

暴風時における風速の垂直成分について

光 田 寧

VERTICAL GUSTS NEAR SURFACE IN HIGH WINDS

by Yasushi MITSUTA

Synopsis

Three dimensional wind components at 10m from the ground in typhoon winds are studied by the use of a propeller anemometer and the new all-weather type bivane, whose free period is about $15/V$ sec and damping ratio is 0.15, at Shionomisaki Wind Observatory of Kyoto Univ.

The data used in this study was obtained on Aug. 23, 1963 when typhoon 6311 was passing over the southern ocean of Shionomisaki. The mean wind speed over the sampling duration (6 min) was 18.3 m/sec. The vertical fluctuating components are smaller than longitudinal ones, and decrease more rapidly with averaging time than those. The ratio is about 20~30% for a few seconds averaged wind speed, but it becomes nearly 10% for 20 or 30sec. And the correlation coefficient between longitudinal and vertical components is about -0.7 .

1. 緒 言

風速の垂直成分は気象現象において重要な役割をはたしている。しかしその重要性にもかかわらず測定が困難であるところから気象学における課題の1つとして残されて来た。特に暴風時にはその測定は困難となり、現在までに実測の記録はほとんど発表されておらず、わずかに Deacon の論文中に引用されたものがある程度に過ぎない。最近の超音波風速計の発達はこの方面の分野において非常に役立つことを期待させるが、その研究は始まったばかりである。従って暴風時の風の垂直成分を測定するための現在のところの手段は従来からのバイベーンの方法以外にない。この論文においては強風用に特に設計されたバイベーンを用いて行なった台風接近時の風の垂直成分の測定の結果を報告する。この測定の目的は構造物に及ぼす風の影響に関する研究の一環として、暴風時の風の乱れの3次元的な構造に関する知識を得ようとするものである。

2. 測器について

従来のバイベーンの多くは風の弱い場合における測定のために作られているので非常に強度が弱く、暴風時の観測にはとうてい使用に耐ええないもので、この研究のために新しいバイベーンが設計された。全天候型のバイベーンを作るためには矢羽根が重くかつ大きくなることはいたしかたない。新しいバイベーンの外観は Fig. 1 に示すとおりである。回転軸から矢羽根の後縁までの長さは 55cm で、水平、垂直の羽根はプラスチックの板で作られ両者の大きさは同じである (約 30cm × 30cm)。垂直偏角の測定範囲は水平から $\pm 45^\circ$ で、その値は水平の風向と共に電気的手段によって記録器に伝えられ、巾 25cm の自記紙の上に記録される。標準の自記紙送り速度は 15mm/hr であるが、スイッチの切換えにより 3600mm/hr の早送りを行なうことも出来る。今回の研究においてはこの早送りの記録が用いられた。

*本文の内容の1部は気象学会昭和38年秋季大会において発表されたものである。

水平の風速の測定は標準的な気象庁型のプロペラ型の風速計 (Koshinvane) によって行なわれた。この風速計の記録紙送り速度もバイベーンと同じになるようにされている。

観測に先立って新しいバイベーンの動特性を京大防災研究所の風洞で検定した。検定は主に種々の風速の下における風向の急変に対する過渡応答に関するもので、そのような状態は主に風洞の風の中で矢羽根をあらかじめ多少風向からずらした位置から急にはなすことによって実現せられた。そのような実験の代表的な記録の例を **Fig. 2 (a) (b)** に示す。これらの結果から自由振動周期 (T_0) と対数減衰率 (λ) を読み取り、それから制動比 ξ と時定数 C を次の関係から計算した。

$$\xi = \frac{\lambda}{\sqrt{\lambda^2 + \pi^2}}$$

$$C = T_0 / 2\lambda$$

この場合の時定数というのは矢羽根の減衰振動の包絡線の振幅が $1/e$ に減衰するに要する時間のことである。計算の結果は **Table 1** に示すとおりになる。水平、垂直の両成分の特性はよく似ており、さらに自由振動同期と時定数は風速の関数であり、表の右端に示したような風速に反比例する形で近似的に示される。

矢羽根の変動する風向の中での運動方程式は、これらのパラメーターを用いて次のような標準型に書くことが出来ることが知られている²⁾。

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + 4\pi \frac{\xi}{T_0} \frac{d\theta}{dt} + \left(2\pi \frac{1}{T_0}\right)^2 \theta = \left(2\pi \frac{1}{T_0}\right)^2 \psi(t) \quad (1)$$

