

風速の空間的および時間的変動の性質について

光 田 寧・加 藤 晶 子

ON THE NATURE OF THE SPACE AND TIME VARIATIONS OF WIND NEAR THE SURFACE

By Yasushi MITSUTA and Akiko Kato

Synopsis

The preliminary results of the observational study of the turbulent structure of storm winds at Tarama Isl., Okinawa are shown in this paper. The aim of the study is to clear the spacial structure of storm wind gust by the aid of 38 anemometers installed on the 27 masts. 24 masts of 15 m high and a center mast of 50 m high are aligned of the straight line of 720 m long. It is revealed from the analysis of two runs of moderate wind cases that the auto and/or space correlations observed at the same time are different appreciably to each other. The gust factor for various averaging time and distance are also shown.

1. は じ め に

従来、地表面近くの大気の乱れの空間的構造を解明するための実験的研究は、数多く行なわれてきたが、その大部分は、一点における風向風速の時間的変化の測定結果に基づいたものである。従ってこれらの研究においては、風速の時間的変化から、風向方向の風の乱れの空間的変動は推定することは出来ても、風向横方向の変動については、自然風の乱れの等方性の仮定に基づかないと議論が展開出来なかった。一方構造物の設計においても、壁面に直角にあたる突風の横方向の揺れが問題とされるが、従来はこれも、風速の時間的変動の観測から求めた突風率を用いて、その空間分布を推定してきた。このように風向横方向の大気の乱れの性質を知るため、水平方向に距離を隔てた多点における風向風速の同時観測が要望されてきた。しかしながら、種々の困難から、今までに行なわれたこのような観測に基づく研究は、世界的にも数少なく、日本においても数例を数えるに過ぎない。

1972年秋に沖縄県多良間島に、台風時の強風の乱れの性質の観測を目的として、水平距離720mにわたって約30台の風向風速計を取り付けた、風向風速の同時観測施設が設置され、我々がその観測を担当することになった。1972年度には13例の観測記録が得られたが、これらはいずれも観測のねらいとした強風の場合のものではなく、風の弱いときのものばかりであった。今回は、その中では比較的強風であった2例について、試験的に解析を行ない、いくつかの興味ある知識が得られたのでここに紹介する。

2. 観測の設備および方法

観測施設の設置された多良間島は、沖縄県の宮古島と石垣島のちょうど中間に位置する東西約5km、南北約4km、面積約188km²のさんご礁の小島である。島の中心緯度は東経124度42分、北緯24度39分、この緯度は台北よりも南である。Fig. 1からもわかるように、島の大部分は海拔10m程度と平坦で、最高標高も32mと低い。観測施設は島の南西海岸から約500m入った地点(Fig. 1中直線A)にあり、ほぼ北西から南東の方向に水平距離720mにわたり、観測用ポールが設置されている。

この島における気象観測は今までに行なわれていないが、宮古島と石垣島における観測資料の統計によると、

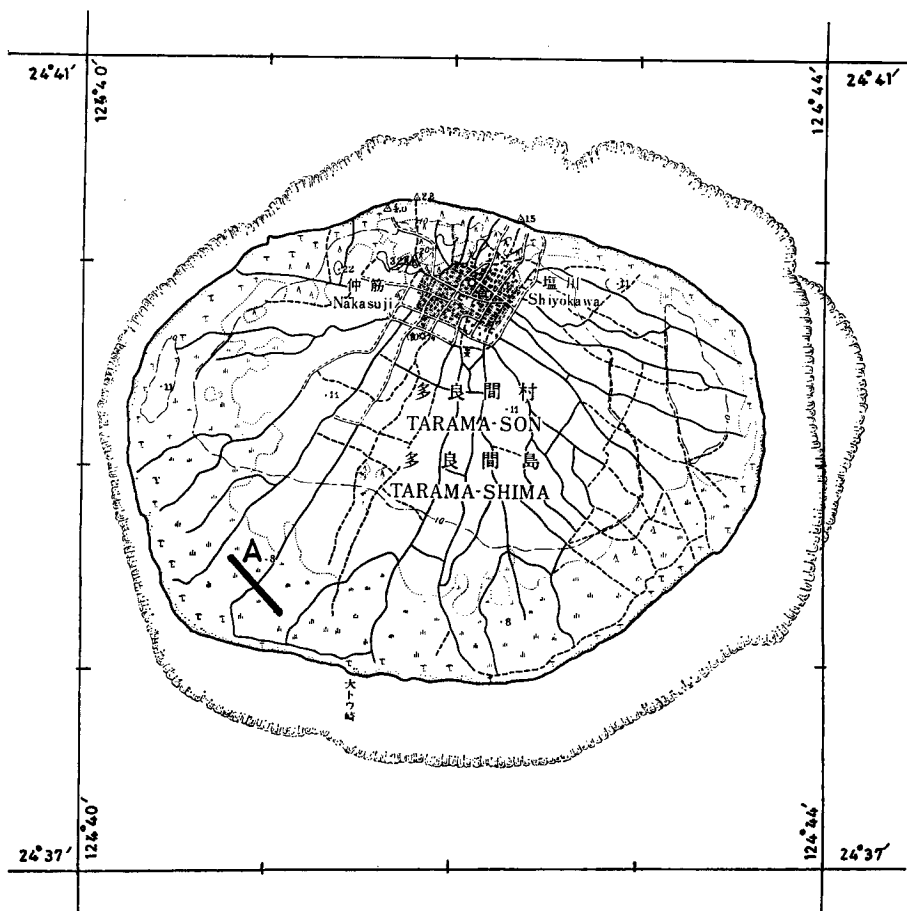


Fig. 1 Map of Tarama Island.

