

強風時における風速変動の空間相関について

塚 本 修・光 田 寧

STUDY OF SPACE CORRELATION OF HORIZONTAL VELOCITY IN HIGH WINDS

By Osamu TSUKAMOTO and Yasushi MITSUTA

Synopsis

Space correlation function of wind speed for the space separations up to 720 m were obtained directly from the anemometer array. Longitudinal space correlation function estimated from autocorrelation function can be a fairly good approximation judging from comparing it with the directly obtained longitudinal space correlation function on the array. Lateral space correlation shows rapid decrease with increasing horizontal distance up to 30–60 m and holds almost constant value in the longer distances which is usually near zero but higher value for longer averaging time. Space-time correlation function with vertical distance obtained on the 50 m high tower in this study shows fairly good agreements with the previous works.

1. は し が き

1972年秋に沖縄県多良間島に特に台風時における強風の乱れの空間的な性質を調べることを目的として水平距離 720 m にわたって約30台の風速計を設置し、風速変動の同時観測を行っている。観測はすでに6ヶ年を経過し、磁気テープ約30本分の記録が得られているが現在までのところ最も風の強いもので平均風速 20 m/s 程度である。観測の概要及び一部の解析結果については既に報告したとおり^{1), 2)} であるが今回はこの観測の主たる目的である風速変動の空間的構造の解明に主眼を置いて解析を行った。従来この種の研究はあまり多くなく、しかもその水平方向の距離は高々 200 m 程度までであり、このような長い距離にわたる観測は例がない。すべてのデータの解析にはまだかなりの時間を要するが、今回は条件の良い場合を選んで水平方向ばかりでなく鉛直方向の空間相関についても解析を行ったのでその結果について報告する。

2. 観 測 の 概 要

観測塔は Fig. 1 に示すような配置になっており、長さ 720 m の測線上に 90 m おきに25基設置され各々

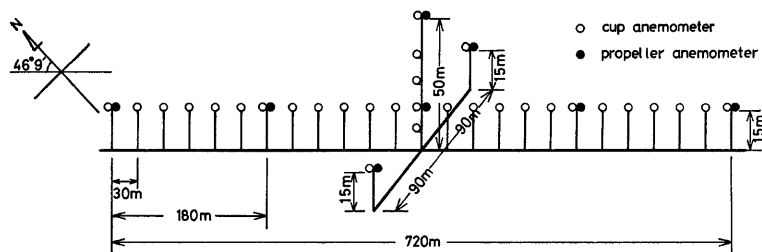


Fig. 1. Arrangement of observing masts and anemometers.

には気象庁型 3 杯風速計が取り付けられている。中央の観測塔から測線に直角方向に 90 m 離れた点にも塔が配置され、塔の高さは中央のもののみが 50 m で他はすべて 15 m である。また図中黒丸で示した箇所にはプロペラ式風向風速計が設置され風向の空間分布も観測できるようになっている。

これらの各測器からの信号は 1/4 秒毎に数値化され現地で磁気テープに収録される。磁気テープは研究室に持ち帰りミニ・コンピュータを用いて各種の統計処理を行う。生のデータは 1/4 秒毎にサンプルされた値であるが観測された風速があまり大きくないところから風速計の応答速度を考えて、今回の計算を行う場合には標準的な評価時間としては 1.5 sec, 観測時間は特に指示しない限り 10 min とした。

3. 相関関数の表現法

Fig. 2 に示すように風向方向と風向横方向の 2 つの軸をもつような直交座標系を考え、その原点、A における風速、 u_A の自己相関関数は

$$R(0, 0, \tau) = \frac{\overline{u_A(t) \cdot u_A(t+\tau)}}{\sigma_{u_A}^2} \equiv R_t(\tau) \quad (1)$$

と表わされる。ここで τ は time lag を示す。この自己相関関数については従来より多くの測定がなされている。これに対し空間相関関数は同時刻の 2 点での風速の値から次のように求められる。

風向方向：

$$R(\xi, 0, 0) = \frac{\overline{u_A(t) \cdot u_C(t)}}{\sigma_{u_A} \cdot \sigma_{u_C}} \equiv R_x(\xi) \quad (2)$$

