ドップラーソーダによる自然風観測値に基づく風速プロファイルの推定に関して

EVALUATION OF WIND SPEED PROFILE FROM OBSERVATIONS BY DOPPLER SODARS

須田 健一*¹, 菅沼 信也*², 岩谷 祥美*³, 佐々木 淳*⁴, 中村 修*⁵

丸山 敬*⁶, 日比一喜*⁷, 石橋 龍吉*⁸, 田村 幸雄*⁹

Kenichi SUDA, Shinya SUGANUMA, Yoshiharu IWATANI, Atsushi SASAKI, Osamu NAKAMURA,
Takashi MARUYAMA, Kazuki HIBI, Ryukichi ISHIBASHI and Yukio TAMURA

Authors' group has been conducting full-scale measurements of atmospheric boundary layer wind speeds by doppler sodars. It is expected to obtain the wind speed profile easily by doppler sodars, because the wind speeds at many altitudes can be measured simultaneously. Preceding to the observation, the quality of the data obtained in various measuring conditions was studied, and the optimum measuring condition was shown. In our study, the measurements had been selected on the basis of the wind speed at the reference altitude, and wind speed profile had been evaluated from the averaged values of them. This method was reexamined by the statistical method in this paper. It is conformed that the value of wind speed at the reference altitude is overestimated in this method and suggested that the measurements would rather be selected by the wind speed averaged at whole altitudes. However, it was pointed out that the data collectable rate at higher altitudes reduced as the wind speed became higher. This phenomenon were presumed to be caused by wind-induced noise. In this paper, the effects of wind-induced noise on the data collectable rates and the measurements were also studied. It is confirmed that the effect of wind-induced noise cannot be ignored and the errors in the measurements are significant at higher altitudes.

Key Words : Doppler sodar, Wind speed profile, Natural wind observation, Statistical method, Wind-induced noise

ドップラーソーダ, 風速プロファイル, 自然風観測, 集計方法, 風騒音

1 はじめに

建築物の耐風設計では, 設計風速を正しく見積ることが, すなわち, 地表面状態を考慮して風速を合理的に評価することが重要である。しかし, そのための資料は十分ではなく, 特に地上 200m を越える高度での風速分布や地表面粗度に応じた風速の増減に関する情報は少ない。ドップラーソーダは, 高高度までの風速をほぼ同時に測定できるので, 風速のプロファイルが容易に得られるものと期待されており, 近年, これを用いた自然風の観測も多く行われている^{1), 2), 3), 4)}など。筆者らのグループでも, 複数のドップラーソーダを用いて, 地表面粗度の異なる複数地点における自然風の同時観測を続けており⁵⁾, それらの観測データから, 地表面粗度による風速の変化や風速プロファイルの相違を見いだそうとしている。

しかし, ドップラーソーダによる自然風観測結果から風速プロファイルを求めようとする場合, ドップラーソーダの性能や自然風の

特性を考慮して, 高高度まで観測できる適当な観測方法を定めることと, 観測データの適切な評価方法を採用することが重要である。ドップラーソーダの自然風観測への適用については文献⁶⁾でも検討されているが, このような目的に合った観測方法の指針は必ずしも明らかではない。また, 観測値から風速プロファイルを推定する方法については, これまでに検討例は見当たらない。

本報は, ドップラーソーダによる自然風観測から風速プロファイルを推定する場合に問題となる点を検討し, 適切な観測方法と評価方法を見出そうとしたものである。まず, 種々の観測条件による自然風観測を行い, ドップラーソーダを用いて高高度までの自然風観測を行うのに適切な観測条件を把握した。次いで, 時空間平均値として観測されるドップラーソーダの観測値から風速プロファイルを推定できるかどうかを, 解析的に検討した。その際の測定高度の評価についても検討している。また, 本研究では, 風速レベルごとに

*¹ 佐藤工業(株)中央技術研究所 主席研究員・工博

*² 東京工芸大学工学部建築学科 講師・工博

*³ 日本大学生産工学部 教授・理博

*⁴ 西松建設(株)技術研究所 研究員・工修

*⁵ (株)風工学研究所 所長・工博

*⁶ 京都大学防災研究所 助教授・工博

*⁷ 清水建設(株)技術研究所 部長・工博

*⁸ 都市基盤整備公団

*⁹ 東京工芸大学工学部建築学科 教授・工博

Research Head, Engineering Research Institute, Sato Kogyo, Dr. Eng.

Lecturer, Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Tokyo Institute of Polytechnics, Dr. Eng.

Prof., College of Industrial Technology, Nihon University, Dr. Sci.

Research Engineer, Technical Research Institute, Nishimatsu Construction, M. Eng.

Manager, Wind Engineering Institute, Dr. Eng.

Assoc. Prof., Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Dr. Eng.

General Manager, Institute of Technology, Shimizu Corp., Dr. Eng.

Urban Development Corp.

Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Tokyo Institute of Polytechnics, Dr. Eng.

