

潮岬における突風前線の観測について (1)

石 崎 潑 雄, 光 田 寧, 林 泰 一

THE GUST FRONT OBSERVATION AT SHIONOMISAKI (1)

By *Hatsuo ISHIZAKI, Yasushi MITSUTA and Taiichi HAYASHI*

Synopsis

The field observation to study the structure of the gust front was planned and carried out at the test field of about 60×130 m of the Shionomisaki Wind Effect Laboratory. Intermittent phenomena such as gust front have not been studied until now, because of difficulties in treating their unsteadiness. In this paper, the observational system is summarized and the results of the preliminary analysis of wind variation in typhoon last year is reported. The positive skewness in the frequency distribution and the example traces of time change rate of wind speed indicate the existence of gust front.

1. は じ め に

風の吹きかたをみていると、時間的にも、空間的にも一様でなく、大きく変動していて、非常にきまぐれな振舞をしている。しかし、野外で、穂波や、草原の草が風でなびくようすは、あたかも海の波が進んでいくような動きを示す。この例のように、風の強い範囲は、風向に直交するような方向に広がった一つの狭い線状の領域を形成して進んでいく。また、暴風雨のときの雨滴の空中での分布は、縞状になっていて、雨滴が多く集中している場所とまばらな場所が交互に存在しているのが認められる。このような現象は、風の変動と対応していると考えられ、空間に風の強い領域と弱い領域があって、風速が急に変化するような一つの面が存在することは、実感としても認められることである。この現象を、Sherlock は、突風前線 (Gust Front) と名付けて、定性的な考察を行なった¹⁾。しかし、その後は、この現象に本格的に取り組んだ研究はなく、風の観測をした際に、風速のトレースの上で、風速の急変が見出されたときに、Gust Front と報告した例²⁾があるにすぎない。

現在、地表付近の風の変動の性質を研究していくときに、風の変動は、完全に不規則 (Stochastic) な現象として取扱って、平均や分散、さらには相関やスペクトルなどの統計的な方法を利用して風速場を表現してきた³⁾。しかし、この方法での解析は、風速場の数量的な性質を記述しなおしたということで、現象そのものの物理的構造を解明したわけではない。そこで、風の乱れの微細構造にまで立入って、突風前線のような現象の構造を明らかにしていくことは、現在の統計理論に基づいた乱流論的な研究がいきづまっていることにも、新たな展望を開くことができるかもしれない。

以上のような観点から、突風前線というような現象の存在を確認し、その構造や性質を実験的に研究してみることが計画した。取扱うべき対象が、空間的な広がりをもつ現象であると考えられるため、観測網は、立体的 (三次元的)、少なくとも平面的 (二次元的) な配置をもつようにしなければならぬ。また、微細構造を調べる目的から、観測点は密に分布している必要がある。このような点を考慮して、京都大学防災研究所付属潮岬風力実験所において、昭和54年度から、観測網の整備に着手し、観測を開始した。先に述べたように、突風前線の本格的な研究は現在のところ見当らずその性質が、どのようなものであるか、はっきりしていない。従って、どのような解析方法が有効な手段となるのかを検討することから始めることとなった。この現象は、規則的な現象ではなく、間欠的に発生するものと考えられるので、非定常な取扱いが

必要であり、単純に乱流理論を適用するわけにはいかないとされる。

本報告では、観測の概要と、突風前線の存在、その発生頻度、空間的な規模を明らかにするために行った試験的な解析例について述べる。

2. 観測の概要

観測は、京都大学防災研究所付属潮岬風力実験所構内の野外実験場と、隣接する休耕地である。**Fig. 1** に示すように、実験所は、本州最南端の潮岬の合地上の西部に位置している。実験場は、東西に約 130 m、南北に約 60 m の広さを持ち、一面に高さ 50 cm 程度の草が生えている。この場所から西側には、海岸まで約 1 km にわたって平坦で、高さ 2~3 m の雑木がところどころに生えている程度で、気流を乱すような特に大きな建物はない。二次元的な風速の変化及び分布を測定するという目的から、従来までの一直線状に並んだ観測網ではなく、平面的な観測網を計画した。観測点の配置は、**Fig. 2** に示すとおりである。潮岬で、強風が期待できるのは、台風時のほかには、冬季の北西の季節風の場合である。台風の場合は、卓越風向は一定していないが、冬季の季節風の風向は、西ないし、北西で持続性があるので、この風向の風が、特に観測しやすいような配置になっている。各観測点は、できるだけ、約 14 m の間隔の格子状になるようにしたが、一部人家や耕作地がある都合上、多少変形した形になった。最も長い測線がとれるのは、西北西から東南東にかけて、120 m にわたってであり、その間に7つの観測点が並ぶ。