風向横方向：

$$R(0, \eta, 0) = \frac{\overline{u_A(t) \cdot u_B(t)}}{\sigma_{u_A} \cdot \sigma_{u_B}} \equiv R_y(\eta) \quad (3)$$

風向によって測線を回転させることはできないから風向が望む方向と一致するのを待って観測を行う以外に調べる方法はない。すなわち、ここでもし風向方向と測線方向が一致すればこの測線で測定したものは風向方向のものを求めるのに利用できるし、角度が 90° の場合は測線方向で測定したものは風向横方向の空間相関になる。(2) 式で表わされた風向方向の空間相関関数は Taylor の frozen eddy の仮説を用いれば一点での自己相関関数 (1) 式を用いて次のように表わすこともできる。

$$R_x(\xi) = \frac{\overline{u_A(t) \cdot u_C(t)}}{\sigma_{u_A} \cdot \sigma_{u_C}} = \frac{\overline{u_A(t) \cdot u_A(t+\tau_0)}}{\sigma_{u_A}^2} = R_t(\tau_0) \quad (4)$$

ただし、ここで $\tau_0 = \xi / \bar{U}$ で $\bar{U}$ は平均風速である。

また、空間相関関数に時間遅れを加えた時空間相関関数は次のように定義できる。

$$R(\xi, 0, \tau) = \frac{\overline{u_A(t) \cdot u_C(t+\tau)}}{\sigma_{u_A} \cdot \sigma_{u_C}} \quad (5)$$

$$R(0, \eta, \tau) = \frac{\overline{u_A(t) \cdot u_B(t+\tau)}}{\sigma_{u_A} \cdot \sigma_{u_B}} \quad (6)$$

今回、解析に用いた Run はなるべく風が強くしかも風向が測線に対して平行あるいは直角に近いものを選んだ。Table 1 にそのリストを示す。ここで直角の場合として 90° と 270° の 2 つの場合を選んだのは観測点が島のはずれにあるため、この 2 つのケースで陸上の吹送距離がかなり異なり、それが乱れの性質に影響を与えるかどうかを見るためである。すなわち 90° のものは陸地の吹送距離の長いものであり、 270° のものは海岸から最短距離を吹いてきたもので陸上の吹送距離は約 500 m しかない。

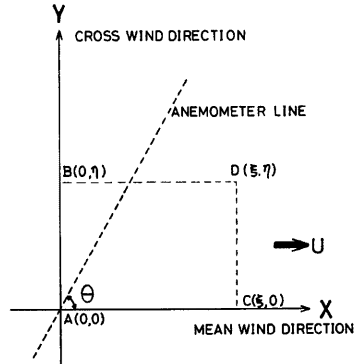


Fig. 2. Co-ordinate used in order to obtain horizontal space correlations.

Table 1. List of run.

Run No.	Wind Speed	Wind Direction	Fetch on Land
28-2-7	11.4 m/s	90°	4.5 km
39-2-5	18.2	180	1
42-1-3	13.7	270	0.5

4. 水平方向の空間相関関数

水平方向には高さ 15 m で水平距離 30 m 毎に 25 点での風速の同時記録が得られており、前出の (2) 式、(3) 式によって空間相関関数を算出した。この場合、同一の水平距離についていくつもの測点の組合せが考えられるが本研究ではこのすべての組合せについて計算を行い、そのアンサンブル平均と標準偏差の値を求めた。その一例は Fig. 3 に示すとおりである。個々の組合せにおける空間相関関数の値は水平距離によってかなり複雑な変化をするが、そのアンサンブル平均をとれば距離によるばらつきはそれほど小さくなる。また同一の距離に対しての組合せの選び方によるばらつきの標準偏差はほぼ 0.1~0.2 程度である。これらの傾向は Table 1 に示した他の 2 つのケースについてもあてはまる。

