

山岳地における風の分布と乱流特性 (第2報)

堀口光章・光田 寧

要 旨

山岳地における風の乱流特性とその水平分布を調べるために、ほぼ東西に延びる稜線の少し北に設置されている試験送電線(敦賀試験線)で観測を行った。試験線に沿った分布の平均として南風よりも平均風速が強い北風においては、乱れの積分スケールとスペクトルピークの波長が大きくなっている。また水平分布についても、スペクトルピークの波長が大きい場所は平均風速が強く、風向方向の乱れの積分スケールが大きい。

キーワード: 乱流, スペクトル, コヒーレンス, 山岳地

1. はじめに

山岳地においては、その複雑な地形により平坦な場所とは異なって水平方向にも鉛直方向にも複雑な気流分布を示す。また、風の乱流特性についても平地上とは異なっていることが考えられる。山岳地における風の分布と乱流特性はその地点ごとに異なると予想されるが、特定の場所における観測からおおよそ平地上と比べてどのような違いが起り得るのかを調べることが山岳地に建設される構造物例えば送電線への風圧加重を検討する上で有用である。

実験用送電線の関西電力敦賀試験線は琵琶湖の北、福井・滋賀の県境付近の山岳地に位置しており、ここではその建設当初の1981年よりプロペラ型風速計などによる風の観測が行われてきている(光田ら, 1983; Mitsu et al., 1983)。また1990年からは音波を使って風を遠隔測定するドップラーソーダにより風の鉛直分布の観測を行っている(堀口・光田, 1994)。1987年以降の観測データより、敦賀試験線での代表的な風向である北寄りと南寄りの風に対して風の分布と乱流特性を調べた結果を前回に報告した(堀口・光田, 1995)が、今回は風速変動のスペクトルなどについても解析した結果を報告する。

2. 観測の概要

2.1 敦賀試験線とその周辺地形

観測を行った敦賀試験線とその周辺の地形は前回に説明したのでここでは簡単に述べるにとどめる。敦賀試験線はFig. 1に示すように標高およそ600mから800mの山岳地に設置されており、この図中では太い破線で示すおおよそ東西に延びる稜線にほぼ沿っているが、ややその北側に位置している。また、この稜線の北と南は深い谷を伴った険しい斜面である。敦賀試験線は水平距離700mの間を3基の鉄塔で張られており、西の端の1号鉄塔から2号鉄塔を経て東の端の3号鉄塔へ設置標高は順次高くなって、その標高差は約180mある。またその向きは東西方向から時計回りに約10度ずれている。

2.2 気象観測システム

敦賀試験線における風の観測は主にプロペラ型風向風速計とプロペラ型風速計により1号から3号の鉄塔、P1からP13までの観測柱で行っている(Fig. 1)。その位置関係を水平距離と高度とが等縮尺で書かれた南方向から見た地形の鉛直断面図上に示したのがFig. 2である。各地点の地表面高度と

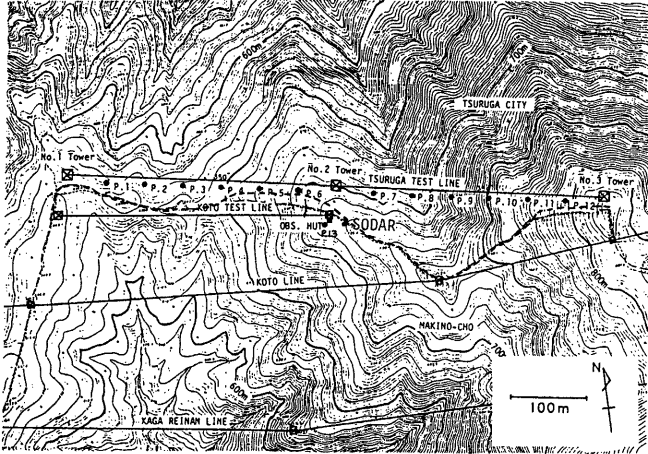


Fig. 1 Map around the Tsuruga Test Line. No.1 - No.3 towers are main towers of the test line. P.1 - P.13 are observation poles. The thick broken line shows the ridge line near the test line. The solid circle denoted by "SODAR" shows the position of the Doppler sodar.

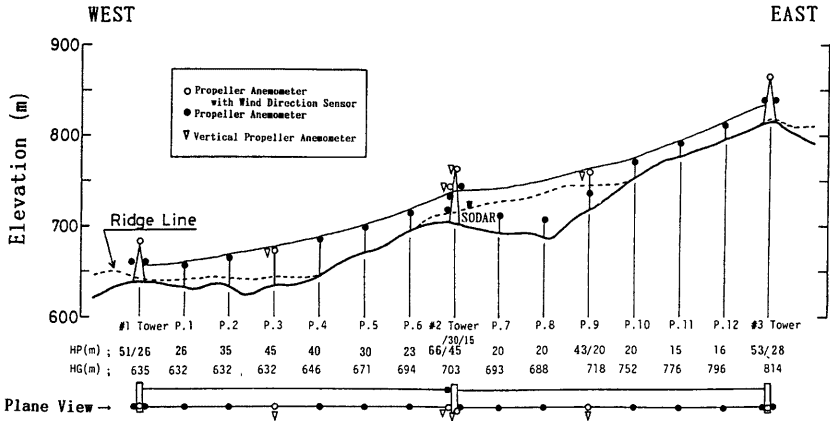


Fig. 2 Profiles of topography from the south. The thick solid line indicates the ground level and the dashed line indicates the ridge line which is a little south of the test line. The thin solid line is the lower test power line installed on the main towers. The locations of anemometers are marked on the figure with open circles, closed circles and triangles. HP is the height of the positions of anemometers from the ground and HG is the height of the ground above sea level.

測定高度を図中に示したほか、敦賀試験線を上から見た測器の配置も示した。また、Fig. 2 に示していない P13 は 2 号鉄塔から南側に約 50m 離れた場所に設置されており (Fig. 1)、測定高度は 18m である。

観測データは琵琶湖側山麓のマキノ観測基地に送られデータ収録装置により磁気テープに記録されるが、今回の解析で使用されるデータの収録チャンネル番号と測定項目・観測点との対応は Table 1 に示す通りである。

Table 1 Input channel of the data acquisition system

ch. No.	Measured data	Position	Sensor
1	Wind speed	1T-middle(W)	propeller 1
2		1T-middle(E)	2
3		P. 1	3
4		P. 2	4
5		P. 3	B
6		P. 4	5
7		P. 5	6
8		P. 6	7
9		2T-middle(SW)	8
10		2T-middle(SE)	9
11		P. 7	12
12		P. 8	13
13	P. 9-lower	14	
14	P.10	15	
15	P.11	16	
16	P.12	17	
17	3T-middle(W)	18	
18	3T-middle(E)	19	
19	2T-middle(NW)	10	
20	2T-30m(SW)	11	
21	P.13	E	
22	1T-upper	A	
23	2T-upper	S	
24	P. 9-upper	C	
25	3T-upper	D	
26	2T-15m(SW)	21	
27	Wind direction	1T-upper	(Vane) A
28		P. 3	B
29		P. 9-upper	C
30		3T-upper	D
31		2T-upper	S
32		2T-middle(SW)	8
33		P.13	E
34	Vertical velocity	P. 3	Vertical propeller 1
35		2T-middle	2
36		2T-upper	3
37		P. 9-upper	4

2.3 観測データ

前回の報告で示したように敦賀試験線においては北寄りまたは南寄りの風向であることが多く、観測データの解析はその北寄りと南寄りの風向の場合だけについて行うことにする。風向の基準としては 2 号鉄塔頂部のプロベラ型風向風速計 S (基準風速計) での 10 分間平均風向を用いて、335~25 度の時を北風、155~205 度の時を南風とした。

1987 年から 1996 年までの磁気テープに収録された観測記録より、風向が上記の基準の範囲であり観測機器の欠測が少なく、比較的強風 (基準風速計での

10 分間平均風速が 15m/s 以上) で 40 分間データが連続して収録出来た場合の北風 7 ケース、南風 7 ケースを解析に使用した。その一覧を Table 2 に示す。なお、データのサンプリング周波数は 10Hz である。

