

山岳地における風の分布と乱流特性 (第3報)

堀口光章

要 旨

東西に延びる稜線の北側斜面に設置されている敦賀試験線での観測データより、北風の場合について解析を行った。2号鉄塔では30m高度付近に風速鉛直分布の極大が見られるが、その場所での風速はMonin-Obukhovの相似則をある程度満たしている。しかし平坦で様な地表面上での値と比べると、多少のずれが見られる。またその30m高度では、高いコヒーレンスの値を示す周波数帯で風速変動の位相がその上下の測定点に対して進んでいる。

キーワード: 乱流, 山岳地, 風速鉛直分布, 相似則, フェイズ

1. はじめに

山岳地においては、その地形により平地上とは異なった複雑な気流分布と乱流特性を示す。この研究は、山岳地に建設される構造物例えば送電線の風による挙動を検討する際に役立てるため、山岳地における風の分布と乱流特性の特徴を明らかにすることを目的としている。

関西電力の実験用送電線である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設置され、その建設当初(1981年)よりプロペラ型風速計、超音波風速計、ドップラーソーダなどにより風の観測が行われた(光田ら, 1983; Mitsuta et al., 1983; 堀口・光田, 1994)。これまでも、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報告した(堀口・光田, 1995; 堀口・光田, 1998)が、今回は特に風の鉛直分布に注目した解析結果を報告する。

このような山岳地における風の観測としては、例えばBradley (1980) による比較的大きな丘 (Black Mountain) での観測などがこれまでになされてきているが、今回は、これまでの観測地とはまた少し異なった特徴を持った地形であること、かなり長期にわたる

各種の条件での観測データが収集されていることが特色である。

2. 観測の概要

2.1 敦賀試験線と気象観測システムの概要

観測を実施した敦賀試験線はFig. 1に示すように標高およそ600mから800mの山岳地に位置しており、おおよそ東西に延びる稜線にほぼ沿ってその北側斜面に設置されている。試験送電線は水平距離700mの間を3基の鉄塔で張られており、西端の1号鉄塔から2号鉄塔を経て東端の3号鉄塔へと設置標高は順次高くなってその標高差は約180mある。

敦賀試験線における風の観測は1号から3号の鉄塔、P.1からP.13までの観測柱に配置されたプロペラ型風速計などにより行った (Fig. 1)。今回解析対象とした2号鉄塔は稜線より少し下った北側斜面に位置している (Fig. 2に地形の南北方向鉛直断面図を示す)。この2号鉄塔においては15, 30, 45, 66mの4高度のプロペラ型風速計 (45, 66mでは風向も測定)、45m高度の超音波風速計、及び、4, 66mの2高度の白金抵抗温度計などにより観測を行った。

