

ドップラーソーダによる山岳地での上空風観測

堀口 光章・光田 寧

WIND OBSERVATION OVER THE MOUNTAINOUS REGION BY A DOPPLER SODAR

By *Mitsuaki Horiguchi* and *Yasushi Mitsuata*

Synopsis

The vertical structure of wind over the mountainous region are studied using a Doppler sodar. Field observations were made near the test power transmission line (Tsuruga Test Line). In the case of northerly wind with average speed of 12~16 m/s, the profile of wind speed shows a maximum value around 40 m from the surface. It is considered that the wind is intensified by convergence near the slope surface of the mountain. The wind direction near the surface is shifted by the slope to north-south direction which is perpendicular to the ridge line. Northerly wind above the ridge blows with upward component by the effect of the slope.

1. はじめに

山岳地のような複雑な地表面起伏をもった場所の上空を吹く風は、地形による影響を受けて、平坦な場所とは大きく異なった鉛直構造を示すと考えられる。地形の影響が具体的にどのような形で現れるかを調べることは、そのような山岳地に建設される構造物たとえば送電線への風圧加重を検討する上でも重要な課題である。

山岳地上空の風を鉄塔などにより測定することが行われているが、おのずから測定出来る高さが制限される。地上から音波により上空数 100 m 程度までの風の鉛直分布の観測を行うことが出来るドップラーソーダを使用すれば、山岳地上空での風の鉛直構造をかなり高いところまで詳細に調べることが可能となる。

関西電力の実験用送電線である敦賀試験線は福井県と滋賀県との県境付近の山岳地にあり、そこではプロペラ型風速計などにより風観測が行われてきている^{1), 2)}。そこでの風の鉛直構造は高さ 62 m の鉄塔に設置されたプロペラ型風速計により調べられているが、より高い高度まで詳細に風の鉛直分布を調べるために、1989 年 12 月にドップラーソーダが敦賀試験線のすぐ脇のほぼ稜線上に設置され、1990 年 2 月より観測が開始された。

2. 敦賀における気象観測とドップラーソーダの概要

2.1 敦賀試験線での気象観測

観測を行った敦賀試験線は Fig. 1 に示すように琵琶湖の北側、福井県と滋賀県の県境にまたがる山岳地の中で、東西に延びる稜線に沿って設置されている。その標高はおよそ 600 m から 800 m で、西から東に次第に高くなっている。ここはまた、日本海側と琵琶湖側を隔てる分水嶺でもある。

観測地付近の詳細な地形は Fig. 2 に示す通りであるが、試験線が設置されている稜線の北と南は深い谷

を伴った険しい斜面となっている。敦賀試験線は水平距離 700 m の間を 3 基の鉄塔で張られた試験送電線であるが、西の端の 1 号鉄塔から中央の 2 号鉄塔を経て東の端の 3 号鉄塔までは標高差が約 180 m ある。またその向きは厳密には東西方向から時計回りに約 10 度ずれた方向に延びている。

Fig. 2 に書き込まれている太い破線は稜線を示しており、1 号鉄塔から 2 号鉄塔にかけて試験線はほぼ稜線に沿っており、2 号鉄塔から 3 号鉄塔にかけてはやや稜線より北側にあたっている。

気象観測は 1 号から 3 号の鉄塔、P1 から P13 までの観測柱および観測本館において行なわれており、風観測のためには合計 19 台のプロペラ型風速計、7 台のプロペラ型風向風速計、4 台のプロペラ型鉛直風速計、および 4 台の超音波風速計が設置されている。また、その他の気象観測のために白金抵抗温度計、水晶温度計、水晶露点計、気圧計、超音波積雪深計および雨量計が使用されている。

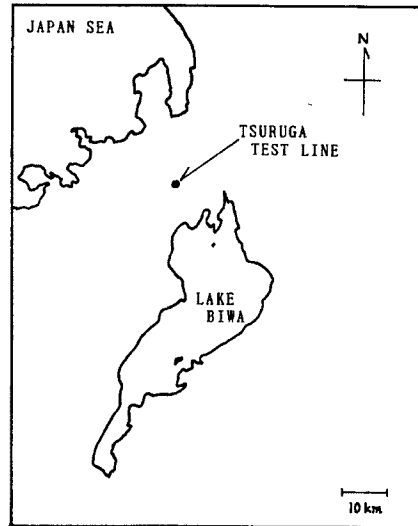


Fig. 1 Location of the Tsuruga Test Line.