年平均 4 個の台風を中心 (中心気圧 990 mb 以下) が島から 300 km 以内の海域を通過することになり、強風の観測が期待される。しかも島がさんご礁より平坦であるために、地面付近の障害物の影響を受けない状態での、風の性質を知ることが出来るものと考えられる。

観測用ポールの配置は Fig. 2 に示すとおりである。北から 46 度 9 分西に傾いた長さ 720 m の測定線上に、30m おきに 25 基の観測用ポールが設置され、中央のポールから測定線に直角方向に、90m 離れた 2 点にもポールが設置されている。観測用ポールの高さは中央のポールのみが 50m で、他は 15m である。(Photo 1 参照) Fig. 2 中白丸で示した場所に風速測定用の気象庁型 3 杯式風速計が取り付けられ、黒丸で示した場所に風向風速測定用の気象庁型プロペラ式風向風速計が取り付けられている。なおここで選ばれた測定線の方角は、この島で最も出現頻度の高い風向と言われる向きに直角である。

これらの測器より得られる風向風速の信号の記録は、Fig. 3 に示すようにして気象データ集録装置の磁気テープにデジタル化して書き込まれる。この装置のデータのサンプリング周期は強風の解析を考慮して、250m sec になっているが、今回の解析においては、風速が観測のねらいとしたものより弱かったので、そのうちから 1.5 sec 毎にデータを選び出して用いた。なおこの集録装置は、常時観測用の風速計の風速があらかじめ任意に設定した基準風速を越えた場合に発せられる起動信号によって、自動的に起動し、無人の場合でも必要な時間だけの記録を取ることが出来るようになっている。この装置は発電装置とともに、近くの

[illegible]

Fig. 2 Arrangement of observing masts and anemoneters.



Photo. 1 Observing mast array.

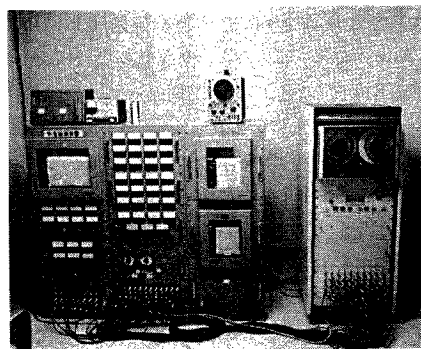


Photo. 2 Indicating panel and data acquisition system.

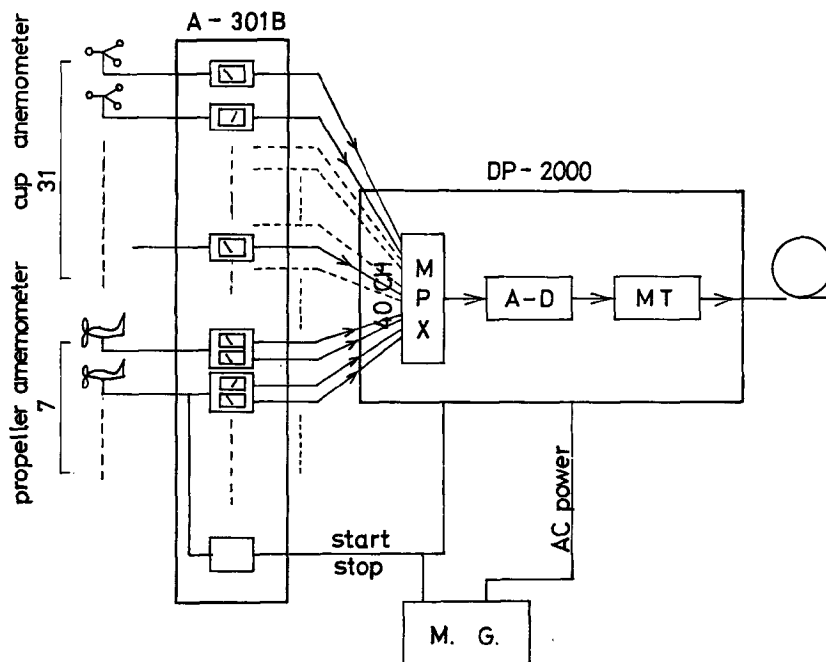


Fig. 3 Block-diagram of the observing system.