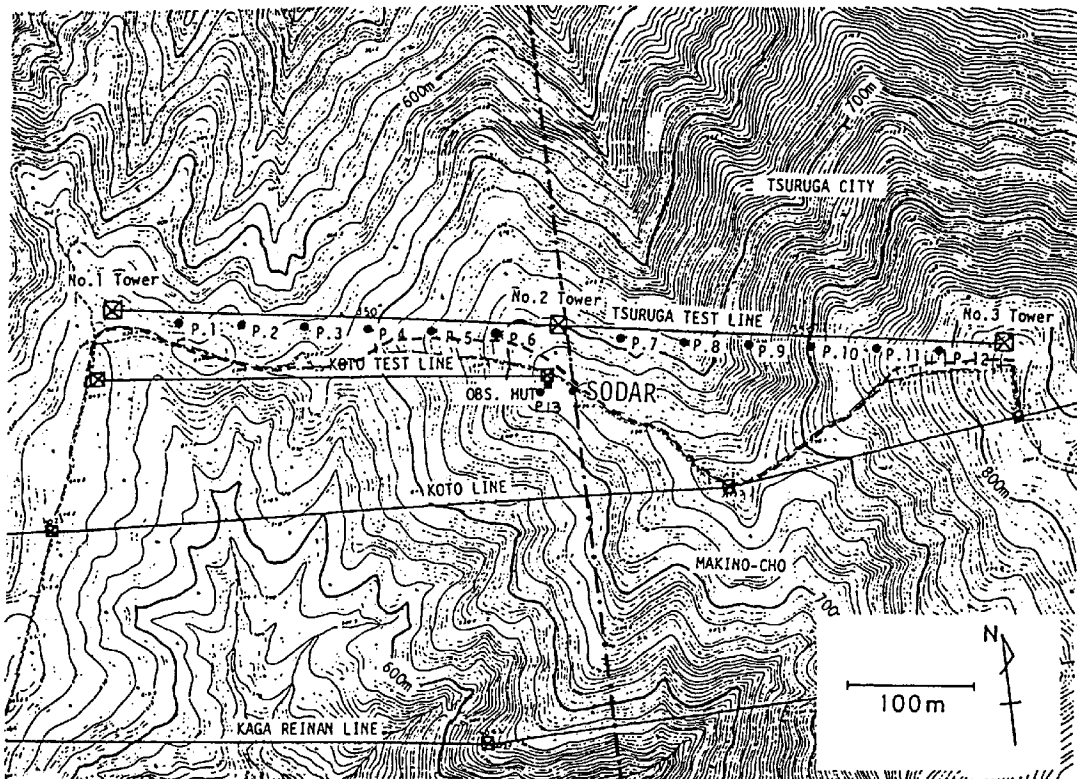


Fig. 1 Map around the Tsuruga Test Line. No.1 - No.3 Towers are main towers of the test line. P.1 - P.13 are observation poles. The thick broken line shows the ridge line near the test line. The dash-dotted line shows north-south direction through No.2 Tower.

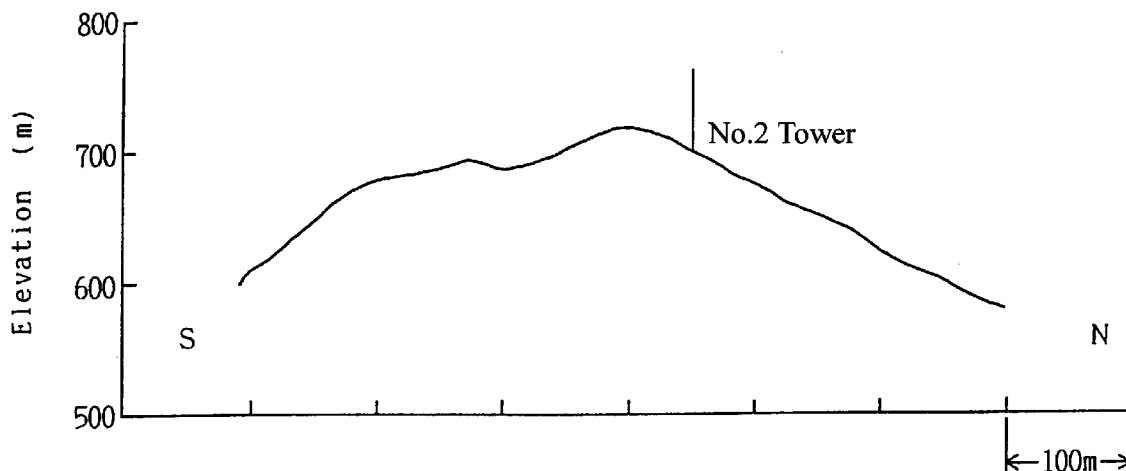


Fig. 2 Profiles of topography from the east. The position of the No.2 Tower is shown.

2.2 観測データ

敦賀試験線においては1年を通じて北寄りまたは南寄りの風向であることが多いが、今回の解析においてはそのうち北風の場合を扱った。風向の基準としては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、その値が335～25度の時を北風としている。