Table 2 Analyzed cases

Group	Case No.	Starting time for measurement (year.mo.day hr:min)	Wind (2T-upper) Speed (m/s)	Direction (deg.)	
N	1	1990. 9.19 23:27	18.5	347	
		23:37	19.6	349	
		23:47	20.8	349	
		23:57	21.9	350	
	2	1990. 9.20	0:07	23.2	350
			0:17	22.9	350
			0:27	22.1	349
	3	1990. 9.20	0:37	20.9	347
			3:11	19.9	339
			3:21	21.0	345
			3:31	20.9	338
	4	1990. 9.20	3:41	20.3	339
			3:51	17.9	343
			4:01	16.0	339
4:11			15.6	334	
5	1990.10. 8	4:21	15.8	333	
		12:22	15.6	352	
		12:32	17.1	350	
6	1990.10. 8	12:42	18.4	350	
		13:22	20.1	350	
		13:32	21.2	350	
7	1990.10. 8	13:52	20.6	350	
		18:05	15.6	346	
		18:15	16.0	348	
		18:25	16.2	349	
8	1990.10. 8	18:35	15.7	350	
		19:05	15.5	346	
		19:15	16.0	348	
S	1	1987. 8.31 12:16	19.1	180	
		12:26	15.6	178	
		12:36	18.6	180	
		12:46	17.4	178	
	2	1987. 8.31	13:39	15.7	178
			13:49	15.6	177
			13:59	16.5	178
	3	1993. 2.17	14:09	17.5	179
			0:57	19.5	153
			1:07	19.9	159
			1:17	20.6	160
	4	1993. 8.10	1:27	20.4	159
			12:21	17.1	173
			12:31	18.9	166
12:41			20.0	167	
5	1993. 8.10	12:51	19.8	167	
		16:57	22.1	160	
		17:07	20.3	162	
		17:17	22.3	159	
6	1996. 4.30	17:27	21.6	158	
		22:00	15.1	163	
		22:10	16.3	164	
		22:20	16.1	164	
7	1996. 5. 4	22:30	15.4	167	
		20:00	15.1	171	
		20:10	15.1	164	
		20:20	15.2	168	
8	1996. 5. 4	20:30	15.9	164	

3. 観測結果

3.1 平均風速と乱れの強さ

まず、解析を行ったケースについて、敦賀試験線に沿った方向での平均風速と乱れの強さの水平分布をFig. 3 (平均風速), Fig. 4 (乱れの強さ)に示す。ここではスペクトルとコヒーレンスの解析に使用する各ケースの始めから4096個(34.1分)のデータに対するの平均風速, 乱れの強さを示し, 風速変動の評価時間(平均化時間)は0.5秒である。各図の左側は各鉄塔中段と各観測柱上部(P9は下部)での値, 右側は各鉄塔頂部での値であり, 黒丸印(・)で各グループ(風向)の平均, 縦の棒(I)でケース間のばらつきの標準偏差を示している。

平均風速については, 北風の場合, P3付近とP10付近が大きくてP7付近が小さい二山型の分布, 南風の場合には, P7, P8の測点で風速が極端に弱い分布をしている。乱れの強さについては, 北風の場合に1号鉄塔付近とP6~P9付近で大きく, 南風についてはP7, P8で特に大きく, またP1でも大きい分布をしている。前回の報告とは解析ケースが異なるが, 平均風速と乱れの強さについて同様な分布をしており, 全般的には乱れの強さが大きい所は平均風速が弱い所に対応している。また, 径間平均として北風よりも南風の方がかなり乱れの強さは大きく, 南風の時には風上側に稜線が位置しているためと考えられる。

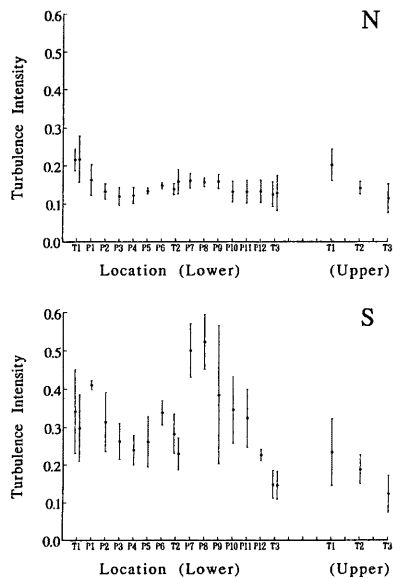
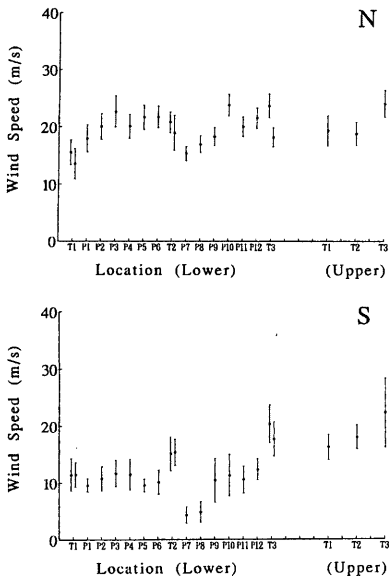


Fig. 3 Horizontal distributions of the mean wind speed along the test line for the each group (wind direction). The values measured at the middle level of the each tower and the upper level of the each pole (lower level for P9) are indicated on the left. The values measured on the top of the each tower are indicated on the right. Average values within the each group are marked with closed circles (・) and standard deviations are indicated with bars (I).

Fig. 4 As in Fig. 3, but for the turbulence intensity.

3.2 乱れの積分スケール

相関解析とそれによる乱れの積分スケールの導出は前回の報告でも行っているが、ケース数が少ないので南風をグループ1, 2というように分けずにまとめて扱い、さらに少しケース数を増やして今回改めて解析を行っている。その相関解析自体の方法は前回と同じであり、風速変動の評価時間(平均化時間)は3秒である。なお、乱れの積分スケールは空気の動き(乱れ)の空間的な相関について、その大きさの程度を示す値である。

風向方向の乱れの積分スケール L_x は、前回と同様に風の乱れ(乱渦, eddy)がそのままの形を保ち平均風速 \bar{u} に乗って流されていくというTaylorの凍結渦(frozen eddy)の仮説が成り立つと仮定して、自己相関係数のタイムラグ τ の増加に伴う減少を次式で近似することにより求める。

$$R(\tau) = \exp(-\bar{u} \cdot \tau / L_x) \quad (1)$$

各観測点における乱れの積分スケール L_x を各グループ(風向)ごとに平均して、敦賀試験線に沿った方向での水平分布を示したのがFig. 5である。場所により L_x の値はかなり変化するものの、図の左側の

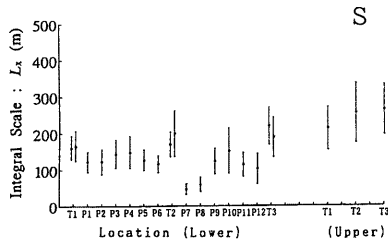
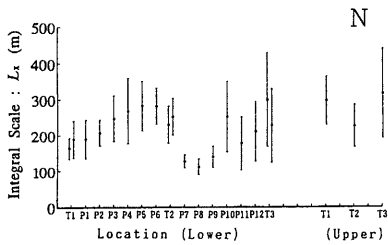


Fig. 5 As in Fig. 3, but for the longitudinal integral scale of turbulence (L_x).

