

突風前線の観測について（その2）

石崎 潑雄・光田 寧・林 泰一

ON THE OBSERVATION OF GUST FRONT II

Hatsuo ISHIZAKI, Yasushi MITSUTA and Taichi HAYASHI

Synopsis

Field observation on the structure of the gust front is performed at Shionomisaki since 1980. The phenomena of the gust front can be detected by the array of three cup anemometers when the averaging time to estimate the wind speed is larger than 1.5 sec if the wind speed is over 10 m/s. The results obtained in the case of 13 m/s mean wind speed are as follows,

- 1) The gust front has a spatial expanse 20–30 m wide in lateral wind direction.
- 2) The gust front exists in front of a strong wind region, where the horizontal gradient of wind speed in the mean wind direction is 0.36 (m/s)/m the maximum.
- 3) The gust front changes its own shape in moving down to the leeward and the moving speed is not necessarily equal to the mean wind speed along the gust front path.

1. はじめに

昭和54年度から、潮岬風力実験所では、接地境界層内の非定常な風のふるまい、特に突風前線といわれる風速が急に増加する現象についての研究を進めてきた。観測網の配置などの観測の詳細についてはすでに報告したとおりである¹⁾²⁾。今回は、昨年12月より、観測網の中の一点に3次元超音波風速計を取付けたので、その解析例を中心として報告する。1980年12月24日16時35分から17時05分にかけての季節風の吹出しの場合の例で、風向は西北西である。3次元超音波風速計による測定を開始したことによって、今までのスカラー的な風速だけでなく、風速の3成分をベクトルの的に測定できるようになった。また、3杯風速計よりも、はるかに細かい風速変動にまで追従できるため、3杯風速計によって測定した風速と比較すればこの3杯風速計で測定できる現象の時間スケールを決定することできる。風速の3成分を測定しているので、運動量輸送を評価し、突風前線の通過の際に運動量がどのように輸送されているかを調べてみれば、突風前線の維持機構についても何らかの手がかりがつかめるかもしれない。

ところで、この観測は、突風前線を観測し、その機構を解明していくことが主目的であるが、観測網として平面的に観測点の配置をとったので、水平2次元の相関をとることができる。この観測網を利用して得られた風速の時空間相関解析結果についてもあわせて報告する。

2. 風速場の統計的性質

突風前線という間欠的に発生する現象を調べる前に、今回の解析例の風速場の性質について、予め調べてみた。風速場の性質を記述するためには、従来から利用されてきた統計的方法を用いた。**Table 1** には、31の観測点の3杯風速計で測定した風速の統計量を示した。各観測点における平均風速が12~13 m/sであるので、風速計の特性を考慮して、風速の評価時間は1.5秒とした。平均化時間を30分ぐらいとったとしても、同一高度の観測点(1~28)によってかなりの差がある。しかし、乱れの強さは、すべての観測点で0.20前後であり、この風速場の平均的な乱れの程度は一様とみてよい。平均すると Skewness は 0.16, Kurtosis

は、2.71であり、風速の頻度分布の山は、平均風速より小さい風速の方へずれ、正規分布よりは平坦である。

Table 2 には、風速の時間微分の統計量を示す。時間微分を計算する際の時間間隔は、風速の評価時間と同じ1.5秒である。この時間微分の平均値は、当然ながら、どの観測点でも 0 m/s^2 である。標準偏差は、観測点によって大きな差はない。Skewness はすべての観測点で正の値をとるが、値は大きくばらついている。平均値は0.46で、頻度分布の山は、時間微分の値が負の方へかたよる。Kurtosis は、ほとんどの場所で3.0を越えて平均的には、3.4であり正規分布よりも尖った形をしている。

突風前線のような非定常な現象を観測するときには、風速計の風速変動に対する追従性が問題となってくる。風速が 10 m/s を越えるようなときには、3杯風速計によって測定した場合でも、評価時間を1.5秒以

Table 1. Statistics of wind speed measured by three cup anemometers.

