

強風時の風速変動のコヒーレンスの水平分布

林 泰 一

HORIZONTAL DISTRIBUTION OF COHERENCE OF WIND SPEED FLUCTUATION IN HIGH WIND

Taichi HAYASHI

Synopsis

The coherence of natural turbulent wind are studied. The horizontal wind speed fluctuations were measured in the horizontally arranged observation network. The horizontal distribution of root coherences are approximated by ellipses. The aspect ratio of ellipses decreases according to the increase of the frequency of fluctuations. This fact indicates that the eddy becomes isotropic in high frequency region.

1. は じ め に

風速の変動の時空間相関や、周波数成分の相関を示すコヒーレンスについての研究は、今までにも数多くなされてきた^{1)~7)}。しかし、これまでの研究は、数少ない観測点での観測結果をもとにして、Taylor の仮説⁸⁾によって、水平2次元に広げた例^{1)~3)}や、観測点が一つの測線上に並んでいて、風向がいろいろ変化する場合の例⁴⁾⁵⁾がほとんどである。また、超音波風速計を立体的に配置して、海上で風速3成分の3次元的なコヒーレンスを求めた例⁷⁾もあるが、空間的な広がりには、風向方向や直角方向に約20mにすぎない。

ここでは、潮岬風力実験所で実施した、接地層中の突風前線の観測^{9)~10)}のために設置した水平2次元の広がりをもつ同一高度の観測網で測定した風速変動の記録から、コヒーレンスの水平分布について解析した結果について報告する。

2. 水平風速のコヒーレンスの表現

2つの観測点の風速変動のコヒーレンスは次のように表わされる。

$$Coh(\xi, \eta, n) = \frac{C_0(\xi, \eta, n) + Q^2(\xi, \eta, n)}{S^2(0, 0, n)} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 ξ, η は、1つの観測点を基準としたときに、他の観測点の風向方向、風向直角方向の座標、 n は周波数である。 $C_0(\xi, \eta, n)$ はコスペクトル、 $Q(\xi, \eta, n)$ はコドラチャスペクトル、 $S(0, 0, n)$ は、パワースペクトルを示す。このコヒーレンスの平方根（以下 $\sqrt{Coh}$ と略す）は、2つの変動のフーリエ周波数成分の相関係数を表わしている。

これまでに、風向方向、風向直角方向の $\sqrt{Coh}$ については、それぞれの方向の減衰定数 k_ξ, k_η を用いて次のように表現できると報告されてきた²⁾¹⁰⁾¹¹⁾。

$$\text{風向方向} \quad \sqrt{Coh(\xi, 0, n)} = \exp\left(-k_\xi \frac{n|\xi|}{U}\right) \dots\dots\dots (2)$$

$$\text{風向直角方向} \quad \sqrt{\text{Coh}}(0, \eta, n) = \exp\left(-k_{\eta} \frac{n|\eta|}{U}\right) \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 U は、平均風速を示す。これらの式は、Davenport が、水平風速の鉛直方向のコヒーレンスに対して仮定した形¹⁾を水平方向にも一般化したものである。減衰定数 k_{ξ} , k_{η} については、いろいろな形が報告されており、例えば岩谷は、 $k_{\xi}=2.6$, $k_{\eta}=14 (\eta/z)^{0.45}$ という値を経験的に得ている。これは、四国の里浦海岸で得られたものである。

任意の点 (ξ, η) における $\sqrt{\text{Coh}}$ については、日野が、(2), (3)を合成して、直感的に次のような式を提案した¹¹⁾。

$$\sqrt{\text{Coh}}(\xi, \eta, n) = \exp\left(-\frac{k_{\xi}|\xi| + k_{\eta}|\eta|}{U} n\right) \dots\dots\dots (4)$$

この式では、ある一つの周波数に対する一つの水平面の $\sqrt{\text{Coh}}$ の等値線は、 k_{ξ} , k_{η} が ξ , η の関数でなければ風向方向、風向直角方向に対角線をもつ菱形群で近似していることになる。