ここで $\psi(t)$ は真の風向変化であり θ は矢羽根の回転位置を示す。この型の方程式の解については既に詳しく研究されている³⁾。その結果によれば過渡応答について考えた場合、このバイベーンのように制動比が0.15の場合には行過ぎ量は60%にも達する。もっともこの事は当然ながら先きの **Fig. 2** に示された実験から直接求められるものである。この場合の周波数特性は **Fig. 3** に示したような値を示す。すなわち、風向変動の周期 (T) が矢羽根の自由振動周期 (T_0) の3倍程度以上長ければ利得はほぼ1であると見なしても良いと考えられるが、それより短い周期では利得は周期によって異なり、 $T = T_0$ という状態で利得は極大値を示しほぼ3になる。さらに短い変動に対しては利得は減少して行く。従ってこの矢羽根を用いた場合には風向変動の周期が $45/V$ ($= 3 \cdot T_0$) 秒程度以上長い場合でなければ正しい風向変動を測定することが出来ないということになる。

上に述べたような制限はバイベーンによって得られた記録を解析する上に大きな問題となる。というのは実際自然の風においては上に示した限界、すなわち1秒ないし1秒以下の短い周期の風向の変動は無視出来

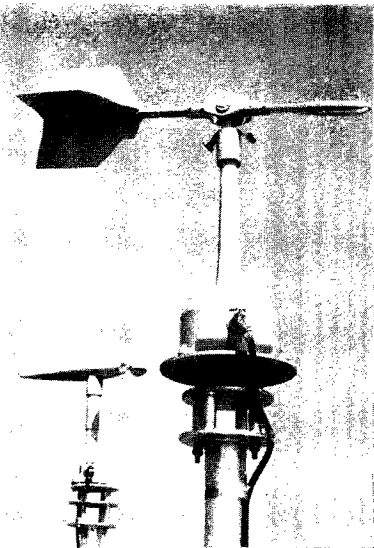


Fig. 1 A view of the new all-weather type bivane and propeller anemometer.

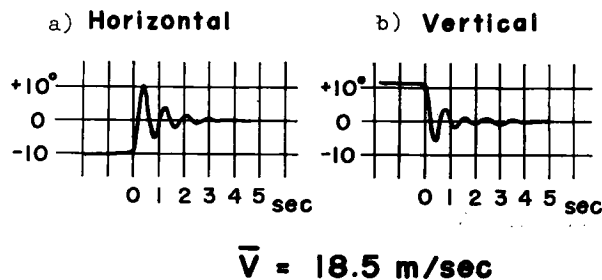


Fig. 2 Transient response of the bivane to the sudden change of wind direction in the wind tunnel.

Table 1 CHARACTERISTICS OF NEW BI-VANE

Wind Speed $\bar{V}$ m/sec		5.0	10.5	18.5	29.5	Mean
Vertical	Free Period, T_0 sec	2.78	1.52	0.77	0.57	$15./2\bar{V}$
	Damping Ratio	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
	Time Constant sec	2.9	1.6	0.8	0.6	$16.1/\bar{V}$
Horizontal	Free Period, T_0 sec	2.80	1.52	0.85	0.58	$15.7/\bar{V}$
	Damping Ratio	0.15	0.14	0.14	0.13	0.14
	Time Constant sec	2.9	1.6	1.0	0.7	$17.4/\bar{V}$

るほど小さくはなく、実際の記録の上においてもその風速の自由振動周期に対応した変動が大きく現われてくる。たとえば Fig. 6 に示した今回の研究の対象となった日の代表的な記録の上でもその時の風速 (c.a. 15m/sec) に対応したほぼ 1 秒 ($\approx 15/\bar{V}$) に対応する変動が卓越しているのが見られる。この欠点はこのバイベーンのみでなく全ての矢羽根による風向変動の観測において見られるもので、現在のような形の矢羽根を用いる以上制動比がもっと大きくて行過ぎの生じないような風向計を製作することは困難である。