観測地点	平 均	標準偏差	乱れの強さ	最 大	最 小	Skewness	Kurtosis
	m/s	m/s		m/s	m/s		
1	13.0	2.5	0.20	21.0	5.8	0.04	2.53
2	12.7	2.6	0.21	19.8	6.7	0.16	2.64
3	12.8	2.5	0.20	20.7	6.2	-0.07	2.73
4	11.7	2.5	0.21	20.7	6.0	0.43	3.02
5	11.9	2.6	0.22	19.3	5.5	0.15	2.65
6	12.4	2.3	0.19	19.5	6.0	-0.03	2.61
7	12.8	2.8	0.22	22.0	6.5	0.22	2.54
8	12.4	2.6	0.21	20.5	6.8	0.39	2.76
9	12.9	2.6	0.21	22.0	5.5	0.12	2.93
10	12.6	2.5	0.20	19.2	5.8	0.00	2.67
11	12.1	3.0	0.25	21.2	5.3	0.25	2.45
12	12.8	2.5	0.20	20.0	7.0	0.36	2.64
13	12.8	2.5	0.20	21.5	6.3	0.17	2.98
14	11.8	2.5	0.21	20.0	5.5	0.15	2.78
15	13.4	2.4	0.18	22.2	7.5	0.04	2.68
16	11.9	2.5	0.21	20.2	5.5	0.18	2.85
17	12.9	2.5	0.19	19.7	7.2	0.30	2.56
18	13.4	2.6	0.19	22.0	6.8	0.19	2.95
19	12.7	2.3	0.19	20.3	7.3	0.30	2.75
20	13.5	2.4	0.18	20.3	6.8	-0.02	2.69
21	12.6	2.5	0.20	20.7	7.0	0.25	2.90
22	13.1	2.4	0.18	20.0	7.2	0.15	2.72
23	13.3	2.6	0.19	20.7	6.3	0.17	2.96
24	12.5	2.5	0.20	19.3	6.2	0.29	2.43
25	13.7	2.5	0.18	20.8	7.7	-0.01	2.54
26	13.5	2.6	0.19	21.3	6.7	0.15	2.74
27	13.1	2.4	0.18	19.7	7.2	0.19	2.76
28	13.3	2.5	0.19	21.0	7.2	0.13	2.68
29	14.9	2.5	0.17	22.7	8.7	0.11	2.69
30	14.7	3.1	0.21	22.8	6.5	0.16	2.59
31	16.4	2.8	0.17	24.6	9.0	0.11	2.64
1~28 の平均	12.7	2.5	0.20			0.16	2.71

上にとれば、その時間スケールの風速の増減には追従すると言われている³⁾。ここでは、3杯風速計に比べて、風速変動に対する追従のよい超音波風速計で測定した風速の統計量と比較してみた。Fig. 1 には、3杯風速計と超音波風速計で測定した風速と時間微分の標準偏差、Skewness, Kurtosis について、いろいろな評価時間の風速について計算したものを示す。風速の標準偏差は、評価時間が増加するにつれて、両者の差は減少していく。評価時間が0.5秒のときには、3杯風速計で測定したものは、超音波風速計で測定したものの81%であり、評価時間1.5秒で90%、2.5秒、92%、5秒を越えると両者の間の差は数%にすぎない。Skewness は、超音波風速計で測定した方が、全般に小さくなる。Kurtosis については、10秒ぐらいまでの評価時間については、よく一致している。

Table 2. Statistics of time derivative of wind speed measured by three cup anemometers.

観測地点	平 均	標準偏差	最 大	最 小	Skewness	Kurtosis
	m/s ²	m/s ²	m/s ²	m/s ²		
1	0.00	1.20	5.78	-3.11	0.72	4.32
2	0.00	1.17	3.67	-3.67	0.30	3.25
3	0.00	1.14	3.67	-2.67	0.37	2.90
4	0.00	1.15	5.33	-3.00	0.42	3.75
5	0.00	1.23	5.00	-3.00	0.49	3.40
6	0.00	1.07	4.33	-2.33	0.51	3.39
7	0.00	1.24	4.22	-3.11	0.48	3.22
8	0.00	1.19	4.33	-3.11	0.55	3.61
9	-0.01	1.20	3.89	-3.56	0.31	3.01
10	-0.01	1.09	4.22	-2.67	0.57	3.60
11	0.01	1.29	4.67	-3.00	0.41	3.00
12	0.00	1.06	3.78	-3.00	0.39	3.41
13	0.00	1.13	3.33	-2.79	0.29	2.99
14	0.00	1.09	3.78	-2.78	0.49	3.24
15	0.00	1.10	4.67	-2.56	0.47	3.36
16	-0.01	1.12	4.44	-2.78	0.48	3.22
17	0.00	1.07	4.11	-2.89	0.48	3.41
18	0.01	1.15	4.00	-3.33	0.35	3.20
19	-0.01	1.04	4.22	-2.44	0.55	3.72
20	0.00	1.10	4.67	-2.67	0.55	3.39
21	-0.01	1.11	4.56	-2.56	0.66	3.78
22	0.01	1.06	4.67	-3.11	0.40	3.49
23	0.01	1.07	4.44	-2.67	0.46	3.50
24	0.00	1.08	4.33	-2.78	0.47	3.46
25	0.01	1.11	3.89	-2.67	0.51	3.00
26	0.01	1.15	4.33	-3.22	0.52	3.54
27	0.01	1.09	4.00	-2.67	0.44	3.30
28	0.01	1.14	4.44	-3.33	0.55	3.64
29	0.00	1.02	4.00	-2.56	0.49	3.40
30	-0.01	1.26	4.00	-3.33	0.10	2.82
31	0.01	1.20	5.11	-3.00	0.39	3.36
1~28 の平均	0.00	1.13			0.46	3.40

