

最大瞬間風速と突風率の測定について

光田 寧・堀口 光章

MEASUREMENT OF PEAK GUST SPEED AND GUST FACTOR

By Yasushi MITSUTA and Mitsuaki HORIGUCHI

Synopsis

The typhoon 9119 has left the new largest peak gust speed records at many stations compared to the largest wind speed records. Some researchers pointed out special feature of large turbulence of this typhoon. However, it is necessary to consider recent changes of characteristics of anemometers. In this paper, the response of the propeller anemometer is studied using the observed data at Tsuruga test power-line. Propeller anemometers can not respond to wind fluctuations with short duration (less than around 1 sec). Recent improvement of the dynamic response of the anemometer has resulted in larger peak gust speed. If large deviations from the wind direction happens from overshooting of wind vane of the propeller anemometer, the averaged wind speed by the propeller anemometer may be underestimated. As the result, apparent larger gust factor may be obtained.

1. は じ め に

1991年台風19号の通過に際して全国の約30地点の気象官署で最大瞬間風速の記録更新があったのに対して、最大風速の記録更新は6地点しかなかった。そのため、今回の台風による強風は特に乱れが大きく、最大瞬間風速とそれを含む時間の平均風速との比として定義される突風率が大きかったことがその特色ではなかったとも言われている。しかし、過去の台風と比較してその風の特性を議論する際には、その測定に使用された風速計の変遷も考慮しなければならない。すなわち、突風率の増加には風速計の特性に起因したものであるのではないかと考えられるからである。

この30年間はどの間に気象庁の気象観測において、最大瞬間風速と風速（10分平均風速）の記録に使用する器械はおおよそ以下のように変更された。瞬間風速については、1960年台になりそれまでのダインズ風圧計から風車型（プロペラ型）風向風速計に切り替えられ、一方平均風速は1961年にそれまでの4杯ロビンソン型風速計から3杯型風速計へ、1975年からは瞬間風速と同様にプロペラ型風向風速計で観測されるようになった。このように測定に使用される風速計が変わってきたが、それぞれの風速計は平均風速に対して検定されているが、変動する風に対しては異なる応答特性を持っている。

また、さらにその後、プロペラ型風向風速計の変換装置は発電機から光チョッパーなどによるパルス式のものに転換されつつある。この方式の風速計にはいろいろなタイプのものがあるが、気象庁で用いられているJMA-80型地上気象観測装置のプロペラ型風向風速計では、プロペラ軸に直結して穴のあいた回転円板が取り付けられている。この円板をはさんで光スイッチが取り付けられていて、プロペラ1回転について48個

のパルス信号を出力し、これから回転速度すなわち風速を求めている。このような方式によって回転軸のトルクを小さくすることが出来た。また、最近では強化プラスチック製のプロペラが用いられて以前の金属製に比べて軽くなり、風速計としての応答はさらに良くなっている。

回転型の風速計の風速変動に対する応答は線型一階の応答関数で近似出来ることが知られており、その時定数 T は風速 U に反比例し、MKS 単位系で示した時の距離定数 $L (L = T \cdot U)$ は気象庁型で 5~10 m の程度である。従ってプロペラの回転の風速の変動に対する応答は風速によって変化し 10 m/s で約 1 sec 以上の周期の変動にしか追従しない。一方、上に示したパルス式の風速計では微風時を除いて 0.25 sec の間のパルスを計測することによって回転速度を求めている。そのため風速が 40~50 m/s 以上になるとこの平均化時間が風速計出力の変動に対する応答を支配することになり、それ以下ではまだプロペラの特長の方で応答は決定される。

風速計によって測定される最大瞬間風速は、厳密には瞬間の風速ではなくある短い時間での平均値である。これが最大瞬間風速の評価時間であり、風速計の風速変動に対する応答の仕方によって決まるので、プロペラ型風向風速計で測定した最大瞬間風速の評価時間は一定せず風速によって変化する場合の方が多いと言わねばならない。また記録にあたってアナログ的なペン書き記録装置を用いている場合はその記録部分の動特性の影響も受けることになる。いずれにせよ次章で詳しく述べるように、風速計の応答特性が向上し風速の評価時間が短くなると、最大瞬間風速の測定値が大きくなる傾向を示す。