多数の観測データを集計して、各高度の風速を評価する方法を採っているが、その際のデータ選別方法による風速プロファイル推定結果に及ぼす影響を検討し、適切なデータ選別方法を示した。また、強風時ほど、データの取得率が減減し、観測可能な高度が下ることが指摘されているが、その原因を風騒音に依るものと想定して、それが観測された風速プロファイルに及ぼす影響についても検討した。

2 ドップラーソーダを用いた自然風観測方法の検討

2.1 ドップラーソーダを用いた自然風観測の原理と観測条件設定上の問題

本研究では、自然風観測にモノスタティック方式ドップラーソーダ(AR-410 型 (株)カイジョー)を使用している。本方式の概念を図1に示す。ドップラーソーダはあるパルス幅の送信信号からの後方散乱波をある時間、受信した信号をもとに風速を推定するものである。ただし、モノスタティック方式は、3方向の各ビームをある間隔で順次、発信する方式である。

ドップラーソーダの受信パワー P_r は(1)式によって与えられる。

$$P_r = P_t \eta_t \eta_r \sigma(\pi) \cdot c \tau / 2 \cdot A_r L / R^2 \quad \dots\dots (1)$$

ここで、 P_t : 発信パワー、 η_t : 発信変換効率、 η_r : 受信変換効率、 $\sigma(\pi)$: 散乱断面積、 c : 音速(=340m/sと仮定)、 τ : 発信パルス幅、 A_r : アンテナ有効面積、 R : 散乱大気層までの距離、 L : 音波の大気による減衰率である。高高度までのデータを取得するには受信波のパワーを確保する必要がある、そのためには発信パワー P_t あるいは発信パルス幅 τ を大きくすれば良い。一方、モノスタティック方式ドップラーソーダにおける高度分解能は(2)式によって決まるので、発信パルス幅 τ を増大させると高度分解能の低下につながる。

$$\Delta h = c(\tau + \tau_F) / 4 \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 τ_F は1測定高度に対する受信時間である。

このため、本研究に使用するドップラーソーダでは、単一パルス方式に加えて、低高度を短パルス(パルス幅 τ_1)で、高高度を長パルス(パルス幅 τ_2)のビームで探査する、混合パルス方式が用意されている。混合パルス方式の概念は図2に示した通りである。

本研究では地上高度500m程度までのデータ取得を目指しているが、どちらのパルス方式が適当か、パルス幅をどう取るか、予め検討が必要である。また、送信波の周波数が高くなると距離減衰が大きくなり、測定可能高度が低下する。これは現地の暗騒音にも左右されるので、その大きさを考慮して、周波数と送信パワーを選択する必要がある。本システムでは、送信周波数は1600, 2400, 3200Hz、送信パワーは150, 400, 900Wの3通りに変えることができる。

2.2 ドップラーソーダの設定条件によるデータ取得率および風速観測値への影響(予備観測結果)

十分な高高度までの風速を取得するための観測条件を把握するため、ドップラーソーダの設定条件(送信方式、パルス幅、送信パワーおよび送信周波数)を変えた場合の、データ取得率および観測値への影響を、自然風の予備観測によって調べた。データ取得率とは10分間の観測数に占める有効観測数の割合と定義され、本観測では(3)式で定義する γ が10dB以上のものを有効観測としている。

$$\gamma = S(f_p) / \left\{ \sum_{i=1}^n S(f) / n \right\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $S(f_p)$ は受信波のピークのパワースペクトル、 $\sum_{i=1}^n S(f) / n$

は送信周波数 $\pm 10\%$ の周波数間の受信波の平均パワーである。観測場所は住宅地であり、東側を国道が通っている。観測時間は昼間で、天気は晴れまたは薄曇りであった。観測は、各ケースとも平均化時間を10分間、観測回数を各3回とし、連続した時間帯に行った。

(1) 単一パルス方式の場合 送信周波数を2400Hz、送信パワーを900Wとし、パルス幅を変えた場合について検討した。各高度での水平方向探査用のビームAおよびBのデータ取得率を、各観測ごとにプロットしたものを図3に示した。なお、データ取得率が30%程度未満の場合には、特異な風速が得られる場合があり、10分間平均風速としても不適切なデータになる恐れがあると考えられる。

図3に示す結果から、主として次の3点が確認できた。①400m以上の高度までのデータを取得するには、パルス幅を200msより大きくする必要がある。一方、高度100m以下のデータを取得するのは難しくなる。②高度200m程度以下のデータを取得するには、パルス幅を100ms以下とする必要がある。③したがって、高度500mまでの範囲のデータを取得するには、単一パルス方式では困難なようである。

(2) 混合パルス方式の場合 パルス幅を低高度用50ms、高高度用300msとし、送信周波数と送信パワーを変えた場合の観測結果を図4に示した。図中、 U 、 σ_u は水平主流方向の平均風速、標準偏差(本システムによる推定値)である。送信周波数1600Hzの場合(図4(a))、データ取得率は高度100m以下および300m以上では極めて小さい。送信パワーを最大の900Wとしているが、取得率の大きい中間高度でも、高々50%程度である。送信周波数3200Hzの場合(図4(b))は、データ取得率は低高度では大きくなるが、高度200m以上では50%を割り、高度の増加とともに急減し、300m以上では極めて小さくなる。送信パワーを大きくしても、300m程度までが限界のようである。2400Hz(図4(c),(d))では、データ取得率の大きな範囲が低高度からかなり高高度まで及ぶようになり、特に送信パワーを900Wにした図4(d)では観測値もよくまとまっている。ただし、500mからはデータ取得率が急減しており、この高度が測定の限