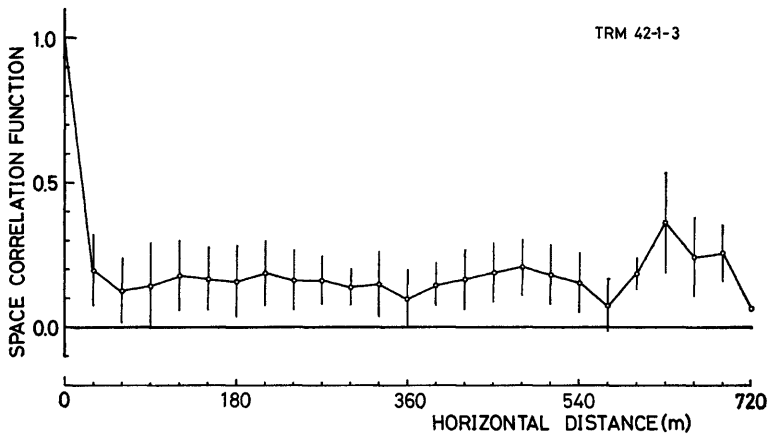


Fig. 3. Averaged space correlation function with rms values for Run 42-1-3.

Fig. 4 に示したものは Table 1 に示した 3 つのケースについての空間相関関数の平均値をプロットしたものである。この図を見て明らかなことは風向が測線に平行な Run 39-2-5 の場合には相関関数は距離と共にゆるやかに減少するのに対し、風向が測線と直角な他の 2 つのケースについては 30~60 m 以上の距離で急激に相関関数の値は小さくなり、それ以上では距離による変化はあまり見られない。また Run 42-1-3 と Run 28-2-7 を比べるとあまり陸地の影響を受けてないと考えられる前者の方は全般的に相関が高く、後者の方はほとんど 0 に近く海洋上のものの方がスケールの大きな渦が卓越しているのではないかと考えられる。これらは各々風向方向の空間相関関数と風向横方向の空間相関関数を表わすことになるが風速変動の空間相関関数の形については今までにいくつかの提案がなされている。たとえば井上⁹⁾ は L_0 を最大乱子の大きさ、 L_m を最小乱子の大きさとして風向方向の相関関数については $L_m \ll \xi \ll L_0$ の範囲では

$$R_s(\xi) = 1 - \left(\frac{\xi}{L_0} \right)^{2/3} \quad (7)$$

また風向横方向については

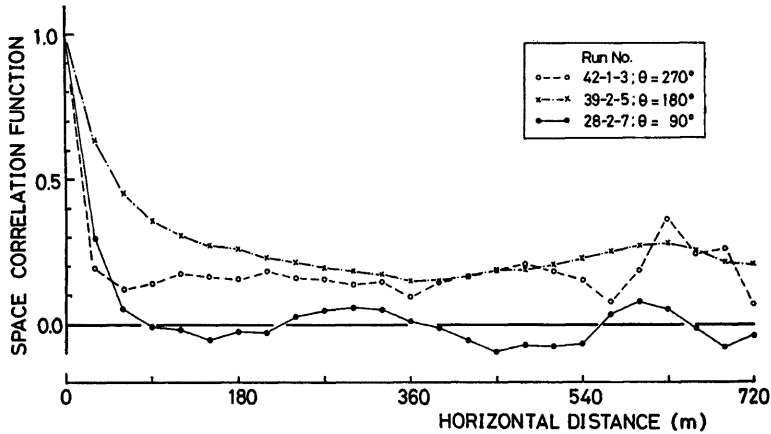


Fig. 4. Averaged space correlation functions for three Runs.

$$R_v(\eta) = 1 - \frac{4}{3} \left(\frac{\eta}{L_0} \right)^{2/3} \quad (8)$$

両者の関係については

$$\frac{1 - R_x(\xi)}{1 - R_v(\eta)} = \frac{4}{3} \quad (9)$$

になるとしている³⁾。一方、風向横方向の空間相関関数については

$$R_v(\eta) = \exp(-\eta/L) \quad (10)$$

$$R_v(\eta) = \frac{1}{1 + a\eta^b} \quad (11)$$

$$R_v(\eta) = \frac{2}{\pi^2} \int_0^\infty F(n) \cdot \coth^{1/2}(n, \eta) \cdot \cos(\Phi(n, \eta)) dn \quad (12)$$