下層での平均としては北風で215m, 南風で138mであり、南風の方が値がかなり小さい。上記の定義に立ち帰って言うならば北風の時と比べて南風の時は風の乱れの空間相関の程度が低いということになる。試験線に沿った方向での値の水平分布については、北風の時にP5周辺, P10, 及び3号鉄塔で値が大きくなっている。逆に測点が谷筋で地上高も低いP7からP9にかけては値が小さい。P7からP8で値が小さいのは南風でも同様で、北風よりもさらに小さな値になっている。また南風の時には1号鉄塔, P4, 2号鉄塔, P10, 3号鉄塔でその周囲より大きな値になっている。さらにどちらのグループ(風向)でも上層の方が値が大きい傾向があるが南風の方で明瞭である。

風向方向の乱れの積分スケール L_x の水平分布を平均風速の水平分布(Fig. 3)と対応させて検討すると、北風・南風を通じて一般的に L_x の値が大きい場所では平均風速が大きいという関係が見られる。このことは乱れの積分時間($T_x = L_x / \bar{u}$)の値があまり水平方向に変化しないことを意味している。また、 L_x の値の分布を乱れの強さの水平分布(Fig. 4)とも比較すると、 L_x の値が大きい所では乱れの強さが小さいという傾向が見られる。

相互相関係数からの風向直角方向の乱れの積分スケール L_y の導出はやはり前回同様に行い、測線を西半分(1号鉄塔-2号鉄塔径間)と東半分(2号鉄塔-3号鉄塔径間)に分けた各径間で求めた L_y の値について、各グループ(風向)別に平均した値とケース間のばらつきの標準偏差をTable 3に示す。1号鉄塔-2号鉄塔径間, 2号鉄塔-3号鉄塔径間とも北風の時の方が南風の時よりもかなり大きくなっていて風向方向の乱れの積分スケール L_x と同じ傾向

Table 3 Average values and standard deviations of the lateral integral scale of turbulence (L_y) in each group (wind direction) for the segments of towers No.1 - No.2 and towers No.2 - No.3

Group	L_y (m) (T 1 - T 2)	L_y (m) (T 2 - T 3)
N	80 ± 28	63 ± 18
S	49 ± 10	26 ± 4

である。また、1号鉄塔-2号鉄塔径間の方が値が大きい。これは1号鉄塔-2号鉄塔径間の方が測点の地上高が大きいことと各測点の位置が空間的に揃っていることによると考えられる。

各地点の上下に離れた測点間の相互相関係数の値により鉛直方向の乱れの積分スケール L_z をやはり前回同様求め、Table 4に示す。求められた L_z の値を見ると、どの測点でも北風の時の方が南風の時よりもかなり大きな値である。一方、2号鉄塔での鉛直風速については風向間での違いは小さい。また、それ以外に目立つ点として、P9で南風の時に特に小さな値になっている。P9では下部の測点が南側の稜線の高度よりも低く、上部の測点は稜線よりも高くなっている。風の吹き方への稜線による影響が上下の測点では異なるため、ここでは鉛直方向の空間相関が低い状況にあると考えられる。

以上のことから水平風速についての乱れの積分スケールとして、北風の場合には L_x が215m、 L_y が71m、 L_z が96m、南風では L_x が138m、 L_y が37m、 L_z が42mという敦賀試験線における平均的な値が得られる。すなわち、北風ではどの方向でも南風よりもスケールが大きい。このような北風と南風との性質の違いに関して、前節で述べたように風速変動の大きさを示す乱れの強さは径間平均値として北風よりも南風の方がかなり大きい。乱れの積分スケールは風についてその空間的な相関の程度を示すものであり、風速変動が大きい南風の時には風の空間的な相関も低いという状況になっていることが分かる。なお、風向方向の乱れの積分スケール L_z と風向直角方向の乱れの積分スケール L_y との比 L_z/L_y の値は北風で3.0、南風で3.7となり、やや南風の方が大きな値となっている。

乱れの積分スケールは測点の地上高や風速変動の

Table 4 Average values and standard deviations of the vertical integral scale of turbulence (L_z) in each group (wind direction) for each observation point

Group	L_x (m) (T 1)	L_y (m) (T 2)	L_z (m) (P 9)	L_x (m) (T 3)	L_z (m) (T 2) (Vertical Velocity)
N	70 ± 13	118 ± 28	63 ± 15	131 ± 50	59 ± 17
S	34 ± 16	52 ± 12	25 ± 16	58 ± 7	66 ± 13

評価時間(平均化時間)によって変化するので、他の平地上で観測結果との比較は容易でないが、例えば四国の里浦のほぼ平坦な海岸近くの場所

Shiotani and Iwatani (1976)が敦賀試験線での場合(下層の測点の平均地上高は28.2m)に比較的近い高さ40mにおいて観測を行っている。その結果として海から吹く風の場合に風向方向の乱れの積分スケールは204m、風向直角方向では54m、陸から吹く風ではそれぞれ154mと65mという値が得られている。敦賀試験線について得られた風向方向の乱れの積分スケールは、北風では里浦での海から吹く風と同程度、南風では陸から吹く風よりも小さな値である。一方、風向直角方向の乱れの積分スケールは、北風で里浦での値より大きめ、南風では小さめの値となっている。

3.3 風速変動のスペクトル

スペクトル解析においては、まずサンプリング周波数10Hzのオリジナルデータから5個ずつ平均(区間の重複のないブロック平均)して評価時間0.5秒のデータを作成する平均化処理を行った。これは、高周波数側のエネルギーを減衰させることにより、折り返し周波数(ナイキスト周波数)より高周波の成分がスペクトルを計算する周波数領域内に混じり込むエリヤシングと呼ばれる現象の影響を少なくするためである。なお、スペクトルの高周波成分も調べるために乱れの積分スケールよりも評価時間は短くしている。平均化処理の後、各ケース40分間のデータのうち始めから4096個(34.1分)のデータに対して高速フーリエ変換(FFT)を行いパワースペクトルを求めた。相関解析と同様に各観測点でのデータごとにリニアトレンドを除去してから解析を行っている。また、求められたスペクトルにはハニングのスペクトルウィンドウ(7回)と周波数について帯域に分けたブロック平均を施して平滑化を行っている。

まずパワースペクトルの例として、北風で最も風の強いケース(ケース2、40分間での平均風速は2号鉄塔頂部の基準風速計で22.3m/s)において2号鉄塔中段プロベラ型風向風速計8(データ収録装置の入力チャンネルでCH.9)で観測された風速変動について得られたものをFig. 6に*印で示す。横軸に周波数 f 、縦軸にはパワースペクトル密度関数 $P(f)$ に周波数を掛けたものを取って両対数軸上に示している。パワースペクトルのピークは周波数0.03Hz程度、周期にして30秒程度の所(Taylorの凍結渦の仮説により波長に直すと800m程度)にあり、また、もう少し低い周波数の0.01Hz程度、周期にして100

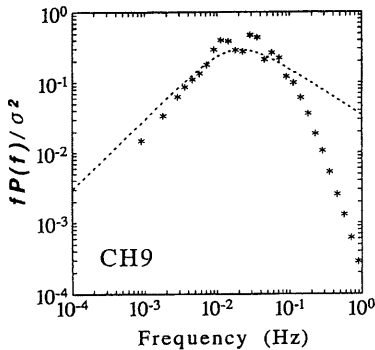


Fig. 6 Power spectrum measured at the middle level of the No. 2 tower (propeller anemometer No. 8, ch. 9) in case N-2 is indicated by marks *. Fitted Karman-type spectrum is also indicated by a dotted line. The power spectrum $P(f)$ is weighted by frequency f and normalized by variance σ^2 .

程程度の所（波長2000m程度）にも少しそれよりは低いピークが見られ、それらのようなスケールでの風速変動が卓越していることを示している。他の平地での観測結果として例えば光田・塚本（1980）が沖縄県多良間島において高度25, 35, 50mで観測したケースではスペクトルピークは0.02Hzにあり、ここでの観測結果はそれらと大差ないものである。なお、上記の二つのスペクトルピーク波長を風向方向の乱れの積分スケールと比較すると、このケースでは $L_x=250\text{m}$ であり、その3倍と8倍程度の大きさである。

風速変動のパワースペクトルをある近似式で表すことは、一つには風の乱流変動の性質を理解するためであるが、また例えば電線動揺のシミュレーションを行う際にある乱流特性を持った風速変動を作り出すためなどという目的も持っている。そして、従来より各種の近似式が提案されてきている。ここでは良く使用されている次式に示すKarman型のスペクトルで近似することを試みる。

$$\frac{fP(f)}{\sigma^2} = \frac{a \cdot f / f_m}{\{1 + 1.5(f/f_m)^2\}^{5/6}} \quad (2)$$

ここで、 a は係数、 f_m は対数スペクトル（周波数の重みを付けたスペクトルを対数軸上に表したものの）のピーク周波数、 σ^2 は風速変動の分散である。

上式の右辺の分母 $\{1 + 1.5(f/f_m)^2\}^{5/6}$ において、 $(2 \times (5/6))$ 乗となっているのは慣性小領域の $-5/3$ 乗則に適合するようにしているためである。大気境界層の乱流スペクトルについては、スペクトルピークから高周波数側において、エネルギーが生成も消滅もせず次々とより小さなスケールの場を受け渡されて行くという状態にあるスペクトル領域として慣性小領域の概念がKolmogorovにより考え出された。さらにKolmogorovは次元的な考察からこの領域ではエネルギースペクトルが波数 κ の $-5/3$ 乗に比例するべきと主張し、これがいわゆる慣性小領域の $-5/3$ 乗則である。但し、この報告においては単位時間あたりの平均エネルギーとしてパワーを取り、波数ではなく周波数についてのスペクトルを考えている。そして、Fig. 6のように縦軸に周波数の重みを付けたパワースペクトル密度関数を取った場合には周波数の $-2/3$ 乗に比例するという形になる。