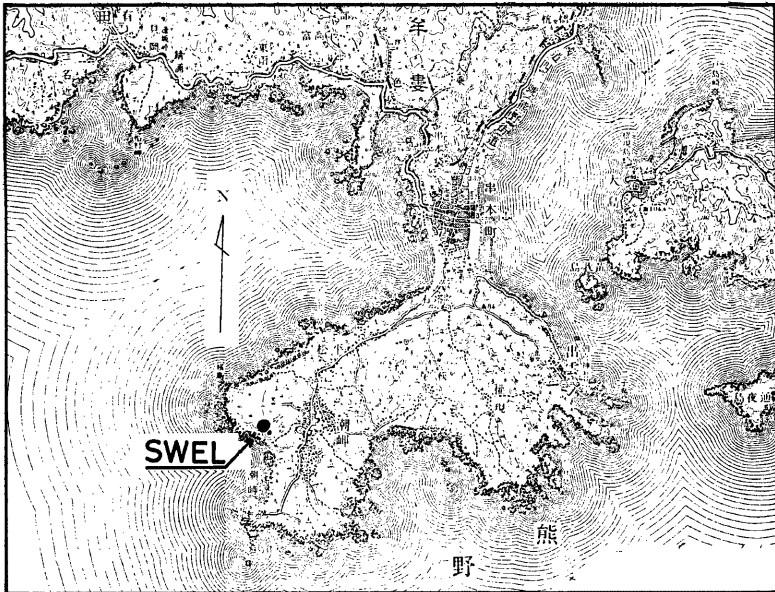


Fig. 1. Topographic map near the Shionomisaki Wind Effect Laboratory.

使用した測器は、31台の気象庁型三杯風速計（小笠原計器製）と、4台のプロペラ型風向風速計（小笠原計器、光進電機製）である。**Fig. 2** 中の No. 1~31 は三杯風速計、P-1~4 はプロペラ型風向風速計であ

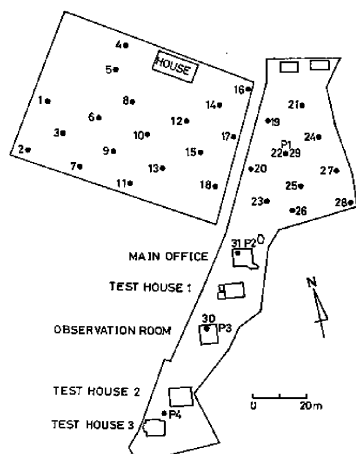


Fig. 2. Network of observation.

Three cup anemometers are set up at points No. 1 to 31.

Propeller anemometers are at P-1 to P-4.

る。No. 1～28 は、高さ 8.25 m の鉄塔の頂上に風速計が設置してある (Photo 1)。No. 29 には、高さ 16.5 m の鉄塔の頂上付近 (16.1 m) であり、この頂上には、風向風速計 (P-1) も取付けてある (Photo 2)。観測室と、研究室本館の屋上には、それぞれ測風塔があり、高さは、10 m, 17.5 m である。測風塔には三杯風速計 (No. 30, 31) とプロペラ型風向風速計 (P-2, P-3) が並べて取付けてある (Photo 3, 4)。その他に、実験場構内の南端付近の実験家屋のそばにも、高さ 10 m の鉄塔があり、頂上にはプロペラ型風向風速計 (P-4) が設置してある。これらの風速計からの信号は、すべてケーブルによって観測室

へ引込んで、40 ch のデータ集録装置 (DP-2000, TEAC 社製) に、デジタル型式で磁気テープに記録される。信号の A-D 変換は、0.25 秒毎に行なわれる。この観測のブロックダイアグラムは、Fig. 3 に示す。31 台の風速計の風速値は、指示計で、常時、読むことができ、4 台の風向風速計の風向風速値は、別に、直接自記記録がとれるようになっている。観測室内の記録装置を Photo 5, 6 に示す。

この観測システムでは、研究室本館屋上の測風塔に設置した三杯風速計 (No. 31) の風速値が、あらかじめ設定した基準風速を越えると、スタート信号が、データ集録装置へ送られて、自動的に記録を開始することのできるの、無人時に急に強風が吹き始めても観測は可能である。

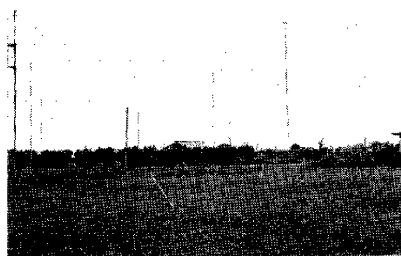


Photo. 1 Example of mast array for observation.

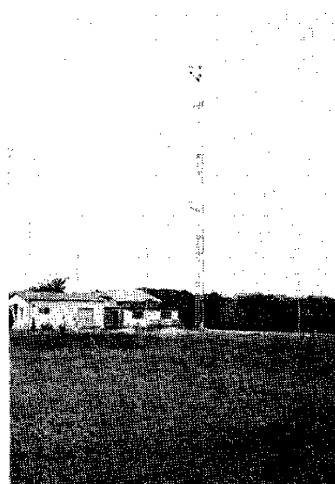


Photo. 2 Propeller anemometer and three cup anemometers at the wind tower in the test field. The three cup anemometer at lower height is No. 22 and the higher one is No. 29 in Fig. 2.

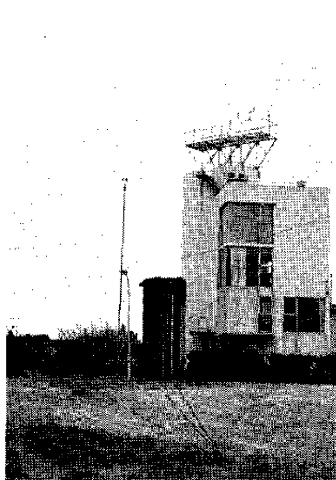


Photo. 3 Propeller anemometer and three cup anemometer on the top of main office.

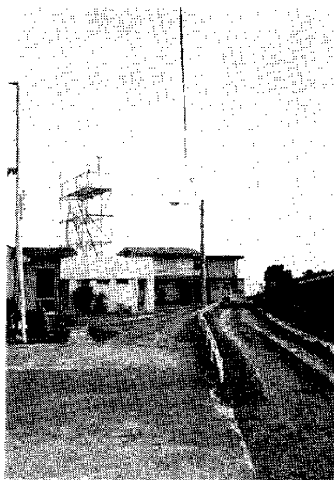


Photo. 4 Same as Photo 3 except for observation room.