3. 時間平均風速と空間平均風速

今回解析を行なったのは、1972年10月3日から4日にかけて観測された寒冷前線通過後の北の季節風の吹き出しの際の記録である。この時の記録は全部で5 Run, 計約5時間分得られているが、そのうち Run 1 および Run 4 の2例を、各々最初の12分間について解析した。測定線上の高度15mにおける25点の測定点の12分間平均風速は、Fig. 4の右端に示すように、Run 1では8.2m/sec, その標準偏差は1.87m/sec, Run 4では7.5m/sec, 標準偏差は1.70m/secでRun 4の方が、風が弱かった。しかし乱れの強さはともに0.23で、両者が非常によく一致した。また平均風向は両Runとも、測定線の向きから約60度右にずれており、真風向に直すと北からやや東に寄った方向であった。

高度15mにおける測定線上の全測定点の風速を、1分間毎に平均してその時間変化を見ると、Fig. 4のようになる。Run 1, Run 4ともに時間変化は非常にゆるやかに平滑化されており、解析時間を通じて風速はほぼ定常であったと考

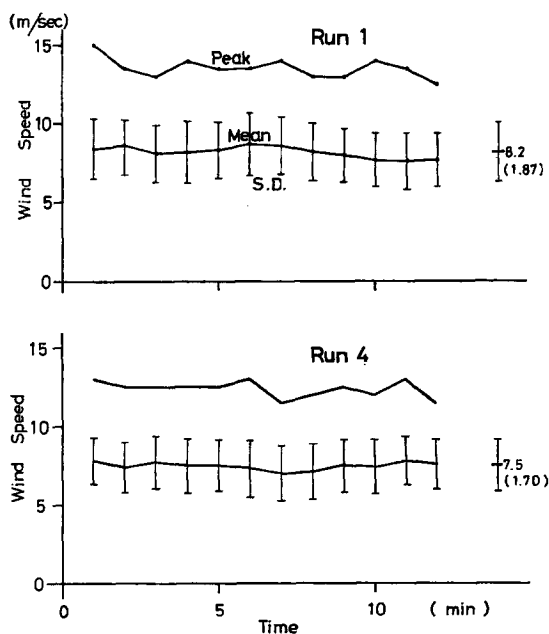


Fig. 4 Time variation of spacial mean wind speed.

えられる。この1分間空間平均風速の12分間の標準偏差をとってみると、Run 1 で 0.36m/sec, Run4 で 0.24m/sec であった。

次に高度15mの各測定点毎に、風速の12分間平均値を求め、その空間的変動の様子を示したのが Fig. 5 である。これには平均風速とともに、各測定点毎の評価時間1.5秒の最大瞬間風速も示している。Run 1 については、12分間の平均風速にかなりの空間的な差が現われており、その最大値 9.2m/sec と最小値 7.2m/sec の間には、2m/sec もの差がある。この差は、均質な確率母集団から任意に選出された標本によって作られた平均値に現われる差としては、大き過ぎるので、測定場所により、平均風速に有意の差があったものと考えざるを得ない。また、各点での最大瞬間風速の最大値と最小値の差は 4m/sec であった。一方 Run 4 の方は、その変動がゆるやかで Run 1 に比べると小さくなっており、12分間平均風速の最大値は 8.0m/sec, 最小値は 7.0m/sec でその差は Run 1 の2分の1の 1m/sec であり、最大瞬間風速の最大値と、最小値の差も 2m/sec とやはりこれも Run 1 の2分の1であった。各々の Run について、25個の12分間平均風速の標準偏差をとると Run 1 で 0.46m/sec, Run 4 で 0.32m/sec となり、空間変動についても Run 1 が Run 4 の1.4倍と大きくなっていることがわかる。この偏差を先に求めた1分間空間平均風速の時間変動の偏差と比較すると、2つの Run とも空間変動の方が大きく、時間変動の偏差の約1.3倍になっている。このことから風速の空間的な変動の方が、この程度の評価の範囲では時間的な変動よりも大きかったといえよう。しかし、Run 4 の平均風速の空間変動と時間変動の標準偏差は、ともに Run 1 の時間変化の標準偏差より小さく、平均値でみる限りでは、Run 4 の場合の方が、より一様かつ定常に近かったと考えてよいようである。Run 1 と Run 4 の場合に現われた相違は、平均風速の差が原因であるかもしれないが、2例からだけでは即断は下されない。いづれにしても場合によっては、その乱れの性質がかなり異なっているらしいことは言えよう。