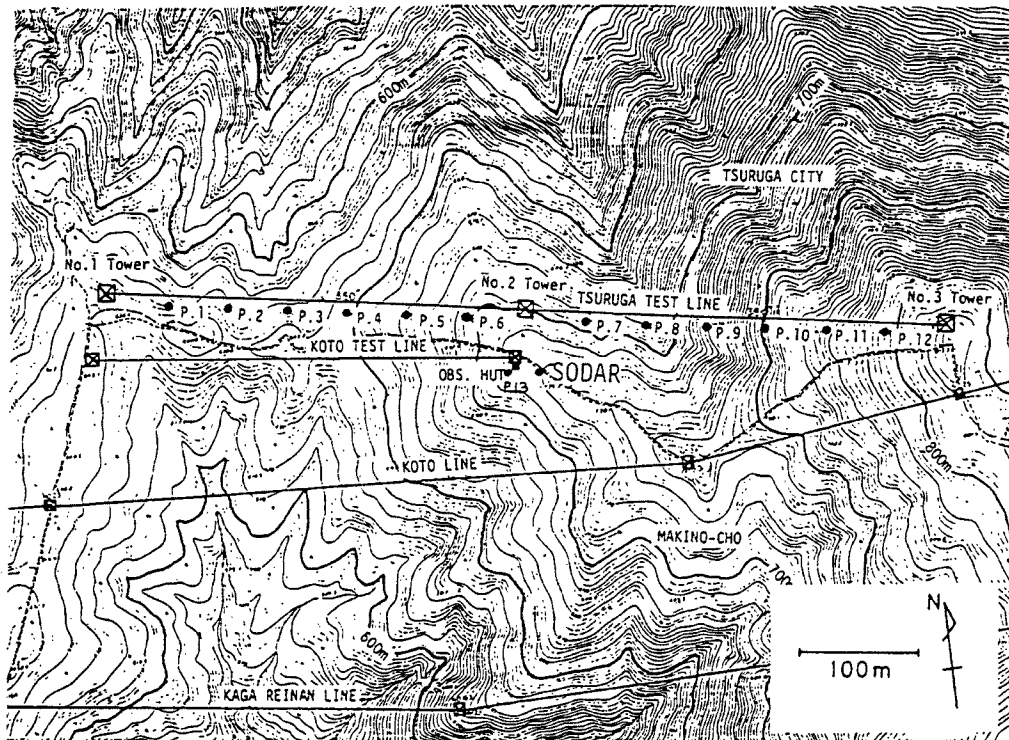


Fig. 2 Detailed map around the Tsuruga Test Line. No.1-No.3 towers are main towers of the test line. P.1-P.13 are observation poles. The thick broken line shows the ridge line near the test line. The solid circle denoted by "SODAR" shows the position of the Doppler sodar.

2.2 ドップラーソーダ

ドップラーソーダは音波を使って地上から上空数 100 m 程度までの風の観測を行うリモートセンシング装置である。このドップラーソーダとはドップラー効果による周波数偏移から風速を求めることが出来るソーダという意味である。なお、ソーダ (SODAR) は、音波レーダとも言い、SOund Detection And Ranging から作られた言葉で、対流圏下部主に大気境界層を観測対象として地上から上空に向けてパルス音波を発射し、上空で気温や風速の変動領域により散乱された音波を受信して反響源までの距離ならびにその様相を探知する装置のことである。

ドップラーソーダには送受波器を地上の一点に配置し上空の 3 方向に音響ビームを向けるモノスタティック方式と、地上に 3 組の送受波器を離して配置し上空の同一点に 3 方向から音響ビームを向けるバイスタティック方式がある。敦賀試験線で使用しているドップラーソーダはモノスタティック方式のもので、3 台の送受波器をそれぞれ南向き、西向き、鉛直上向きに設置して、それぞれのビーム軸方向の風速成分を後方散乱波のドップラー周波数偏移を FFT (高速フーリエ変換) 法によって検出することから求め、さらに水平風速、風向、鉛直風速に変換している。このドップラーソーダの主な仕様は **Table 1** に示す通りであり、1989 年 12 月に敦賀試験線に輸送され、観測本館東側のほぼ稜線上の **Fig. 2** に示される場所に設置された。その後試験観測や調整が行われ、1990 年 2 月より本観測が開始された。

プロペラ型風速計などとは異なり、ドップラーソーダはその音響ビームの空間的広がりの中での平均的な風速を求めるものであり、また時間的にも平均操作を行っている。このドップラーソーダでの音響ビーム幅は約 10 度であるから、例えば高度 160 m においては 30 m 近い広がりになり、時間的には 10 分間での平均操作を行っている。さらに水平風速と風向を求める時に、南向きと西向きのビーム間での風の一様性を仮定している。ビーム間の水平距離は、例えば高度 160 m では約 70 m にもなる。取得されたデータを扱う時には、このようなドップラーソーダの特質を充分考慮する必要がある。

Table 1. Specifications for the Doppler sodar

Observation method	Triple monostatic
Antenna type	Offset parabola reflector
Reflector diameter	0.9 m
Transmission frequency	2400 Hz
Transmission power	300 W
Transmission pulse duration	54 msec
Pulse repetition interval	4 sec
Sound beam width	~10 deg
Zenith angle of slantwise antennas	20 deg
Observation heights	30~250 m
Observation values	1) Mean wind speed, wind direction and vertical velocity 2) Standard deviation of wind speed toward the antenna beams
Doppler detection method	Power spectrum estimate by FFT
Averaging time	10 min

3. 観測結果

3.1 風速・風向の鉛直分布

ドップラーソーダにより水平風速と風向の鉛直分布を連続的に観測した例として、1993 年台風 13 号が日本海を通過した時の風の鉛直分布の時間変化を **Fig. 3** に示す。9 月 3 日 14 時から 9 月 5 日 1 時頃までの時