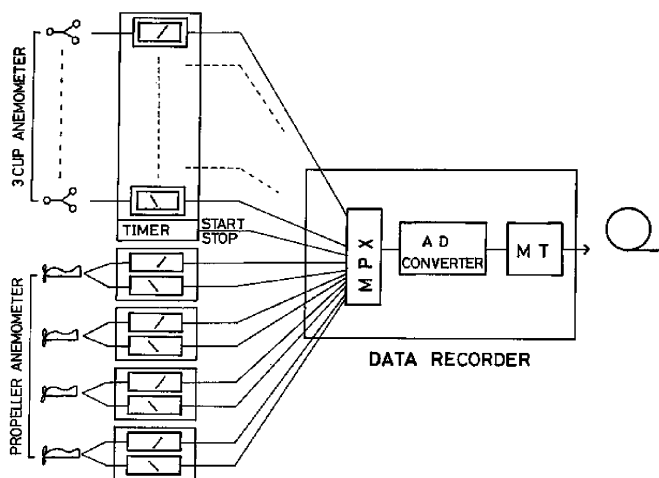


Fig. 3. Blockdiagram of observation.

3. 観測結果と解析

観測を開始してから昭和54年度中に、磁気テープ14巻、計60時間分の記録を得ることができた。今回報告する解析例は、そのうちで、昭和54年9月の台風16号に伴う強風時の2例である。解析時間は、どちらの場合も10分間である。いずれの場合も風速が大きくなり、この三杯風速計では、0.25秒の変動には追従しえな

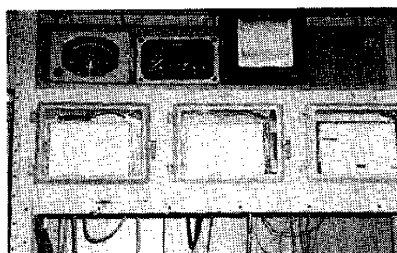
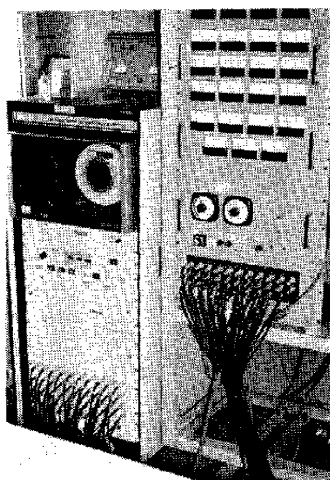


Photo. 6 Chart recorders and indicators of wind direction and speed.

← Photo. 5 Transducers and data acquisition system.

Table 1. List of runs in analysis.

Run No.	観 測 時	時 刻	解 析 時 間 (分)	平 均 風 速 (m/s)	平 均 風 向
1	1979-9-30	19:58	10	10.6	SW
2	1979-9-30	21:27	10	15.4	SSW

いと考えられるので6個毎にブロック平均をして、1.5秒平均の風速の時系列を作り、それを基にして解析することにした。解析した2例の日時、平均風向風速などの諸量は、Table 1 に示すとおりである。

4. 風 速 の 変 動

本研究の目的は、突風前線という現象の存在を確認して、その性質を明らかにしていくことである。ところが現状では、その現象の実体は、はっきりとは把握できていない。このため、どのような性質をもつ現象であるか、どのような解析手段を用いれば、その性質をより明確に表現できるのかという見当をつけてみる必要があろう。この現象のおおよそのイメージを得るためには、従来からの統計的な方法を利用して、風速の変動の解析を行なってみることが一つの方法として考えられる。

各観測点で、評価時間を1.5秒とした風速値について、度数分布を作ってみた。解析した例の風向は南であるので、丁度、観測網の一部が周囲の地形や建物の影響を受けやすく、度数分布の形は、必ずしも全部の観測点で同じような形をしていない。周囲の影響が、気流に対して、比較的小さいと思われるような観測点での度数分布を Fig. 4, 5 に示す。また、各観測点の統計量は、Table 2, 3 に示すとおりである。各点の風速変動の Skewness や Kurtosis は、風速変動の度数分布が正規分布と仮定したときの、Skewness の値0や Kurtosis の値3とは異なっている。同じ高度の観測点について、空間的な平均値をとると、Run 1 で Skewness が0.3, Kurtosis が2.9, Run 2 では各々0.0, 2.7である。

突風前線のような風の急変の性質を調べていくためには、風速自体よりも、風速の変化率を調べてみる方が、現象を直接的に把握できるのではないかとと思われるので、評価時間をいろいろ変化させてみた風速値に

Table 2. Statistical values of wind speed and its time change rate at Run 1.

