

山岳地における風の分布と乱流特性

堀口 光章・光田 寧

SPATIAL DISTRIBUTION OF WIND AND TURBULENCE CHARACTERISTICS OVER THE MOUNTAINOUS REGION

By *Mitsuaki Horiguchi* and *Yasushi Mitsuta*

Synopsis

Spatial distribution of wind and turbulence characteristics over the mountainous region are investigated. Field observations of wind by propeller anemometers were made along the test power transmission line (Tsuruga Test Line) near the ridge. In this area, northerly and southerly wind direction is dominant due to east-west direction of the ridge line.

Therefore, analysis was made for the cases of the north wind and the south wind. However, in the cases of the southerly wind, strongest wind cases at the top of the No. 3 tower among other observing points are seen a little easterly deviated wind case. These cases can be classified into a different group of data from other southerly wind cases. Different spatial distributions of wind characteristics were found among these groups. The difference between the north wind and the south wind may be attributed to the local topography, because the ridge line is located a little south of the test line. It is considered that slight deviation of wind direction over this area made the difference between two groups of the south wind due to the topography. In relation to the turbulence intensity, integral scale of the turbulence for the north wind is larger than that for the south wind.

1. は じ め に

複雑な地表面起伏を持った山岳地における風は、地形により風向が変えられたり収束して風速が強められたりするなどによって風速や風向が一様でない水平分布を示し、また、平坦な場所とは異なった鉛直構造を示すことが考えられる。さらに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。山岳地における風が地形によりどのように影響されて吹いているのかを調べることは、そのような山岳地に建設される構造物例えば送電線への風圧荷重を検討する上でも重要な課題である。

琵琶湖の北側の福井県と滋賀県との県境付近の山岳地にある実験用送電線の関西電力敦賀試験線ではプロペラ型風速計などにより風の観測が行われてきており、観測結果の一部は既に報告されている^{1,2)}。1987年にはさらに詳細な風観測及び総合的な気象観測を行うために観測施設と測器の拡充を行い、また1990年からは音波を使ったりモートセンシング装置であ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³⁾。ここでの解析は1987年以降の試験線上での観測データについて新たに行ったものであり、この場所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。

2. 観測の概要

2.1 地形の概要

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標高およそ 600 m から 800 m の山岳地に設置されている。観測地付近の詳細な地形は Fig. 2 に示す通りである。Fig. 2 に書き込まれている太い破線はおおよそ東西に延びる稜線を示しており、試験線はほぼ稜線に沿っているが、特に 2 号鉄塔から 3 号鉄塔にかけてはやや稜線より北側に位置していることが分かる。また、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 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り、その標高差は約 180 m ある。またその向きは東西方向から時計回りに約 10 度ずれた方向に延びている。

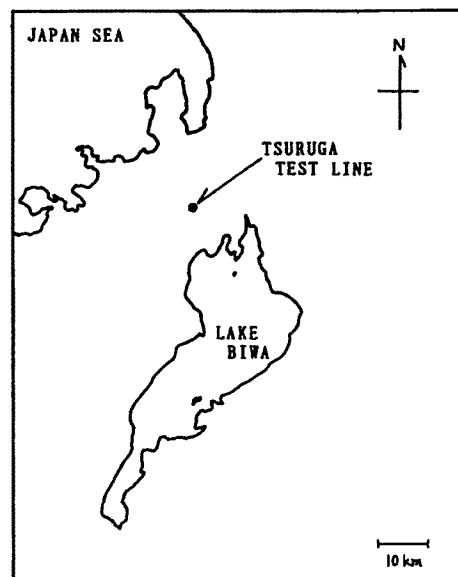


Fig. 1. Location of the Tsuruga Test Line.

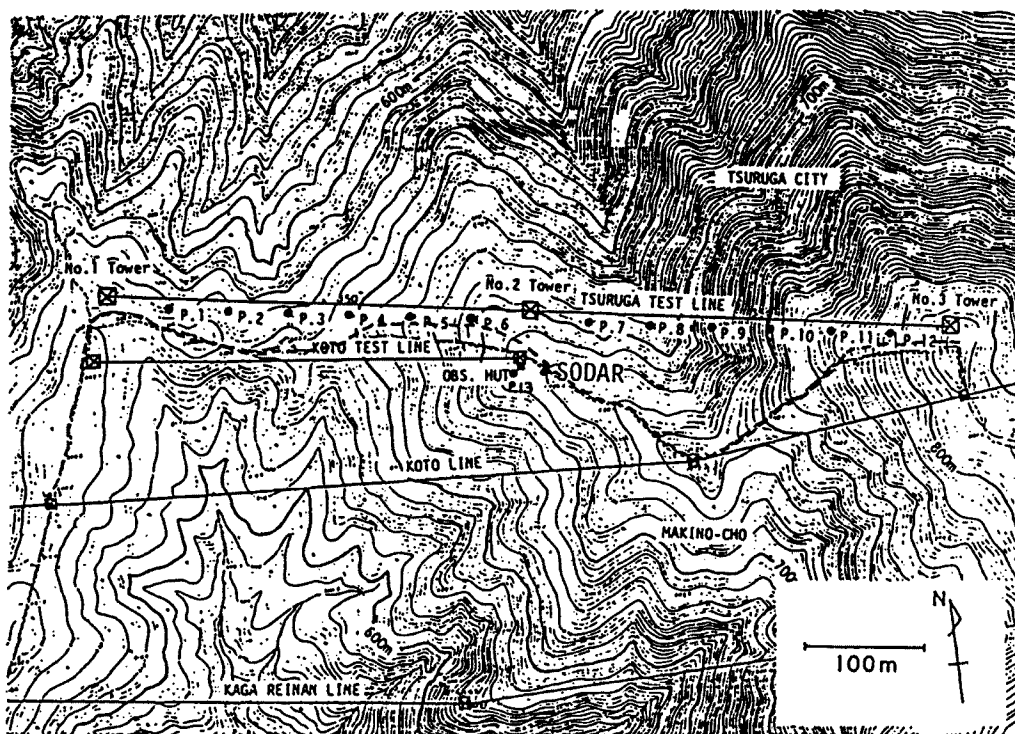


Fig. 2. Detailed map around the Tsuruga Test Line. No. 1–No. 3 towers are main towers of the test line. P. 1–P. 13 are observation poles. The thick broken line shows the ridge line near the test line. The solid circle denoted by “SODAR” shows the position of the Doppler sodar.