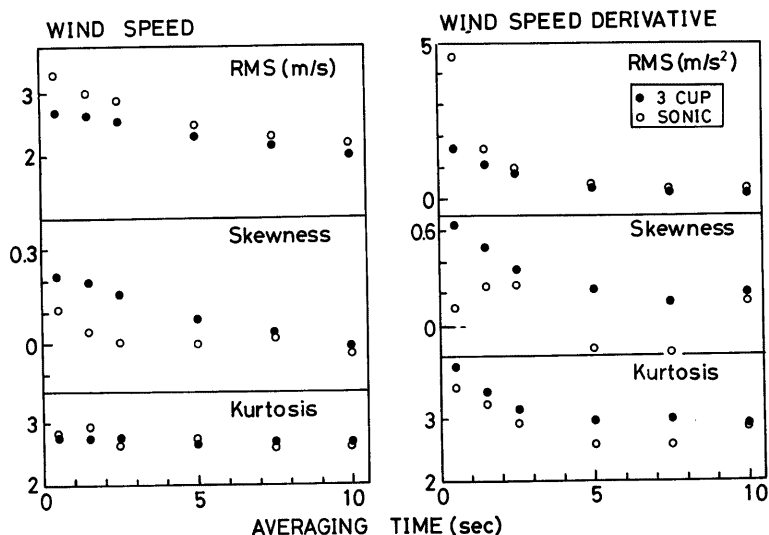


Fig. 1. Comparison of statistics of wind speed and its time derivative measured by three cup anemometers and a sonic anemometer. Dots are statistic values measured by three cup anemometers and circles are those by a sonic anemometer.

風速の時間微分の標準偏差は、評価時間が0.5秒のときには、3杯風速計で測定したものは、超音波風速計で測定したものの36%でしかない。1.5秒で71%、2.5秒でも、84%である。Skewnessは全体として、超音波風速計で測定したもののほうが小さくなる。3杯風速計で測定したものは、評価時間が大きくなると、Skewnessの値は単調に減少している。それに対して、超音波風速計で測定したものについては、評価時間を大きくして5.0、7.5秒のときには、負の値をとるようになり、10秒のときには再び正に戻るという変化をする。Kurtosisは、超音波風速計で測定した場合の方が全体として大きい。評価時間が大きくなれば、Kurtosisの値が小さくなる傾向は、両者に共通している。

評価時間が1.5秒以上であれば、三杯風速計と超音波風速計で測定した風速の標準偏差比は0.9以上である。風速の測定高度が、三杯風速計が8.25 m、超音波風速計が12 mであることを考慮すると、この比の値は大きくなると考えられる。即ち、評価時間を1.5秒以上にすれば、三杯風速計で測定しても、このぐらいの時間スケールの現象に対しては、同じぐらいの精度で風速の測定ができると推定できる。

3. 風速の時空間相関

高さ8.25 mの同一高度の28点の風速の自己相関係数の平均と標準偏差を示したのがFig. 2である。観測時間は10分間である。同一高度の風速についてだけの自己相関をとってみても、場所によって、その値は大きくばらついていて、自己相関係数が0付近の時間遅れのときにも、28地点の自己相関係数の標準偏差は0.08~0.09ぐらいの値をとる場合もある。28地点の平均値によって、この風速場の平均状態が示されるとすれば、自己相関係数の形は現在までに報告されているものと大きく異なっていない。積分スケールを求めるために、自己相関係数が最初に0となる時間遅れ28.5秒までを積分すると、時間の積分スケールは4.6秒になる。この観測時の平均風速（各観測点の10分間平均風速の空間平均）である13.1 m/sを考慮すると、風向方向の長さのスケールは58.8 mになる。