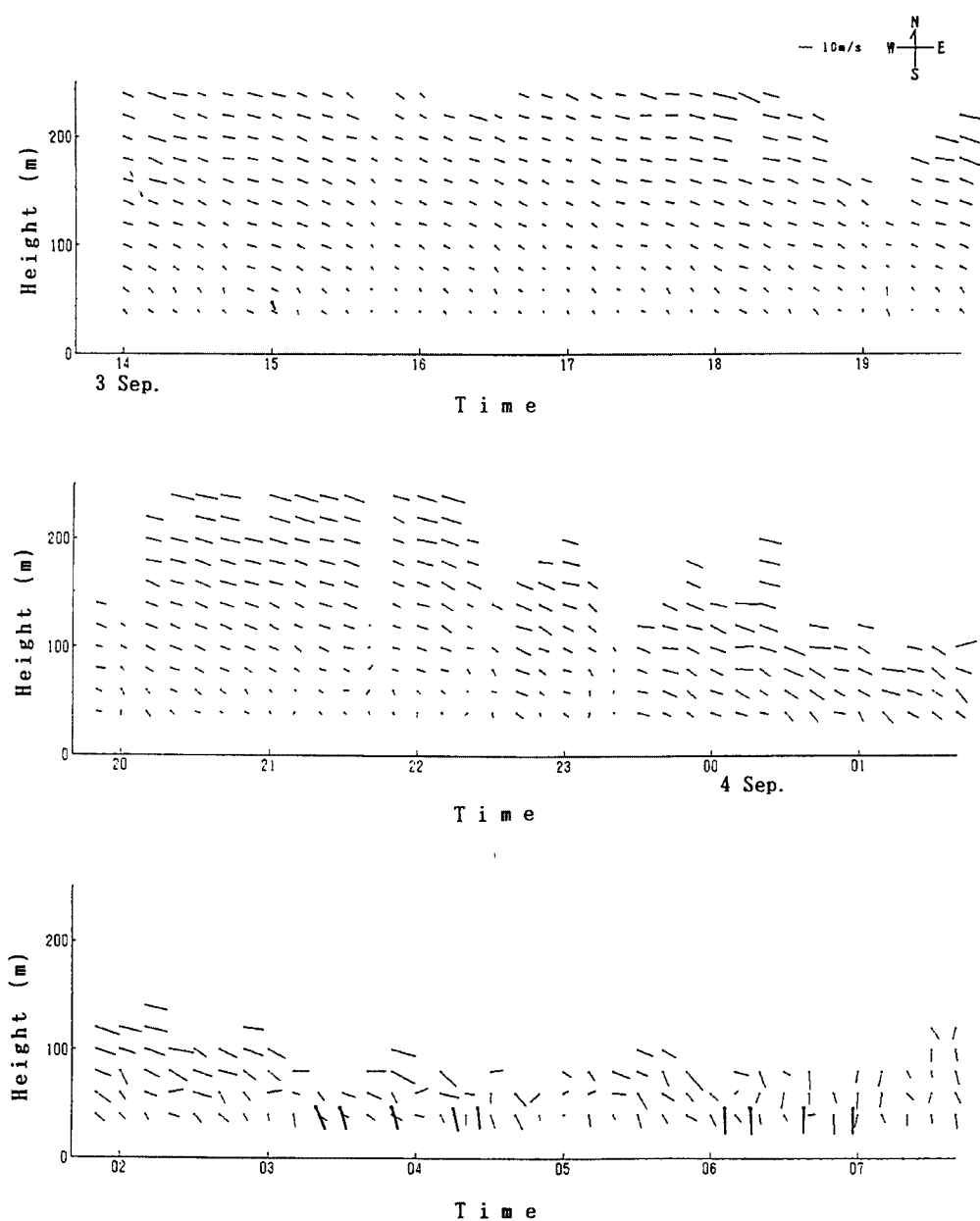


Fig. 3(a) Time series (from 14 : 00 3rd Sep. to 7 : 40 4th Sep. 1993) of the profile of horizontal wind speed and wind direction measured by the Doppler sodar. The length of the vectors correspond to the wind speed and the direction of the vectors from the central dots show the wind direction (see upper right corner of this figure). Thick vectors at 47 m in height show measured data by the propeller anemometer at the top of the No.2 tower.