OBSERVATION POINT	WIND SPEED							WIND SPEED CHNGE RATE				
	MEAN (m/s)	RMS (m/s)	INTENSITY OF TURBULENCE	MAXIMUM (m/s)	MINIMUM (m/s)	SKEWNESS	KURTOSIS	RMS (m/s ²)	MAXIMUM (m/s ²)	MINIMUM (m/s ²)	SKEWNESS	KURTOSIS
1	12.7	2.4	0.19	19.3	5.9	0.05	2.77	1.7	5.7	-4.4	0.42	3.16
2	12.3	2.4	0.20	19.3	6.0	0.03	2.84	1.5	5.4	-4.9	0.27	2.98
3	12.5	2.3	0.19	18.8	6.2	-0.09	2.60	1.7	5.7	-3.8	0.54	3.58
4	10.4	2.4	0.26	17.5	5.2	0.23	2.39	1.4	4.3	-3.2	0.54	3.23
5	11.3	2.7	0.24	19.3	6.3	0.28	2.52	1.6	6.1	-3.5	0.56	3.65
6	11.8	2.5	0.21	19.4	5.8	0.19	2.68	1.6	5.1	-3.9	0.58	3.24
7	13.1	2.4	0.18	19.0	7.1	0.08	2.45	1.7	6.0	-5.0	0.28	3.23
8	10.2	2.7	0.26	18.1	4.9	0.34	2.65	1.5	5.1	-3.9	0.46	3.44
9	11.2	2.6	0.24	17.7	4.8	-0.05	2.57	1.7	5.6	-3.5	0.60	3.44
10	9.5	2.8	0.29	18.7	3.8	0.59	2.84	1.4	4.5	-4.5	0.31	3.28
11	11.8	2.7	0.23	19.4	5.2	0.20	2.65	1.7	6.5	-4.2	0.43	3.57
12	8.2	2.3	0.28	14.9	3.9	0.46	2.78	1.3	4.3	-3.1	0.55	3.71
13	9.1	2.8	0.31	19.5	3.0	0.66	3.30	1.4	5.3	-3.5	0.28	3.31
14	9.1	2.7	0.29	18.3	3.3	0.59	2.95	1.4	5.6	-3.5	0.62	3.75
15	8.5	2.3	0.28	15.6	3.4	0.44	2.87	1.3	5.2	-3.1	0.83	4.75
16	9.5	2.3	0.25	16.1	3.4	0.27	3.06	1.3	4.3	-3.3	0.34	3.12
17	8.7	2.8	0.32	18.0	3.2	0.66	3.16	1.5	5.8	-4.8	0.50	3.72
18	7.5	2.5	0.33	15.3	2.9	0.66	3.08	1.3	7.4	-3.2	1.28	6.63
19	10.9	2.7	0.24	19.4	3.3	0.19	3.48	1.5	6.2	-3.8	0.56	3.71
20	8.5	2.8	0.33	18.5	3.3	0.60	3.32	1.6	4.8	-4.3	0.76	4.10
21	11.0	2.4	0.22	18.8	5.0	0.35	2.89	1.4	5.3	-3.3	0.64	3.83
22	11.0	2.7	0.24	19.7	3.0	0.16	3.54	1.5	7.5	-4.0	0.69	4.64
23	9.6	2.8	0.29	18.8	3.7	0.39	3.16	1.6	6.2	-4.1	0.72	4.19
24	11.9	2.7	0.23	19.5	5.2	0.39	2.73	1.6	6.2	-4.5	0.52	3.34
25	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
26	12.1	2.8	0.23	21.3	5.6	0.50	3.35	1.5	7.2	-4.8	0.46	4.14
27	11.4	2.4	0.21	18.2	5.7	0.44	2.61	1.4	4.8	-4.4	0.45	3.75
28	11.9	2.5	0.21	19.0	6.2	0.34	2.55	1.4	4.4	-4.3	0.23	3.18
MEAN	10.6	2.6	0.25			0.33	2.88	1.5			0.	3.50

ついでその時間変化率を計算して、その統計的な性質を考えてみた。この時間変化率の度数分布を示したのが、Fig. 4, 5 の b), c) である。風速の評価時間は、1.5 秒と 6.0 秒である。風速の時間変化率の平均値は、どちらの解析例の場合も、また評価時間が 1.5 秒のときも 6.0 秒のときも、0.0 m/s² であるが、その度数分布の形は、評価時間によって異なっている。すなわち、評価時間が 1.5 秒のときには、度数分布の形は明らかに歪んでいるが、6.0 秒にすると、その歪みはなくなって正負はほぼ対称になる。風速の評価時間を 1.5

Table 3. Same as Table 2 except for Run 2.