これに対し、 $\sqrt{\text{Coh}}$ が周波数別の2つの風速変動の相関係数を示することから、次のように表現してみることにした。これは、先きに、著者らが示したように、空間相関係数について、その等値線を、風向方向に長軸、風向直角方向に短軸をもつ楕円群で近似できること²⁾からの類推である。

$$\sqrt{\text{Coh}}(\xi, \eta, n) = \exp\left(-\sqrt{\frac{\xi^2}{a^2} + \frac{\eta^2}{b^2}}\right) n \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 a , b は周波数の関数で長さの次元をもち、風向方向及び風向直角方向の周波数毎の積分スケールであり、その風波数の乱渦のスケールを示す。

風向方向、風向直角方向の $\sqrt{\text{Coh}}$ が、(2), (3)のように表現できるとすれば、(5)で $\xi=0$ 又は $\eta=0$ のときと比較して、減衰定数 k_{ξ} , k_{η} と乱渦のスケール a , b の間には、次のような関係が成立する。

$$k_{\xi} = \frac{U}{an} \dots\dots\dots (6)$$

$$k_{\eta} = \frac{U}{bn} \dots\dots\dots (7)$$

一つの周波数について、 a , b が決定できれば、減衰定数 k_{ξ} , k_{η} が求まることになる。

3. 観測及び解析の概要

潮岬風力実験所の野外実験場(南北 60 m, 東西 120 m)のほぼ平坦な地面に、28点の観測点を設け、風速変動の測定を行なった。観測点の配置は、Fig. 1 に示すとおりであり、一辺が約 14 m の格子状になるように観測点を決めた。しかし、敷地の形の都合上、完全な格子になっていない部分もある。図中の No. 22 の地点以外の観測点には、高さ 8.25 m のポールをたてて、その頂上に、気象庁型三杯風速計を取付けた。No. 22 には、高さ 17 m の観測塔をたてて、高さ 8.25 m と 16 m に三杯風速計、高さ 17 m にプロベラ型風向風速計を取付けた。

これらの風速計からの信号は、4 Hz で数値化して磁気テープに収録した。この 4 Hz で数値化した風速変動のデータは、6 個毎に平均を作り、評価時間 1.5 秒の風速変動の時系列を作った。これは、三杯風速計の風速変動に対する動特性を考慮したためである。

今回、解析したデータは、1980年12月の冬季季節風の吹き出し時に観測したものである。風向は西北西な北西で、風向方向に、最も長く観測点が並んでいる方向である。観測時間は3時間であるが、30分づつ 6 Runs に分けて解析した。各 Run 毎の全観測点の平均風速は、7.7~12.9 m/s である。平均風速の観測点による差は、各 Run によって異なるが、その差は10%以内である。

スペクトルの計算を始める前に、風速変動の時系列から長周期の変動を除いて、乱流成分のみを残すために、評価時間 1.5 秒の風速変動を前後80個づつ、すなわち、240 秒の移動平均からの差をとって、新たな時

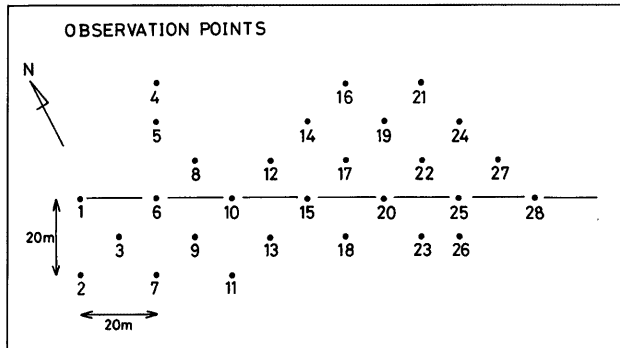


Fig. 1 Arrangement of observational network. The figures are the observation points.