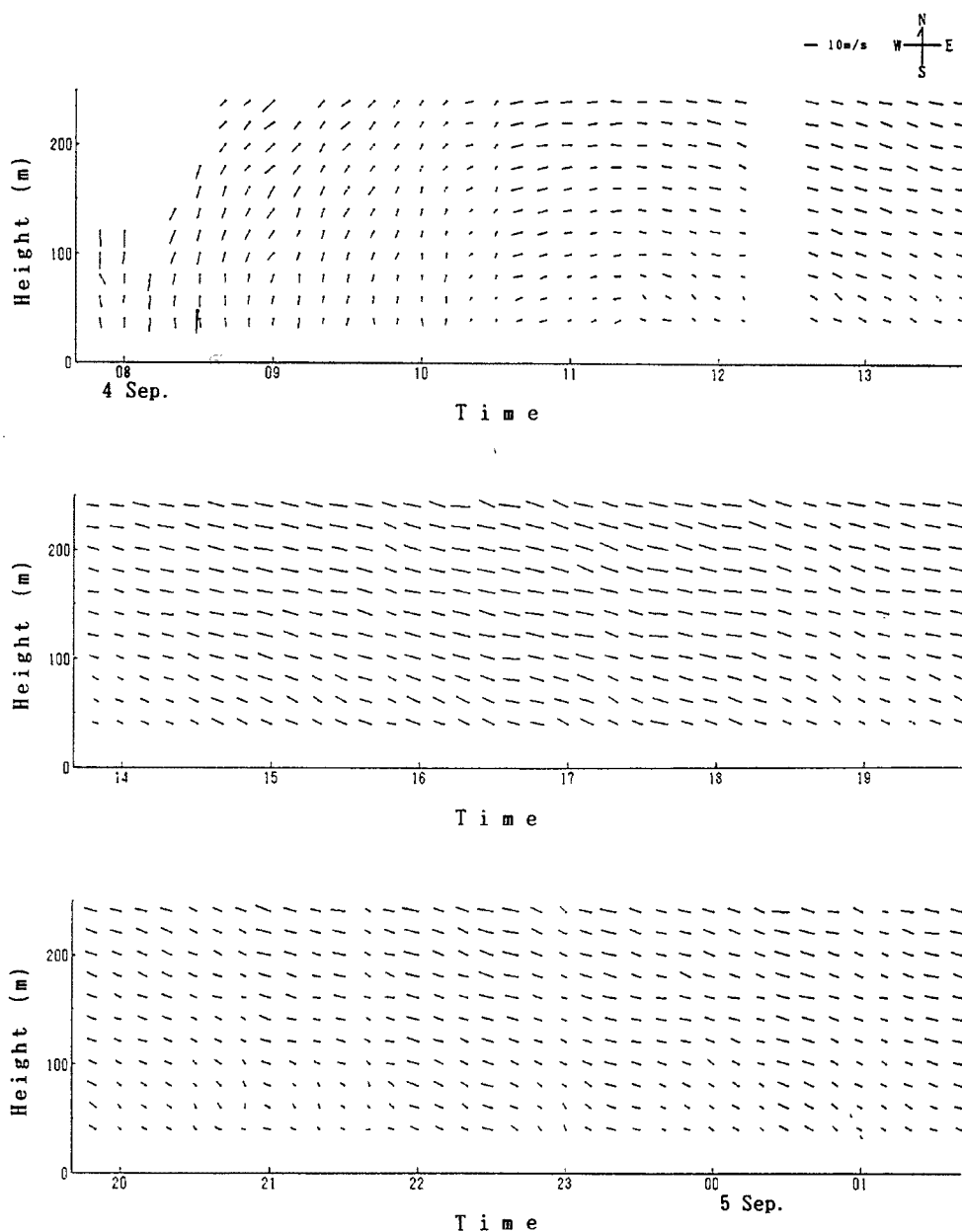


Fig. 3(b) Same as Fig. 3(a), except for the period from 7:50 4th Sep. to 1:40 5th Sep. 1993.

間帯についての10分間平均風速と風向を示すが、測定時刻・高度に対応した位置を中心としたベクトルの向きで風向（北を上）、ベクトルの長さで風速を表している。

Fig. 3 には、ドップラーソーダのデータに加えて2号鉄塔頂部に設置されているプロペラ型風向風速計によって測定された風速・風向の値を、同じように測定時刻・高度に対応した位置を中心としたやや太いベクトルで表している。但しこの図での高度は、66 m という風速計の設置高度から水平にドップラーソーダ設置場所上空に延ばした高さである。なお、**Fig. 2** に示すように、ドップラーソーダがほぼ稜線上に設置されているのに対して、2号鉄塔は北側斜面に高度で約 20 m、水平距離で約 50 m ほど下ったところに位置

している。

Fig. 3 に示した時間帯の始めの方では設定測定高度の上限である 250 m までドップラーソーダにより上空の風が観測出来ているが、風速が強くなるに従って雑音増加のため測定高度が低くなっており、気圧の測定により台風が敦賀試験線に最も接近したと考えられる 9 月 4 日の 5 時頃には 80 m 程度の高度までしか観測出来ていない。

地形による影響が少ないと考えられる比較的高い高度での風向は、始め東あるいは南東であり、途中 9 月 3 日 23 時頃からの測定出来なかった時間帯を経て、9 月 4 日 9 時頃からは南西、11 時頃からは西風が継続した。これは台風が中国地方より日本海へ出て北東進するに従って、大きなスケールでの一般風が変化して行ったことに伴うものであると考えられる。

Fig. 3 に示した例では全般的に高い高度の方が風速が強くなっているが、例えば 9 月 4 日 7 時 40 分におけるように地表近くの方が風速が強いというような場合も見られる。これは、後で詳しく述べるように、山の斜面で風が収束して地表近くで風速が強化される場合に当たると考えられる。

2 号鉄塔のプロペラ型風向風速計では全般に同高度のドップラーソーダによる測定値に比べてかなり大きな風速となっている。その時の風向は南寄りであるから 2 号鉄塔は稜線の風下にあたり、稜線でのドップラーソーダに比べて大きな風速になっているのは、前章で述べたような測定の方式の違いによるものと考えられる必要があると思われる。

ドップラーソーダによって測定された風向の鉛直分布を見ると、比較的高い高度とそれに対して低い高度の地表近くでは風向に違いが見られることが多い。例えば始めの方の 9 月 3 日 22 時頃までの時間帯では、傾向として高さ 100~200 m 程度の風は東南東の風向であるのに対して、地表に近い 50 m 付近の高度では南寄りの南から南東の風向となっている。また、9 月 4 日 11 時頃以降の時間帯では、高い高度で西風であるのに対して地表近くでは北寄りの北西の風向となっている。

これに関して、敦賀試験線におけるプロペラ型風向風速計によるこれまでの観測で、一年を通じて北寄りまたは南寄りの風向の頻度が多いことが観測されている。例えば **Fig. 4** は、1 日 1 回 14 時 50 分から 15 時までの定時における 2 号鉄塔頂部のプロペラ型風向風速計による 10 分間平均風速・風向の分布を示したものであるが、風速によらず北寄りまたは南寄りの風向であることが圧倒的に多い。これは、風が山の斜面を吹き上がる時に斜面に直交する風速成分が風の収束により強化されて風向が稜線に直交する方向に曲げられることによると考えられる。

このこととドップラーソーダによる風の鉛直分布の観測例から、低い高度における方がより地形の効果が大きく、風が稜線直角方向の北寄りまたは南寄りに向けられているということが推測される。風速と風向の鉛直分布の形には地形以外に地表面の粗度や安定度などが影響すると思われるが、ここではまず単純に地形による影響だけを取り上げるために、季節や時刻によらず平均的に風速と風向の鉛直分布がどのような形になっているかについて調べることにした。