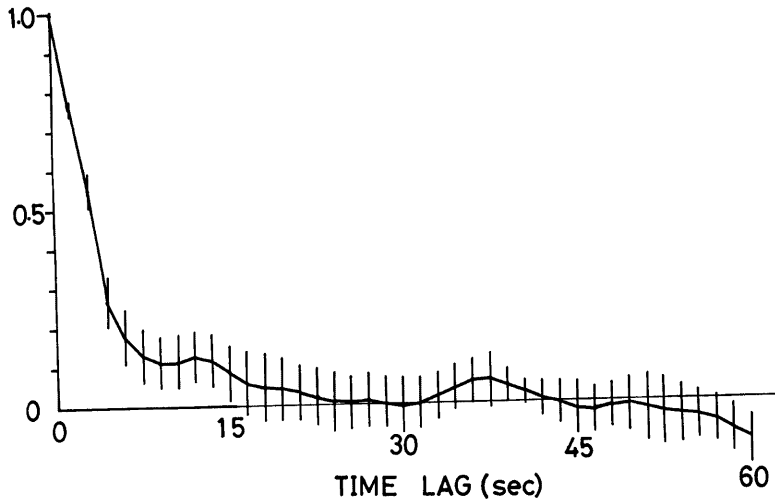


Fig. 2. The space average of auto correlation coefficient on 28 observation points at the height of 8.25 m.

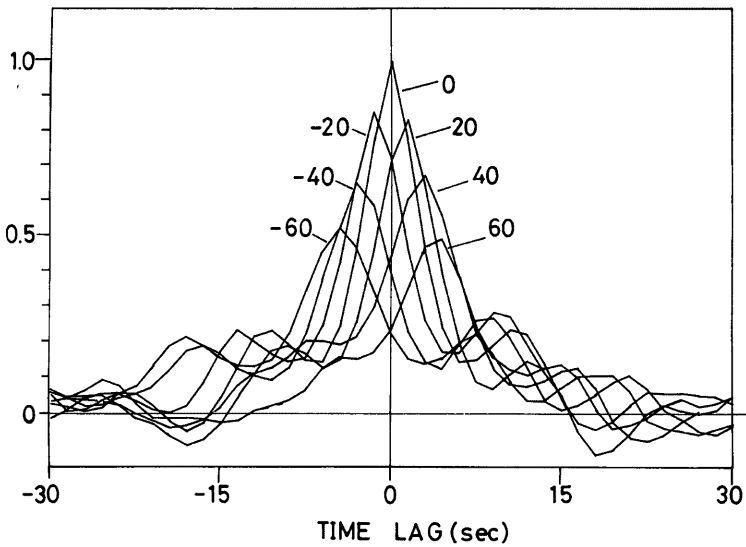


Fig. 3. The space-time correlation coefficient for various separation differences. The figures are space lags. (unit m)

相互相関はすべての観測点の組合せについて計算することは、計算時間の関係上、無理であるので、1つの固定点を決めて、その固定点と他の27の観測点との相関を求めてみることにした。固定点としては、観測網のほぼ中央の点をとった。Fig. 3 には、固定点を中心として、平均風方向に 20 m 間隔で並ぶ 7 つの観測点の時空間相関係数を示す。測線がほぼ風向と平行な向きであるので、当然のこととして、固定点より風上の観測点との組合せをとるときには、時間遅れが正のときに、風下の観測点との組合せのときには、時間遅れが負のときに、相関の山があらわれる。Taylor の凍結乱流の仮説 (Taylor's frozen turbulence hypothesis) が成立するとすれば、渦 (eddy) は、平均流によって流されていくので、時空間相関の山は、測線方向には、風速のその方向の取分で、風上から風下へと移動していくことが予想される。そこで、測線の両端の観測点間の距離 120 m と、相関の山があらわれる時間遅れの差 9.0 秒から、渦 (eddy) の移動速度を求めると、13.3 m/s となる。一方このときの平均風速は 13.1 m/s であり、測線と平均風向のなす角は 12° であるので、測線方向の風速成分は 12.8 m/s である。両者を比較すると、渦 (eddy) の移動速度の方がやや大きい、その差は僅か 4 % にすぎず、この程度の差であれば、Taylor の仮説は十分成立していると考えてもよいであろう。