今回対象とするのは1987年から1997年までに磁気テープに収録されたデータであるが、それより抽出して解析に使用した。なお、データのサンプリング周波

数は強風時の観測で10Hz, その他の場合で2Hzである。

3. 観測データの解析

3.1 風速鉛直分布

北風の場合, 2号鉄塔における4高度での観測では30m高度での風速値が最も強くなり鉛直分布の極大が現れている(堀口・光田, 1995)。これは風上方向が谷を伴った険しい(南北方向の勾配は約30度)斜面となっていて風が収束すること, 山越え気流の状況にあり, 周囲の気圧場の変化による稜線付近での風速増加の結果と考えられる。このような場合に平地上で観測される風速鉛直分布とどの程度違うかということ, また大気の安定度によってどのようにその形が変化するかということが重要な研究課題である。これは, このような場所でも平坦で様な地表面についてと同様にMonin-Obukhovの相似則が満たされているのかという問題と関係している。なお, Monin-Obukhovの相似則とは, 定常で水平方向に様な接地層について, 風速や気温の各種統計量が地表における摩擦応力と鉛直熱フラックス, 及び浮力を表すパラメータだけで一義的に決定されるというものである。

接地層に適した安定度のパラメータは高度 z のObukhovの長さ L に対する比 $\zeta (=z/L)$ で, 次式のように表される(—は適当な長さの時間平均, 'は変動成分を示す)。

$$\zeta = z/L = - \frac{(g/\bar{\theta})(\overline{w'\theta'})_0}{u_*^3/kz} \quad (1)$$

ここで, g は重力加速度, θ は温位, w は鉛直風速, u_* は摩擦速度, k はvon Karman定数(一般的に用いられてきている値である0.4とする)であり, $(\overline{w'\theta'})_0$ は地表面での温度フラックスを表している。摩擦速度 u_* は接地層における特徴的な速度の尺度であり,

$$u_* = (\tau/\rho)^{1/2} = [-\overline{(u'w')}]^{1/2} \quad (2)$$

である。ただし, τ は運動量フラックス, ρ は空気密度, u は水平風速であり, 添え字 $_0$ は地表面での値を表している。Obukhovの長さ L は, 式(1)より $(\overline{w'\theta'})_0$ を Q で表すと以下のように書ける。

$$L = - \frac{u_*^3 \bar{\theta}}{kgQ} \quad (3)$$

従って, u_* と Q の値が求められれば, L の値が算出できる。地表面近くにおいて超音波風速温度計などを用いた渦相関法により直接的に運動量フラックスと温

度フラックスを測定していれば, あとは簡単に式(3)で L が求まるが, ここではそのような測定を行っていないので下に示すような方法で求める。

平均風速 $\bar{u}$ の鉛直勾配についての無次元形は次式のようなになる。

$$\phi_u(\zeta) = (kz/u_*) (\partial \bar{u} / \partial z) \quad (4)$$

ここで, ϕ_u は ζ に関する普遍関数であるとする。この式について, 粗度($z=z_0$, この高度での風速は $u=0$ とする)からここでの測定の最低高度 $z=15\text{m}$ (風速は $\bar{u}=U_{15}$ とする)までの積分を考えると次式が得られる。

$$u_* = \frac{kU_{15}}{\int_{\zeta_0}^{\zeta_A} (\phi_u(\zeta)/\zeta) d\zeta} \quad (5)$$

ただし, $\zeta_0 = z_0/L$, $\zeta_A = 15/L$ とする。一方, 気温の鉛直勾配についての無次元形は次式のようなになる。

$$\phi_h(\zeta) = (kz/T_*) (\partial \bar{\theta} / \partial z) \quad (6)$$

ここで, ϕ_h は ζ に関する普遍関数であるとする。また, T_* は摩擦温度($= -(\overline{w'\theta'})_0/u_*$)であり, 接地層における特徴的な温度の尺度である。上式について, 気温測定がなされている高度4m(平均温位を θ_4 とする)から66m(平均温位 θ_{66})までの積分を考えると次式が得られる。

$$Q = \frac{ku_*(\theta_4 - \theta_{66})}{\int_{\zeta_1}^{\zeta_2} (\phi_h(\zeta)/\zeta) d\zeta} \quad (7)$$

ただし, $\zeta_1 = 4/L$, $\zeta_2 = 66/L$ とする。平坦で様な地表面という条件を満足するような場所における観測結果に基づく普遍関数 ϕ_u と ϕ_h についての定式化については多くの研究者によってなされているが, Kaimal and Finnigan(1994)によってまとめられたものをここでは使用する。すなわち,

$$\phi_u = \begin{cases} (1+16|\zeta|)^{-1/4} & -2 \leq \zeta \leq 0 \\ 1+5\zeta & 0 \leq \zeta \leq 1 \end{cases} \quad (8)$$

$$\phi_h = \begin{cases} (1+16|\zeta|)^{-1/2} & -2 \leq \zeta \leq 0 \\ 1+5\zeta & 0 \leq \zeta \leq 1 \end{cases} \quad (9)$$