敦賀試験線周辺を吹く一般風の風向と風速により地形の影響の仕方が異なると考えられるので、**Table 2** に示す約 10 ヶ月にわたる期間のデータから、風向と風速で分類して平均鉛直分布を作成した。比較的風の強い時も高度 150 m 程度までは測定出来ていることが多く、またこの高度では地形による影響が比較的少ないと考えられるので、平均鉛直分布を作成する時の分類基準としてこの付近の高度での風向及び風速を使用

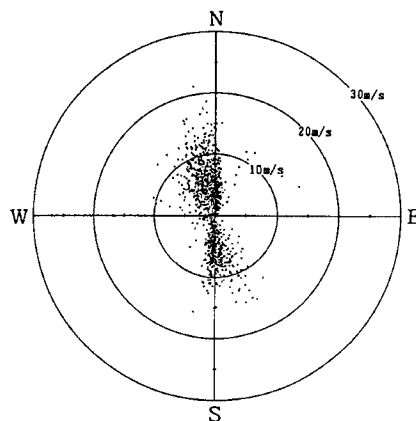


Fig. 4 Distribution of wind speed and wind direction averaged for 10 minutes by the propeller anemometer at the top of the No.2 tower. Daily observations were made at 14:50~15:00 during Aug. 1987 and June 1993.

Table 2. Duration of data used for making average profiles

Year	Month	Day	Hour	Min	Year	Month	Day	Hour	Min
1992	12	10	9	50～	1992	12	18	20	00
1993	1	8	13	00～	1993	1	16	23	20
	1	16	23	40～		1	25	9	50
	2	18	11	20～		2	23	17	20
	3	3	11	40～		3	11	21	50
	3	11	22	10～		3	20	8	30
	3	20	8	50～		3	24	16	20
	3	24	18	00～		4	2	4	10
	4	2	4	30～		4	6	13	30
	4	7	11	20～		4	15	21	30
	4	15	21	50～		4	24	8	10
	4	24	8	30～		5	2	18	50
	5	2	19	10～		5	7	9	50
	5	7	11	50～		5	11	15	10
	5	11	15	30～		5	13	9	10
	7	1	9	50～		7	9	20	00
	7	9	20	20～		7	18	6	40
	7	18	7	00～		7	26	17	20
	7	26	17	40～		8	2	13	30
	8	4	15	40～		8	13	1	40
	8	13	2	00～		8	21	12	20
	8	21	12	40～		8	26	13	00
	9	3	14	00～		9	4	12	10
	9	4	12	40～		9	12	22	50
	9	12	23	10～		9	21	9	30
	9	21	9	50～		10	4	15	30

Table 3. Data number for each ranks of wind speed and wind direction

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	0～4	4～8	8～12	12～16	16～20	20～24	24～28	28～32	32～36	36～40 m/s
1 N	246	510	463	202	11	0	0	0	0	0
2 NE	57	16	9	3	0	0	0	0	0	0
3 E	136	155	189	32	3	0	0	0	0	0
4 SE	498	1440	424	35	2	0	0	0	0	0
5 S	403	376	757	476	56	0	0	0	0	0
6 SW	218	249	155	21	2	0	0	0	0	0
7 W	214	397	203	27	1	0	0	0	0	0
8 NW	737	1507	424	34	2	0	0	0	0	0

することにした。具体的には、高度 160 m まで欠測のないデータについて、高度 140 m と 160 m での風向及び風速を平均した値を用いて、風向については北から北西までの 8 方位、風速は 4 m/s ごとでランク分けを行った。Table 3 は、各風向・風速ランクに分類されたデータ数を示している。ここで風向ランクについては、例えば“N”は北を中心にしてプラスマイナス 22.5 度の範囲に風向が入るものを示している。

Fig. 5 はこのようにして作成した平均鉛直分布のうち、比較的強い風速である 4 ランク目、12~16 m/s に分類されたものの各風向 8 方位についての風速・風向の鉛直分布である。このように比較的強い風速の場合を取り上げたのは、その場合地形以外の要素のうち安定度などの要素の効果が小さく、またドップラーソーダの測定精度も比較的良いと考えられるからである。

まず、風速の鉛直分布について見てみると、風向が北の時、高度が変わってもあまり風速は変化しない、あるいは高い高度よりも地表近くの方がやや風速が強くなっている。そして、高度 40 m に風速の極大が見られる。風速の平均値としては、高度 160 m で 13.5 m/s であるのが高度 40 m では 14.7 m/s という程度である。風向が北東の時にもデータ数が 3 例だけと少ないが、同様な鉛直分布である。平地上での風速の鉛直分布については対数法則やべき乗則が適用出来るとされていて、その場合、上空に行くにつれて風速は次第に増加する形を取るが、ここでの風速の鉛直分布はまったく異なった形をしている。これは敦賀試験線付近を通る山の稜線がほぼ東西に延びており、北から吹く風が山越えの際に地表近くで風速が強められる結果と考えられる。

一方、北・北東の風向の時以外では、平地上と同様な上空に行くにつれて風速が増加する鉛直分布をしている。北風の場合に比べて南風の場合に地表近くでの風速の強化が見られないという結果は、ドップラー