一方、風向計としてのプロペラ型風向風速計は、風速計とは異なって線型 2 階の応答を示すと考えて良い。その制動力は空気力に頼っているため制動比が小さく、時定数と一致した周期の風向変動に対しては共振を起こして実際より大きな振幅で振動する。さらに平均風向からの偏角が大きくなると翼が失速するために追従が極端に悪くなることもある。そのため、必ずしも応答特性が良いとは言えない。しかもその距離定数は 10 m 程度の値を示し、実際の風向の変動においてもそのような変動は小さくない。風向計が風の中でいつも大きく動いているように見えるのはこのためである。

風向計が大きく振れる時には正しい風向より行き過ぎて風向に対して斜めを向いてしまうことになり、その時風向計の先端に付いている風速計はその向きの分速度しか検出しない。従って風向変動のある自然風の中ではプロペラ型風向風速計で測定した風速は風向計の固有周期の変動で変調され、結果として平均風速を過小評価してしまうこととなる。

このように最大瞬間風速は風速計の改良により以前より大きな値、平均風速は過小な値を示すため、見かけ上の突風率の増大が生じる可能性がある。桑形¹⁾ は、過去 40 年間に日本に襲来した主要な大型台風による突風率を調べ、風速の測定方法の変化が突風率の見かけ上の増加を引き起こしていたことを示したが、その一方で、都市化に伴う地表面粗度 z_0 の増加も突風率増加の原因の一つになっている可能性を示唆している。

ここでは、これらの問題の理論的な検討は今後に残るとして、自然風に対してプロペラ型風向風速計がどのような応答を示すのかを実際の測定データをもとにして調べて見た。

2. データと解析方法

超音波風速計は風に対する応答が良く、プロペラ型風向風速計と比較して実際の風をより良く反映していると思われるので、これをプロペラ型風向風速計の応答を調べる時の基準として用いることが出来る。そこで、2 種の風速計がすぐ近くに設置されている関西電力敦賀試験線の測定データを解析に使用した。なお、敦賀試験線は福井県と滋賀県との県境付近の山岳地に設置されている実験用送電線である。ここでは送電鉄塔と観測柱に設置されたプロペラ型風向風速計や超音波風速計により風の観測がなされている。

解析に用いたのは以下に示すプロペラ型風向風速計 2 台 (PA, PB) と超音波風速計 2 台 (SA, SB) によるデータで、A は 2 号鉄塔中段に取り付けられており、B は観測柱 P. 13 に取り付けられている。プロペラ型風向風速計は、風速の測定に発電機、風向の測定にポテンシオメータを使用した従来型のものである。

- ・プロペラ型風向風速計（風速：発電機，風向：ポテンシヨメータ）

〈PA〉 No. 8：2号鉄塔中段，地上高 45 m

〈PB〉 E：観測柱 P. 13，地上高 18 m

- ・超音波風速計（3次元）

〈SA〉 No. 2：2号鉄塔中段，地上高 45 m

〈SB〉 No. 1：観測柱 P. 13，地上高 18 m

また，今回の解析は次に示す 4 例について行った。

- ・ケース 1：1989年 9 月 3 日 3 時 52 分，平均風速 8.8 m/s，風向 179 度（南風）
- ・ケース 2：1989年 9 月 20 日 6 時 40 分，平均風速 16.1 m/s，風向 356 度（北風）
- ・ケース 3：1989年 10 月 8 日 10 時 35 分，平均風速 18.9 m/s，風向 8 度（北風）
- ・ケース 4：1989年 10 月 8 日 10 時 45 分，平均風速 17.8 m/s，風向 6 度（北風）

各ケースはサンプリング周波数 10 Hz で測定された 10 分間のデータである。なお，上記の平均風速値と平均風向値は 2 号鉄塔中段のプロペラ型風向風速計 No. 8 で測定された値である。4 例のうち，ケース 1 だけは南風の場合で，その他は北風の場合である。また，平均の風速は南風のケース 1 は弱く，その他のケースは比較的強い。