の3つの関数形が提案されており、その適合性を調べて見ても3者共従来の200m程度までの水平方向の空間相関関数の実測値を表現するには大きな差異は無い。岩谷⁴⁾は最後の式を提案し、風速変動の他の性質との関係が、うまく説明出来るとしている。しかしここに示したような長い水平距離にわたる空間相関関数については、これらの形は必ずしもあてはまるものではなく、別の形の表現法を考える必要があるかもしれない。

風向方向の空間相関関数は、前章の(4)式で示したように1点での自己相関関数から frozen eddy の仮説を用いて推定することも可能である。Fig. 5 に示したものは25点における自己相関関数を各 time lag 毎に平均したものとそのばらつきの標準偏差を示す。自己相関関数の形としては井上³⁾によると、

$$R_t(\tau) = 1 - \left(\frac{\tau}{T_0} \right)^{2/3} \quad T_0 = L_0 / \bar{U} \quad (13)$$

あるいは、

$$R_t(\tau) = \exp(-\bar{U}\tau/L) \quad (14)$$

などの形が提案されており、ここに示したものは多少の違いはあるもののデータにもばらつきがあるためどちらでも同程度の適合性を示す。先に得られた自己相関関数から3つのケースについて(4)式を用いて風向方向の空間相関関数を推定したものがFig. 6であり、これには併せてRun 39-2-5の場合の直接求められた空間相関関数も描いてある。これを見ると多少の差は認められるが各々の値が0.1~0.2程度の標準偏差をもっていたことを考えるとほぼ直接測定したものと自己相関関数から推定したものと一致していると考え

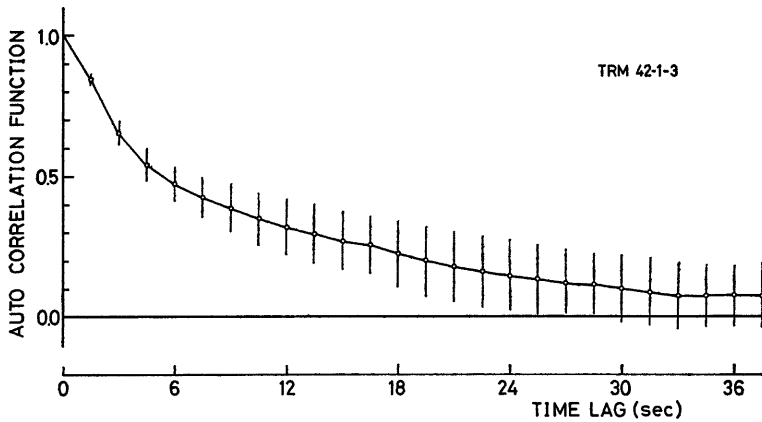


Fig. 5. Averaged auto correlation functions with rms values for Run 42-1-3.

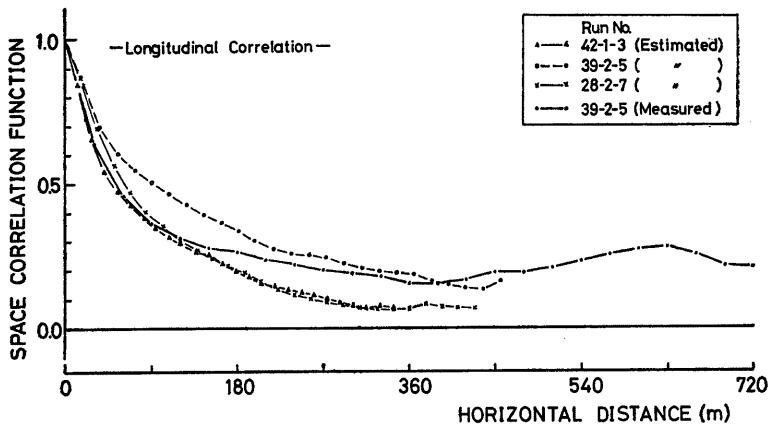


Fig. 6. Longitudinal space correlation functions estimated from auto correlation functions and those from observed values Run 39-2-5.