高さ50mの観測用ポールにおいては、5高度で風速が測定出来るので、風速の鉛直分布を調べることが出

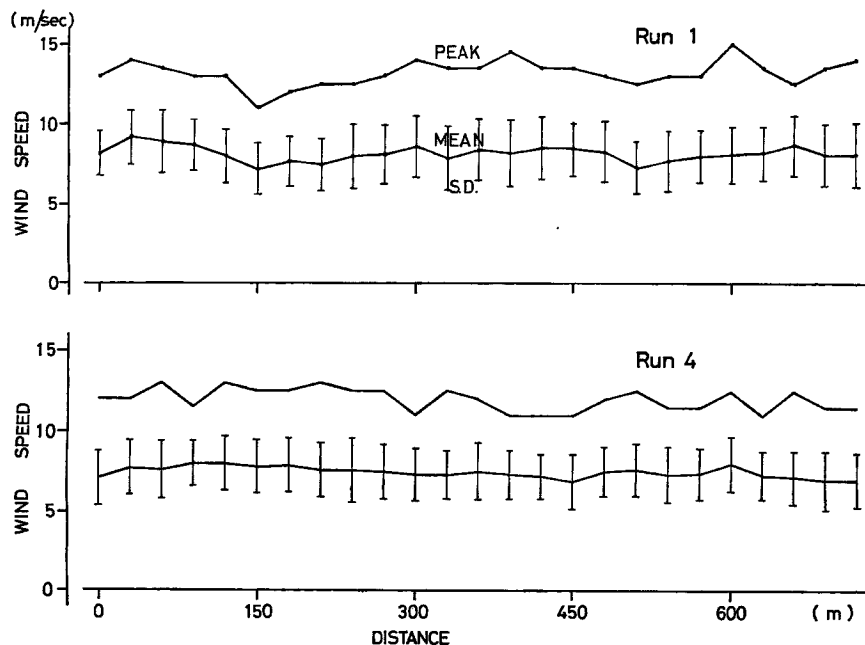


Fig. 5 Spatial variation of time mean wind speed. Distance is measured from the northwestern end of the array.

来る。12分間平均風速から、風速の鉛直分布を求めた結果を示すのが Fig. 6 である。風速の鉛直分布は高度のべき乗に比例するとして、直線を引いて傾きを求めると、Run 1 で 0.27, Run 4 では 0.31 であり、このように平坦な地表面上で予想された傾き¹⁾よりは、やや大きな値が出た。この図では、Run 1 と Run 4 で風速の鉛直分布の形が非常によく似ており、7 m 高度の風速が少し大きく出ること等、同じような特色が現われている。この点についてはさらに多くの例について解析を行ない、検討を進めたい。

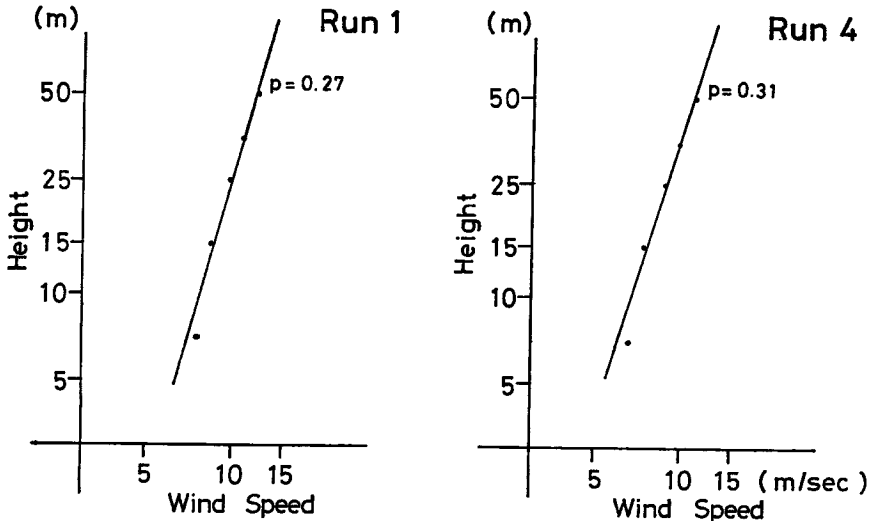


Fig. 6 Vertical profile of mean wind speed.

4. 自己相関係数

高度15mの25点の測定点の各々について、評価時間1.5秒毎の風速値から風速の自己相関係数を求め、25点についての値を一緒にして図にしたのが Figs. 7, 8 である。図からもわかるように、2つの Run とも各測点の自己相関を示す曲線は、実に様々な形をしており、隣接する2点の自己相関の形も決して類似していない場合も多い。またずらし時間15秒から30秒にかけては、各測点の相関値のばらつきが非常に大きく、特にこの傾向は Run 1 の場合に著しい。この2つの図からは系統的な傾向が把握しにくいので、これら25点の相関係数をずらし時間ごとに平均して、その標準偏差とともに示すと Figs. 9, 10 のようになる。平均値をとってみると曲線はゆるやかに減少し、その上に周期20秒程度の波が乗っている様子が現われてきた。標準偏差は0.1程度であるが、Run 1 のずらし時間15秒から45秒にかけては、約0.15の大きな値を示している。Run 1 ではずらし時間75秒までに相関係数は0にはならないが、ほぼ0に近づいたとして積分を行なって乱れの積分スケールを求めると、図中長方形で示すように15秒になる。この値に平均風速をかけて長さのスケールに換算すると約123 m となる。これが風向方向の風の乱れのスケールを示すものと考えられる。Run 4 については、ずらし時間48秒付近で相関値は0になり、それ以上のずらし時間では、0を中心に波状の変化が見られた。乱れの積分スケールは約10秒であり、これに平均風速をかけて長さのスケールに換算すると約77 m になる。このスケールは Run 1 のスケールの約3分の2である。なおこれらのスケールの値は、今までに塩谷ら²⁾が行なった研究で求められている値と大差はない。