1/10 秒ごとに測定されたオリジナルデータをもとに，連続した 2 個ごと，4 個ごとというように平均する個数を変えていったデータの組を作成する。これは模擬的に風速の評価時間を変えることに対応している。このようにして評価時間 0.1 秒（サンプル数 6000 個）から 102.4 秒（サンプル数 5 個）までのデータ組を作成し，解析に使用した。

3. 解析結果

3.1 突風率と乱れの強さ

最大瞬間風速とそれを含む時間の平均風速との比として定義される突風率を上記のようにして作成されたデータ組から計算した値を Table 1 に示す。また，4 例のうち平均風速が最も強かったケース 3 について，横軸に平均化時間（評価時間），縦軸に突風率を取ってグラフにしたものを Fig. 1 に示す。超音波風速計による突風率は評価時間が短くなるに従って大きくなっていくが，プロペラ型風速計での突風率は評価時間 0.1 秒から 1.6 秒程度まではほぼ同じ値であり，短い評価時間では飽和してしまっている。これは発信機や変換機特性により決定される時定数より短い周期の風速変動には，風速計が追従していないためである。

風速変動のスペクトルは連続的に周波数の高い方までエネルギーが分布しているので，最大瞬間風速の計測における応答が早くなり風速の評価時間が短くなるとそれだけ最大瞬間風速は大きくなることになる。光田²⁾は，過去の観測データをもとにして突風率と最大瞬間風速の評価時間との間についての以下のような経験式を提唱した。

$$G = (s/D)^{-p} \dots\dots\dots (1)$$

ここで， G は突風率， s は最大瞬間風速の評価時間， D は平均風速の評価時間， p は乱れの性質によって決定される定数である。

自然の風では突風率は風速の評価時間を短くすればいくらかでも増大していくが，実際の風速計の測定では飽和して一定以上にならない。そしてこの飽和評価時間は風速計の動特性と風速によって決定される。ここでの結果は，風速計の発信機や変換機が変わり時定数が短くなると風速の評価時間が短くなり，その結果突風率が大きくなることを示している。但し，より一般的な状況を把握するためにもっと多くの例を今後調べていく必要がある。

同様に，風速の標準偏差と平均風速との比である乱れの強さについて計算した結果を Table 2 に示す。また，4 例のうちケース 3 についてグラフにしたものを Fig. 2 に示す。超音波風速計では，評価時間

Table 1. Variation of the gust factor with averaging time

			Averaging time, s (sec)											
			0.1	0.2	0.4	0.8	1.6	3.2	6.4	12.8	25.6	51.2	102.4	
Gust factor G	PA	case 1	1.77	1.77	1.77	1.76	1.74	1.73	1.68	1.60	1.45	1.33	1.07	
		2	1.37	1.37	1.37	1.37	1.37	1.36	1.34	1.31	1.31	1.28	1.13	
		3	1.28	1.28	1.28	1.28	1.26	1.25	1.22	1.20	1.19	1.06	1.04	
		4	1.27	1.26	1.26	1.26	1.24	1.23	1.22	1.18	1.11	1.10	1.08	
	PB	case 1	1.74	1.73	1.72	1.72	1.66	1.56	1.48	1.40	1.25	1.13	1.08	
		2	1.53	1.52	1.52	1.50	1.49	1.41	1.34	1.32	1.31	1.22	1.12	
		3	1.45	1.45	1.44	1.41	1.40	1.39	1.33	1.28	1.24	1.15	1.13	
		4	1.52	1.52	1.51	1.50	1.48	1.46	1.37	1.34	1.28	1.21	1.10	
	SA	case 1	1.88	1.77	1.74	1.66	1.55	1.50	1.39	1.33	1.28	1.18	1.09	
		2	1.46	1.43	1.40	1.36	1.32	1.29	1.26	1.24	1.24	1.21	1.10	
		3	1.35	1.32	1.28	1.26	1.22	1.20	1.16	1.13	1.11	1.05	1.05	
		4	1.34	1.29	1.28	1.26	1.25	1.21	1.18	1.15	1.13	1.11	1.08	
	SB	case 1	1.71	1.69	1.67	1.63	1.56	1.50	1.39	1.32	1.21	1.13	1.06	
		2	1.66	1.53	1.45	1.41	1.41	1.38	1.35	1.31	1.31	1.25	1.13	
		3	1.59	1.50	1.45	1.44	1.42	1.40	1.37	1.32	1.29	1.14	1.14	
		4	1.70	1.68	1.56	1.51	1.46	1.43	1.42	1.35	1.29	1.20	1.08	
Sample number N			6000	3000	1500	750	375	187	93	46	23	11	5	