風速計の特性も同時に風洞において検定されたが*、風速計の時定数はバイベーンよりはずっと小さくて半分以下である。その上過渡応答時における行過ぎ、あるいは周波数特性の上における山についてもほとんど問題になくとも良いことが知られた。そしてこの風速計は風速が 20m/sec 近くにもなれば 1 秒程度の変動にはほぼ追従して行くものとみてよい。

また風速計のプロペラの軸に対して風が斜めに当たる場合に風速計の示す風速がどのような値をとるかということも同時に風洞で検定を行なった。このことはプロペラの軸は水平の面内においてのみしか回転しないところから垂直分速度の算定において重要な意味を持つものである。実験の結果は Fig. 4 に示されたとおりである。この図では種々の風速の下における結果を風速計の示す風速の真の風速に対する比の形でまとめて示してある。この図からも明らかなように、風速計の示す風

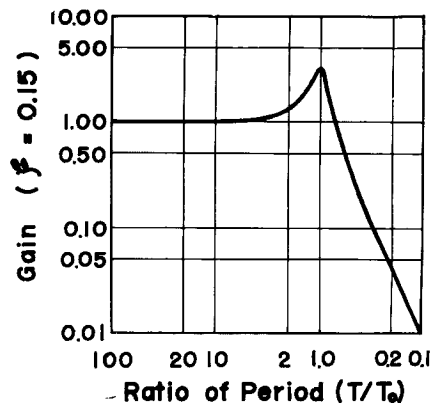


Fig. 3 Frequency response of the bivane, computed from the results of wind tunnel experiments shown in Table 1.

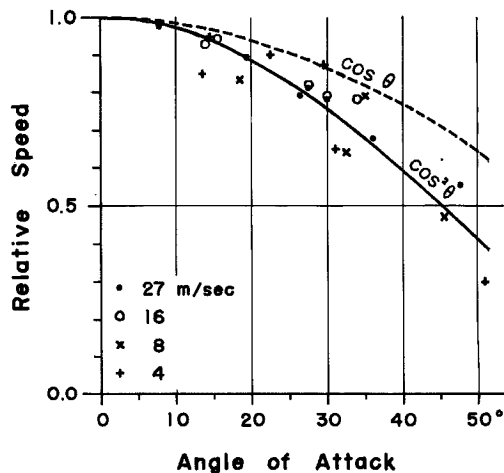


Fig. 4 Characteristics of the propeller anemometer to slant wind.

*この風速計の特性に関する研究の1部は著者によって先きに報告されている。

速は必ずしも風速のプロペラの軸の方向の分速度ではなく、むしろ偏角の余弦の自乗に比例した変化の仕方を示す。このことは既に Panofsky and McCormic⁵⁾によっても指摘されている。

しかし風向の偏角が十分小さければ簡単に風速計は風速の分速度を示していると考えても大きな誤差になることはない。

3. 観測及びその結果

上述のようなバイベーン及びプロペラ型の風向風速計を京都大学防災研究所の潮岬風力実験所⁶⁾の測風塔に取り付けて、昭和37年秋より観測を開始した。この実験所は潮岬の廃止された小さな軍用飛行場の滑走路の南端に位置しており(Fig. 5 参照)、測器の地上高は10m 測器は南北に並んでその間隔は2mである(Fig. 1 参照)。

この研究に用いた観測資料は昭和38年8月28日14時19分から26分までの間のもので、この時には台風6311号が潮岬の南方洋上を東進中で、それに伴う強い北風が吹いていた。観測時の天気は雨で、現地気圧は約985mb、そして気温は約28°Cであった。観測時間は計6分間で、この間の水平風速の平均値は18.3 m/sec、平均風向は北より東に17°であった。この状態における風上側の状態は数百メートルぐらいの範囲内には大きな障害物はなく、平たんな芝生あるいはさつまいも畑である。

観測は1秒間1mmの記録紙早送りによって行なわれたが、その記録の1例を示したものが Fig. 6 である。これらの記録のうちでプロペラ型風向風速計による風向の記録はバイベーンの水平風向と同じものを測定していることになるので今回の解析には利用していない。さきにも述べたとおり自由振動が大きく