OBSERVATION POINT	WIND SPEED							WIND SPEED CHANGE RATE				
	MEAN (m/s)	RMS (m/s)	INTENSITY OF TURBULENCE	MAXIMUM (m/s)	MINIMUM (m/s)	SKEWNESS	KURTOSIS	RMS (m/s ²)	MAXIMUM (m/s ²)	MINIMUM (m/s ²)	SKEWNESS	KURTOSIS
1	9.2	2.5	0.27	16.5	3.6	0.39	2.58	2.1	7.6	-5.5	0.50	3.35
2	12.6	3.6	0.29	22.9	3.7	0.10	2.39	2.8	9.1	-7.1	0.62	3.44
3	9.7	2.1	0.22	16.5	5.2	0.39	3.12	1.8	6.1	-5.0	0.45	3.13
4	18.0	2.8	0.16	25.7	11.0	0.06	2.52	2.1	7.3	-5.2	0.64	3.15
5	17.1	2.8	0.17	25.1	9.8	0.13	2.44	2.2	5.7	-5.8	0.32	2.64
6	14.3	2.8	0.19	22.0	7.6	0.20	2.64	2.1	5.8	-6.7	0.11	2.93
7	12.1	2.6	0.22	18.5	5.3	0.00	2.69	2.0	7.1	-4.8	0.52	2.87
8	19.0	2.7	0.14	25.2	11.6	-0.18	2.57	2.1	7.7	-5.0	0.07	2.88
9	17.4	2.9	0.17	24.6	10.5	-0.01	2.49	2.1	6.7	-5.8	0.29	2.13
10	20.7	2.7	0.13	27.0	12.0	-0.32	3.15	2.9	5.8	-5.6	0.11	2.90
11	22.5	2.9	0.13	29.0	11.8	-0.52	3.34	2.8	5.5	-5.8	-0.02	2.85
12	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
13	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
14	19.6	3.0	0.15	26.7	10.4	-0.31	2.88	2.3	7.2	-6.6	0.37	3.19
15	21.0	3.0	0.15	28.2	11.1	-0.22	3.07	2.5	11.4	-6.6	0.42	4.06
16	15.5	2.7	0.17	23.0	8.5	-0.11	2.56	1.9	6.2	-5.4	0.19	3.09
17	19.2	3.4	0.18	27.0	9.7	-0.24	2.76	2.5	8.7	-6.5	0.30	3.49
18	22.3	3.5	0.16	30.6	12.6	-0.42	2.82	2.5	8.4	-6.4	0.24	3.10
19	14.2	3.4	0.24	23.0	5.9	0.10	2.54	2.6	8.0	-6.2	0.37	3.12
20	14.8	3.3	0.22	23.0	6.0	-0.10	2.73	2.5	8.2	-7.9	0.22	2.98
21	10.8	2.8	0.26	18.4	3.2	0.11	2.73	2.1	6.3	-5.2	0.35	2.93
22	9.9	2.5	0.25	16.6	3.6	0.10	2.53	1.9	6.2	-4.9	0.43	2.98
23	8.1	2.2	0.27	15.0	3.3	0.37	2.99	1.7	5.7	-4.6	0.48	3.25
24	13.7	3.2	0.23	21.9	5.5	0.00	2.60	2.6	6.8	-6.6	0.31	2.88
25	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
26	14.4	3.4	0.24	25.4	4.5	0.38	3.37	2.8	10.6	-7.4	0.62	4.07
27	14.2	2.9	0.21	23.1	6.4	0.11	2.90	2.4	5.8	-5.8	0.12	2.58
28	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
MEAN	15.4	2.9	0.20			0.00	2.72	2.3			0.29	3.12

秒から、1.5秒ずつ増していき、7.5秒まで変化させ、統計量について同じ高度の観測点の空間平均をとったものを **Table 4** に示す。評価時間を増していくと、風速の時間変化率の Skewness は減少していき、その度数分布の形は、だんだん正負対称になることがわかる。評価時間を増していくと、風速変動は平滑化されるので、風速の標準偏差が、だんだん減少していくのは予想通りである。ところが、風速の時間変化率については、必ずしも、そのような傾向を示さず、評価時間が長い方が、標準偏差の大きいような場合がある。

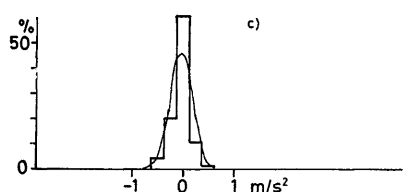
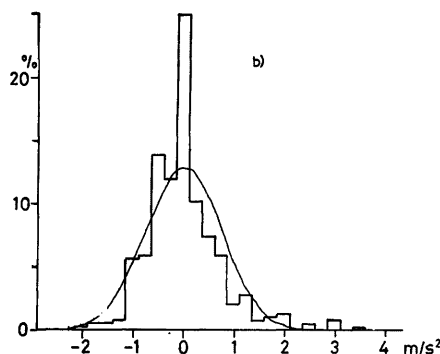
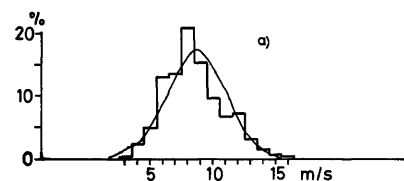


Fig. 4. Frequency distributions of Run 1.
Curves in the figures are the normal distributions.
a) Wind speed with averaging time 1.5 sec.
b) Time change rate of wind speed calculated from wind speed with averaging time 1.5 sec.
c) Same as Fig. 4. b) except for averaging time 6.0 sec.

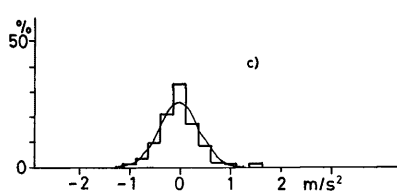
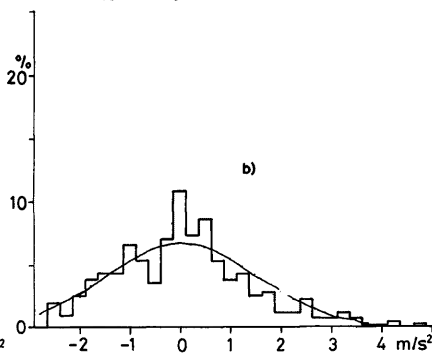
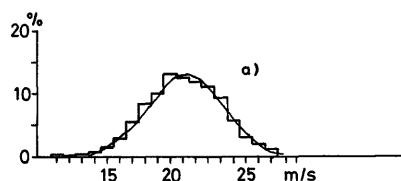


Fig. 5. a)-c) Same as Fig. 4. a)-c) except for Run 2.