2.2 敦賀試験線気象観測システム

敦賀試験線における気象観測は1号から3号の鉄塔、P1からP13までの観測柱、及び観測本館において行っている。観測柱は主に風の分布の観測のために建てたものであるが、1号鉄塔から2号鉄塔間には下部琵琶湖側の電線（B相）の下方4mの高さに測器が設置出来る高さにそろえてP1からP6まで50mおきに観測柱を建設した。一方、2号鉄塔から3号鉄塔間では地上高20mにそろえて、電線よりも高くなるものについては適宜低くなるようにしてP7からP12まで50mおきに観測柱を建設した。さらに試験線に直交する方向での風の分布を調べることなどのために、2号鉄塔から南側に約50m離れた観測本館のすぐ脇（南西側）にP13を建てた。

敦賀試験線では、気象観測でも特に風の観測に重点を置くために、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、4台の超音波風速計、及びドップラーソーダを設置している。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、及び雨量計を使用している。

以上の測器のうち、P13におけるものと超音波風速計を除いて風の測定に使用するものの位置関係を詳細に示したのがFig. 3である。この図は南方向から見た地形の鉛直断面図であり、水平距離とは等縮尺で書かれている。各観測点での地表面高度と測定点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。

風観測用の機器のうち、まずプロペラ型風速計は1号鉄塔と3号鉄塔においては中段の南東側と南西側、及び上段（頂部）に計3台設置し、2号鉄塔ではこれに加えて中段の北西側と、より下部の30mと15mにも設置した。各鉄塔間においては、P1からP12までの観測柱の上部（頂部）にプロペラ型風速計を設置したが、P9においてはその下部にも設置した。また、P13にもその頂部にプロペラ型風速計を設置した。これらの風速計のうち風向を検出するためのポテンショメータを組み込んだものは、1, 2, 3号鉄塔上段（頂部）、P3, P9上部、P13, 2号鉄塔中段の南西側のものの合計7台である。

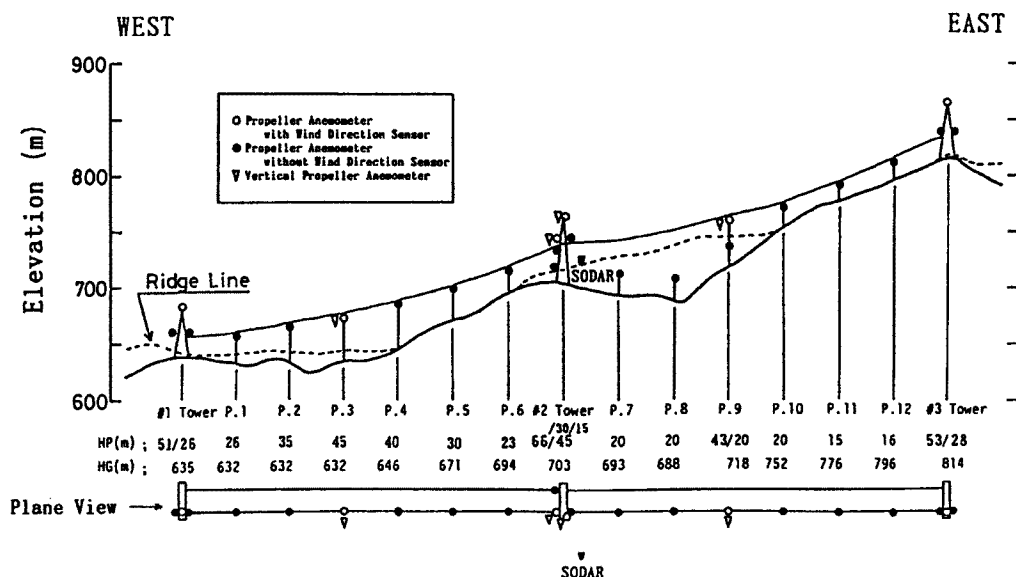


Fig. 3. Profiles of topography from the south. The thick solid line indicates the ground level and the dashed line indicates the ridge line which is a little south of the test line. The thin solid line is the lower test power line installed on the main towers. The locations of anemometers are marked 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.

風の水平成分を測定する上記のプロペラ型風速計のほかに、風の鉛直成分を測定するためにプロペラ型鉛直風速計をP3、2号鉄塔中段と上段、及びP9上部の4箇所に設置した。また、風の変動をその3成分(東西、南北、鉛直)独立に測定することが出来る超音波風速計をP9下部、2号鉄塔中段、3号鉄塔中段、及びP13の4箇所に設置した。さらに、上空の風を測定するために、音波によるリモートセンシング装置であるドップラーソーダを観測本館東側の稜線上に設置した。

観測本館内のパーソナルコンピュータによりデータ収録しているドップラーソーダ以外の測器のデータは、琵琶湖側山麓のマキノ町にあるマキノ観測基地に光ファイバーで伝送されている。このマキノ観測基地にはデータ収録装置を設置して、2号鉄塔頂部のプロペラ型風向風速計(基準風速計)がある風速値を越えるとデータが磁気テープに収録されるようにした。この設定風速値は15 m/s から 20 m/s 間で状況によって適宜変えている。データの収録は10分間単位で、10分間データが収録された後さらに基準風速計の風速値が設定風速値を越えている場合には次の10分間もデータが収録される。このような強風時の観測以外に、山岳地での気象の1年を通じて、また年々の変化を調べるために、1987年8月より毎日1回定時、14時50分から15時までの10分間のデータ収録も行っている。データのサンプリング周波数は強風時観測が10 Hz、定時観測が2 Hzである。

2.3 観測データ

敦賀試験線が設置されている場所は複雑な地形を持った山岳地であるので、風の性質はその風向によって変わることが考えられる。1987年から1993年にわたる定時観測のデータを用いて1、2、3号鉄塔頂部での風速・風向の分布を示したのがFig. 4である。どの場所でも北寄りまたは南寄りの風向である日が圧倒的に多いことが分かる。なお、このような風向分布になるのは、敦賀試験線付近に稜線が走っており、斜面で風が収束して稜線に直交する風速成分が強化され風向が稜線に直交する方向に曲げられるため、ほぼ東西に稜線が走るこの場所では一般的に風向が北寄りまたは南寄りになることが多いと考えられる。

上記のように、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ので、次章における観測データの解析は北寄りと南寄りの風向の時だけについて行うことにする。北寄り、南寄りの風向の場合(以降、単に北風、南風と呼ぶ)を選び出す時の基準としては2号鉄塔頂部のプロペラ型風向風速計(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。また、風速については、基準風速計で10分間平均風速が18.0～23.2 m/sの比較的強風である場合を用いた。

1987年から1993年までの強風時観測の記録より、風向と風速が上記の基準の範囲であり観測機器の欠

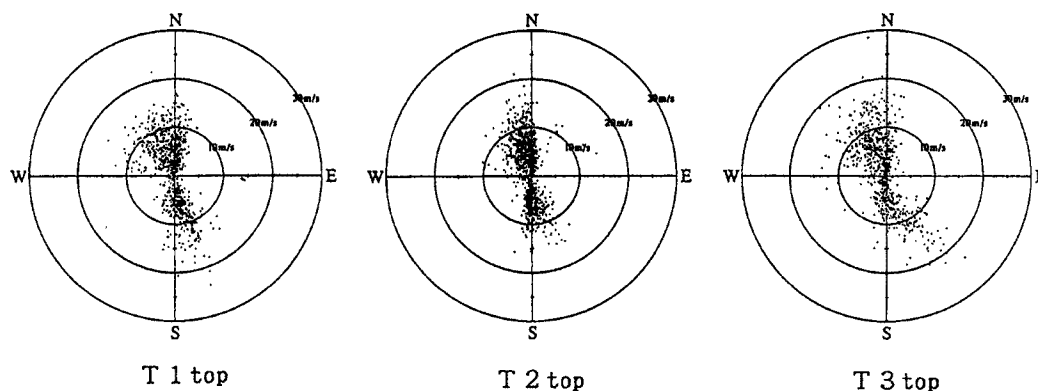


Fig. 4. Distributions of the wind speed and wind direction averaged for 10 minutes by the propeller anemometers on the top of each tower. Daily regular observations were made at 14:50–15:00 during Aug. 1987 and June 1993.