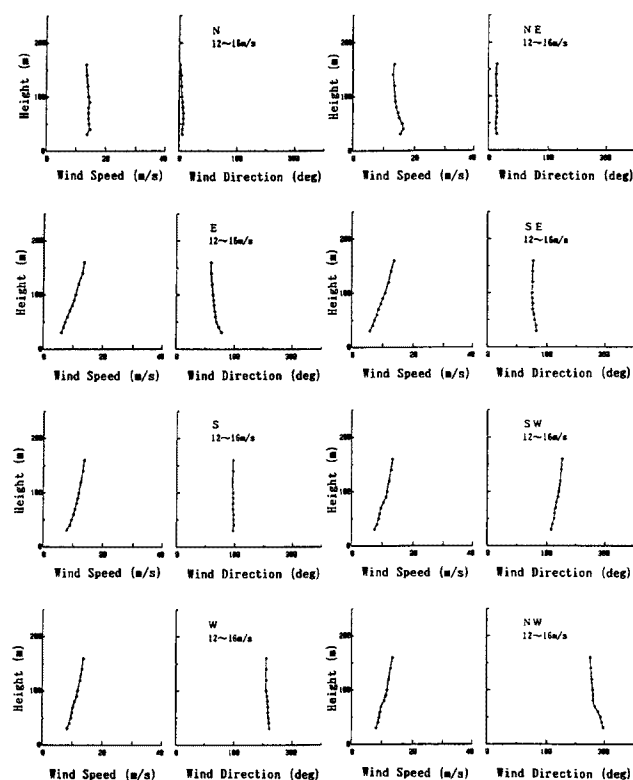


Fig. 5 Average profiles of wind speed and wind direction made by classified data. Profiles for 4th rank of wind speed (12~16 m/s) are shown.

ソーダが設置されている場所から北側の山の斜面の勾配が南側より急であり、設置場所から南東方向に稜線が延びているという南北の地形の違いによると考えられる。**Fig. 6** にドップラーソーダ設置場所を中心とした8方位の各方向での地形の鉛直断面図を示したが、北方向では急な下り斜面が長く続いていることが分かる。

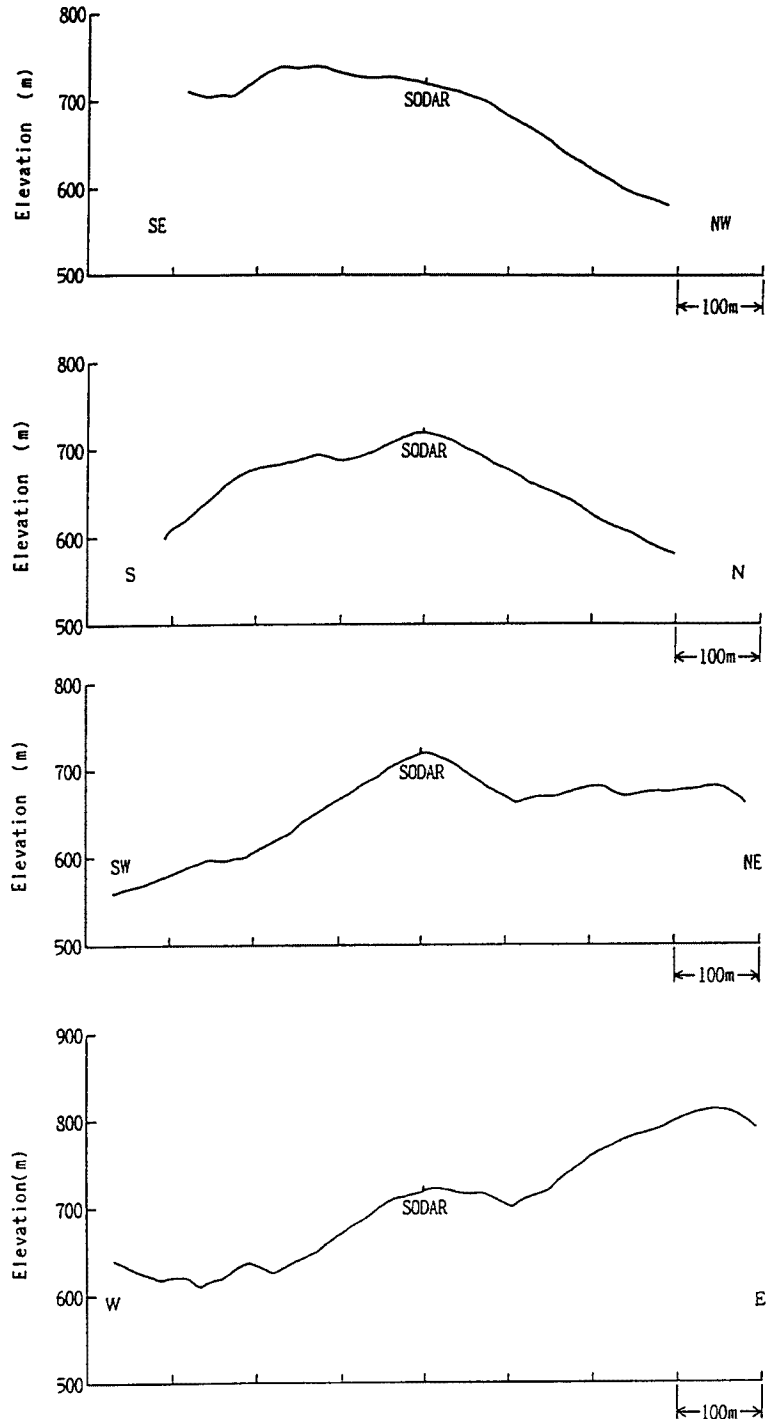


Fig. 6 Vertical cross sections of topography around the Doppler sodar site.