ることができる。また Fig. 4 と Fig. 6 を用いて Run 42-1-3 と Run 28-2-7 とについて風向方向と風向横方向との相関関数の関係、即ち(9)式の検証を行うことができるがこの場合には各 lag によって値のばらつきが大きく満足するような結果は得られなかった。

5. 評価時間による空間相関関数の変化

これまでに示した風速変動の相関関数は風速の評価時間を 1.5 sec としたことは先に述べたとおりであるが、この評価時間を長くすることによって相関の値は大きくなっていくことが考えられる。そこでここでは評価時間として 1.5 sec, 9 sec, 60 sec, 600 sec の 4 種を選び、この選び方による相関関数の変り方を検討した。

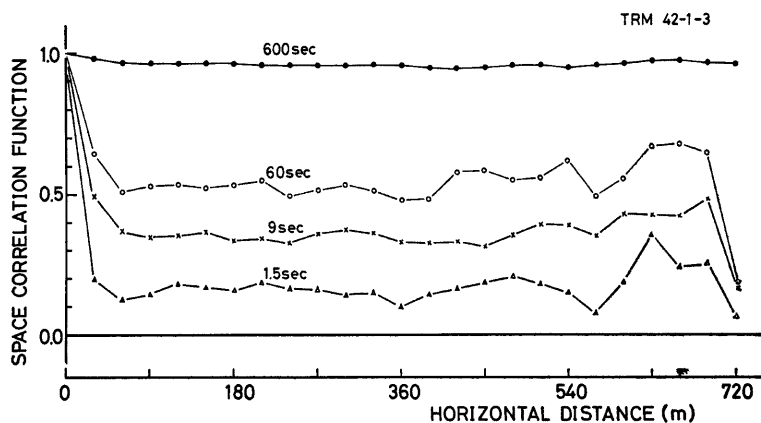


Fig. 7. Variation of lateral space correlation function with the averaging time for Run 42-1-3.

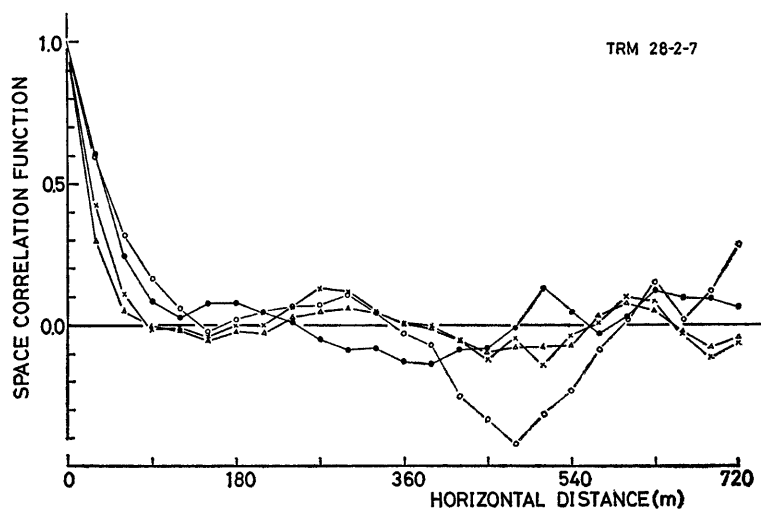


Fig. 8. Same as Fig. 7 except for Run 28-2-7.

この評価時間を600 secにとった場合には観測時間はRunによって60 min~100 minにとっている。Fig. 7及びFig. 8に示したものは、風向が測線と直角な2つの場合についての4種の評価時間をとった場合の空間相関関数の変化を示したもので、測線に直角に海側から風の吹いてくるRun 42-1-3の場合には評価時間が長くなると共に空間相関関数は1に近づく傾向を見せ、評価時間600 sec (10 min) の場合にはほぼすべての距離でほぼ1に近い相関を示す。すなわちこの範囲では10分間平均風速は全く同じ変化をすることを意味する。もっとも60 sec以下の評価時間では距離30~60 mまでの間に急激に相関が減少し、それ以上の距離では特