測が少ないケースを選び出して解析を行った。各ケースは10分間の観測記録である。観測記録のうち解析で使用したのは、水平風速についてはプロペラ型風速計とプロペラ型風向風速計、鉛直風速についてはプロペラ型鉛直風速計による測定データである。

北風、南風のうち南風については、3号鉄塔での風速が他の測点での風速に比べて非常に大きい場合が時々観測されている。そこで、南風のうち、3号鉄塔頂部での風速値が1号鉄塔から2号鉄塔間の平均風速値より1.5倍以上大きい場合を南風グループ2として、それ以外の南風グループ1とは分けて取り扱うこととする。

以上の分類によるそれぞれのグループでの解析ケース数を以下に示す。なお、N, S1, S2という分類記号を以降の図中では使用している。

北風 (N) : 9 ケース
 南風グループ1 (S1) : 6 ケース
 南風グループ2 (S2) : 7 ケース

南風グループ1、2の分類については、上記のように3号鉄塔頂部での風速値を用いたが、3号鉄塔はFig. 3を見て分かるように敦賀試験線でも最も標高が高く、特にその頂部での風はほかの測点に比べて地形の影響が少なく、そこでの風速と風向は試験線上空を吹く風の一般的な状況を表していると考えられる。解析したケースにおける3号鉄塔頂部での風速・風向の分布をFig. 5に示すが、南風グループ2では全てかなり東寄りの風向となっており、南風グループ1のほぼ真南の風向とは明確に分かれている。上空の風で見ると南風グループ2ではほぼ東南の風であり、結果的には上空の風向による分類ともなっていることが分かる。このように南風が2つに分類されるのは、稜線が3号鉄塔の所から南の方向に走っており、この南北稜線の左側から風が吹くか(グループ1)、右側から吹くか(グループ2)の差によって生じるものであると考えることが出来、局所的な地形が風の吹き方に大きな影響を与えていることを示すものである。

なお、相関解析を行うケースとしては各ケースについて長時間のデータを必要とするため別のケースを用いなければならなかった。そこで、磁気テープの観測記録の中から比較的強風(基準風速計での10分間平均風速が15 m/s以上)で40分間データが連続して収録出来た場合の12ケース(北風：7ケース、南風グループ1：2ケース、南風グループ2：3ケース)を選び出して使用した。

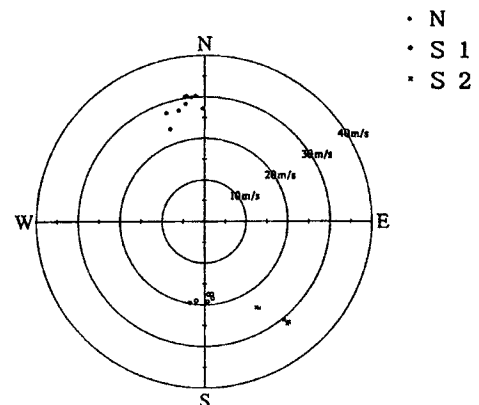


Fig. 5. Distributions of the mean wind speed and wind direction on the top of the No. 3 tower for the analyzed cases.

3. 観測結果

3.1 風の水平分布

この場所での風の性状の特徴を調べるために、まず北風、南風グループ1、南風グループ2の各場合についての敦賀試験線に沿った方向での平均風速の水平分布をFig. 6に示す。各測点での縦の棒の真ん中の黒丸が各グループでの平均値、縦の棒はばらつきの標準偏差を示している。また、図の左側は、各鉄塔については中段での測定値、各観測柱ではその上部(P9は下部)での測定値を示している。一方、図の右

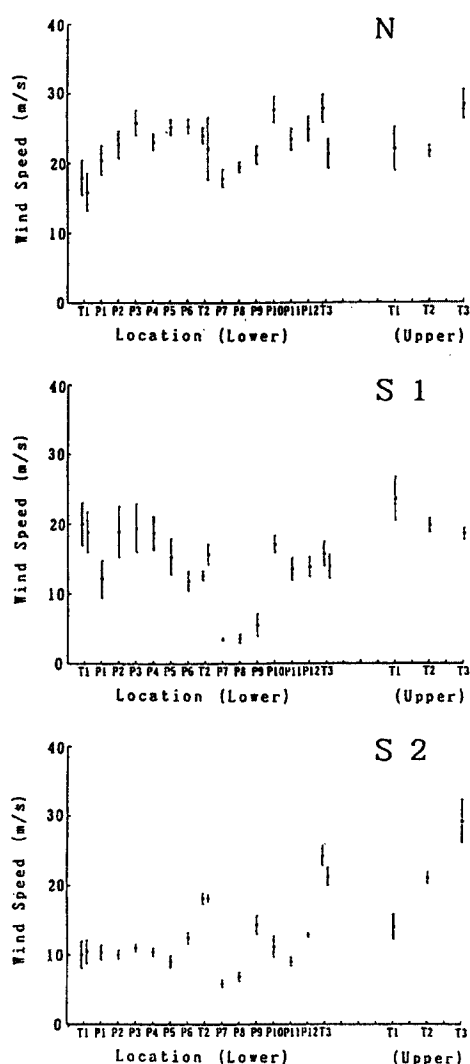


Fig. 6. Horizontal distributions of the mean wind speed along the test line for the each group. The values measured at the middle level of the each tower and the upper level of the each pole (lower level for P9) are indicated on the left. The values measured on the top of the each tower are indicated on the right. The average values within the each group are marked on the figure with closed circles (•) and the standard deviations within the each group are indicated with the bars (I).

側は各鉄塔頂部での測定値である。

北風の場合, Fig. 6 の左側に示す下層での平均風速の水平分布を見ると, P3 付近と P10 付近が大きくて P7 付近が小さいという二山型の分布をしている。風の分布で山になっている地点は稜線が測点に比較的近く, また北寄りの風で稜線の風上側であるから, 斜面による風の収束により大きな風速値を示していると考えられる。また, P7, P8 付近は 2 号鉄塔から 3 号鉄塔間の谷間に観測柱があり, しかも測定高度が 20 m で近くの稜線の高さよりも低い。そのために他の測点よりも風速が弱くなっているものと思われる。図の右側に示す上層での風速について見てみると, 1 号鉄塔頂部と 2 号鉄塔頂部は同程度の風速であるが, 3 号鉄塔頂部では 30% 程度値が大きくなっている。これは, 3 号鉄塔は設置標高が高く, 地形の影響が少ないためと考えられる。

この平均風速の水平分布に関連して風向の水平分布を見るために, 1 号鉄塔から 3 号鉄塔まで 5 点での平均風向の各グループでの平均とばらつきの標準偏差を求めて Table 1 に示す。北風の場合には, この表から分かるように P3 で他の測点よりもやや東寄りの風向であること以外は測点ごとでの顕著な傾向は見られない。この P3 では平均風速の水平分布で山になっていて風の収束による風速強化が考えられたが, これにより風向についてもその向きが変えられていることが考えられる。

