

強風時の風速変動の時空間相関について

石崎 潑雄・光田 寧・林 泰一

THE SPACE TIME CORRELATION OF WIND SPEED FLUCTUATION IN HIGH WIND

By *Hatsuo ISHIZAKI, Yasushi MITSUTA and Taiichi HAYASHI*

Synopsis

The space time correlations of natural wind are investigated using the horizontal wind speed fluctuation measured in the observation net work where the observational points are arranged two-dimensionally. The isopleths of space correlation coefficients are approximated by the ellipses. The fitness of this approximation is fairly good. The aspect ratio of these ellipses is 3 to 4, when the averaging time of wind speed is 1.5 sec. The aspect ratio increases with the wind speed and the averaging time. Talor's frozen eddy hypothesis is checked by comparing the traveling distance of turbulent eddy. The traveling speed is estimated 1.14 times of mean wind speed.

1. は じ め に

風速変動の時空間相関についての研究は、今までにも数多くなされてきた^{1)~5)}。しかし、これまでの研究では、数少ない観測点での実測値をもとにして、Taylor の frozen eddy の仮説⁶⁾に基づいて水平に2次元に広げた例^{1)~3)}や、観測点が一つの測定線上に並んでいて、風向がいろいろ変化するのを待って、丁度、測定線の方向や直角方向になる場合を選んで、観測を行なった例^{4), 5)}がほとんどである。

ここでは、1979年から3年間、潮岬風力実験所において行なった、接地境界層中の突風前線の観測^{7)~9)}のために設けた水平2次元の広がりをもつ28点の観測点からなる観測網で測定した、風速変動の記録をもとにして、時空間相関の解析を行なったので、その結果について報告する。一部はすでに報告したが⁸⁾、今回は解析例を増やし、また、観測時間も長くした。

2. 観 測 の 概 要

潮岬風力実験所の野外実験場(縦60m、横120m)のほぼ平坦な土地に、28本の観測塔を設置した。観測塔の配置は、Fig. 1に示すとおりである。できるだけ、1辺が約14mの格子状になるように配置をとったが、敷地の形の都合や、民家があるために、多少変形している所もある。観測塔の高さは、図中のNo. 22を除いて、すべて地上高8.25mとし、その頂上に気象庁型三杯風速計を取付けた。No. 22には、特に地上高16mの鉄塔をたて、他の観測点と同じ高度の8.25mと16mに三杯風速計、16mにプロペラ型風向風速計を取付けた。

これらの計測器からの信号は、4Hzで数値化して、磁気テープに収録した。このデータをもとにして、実験所内の小型計算機で統計処理を行なった。磁気テープのデータは4Hzで収録されているが、三杯風速計の風速変動に対する追従性を考慮して、6個づつの平均をとり、標準の風速の評価時間としては1.5秒とした。観測の詳細は、突風前線の報告^{7)~9)}に述べている。

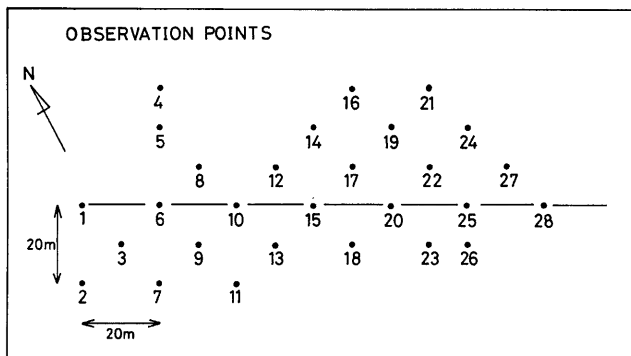


Fig. 1 Arrangement of observational network. The figures are the observational points.