に大きく変化しないという傾向は共通して見られる。一方、逆に陸側から風の吹いている Run 28-2-7 の場合には評価時間による影響はあまり見られず、はっきりと評価時間による相関の違いが見られるのは近い距離においてのみである。距離が大きくなると評価時間の長さにかかわらず 1.5 sec の場合と同様ほとんど零に近い相関を示し、評価時間を 10 min にしてもこの傾向は変わらない。このことはたとえ観測時間を長くして 10 min 毎の平均風速をとっても、その時間変化はこの程度の距離離れている範囲においても、一点だけでは必ずしも全ての場合について代表できるものではないということを示す点において興味深い。参考のために Fig. 9 には今回解析した 3 つの場合について、10 分間平均風速の時間変化を測線上の 25 点の全てについてプロットしてみたものを示す。この図を見ても Run 28-2 の場合は特に相関が悪いことがうかがえるが、それと共に他の 2 つに比べて風速の時間変化が比較的小さい。10 min というような長い評価時間の風速の変動は比較的大きな規模の要因によって支配され、ここで見られるように 200 m ぐらいの距離でその相関が零に近くなるということは考え難いことであると言わざるをえない。更に多くの観測例を集積した上で解析を進めたい。

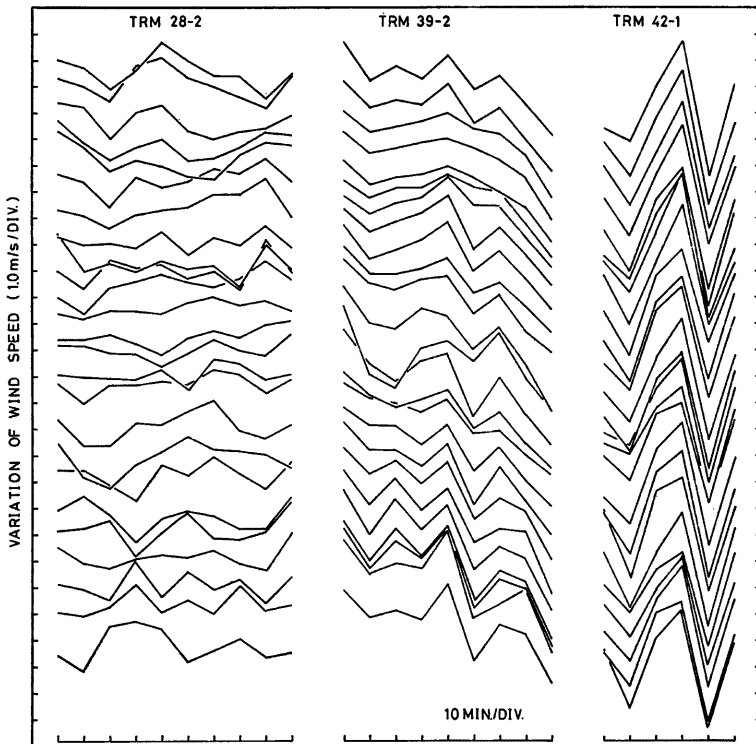


Fig. 9. Time variations of 10-min mean wind speed obtained from 25 anemometers.

6. 水平方向の時空間相関関数

先に述べた空間相関関数は同時刻における 2 点間の風速変動の相関をとったものであるが、これに時間遅れ

を加えた (5), (6) 式で示したような時空間相関関数について調べてみた。Fig. 10 に示したものは風向が測線に平行な場合, Run 39-2-5 の時空間相関関数の一例で測線の両端近くの 2 つずつの組合せをとったものである。風向方向と測線方向が一致しているこの場合には Taylor の frozen eddy の仮説が検証できる。風下側では風上側に比べて当然のことながら位相は遅れてくるが, この位相の遅れ, つまり時空間相関係数が最大を示す time lag の位置が風速から推定できるはずである。Fig. 10 に示したケースでは若い番号の側が風下側に当たるので常に遅れており, 距離が大きくなるにつれてどちら向きにもピークの位置が少しずつずれてゆく傾向は見られるが必ずしも距離に比例しているとは言えない。しかし, 30 m 離れた 2 点間の相関の最大の位置は +1.8 sec と -2.0 sec であり, これから逆に渦の輸送速度を求めると 15~16 m/s となる。一方, この時の平均風速は 18 m/s であった。また 60 m 離れた 2 点での相関の最大は +3.0 sec と -7.5 sec で起きている。