次に南風の場合について, 敦賀試験線に沿った方向での平均風速の水平分布を調べる。敦賀試験線付近を走る稜線は測線よりもやや南側に位置するため, 北風の場合と南風の場合では測線から見て風上側の地形が大きく異なることになる。そのために南風の場合の平均風速の水平分布は, 北風の場合と比べて大きく異なる形となる。また南風については, 3 号鉄塔頂部での風速と風向により 2 つのグループに分類したが, 3 号鉄塔以外の測点でもこの 2 つのグループで違いが見られる。

南風グループ 1 と南風グループ 2 について, 下層での平均風速の水平分布 (Fig. 6) を見ると, 南風の場合の特徴として, P7, P8 の測点では風速が極端に弱くなっている。これらの地点では北風の場合

でも他の測点に比べて風が弱い傾向が見られたが, 南風の場合には測点よりも高い稜線が風上側にあり, そのために風速が弱くなっていると考えられる。この傾向は南風グループ 1 の方が顕著に見られ, P9 でもかなり風速が弱くなっている。Fig. 2 を見て分かるように, P9 の南側で稜線はその走向が南東方向

Table 1. Mean wind directions at the each observation point for the each group. The average values and the standard deviations within the each group are indicated.

Group	T 1 top (deg)	P 3 (deg)	T 2 top (deg)	P 9 upper (deg)	T 3 top (deg)
N	344 ± 8	8 ± 2	347 ± 6	346 ± 4	350 ± 6
S 1	164 ± 4	179 ± 2	180 ± 1	199 ± 6	180 ± 6
S 2	177 ± 4	195 ± 6	161 ± 3	179 ± 2	143 ± 4

から東北東方向へと大きく変わり、またその稜線は3号鉄塔に近付くにつれてあまりはっきりしなくなっている。そのような地形のため、グループ2におけるように上空の風向が東寄りの時には、P10の南側付近からの流れによりP7からP9、特にP9であまり風速が弱くならないというようなことを考えることが出来る。

また、これ以外にもグループ1、2の違いとして、1号鉄塔からP6までの風の分布について、グループ1ではP1とP6でやや風速が弱いと2号鉄塔での風速と比べて大きめの風速が観測されているのに対して、グループ2ではかなり弱い風速となっている。またグループ2では3号鉄塔中段で他の下層の測点と比べてかなり強い風速が観測されている。さらに上層の風については、グループ2では3号鉄塔で1号、2号鉄塔に比べて非常に風速が強くなっている。このようにグループ2では3号鉄塔に比べて1号鉄塔から2号鉄塔にかけて、また特に1号鉄塔寄りの測点で風が弱くなっている。地形を見ると1号鉄塔から2号鉄塔まではほぼ東西に延びている稜線が2号鉄塔の南付近で南東方向の走向に変わっている。この2号鉄塔の南付近から稜線が南東方向に延びているという山容のために、上空の風向が東寄りであるグループ2の時は山の蔭になって風速が1号鉄塔から2号鉄塔にかけて全体的に弱くなっているということが考えられる。

平均風向の値 (Table 1) を見てみると、南風グループ2では、Fig. 5 で見たように3号鉄塔頂部での風向がかなり東寄りの140度近い風向となっているほかに2号鉄塔頂部でもやや東寄りの風が観測されている。南風の時はこれ以外にも各測点間での風向の違いが目立ち、測線より南側に稜線が位置しているその地形により風の流れも複雑になっていることが考えられる。

同じ南風でもグループ1とグループ2とでは、次節以降で述べるように平均風速と風向以外にも風の分布や性質の違いが見られる。ここまでに見たように3号鉄塔頂部での風向がグループ2で東寄りになっていることから試験線上空を吹く風の風向の違いが地形の影響によりグループ1、2間での風の分布や性質の違いをもたらしたと考えられる。

3.2 風の乱れの水平分布

風の乱れを考える時、風速変動の評価時間、すなわちどれくらいの時間スケールでの変動を考えるかによってその統計量は異なった結果が得られる。ここでは送電線の固有振動周期に近い時間の3秒を評価時間とした場合について考える。マキノ観測基地のデータ収録装置ではサンプリング周波数10 Hzでデータを記録しているが、このオリジナルデータから連続したデータを30個ずつ平均して評価時間3秒のデータとして取り扱った。なお、測定に使用しているプロペラ型風速計の時定数は風速20 m/s程度の時に1秒程度であり⁴⁾、評価時間3秒での風の乱れを調べるには十分な応答特性を持っている。

風速変動の標準偏差の値は一般的に風速値そのものによって変化するので、標準偏差の値を平均風速値で割って規格化した量である乱れの強さについてその水平分布を調べることにする。Fig. 7は、その乱れの強さの敦賀試験線に沿った方向での水平分布について、北風、南風グループ1、南風グループ2の各グループでの平均値とばらつきの標準偏差を示したものである。北風の場合に下層での値の大きい所は1号鉄塔付近とP6～P9付近であり、これはおおよそ平均風速の小さい所に対応する。また上層については

1号鉄塔が最大で3号鉄塔に向かって減少しており、全体的に見て、平均風速の弱い所では乱れの強さが大きいという傾向が見られる。なお、1号鉄塔から3号鉄塔までの全径間での下層における平均の乱れの

強さは0.138で、その測線上でのばらつきの標準偏差は0.029、このばらつきの標準偏差の平均値に対する割合は21%である。

風の乱れに関して次に、風向の変動について見てみる。そのために、風向変動の標準偏差の各測点での値を各グループ別に平均してTable 2に示す。北風の場合、Fig. 3に示すように測点の標高が最も低いP3での変動がほかの測点よりやや大きめになっている。

一方、南風の場合について、その乱れの強さの水平分布(Fig. 7)を見ると、両グループともP7、P8で特に大きく、グループ1ではP9においてさらに大きい。また、グループ1ではP1、グループ2では1号鉄塔付近とP10付近でも乱れが大きくなっている。上層においては、グループ1で1号鉄塔から3号鉄塔に向けてやや乱れが増加する傾向が見られ、グループ2では逆に3号鉄塔に向けて乱れが小さくなっている。全体的に見ると北風同様に平均風速の弱い所で乱れの強さが大きいという傾向が見られるが、南風の時は山の蔭となるP7からP9で乱れが特に大きくなっていることが分かる。

1号鉄塔から3号鉄塔までの全径間での下層における平均の乱れの強さは南風グループ1で0.282、南風グループ2で0.312となっており、北風の場合と比べて南風ではかなり大きな値になっているが、グループ1、2間での違いはあまり大きくない。一方、測線上でのばらつきの標準偏差はグループ1で0.115、グループ2で0.105であり、平均値のそれぞれ41%、34%となり、これらの値は北風の場合の21%というばらつきに比べてかなり大きくなっている。南風の場合には風上側に稜線が位置しているため平均的に乱れの強さが大きくなっており、測線

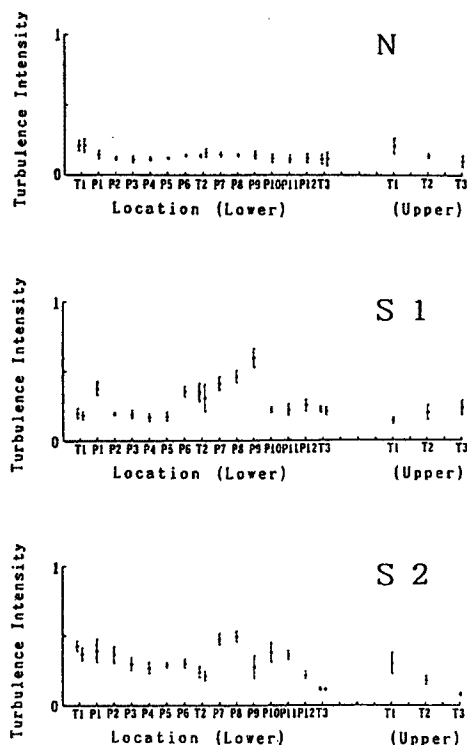


Fig. 7. Horizontal distributions of the turbulence intensity along the test line for the each group. The values measured at the middle level of the each tower and the upper level of the each pole (lower level for P9) are indicated on the left. The values measured on the top of the each tower are indicated on the right. The average values within the each group are marked on the figure with closed circles (•) and the standard deviations within the each group are indicated with the bars (I).