図1 モノスタティック方式ドップラーソーダの観測原理

図2 混合パルス方式の概念

図3 単一パルス方式の場合のパルス幅によるデータ取得率の相違
(送信周波数 2400Hz, 送信パワー 900W)

界であると考えられる。この結果から、パルス幅を低高度用 50ms, 高高度用 300ms とした場合は、高度 500m 程度までを測定対象とすると、送信周波数は 2400Hz が最も適当であることが分かる。この場合、送信パワーを 900W にすると、データ取得率は向上する。

上述の観測結果を踏まえ、また、予備観測時に比べて、強風時には S/N 比が低下する可能性が大きいことを考慮して、本研究では以下のような観測条件とすることとした。

- ・発信周波数 : 2400Hz
- ・パルス幅 : 短パルス…80ms, 長パルス…500ms
- ・測定高度 : 短パルス…40~100m, 長パルス…110~1100m
- ・受信時間 : 107ms
- ・高度分解能: 短パルス…19.125m, 長パルス…54.825m

図5 ドップラーソーダによる観測値の時空間平均の概念
(単一ビームと仮定)

図4 混合パルス方式の場合の観測条件によるデータ取得率, 観測値の相違
(混合パルス: 低高度用 50ms, 高高度用 300ms)

3 ドップラーソーダによる自然風観測値についての検討

3.1 ドップラーソーダによる平均風速の空間平均について

ここでは、簡単のため、ドップラーソーダからの送信波を単一ビームと仮定して検討する。その概念は図5に示すようになる。したがって、他の要因の影響を除いて単純化して考えると、ドップラーソーダにおける観測値は、図5に示す時空間からの情報に基づくものであり、図5に示す重み付き空間平均を求めていることになる。このような観測値から風速プロファイルが得られるかを検討した。

ここでは、水平風速のプロファイルがべき法則に従うと仮定し、各高度における風速を上記の重み付き空間平均値として算出し、これと真値との比を求める。本仮定に基づく、各高度 Z_m における水平風速の重み付き空間平均値 U_m は(4)式で求めることができる。

(a) $\tau < \tau_F$ の場合 (b) $\tau = \tau_F$ の場合 (c) $\tau > \tau_F$ の場合
図6 空間平均の重み関数 W_Z

$$U_m = \int_{Z_L}^{Z_U} U_Z \cdot W_Z dZ = \int_{Z_L}^{Z_U} U_{Z_m} (Z/Z_m)^\alpha \cdot W_Z dZ \quad \cdots (4)$$

ただし、 U_Z ：地上高度 Z (m)における平均風速(m/s)

$$(\quad = U_{Z_m} (Z/Z_m)^\alpha)$$

U_{Z_m} ：地上高度 Z_m (m)における平均風速(m/s)

α ：水平風速プロファイルのべき指数

W_Z ：地上高度 Z (m)における空間平均の重み関数

Z_U, Z_L ：空間平均の上限高度および下限高度

空間平均の重み関数 W_Z は、パルス幅 τ に依存し、受信時間 τ_F に対する長短によって、図6のようになる。

各高度 Z_m における水平風速の重み付き空間平均値 U_m と真の値 U_{Z_m} との比を算定した結果を表1に示した。低高度や発信パルス幅が大きくなった場合には、若干、真値とは外れるが、ほぼ真値に近い値が得られるものと判断できる。したがって、十分な精度で、高高度までの観測値が得られれば、ドップラーソーダによる観測によって、風速プロファイルを推定することは可能であると考えられる。

3.2 ドップラーソーダの測定高度について

3.1節では、音波の距離減衰を無視して検討を行った。しかし、ドップラーソーダの受信パワーは音波の散乱領域までの距離の2乗に反比例するので、広い散乱領域からの散乱波を受信した場合には、受信波は対象領域内の低高度からの散乱波の影響をより強く受けることになる。このことを考慮すると、測定高度の設定は見直す必要があるものと考えられる。本節では、音波の距離減衰を考慮した場合、実質的な測定高度がどのように評価されるかを検討した。

(1) ドップラーソーダの測定高度について

(1)式の分子の各項を時間と高度に依存しない定数であると仮定すると、以下のように書き換えることができる。

$$P_r = B \cdot c \tau / 2 Z^2 \quad \cdots (5)$$

ただし、 B は定数であり、 $B = P_t \eta_t \eta_r \sigma(\pi) \cdot A_r L$ である。

微小時間 $d\tau$ 間の発信パルスに対する、高度 Z からの後方散乱で得られる受信パワーへの寄与分を dP_r とすると、(6)式が成立する。

$$dP_r = (B \cdot c / 2 Z^2) \cdot d\tau \quad \cdots (6)$$

図7のように時刻 t_0 に長さ τ のパルスが発信されたとき、時刻 t_A における受信パワー P_r は、 $Z = c(t_A - t) / 2$ 、 $dZ = -(c/2) d\tau$ 、 $Z_1 = c(t_A - t_0) / 2$ 、 $Z_2 = c(t_A - \tau - t_0) / 2$ であるので、(7)式となる。