以上のように均一な地面条件の下で測定されたにもかかわらず、各測定点で同時に求めた個々の自己相関関数の形の相違が、予想外に大きいことが示されたが、これは風の乱れの性質を、ただ一点のみでの風速変動の解析から推定してきた従来の方法に、大きな問題を投げかける事実であろう。各点での風速のスペクトルの形も当然、非常に様々な形をなすであろう。この点については、現在解析を進めつつある。

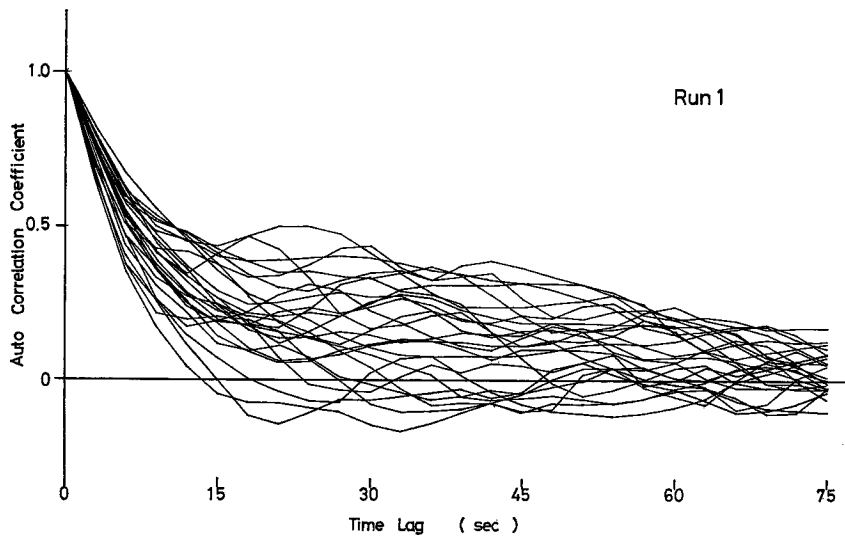


Fig. 7 Auto correlations of wind speed fluctuations observed at 25 measuring points at 15 m high for Run 1.

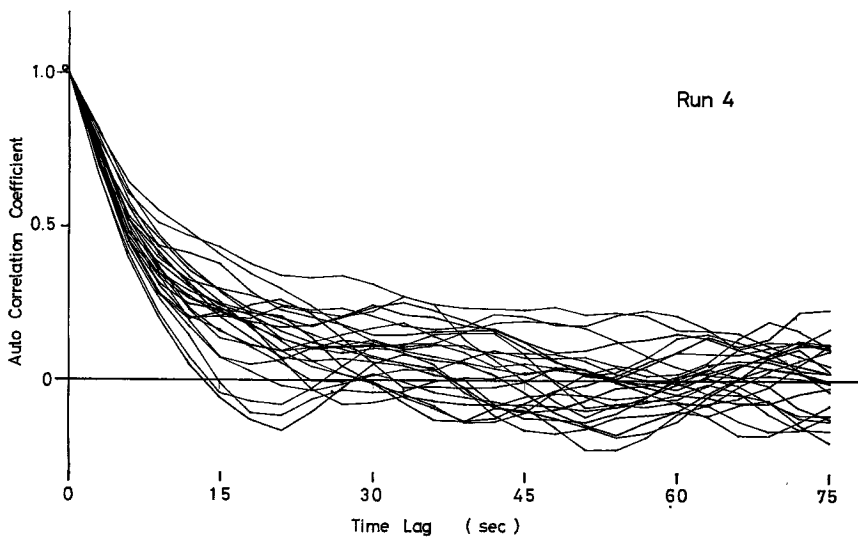


Fig. 8 Same as Fig. 7 except for Run 4.

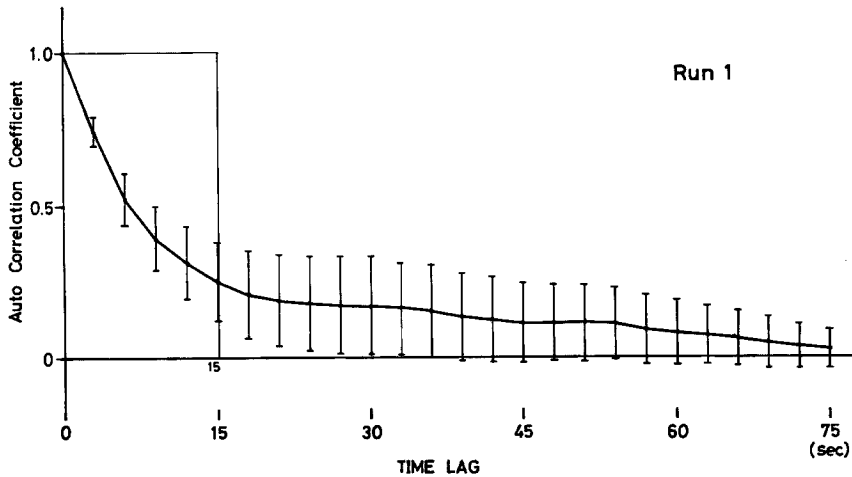


Fig. 9 Averaged auto correlation function with rms values and the integral scale of turbulence for Run 1.