Table 2. Standard deviations for the variation of wind direction at the each observation point. The average values within the each group are indicated.

Group	T 1 top (deg)	P 3 (deg)	T 2 top (deg)	P 9 upper (deg)	T 3 top (deg)
N	13	18	8	8	11
S 1	7	8	10	29	12
S 2	15	19	12	14	4

上での値のばらつきも大きいと考えられる。

南風について風向変動の標準偏差 (Table 2) を見ると、グループ2における3号鉄塔での変動がグループ1に比較してかなり小さくなっている。この地点では風速変動についてもグループ2では乱れの強さがかなり小さくされており、風速、風向ともグループ2では乱れが小さいことが分かる。また、P9ではグループ1で風向変動がかなり大きくなっている。この地点では風速変動についてもグループ1では乱れの強さがかなり大きくなっている。以上のことのほかにも、1号鉄塔とP3でグループ2の方が風向変動がかなり大きく、北風の場合も併せて風速の弱い所で風速変動 (乱れの強さ) も風向変動も大きいという傾向が見られる。

3.3 突風率

突風率は最大瞬間風速とそれが測定された時刻を含むある長さの時間の平均風速との比として定義される。最大瞬間風速の値がそれを測定する時に実際に要する時間、すなわち評価時間によって変わることから、突風率も同様に評価時間によって変化するが、ここでは最大瞬間風速の評価時間は電線の固有振動周期に近い3秒とし、平均風速は10分間での平均値を用いる。

Fig. 8に北風、南風グループ1、南風グループ2の各グループごとで平均した突風率の水平分布を示す。北風の場合に下層では1号鉄塔付近で他の測点より値が大きいほかは目立った値の大小は見られないが、2号鉄塔からP9付近にかけてやや大きな値が見られる。また上層では1号鉄塔から3号鉄塔に向かってやや値が減少している。このような分布は乱れの強さで見られたものと同様であり、乱れの強さの大きい所では突風率も大きいという傾向を示している。1号鉄塔から3号鉄塔までの径間平均値は1.35であり、測線上でのばらつきの標準偏差は径間平均値の7%である。

一方、南風の場合の突風率は北風の場合よりもかなり大きく、径間平均値は南風グループ1で1.77、南風グループ2で1.79となるがグループ1、2間での違いは殆ど見られない。地点による値のばらつきもかなり大きく、標準偏差はグループ1で径間平均値の22%、グループ2で17%である。風の乱れの強さについては前節で見たように北風よりも南風の方が乱れが大きく、その風の乱れの大きい南風では突風率も大きくなっているわけである。突風率の分布 (Fig. 8) を見ると、両グループとも測点よりも高い稜線の風下に位置するP7とP8、グループ1ではP9においても特に大きな値となっている。また、上層での突風率は下層での値と比べて全般的にそれほど大きくないが、グループ1では1号鉄塔から3号鉄塔に向かって増加

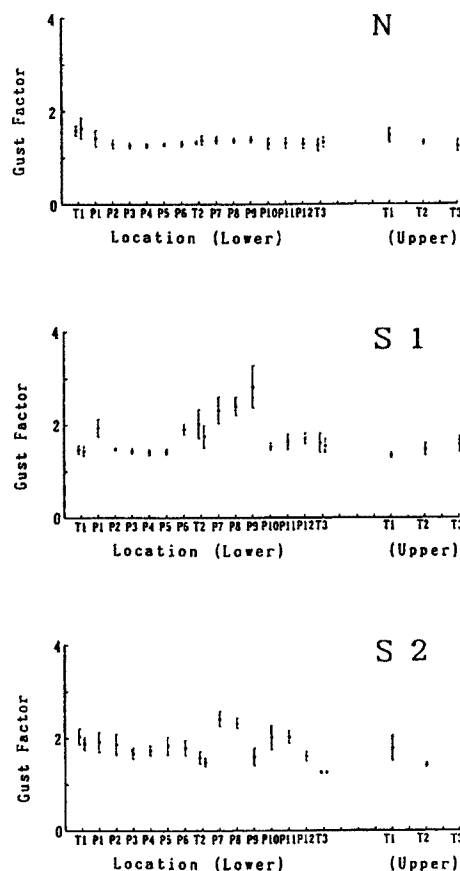


Fig. 8. Horizontal distributions of the gust factor along the test line for the each group. The values measured at the middle level of the each tower and the upper level of the each pole (lower level for P9) are indicated on the left. The values measured on the top of the each tower are indicated on the right. The average values within the each group are marked on the figure with closed circles (•) and the standard deviations within the each group are indicated with the bars (I).

し、グループ 2 では逆に 3 号鉄塔に向かって減少している。また、グループ 2 では上層、下層とも 3 号鉄塔での値が他の測点での値よりかなり小さくなっている。このような南風についての突風率の分布も北風の場合と同様に乱れの強さでの分布と同様な形をしている。

3.4 風速の鉛直分布

敦賀試験線の観測点のうち 1, 2, 3 号鉄塔と P 9 においては風速の鉛直分布の測定を行っている。測定高度は 1 号鉄塔で 26 m と 51 m, 2 号鉄塔で 15 m・30 m・45 m・66 m, P 9 で 20 m と 43 m, 3 号鉄塔で 28 m と 53 m である。

Fig. 9 は北風、南風グループ 1, 南風グループ 2 の各場合について 10 分間平均風速の鉛直分布を各グループごとに平均して示したものである。北風の場合、2 高度のみで測定している 1 号鉄塔、P 9, 3 号鉄塔での鉛直分布については、3 号鉄塔で風速の高度変化がわずかではあるが、どの地点でも上層の方が風が強くなっている。しかし、4 高度で測定している 2 号鉄塔での結果を見ると、頂部の 66 m での風速よりも高度 30 m での方が大きな値を示し、鉛直分布の極大となっている。