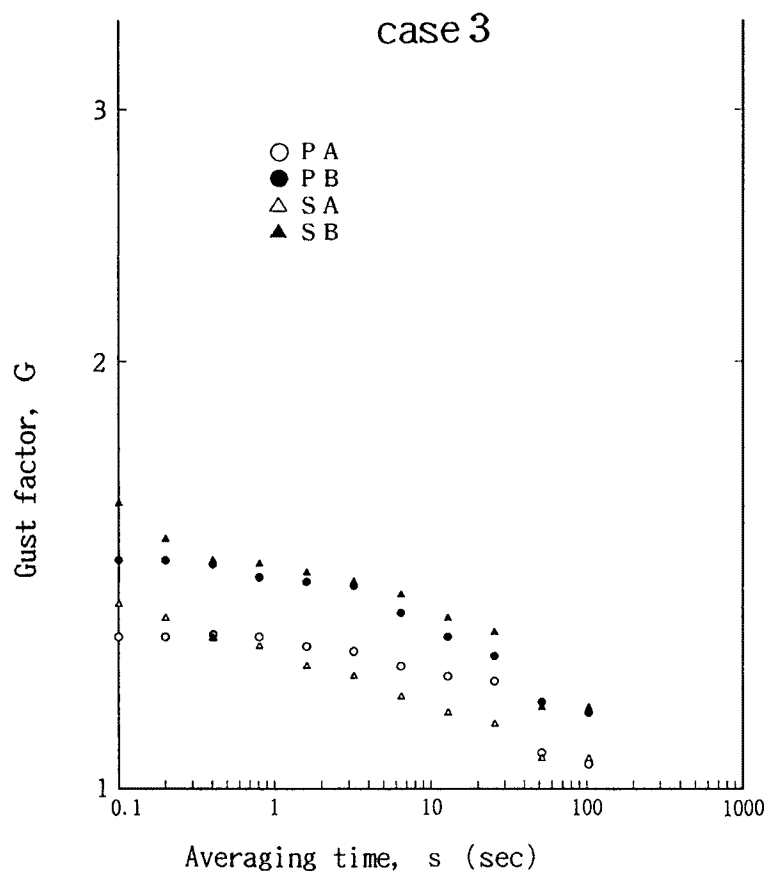


Fig. 1. Variation of the gust factor with averaging time for case 3.

Table 2. Variation of the intensity of turbulence with averaging time

			Averaging time, s (sec)											
			0.1	0.2	0.4	0.8	1.6	3.2	6.4	12.8	25.6	51.2	102.4	
Intensity of turbulence $\sigma_u/\bar{U}$	PA	case 1	0.32	0.32	0.32	0.31	0.31	0.31	0.30	0.28	0.25	0.20	0.08	
		2	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.16	0.15	0.14	0.11	
		3	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.11	0.11	0.09	0.08	0.06	0.02	
		4	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.10	0.10	0.10	0.08	0.07	0.07	
	PB	case 1	0.24	0.24	0.24	0.24	0.23	0.22	0.20	0.15	0.12	0.08	0.06	
		2	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.17	0.16	0.16	0.14	0.13	0.12	
		3	0.21	0.21	0.21	0.21	0.20	0.19	0.17	0.15	0.12	0.11	0.07	
		4	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.19	0.17	0.16	0.14	0.12	0.10	
	SA	case 1	0.27	0.26	0.26	0.25	0.24	0.22	0.20	0.18	0.16	0.13	0.07	
		2	0.15	0.15	0.15	0.14	0.14	0.14	0.13	0.13	0.12	0.11	0.09	
		3	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.09	0.08	0.08	0.06	0.05	0.03	
		4	0.11	0.11	0.11	0.10	0.10	0.10	0.09	0.08	0.07	0.07	0.07	
	SB	case 1	0.20	0.19	0.19	0.18	0.18	0.16	0.15	0.12	0.08	0.06	0.04	
		2	0.18	0.18	0.17	0.17	0.16	0.16	0.15	0.15	0.14	0.13	0.11	
		3	0.25	0.24	0.24	0.23	0.22	0.21	0.20	0.18	0.15	0.12	0.08	
		4	0.23	0.23	0.22	0.21	0.20	0.20	0.18	0.16	0.14	0.11	0.09	