また、式(2)の分母の始めの1により、低周波数でスペクトル $P(f)$ が一定値になるという平地での実測における傾向を反映する形になっている。この式の右辺の分子における係数 a は、スペクトル $P(f)$ の周波数0から ∞ までの積分値が分散 σ^2 に等しいということからその値が決まる係数であり、ピーク周波数 f_m を決めればそれにより値が定まる。

このKarman型スペクトルを北風ケース2、2号鉄塔中段プロベラ型風向風速計8で観測された風速変動について得られたスペクトル（Fig. 6）に適合させることを試みる。この際、FFTにより求められたもともとのパワースペクトルは、対数軸上に表すと高周波数側に密にその値が得られているので、Fig. 6に示す対数盛りでおおよそ等間隔になるように取った周波数について、ピーク周波数 f_m を可変とした最小自乗法を用いることとする。また、測定に使用しているプロベラ型風向風速計の風速測定についての時定数は変換器等を含めると3秒程度であり、スペクトルの高周波数側では大きなパワーの減衰が示されているので、周波数0.2Hz以下の部分だけを考えることとする。

Fig. 6に適合させたスペクトル近似式による値を点線で示すが、係数 $a=0.620$ 、ピーク周波数 $f_m=0.0209\text{Hz}$ である。観測データから得られたスペクトルと比較すると、既に説明した高周波数でスペクトルの減衰が大きいことのほかに観測では2つのピークが見られることと低周波数側でも減衰が大きいという違いが見られる。しかし、おおよそのスペクトルの形としてはKarman型のスペクトルで良く表すことが出来ると考えられる。

次に、各観測点におけるパワースペクトルを北風

で最も風の強いケース（ケース2）（Fig. 7）と南風で最も風の強いケース（ケース5，40分間での平均風速は2号鉄塔頂部の基準風速計で21.6m/s）

（Fig. 8）について示す。ここで、図中では収録チャンネル番号で示す各観測点のうち、CH.1~26は水平風速、CH.34~37は鉛直風速についてのスペクトルである。

北風のケースについては、水平風速についておおよそ周波数0.01~0.05Hz、周期にして20~100秒程度の所に、また、鉛直風速についてはおおよそ周波数0.05~0.2Hz、周期にして5~20秒程度の所にパワースペクトルのピークが見られる。また南風のケースについては、水平風速についておおよそ0.007~0.04Hz、周期にして30~140秒程度の所に、また、鉛直風速についてはおおよそ周波数0.01~0.09Hz、周期にして10~100秒程度の所にピークが見られる。水平風速、鉛直風速とも南風のケースの方がピークの見られる範囲が少し低い周波数（大きい周期）の方にシフトしている。

北風（Fig. 7）と南風（Fig. 8）についての各観測点でのパワースペクトルを見ると、場所によりスペクトルのピークの位置に違いが見られる。そこで、北風7ケースと南風7ケースのそれぞれに対して各観測点でのパワースペクトルから（パワースペクトル密度関数 $P(f)$ に周波数 f を掛けたものについての）ピークを示す周波数を求め、北風と南風のそれぞれで平均した。Fig. 9はその敦賀試験線に沿った方向での水平分布を示す。図中では縦の棒（I）で示すケース間のばらつき標準偏差はかなり大きい。しかし図の左側に示す下層での分布の形について北風と南風では明らかな違いがあることが分かる。北風についてはP1とP9付近でピーク周波数の高い二山型の分布をしており、南風についてはP6、2号鉄塔と、特にP12で高くなっている。また、北風、南風とも図の右側に示す上層ではピーク周波数が低めとなっている。

北風の場合、ピーク周波数の低い場所は斜面による収束で平均風速が強く、前節で述べた風向方向の乱れの積分スケールが大きい場所に対応する傾向があるが、南風では明瞭な関係は見られない。Taylorの凍結渦の仮説が成り立つとしてピーク周波数を平均風速値を用いてピーク波長に換算すると、北風・南風ともピーク波長の大きい所は平均風速が強く風向方向の乱れの積分スケールが大きいという比較的良い対応関係を示すようになる。北風と南風との関係についても、ピーク周波数については南風の方が少し低い傾向が見られるが、下層での平均として平均風速の強い北風の方がより風向方向の乱れの積分

スケールが大きく、ピーク波長でも大きくなっている。以上のことは、斜面での収束などによる風速の変化により、時間的なスケールよりも空間的なスケールの方が対応した変化をすることを示唆している。

3.4 風速変動のコヒーレンス

空間距離 l の2点（A,B）間の周波数 f における風速変動のコヒーレンスは次式で定義される。

$$Coh(f, l) = \frac{Co^2(f) + Qu^2(f)}{P_A(f) \cdot P_B(f)} \quad (3)$$

ここで、 $Co(f)$ 、 $Qu(f)$ はそれぞれコスペクトル、クオドラチャースペクトルの値を表し、 $P_A(f)$ 、 $P_B(f)$ はそれぞれ観測点A,Bでの風速変動のパワースペクトルの値である。このコヒーレンスの値の平方根をとったもの、すなわちルートコヒーレンス $R(f, l)$ は、周波数別に見た空間相関を表している。

敦賀試験線では1号鉄塔-2号鉄塔径間において下部琵琶湖側の電線（B相）に揃えた高さで水平風速の測定を行っており、風向直角方向（試験線に沿った方向）についてはこの径間のみについてプロベラ型風速計観測点（CH.1~10）の全ての組み合わせについてのコヒーレンスを計算した。また、風向直角方向以外に風向方向については2号鉄塔-P13（CH.19, 9, 21）のプロベラ型風速計観測点の全ての組み合わせと、鉛直方向については1号鉄塔（CH.1, 22）・2号鉄塔（CH.26, 20, 9, 23）・P9（CH.13, 24）・3号鉄塔（CH.17, 25）におけるプロベラ型風速計観測点の全ての組み合わせについてもコヒーレンスを計算した。鉛直風速についてのコヒーレンスも2号鉄塔の中段と上段（CH.35, 36）という鉛直方向の組み合わせについて計算した。

コヒーレンスについても前節のスペクトル解析と同じケースのサンプリング周波数10Hzで各40分間のオリジナルデータから5個ずつ平均して評価時間0.5秒のデータを作成し、初めから4096個（34.1分）のデータに対して解析を行った。その際のデータ処理の方法はスペクトル解析と同様であり、周波数について帯域に分けたブロック平均を施して平滑化を行っている。

求めたルートコヒーレンスを北風で最も風の強いケース（ケース2）（Figs.10, 11, 12）と南風で最も風の強いケース（ケース5）（Figs.13, 14, 15）について示す。横軸には周波数を対数軸上に取っている。なお、CH.AとCH.Bのルートコヒーレンスを図中ではCH.A*Bとして示している。前節で述べたように測定に使用しているプロベラ型風速計の特定