現われているので、風向記録の読み取り値をそのまま解析に用いることは出来ない。この場合における自由振動周期はほぼ0.8秒で、さきに述べた規準から考えて3秒程度以上の周期については問題がないと言えるから、解析には多少問題は残るがそれ以上の周期の変動についてのみ考えることとし、3秒間毎の平均の風向を求めることとした。この際、平均風向を求めるには平均する時間の間の記録の上の山及び谷での値を全て読み取ってその値を平均し、その時間の平均の風向とした。そして上下方向の偏角については水平方向を原点とし、上昇方向を正として読取り、水平方向については全平均風向のN17°Eを原点として西寄りの場合を正とした。一方風速計については1秒間毎の平均値を目で読み取り、その3秒間の平均値を求めた。

このようにして求められた上下方向の偏角の最大値は15度で、平均偏差は約2度であった。この程度の偏角ならば、さきに述べたとおり風速計で測定した風速の値は風速の水平成分を示していると考えても差はない。従って風速の垂直成分(w)はその時刻の水平風速に偏角の正接を掛けることによって求められ、風速の水平面内の風向方向(u)及び直角成分(v)はそれに水平風向の余弦と正弦を掛けることによって得

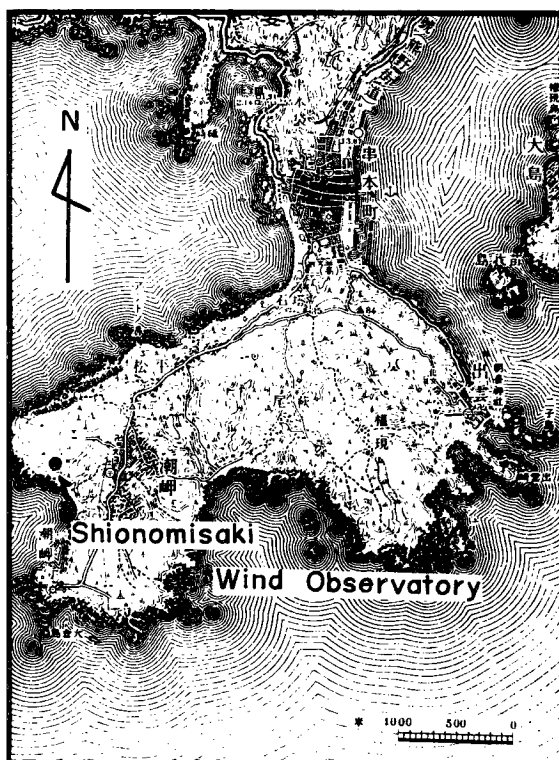


Fig. 5 General position of the observation site, the Shionomisaki Wind Observatory of Kyoto Univ.

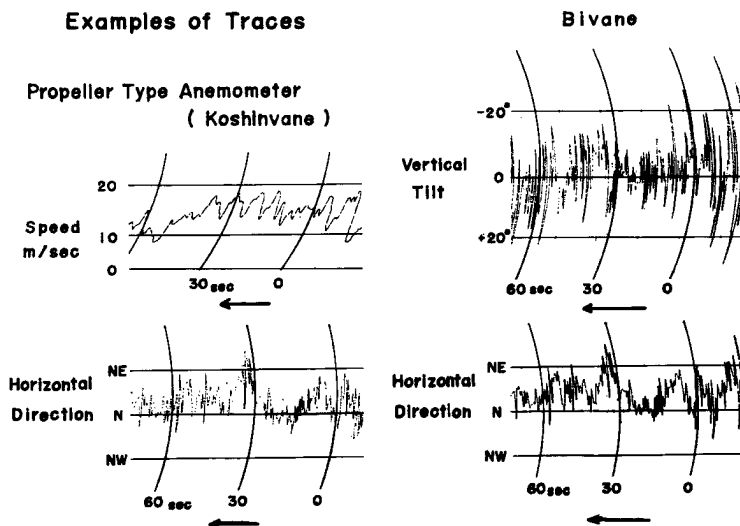


Fig. 6 Examples of traces of the propeller anemometer and bivane.