相関係数の空間的な広がりを調べるために、固定点と他の27点の観測点との組合せをとった、時空間相関のうち、同一時刻 (時間遅れなし) の相関係数の値を、観測点の配置にあわせて示し、等値線を引いたのが、Fig. 4 である。図からわかるように、相関係数の等値線は、ほぼ楕円形をしている。その長軸の方向は相関係数の値によって異なっていて、必ずしも平均風向の向きとは一致しているとは限らない。もし風速場が均一 (homogeneous) で定常であり、かつ Taylor の仮説が取立するとすれば、相関係数の空間分布は、固定点を中心とする点対称になるはずである。この観測例で、相関係数の等値線は必ずしも点対称でないのは、観測時の流れの場が必ずしも均一ではなかったのではないかと思われる。この図から、風向方向と直交方向の積分スケールを求めると、それぞれ 33.5 m, 9.5 m であり、その比は 3.5 になる。Shiotani らは里浦において、一つの測線上に並ぶ観測点での風速の測定から、Taylor の仮説を仮定することによって、水平面内の同時刻の相関係数を求めた⁴⁾。この方法によって求めた等値線図では、相関の等値線は風向方向に伸

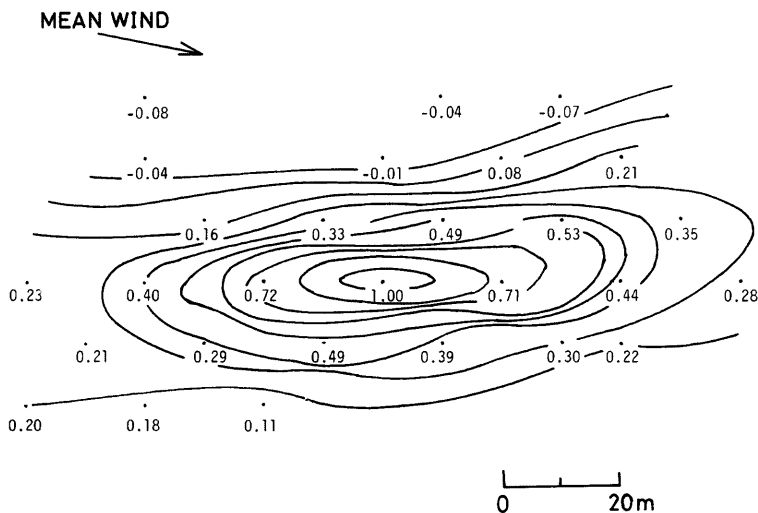


Fig. 4. The spatial pattern of correlation coefficients at the height of 8.25 m.

びた楕円形をしていて、長軸はほぼ風向と一致した向きである。縦方向の乱れのスケールの比は、2.5~4.0である。この里浦の観測では、測定高度が20 m, 40 mで、今回の潮岬での観測の場合よりもかなり高いため、縦方向と横方向のスケールは、共にはるかに大きい。縦横比は、ほぼ同程度の値である。

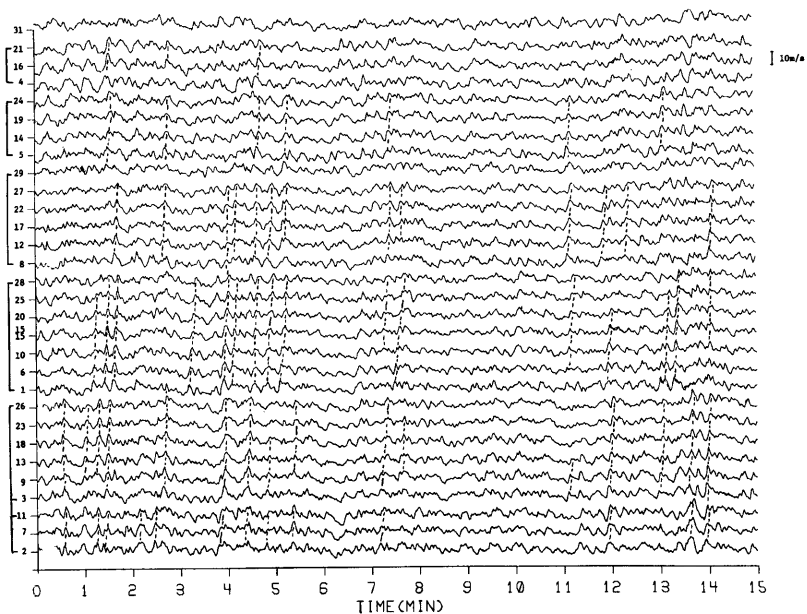


Fig. 5. Example traces of wind speed measured by three cup anemometers.