風速の評価時間が1.5秒のときの、時間変化率の度数分布から、その変化率の値が 5 m/s^2 以上の風速の急増が、時々発生していることがわかるが、風速の減少のとき、すなわち、変化率の値が負の場合には、急減の発生頻度は、はるかに少なくなる。これは、風速の変動に対する風速計の応答特性に関係することがないとは言えないが、平均風速が 10 m/s で、時間が1.5秒程度の変動については、本実験で使用している気象庁型三杯風速計でも、十分追従しうるものと考えてよいであろう⁴⁾。

Fig. 6 は、Run 1 の風速のトレースを示す。このときの風向は、南東であるので、南東から北西へ向かって測線が並ぶように、観測点の順番を並べかえて図示している。時刻の50秒から1分付近で、観測点18から15、12へと、風速の急増部分が移動していくのがみられる。また、同時刻頃に、観測点26—23—20—17—14と、風速の急増領域が移動していている。この風速の急増の動きをもっとよく調べるため、風速の時間変

Table 4. Statistical values of windspeed and time change rate of wind speed with averaging time.

RUN-1		WIND SPEED			WIND SPEED CHANGE RATE		
AVERAGING TIME(sec)	MEAN (m/s)	RMS (m/s)	SKEWNESS	KRUTOSIS	RMS (m/s)	SKEWNESS	KRUTOSIS
1.5	10.6	2.6	0.33	2.88	1.5	0.55	3.50
3.0		2.5	0.29	2.84	2.0	0.30	3.23
4.5		2.4	0.26	2.84	2.2	0.19	3.01
6.0		2.3	0.25	2.89	2.2	0.09	2.99
7.5		2.2	0.24	2.85	2.2	0.19	3.22
RUN-2							
AVERAGING TIME(sec)	MEAN (m/s)	RMS (m/s)	SKEWNESS	KRUTOSIS	RMS (m/s)	SKEWNESS	KRUTOSIS
1.5	15.4	2.9	−0.00	2.72	2.2	0.29	3.12
3.0		2.7	−0.04	2.82	2.6	0.18	2.98
4.5		2.5	−0.05	2.80	2.6	0.16	3.06
6.0		2.4	−0.07	2.74	2.5	0.04	2.91
7.5		2.3	−0.10	2.79	2.5	0.03	2.85

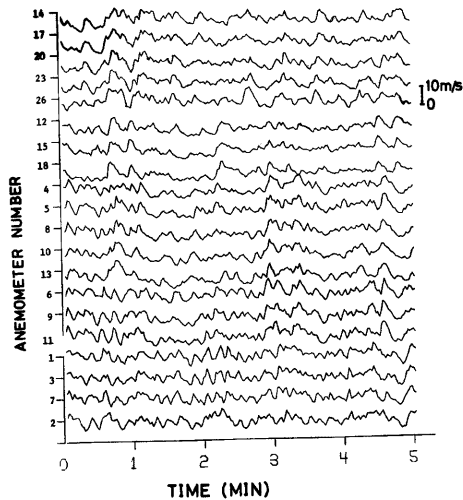


Fig. 6. Example trace of wind speed with averaging time 1.5 sec.

化率のトレースを Fig. 7 に示す。風速のトレースに比べると、もっと細かい（短周期の）変化が卓越している。そして、ところどころに、鋭い上向きのピークが出現している。このピークが風速の急増を示している

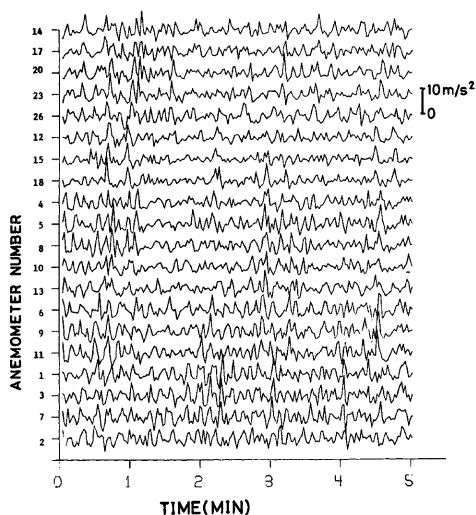


Fig. 7. Example trace of time change rate of wind speed in the case of Fig. 6.

のである。また、上向きのピークが卓越していることは、時間変化率の *Skewness* が正であることから予想されることであった。この場合、風速は 10 m/s 程度であり、数 m/s の中で風速の急増が、間欠的に発生している。この急増に対して、Fig. 6 からわかるように、風速の減少は、増加に比べると緩やかである。

これらのことから、突風前線とみなせるような、風速の急増部分が、各観測点を通過していることは確実に、その通過を捉えるには、風速 10 m/s 程度のときには、1.5 秒程度の評価時間で検知できることがわかった。

5. 突風前線の空間的広がりと移動

突風前線の二次元的な広がり、とその移動について調べてみた。先きに述べたように、各観測点について、風速の時間変化率を計算して、その値を 1.5 秒毎に、観測点の配置通りに出力できるようにした。こうすると、風速の時間変化率の平面的な分布がわかり、その分布の変化のようすを時間的に追っていくことができる。典型的な 2 つの例について示したのが、Fig. 8, 9 である。このときの風向は、南西ないしは南々西である。図中の数字は、風速の時間変化率の 2 倍の値であり、評価時間を 1.5 秒としたときの風速値から計算した時間変化率である。図の中で、実線で囲んだ部分が風が急増した領域であり、時間の経過について、風上から風下へ向かって移動していくようすがわかる。突風前線の領域の広さは、風向と直交方向に、最大で約 40 m、風向方向には、約 20 m の大きさがある。その領域の形状は、Fig. 8 に見られるように、一定の形を保って移動していくわけではなく、時間とともに、変形していく。また、領域の広さも一定していない。移動速度を求めるのは、領域の変形のために、なかなか困難である。特に、Fig. 9 の 2 分 29.2 秒から 2 分 30.7 秒にかけては、移動せずに静止しているかのように見える。しかし、突風前線はある巾をもって、その先端付近が一方で観測されていて、1.5 秒後には、後端付近が観測されたのだという解釈も成り立つ。もし、そうであれば、この急変面の風向の幅は 20~30 m ということになる。時々刻々の移動速度を求めること