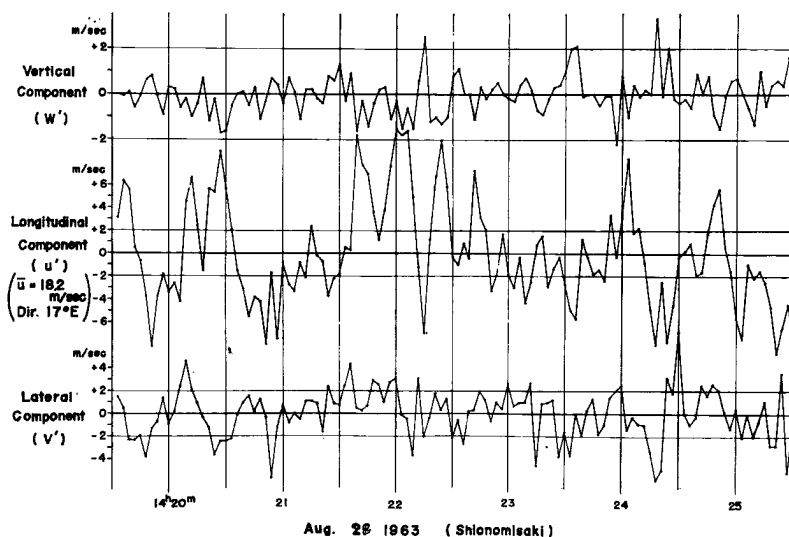


Fig. 7 Results of the observation on Aug. 28 1963.

られる。風向方向成分の平均値は 18.2 m/sec となり、各成分の変動値の時間変化を図示したものが **Fig. 7** である。この場合 u は風下に向かって正、 v は風下に向って左側に正、 w は上に向かって正である。計算された、 u' 、 v' 及び w' の極大値は各々、 $+11.0$ 、 -7.2 及び $+3.3 \text{ m/sec}$ である。これらの値は各々平均風速の 60、40 及び 18 % に相当する。また各変動値の Root Mean Square は各々、4.43、2.21 及び 0.81 m/sec となる。すなわちこれらの値によれば垂直方向の変動成分は極値において風向方向成分の $3/10$ 、RMS においてはほぼ $1/5$ であると言える。一方風向直角方向の成分は風向方向成分のほぼ $1/2$ である。風の弱い場合について Taylor ⁷⁾ の研究した古い結果によれば地上 21 ft の高さではすでに等方的であると考えても

よいとされている。しかし今回の結果ではとうてい等方的であるとは言えない。しかし強風時においても160mといった十分高いところでは Deacon が述べている¹⁾ とおりかなり等方に近いようであるから、Taylor の結果との差は主に風速によって非等方的と見なければならぬ 高さを変える必要があるという当然な理由によるものであろう。事実この場合の風速評価時間は3秒であるが、これと平均時速との積はほぼ50m となり、これが分解出来る 最低の波長とすれば観測高度の5倍も大きいということになってしまう。従って上のような結果になることも必然的なものであるということも出来よう。

これらの3つの変動成分の間の相関係数も同時に調べられた。 u' と w' との間の相関係数 ($Ru'w'$) は -0.62 である。このことは突風は下降流を伴い、風の弱くなった時には上昇流を伴っていることを意味する。このことは風の弱い場合、あるいは強風時の高いところで確認されていることとも一致する。一方 u' と v' との相関 $Ru'v'$ 及び v' と w' との相関 $Rv'w'$ は各々 $+0.13$ と -0.19 で、いずれも $Ru'w'$ に比して小さく有意なものとは認め難い。

4. 風速評価時間による特性の変化

前節に述べた結果は3秒間の平均風速に対する性質である。しかしこの風速評価時間の差によってその特性に差が出て来ることが前節の結果からも予測される。前述の資料より6,12及び24秒の平均値を求め、各々について前節におけるのと同様な特性を計算した結果は **Table 2** に示すとおりである。この表には3秒

Table 2 The characteristic of the observed fluctuating components.

Averaging- Time sec	Extremes m/sec Max. and (Min.)			Standard Deviation m/sec and (Intensity of Turbulence)			Correlation Coefficient		
	u'	v'	w'	u'	v'	w'	$Ru'v'$	$Ru'w'$	$Rv'w'$
1	+13.8 (-9.3)			4.85 (0.27)					
3	+11.0 (-8.7)	+5.9 (-7.2)	+3.3 (-2.2)	4.43 (0.24)	2.21 (0.12)	0.87 (0.048)	+0.13	-0.62	-0.19
6	+10.6 (-7.6)	+4.6 (-4.5)	+2.1 (-1.7)	4.20 (0.23)	1.80 (0.099)	0.69 (0.038)	+0.27	-0.70	-0.28
12	+10.0 (-6.6)	+2.8 (-1.9)	+1.1 (-1.2)	3.77 (0.21)	1.28 (0.070)	0.50 (0.028)	+0.41	-0.74	-0.39
24	+4.8 (-4.7)	+1.3 (-1.9)	+0.5 (-0.7)	2.69 (0.15)	1.00 (0.055)	0.31 (0.017)	+0.31	-0.82	-0.13