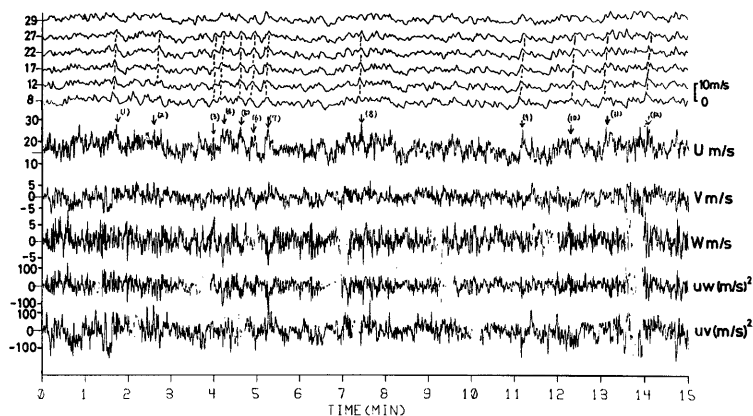
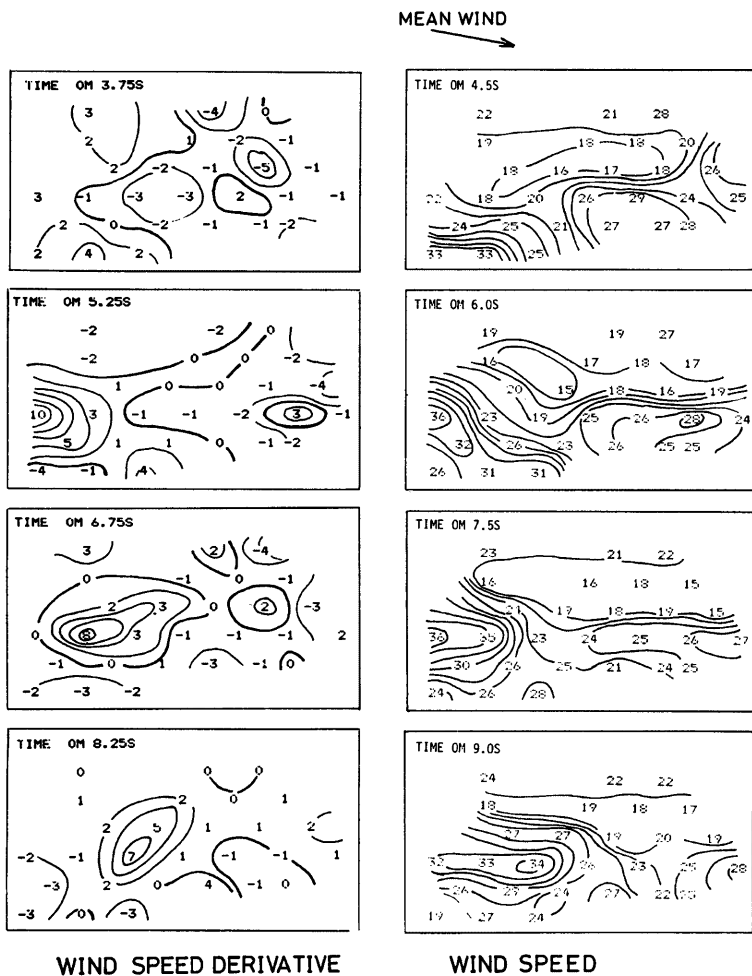


Fig. 6. Example traces of three components of wind velocity and momentum fluxes in vertical and horizontal directions.

4. 突風前線の存在とその性質

31点の観測点の風速のトレースを Fig. 5 に示す。このときは、風向が西北西であり、観測網の中で、ほぼ風向方向に並ぶ6本の測線がとれる。この測線に沿って観測点が風上から風下へと並ぶように示した。1つの測線上で風上が下、風下が上になる。ところどころに風速が急に増加する部分があり、それが測線に沿って風上から風下へと動いていく。それは、Fig. 5 の中で破線で示す部分である。風速の急に増加する部分は、1つの測線だけでなく、いくつかの測線にまたがっていて、風向横方向にも広がりをもっている。以前にも報告したとおり、これが突風前線である。



(a)

Fig. 6 には、超音波風速計で測定した風速の3成分のトレースと、その観測点を含むような測線上の6点の観測点の風速の記録をあわせて示す。突風前線の通過と考えられるところに矢印を付したが、超音波風速計で測定した風向方向の風速の記録にも、風速の急な増加が見られる。

Fig. 6 の、5分目と6分目の間にある No. 7 の場合について、風速とその時間微分の空間分布が時間的にどのように変化していくかを示したのが Fig. 7 である。観測点とはほぼ同じ配置で、風速と時間微分の値を示し、等値線を引いてみた。図中の数字は、実際の風速や時間微分の値の2倍の値である。単位は風速が m/s、時間微分が m/s^2 である。風向方向の風速の水平勾配が大きい領域が強風域の前面にあり、それが、1つの面をなして、平均風向方向に移動していくようすがよくわかる。これがまさに突風前線を視覚的にと