である。これらの普遍関数を式(5)と式(7)に代入し, 求められた u_* と Q から L が導出できる。しかし, 式(5)と式(7)の計算を行う時には L が既知でなければならないので, 始めは $\phi_u=1$, 及び $\phi_h=1$, すなわち中立で

あるとして u_* と Q を求め、これらから L を計算する。この L の値を用いて式(5)と式(7)より u_* と Q を求め、またこれらから L を求めるということを繰り返し、ほぼ収束した L の値を解とする(逐次近似の解法)。

粗度の値は、地形による風の収束などの影響を受けない条件での地表面付近での風速鉛直分布より求められるが、この場所ではそのような観測がなされていないので、観測場所付近が背のあまり高くない林であることから $z_0=0.2\text{m}$ として計算を行っている。

このようにして求めた大気の安定度によりどのように風速鉛直分布が変化するかを見るため、まず高度30mでの10分間平均風速 U_{30} の値を摩擦速度 u_* で正規化した値について調べた(Fig. 3)。観測データのうち1989年11月以降のデータで15m高度の風速計に出力低下が見られたので、この解析においては1987年から1989年11月までのデータについて安定度 z/L との関係を示している。図中で一つの+記号で示すのが各10分間の観測データに対する値である。また、平坦で一般的な地表面について得られた(8)式の普遍関数より求められる U_{30}/u_* の値を点線で示している。

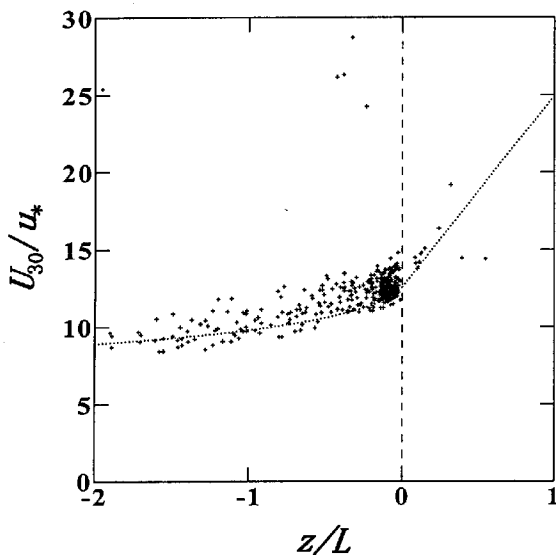


Fig. 3 U_{30}/u_* shown as a function of z/L . The dotted line shows the values in the surface layer over uniform flat terrain.

Monin-Obukhovの相似則が満たされていれば U_{30}/u_* の値は安定度 z/L だけの関数となる。今回の観測では、 z/L が負の値を示す不安定の領域から中立までの場合が殆どであり、 z/L が正の値を示す安定な領域についての観測結果は少ない。しかし、不安定領域から中立に近くなるほど値が大きくなる関係が見られ、また値の広がりもそれ程小さくなく、このような場所でも

Monin-Obukhovの相似則が比較的良く満たされていることが分かる。それでも、平坦で一般的な地表面についての値を下限としてそれより大きな値に分布しているというのが特徴であり、風の収束などの効果により風速鉛直分布に極大が現れるということと関係し、この場所での高度30mでの風速が地表面でのフラックスなどだけでは決まらないことを示している。

そこで、 U_{30}/u_* の値が安定度以外のパラメータにも依存する傾向があるのかどうかを見るため、例えば比較的上空の高度66mでの風速値 U_{66} に対する U_{30}/u_* の値の関係を調べると、Fig. 4のように高度66mでの風速が強いほど U_{30}/u_* の値が大きくなるという傾向が見られる。これは、Monin-Obukhovの相似則からどの程度ずれるかに、この斜面に向かって吹き込む風の強さが関係していることを示している。