今回解析したデータは、1981年12月の冬季の季節風の吹き出し時に観測したものである。この冬季の季節風の風向は、概ね、北西ないし西であり、Fig. 1 でわかるとおり、この観測網では最も長い吹送距離がとらう。観測記録は全部で3時間分であるが、30分ずつ6 Runs に分けて解析した。また、風速変動のうちで長周期の変動を除き、乱流成分だけを残すために、評価時間1.5秒の風速変動値を前後80個ずつ、すなわち240秒の移動平均をとり、それからの差をとって新たに時系列をつくり、それをもとにして解析した。この移動平均からの差をとる操作は、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。この型のフィルターは、位相のずれはない。解析した例は、平均風速が $7.7 \sim 12.9$ m/s で、比較的強風時のものである。

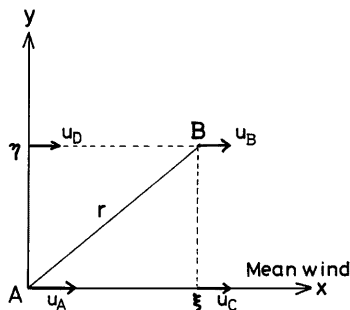


Fig. 2 Co-ordinate used for obtaining the horizontal space time correlation.

3. 水平風速の時空間相関の表現法

Fig. 2 に示すように、風向方向に x 軸、それと直角方向に y 軸をもつような座標系を考える。その原点を A とし、基準点とする。A における風速を u_A とする。原点 A から、距離 r だけ離れた点 B (ξ , η) の風速を u_B とするとき、 u_A , u_B の時空間相関係数 R は、風速場が定常で均一であるとする、次のように表現できる。

$$R(\xi, \eta, \tau) = \frac{\overline{u_A(t)u_B(t+\tau)}}{\sigma u_A \sigma u_B} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 τ は時間の遅れである。 σu_A , σu_B は各々 u_A , u_B の標準偏差である。

自己相関係数は、(1) で $\xi = \eta = 0$ として、

$$R(0, 0, \tau) = \frac{\overline{u_A(t)u_A(t+\tau)}}{\sigma u_A^2} \dots\dots\dots (2)$$

風向方向の空間相関係数は、(1)で $\eta=0, \tau=0$ として、

$$R(\xi, 0, 0) = \frac{u_A(t) u_G(t)}{\sigma u_A \sigma u_G} \dots\dots\dots (3)$$

風向直角方向の空間相関係数は、 $\xi=0, \tau=0$ として、

$$R(0, \eta, 0) = \frac{u_A(t) u_D(t)}{\sigma u_A \sigma u_D} \dots\dots\dots (4)$$

となる。

風向方向、風向直角方向の空間相関係数は、次のような式で近似できることが、報告されている¹⁰⁾。

$$R(\xi, 0, 0) = \exp\left(-\frac{\xi}{L_x}\right) \dots\dots\dots (5)$$

$$R(0, \eta, 0) = \exp\left(-\frac{\eta}{L_y}\right) \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 L_x, L_y は、各々の方向の積分スケールであり、

$$L_x = \int_0^\infty R(\xi, 0, 0) d\xi \dots\dots\dots (7)$$

$$L_y = \int_0^\infty R(0, \eta, 0) d\eta \dots\dots\dots (8)$$

で与えられるものである。これらの量は、各方向の渦動 (eddy) の平均的な大きさに相当する。

(6), (7) を考慮して、任意の点 B (ξ, η) の風速変動空間相関係数を次のような式で表現することを考える。

$$R(\xi, \eta, \tau) = \exp\left(-\sqrt{\left(\frac{\xi}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{\eta}{L_y}\right)^2}\right) \dots\dots\dots (9)$$

(9) で、 $\xi=0$ 又は $\eta=0$ とすれば、(6) 又は (7) になる。

(9) を変形すると、

$$\left(\frac{\xi^2}{L_x^2} + \frac{\eta^2}{L_y^2}\right) \frac{1}{(\ln R)^2} = 1 \dots\dots\dots (10)$$

となり、 R の値を決めると、 ξ と η について、 x 軸、 y 軸に長軸、短軸をもつ楕円の方程式になる。すなわち、空間相関係数を (9) で近似することは、空間相関係数の水平分布を楕円で近似することになる。

L_x, L_y は、空間相関係数の実測値をもとにして、最小二乗法で決定した。

4. 水平方向の空間相関

4.1 空間相関の水平分布とその形状

観測点すべてについての組合せをとって、相関を計算するのは、計算時間の都合上、不可能であったので、観測網のほぼ中央の点 (Fig. 1 の No. 15) を基準点として、他の27点との時空間相関係数を計算した。