表1 ドップラーソーダによる水平風速観測値/真値 (U_m/U_{Z_m})

(a) べき指数 $\alpha = 0.15$ の場合

		パルス幅 τ (ms)						
		$1/2 \tau_F$	τ_F	$3/2 \tau_F$	$2 \tau_F$	$5/2 \tau_F$	$3 \tau_F$	$7/2 \tau_F$
測定高度 Z (m)	$c \tau_F$	0.998	0.997	0.995	0.993	0.989	0.983	測定不可
	$2c \tau_F$	1.000	0.999	0.999	0.998	0.998	0.997	0.997
	$3c \tau_F$	1.000	1.000	1.000	0.999	0.999	0.998	0.998
	$4c \tau_F$	1.000	1.000	1.000	1.000	0.999	0.999	0.999
	$5c \tau_F$	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.999
	$6c \tau_F$	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

(b) べき指数 $\alpha = 0.30$ の場合

		パルス幅 τ (ms)						
		$1/2 \tau_F$	τ_F	$3/2 \tau_F$	$2 \tau_F$	$5/2 \tau_F$	$3 \tau_F$	$7/2 \tau_F$
測定高度 Z (m)	$c \tau_F$	0.997	0.995	0.992	0.988	0.982	0.972	測定不可
	$2c \tau_F$	0.999	0.999	0.998	0.997	0.996	0.994	0.992
	$3c \tau_F$	1.000	0.999	0.999	0.999	0.998	0.998	0.997
	$4c \tau_F$	1.000	1.000	1.000	0.999	0.999	0.999	0.998
	$5c \tau_F$	1.000	1.000	1.000	1.000	0.999	0.999	0.999
	$6c \tau_F$	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.999	0.999

ただし、 τ_F ：受信時間(ms)， c ：音速 (=340m/s)

$$P_r = \int_{t_0}^{t_0+\tau} dP_r = \int_{Z_1}^{Z_2} (-B/Z^2) dZ = B(1/Z_2 - 1/Z_1)$$

$$= B c \tau / 2 Z_1 Z_2 \quad \cdots (7)$$

(5)式と(7)式を比較すると、時刻 t_A における受信パワーの測定高度は、 $(Z_1 + Z_2) / 2$ ではなく、

$$Z = \sqrt{Z_1 \cdot Z_2} \quad \cdots (8)$$

とするのが合理的であることが分かる。この両者の差は Z_1 と Z_2 の大きさとその差に依存し、その差は発信パルス長に依存する。

ドップラーソーダは受信時間 τ_F の間、連続的に信号を受信する。

図7 ドップラーソーダの観測高度

表2 測定高度の補正值

測定高度 (m)	補正高度 (m)	測定高度 (m)	補正高度 (m)	測定高度 (m)	補正高度 (m)
40	39.4	160	154.2	460	458.0
50	49.5	180	174.9	500	498.2
60	59.6	200	195.4	550	548.4
70	69.7	220	215.8	600	598.5
80	79.7	250	246.4	650	648.6
90	89.7	280	276.7	700	698.7
100	99.8	310	307.1	750	748.8
110	101.3	340	337.3	800	798.9
120	112.1	380	377.6	900	899.0
140	133.3	420	417.8	1000	999.1

図8 ドップラーソーダによる風観測結果より求めた風速プロファイル

図9 高度補正後の風速プロファイル

各瞬時の受信信号に対応する高度は刻々変化する。したがって、各瞬時の受信信号に対応する高度を上記の方法で求めて、その平均値を受信時間 τ_F 間の観測の測定高度とすることが合理的である。

本研究では、混合パルス方式を用いるが、たとえば、図8に示した例のように、観測結果には、長パルスと短パルスのつなぎの高度である 100m のところで観測値の不連続が見られるが、上述のことをこのような問題の生じる一因として考えることができる。特に大きなシアアのある時に、不連続が大きくなっている。

(2) 測定高度の補正

発信パルス幅を小さくすると、測定領域が狭くなり、高度分解能が良くなる。一方、発信パルス幅を大きくするとデータ取得率を向上させることができる。それぞれの長所を生かすために、低高度を短パルス、高高度を長パルスで測定するのが混合パルス方式である。

前述の本研究での測定条件に対する測定高度の補正値を表2に示した。長パルスでの測定高度範囲の内、低高度に対する高度補正量が大きくなっている。

(3) 測定データの解析例とその測定高度

図8に示した結果を表2の値を用いて測定高度補正した結果を図9に示した。測定高度補正により風速プロファイルは幾分滑らかになり、まだ完全な補正にはなっていないが、不連続がある程度は解消されている。

4 風速レベル別風速プロファイルに及ぼすデータ選別方法の影響

ドップラーソーダで計測された各高度の 10 分間平均風速から、風速プロファイルの評価するに当たり、本研究では、各時刻ごとのプロファイルはかなりのばらつきを有する⁷⁾ことを考慮して、風向・風速により選別したデータから、風向および風速レベル別にアンサンブル平均を取る方法を採用してきた⁵⁾。しかしながら、データの選別を代表高度の風速によって行うとすると、条件付き期待値の考えに基づけば、得られる風速プロファイルは代表高度 Z_R のとり方に依存することが予想される。ここでは、代表高度での風速によって選別することが風速プロファイルの推定に及ぼす影響を明らかにし、風速レベル別の風速プロファイルを集計する方法について検討した。