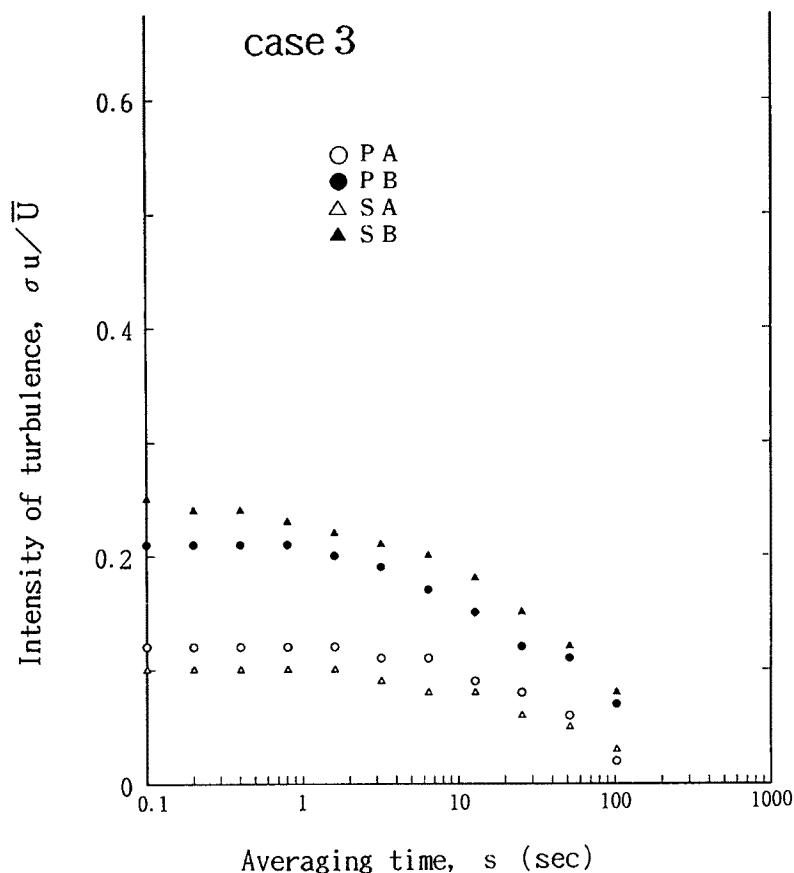


Fig. 2. Variation of the intensity of turbulence with averaging time for case 3.

が短くなるに従って乱れの強さが大きくなっていく傾向があるが、プロベラ型風速計での乱れの強さは評価時間0.1秒から0.8秒程度まではほぼ同じ値である。この原因は先にも述べた通りこの場合1秒弱ぐらいのところに風速計の時定数があり、それより短い周期の変動には追従しないことによると考えられる。

3.2 ピークファクター

風速分布が統計的分布をしていると仮定した場合、風速の評価時間が s 秒である時にその最大瞬間風速 U_{smax} はそのようにして評価した風速値（平均風速 $\bar{U}$ の平均時間が D 秒なら D/s 個のデータ数になる）の統計的最大値であると考えられ、評価時間 s での風速値の標準偏差 σ_s とピークファクターと呼ばれるパラメータ k_s を用いて次のように表される。

$$U_{smax} = \bar{U} + k_s \sigma_s \quad \dots\dots\dots (2)$$

このピークファクターはデータのサンプル数とデータの統計的分布の型に依存する統計学的なパラメータであり、サンプル数が多くなるに従って大きな数値を示すことになる。なお、突風率や乱れの強さは風速が減少するに伴って大きな値を示すが、このピークファクターは、あまり風速にはよらない値となることが実験でも知られている³⁾。風速分布がガウス分布をしているとすると、この値の平均値は正規最大値としてデータ数のみの関数となり、統計数値表にも示されている。