系列を作成し、これをもとに解析を進めた。この操作は、遮断周波数 6.3×10^{-3} Hz の高域通過フィルターを通したことになる。

スペクトル解析は、Blackman Tuckey 法によった。その際、相関を計算する場合に、観測点のすべての組合せをとることは、計算時間の都合上、困難であったので、観測網のほぼ中央の点 (Fig. 1 の No. 15) を基準点として、この点と他の点との組合せをとることにした。

4. 風速変動のコヒーレンスの平方根の水平分布

風速変動の $\sqrt{Coh}$ の水平 2 次元分布の実測例を Fig. 2, 3 に示す。変動の周波数は、Fig. 2 の場合が、 1.075×10^{-2} Hz, Fig. 3 の場合が 1.828×10^{-1} Hz である。平均風速は 12.9 m/s のときのものである。2 つの図で、各観測点での $\sqrt{Coh}$ の実測値を比較してみると、すべての観測点において、低周波数の場合の方が、 $\sqrt{Coh}$ の値が大きいことがわかる。すなわち、ゆっくりした風速変動は、より遠いところまで伝わるものが

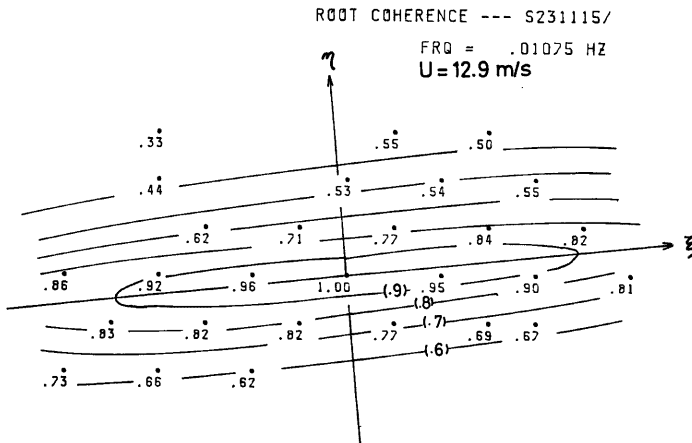


Fig. 2 Horizontal distribution of root coherence at the frequency of 0.01075 Hz.

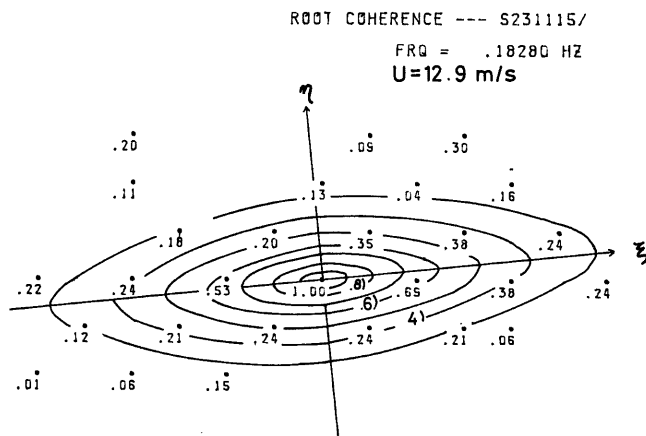


Fig. 3 Same as Fig. 3 except for the frequency of 0.1828 Hz.

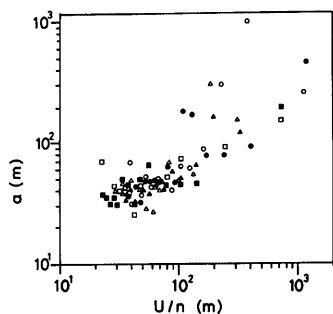


Fig. 4 Longitudinal scales as a function of wave length (● Run 1; ○ Run 2; ▲ Run 3; △ Run 4; ■ Run 5 and □ Run 6).

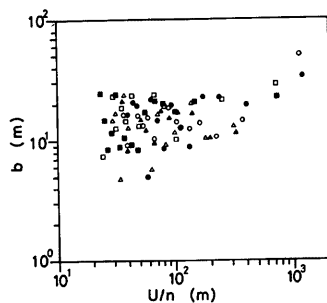


Fig. 5 Lateral scales as a function of wave length. Symbols are same as in Fig. 4.