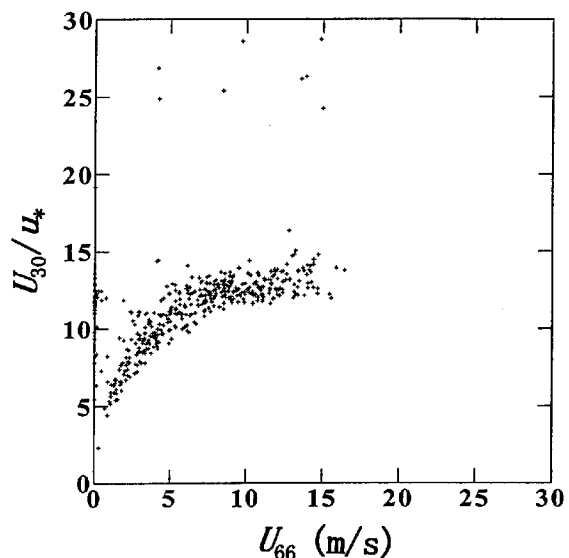


Fig. 4 U_{30}/u_* shown as a function of U_{66} .

高度30mではMonin-Obukhovの相似則が比較的良く満たされているが、その上の高度45mでの風速(U_{45})についても安定度との関係を調べたのがFig. 5である。図を見ると、 U_{45}/u_* の値も不安定の領域において安定度に伴って変化する傾向が見られ、その値の広がりも小さくなく、Monin-Obukhovの相似則が比較的良く満たされていることになる。しかし、 U_{30}/u_* の場合とは逆に、今度は点線で示す平坦で一般的な地表面での値よりも小さな値の方に分布しているのが特徴である。

今後の研究については、ここで取り扱った平均風速の鉛直分布だけではなく、各観測点での風速に関する変動量などが大気の安定度あるいは風速や風向の変化によってどのように変わっているのか、また平地上

での値と比べてどのように違うかについても調べていく必要がある。

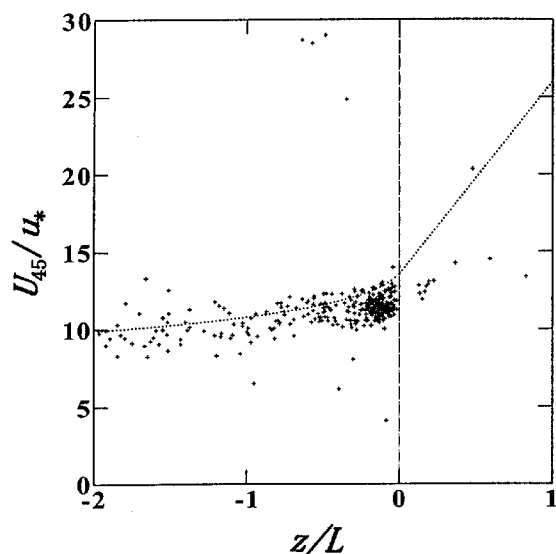


Fig. 5 U_{45}/u_* , shown as a function of z/L . The dotted line shows the values in the surface layer over uniform flat terrain.

3.2 各高度の風速変動間の関係

各高度における風速変動とその間の関係を調べることは、運動量輸送などを考えるにあたって基礎的な資料となる。そこで、2号鉄塔における4高度でのプロペラ型風速計による風速変動の測定から各高度でのスペクトル、各高度間でのコヒーレンスとフェイズを調べた。今回の解析では、まずある一つのケースについての結果を示し、その他の場合との比較については今後の課題とする。

対象とするケースは1990年9月20日0時7分から40分間の北寄りの風の場合で40分間の平均風速は2号鉄塔頂部で22.3m/sである。この時の平均風速の鉛直分布をFig. 6に示す。なおこの図では後の解析に使用する34.1分間のデータについての平均値を示している。図を見ると、これまで述べてきたように高度30m程度に極大を持った分布をしている。

まず各高度での風速変動のスペクトルを見たのがFig. 7である。なお、スペクトルの計算については堀口・光田(1998)と同じ方法で行っている。この図において、横軸には高度 z の波長 $\lambda (= \bar{u}/f)$, f は周波数に対する比である無次元周波数 $n (= z/\lambda)$, 縦軸についてはパワースペクトル密度関数 $P(f)$ に周波数 f を掛けて分散 σ^2 で規格化した値をとっている。図を見ると、高度30mでのスペクトルだけが低い(無次元)周