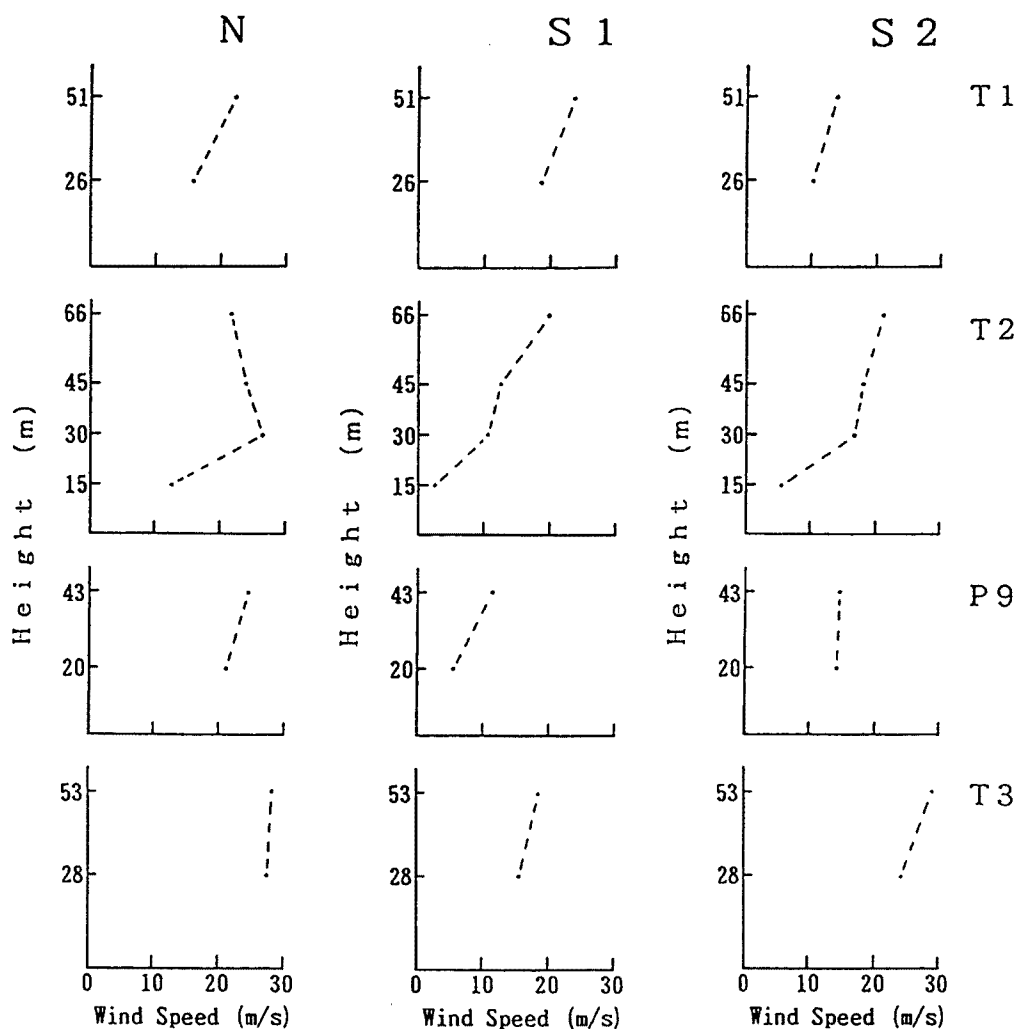


Fig. 9. Vertical profiles of the mean wind speed at the each observation point. The averaged values within the each group are indicated.

平地上での風速の鉛直分布については、地表より数十 m 程度の高さまでは対数法則が適用出来、さらに上空ではべき乗則で表すことが出来るとされているが、どちらの法則でも上層に行くにつれて風速は次第に増加する形を取る。2号鉄塔付近の地形を考えると、その風下側に2号鉄塔での地表面高度より20 m 程度高い稜線があり、それに向かって2号鉄塔付近では約30度の勾配の斜面となっている。この地形のために気流が鉛直方向に収束し、風速の極大が存在する鉛直分布になると考えられる。他の測点ではこのような風速の極大は見い出せないが、より細かな間隔で風速の鉛直分布を測定すれば極大が現れるものと考えられる。なお、2号鉄塔の南側のほぼ稜線上に設置されているドップラーソーダでも、北風の時に高度40 m 程度に極大を持つ風速鉛直分布が観測されている³⁾。

次に南風の場合の風速の鉛直分布を見ると、グループ1、2ともいずれの地点でも上層で風が強くなっているが、2号鉄塔については15 m 高度で極端に風が弱くなっている。南風の場合、風上側に2号鉄塔での地表面高度より20 m 程度高い稜線があって、その蔭の弱風域に入っていると考えられる。また、細かく見ると45 m 高度が少しへこんで30 m 高度で突出した風速鉛直分布の形になっていて、南側斜面での風の収束による風速の強化が稜線を越えて2号鉄塔における風速の鉛直分布の形に影響していることが考えられる。

南風グループ1、2を比較すると、P9でグループ2の方が上下の風速差は小さくなっており、また、2号鉄塔の15 m 高度の風速もグループ2の方が少し大きくなっている。このようなグループ間での鉛直分布の違いは、3.1節でも述べたようにグループ2では風向が東寄りのため、下層でも南側の稜線を越える風が比較的吹きやすかったことが原因と考えられる。

3.5 吹上げ角の分布

風は一般的に水平方向のみでなく3次的に吹くものであり、特に山岳地では地形の効果のために鉛直方向の風速成分が大きくなる。敦賀試験線ではP3(45 m)、2号鉄塔中段(45 m)、2号鉄塔頂部(66 m)、P9上部(43 m)の4ヶ所にプロベラ型鉛直風速計を設置して風速の鉛直成分の測定を行っており、これらと同一地点での風速の水平成分の測定値とを組み合わせると、風の吹上げ角ないしは吹下げ角を求めることが出来る。

Table 3に、上記4ヶ所での吹上げ角の10分間平均値を各グループで平均した値を示す。まず北風の場合、2号鉄塔付近の風上側の斜面の勾配はおおよそ26度であるが、それに対して高さ45 mでの吹上げ角は19度、66 mでは17度であり、斜面の勾配に対して70%程度の値となっている。一方、P3とP9での風上側斜面の勾配はおおよそ28度及び22度であるが、地上高45 m(P3)と43 m(P9)での吹上げ角はそれぞれ15度と18度であり、斜面の勾配に対してそれぞれ50%と80%程度の値である。

南風の場合には2つのグループで結果はかなり異なっている。まず2号鉄塔の測点について、グループ1では66 mで11度、45 mで14度の吹き上げであるのに対して、グループ2では66 m、45 mとも5度の吹き下げとなっている。P3では両グループとも吹き上げであり、吹上げ角はグループ1で12度、グループ2で16度となる。一方P9ではグループ1で5度の吹き上げであるのに対して、グループ2で4度の吹き下げとなっている。

Table 3. Updraft inclinations at the each observation point. The average values within the each group are indicated.