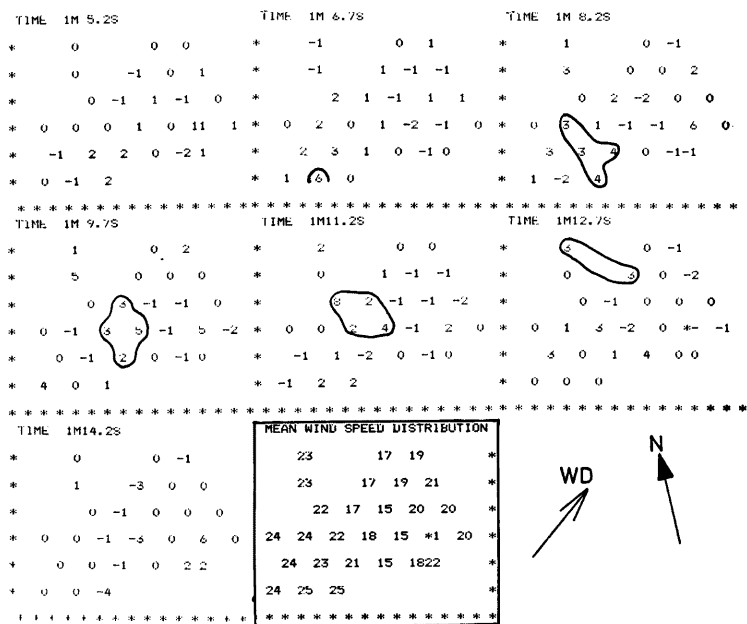


Fig. 8. Typical example of gust front. The values in the figure is twice of wind speed.

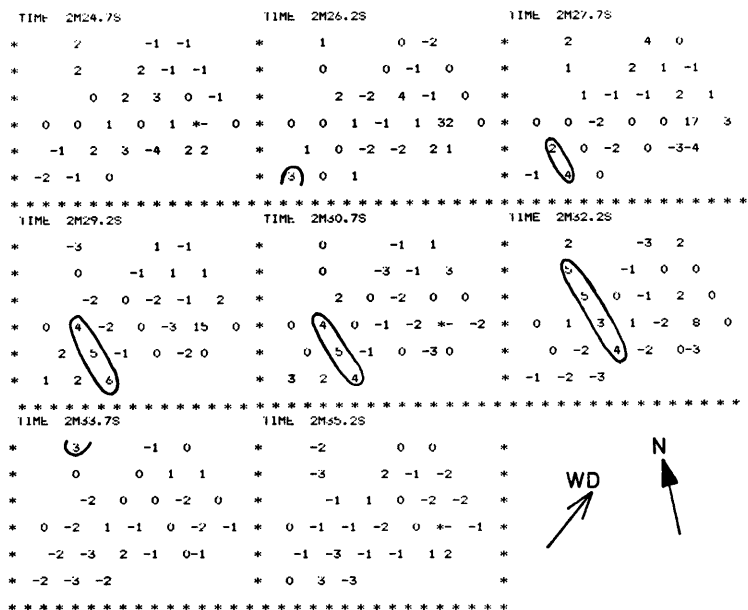


Fig. 9. Same as Fig. 8.

は不可能なので、風の急変領域が、観測網で捉えられ始めてから、移動して出ていくまでの距離と時間から、平均的な移動速度を求めてみると、約 10 m/s である。この2つの例の場合の、平均風速の分布は、**Fig. 9** の右下に黒い四角で囲んで示したとおりである。この図の中の数字も風速の2倍の値であるが、風速の急変領域が移動していった場所では、平均風速は、11~12 m/s であり、この値に比べると移動速度の方がやや小さい。

突風前線のような現象は、風速の急増部分が移動していくような現象であるので、風速やその時間変化率を、場の関数としてみる Euler 的な考え方よりも、突風前線の移動に沿って、その物理量の変化を考えていく Lagrange 的な取扱の方がよりふさわしいと思われる。突風前線のような強風領域が通過すると一つの観測点では、風速の時間変化率は当然正の値をとるであろうが、その強風領域自体が加速しつつあるのか、減速しつつあるのかの判断は、上に述べた Euler 的な風速の時間変化率の分布からは、不可能である。強風領域の加速減速は、突風前線の発達減衰に関わってくると思われるので、Lagrange 的な加速を求めてみる必要がある。Lagrange 的な実質微分 (material differentiation) は、Euler 微分を使って、次式のように表現できる。

$$\frac{Du_j}{Dt} = \frac{\partial u_j}{\partial t} + u_i \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad \dots\dots\dots (1)$$

u_i は風速である。右辺の第一項が、**Fig. 8, 9** に示す風速の時間変化率である。第二項の移流項は、風速の空間分布がわかれば、求めることができ、(1) 式の左辺の Lagrange 的な加速度が計算できることになる。**Fig. 9** の風速の時間変化率が大きい領域について、(1) 式の各量を評価することにして、そのときの風速の二次元的な分布 (すなわち、**Fig. 9** を計算するために用いた風速の分布) を **Fig. 10** に示す。この **Fig. 9**,