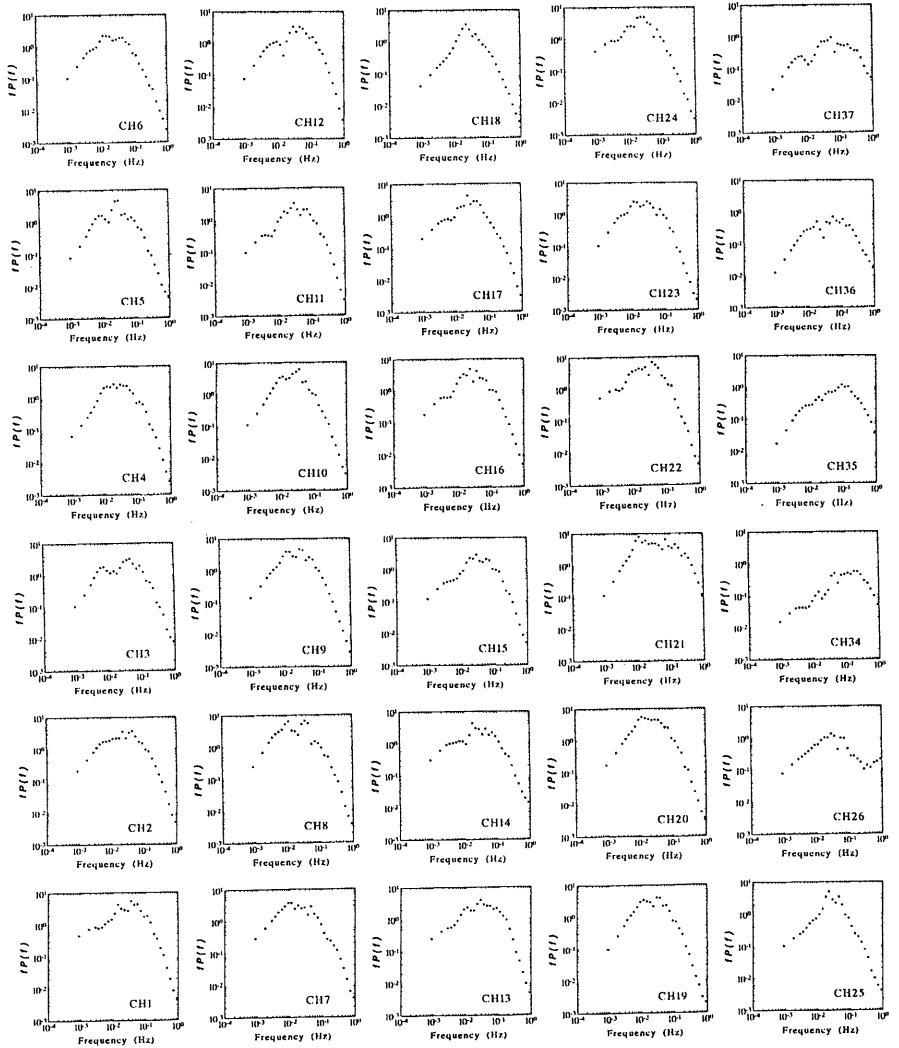


Fig. 7. Power spectra measured at each observation point in case N-2. The power spectra $P(f)$ weighted by frequency f for ch.1-26 of horizontal velocity and ch.34-37 of vertical velocity are shown.

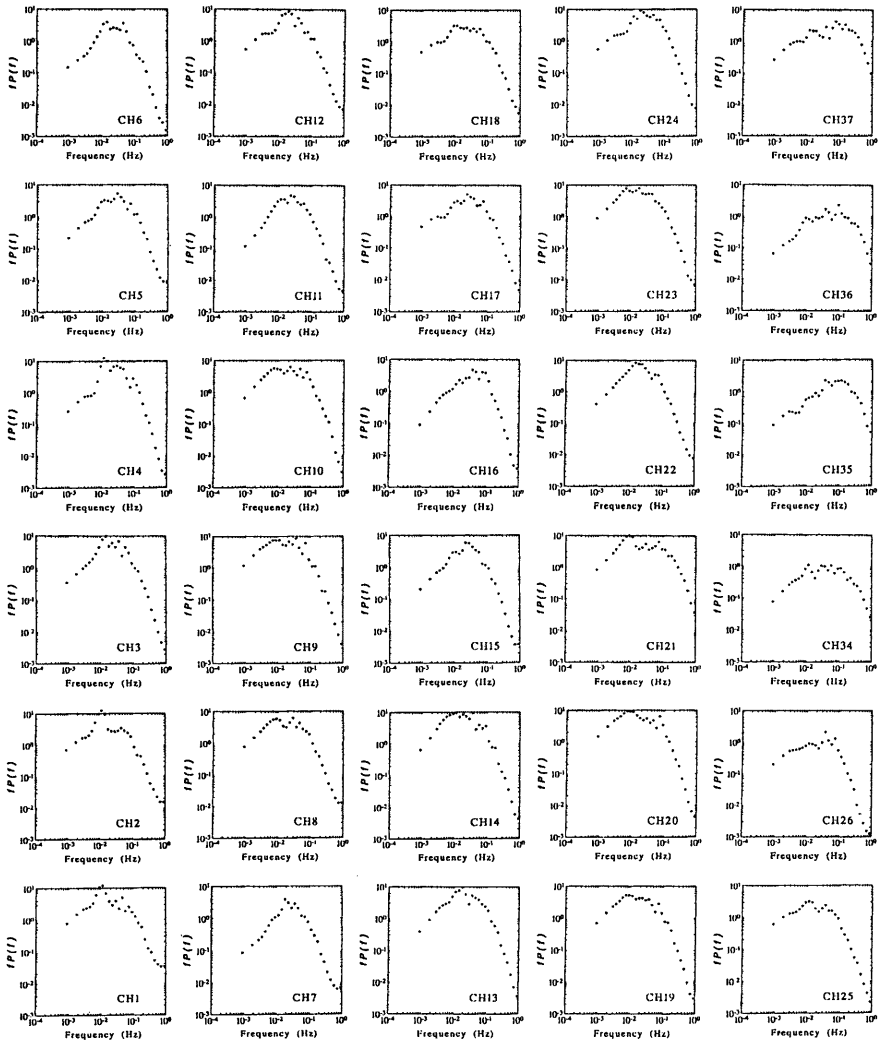


Fig. 8 As in Fig. 7, but for case S-5.

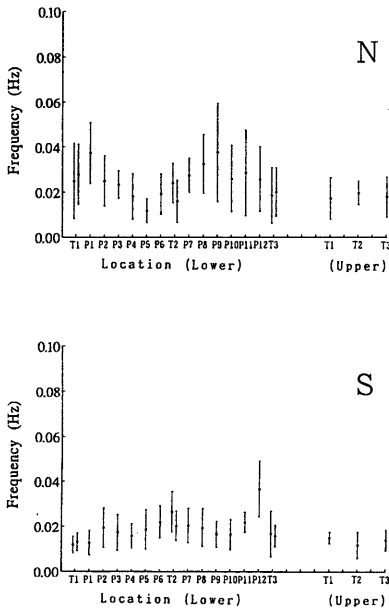


Fig. 9 Horizontal distributions of the peak frequency of the power spectrum along the test line for the each group (wind direction). The values measured at the middle level of the each tower and the upper level of the each pole (lower level for P9) are indicated on the left. The values measured on the top of the each tower are indicated on the right. Average values within the each group are marked with closed circles (•) and standard deviations are indicated with bars (I).

数が大きく、パワースペクトルの高周波数側 (0.2 Hz程度以上) では大きな減衰が示されているので、コヒーレンスについてもその値に影響を与えている。また、FFTの特性から高周波数側ではスペクトルについて大きな変動が示され、周波数について帯域に分けたブロック平均を施して平滑化を行っているために高周波数側でもある程度のコヒーレンスの値が示されている。これらのことから高周波数側 (0.2 Hz程度以上) でのコヒーレンスの値は信頼出来ないので注意を要する。

まず水平風速の風向直角方向の組み合わせについて、そのコヒーレンスの値 (Figs.10, 11, 13, 14)

を検討する。距離が近い測点同士ではその値が比較的大きいと予想される。しかし、各鉄塔での西側と東側で距離14mという近い測点同士 (1号鉄塔CH.1-2, 2号鉄塔CH.9-10) でのコヒーレンスは低周波数側で比較的大きめの値を取る傾向があるが、それ以外の距離50mの測点同士では北風ケース2でのP1-P2 (CH.3-4) におけるように低周波数側でもあまり値が大きくない場合が多く見られる。いづれにせよ50m以下の比較的距離が短い測点同士でも0.01Hz程度以上の周波数ではそのコヒーレンスの値はあまり高くない。

距離が50mより大きな場合には全般的にそれ程コヒーレンスは低周波数でも大きくない。これは、風向直角方向の乱れの積分スケールが3.2節で示したように北風で71m, 南風で37mと小さく、風向直角方向の空間相関の程度が低いことに対応した結果であると考えられる。しかし、北風ケース2での1号鉄塔中段東側-P5 (CH.2-7) のようになりに距離が離れていても (この場合は243m) 低周波数でコヒーレンスが大きい場合も見られる。このような場合、ここでは各グループ (風向) のうち一つのケースについてのみ図で示したが、ケースによってはコヒーレンスの高くない場合もあり、ケース間のばらつきがある。また、低周波数で値がそれ程高くなくても周波数0.01Hz程度でコヒーレンスが高くなりピークを示す場合が多く見られる。なぜこのような現象が現れるのか、解析方法も含めて今後検討する必要がある。