Fig. 3 には、評価時間 1.5 秒の風速変動の空間相関係数の水平分布の一例 (Run 1) を示す。この例では、平均風速は 12.9 m/s である。この実測値をもとにして、(9) で L_x, L_y を決定したが、その際、相関係数の値が 0.2 以上のものに限って使用した。これは相関が 0.2 より小さいものまで含めると、実測値との誤差が大きく、20% を越えるほどになってしまうためである。Fig. 3 の実線で示すのが、空間相関係数を (9) で近似したときの等値線を示す楕円群である。この例では、 $L_x=59.1$ m, $L_y=14.7$ m であった。楕円の長短軸の比 L_x/L_y は 4.03 であった。(9) で近似した値と、実測値との誤差の r.m.s. は 14.8% であった。

他の 5 例についても同様な手続きで解析を行ない、各 Run 毎に平均風速 WS 、積分スケール L_x, L_y 、楕円の長短軸比 L_x/L_y 、及び実測値との誤差の r.m.s. は Table 1 に示す。実測値との誤差の r.m.s. は 14

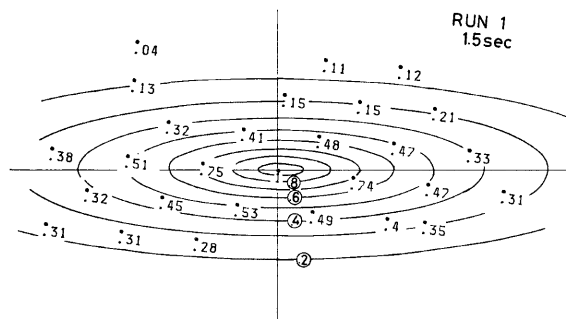


Fig. 3 Horizontal distribution of space correlation coefficients with averaging time of 1.5 sec. Ellipses are the isopleths approximated by (9).

Table 1 Mean wind speed, longitudinal and lateral integral scales, aspect ratio and root of mean square error

RUN	WS (m/s)	L _x (m)	L _y (m)	L _x /L _y	Error %
1	12.9	59.1	14.7	4.03	14.8
2	12.1	63.9	20.3	3.14	14.3
3	10.5	41.6	10.6	3.84	14.0
4	9.9	62.9	19.5	3.23	16.4
5	7.7	48.7	15.3	3.18	18.2
6	7.8	53.4	16.1	3.32	14.4

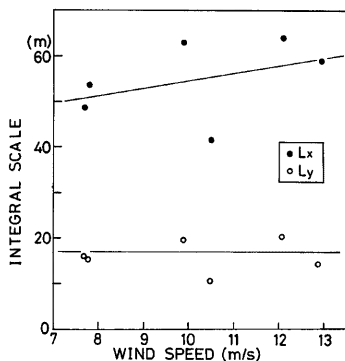


Fig. 4 Longitudinal and lateral integral scales as function of wind speed

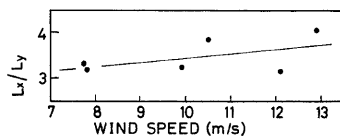


Fig. 5 Aspect ratio of ellipses as function of wind speed

～18%であり、この程度の精度で空間相関係数は(9)で表現できる。

Fig. 4 には、風向方向、風向直角方向の積分スケールである L_x と L_y の風速に対する変化のようすを示す。今回の観測における風速の範囲である 7.7～12.9 m/s では、 L_x は 40～60 m、 L_y は 10～20 m 程度である。風速の増加に対して、 L_x は増加する傾向があるのに対し、 L_y は風速には依存しない。Fig. 5 には、楕円の長軸と短軸の比 L_x/L_y と風速との関係を示す。この風速の範囲では 3～4 程度の値をとり、風速に対する L_x 、 L_y の変化に対応して、風速が増すにつれてやや増加する。Shiotani and Iwatani は、里浦海岸において、一つの測定線上に並ぶ観測点での