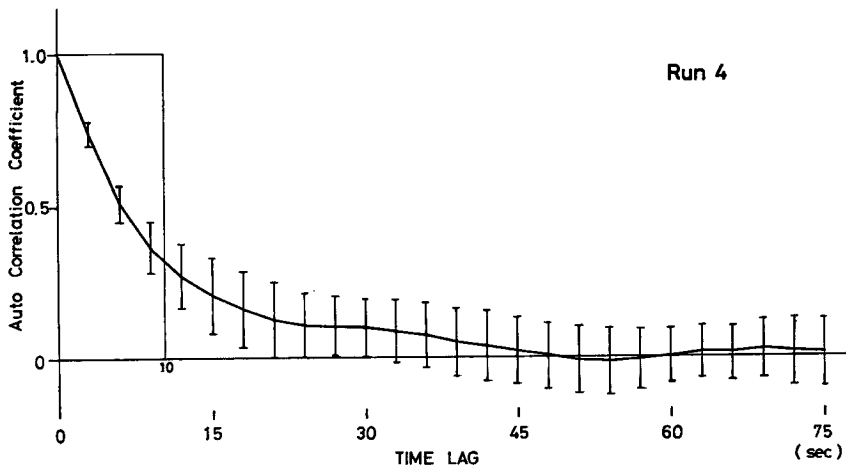


Fig. 10 Same as Fig. 9 except for Run 4.

5. 空間相関係数

高度15mで測定された評価時間1.5秒の風速値から求めた、各々の測定点間の風速の空間相関を示すのが、Figs. 11, 12である。これらの図から、各々の測定について求めた風速の空間相関係数も、のこぎり型の複雑な変化をしており、決してなめらかには変化していないことでわかる。また相関係数のばらつきも非常に大きく、特にこの傾向は、自己相関の場合と同じく Run 1 で顕著である。これらもまた、系統的な変化を見るため、各距離毎の相関係数を平均して、標準偏差とともに表わすと Figs. 13, 14 のようになる。この結果、2つの Run について、ともに0を中心にした波長150~200mの波状変化が認められた。Run 1 については、120m付近で相関係数は0になり、この距離までで乱れの積分スケールを求めると、図中長方形で示すように約25mになる。このスケールは、測定線の方角、すなわち風向と約60度の角度をなす方向の乱れのスケールと考えられる。これを先に求めた風向方向の乱れのスケールと比較すると、その約5分の1になる。

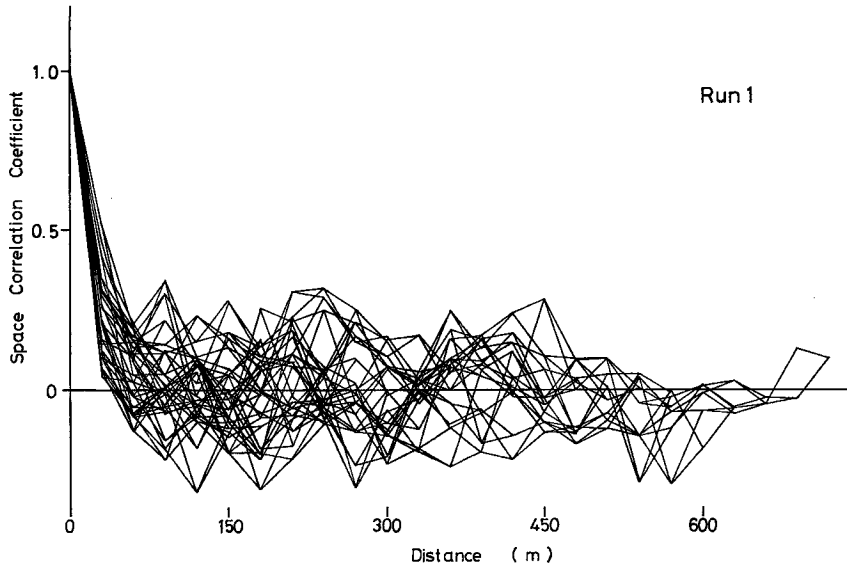


Fig. 11 Space correlations of wind speed fluctuations observed at 15 m high for Run 1.