わかる。この一定の周波数に対する $\sqrt{Coh}$ の実測値を用いて、最小2乗法によって、(6)式をあてはめ、 a 、 b の値を求めてみると、Fig. 2 の場合が $a=466$ m, $b=34$ m, Fig. 3 の場合が、 $a=48$ m, $b=15$ m である。この計算を行なう際には、0.2 以上の実測値のみを用いた。Fig. 2, 3 の実線で示す楕円群が(6)式で近似した $\sqrt{Coh}$ の等値線である。近似した値の実測値との誤差の rms は、各々、9%、20%であった。楕円の長軸と短軸の比 a/b は、それぞれ、13.5 及び 3.3 であり、低周波数の場合の方がより細長い楕円で近似されることがわかる。

他の例についても同様な手続きで解析を行なった。 $\sqrt{Coh}$ を(5)で近似したものと、実測値との誤差 rms は20%程度であった。

ある一つの周波数における、乱渦の風向方向及び風向直角方向のスケールを示す a と b の、その周波数の

変動の波長 U/n に対する関係を, Fig. 4, 5 に示す。 a, b 共に, 変動の波長の増加につれて, 増加している傾向を示す。その増加のようすは, b に比べて a の方が急速に増加している。すなわち, 風向方向の乱渦のスケールの方が, 風向直角方向に比べて, 平均風速や変動の周波数により影響されやすいことがわかる。

Fig. 6 には, 乱渦の風向方向と風向直角方向の比 a/b の周波数に対する関係を示す。各 Run 毎に平均風速が異なるので, 平均風速 U と測定高度 z で無次元化した周波数に対してプロットした。この比 a/b は, 周波数の増加とともに, 細長い楕円から, 円に近づくような傾向を示す。これは, 高周波数になるにつれて, 乱渦の性質が等方的になることを示していると考えられる。

5. コヒーレンスの減衰定数

各 Run の各周波数について求めた a, b から, (6), (7) の関係を利用して, 風向方向, 風向直角方向の減衰定数 k_θ, k_η を求めた。先きに述べたように, 波長 U/n と乱渦の風向方向及び風向直角方向のスケール a, b の比が一定であれば, 減衰定数は, 一定である。しかしながら, Fig. 4, 5 からわかるように, その比は一定ではないことがわかる。(Fig. 4, 5 は対数目盛であり, 比が一定であれば, 傾きが1の直線で近似できるはずである。) ここでは, k_θ, k_η の周波数に対する変化を調べてみた。Fig. 7, 8 は, k_θ, k_η を無次元周波数に対してプロットしたものである。 k_θ, k_η の値は, 周波数によって異なるが, $k_\theta = 0.3 \sim 7, k_\eta = 1.0 \sim 36$ ぐらいの値が得られた。Ropelewski らは, 数多くの観測例を整理して得た $k_\theta = 6 \sim 7^6$ や, 岩谷が得た $k_\theta = 2.6$ は, 今回得られた値と同程度の値である。

減衰定数の周波数に対する依存性は, Fig. 7, 8 から明らかなように, 周波数の増加とともに, 減少している。これを直線で近似したものが, Fig. 7, 8 の直線である。これらはそれぞれ次のように示される。

$$k_\theta = 0.56 \left(\frac{nz}{U} \right)^{-0.38} \dots\dots\dots (8)$$

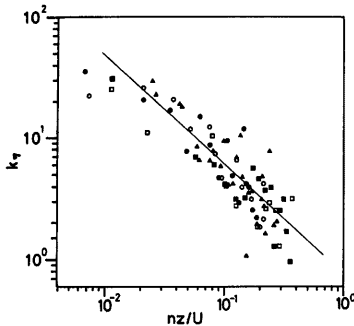


Fig. 7 Longitudinal decay parameter as a function of dimensionless frequency. Symbols are same as in Fig. 4.

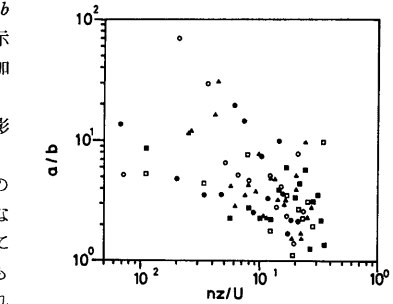


Fig. 6 Aspect ratio of eddy as a function of dimensionless frequency. Symbols are same as in Fig. 4.