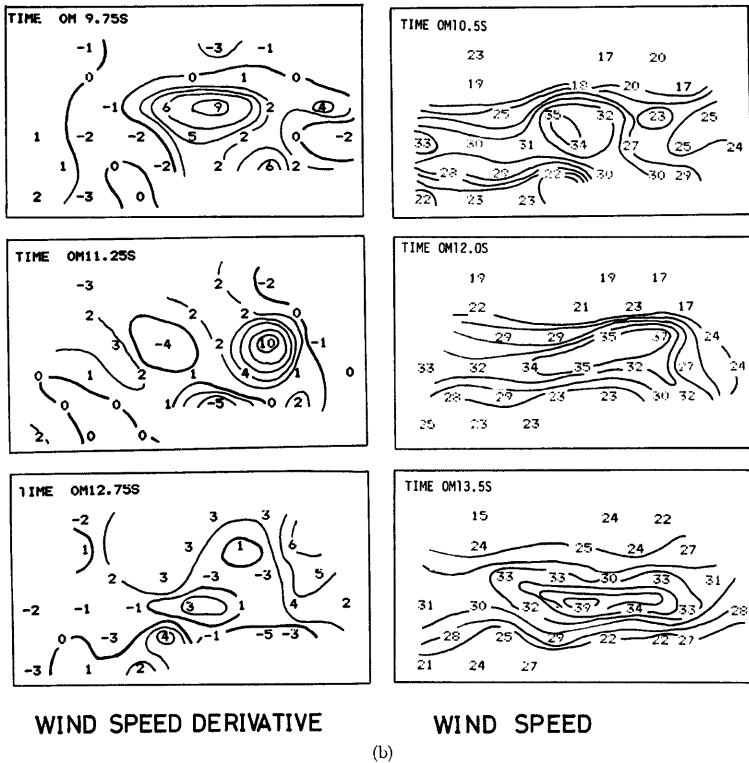


Fig. 7. Time series of instantaneous spatial distributions of wind speed and its time derivative in observation net work.

Table 3. Characteristics of gust fronts and following strong wind region.

No.	突 風 前 線					強 風 域		
	時間微分 の最大値 (m/s^2)	最大水平 勾 配 (m/s)/m)	移動速度 $U_G(\text{m/s})$	通過経路 に沿った 平均風速 $U_R(\text{m/s})$	U_G/U_R	最大風速 (m/s)	空 間 的 規 模	
							風向方向 (m)	直角方向 (m)
4	4	0.28	13.3	14.4	0.92	19.5	>100	30
5	3	0.23	13.3	14.1	0.94	19.0	100	30
7	5	0.33	13.3	14.6	0.91	18.5	>120	40
9	3	0.25	13.6	10.7	1.27	17.0	80	20
10	5	0.36	16.0	13.8	1.16	21.0	120	20

らえたものである。突風前線が通過すれば、当然、その観測点では、風速の時間微分も大きい値をとるはずで、突風前線に引続く強風域の中では、時間微分の、最早それほど大きな値はとらない。というのは、風速のトレースを見てもわかるように、強風域の前面で、風速は急激に増加する。一方強風域内ではある最大値に達すると減少しはじめるが、その減少のようすは、増加に比べるとはるかにゆるやかである。時間微分の空間分布を時間的に追っかけていけば、突風前線の大ききとか、移動のようすを追跡できる。風速の急に増加した部分の形は、風向方向には伸縮しながら、直交方向には20~30 mの幅で風下へと移動していく。このように移動に伴う変形のために、瞬間的な移動速度を求めるのはむづかしいが、移動した距離とそれに要した時間から平均移動速度を求めてみると16.0 m/sである。この観測例の時空間平均風速は14.6 m/sであり、移動速度の方が大きい。

同じような解析を、他の例についても行ない、突風前線とそれに続く強風域の性質についてもまとめたのが、Table 3である。解析した例は、Fig. 6で特に連続して突風前線が通過した4分目から6分目にかけてのNo. 4, 5, 7, 11分目頃のNo. 9, 12分目のNo. 10である。どの例でも、No. 7の場合と同じように、強風域の前面には、風向方向の水平勾配が極めて大きい部分が必ず存在している。またまた時間微分の空間分布からも、風速の急増部分は狭い領域を保ちながら風下へと移動していく。上記の5例について、突風前線が、観測網にはいつてから出ていくまでの間の、時間微分と風向方向の風速の水平勾配の最大値、風向及び直交方向の大きき、また突風前線に引続く強風域の大きき、最大風速などをまとめてみた。