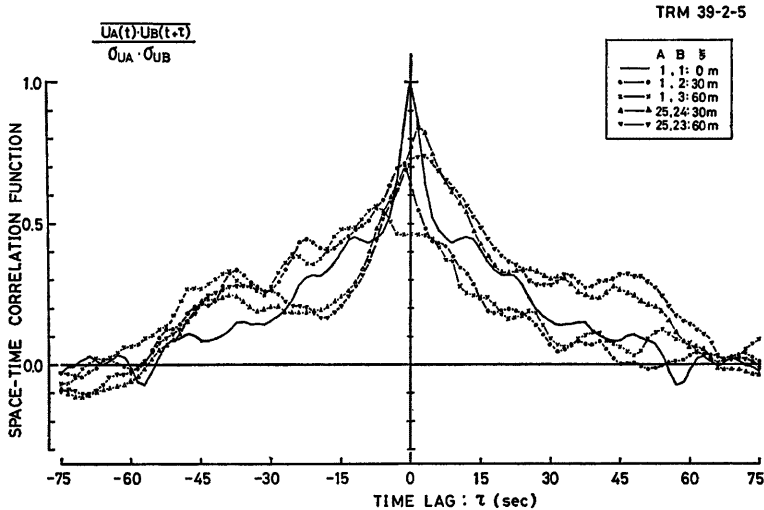


Fig. 10. Space-time correlation functions for two kinds of horizontal separation distances as functions of the time lag.

塩谷ら⁹⁾はいくつかの測定結果から風向方向と測線方向が角度 θ をなす場合, 相関関数の値が最大となる time lag, τ_m は次のように表わせるとしている。

$$\tau_m = l \cdot \cos \theta / (0.8 \bar{U}) \quad (15)$$

ここで l は 2 点間の距離である。Fig. 10 に示したケースでは $\theta = 0^\circ$ であるので先に述べた距離 30 m における τ_m と $\bar{U}$ の関係はほぼ (15) 式を満足するものと考えられる。しかし, 渦の輸送速度は平均風速にほぼ等しいという岩谷ら⁹⁾の報告もあり Lagrange 相関を求めることと共に今後更に検討を要する問題である。

7. 鉛直方向の時空間相関関数

水平方向の時空間相関関数については (5), (6) 式のように表わせるが, 同様に鉛直方向の時空間相関関数も次のように表わせる。

$$R_z(\zeta, \tau) = \frac{\overline{u_{z1}(t) \cdot u_{z1}(t+\tau)}}{\sigma_{u_{z1}} \cdot \sigma_{u_{z1}}} \quad (16)$$

ここでは鉛直距離を示す。まず, time lag, $\tau=0$ の鉛直方向の空間相関関数は水平方向のように二点間の距離のみによって一意的に決まるというわけではなく, 各々の測定高度自体も問題となってくる。Panofsky and Singer⁷⁾ は種々の測定結果から2点 Z_1 と Z_2 ($Z_2 > Z_1$) における time lag=0 の鉛直方向の空間相関関数を次のように表わせるとした。

$$R_Z(\zeta, 0) = \exp \{-C \cdot (Z_2^{1/3} - Z_1^{1/3})\} \quad (17)$$

ここで C は実験的に求まる定数で0.5とされている。また鉛直方向には風速のシアがあるために上層と下層で位相のずれが起こり一般には上層の方が位相が早い。そのために相関が最大となるには時間的な遅れを生じ, この遅れ, $\tau_{\max}$ は塩谷⁸⁾ によれば次のように表わせる。

$$\tau_{\max} = 3.0 (Z_2^{1/3} - Z_1^{1/3})^{3/2} \quad (18)$$

Fig. 11 に示したものは鉛直方向の時空間相関関数の一例で高さ 15 m の風速を基準として他の4高度(50 m, 35 m, 25 m, 7 m) との組合せについて自己相関関数と共にプロットした。以上のことから予想されたとおり, 鉛直距離が大きくなるほど同時刻 (time lag=0) の相関の値は小さく, また相関のピークの phase lag も大きくなる。Table 2 に示したものは (17), (18) 式より予想される $R_Z(\zeta, 0)$ と $\tau_{\max}$ の値を Fig. 11 から得た値と比べたもので, 両者はほぼ合っていると見なすことができる。