Group	P 3 (deg)	T 2 middle (deg)	T 2 top (deg)	P 9 upper (deg)
N	15	19	17	18
S 1	12	14	11	5
S 2	16	- 5	- 5	- 4

南風グループ 2 の場合に 2 号鉄塔と P 9 で吹き下げになるのは、南側でこの場合は風上側にあたる稜線から 2 号鉄塔は水平距離約 40 m、高度差約 15 m、P 9 は水平距離約 100 m、高度差約 25 m 斜面を下った場所に設置されているため、風が斜面を吹き降ろしていると考えられる。それに対して P 3 ではそれほど稜線から離れておらず、風は吹き下げになっていないものと考えられる。2 号鉄塔と P 9 において、グループ 1 で吹き上げ、グループ 2 では吹き下げになるのは、3. 1 節で述べたような風向の違いによりグループ 1 では稜線南側の急斜面を吹き上がってきた流れが卓越しており、グループ 2 では山を回り込むように稜線を越えてきた流れが卓越して吹き下げになるという状況が考えられる。

3.6 乱れの積分スケール

この節における相関解析では、まず 2. 3 節で述べたように各ケース 40 分間の長さでサンプリング周波数 10 Hz のオリジナルデータから 30 個ずつ平均して評価時間 3 秒のデータを作成した。これは、送電線の固有振動周期が 3 秒程度であり、それよりも長い周期での現象を調べるためである。そして各風速計による風速測定値についての自己相関係数をタイムラグ 60 秒までと、各風速計による測定値間の相互相関係数をタイムラグ ± 30 秒までについて計算した。また、いずれについても計算の前処理として、各チャンネルごとに 40 分間でのリニアトレンドを除去した。

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ものとして乱れの積分スケール L_x がある。その定義としては x を 2 点間の距離とした時の相互相関係数 $R(x)$ より、

$$L_x = \int_0^{\infty} R(x) dx \dots \dots \dots (1)$$

である。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すれば風向方向の相互相関係数を一地点での自己相関係数で置き換えることが出来る。そしてさらにタイムラグ $\tau (\tau = x/\bar{u})$ の増加に伴う自己相関係数 $R(\tau)$ の減少を次式で近似することにより、風向方向の乱れの積分スケール L_x を求めることが出来る。

$$R(\tau) = \exp(-\bar{u} \cdot \tau / L_x) \dots \dots \dots (2)$$

長いタイムラグのところでは相関が小さくなり (2) 式にうまく乗らなくなるので、実際の解析ではタイムラグ $\tau = 15$ 秒までの自己相関係数の値に (2) 式をあてはめて最小自乗法で L_x の値を求めた。

各測点、各グループごとに平均した敦賀試験線に沿った方向での乱れの積分スケール L_x の値の水平分布を Fig. 10 に示す。図の左側は各鉄塔中段と各観測柱上部（P 9 は下部）での値、右側は各鉄塔頂部での値である。場所により L_x の値はかなり変化するものの、1 号鉄塔から 3 号鉄塔までの全径間での下層における平均値は北風の時に 215 m、南風グループ 1 で 162 m、南風グループ 2 で 139 m であり、南風の方が値が小さく、南風の中でもグループ 2 の方が値が小さい。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、稜線に比較的近く斜面による風の収束で風速が強くなっている所にほぼ対応した P 5-P 6 付近、P 10、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場合風速が弱くなっている P 7 から P 9 にかけては値が小さい。P 7 から P 8 で値が小さいのは稜線の蔭となり風速が極端に弱くなる南風でも同様で、特にグループ 1 では非常に小さな値となり、風速でも見られたように P 9 でも小さな値になっている。また南風の時にはグループ 1 で P 1 と P 6、グループ 2 では P 5 と P 11-P 12 においても小さな値が見られ、同様に風速が弱い所にほぼ対応している。さらにどのグループの場合でも上層の方が値が大きい傾向がある。

以上に述べた L_x の値の分布を 3. 2 節で述べた乱れの強さの分布とも比較すると、解析ケースが一致しないこともあり対応はあまり良くないが、 L_x の値が大きいところでは乱れの強さが小さいというような傾向が見られ、これは平均風速の対応とも関連している。

相互相関については、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

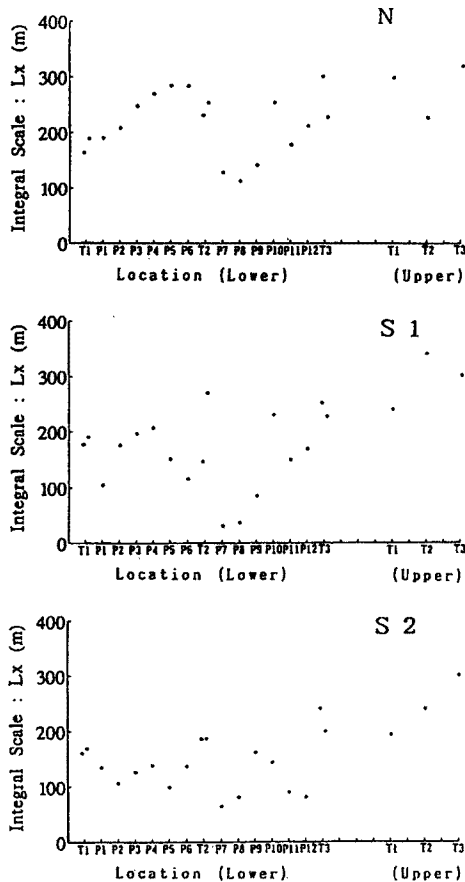


Fig. 10. Horizontal distributions of the longitudinal integral scale (L_x) along the test line for the each group. The values measured at the middle level of the each tower and the upper level of the each pole (lower level for P9) are indicated on the left. The values measured on the top of the each tower are indicated on the right. The average values within the each group are marked on the figure with closed circles ($\bullet$) and the standard deviations within the each group are indicated with the bars (I).

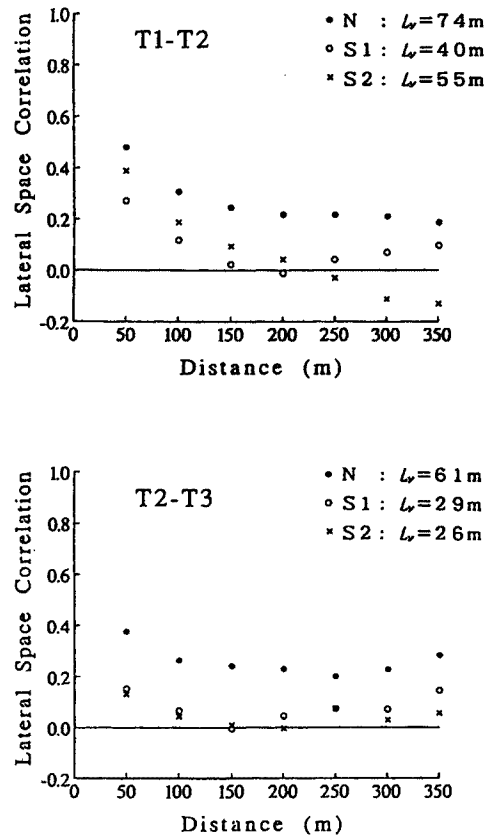


Fig. 11. Lateral space correlation coefficients as function of distance for the each span. The values are averaged within the each group and the each distance. Lateral integral scales (L_y) calculated from the values below the distance of 100 m are indicated on the figure.