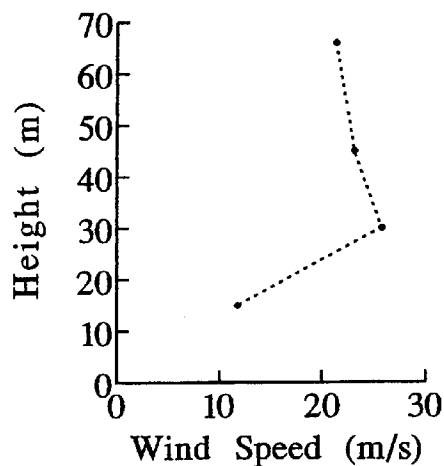


Fig. 6 Wind profile on the No.2 Tower at 0007-0041 LST 20 September 1990.

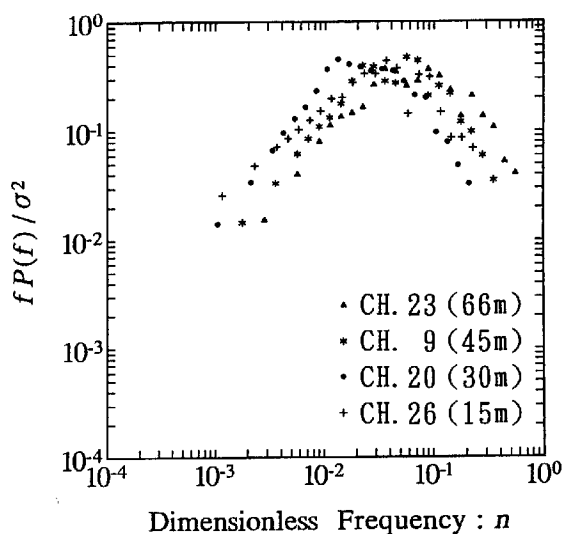


Fig. 7 Normalized power spectra at each level of the No.2 Tower. Spectra are shown as a function of dimensionless frequency.

波数側にシフトしていることが分かる。この高度では平均風速が強くなっており、そのことが関係していると考えられる。

各高度での風速変動間のコヒーレンスとフェイズを30m高度を中心として調べる。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は、周波数別に見た空間相関を表している。また、フェイズは周波数別に見た風速変動間の位相差である。なお、この計算についても堀口・光田(1998)と同様であるが、求めたコヒーレンスとフェイズについ

て、ハニングのスペクトルウィンドウを用いた平滑化を行っている。

例として30mと66m高度の風速変動間のルートコヒーレンスとフェイズをFig. 8に示す。フェイズが正の値である時は66m高度の風速変動の方が進んでいる、また、負の値である時は30m高度の風速変動の方が進んでいることを示している。低い周波数帯は別としてコヒーレンスは0.01~0.02Hz程度で高く、その周波数帯では30m高度の風速変動の位相が66m高度より進んでいることが分かる。次に30mと15m高度との間でルートコヒーレンスとフェイズを見たのがFig. 9である。この場合、フェイズが正の値である時は30m高度の風速変動の方が進んでいることを示している。やはり0.01~0.02Hz程度ではコヒーレンスが高く、30m高度の風速変動の位相の方が進んでいることが分かる。30mと45m高度間でも同様な位相関係が見られ、これらのことは、30m高度で風が加速された結果であると考えられる。ただし、30mと15m高度間、30mと45m高度間ではこの周波数帯より低いところで逆に30m高度の方が位相が遅れているのが見られる。しかし、今のところこのような結果をもたらす理由は不明である。