異なる評価時間のデータ組について計算したピークファクターの値を **Table 3** に示す。また、4例のうちケース3についてグラフにしたものを **Fig. 3** に示す。超音波風速計では評価時間が短くなるに従ってピークファクターの値は大きくなっていく傾向があるが、プロベラ型風速計では評価時間0.1秒から0.8秒程度までは変化せずほぼ同じ値である。これは風速変動の分散もまた時定数以下の評価時間では増加しないことによるもので、風速計の追従に限界があることを示している。

3.3 風向の変動

突風率などについて調べたケースに対して今度はその時のプロベラ型風向風速計による風向データの変動について見てみた。プロベラ型風向風速計と超音波風速計について、風向の標準偏差を調べた結果を **Table 4** に示す。また、4例のうちケース3についてグラフにしたものを **Fig. 4** に示す。得られた値を見るとプロベラ型風向風速計でも超音波風速計でも評価時間が短くなるに従って風向の標準偏差は大きくなっている。風速の場合とは異なり、プロベラ型風向風速計でも発信機や変換機特性による短い評価時間における風向の標準偏差の値の飽和は見られない。風向計は2階の応答特性を示して時定数のところで応答関数に山が生じ、風速計のように直ちにカットオフされないため、分散の統計ではその減衰が小さく見える。従って、分散が減じないことが風向計が正しく風向に向いているかどうかについての保証になるためには、さらに別な立場の調査が必要である。

プロベラ型風向風速計においてはポテンシオメータの切り替わりのところで出力電圧値が異常な値を示す。北風の場合、その値がオリジナルデータに混入しているので、短い評価時間に対してはそれにより大きな標準偏差の値を示す可能性もある。このことを考慮して南風の場合のケース1だけについてその値を見れば、この場合は風が弱いこともあって評価時間0.2秒程度で風向の標準偏差の値は飽和していると考えられる。

今後さらに風向計の動特性とその先端に付いた風速計の動特性とを組み合わせた形での応答特性を詳細に調べていく必要がある。

4. お わ り に

以上述べた解析の結果は、風速計の改良によって風速の計測における応答が早くなり評価時間が短くなって最大瞬間風速の測定値が大きくなることと、明確には示せなかったが風向変動のある自然風の中ではプロ

Table 3. Variation of the peak factor with averaging time

			Averaging time, s (sec)											
			0.1	0.2	0.4	0.8	1.6	3.2	6.4	12.8	25.6	51.2	102.4	
Peak factor k	PA	case 1	2.45	2.45	2.45	2.43	2.36	2.35	2.27	2.16	1.80	1.65	0.85	
		2	2.16	2.16	2.16	2.13	2.14	2.12	2.06	1.95	2.13	2.03	1.16	
		3	2.39	2.39	2.35	2.35	2.24	2.24	2.00	2.07	2.31	1.10	1.79	
		4	2.50	2.44	2.44	2.44	2.18	2.19	2.18	1.94	1.41	1.47	1.22	
	PB	case 1	3.12	3.08	3.03	3.03	2.81	2.50	2.40	2.68	2.19	1.70	1.28	
		2	2.88	2.85	2.83	2.75	2.73	2.40	2.06	2.06	2.19	1.70	1.03	
		3	2.13	2.13	2.10	2.01	2.00	2.05	1.87	1.82	1.93	1.38	1.77	
		4	2.57	2.54	2.52	2.52	2.47	2.48	2.15	2.13	1.98	1.82	0.97	
	SA	case 1	3.27	2.96	2.91	2.65	2.33	2.28	1.93	1.87	1.76	1.42	1.27	
		2	3.07	2.88	2.75	2.51	2.23	2.12	1.98	1.83	1.89	1.87	1.03	
		3	3.32	3.12	2.72	2.63	2.33	2.19	1.91	1.64	1.69	1.05	1.58	
		4	3.08	2.73	2.67	2.54	2.50	2.13	2.01	1.86	1.77	1.61	1.23	
	SB	case 1	3.64	3.58	3.56	3.47	3.21	3.04	2.66	2.64	2.70	2.07	1.57	
		2	3.67	3.03	2.62	2.46	2.52	2.41	2.26	2.16	2.30	1.98	1.12	
		3	2.39	2.07	1.91	1.92	1.89	1.92	1.87	1.75	1.95	1.12	1.71	
		4	3.03	3.02	2.56	2.41	2.25	2.18	2.28	2.20	2.00	1.85	0.89	