風速変動の観測から, Taylor の frozen eddy の仮説を仮定して, 同一時刻の空間相関係数の水平分布を求めている²⁾。相関係数の分布の形状は, 風向方向に伸びた楕円に近い形をしていることが報告されている。積分スケールは, L_x が海風の場合に 204 m, 陸風の場合に 154 m, L_y は海風の場合に 54 m, 陸風の場合に 65 m である。長軸と短軸の比は, 海風の場合に 4.2, 陸風の場合に 2.5 である。潮岬の解析結果と比べると, 里浦の場合の方が積分スケールははるかに大きい。長短軸比は, 里浦の海風と陸風の間ぐらいの値である。

4.2 風速の評価時間を変化させた場合の空間相関

これまでに述べてきた風速変動の相関係数は, 風速の評価時間が 1.5 秒の場合である。評価時間を大きくしていくと, 相関係数の値は増加することが予想され, その水平分布の形状も変化すると思われる。風速の評価時間として 1.5, 3.0, 6.0, 9.0, 15.0, 30.0, 60.0 秒の 7 種類を選んだ。風速変動の時系列は, すでに遮断周波数 6.25×10^{-3} Hz の高域通過フィルターを通してあるので, 評価時間を変化させることは, 帯域通過フィルターを通すことになる。その低域通過側の遮断周波数は 1.0, 5.0×10^{-1} , 2.5×10^{-1} , 1.7×10^{-1} , 1.0×10^{-1} , 5.0×10^{-2} , 2.5×10^{-2} Hz に相当する。7 種類の評価時間のうち, 1.5 秒については, すでに Fig. 3 に示した。同じ Run の他の評価時間の 3.0, 6.0, 15.0, 60.0 秒の 4 つの場合を Fig. 6~9 に示す。風速の評価時間が大きくなるほど, 相関係数の値は大きくなる。