分けて、各径間での全ての組み合わせについて3秒ごとの各タイムラグでの相互相関係数を求めた。また、鉛直方向での相関を調べるために、1号鉄塔での中段と頂部というような組み合わせについても相互相関係数を計算した。

この相互相関係数のデータのうち、タイムラグ $\tau = 0$ 秒すなわち同時における相関係数の値はその測点間での空間相関を表している。測点間の距離が離れるに従ってどのように相関が減少していくかを見るために、測線の西半分 (T1-T2) と東半分 (T2-T3) について各グループごと、各距離ごとにデータを平均して、横軸に距離を取ってグラフにしたのが Fig. 11 である。これについても自己相関と同様に水平距離 l の増加に伴う相関係数の減少を次式で近似することにより、風向直角方向の乱れの積分スケール L_y を求めることが出来る。

$$R(l) = \exp(-l/L_y) \quad \dots\dots\dots (3)$$

Table 4. Vertical integral scales (L_z) at the each observation point.
The average values within the each group are indicated.

Group	T 1 (m)	T 2 (m)	P 9 (m)	T 3 (m)	T 2 vertical (m)
N	68	112	60	118	55
S 1	45	66	50	54	55
S 2	43	52	17	63	70

図に示すように大きな距離のところで相関係数はきれいに減少しないので、ここでは距離 l が 100 m 以下の相関係数の値に (3) 式をあてはめて最小自乗法で L_y の値を求めた。その値は図中に示す通りであるが、T 1-T 2 径間、T 2-T 3 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る。南風グループ 1, 2 を比較すると、T 1-T 2 径間ではグループ 2 の方が値が大きい、T 2-T 3 径間では大きな違いは見られない。また、どのグループでも T 1-T 2 径間の方が値が大きい。これは、T 1-T 2 径間の方が測点の高度や稜線との距離が T 2-T 3 径間よりもそろっているために、風向直角方向すなわち測線に沿う方向での風の空間相関が高くなっていると考えられる。

一方、同一地点の各高度での風速計による測定値間の相互相関係数から鉛直方向の空間相関についても水平方向と同様に考えることが出来る。2 号鉄塔以外では 2 高度のみでしか観測していないのでかなり粗い見積りになるが、タイムラグ $\tau = 0$ 秒での各測点間の相互相関係数の値を各グループごと、各距離ごとに平均し、風向直角方向におけるのと同様に鉛直方向の乱れの積分スケール L_z を求めたものを Table 4 に示す。但し、2 号鉄塔においては、地上に最も近い高度 15 m の測点と他の測点との相関が他の組み合わせに比べて非常に小さくなる時があるので、高度 15 m を含む組み合わせは L_z の計算に使用しなかった。また、2 号鉄塔での 2 高度における鉛直風速の測定からも、水平風速と同様に鉛直方向の乱れの積分スケールを求めて同じ表に示した。

求められた L_z の値を見ると、水平風速についてはどの測点でも北風の時の方が南風の時よりも大きな値である。また、南風グループ 1, 2 については、グループ 2 で非常に小さな値になっている P 9 を除けば大きな違いは見られない。P 9 下部ではグループ 1 に対してグループ 2 では風速が弱くならず、風速の高度変化も小さくなっていて、3. 1 節で東寄りの風向であることによる風の流れを考えた。そのような状況のもとで P 9 上下での風の相関もかなり低くなっているわけである。一方、2 号鉄塔での鉛直風速については南風グループ 2 だけ少し大きな値になっている。

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、北風の場合には風向方向の L_x が 215 m、風向直角方向の L_y が 68 m、鉛直方向の L_z が 90 m、南風グループ 1 では L_x が 162 m、 L_y が 35 m、 L_z が 54 m、南風グループ 2 では L_x が 139 m、 L_y が 41 m、 L_z が 44 m という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かなりスケールが大きく、南風間での違いは顕著ではない。3. 2 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く、風上側に稜線が位置しているためと考えられた。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、風速変動が大きい時には風の空間的な相関も低くなるという関係になっている。

4. お わ り に

山岳地における風が地形によりどのように影響されて吹いているのかを調べるために、琵琶湖の北側の山岳地にある関西電力敦賀試験線で収集された風に関する観測データを解析し、この場所での代表的な風向である北寄りと南寄りの風に対しての風の分布と乱流特性を調べた。このうち南寄りの風向について

は、3号鉄塔頂部での風速値が1号鉄塔から2号鉄塔間の平均風速値より1.5倍以上大きい場合があり、それを南風グループ2として、それ以外の南風グループ1とは分けて取り扱った。この南風グループ2では試験線上空を吹く風の一般的な状況を表していると考えられる3号鉄塔頂部での風向がほぼ真南のグループ1とは異なってかなり東寄りになっていて、上空の風向が真南の場合のグループ1と南東の場合のグループ2という分類ともなっている。ここでの解析結果を要約すると以下ようになる。

定時観測のデータから各鉄塔頂部での風速・風向の分布を見ると、どの場所でも北寄りまたは南寄りの風向であることが圧倒的に多い。敦賀試験線付近にはほぼ東西に稜線が走っており、斜面で風が収束して稜線に直交する風速成分が強化され風向が稜線に直交する方向に曲げられるため、この場所では一般的に風向が北寄りまたは南寄りになることが多いと考えられる。

北風、南風グループ1、南風グループ2の各場合について、その平均風速、乱れの強さ、突風率の敦賀試験線に沿った方向での水平分布を調べると、グループ間で違いが見られる。また、1号鉄塔から3号鉄塔までの径間平均値を調べると乱れの強さも突風率も北風より南風の方が大きく、南風グループ1、2間での違いはあまり大きくなかった。北風と南風とでの違いは、稜線が測線よりもやや南側に位置するため測線から見て風上側の地形が大きく異なることによると考えられる。また、南風グループ1、2間については、試験線上空を吹く風の風向の違いが地形の影響により風の分布の違いをもたらしたと考えられる。

風速の鉛直分布については北風の場合に2号鉄塔の30 m 高度付近で風速の極大が見い出され、斜面で気流が鉛直方向に収束した結果と考えられる。一方、南風の場合にはこのような極大は見られないが、南側斜面での風速の強化による影響を示唆する鉛直分布となっていた。

風の吹上げ角については、北風の場合、例えば2号鉄塔の高さ45 m での吹上げ角は19度、66 m では17度であり、およそ26度の斜面の勾配に対して70%程度の値が得られた。一方、南風の場合にはグループ2の時に2号鉄塔とP9で数度程度の吹き下げとなり、風上側の稜線から斜面を下った場所に観測点が設置されているためと考えられる。

風の乱れの空間的な相関についてその大きさの程度を示す乱れの積分スケールを調べると、水平風速について北風ではどの方向でも南風よりもかなりスケールが大きく、南風間での違いは顕著ではなかった。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く、風速変動が大きい時には風の空間的な相関も低くなるという関係になっていた。

風に関するデータの解析については、今後スペクトル解析なども行って乱流特性についてさらに調べて行く必要がある。また、風の分布の状況をより詳細に調べるために、ドップラーソーダにより上空を吹く風を調べることに加えて、観測データをもとにして3次元的な空気の流れを求める計算モデルMASCON⁵⁾により、山岳地上空をどのように空気が流れているかについて調べていく予定である。

最後に、観測設備の利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と、観測機器等の保守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) 堀口光章・光田 寧：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-1，1994，pp.23-34.
- 4) 光田 寧・堀口光章：最大瞬間風速と突風率の測定について，京都大学防災研究所年報，第36号B-1，1993，pp.17-25.

- 5) 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, 174 p.