4.1 風速レベル別風速プロファイルの推定

風速プロファイル u_Z の標本が多数得られているとき、代表高度 Z_R での風速 u_R が u^* となる場合を選別して平均し、風速レベル別の風速プロファイル U_Z^* を求めることを考える。ここで、 u_Z が (9)

式のように同時正規分布に従うものとする。

$$\begin{bmatrix} u_Z \\ u_R \end{bmatrix} \approx N \left(\begin{bmatrix} U_Z \\ U_R \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \sigma_Z^2 & \gamma_{ZR} \sigma_Z \sigma_R \\ \gamma_{ZR} \sigma_Z \sigma_R & \sigma_R^2 \end{bmatrix} \right) \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここで、 U_Z , σ_Z はそれぞれ u_Z の平均値および標準偏差、 U_R , σ_R はそれぞれ u_R の平均値および標準偏差、 γ_{ZR} は u_Z と u_R の相関係数である。また、 $N(\mu, \Sigma)$ は平均値ベクトル μ 、共分散行列 Σ の正規分布に従うことを表している。同時正規分布の性質より、 U_Z^* は条件付き期待値として (10) 式で推定される。

$$U_Z^* = U_Z + \frac{\gamma_{ZR} \sigma_Z}{\sigma_R} (u^* - U_R) \quad \dots\dots\dots (10)$$

4.2 指数モデルを用いた考察

はじめに非常に簡単なモデルを用いて集計方法の影響について検討する。ここでは (11) 式のような指数モデルを考える。

$$\frac{U_Z}{U_R} = \left(\frac{Z}{Z_R} \right)^\alpha, \frac{\sigma_Z}{\sigma_R} = \left(\frac{Z}{Z_R} \right)^\beta \quad \dots\dots\dots (11)$$

上式を (10) 式に代入すれば、直ちに (12) 式を得る。

$$U_Z^* = U_Z + \gamma_{ZR} \left(\frac{Z}{Z_R} \right)^\beta (u^* - U_R) \quad \dots\dots\dots (12)$$

(12) 式の右辺第2項が、真の風速プロファイル U_Z からの歪みを表わしている。

べき指数 α , β , 相関係数 γ_{ZR} およびデータ選別風速 u^* を以下のように仮定した U_Z^* の計算例を図10に示した。

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= 0.1, \beta = -0.05, \\ \gamma_{ZR} &= \exp\left(-\frac{|Z - Z_R|}{K}\right), u^* = 1.5 U_R \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots (13)$$

ここで、 K は平均風速 u_Z の Z_R 付近での鉛直方向の相関長に相当する。図からわかるように、通常の場合のような相関を仮定した $K=200$ m の場合には、代表高度 $Z_R=100$ m で極大値を持つプロファイルが得られる。これは、(13) 式のように選別風速 u^* として代表高度での平均風速 U_R より大きな値を仮定したからである。 U_R より小さな値を仮定すれば、 $u^* - U_R < 0$ となり、(12) 式から推定できるように、 $Z_R=100$ m で極小値を持つような分布となる。(12) 式から分かるように、この傾向は鉛直方向の風速の相関係数 γ_{ZR} が大きくなる程、つまり、相関長 K が小さくなる程、顕著になる。

なお、当然のことであるが、完全相関 ($\gamma_{ZR}=1$, $K=\infty$) の場合

図10 指数モデルを用いた選別集計の例

図11 代表高度で選別集計した風速プロファイル

図12 全高度の平均風速で選別集計した風速プロファイル

も真の平均風速プロファイルと同じ指数勾配のプロファイルにはならない。この例のように $u^* > U_R$ の場合、 $\alpha > \beta$ の時は真の平均風速プロファイルのべき指数 α よりも小さい勾配になり、反対に $\alpha < \beta$ の時は真の平均風速プロファイルのべき指数 α よりも大きい勾配のプロファイルを推定することになる。 $u^* < U_R$ の場合は逆になる。

4. 3 実測値による検討

ドップラーソーダで実測された 10 分間平均風速のプロファイルを標本 u_Z として、同様の検討を行う。ここでは代表高度での風向が南となるデータを対象とし、「高浜台観測点」⁸⁾ の 985 標本および「平塚観測点」⁹⁾ の 1806 標本を用いた。このような標本群から、風速レベル別集計の例として、代表高度の風速が $10 \leq u_R < 15 \text{ m/s}$ となる標本を選別して集計した結果が図 1 1 である。図中には、 $u^* = 12.5 \text{ m/s}$ とし、(1 2) 式に U_Z 、 σ_Z 、 γ_{ZR} の観測値を代入して求めた推定値も併せて示した。いずれの観測点でも集計値と推定値の傾向は良く一致しており、(1 2) 式による推定は概ね成立することが分かる。高浜台では、図 1 0 の数値例と同様に、代表高度付近で最大値を持つプロファイルとなっており、集計方法の影響が大きく現れていると見られ、真のプロファイルから歪んでしまっていると考えられる。平塚についても高高度における風速の減少傾向をみてとることができる。