平均の風速の特性及び1秒平均の水平風速の特性を u' の値に近似出来るものとして各々の欄に記入してある。この近似は風向変動がさして大きくないところからあまり誤差は大きくない。この表にはさらに RMS と平均風速（この場合18.2 m/sec）との比として定義される Intensity of Turbulence も同時に示してある。

この表からみると、垂直及び直角方向の変動成分、特に前者は風速評価時間の増大と共に急速に減少して行くことが明らかに見られる。3秒平均風速については Iw'_3 は Iu'_3 の1/5であるのに反し、24秒平均をみると Iw'_{24} は Iu'_{24} の1/12にもなる。また Iv'_3 は Iu'_3 のほぼ1/2であるが Iv'_{24} は Iu'_{24} の1/3近くになっている。この Intensity of Turbulence の風速評価時間との関係を図示したものが、**Fig. 8** である。この変化の様子は図が示したようなほぼ直線で近似出来る。今、仮りにこの関係が時間の短い方に外挿する

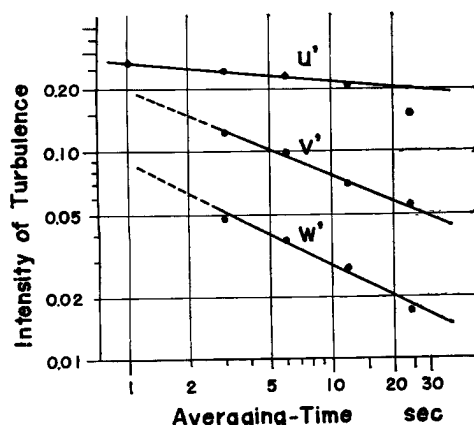


Fig. 8 Variation of intensity of turbulence with averaging-time.

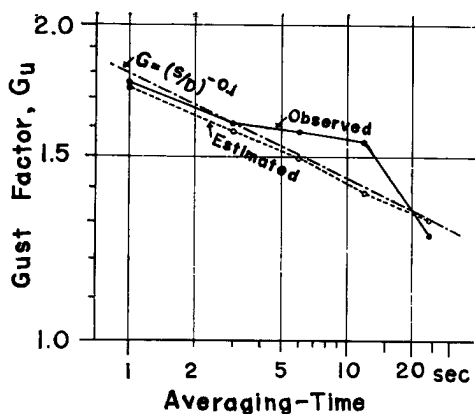


Fig. 9 Variation of longitudinal gust factor with averaging-time.

ことが可能であるとすれば 0.1 ないし 0.5 秒ぐらいのところ
で 3 つの分値の変動値はほぼ同じ値をとることになる。この
ことは波長が観測高度の 10m とほぼ等しくなる周期、すな
わちこの場合は $10/18 \approx 0.5$ 秒 ぐらい以下の 周期の乱れにつ
いては等方的であるという考えを支持するものとも見られな
いこともない。

一方、各方面の成分の極値 (u 方向については $u_{\max} = \bar{u} + u'_{\max}$) を風向方向の平均風速で割ったものを突風率と定
義して、各々の成分について突風率の評価時間に対する比を
求めたものが Fig. 9 及び Fig. 10 である。Fig. 9 は風
向方向の成分に関するもので黒丸が Table 2 に示した実
測の値に基づくもので、白丸は各々の評価時間に対応する
Intensity of Turbulence に基づいて次のような関係⁸⁾に従
って計算されたものである。

$$G_{us} = 1 + K_s I_{u's}$$

ただし、ここで K_s は $P_r\{x \geq k_s\} = S/D$ となるような K_s で、 x は標準正規分布関数、 S は風速評価時
間、 D は全観測時間である。一方鎖線で示したのは先きに著者が示した 突風率と風速評価時間との間の実
験的関係式⁹⁾

$$G_{us} = (S/D)^{-p}$$

に他の場所の地上 10m で得られた P の値である 0.1 の値を入れたものの適合性を示したものである。実測
値の 10 秒程度のところに少し山が出ているが、それ以外の部分では 3 者の一致はかなり良い。