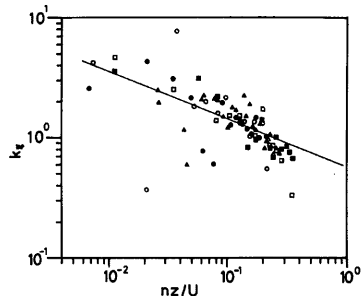


Fig. 8 Lateral decay parameter as a function of dimensionless frequency. Symbols are same as in Fig. 4.

$$k_y = 0.77 \left(\frac{nz}{U} \right)^{-0.85} \dots\dots\dots (9)$$

高周波数の変動に対応する乱渦がだんだん等方に近づいて、ついには、ある周波数で完全に等方になるとすれば、そのときには、 $k_x = k_y$ が成立する。 $k_x = k_y$ となる周波数までは、今回は、データが得られてはいないが、仮に、 k_x, k_y の周波数に対する変化が、そのまま、(8), (9) で表現できるとすれば、そのときの周波数は、 $nz/U = 1.97$ である。さらに、等方になった乱渦の性質が、それ以上の周波数帯では、そのまま維持されるとすれば、そこでは $k_x = k_y$ が、そのまま成立することになる。この高周波数帯については、より詳しい測定が必要である。

6. 結 語

水平 2 次元の広がりをもつ観測網で測定した風速変動のスペクトル解析を行ない、コヒーレンスの水平分布について考察した。空間相関係数の水平分布との類似から、コヒーレンスの平方根の等値線を楕円で近似するような実験式を導入し、実測値と比較した。楕円の形状は、周波数によって変化し、高周波数の変動ほど、縦横比が小さくなり、より円に近づくことがわかった。

コヒーレンスの減衰定数についても、周波数に対する依存性が示された。この減衰定数と周波数の関係については、今後、更に調査してゆきたい。

参 考 文 献

- 1) Davenport, A.G.: The spectrum of horizontal gustiness near the ground in high winds., Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 87, 1961, pp. 194-221.
- 2) Naito, G. and K. Kondo: Spatial structure of fluctuating components of the horizontal wind speed above ocean., J. Meteorol. Soc. Japan, 52, 1974, pp. 391-399.
- 3) Iwatani, Y.: Some features of the spatial structures of the surface layer turbulence in high wind condition., J. Meteorol. Soc. Japan, 55, 1977, pp. 130-137.
- 4) 光田 寧, 塚本 修: 強風時における風の乱れの空間的構造, 京大防災研年報, 第23号 B-1, 1980, pp. 303-323.
- 5) Pielke, R.A. and H.A. Panofsky: Turbulence characteristics along several towers., Boundary-Layer Meteorology, 1, 1970, pp. 115-130.
- 6) Ropelewski, C.F., H. Tennekes and H.A. Panofsky: Horizontal coherence of wind fluctuation., Boundary-Layer Meteorol., 5, 1973, pp. 353-363.
- 7) Naito, G.: Three-dimensional space structure of turbulence eddy in the atmospheric boundary layer above ocean., J. Meteorol. Soc. Japan, 60, 1982, pp. 1299-1315.
- 8) 石崎澄雄・光田 寧, 林 泰一: 潮岬における突風前線について(その1), 京大防災研年報, 第23号 B-1, 1980, pp. 257-270.
- 9) 石崎澄雄・光田 寧・林 泰一: 突風前線の観測について(その2), 京大防災研年報, 第24号 B-1, 1981, pp. 319-329.
- 10) 石崎澄雄・光田 寧・林 泰一: 突風前線の観測について(その3), 京大防災研年報, 第25号 B-1, 1982, pp. 247-253.
- 11) Hino, M.: Theoretical argument on turbulent structure of gusty wind., Proc. of JSCE, No. 202, 1972, pp. 115-118.
- 12) 石崎澄雄・光田 寧・林 泰一: 強風時の風速変動の時空間相関について, 京大防災研年報, 第28号 B-1, 1985, pp. 407-414.