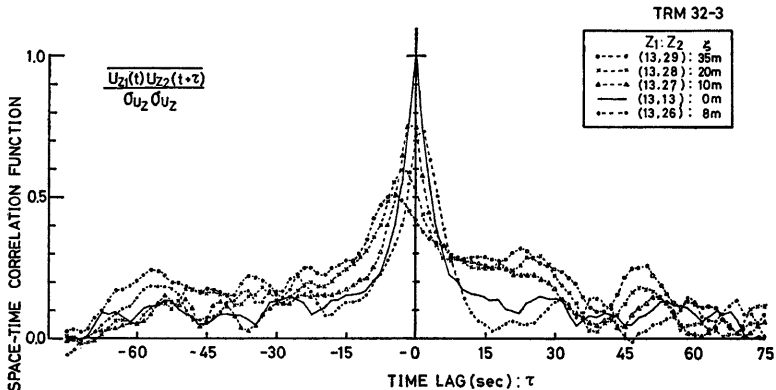


Fig. 11. Space-time correlation functions for various vertical separation distances as functions of the time lag.

Table 2. Vertical correlation function with no time lag and time lag at maximum correlation.

		50 m-15 m	35 m-15 m	25 m-15 m	15 m-7 m
$R_Z(\zeta, 0)$	observed	0.42	0.54	0.75	0.72
	calculated	0.55	0.67	0.80	0.76
$\tau_{\max}$ (sec)	observed	4.5	3.0	0.8	1.0
	calculated	4.0	2.2	0.9	1.2

8. 結 語

水平距離 720 m にわたる25台の風速計の同時記録を基にして風向が測線に平行な場合及び直角の場合について水平方向及び鉛直方向の空間相関解析を行った。風向が測線と平行な場合には空間相関関数は距離と共にゆるやかに減少し自己相関関数から frozen eddy の仮説を用いて求めた形もほぼこれに近いものになる。また, 時空間相関関数から求めたピークの位置のずれはほぼ $\tau_m = l/0.8 \bar{U}$ で表わせる。風向横方向の空

間相関関数については 30~60 m 以上ではほぼ距離によらず一定の値になることが見出せた。また風速の評価時間については長くとれば相関の値は当然のことながら大きくなるが、ある距離以上では相関が評価時間にかかわらず零となってしまう場合もある。鉛直方向の空間相関については従来用いられている表現を裏付けることができた。今後は更に強風時のデータも積み重ねてより普通的な乱流の空間構造の確立を目指したい。

本研究の一部は中央電力協議会によって設立され、現在電力中央研究所によつて維持されている台風研究委員会の作業の一環として行われたものである。

参 考 文 献

- 1) 光田 寧・加藤晶子：風速の空間的および時間的変動の性質について，京都大学防災研究所年報，第 16 号 B, 1973, pp. 293-304.
- 2) 光田 寧・藤谷徳之助・加藤晶子：評価時間と評価距離を考慮した突風率の表現について，京都大学防災研究所年報，第 17 号 B, 1974 pp. 219-225.
- 3) 井上栄一：地表風の構造，農業技術研究所報告 A 第 2 号，1952.
- 4) Iwatani, Y.: Lateral Space Correlation and Spectrum of Turbulent Velocity in High Wind Condition, (to be published).
- 5) Shiotani, M. and Y. Iwatani: Horizontal Space Correlations of Velocity Fluctuations during Strong Winds, J. Met. Soc. Japan, Vol. 54, No. 1, 1976, pp. 59-66.
- 6) 岩谷祥美・塩谷正雄・黒羽隼夫：大気乱流の風向に沿った方向の空間的性質について，日本大学生産工学部報告，第 9 巻，第 2 号，1976. pp. 121-126.
- 7) Panofsky, H. A. and I. A. Singer: Vertical Structure of Turbulence, Quart. J. Roy. Met. Soc., Vol. 91, No. 389, 1965, pp. 339-344.
- 8) Shiotani, M.: Turbulence Measurements at the Sea Coast during High Winds, J. Met. Soc. Japan, Vol. 53, No. 5, 1975, pp. 340-354.