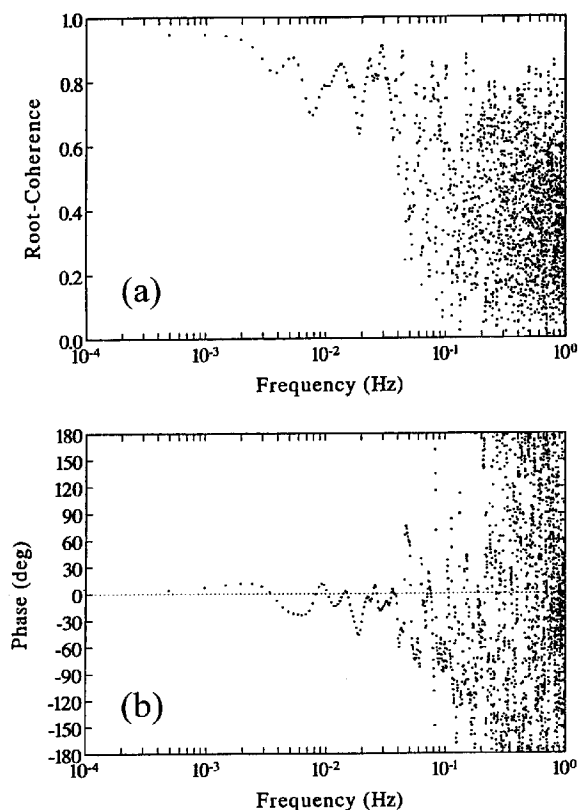


Fig. 8 (a) Root coherence and (b) phase between the levels of 30m and 66m of the No.2 Tower.

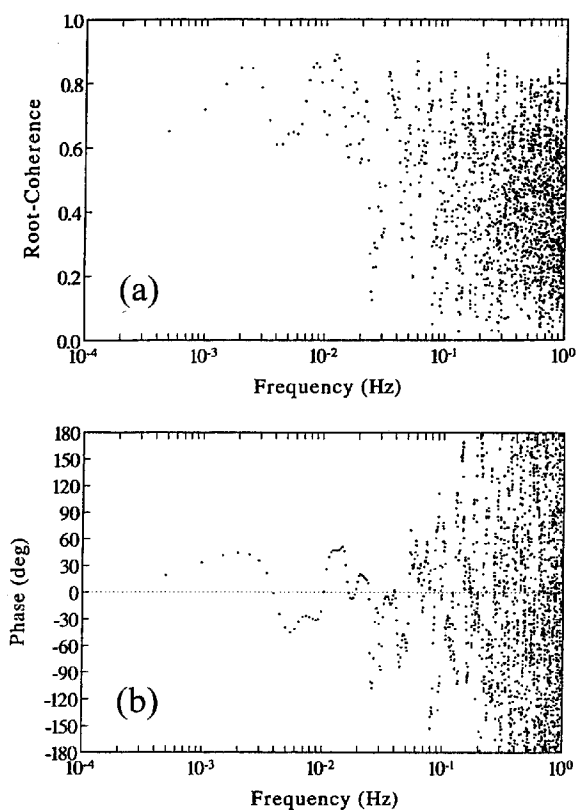


Fig. 9 (a) Root coherence and (b) phase between the levels of 30m and 15m of the No.2 Tower.

運動量輸送については、2号鉄塔では唯一の測定である45m高度における超音波風速計による測定から計算できる。風速3成分の測定値からコヒーレンスなどの計算と同じく34.1分間での平均流方向を求め、この方向に u 成分、直交する水平左方向に v 成分、直交する上向きに w 成分をとるように座標変換を行う。そして、この平均流方向の運動量の直行する上下方向へのフラックス($\overline{u'w'}$)を計算すると下向きに $4.4\text{m}^2\text{s}^{-2}$ という値が得られる。平均風速は66m高度より30m高度の方が強いが、運動量は30m高度の方向に輸送されていることになる。これについて、その超音波風速計によるサンプリング周波数10Hzの測定データを5個ずつ平均したデータから水平風速と吹上角の関係をしてみると(Fig. 10)、水平風速が弱い時の方が吹上角が大きいう関係が見られる。これは、水平風速が弱くなると地面に沿うように風が吹き上がることを示していると考えられる。平均流方向に座標変換すると、水平風速が平均より強くなる時(u' が正)には w' が負、水平風速が弱くなる時(u' が負)には w' が正となって、運動量輸送としては下向きという結果になる。斜面上を風が吹き上がるこの場所では、