TIME 2M24.0S	TIME 2M25.5S	TIME 2M27.0S
* 22 17 23	* 26 15 21	* 28 14 17
* 18 16 16 21	* 22 20 14 19	* 23 21 12 19
* 20 23 14 18 20	* 20 27 19 17 18	* 24 23 25 15 17
* 24 16 22 28 16 *1 18	* 24 16 25 29 19 91 19	* 25 17 28 26 21 *1 19
* 25 16 26 30 1822	* 23 19 31 24 2226	* 26 18 28 21 2628
* 30 27 23	* 25 25 21	* 31 23 23

TIME 2M28.5S	TIME 2M30.0S	TIME 2M31.5S
* 32 20 17	* 26 23 15	* 25 21 17
* 26 25 14 16	* 26 22 17 18	* 27 17 15 23
* 26 22 23 19 18	* 23 22 19 18 22	* 26 22 15 17 22
* 31 17 23 26 21 *1 24	* 33 24 20 26 16 *1 24	* 34 30 21 24 13 *1 21
* 29 18 24 21 2021	* 32 26 22 20 1722	* 34 35 19 20 1221
* 28 30 22	* 31 34 32	* 36 38 38

TIME 2M33.0S	TIME 2M34.5S	TIME 2M36.0S
* 28 15 21	* 34 13 21	* 31 14 21
* 34 14 15 23	* 34 15 18 25	* 29 18 17 21
* 34 22 12 21 23	* 30 22 11 17 22	* 27 23 10 14 19
* 34 33 26 26 10 *1 21	* 30 28 29 24 9 *1 19	* 30 26 28 21 10 83 17
* 34 31 26 17 1116	* 30 26 30 14 1114	* 28 21 28 12 1418
* 34 34 33	* 30 28 29	* 30 33 23

Fig. 10. Wind speed distribution in the case of gust front in Fig. 9.

Table 5. Lagrangian acceleration of gust front in the case of Fig. 9

TIME	2 M 27.7 sec		2 M 29.2 sec			2 M 30.7 sec			2 M 32.2 sec		
POINT	3	7	6	9	11	6	9	11	8	10	13
$\partial u / \partial t$	1.0	2.0	2.0	2.5	3.0	2.0	2.5	2.0	2.5	1.5	2.0
$u \partial u / \partial x$	-5.0	-2.4	-2.2	-4.1	-1.9	-4.1	-8.4	-6.7	-0.8	-4.6	-4.2
Du / Dt	-4.0	-0.4	-0.2	-1.6	-1.1	-2.1	-5.9	-4.7	1.7	-3.1	-2.2

10 を利用して、(1) 式で平均風向だけの気流を考えることにして、それに直交するような方向の流れは無視した。計算結果は、Table 5 に示すとおりである。観測点の配置の都合上、風速の空間微分が求められない地点があった。

(1) 式の移流項は、すべての観測例について、負の値をとる。その大きさは、第一項の時間変化の項に比べると大きく、その結果、(1) 式の左辺の Lagrange 的な加速度は負になるときが多い。突風前線自体の加速度が負であるということは、実質的には、減速していることであって、この現象が衰退しつつある状態を物語っていると考えられる。この負の加速度の大きさが数 m/s^2 であることを考えると、この現象の寿命（ライフタイム）は数秒ないしは十数秒程度であろうと推定される。

実際には、突風前線が発生して、発達しつつある状態も存在するであろうし、それも観測できるはずである。気流の状態が良好な西ないしは北西の風について、同様な解析を行なってみれば、その段階の突風前線を捕えることができるかもしれない。

6. む す び

以上のように、潮岬風力実験所において、突風前線の観測を目的として、観測システムを完成し、実際に観測を開始した。現段階は、2つの例の観測記録について、試験的な解析を行なっただけで、まだ結論的なことを言えるところまでは至っていない。しかし、風速やその時間変化率の度数分布や各種の統計量、トレースから突風前線と考えられるような風速が急増するような現象を見出すことができ、それが風上から風下へ向かって移動していくようすを確認できた。

突風前線の空間的規模は、今回の解析例から、風向直交方向に 40 m、幅が 20 m 程度の広がりを持ったものであり、風向方向に移動するにつれて変形していく。このため、時々刻々の移動速度を追っていくことは難しいが、観測網の範囲を通過する間の平均移動速度は、そのときの平均風速より小さい結果をえた。

突風前線の発達状態をみるために、実質加速度を求めてみたが、今回の解析例からは、減衰状態にあると思われるものしか見出せなかった。

今後、解析例を増やして、突風前線の構造についても研究を進めるつもりである。

最後に、観測準備に御協力をいただいた、潮岬風力実験所技官、尾崎寿寿、河内伸治、防災研究所大学院生近藤宏二、内田 諭の各氏に感謝する。

参 考 文 献

- 1) Sherlock, R.H.: Variation of Wind Velocity and Gusts with Height., Proc. ASCE, 78, Spr., No. 126, 1952, pp. 1-16.
- 2) Finnigan, J.J.: Turbulence in Waving Wheat., I. Statistics and Honami, Boundary-Layer Meteorol., 16, 1979, pp. 181-211.

- 3) 塩谷正雄, 岩谷祥美: 風の乱れの測定, 気象研究ノート, 第114号, 1973, pp. 70-110.
- 4) 台風研究委員会: 多良間島における台風観測総合報告書, 1980, pp. 229.