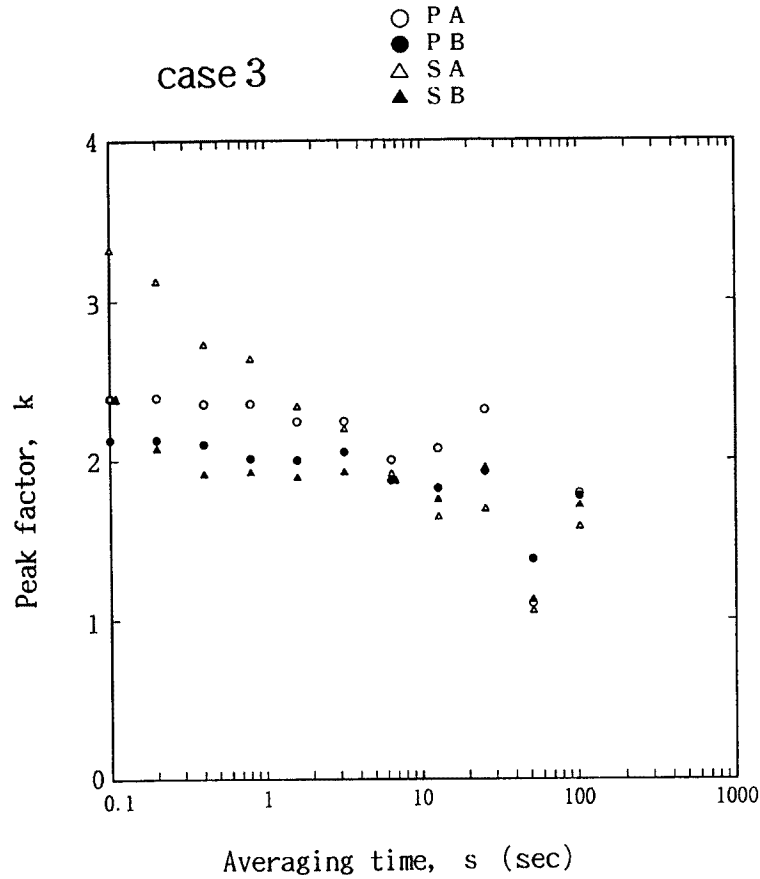


Fig. 3. Variation of the peak factor with averaging time for case 3.

Table 4. Variation of the standard deviation of wind direction with averaging time

			Averaging time, s (sec)											
			0.1	0.2	0.4	0.8	1.6	3.2	6.4	12.8	25.6	51.2	102.4	
Standard deviation of wind direction σ_D	PA	case 1	19.5	19.3	18.7	17.1	15.1	13.3	11.6	9.6	7.4	5.9	4.6	
		2	27.4	22.0	15.0	12.9	11.7	10.8	9.8	9.0	8.0	7.2	6.2	
		3	19.3	14.5	9.0	6.5	5.5	4.7	4.1	3.4	2.7	1.7	1.4	
		4	19.7	15.6	8.4	6.0	4.8	3.8	3.3	2.6	2.1	1.3	0.7	
	PB	case 1	14.3	14.2	13.7	12.7	12.1	11.4	10.6	9.5	8.4	6.6	3.7	
		2	27.3	25.1	17.9	11.5	9.5	8.2	7.2	6.3	5.7	5.1	4.6	
		3	11.0	10.3	8.8	7.8	7.1	6.6	6.1	5.4	4.4	4.0	3.0	
		4	10.8	10.6	8.3	7.1	6.4	5.7	5.2	4.5	3.9	3.0	1.3	
	SA	case 1	15.9	15.2	14.6	14.0	13.2	11.9	10.3	9.1	6.7	5.7	4.3	
		2	9.8	9.7	9.6	9.4	9.2	8.9	8.5	7.9	7.3	6.3	5.2	
		3	7.3	7.2	7.0	6.8	6.5	6.2	5.8	5.3	4.8	3.8	3.5	
		4	6.2	6.0	5.9	5.7	5.5	5.1	4.5	3.7	3.1	2.0	0.8	
	SB	case 1	13.6	13.3	13.1	12.8	12.3	11.8	10.7	9.7	8.4	6.3	4.1	
		2	10.0	9.6	9.4	9.0	8.7	8.4	7.9	7.2	6.3	5.8	5.2	
		3	11.0	10.2	9.6	9.1	8.6	8.0	7.5	6.6	5.4	5.1	3.8	
		4	9.5	8.9	8.3	7.8	7.4	6.8	6.1	5.2	4.5	3.6	1.5	

