.1	0.7	150	107	5.0	0.2	4.2	0.4	0.2
200	105	6.4	0.3	7.3	1.1	0.4	200	111	6.1	9.2	4.8	0.5	0.2
250	105	7.3	0.4	7.9	1.0	0.5	250	112	6.7	9.1	5.4	0.3	0.1
300	108	8.5	0.3	5.7	1.1	0.5	300	114	2.5	0.3	4.1	0.6	0.2
329	107	9.3	0.3	4.8	1.4	9.4	350	114	9.1	-0.1	3.0	0.6	0.1
400	111	10.4	0.2	á.1	1.3	0.4	400	120	10.2	0.5	3.8	1.1	
450	113	11.7	Ø.2	4.0	1.2	0.6	450	121	12.4	0.0	1.3	0.5	
500	115	13.2	0.1	3.5	1.6	0.4	500						

7/74/87 13:70		20	10-HTN. AVE.			7/24/82		14:20		1	AVE.		
ALT	DIR	U	 VZ	58	99	\$7	ALT	BIR	۷	VZ	SD	SV	SZ
	BEB	X/SEC	N/SEC	868	H/SEC	H/SEC	N	BEB	N/SEC	A/SEC	BE S	M/SEC	M/SEC
150	97	5.2	-0.0	4.1	0.8	9.4	150	104	4.9	0.1	5.6	0.6	0.5
200	101	4.0	-0.0	4.2	0.9	0.5	200	108	5.7	0.0	5.4	0.8	٥.3
250	104	4.4	-0.0	7.4	1.0	0.5	250	110	6.6	-0.1	5.9	0.8	.0.4
300	108	7.2	0.0	5.7	0.8	0.5	300	111	7.9	-0.2	4.8	4.7	0.5
350	112	7.4	0.2	5.2	1.0	0.6	350	114	9.3	-0.3	5.0	1.1	0.5
400	112	9.4	-0.0	4.9	0.8	0.4	400	118	10.0	-0.1	2.7	0.8	0.4
450	114	10.3	-0.1	2.7	1.2	0.5	450	118	11.8	-0.4	2.4	0.7	0.4
500	115	11.7	-0.2	4.0	0.4	0.5	500	125	12.4	-0.2	2.7	0.8	0.3

7/2	4/97	131	30	1	0-#TW.	AUF		7/24	4/82	141	30	. 10	-HIH.	AVE.
ALT	818		U7	SR	SV	97		ALT	DIR	V	٧Z	Sð	SV	sz
×	DEG	N/SEC	R/SEC	028	N/SEC	N/SEC		Ħ	DEB	N/SEC	N/SEC	DEB	N/SEC	N/SEC
150	105	5.4	0.1	5.2	0.5	0.4		150	102	5.5	-0.1	5.4	0.6	0.7
200	106	4.1	0.0	4.0	0.4	0.1		200	105	4.3	-0.1	6.2	9.7	0.6
250	110	7.7	-0.0	4.1	0.7	0.2	÷	250	108	- 7.4	-0.2	5.9	0.7	0.4
300	112	1.1	-0.2	4.5	0.8	0.3		300	111	8.4	-0.3	5.1	0.7	0.4
350	115	9.6	-0.4	4.1	1.5	0.3		350	115	9.0	-0.3	4.1	0.6	0.5
400	120	9.7	-0.3	4.4	0.8	0.0		400	114	10.2	-0.4	3.0	0.4	0.5
450	122	11.2	-0.3	4.0	1.4	0.2		450	120	10.0	-0.3	3.4	0.7	0.4
500	124	13.0	-0.5	3.4	2.0	0.0		200	118	10.4	-0.5	5.J	0.8	9.4

Table 5.1

Data format of the real time printout and MT recording of the Doppler sodar system.



(b)



Fig. 5.8 Running state of the Doppler sodar at Okayama. a) Transmitter and receiver 3.b) Receiver 2.