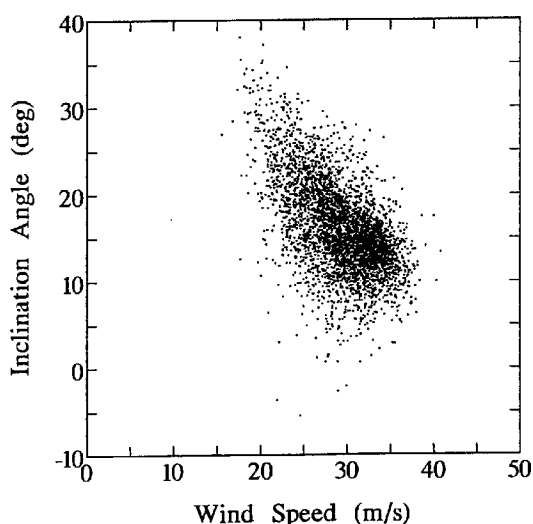


Fig. 10 Inclination angle measured by a sonic anemometer at the level of 45m of the No.2 Tower. This is shown as a function of wind speed.

吹上角の変化により下向きの運動量輸送が示されることが考えられる。

今回の解析は一つのケースについてのものであり、これがこの場所での現象として代表的なものであるかどうか、他のケースについても調べていく必要がある。また、3.1節でも扱った風速鉛直分布の形、この節で扱ったスペクトルの高度変化、各高度の風速変動間の位相差、運動量フラックス、及びその他の乱流統計量について、それらが決まる過程と相互の関係を総合的に理解するためにさらに解析を進める必要がある。

4. おわりに

山岳地における風の特徴を調べるために、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、斜面に対して吹き上がっていく風向となる北風の場合について特に風の鉛直分布に注目したデータ解析を行った。その結果を要約すると以下ようになる。

2号鉄塔の高度30mでの風速を摩擦速度で正規化した値を調べると、このような斜面上でもMonin-Obukhovの相似則が比較的良く満たされていることが分かる。しかし、これまでの平坦で一様な地表面上での観測結果とはずれが見られ、これはこの斜面に向かって吹き込む風の強さというような量と関係している。

ある一つのケースについて、2号鉄塔の各高度での風速変動間の関係を調べると、高いコヒーレンスを示す0.01~0.02Hz程度の周波数帯において30m高度の風速変動の位相がその上下の高度より進んでいる。これは30m高度で風が加速された結果であると考えられる。

山岳地における風の分布と乱流特性について、さらに観測データの解析と検討を進め、特に平地上と比べてどのような違いがあるのか定量的に調べていく予定である。

謝 辞

今回の観測にあたり、敦賀試験線の設備の利用については関西電力株式会社よりその機会が提供され、観測機器等の点検・保守については住友電気工業株式会社より協力を得た。またこの研究は(故)光田寧京都大学名誉教授の指導のもと遂行した。ここに記して謝意を表する。

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.
- 堀口光章・光田 寧 (1998) : 山岳地における風の分布と乱流特性 (第2報), 京都大学防災研究所年報, 第41号B-1, pp. 321-339.
- 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.
- Bradley, E.F. (1980): An experimental study of the profiles of wind speed, shearing stress and turbulence at the crest of a large hill, Quart. J. R. Met. Soc., Vol. 106, pp. 101-123.
- Kaimal, J.C. and Finnigan, J.J. (1994): Atmospheric Boundary Layer Flows - Their Structure and Measurement -, Oxford University Press, 289p.
- Mitsuta, Y., Tsukamoto, O. and Neno, M. (1983): Wind characteristics over complex terrain, J. Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.15, pp. 185-196.

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

Mitsuaki HORIGUCHI

Synopsis

Some data analysis was made for the cases of north wind observed at Tsuruga Test Line. This test line is located on the north slope of a ridge line which runs along west-east direction. On the No.2 Tower, local maximum of wind profile is shown around the 30m level. Although the wind speed at this level satisfies Monin-Obukhov similarity in some degree, some shift from the values over flat uniform terrain is evident. At this 30m level, the phase of wind fluctuation proceeds from the surrounding levels over the frequency band in which the coherence shows high values.

Keywords: turbulence, mountainous region, vertical wind profile, similarity theory, phase