4. 4 観測値の集計方法の提案

以上のように、特定の代表高度での風速によりデータを選別する方法は、真のプロファイルから歪んだプロファイルを推定する恐れがあり、強風時の風速プロファイルを集計する方法として適切ではない。従来は代表高度 $Z_R = 100 \text{ m}$ をはさむ高度 $50 \sim 180 \text{ m}$ の平均風速により選別を行ってきた⁵⁾。この方法ではかなりの高度領域での平均値をとっているため、前述の図 1 0 のような極端な歪みはないものと思われるが、より慎重を期して、本研究では全高度の平均風速による選別をすることとした。図 1 2 は観測している全高度（高度 420m まで）の平均風速が 10 m/s 以上となる標本を選別集計して得られた風速プロファイルである。

5 推定される平均風速プロファイルに及ぼす風騒音の影響

ドップラーソーダによる風観測結果から、強風時ほど、データ取得率が通減し、観測可能な高度が下ることが指摘されており⁷⁾、観測された風速プロファイルへの影響が懸念される。取得率低減の原因として容易に想起できるのが、風速に伴って増加すると予測される風騒音である。ここでは、ドップラーソーダのデータ取得や観測値への風騒音の影響について検討を試みた。推論を容易にするためにいくつかの仮定や簡略化を行っているが、本論の主旨を歪めるものではないことは、ある程度の幅を持った考察により確かめている。

5. 1 風速によるデータ取得率の変化

海岸における自然風観測結果⁸⁾ から、各観測高度におけるデータ取得率 β の出現確率を風速レベルごとにまとめたものを、図 1 3 に示した。なお、ここでは、風速のレベル分けはデータ取得率の大きい高度 $110 \sim 140 \text{ m}$ 間の平均風速によっている。

図 1 3 によると、高度とともにデータ取得率が通減することのほかに、風速が増す程、全高度に渡って取得率が低下し、特に高高度では取得率の低減が大きいことが分かる。これまで、超音波風速計との比較観測によって、ドップラーソーダでは 20% 以上の取得率があれば、ほぼ真値に近似する観測値が得られる⁶⁾ とされ、多くの観測でもこれを基準に観測データが纏められている。ノイズがランダムに生じるのであれば、このように求めた期待値は真値に近似すると期待できる。しかし、図 1 3 の結果は、何らかの系統的なノイズが影響していることを示唆している。文献 6) は、高度 200m までの範囲での比較観測によって、ドップラーソーダの観測精度を検討しているもので、より高高度については確認されておらず、上記のようなデータの扱い方では、推定される風速プロファイルにもこれらのノイズが影響を及ぼす可能性が危惧される。

5. 2 ドップラーソーダによる観測と風騒音の関わり

ドップラーソーダでは、送信波の後方散乱波を次々と受信することによって、上空までの風速の情報を得ている。したがって、ドップラーソーダによる観測中は、目的の後方散乱波とともに、常に地表付近から上空までの風騒音も同時に受信している（図 1 4）。観測対象を高高度までとしても、1 回の観測の所要時間は数秒であるので、この間、平均風速プロファイル等に変化がないと考えて、各観測対象高度の受信波中の風騒音のパワーは一定と考えることとし、

(a) $5 \leq U < 10 \text{ m/s}$ (データ数 1555) (b) $10 \leq U < 15 \text{ m/s}$ (データ数 327) (c) $15 \leq U < 20 \text{ m/s}$ (データ数 13)
図 1 3 風速レベルごとのデータ取得率の出現確率の高度変化 (高浜台, アンテナ A (東向き), 風向: 南)

図14 風騒音の発生・伝播と受信

また、風騒音の発生源には様々のものを想定しうが、ここでは簡単に、そのパワーは(14)式で表される¹⁰⁾と考えることにする。

$$P_w = C \times U^\eta \quad \dots\dots\dots (14)$$

ここで、 U は任意の基準高度での風速である。定数 C は観測地の条件が定まれば、風向、すなわち、風速プロファイルのみに依存する。したがって、風向を限れば、風騒音の大きさは風速のみに依存して増加することになる。

5.3 データ取得可能な限界風速

ドップラーソーダの受信波のパワーを、図15に示すように、後方散乱波、暗騒音(風騒音を含まない)と風騒音に分離して考えると、

$$\gamma_Z = \{S_Z(f_p) + N_B + N_W\} / \{N_{D,Z} + N_B + N_W\} \quad \dots\dots (15)$$

ここで、 $S_Z(f_p)$ は高度 Z での後方散乱波のピークのパワースペクトル、 $N_{D,Z}$ 、 N_B 、 N_W はそれぞれ後方散乱波、暗騒音、風騒音の平均パワーである。なお、対象帯域 $f_1 \sim f_N$ は狭く、その間の風騒音のパワーは、周波数に依る変化が小さいと考えられるので、ここでは、周波数に依らず一定と仮定して検討する。