また垂直方向及び直角方向のこの種の突風率は従来調べられていなかったものであるが Fig. 10 に示す
とおり風速の評価時間と共にかかなり急速に変化している。しかも近似的には風向方向の場合と同じようにこ
の範囲では風速評価時間の中間数に比例する形になっている。また白丸で示した推定値は風向方向と同様に
Intensity of Turbulence から次のようにして計算したものである。

$$G_v = K_s I_{v's}$$

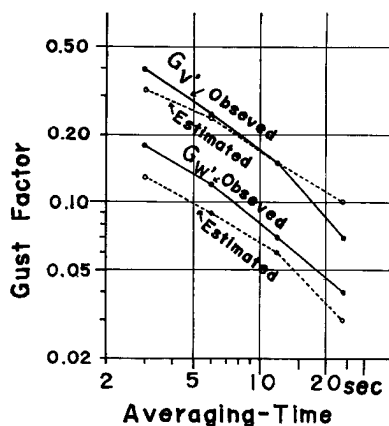


Fig. 10 Variation of lateral and vertical gust factors with averaging-time.

$$G_w = K_s I_{w's}$$

ただし K_s は前と同じ値である。 G_v については両者はほぼ近いとみても良いであろうが、 G_w については両者には系統的な差が出ている。このことは w' についてはここに仮定したような正規分布が適当でないということを意味する。いずれにしてもこの関係を左右に外挿して考えれば1秒程度の短周期については垂直方向の突風率も0.3ないし0.4となり、さらに風向直角方向については0.6ないし0.7という大きな値を示すことになるので、実際上の問題として無視出来なくなるであろうし、また20~30秒という長い時間を考えるならば垂直方向の変動も風向直角方向の変動も平均風速の10%以下になってまず問題としなくても良いということになる。しかしこの観測は1例だけのものであり、しかも解析を行なった風速評価時間の範囲が狭いのので、ここに述べた考察もさらに多くの観測と比較した上でなければ一般的な結論と考えるのは早計である。

5. 結 語

1963年8月28日の台風接近時に潮岬風力実験所において観測された風の垂直変動値は上に述べたようなものであるが、その主な結果を要約すれば、暴風時における地上10m付近における風の垂直変動成分は数秒間の平均値については風向方向の変動の20~30%程度のものである。この比は風速の評価時間が増大すると急速に減少し、20~30秒程度にもなれば10%以下になる。逆に1秒以下の短い変動については垂直変動成分も増大し、ほぼ等方的になると考えてよいというような徴候がみられる。

おわりに本観測を行なうに当り種々の御教示を頂いた石崎潑雄教授及び山元龍三郎助教授に深く謝意を表すると共に、観測に協力して頂いた川村純夫、許昌九、西田和弘の諸氏及び記録の読み取り、整理さらに原稿の作製を手伝って頂いた草壁秀子氏に感謝する次第である。

参 考 文 献

- 1) Deacon, E.L.: Gust Variation with Height up to 150m. Quart. J. Roy. Met. Soc., Vol. 81, p.562, 1955.
- 2) 佐貫亦男: 地上気象器械, 共立出版, p.17, 1953.
- 3) 磯部 孝: 測定技術, 岩波書店, p. 66, 1958.
- 4) Mitsuta, Y.: Studies on Peak Gust, Geophysical Papers Dedicated to Prof. K. Sassa, p. 285, 1963.
- 5) Panofsky, H. and R.A. McCormick: Properties of Spectra of Atmospheric Turbulence at 100 meters. Quart. J. Roy. Met. Soc., Vol. 80, p.546, 1954.
- 6) 棚橋諒, 石崎潑雄, 光田寧: 潮岬風力実験所における風力観測用測器について, 京都大学防災研究所年報, 第7号(発表予定)
- 7) Taylor, G.I.: Turbulence. Quart. J. Roy. Met. Soc., Vol. 53, p. 201, 1927.
- 8) 光田 寧: 大気下層における風の構造に関する2, 3の問題, 海と空, p.39, Vol.75, 1963.
- 9) Mitsuta, Y.: Gust Factor and Analysis Time of Gust, J. Met. Soc. J. Ser. II, Vol. 40, p. 242, 1962.