評価時間 1.5 秒の場合と同様に, (9) で空間相関係数を近似して L_x と L_y を求めた。 L_x , L_y の評価

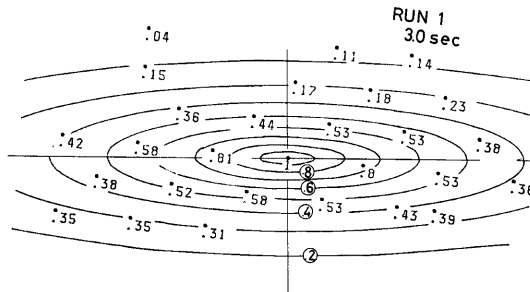


Fig. 6 Same as Fig. 3 except for averaging time of 3.0 sec

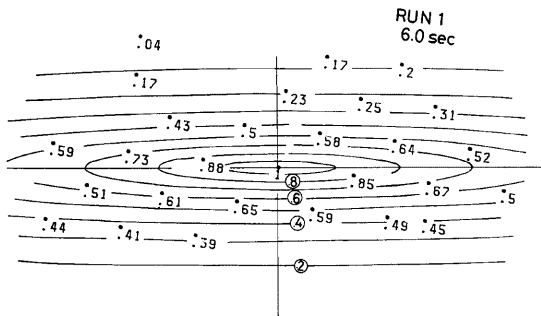


Fig. 7 Same as Fig. 3 except for averaging time of 6.0 sec

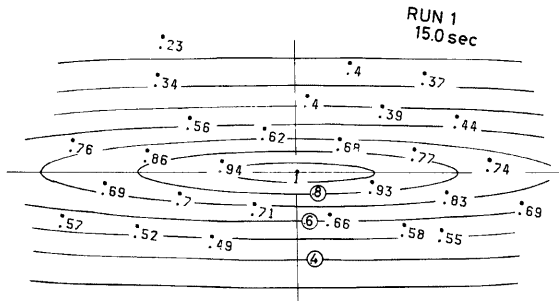


Fig. 8 Same as Fig. 3 except for averaging time of 15.0 sec

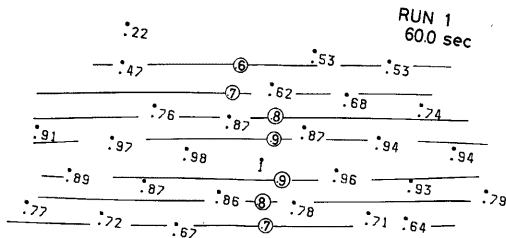


Fig. 9 Same as Fig. 3 except for averaging time of 60.0 sec

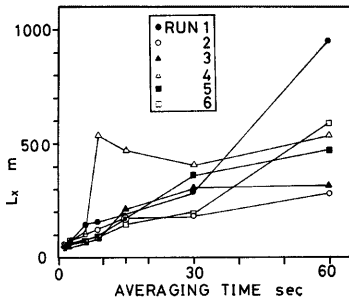


Fig. 10 Longitudinal integral scales as function of averaging time

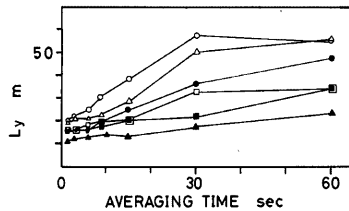


Fig. 11 Lateral integral scales as function of averaging time. Symbols are same as in Fig. 10

時間に対する変化のようすは、Fig. 10, 11 に示す。 L_x も L_y も全体としては、評価時間が大きくなるに従って、増加していく傾向を示している。その増加のようすは、 L_x の方が L_y に比べて大きいようである。 L_x と L_y の比と風速との関係を Fig. 12 に示す。評価時間が1.5~3.0秒のときには、各 Run 共に3~4であるが、評価時間が大きくなると、かなりばらつきは大きいものの、平均的には増大していく。すなわち、楕円の形状は、評価時間が大きくなるにつれて、より細長くなることになる。

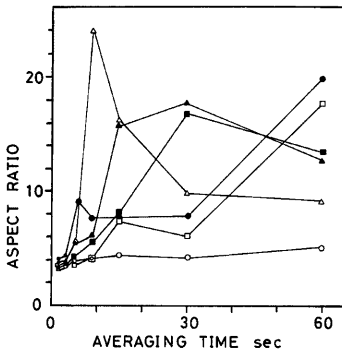


Fig. 12 Aspect ratios of ellipses as function of averaging time. Symbols are same as in Fig. 10.

5. 時空間相関

先きに述べた空間相関は、同一時刻の2点の相関をとったものである。ここではさらに、時間の遅れを加えた、時空間相関について調べてみた。渦動がそのままの形を保ったまま、風上から風下へと流されていくという Taylor の frozen eddy の仮説を検証し、その渦動の平均移動速度を求めてみた。

風速変動の位相は、基準点より風上側では進み、風下側では遅れている。このため、時空間相関が最大になるのは、観測点の位置によって、ある時間遅れて、あるいは進んで現れることになる。観測網の中で、風上から風下へ最も長い吹送距離がとれる、観測点1—6—10—15—20—25—28 (Fig. 1 の直線) を選び、基準点 No. 15 と他の6点との時空間相関係数を求めた。Fig. 13 には、その結果の一例 (Run 1) を示す。この Run では、風向と測定線のなす角は5.4度であり、測定線はほぼ風向方向に沿っている。図中の数字は基準点との距離を示し、正が風下側、負は風上側である。時空間相関が最大になるのは、基準点より風上側では時間が進み、風下側で遅れている。

時空間相関が最大になる時間の遅れを τ_m とする。風向と測定線のなす角を θ とすると、測定線方向の風速の成分は、 $\bar{U} \cos \theta$ である。もし、渦動が平均風速で移動しているとすれば、 $\tau_m \cdot \bar{U} \cos \theta$ は、基準点と観測点との距離 ξ に等しくなるはずである。そこで、実際の距離と $\tau_m \cdot \bar{U} \cos \theta$ の関係を調べてみた。その際、 τ_m の正確な評価が必要である。本来、風速場が定常で均一であると仮定すれば、時空間相関はその値が最大となる時間の遅れを中心として、前後は対称形になるはずである。ところが Fig. 13 に示すように、風速の評価時間が1.5秒であるので、時間遅れの間隔も1.5秒であり、それより細かい時間は、実測値からだけでは判断できない。そこで、時空間相関が最大になる時間の遅れを、より正確に推定するために、時空間相関係数の実測値が最大になる点の前後5点を放物線で近似し、その頂点の時間の遅れを推定した。こう