風向方向 (Figs.12, 15) については2号鉄塔の北側と南側で距離16mという近い測点同士 (CH.19-9) でのコヒーレンスは高周波数までかなり高いが、距離がCH.19-21で59m, CH.9-21で43mと離れる2号鉄塔とP13との組み合わせになると北風ケース2ではコヒーレンスの値は低周波数からあまり高くなり、南風ケース5でも周波数0.01Hz程度で急激に減少している。

鉛直方向 (Figs.12, 15) についてはその距離が最大でも2号鉄塔頂部66m-15m (CH.23-26) 間での51mであり、コヒーレンスの値は低周波数側で比較的大きい。鉛直風速に対する鉛直方向の組み合わせについてはある程度高いコヒーレンスを示している。

一般的には、ルートコヒーレンスは無次元周波数 $f l / \bar{u}$ (\bar{u} は平均風速) に対して次のような形で表されることが考えられている。

$$R(f, l) = \exp(-k f l / \bar{u}) \quad (4)$$

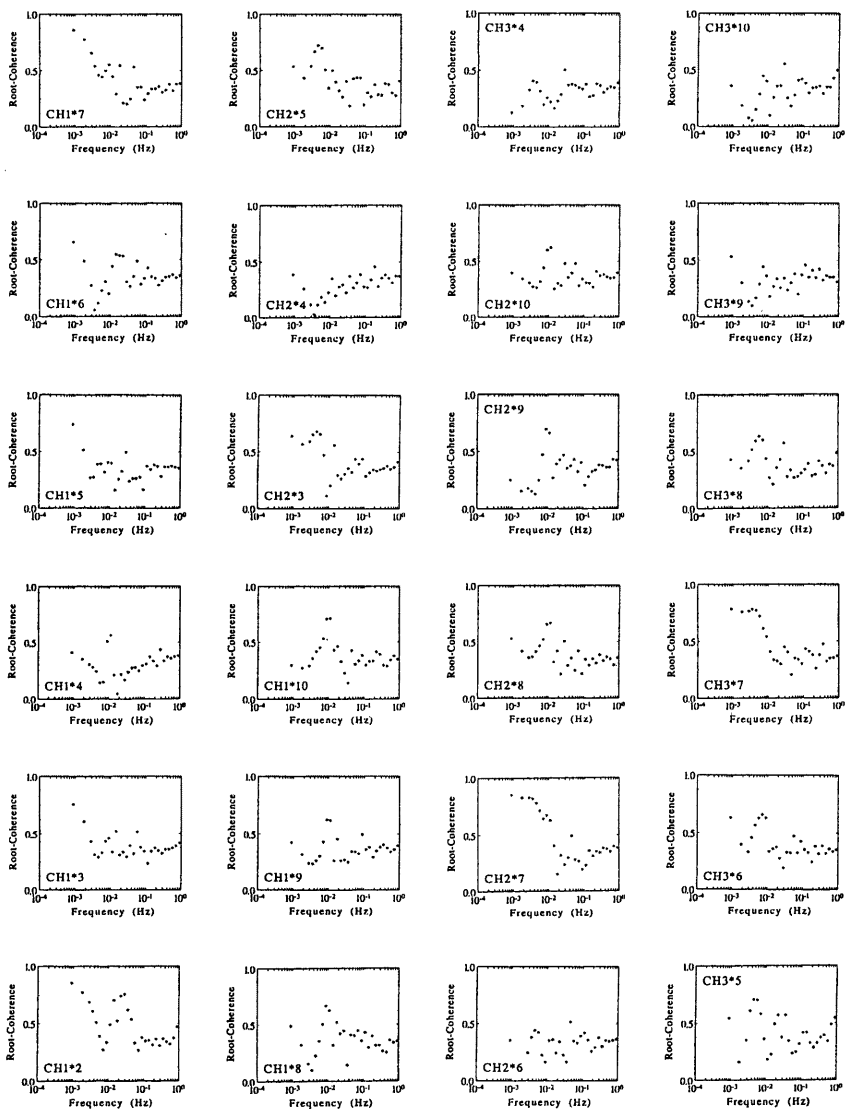


Fig.10 Root coherences between horizontal velocity fluctuations at two observation points in case N-2. Lateral combinations in towers No.1 - No.2 (ch.1-10) (part 1).

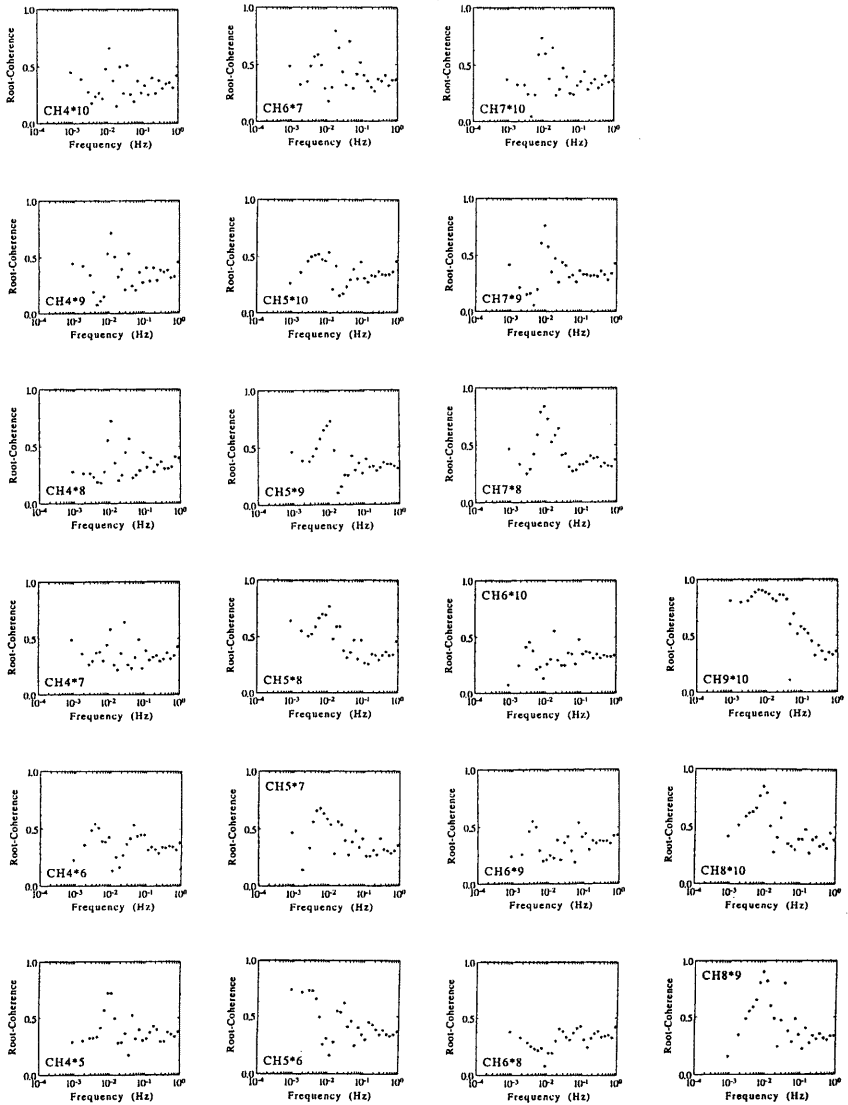


Fig.11 Root coherences between horizontal velocity fluctuations at two observation points in case N-2. Lateral combinations in towers No.1 - No.2 (ch.1-10) (part 2).