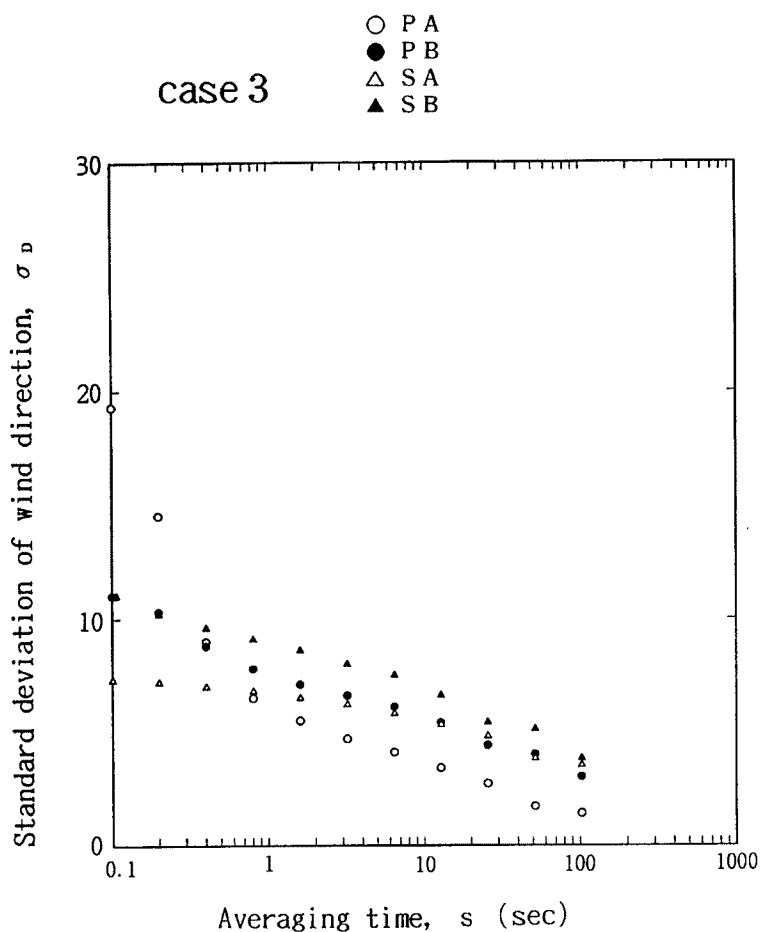


Fig. 4. Variation of the standard deviation of wind direction with averaging time for case 3.

ベラ型風向風速計はその風向計が正しく風向に向いておらず平均風速は過小評価する可能性を示している。これらのことにより突風率の見かけ上の増加が生じていることが考えられる。今後さらにデータの詳細な解析を行うと同時に風速計単体の風洞実験等を行って、実態の解明を進めていく予定である。

参 考 文 献

- 1) 桑形恒男：大型台風にもなった気象官署の突風率の長期変化、天気、Vol. 40, No. 2, 1993, pp. 91-97.
- 2) Mitsuta, Y.: Gust factor and analysis time of gust, J. Meteor. Soc. Japan, Vol. 40, 1962, pp. 242-244.
- 3) Mitsuta, Y. and O. Tsukamoto: Studies on spatial structure of wind gust, J. Appl. Meteor., Vol. 28, 1989, pp. 1155-1160.