風速 0m/s の時、高度 $Z_{\max}$ までデータ取得可能であると、 $N_{D,Z_{\max}} = d \cdot S_{Z_{\max}}(f_p)$ 、 $N_B = b \cdot S_{Z_{\max}}(f_p)$ とおくと、有効観測を $\gamma \geq 10$ としているので、(16)式が導かれる。

$$\begin{aligned} \gamma_{Z_{\max}} &= \{S_{Z_{\max}}(f_p) + N_B\} / \{N_{D,Z_{\max}} + N_B\} \\ &= (1 + b) / (d + b) = 10 \quad \dots\dots\dots (16) \end{aligned}$$

高度 Z でも後方散乱波のピークのパワーと平均パワーの比が一定

図16 限界風速の試算結果 ($Z/Z_{\max} = 0.3$ での限界風速を1として表示した) 図17 変動風速の確率分布 $f(u)$ と限界風速 $U_{Z,\max}$ (a) 風騒音の影響のない場合 (b) 風騒音の影響のある場合
図15 受信波のパワー・スペクトル

である($N_{D,Z} = d \cdot S_Z(f_p)$)とし、音波の距離減衰を考慮すると、(17)式が成立する。

$$S_Z(f_p) = S_{Z_{\max}}(f_p)(Z/Z_{\max})^{-2}, N_{D,Z} = N_{D,Z_{\max}}(Z/Z_{\max})^{-2} \quad \dots\dots\dots (17)$$

したがって、風騒音が加わった場合のデータ取得条件は、(16)式を考慮すると、(18)式となる。

$$\begin{aligned} \{S_Z(f_p) + N_B + N_W\} / \{N_{D,Z} + N_B + N_W\} &\geq 10 \\ S_{Z_{\max}}(f_p)(1 - 10d) \{(Z/Z_{\max})^{-2} - 1\} &\geq 9N_W \\ \therefore (Z/Z_{\max})^{-2} - 1 &\geq C' U^\eta \quad \dots\dots\dots (18) \end{aligned}$$

(18)式より、各高度でのデータ取得可能な限界風速の比 k を求めて、図16に示した。高度が上がるにつれて、限界風速が遞減すること、すなわち、高風速時のデータ取得の困難さが窺われる。

5.4 データ取得率と風速観測値の期待値

高度 Z_0 でデータ取得率が100%になる風速の上限値を $U_{Z0,\max}$ とすると、平均風速観測値 U_{Z0} の期待値は真値 U_{Z0} に一致する。

$$E[\beta] = 1, \quad E[U_{Z0}] = U_{Z0,\max} = U_{Z0} \quad \dots\dots (19)$$

この時、任意高度 $Z(>Z_0)$ では、図17のようになり、

$$E[\beta] = \int_0^{u_{Z,\max}} f(u_Z) du_Z < 1 \quad \dots\dots (20)$$

$$E[U_Z] = \int_0^{u_{Z,\max}} u_Z f(u_Z) du_Z < U_Z \quad \dots\dots (21)$$

図18 データ取得率 β と平均風速観測値の期待値 $E[U_Z]$ ($Z_{\max} = 1000\text{m}$, $Z_0 = 300\text{m}$, 粗度区分IIの場合)

明らかに、観測値 U_Z の期待値は真値 U_z を下回る。ここで、 $u_z = U_z + u_z'$ と書き、 $f(u_z'/\sigma_z) = f(u_{z0}'/\sigma_{z0})$ と仮定すると、

$$E[\beta] = \int_{-g}^g f(u_z'/\sigma_z) d(u_{z0}'/\sigma_{z0}) \quad \cdots \cdots (22)$$

$$E[U_Z] = U_z \int_{-g}^g f(u_z'/\sigma_z) d(u_z'/\sigma_z) + \sigma_z \int_{-g}^g (u_z'/\sigma_z) f(u_z'/\sigma_z) d(u_z'/\sigma_z) \\ < U_z \int_{-g}^g f(u_z'/\sigma_z) d(u_z'/\sigma_z) = U_z \cdot E[\beta] \quad (23)$$

ただし、 $g = -u_{z,\min}'/\sigma_z$ 、 $\varepsilon = u_{z,\max}'/\sigma_z < g$ である。変動風速の確率分布を正規分布と仮定すると、(24)式となる。

$$E[U_Z] = U_z \{E[\beta] - (\sigma_z/U_z) e^{-\varepsilon^2/2} / \sqrt{2\pi}\} \quad (24)$$

したがって、観測値の期待値は、高々、真値に取得率の期待値を掛けた程度であることになる。ここで、

$$U_z = U_{z0} (Z/Z_0)^\alpha, u_z = u_{z0} (Z/Z_0)^\alpha \\ I_z = 0.1 (Z/Z_0)^{-\alpha-0.05} \quad \cdots \cdots (25)$$

とすると、(26)式が導かれる。

$$\varepsilon = 10(Z/Z_0)^{\alpha+0.05} \{k(Z/Z_0)^{\alpha-\alpha} - 1\} + kg_{z0}(Z/Z_0)^{0.05} (Z/Z_0)^\alpha \\ \cdots \cdots \cdots (26)$$

ここで、 k は高度 Z_0 および Z における限界風速の比である。さらに $\alpha' = \alpha$ と仮定して、(26)、(22)、(24)式より、 ε 、 $E[\beta]$ 、 $E[U_Z]/U_z$ を試算した例を図18に示した。高度 Z_0 を超えると、データ取得率と観測値の期待値は急激に低下することが分かる。