次に風向の鉛直分布について見てみる。**Fig. 5**に示すように、風向が北あるいは北東の場合には高い高度から地表近くまで風向は殆ど変化していないが、東風の場合には地表近くになるに従って南東方向に風向が変化している。その風向の変わる角度はおおよそ 35 度程度にもなっている。同様に低高度で風向が稜線に直角方向の南寄りになるという傾向は、分類基準の高度 150 m 付近での風向が南東と南西の時にも見られる。また、風向が北西の時には地表近くになるに従って北寄りに風向が変化しており、低高度では稜線に直角方向の風向となる。

このような風向の鉛直分布の特徴についての説明としては以前に述べたように、比較的高い高度では大きなスケールでの気圧配置による一般風が吹いているが、高度が低く地表近くになるにつれて地形による影響が強くなり、この場合には稜線に直角方向の北寄りまたは南寄りに風向が変化すると考えられる。どれくらいの高さまで地形の影響を強く受けるかは、風速の強さにもよると考えられるが、ここで示した風速 12~16 m/s の場合には高度 80 m 程度までその影響が大きいと考えられる。

3. 2 鉛直風速と吹上げ角の鉛直分布

ドップラーソーダでは風速の鉛直成分も測定しているが、設置当初より鉛直方向のアンテナの音響ビームが正しい鉛直よりも傾いていたことが 1993 年になって判明した。その修理は 1993 年 12 月に完了したが、それまでの観測データのうち鉛直風速については正しくなく、鉛直より傾いた方向での成分風速を測定していた。音響ビームのその時の正確な方向が分かればデータを補正することが可能であるが、傾いていた音響ビームの正確な方向を現地で測定することは困難であり、ここでの鉛直風速や吹上げ角の議論は改修後の測定値のみを使用する。

前節で風速と風向の平均的な鉛直分布を調べた時と同様に、今度は 1993 年 12 月 9 日 15 時 50 分から 18 日 2 時までの期間の 10 分平均データとして総数 998 個の中から、高度 140 m と 160 m での風向と風速で分類して、鉛直風速と吹上げ角の平均鉛直分布を作成した。**Fig. 7**は、各風向・風速ランクに分類されたデータの中から特に北風と南風の場合について、そして風速は 12~16 m/s に分類されたものについての平均の水平風速・風向・鉛直風速・吹上げ角の高度分布を示す。このランクに分類されたデータの数、北風

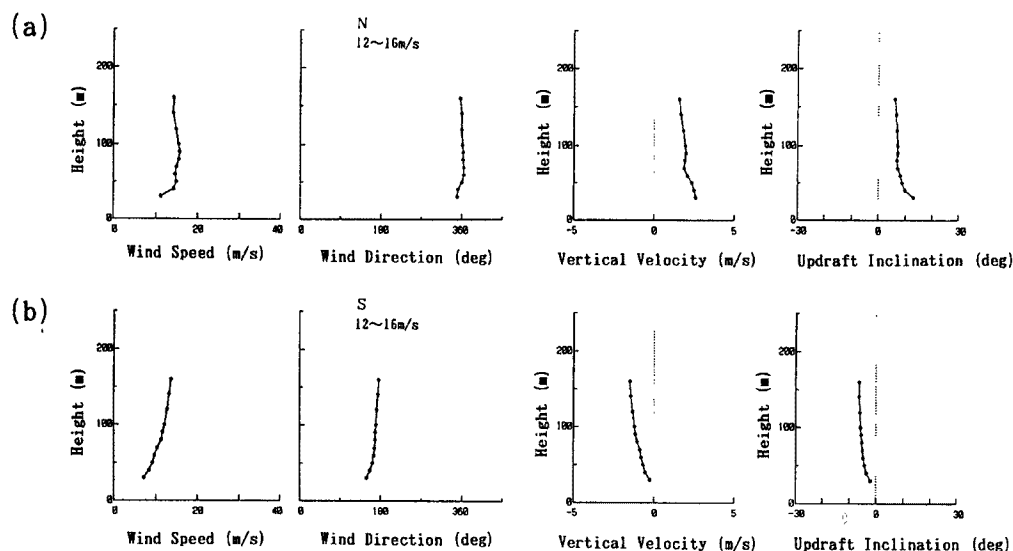


Fig. 7 Average profiles of vertical velocity and updraft inclination made by classified data. Wind speed and wind direction are also shown. The rank of wind speed is No.4 (12~16 m/s). (a) Northerly wind rank and (b) Southerly wind rank.

137 個, 南風 44 個である。

北風の場合, 鉛直風速は地表近くから比較的高い高度までプラスの値すなわち上向きで, 地表近くから上空へ向かって減少しおよそ $2.5 \sim 1.5 \text{ m/s}$ 程度の値を示している。水平風速と組み合わせて吹上げ角に直すと, 高度 30 m での約 13 度から 160 m での約 6 度に上空へ向かって減少する吹上げになる。一方, 南風の場合に鉛直風速は, 地表近くから比較的高い高度までかなり弱いながらマイナスの値すなわち下向きで, 地表近くから上空へ向かってその絶対値は増加して $-0.5 \sim -1.5 \text{ m/s}$ 程度の値を示している。水平風速と組み合わせて吹上げ角に直すと, 高度 30 m での約 2 度から 160 m での約 6 度に上空へ向かって増加する弱い吹下げになる。