突風前線の強さの指標と考えられる時間微分の最大値は、 5 m/s^2 に達する場合が2例あった。もう一つの強さの指標としては、風速の最大水平勾配は、 $0.36 (\text{m/s)/m}$ であり、わずか20 mの距離の間で7.2 m/sもの風速の急激な変化があったことを示している。

突風前線が、どのような速度で移動していくのかということは、興味深い問題であり、ここでは、風速との比較を行なった。時々刻々の風速の分布で、突風前線を含むような風向方向に並ぶ2つの観測点の風速を平均し、それらを、観測網にとらえられてから出ていくまでの間について平均すると、突風前線が通過した経路についての平均風速 U_R が求まる。突風前線の移動速度は、前述のとおり、動いた距離とそれに要した時間から求めた。その移動速度 U_G と U_R の比は、No. 4, 5, 7の例では、風速の方が大きく、移動速度は風速の90%であるが、No. 9, 10では、風速より10~20%も大きい。

突風前線に続く強風域の大ききも観測例によって異なっているが、風向方向の100 mを越えるような大ききをもつに対し、直交方向には最大でも40 mであり、風向方向に長く伸びた形をしていることがわかる。

5. 突風前線の通過と運動量輸送

Fig. 5には、風速の3成分とともに運動量の輸送量も示した。 uw は鉛直上向き、 uv は水平方向の運動量の輸送量である。突風前線の通過の際の運動量の輸送がどのようになっているかを調べてみた。No. 7の

ように、鉛直下向き及び水平方向に運動量が共に活発に輸送されている場合、No. 4 のように、鉛直下向きの方がはるかに活発な場合、No. 9 のように水平移流の方が卓越している場合などいろいろな場合があって、現在のところはっきりしたことは言えない。

6. む す び

三杯風速計によって測定した風速を用いて、突風前線の観測を行ってきたが、突風前線のような非定常な現象を観測する上で、この風速計が、どの程度の時間スケールの風速変動に追従しうるかを調べてみた。超音波風速計で同時に測定した風速について、風速や時間微分の標準偏差、Skewness, Kurtosis などの統計量を求めて比較してみた。風速 10 m/s 以上の場合に、評価時間を1.5秒以上にとれば、2種類の風速計で求めた標準偏差は、同じくらいの値をとるようになる。すなわち、三杯風速計でも、観測時の風速が 10 m/s 以上であるので、評価時間を1.5秒ぐらいいとれば、この程度の時間スケールの風速の増減に対しては、超音波風速計による測定と同じくらいの精度で風速の測定ができる。この三杯風速計による突風前線の妥当性をふまえた上で、今回の解析で得られた突風前線に関する結果は次のとおりである。

1) 各測定点の風速の時間変化のトレース上で、突風前線にあたるものは、いくつかの測線上にまたがって、風上から風下へと移動していく。

2) 風速と時間微分の時々刻々の空間分布を作ってみると強風域の前面に、風向方向に風速の水平勾配が非常に大きな領域が存在し、その幅は、20~30 m である。これが突風前線であり平均風速 13 m/s のときにその最大水平勾配は 0.36 (m/s)/m にも達する例がある。

3) 突風前線の形態は、移動につれて、変形を伴っていて、風向方向に伸縮する。移動速度は、観測時間全体の時空間平均風速よりは大きい。しかし、突風前線が通過した経路に沿った平均風速に比べると、大きい場合と小さい場合の両方がある。

4) 突風前線の通過と運動量輸送については、未だ断定的なことは言えないが、突風前線の維持、発達衰弱のメカニズムに大きな役割を果していそうである。

突風前線の観測に付随して得られた、二次元相関解析からは、この観測例では Taylor の凍結乱流の仮説が取立すること、空間相関係数の空間的な広がり、楕円形をしているが、この観測例ではその長軸は、必ずしも平均風向に伸びているとは限らない。

今後は、解析を進めて、突風前線の発達衰弱過程についても研究を進めていく予定である。

参 考 文 献

- 1) 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, 257-270.
- 2) 石崎澄雄, 光田 寧, 林 泰一: 突風前線の性質について, 第6回風工学シンポジウム論文集, 1980, 39-44.
- 3) 佐貫亦男: 地上気象器械共立全書, 1953, pp. 252.
- 4) Shiotani, M and Y. Iwatani: Horizontal space correlation of velocity fluctuations during strong wind. J. Meteor. Soc. Japan Vol. 54 No. 1, 1976, 59-67.