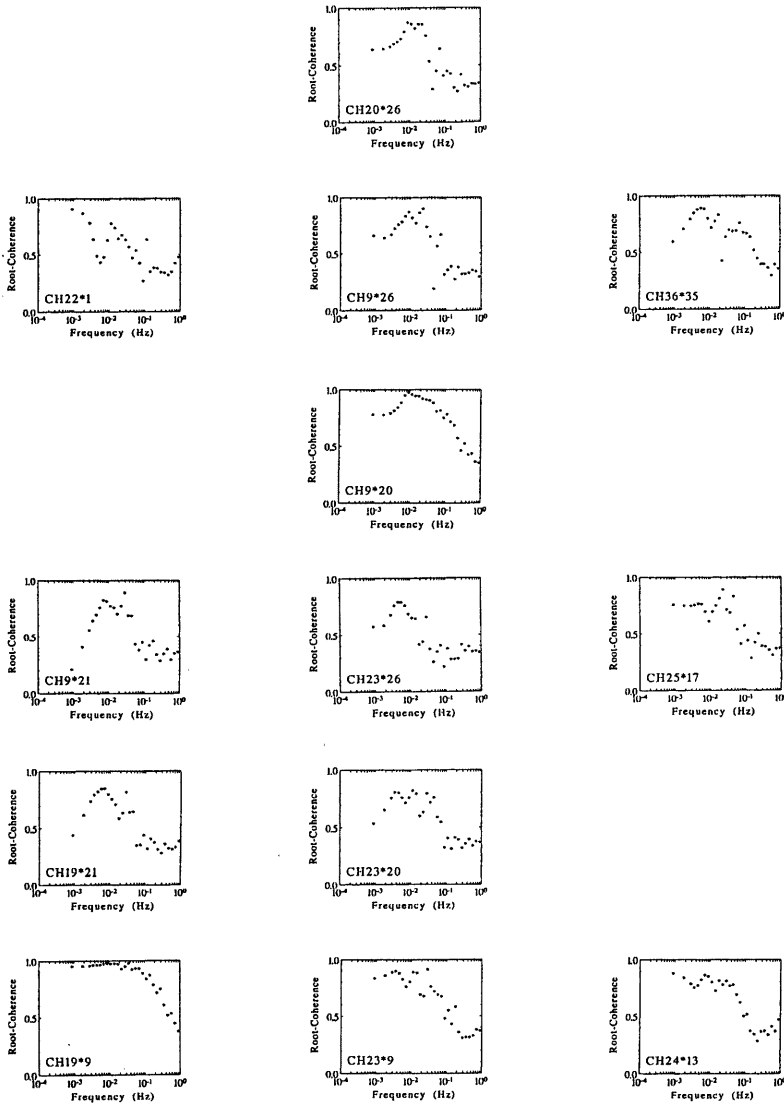


Fig.12 Root coherences between velocity fluctuations at two observation points in case N-2. Longitudinal combinations in T2 - P13 and vertical combinations at T1, T2, P9, T3 for horizontal velocity (ch.1-26). A vertical combination at T2 for vertical velocity (ch.35, 36) is also shown.

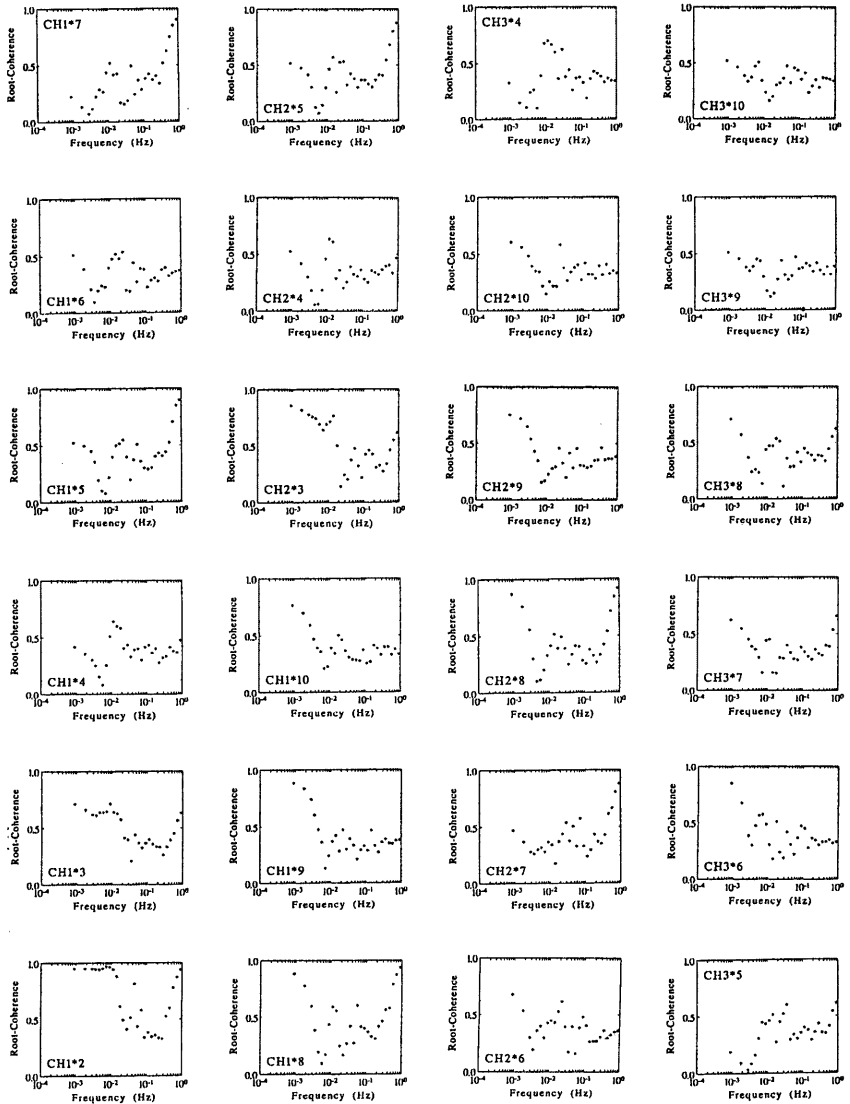


Fig.13 Root coherences between horizontal velocity fluctuations at two observation points in case S-5. Lateral combinations in towers No.1 - No.2 (ch.1-10) (part 1).

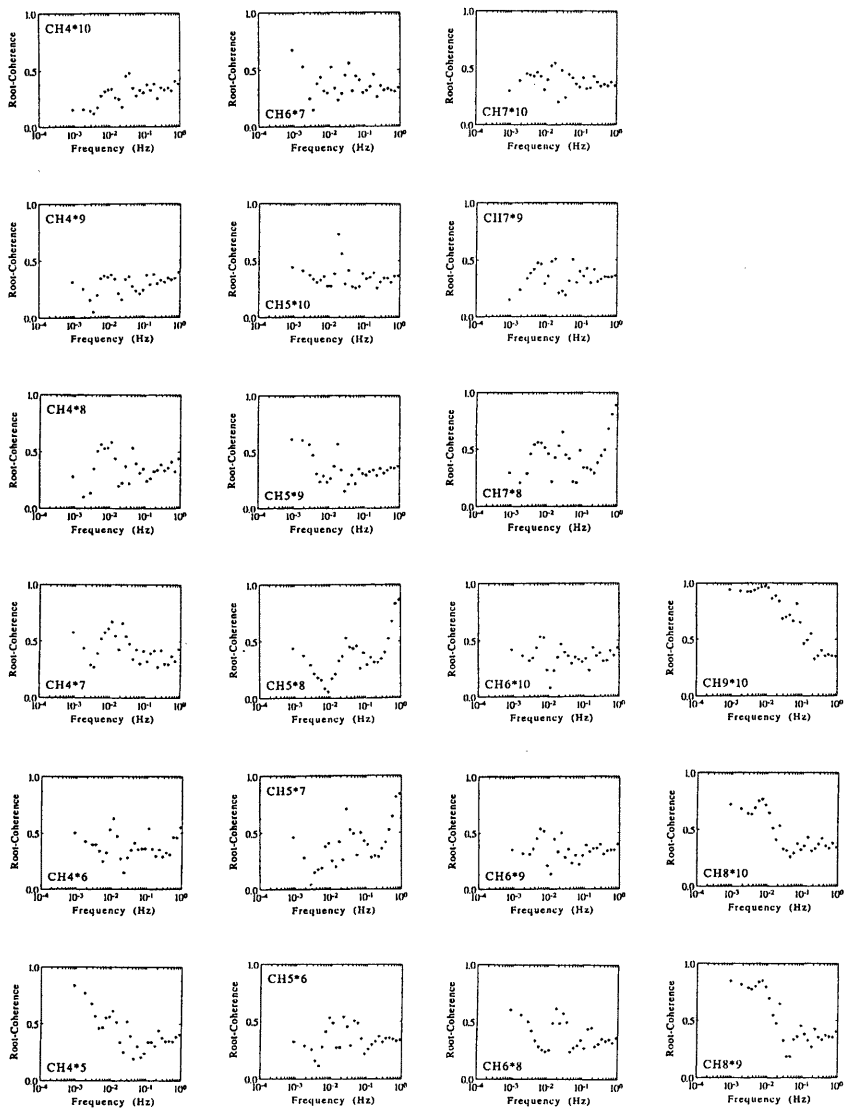


Fig.14 Root coherences between horizontal velocity fluctuations at two observation points in case S-5. Lateral combinations in towers No.1 - No.2 (ch.1-10) (part 2).