5.5 風速プロファイルへの影響

ドップラーソーダの観測値に対する風騒音の影響について、単純化したモデルによる試算を行った。この結果によれば、風速が増すにつれて、高高度でのデータ取得率は通減し、それに伴い、選別集計した高高度における風速観測値は真値よりも小さく評価される傾向があることが分った。このように、風騒音の影響は無視できず、また、系統的な誤差をもたらすので、観測される風速プロファイルの形状もその影響を受ける可能性がある。したがって、風速のプロファイルを評価する際には、この点についても考慮が必要である。

6 おわりに

ドップラーソーダを用いた自然風観測結果から、風速のプロファイルを求める場合の問題点を検討した。高高度までの風速を観測するための適切な観測条件、真の風速プロファイルに相当する風速が時空間平均値として採取されるドップラーソーダの観測値から得られるかどうかの検討、および、風速レベルごとに風速プロファイルを推定する際に、風速レベル分けをするためのデータ選別方法による推定結果への影響に関する検討、風速とともに増大すると考えられる風騒音による観測値と風速プロファイルへの影響に関する検討である。その結果、次のような事柄が明らかになった。

- ① 高度 500m 程度までの高度範囲の風速を観測するには、ドップラーソーダの送信条件は、短パルス幅が 50~80msec、長パルス幅が 300~500msec の混合パルス方式とし、送信周波数は 2400Hz とするのが最も適切である。送信パワーは大きくする方がよい。
- ② ドップラーソーダの観測値はある空間領域の平均値であり、各

高度での局所的な風速ではないが、十分な精度の観測値が得られれば、その風速プロファイルは真のプロファイルに近いものになる。

- ③ ドップラーソーダによる測定高度は、音波の距離減衰を考慮して、補正する必要がある。

- ④ 代表高度における風速によりデータを選別・集計する方法は、当該高度付近で真のプロファイルを歪める恐れがあり、風速プロファイルを求める方法として適切ではない。このような影響を取り除くには全高度の平均風速によって選別・集計する方法が望ましい。

- ⑤ 強風になると風騒音の影響が大きくなり、高高度でのデータ取得率が徐々に通減し、測定可能な高度が低下する。これに伴って、風騒音の影響を受けた風速観測値の期待値はデータ取得率の平均値とともに低減すると推定される。したがって、得られる風速プロファイルの形状も、風騒音の影響を受ける可能性がある。

謝辞 本研究は大気境界層研究会において 1994年9月から実施している。本論文の内容は、本研究会の議論に基づいていることを記し、謝意を表します。著者のほかのメンバーは次の通りである。

藤井邦雄（風環境リサーチ）、宮下康一（風工学研究所）、小林康之・佐々木亮治（西松建設）、上江州清（都市基盤整備公団）

【参考文献】

- 1) 天野輝久, 大熊武司, 川口彰久, 後藤暁: ドップラーソーダによる沖縄における台風時の風観測値, 日本風工学会誌, 第 67 号, pp.9-14, 1996
- 2) 鄭永培, 神田順, 内藤玄一, 高倉秀一: 市街地における複数ドップラーソーダによる上空風観測, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.111-112, 1996
- 3) 高倉秀一, 赤林伸一, 須山喜実: 音波を利用した市街地上空の風の観測 沿岸部（新潟市）及び内陸部（新潟市）の市街地における鉛直プロファイルの測定結果, 日本風工学会誌, 第 62 号, pp.35-44, 1995
- 4) 日比一喜, 神田順, 桂順治: ドップラーソーダによる台風時の風速鉛直分布の実測, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.121-122, 1994
- 5) 須田健一, 佐々木淳, 藤井邦雄, 小林康之, 上江州清, 田村幸雄: ドップラーソーダを用いた地表付近の平均風速の鉛直分布に関する研究, 第 14 回風工学シンポジウム論文集, pp.7-14, 1996
- 6) 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: 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, 第 33 号, 第 8 号, pp.19-29, 1986
- 7) 須田健一, 小林康之, 藤井邦雄, 岩谷祥美, 佐々木淳, 石橋龍吉, 田村幸雄: ドップラーソーダを用いた地表面粗度の異なる地点の風速鉛直分布に関する研究(その 1 平均風速鉛直分布の評価方法に関する検討), 日本風工学会誌, 第 71 号, pp.39-40, 1997
- 8) 石橋龍吉, 藤井邦雄, 佐々木淳, 須田健一, 日比一喜, 田村幸雄: ドップラーソーダを用いた地表面粗度の異なる地点の風速鉛直分布に関する研究(その 10 海岸での自然風観測結果), 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.235-236, 1998
- 9) 中村修, 小林康之, 佐々木淳, 藤井邦雄, 須田健一, 石橋龍吉, 田村幸雄: ドップラーソーダを用いた地表面粗度の異なる地点の風速鉛直分布に関する研究(その 11 沿岸住宅地での自然風観測結果), 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.237-238, 1998
- 10) Lighthill, M.J.: On sound generated aerodynamically, I. General theory, Proc. R. Soc. London, A211, pp.564-587, 1952

(2001年4月25日原稿受理, 2001年7月19日採用決定)