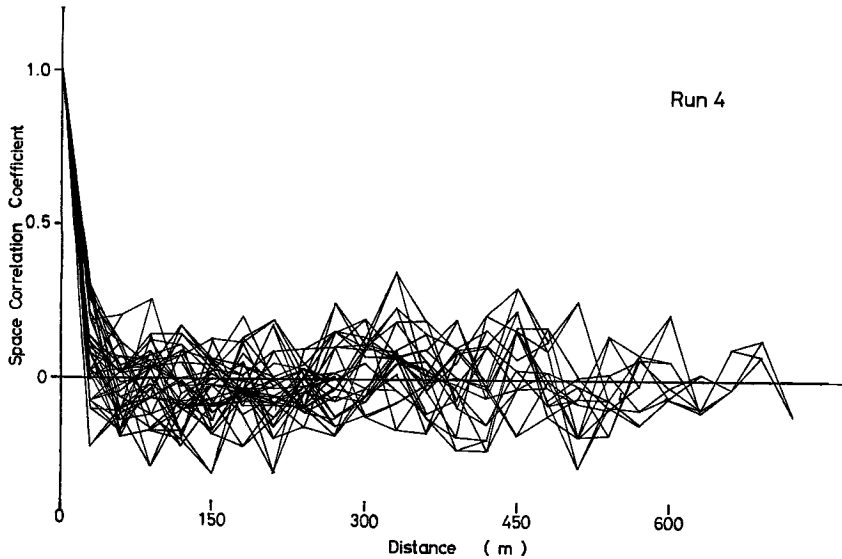


Fig. 12 Same as Fig. 11 except for Run 4.

一方 Run 4 では、相関係数の平均値は 60m で負になるが、個々の値としては 30m の距離でも負の値になるものもある。乱れの積分スケールは 18m となり、風向方向のスケールと比較すると、その約 4 分の 1 である。

風向方向と風速横方向の乱れのスケールの各々を、Run 1 と Run 4 とで比較してみると、両者とも平均風速がやや大きかった Run 1 の方が大きくなっており、その比は両スケールともほぼ 3 : 2 程度になる。しかし両方向のスケールの比については 2 つの Run についてともに大差はなく、風の乱れのスケールは風向方向に長く延びて、風向横方向のスケールの 4 ないし 5 倍近くになっているという結果が得られた。この比

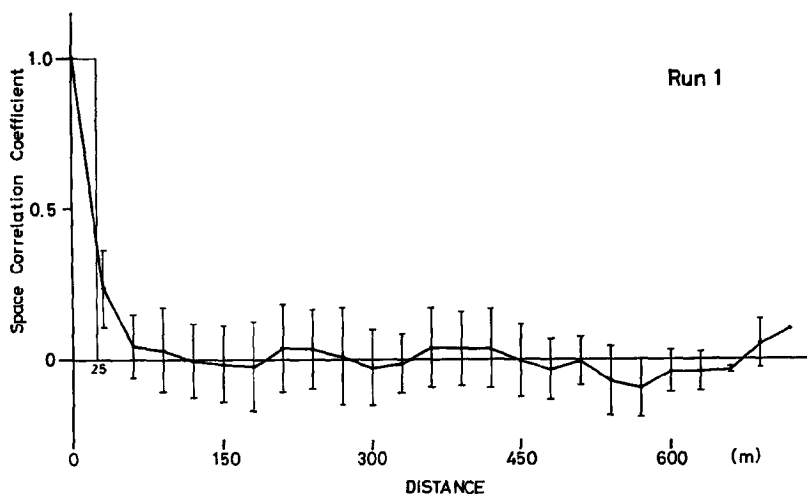


Fig. 13 Averaged space correlation function with rms values and the integral scale of turbulence for Run 1.

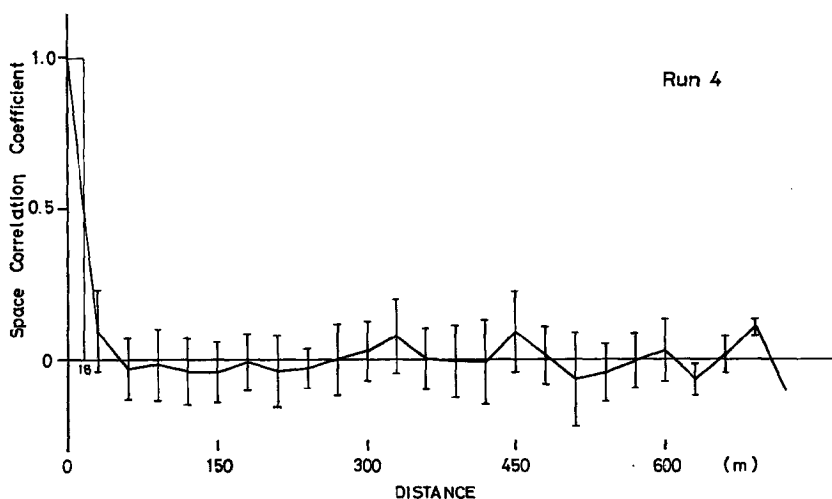


Fig. 14 Same as Fig. 13 except for Run 4.