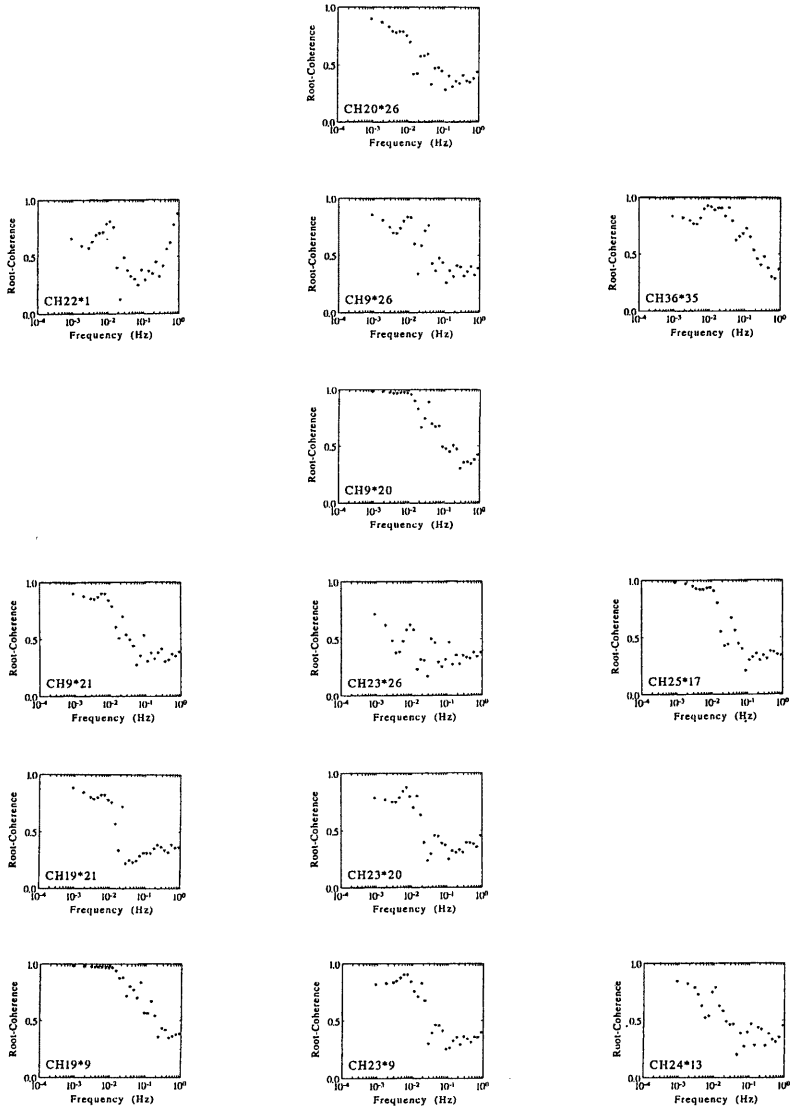


Fig.15 Root coherences between velocity fluctuations at two observation points in case S-5. Longitudinal combinations in T2 - P13 and vertical combinations at T1, T2, P9, T3 for horizontal velocity (ch.1-26). A vertical combination at T2 for vertical velocity (ch.35, 36) is also shown.

ここで k は減衰定数と呼ばれる。Iwatani (1977) による平地での観測では風向直角方向の組み合わせについての減衰定数として、 z を観測点の高度とした時に $k=14(1/z)^{0.46}$ という値が得られている。敦賀試験線における風向直角方向の組み合わせについて、コヒーレンスの周波数に対する依存性がある程度式(4)で近似出来る形になっている場合も見られるが、山岳地におけるコヒーレンスの特徴として上記の様に低周波数でも値が低い場合や、さらに周波数0.01 Hz程度でピークを示すような形になっている場合も多い。

4. おわりに

山岳地における風の乱流特性を調べるために、琵琶湖の北側の山岳地にある関西電力敦賀試験線で観測を行い、この場所での代表的な風向である北風と南風のケースについてそのデータを解析した。その解析結果を要約すると以下のようになる。

乱れの強さで示される風速変動が大きい南風の時には水平風速についてどの方向でも乱れの積分スケールが小さく、風の空間的な相関が低い状況になっている。

水平風速の観測例について求められた風速変動のパワースペクトルは、Karman型のスペクトル近似式でおおむね良く表すことが出来る。また、水平風速について北風でおおよそ周波数0.01~0.05Hz、周期にして20~100秒程度、南風では0.007~0.04Hz、周期にして30~140秒程度の所にパワースペクトルのピークが見られる。

スペクトルのピーク周波数を波長に換算して考えると、敦賀試験線に沿った方向での水平分布について、北風・南風ともピーク波長の大きい所は平均風速が強く風向方向の乱れの積分スケールが大きいという比較的良好な対応関係が見られる。北風と南風との関係についても、ピーク周波数については南風の方が少し低い傾向が見られるが、下層での平均として平均風速の強い北風の方がより風向方向の乱れの積分スケールが大きく、ピーク波長でも大きくなっている。これらのことは、斜面での収束などによる風速の変化により、時間的なスケールよりも空間的なスケールの方が対応した変化を示唆している。

測点間の風速変動のコヒーレンスについては、50

m以下の比較的距離が短い測点同士でも0.01Hz程度以上の周波数ではそのコヒーレンスの値はあまり小さくなく、距離が50mより大きな場合には全般的にそれ程コヒーレンスは低周波数でも大きくない。これは、風向直角方向の乱れの積分スケールが大きくなり、空間相関の程度が低いことに対応した結果である。

山岳地、この研究では特に敦賀試験線における風の分布と乱流特性についてさらにデータ解析を進め、定量的にその状況を記述することが必要である。

謝 辞

今回の研究にあたり敦賀試験線の観測設備を利用させていただいた関西電力株式会社の方々と、観測機器等の点検・保守について御協力して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

- 堀口光章・光田 寧 (1994) : ドップラーソーダによる山岳地での上空風観測, 京都大学防災研究所年報, 第37号B-1, pp.23-34.
- 堀口光章・光田 寧 (1995) : 山岳地における風の分布と乱流特性, 京都大学防災研究所年報, 第38号B-1, pp.85-100.
- 光田 寧・塚本 修 (1980) : 強風時における風の乱れの空間的構造, 京都大学防災研究所年報, 第23号B-1, pp.303-323.
- 光田 寧・塚本 修・根井 充 (1983) : 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, pp.363-374.
- Iwatani, Y.(1977): Some features of the spatial structures of the surface layer turbulence in the high wind condition, J.Meteor.Soc.Japan, Vol.55, pp.130-137.
- Mitsuta, Y., Tsukamoto, O. and Neno, M.(1983): Wind characteristics over complex terrain, J.Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.15, pp.185-196.
- Shiotani, M. and Iwatani, Y.(1976): Horizontal space correlations of velocity fluctuations during strong winds, J.Meteor.Soc.Japan, Vol.54, pp.59-67.

Spatial Distribution of Wind and Turbulence Characteristics over the Mountainous Region (II)

Mitsuaki Horiguchi and Yasushi Mitsuta

Synopsis

Turbulence characteristics of wind and their spatial distributions over the mountainous region are investigated. Field observations of velocity fluctuations were made along the test power transmission line (Tsuruga Test Line). This test line is located a little north of a ridge line which runs roughly along the west-east direction. In relation to the stronger mean wind speed, the integral scales of turbulence and the spectral peak of the wavelength for the north wind are larger than those for the south wind. The spectral peak of the wavelength is large in the location along the test line where the mean wind speed is strong and the longitudinal integral scale of turbulence is large.

Keywords: turbulence; spectrum; coherence; mountainous region