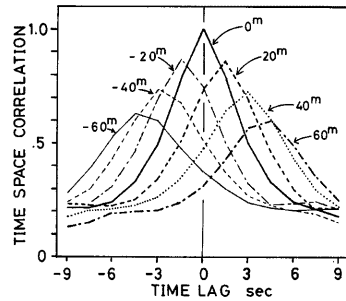


Fig. 13 Space time correlation coefficients for various separation distances as function of lag time

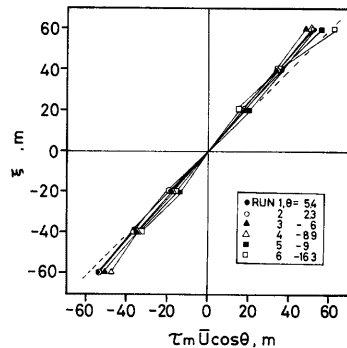


Fig. 14 Comparison of traveling distances of turbulent eddy

して求めた τ_m を用いて、 $\tau_m \cdot \bar{U} \cos \theta$ と ξ との関係を調べてみたのが Fig. 14 である。図中の破線は、渦動が平均風速で移動するとした、 $\xi = \tau_m \cdot \bar{U} \cos \theta$ を示す。実測値に基づいて計算すると、6 Runs とともに、 $\tau_m \cdot \bar{U} \cos \theta$ が ξ より小さくなる傾向がある。平均すると、移動速度は平均風速の1.14倍となる。すなわち渦動の移動速度が平均風速より大きい。今までには、渦動の移動速度は平均風速に等しいとか、約0.8倍であるという報告がある^{2), 5)}。平均風速より大きい例は余りない。この渦動の移動速度については、今後さらに調査していきたい。

6. 結 語

水平2次元の広がりをもつ観測網において、風速変動を測定し、その時空間相関の解析を行なった。今までの空間相関係数の風向方向、風向直角方向の近似式を考慮して、空間相関係数の水平分布が楕円になるような表現式を導き、その適合性を調べてみた。その結果、20%の誤差で近似式は実測値と合うことがわかった。楕円の縦横比は、風速の評価時間1.5秒のときに3~4で、風速とともにやや増加し、楕円の形が細長くなる傾向を示す。

時空間相関係数の最大値を示す時間遅れの変化から求めた、渦動の移動速度は平均風速の14%増しという結果を得た。

今後は、周波数別の相関を示す、コヒーレンスについても解析を進めてゆきたい。

参 考 文 献

- 1) Panofsky, H.A.: Scale Analysis of Atmospheric Turbulence at 2 m., Quat. J. Roy. Soc., Vol. 88, 1962, pp. 57-69.
- 2) Shiotani, M. and Y. Iwatani: Horizontal Space Correlations of Velocity Fluctuations during Strong Wind., J. Meteor. Soc. Japan, Vol. 54, No. 1, 1976, pp. 59-66.
- 3) Takeuchi, K.: Relationship between Different Correlation Coefficients in the Atmospheric Boundary Layer., Physics of fluid., Vol. 00, 1967, pp. S223-S225.
- 4) 塚本 修・光田 寧: 強風時における風速変動の空間相関について, 京都大学防災研究所年報第21号 B-1, 1978, pp. 427-436.
- 5) 光田 寧・塚本 修: 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, 1980, pp. 303-323.
- 6) Taylor, G.I.: The Spectrum of Turbulence., Proc. Roy. Soc., A164, pp. 467-000.
- 7) 石崎澄雄・光田 寧・林 泰一: 潮岬における突風前線の観測について (1), 京都大学防災研究所年報第23号 B-1, 1980, pp. 257-270.
- 8) 石崎澄雄・光田 寧・林 泰一: 突風前線の観測について (その2), 京都大学防災研究所年報 第24号 B-1, 1981, pp. 319-329.
- 9) 石崎澄雄・光田 寧・林 泰一: 突風前線の観測について (その3), 京都大学防災研究所年報 第25号 B-1, 1982, pp. 247-253.
- 10) 塩谷正雄: 強風の性質, 開発社, 1979, 193 p.