も、塩谷らが四国の里浦での観測から得た²⁾結果と、ほぼ一致する。

以上のように自己相関、空間相関とも、平均値について検討してきたが、Figs. 7, 8, 11, 12 に示したように各々の測点における自己相関係数の変化は、それぞれ異なり、空間相関係数の変化は非常に複雑であって、風の場の空間的な様相の複雑さは予想を越えるものであった。これらのことから、今回観測を行なったような平坦な場においても、解析を行なった程度の時間については、風の乱れの性質の空間的な一様性を仮定することが、困難であることが示されたといえよう。

6. 突 風 率

Run 1 について、評価時間 1.5 秒間隔で得られた、高度 15m における 25 点の風速値から、2 種類の方法で突風率を求めてみた。一つは従来から行なわれてきたように、突風率を 1 点での最大瞬間風速から求め、評価時間の関数として表わすものである。この関数は実験的に次のようになることが知られている³⁾。

$$G = \left(\frac{S}{D} \right)^{-p} \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで G は突風率、 S は最大瞬間風速の評価時間、 D と p は実験的に決定される定数で、 D は平均風速の平均時間に相当する。Fig. 15 はこの関係を表わした図で、対数座標で示されている。突風率の評価時間に対する変化はほぼ図中の直線上に分布し、(1)式で近似出来ることを示している。そして指数 p は 0.091 になる。これは他の場所で得られた値³⁾と大差ない。こうして求めた突風率から風向方向の突風の広がりか推定出来る。すなわち評価時間に平均風速をかけることにより、突風率が、風向方向の評価距離の関数として得られるからである。このようにして得られた直線が、Fig. 16 中の破線で示されている。

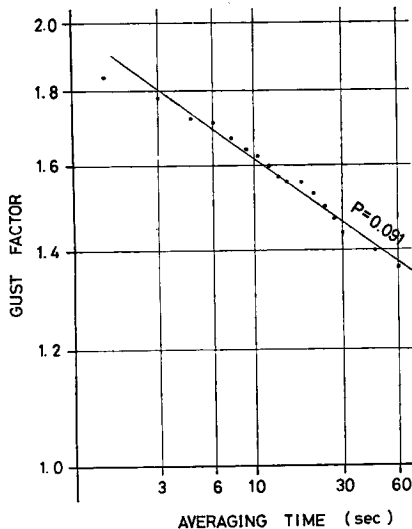


Fig. 15 Gust factor as the function of averaging time.

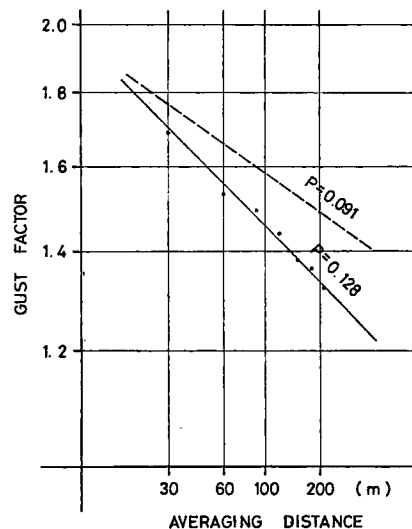


Fig. 16 Gust factor as the function of averaging distance. Solid line shows the observed lateral gust factor and broken line the longitudinal gust factor as derived from the results shown in Fig. 15.

一方、突風率を風向横方向の評価距離で平均した最大瞬間風速の関数として直接求めることが、今回の観測から可能である。今回測定した風向と、測定線のなす角度は60度であるから、その方向への突風の広がりが推定出来る。評価時間 1.5 秒の風速値を測定線方向の評価距離について平均した最大瞬間風速から求めた突風率を、評価距離の関数として示したのが Fig. 16 である。突風率はほぼ直線上に乗り、(1)式と類似の形で近似すると、べき指数 p は 0.128 となる。この図に示した風向方向の突風率と風向横方向の突風率を比較すると、風向方向の突風率の方が評価距離に対する減少が小さい。従って従来のように、風向方向の突風の広がりに適当な定数をかけて、風向横方向の広がりを推定することには⁴⁾、疑問が生じたことになる。今後は評価時間、評価距離をともに考慮した新しい突風率の関係を求めてゆく必要がある。この空間的に平均した最大瞬間風速の評価時間を、色々と変化させることにより、この種の知識を得ることが出来るものと期待出来る。

7. む す び

以上のように、今までに例をみない、水平方向に長い距離を隔てた多点における風速変動の同時観測の結果が、得られることになったが、まだ2例について試験的な解析がなされただけで、結論を得るといへるまでには至っていない。それでも種々の興味ある現象が見つかった。これらを基礎にしてさらに詳しい解析を進めれば、新しい知識が得られるとともに、従来からの解析方法に多くの問題点が指摘されるであろう。

この研究は、台風研究委員会（委員長 七里義雄）のもとで行なわれているものである。困難な状況のもとで、この観測施設を完成された、関係者各位の努力に敬意を表するとともにその資料の利用を許可して頂いた同委員会に感謝する。

参 考 文 献

- 1) Davenport, A. G.: Tall Buildings, Pergamon Press, London, 1966, pp. 3-44.
- 2) Shiotani, M. and H. Arai: Wind Effects on Buildings and Structures, Vol. 1, University of Toronto Press, 1967, pp. 535-555.
- 3) Mitsuta, Y.: Gust Factor and Analysis Time of Gust, J. of Met. Soc. of Japan, Ser. II, Vol. 40, No. 4, 1962, pp. 242-244.
- 4) 石崎澄雄・光田 寧: 強風時における突風の揺れりと突風率について, 京都大学防災研究所年報, 第5号A, 昭37. 3, pp. 135-138.