北風の場合に吹上げになるのは, 敦賀試験線付近を通る山の稜線がほぼ東西に延びており, 山の斜面で北から吹く風が吹き上がりそれは特に地表近くで顕著である結果と考えられる。ドップラーソーダ設置場所より北方向の斜面の傾斜角は約 27 度であり, 高度 30 m の地表近くの風の吹上げ角はこの 2 分の 1 程度, より高い高度の 160 m では 5 分の 1 程度に減少していることになる。Fig. 8(a) には北風の時の風の吹き上げの状況を地形の鉛直断面図上に空気の流れを表すベクトルで示している。また, 南風では弱いながら吹下げになっているのは, Fig. 2 を見て分かるようにドップラーソーダが設置されている場所から南東方向に稜線が延びていてその方向に高度が増しているという地形のためとも考えられる。Fig. 8(b) に南風の時の風の状況を示すが, より詳細な検討はさらに観測データを蓄積して行う必要がある。

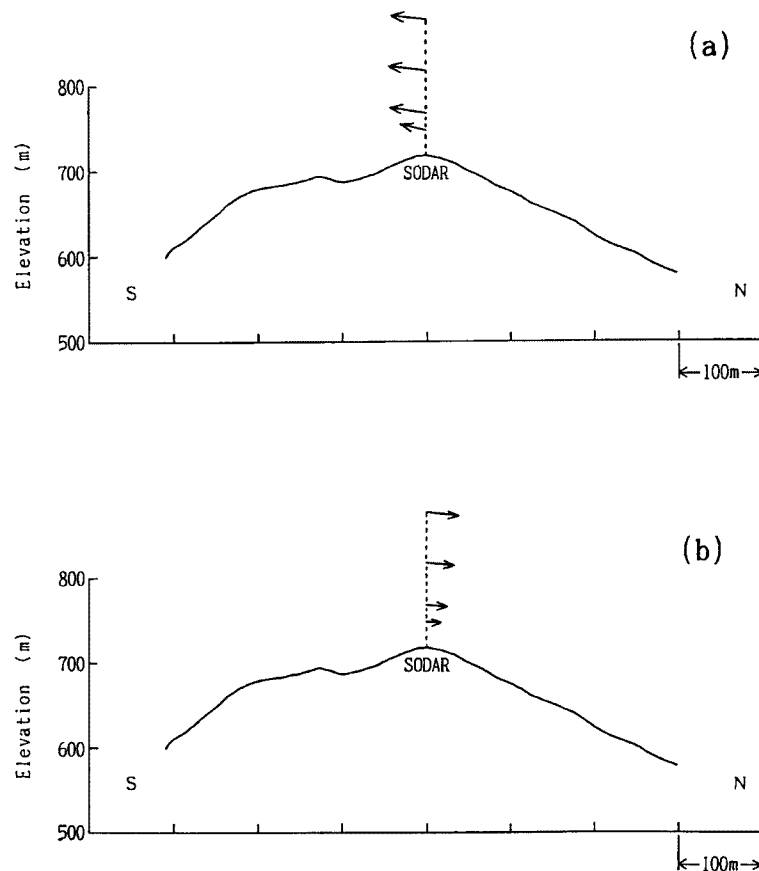


Fig. 8 Schematic view of flow patterns on the vertical cross sections. (a) Northerly wind and (b) southerly wind.

4. おわりに

地形による影響を強く受ける山岳地上空を吹く風の鉛直構造の特徴を調べるために、その具体的な場所として関西電力敦賀試験線を選び、ドップラーソーダにより風の鉛直分布の観測を行った。

風速の鉛直分布について、風向が北寄りの時に、高い高度から地表近くに向けてやや風速が強くなり高度 40 m あたりに風速の極大が見られるという鉛直分布をしていた。これは敦賀試験線付近を通る山の稜線がほぼ東西に延びており、山の斜面で北から吹く風が収束して地表近くで風速が強化される結果と考えられる。

風向の鉛直分布については、高い高度で西寄りあるいは東寄りの風が吹いていても、地表近くでは地形による影響で稜線に直角方向の北寄りあるいは南寄りの風向になるという傾向が見られた。

吹上げ角については、北風の場合に吹上げとなり、山の斜面により風が吹き上がる結果と考えられたが、南風では弱いながら吹下げになっていた。これは、ドップラーソーダが設置されている場所から南東方向に稜線が延びていて高度が増しているという地形のためとも考えられる。

今後、さらに観測データを収集して解析を行い、風の鉛直構造についての詳細な検討を進めて行く必要がある。今回取り扱わなかったが風速の変化により鉛直分布の形がどのように変わるかということや、積雪の有無による地表面の粗度の変化や安定度などの影響についても検討する必要がある。また、吹上げ角については地形による影響が大きく、ドップラーソーダの送受信アンテナの設置角度が正しくないとその値が大きく変わるので、より慎重にデータを検討する必要がある。

山岳地上空を吹く風の状況をより総合的に理解するためには、3 次元的にどのように空気が流れているかについて調べる必要がある。ここではただ一台のドップラーソーダにより上空を吹く風を調べたが、観測データをもとにして計算により 3 次元的な空気の流れを求める計算モデル MASCON³⁾により、プロペラ型風速計などとドップラーソーダの観測データから山岳地上空を吹く風の 3 次元的な状況について調べていく予定である。

最後に、観測設備と観測データの使用について機会を提供して下さった関西電力株式会社の方々に對して、また、観測機器の保守と観測データの収集について御援助を頂いた住友電気工業株式会社の方々に厚く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 光田 寧・塚本 修・根井 充：山岳地における風速変動の風向横方向の空間相関，京都大学防災研究所年報，第 26 号 B-1，1983，pp.363-374.
- 2) Mitsuta, Y., O. Tsukamoto and M. Nenoï : Wind Characteristics over Complex terrain, J. Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.15, 1983, pp.185-196.
- 3) Sasaki, Y. K. : Lecture Notes on Variational Methods for Environmental Analysis and Prediction Problems, Severe Storm Research Notes, No.1, Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., 1979, 174p.