

プロペラ型風速計の斜風に対する特性について

光 田 寧・蒲 生 稔
吉 川 祐 三・藤 谷 徳之助

ON THE CHARACTERISTICS OF THE PROPELLER TYPE ANEMOMETER IN THE WIND WITH THE VARIOUS ANGLES OF ATTACK

By Yasushi MITSUTA, Minoru GAMO, Yuzo YOSHIKAWA
and Tokunosuke FUJITANI

Synopsis

The static and dynamic response characteristics of the Gill type anemometer in the winds with the various angles of attack are discussed. New directional correction factors for static sensitivity and dynamic response of the anemometer have been obtained by the wind tunnel experiments. The results of the wind tunnel experiment were compared with the results of field experiments, which shows good agreement between both results. The principal result of the present study is that the time constant of the propeller anemometer is almost inversely proportional to the total wind speed even in the aslant wind disregard to the angle of attack.

1. 緒 言

風速の3次元的な各成分の測定, 特に鉛直成分の測定についてはバイベーンやX型熱線風速計等, 従来から多くの方法が試みられてきているが, 測定精度が悪い, あるいは野外での観測に適さない等種々の問題点があった。しかし, 近年超音波風速計が開発されて^{1), 2)}, 精度の高い測定が可能となってきた。一方, 従来のプロペラ型風速計のプロペラの形状を改良して風速の特定方向の分値を測定しようとする努力もなされており, 米国においてプロペラの回転軸方向の風速成分を測定する実用的な測器, いわゆる Gill 型風速計が開発され³⁾, 各国で各種の観測に用いられる様になってきている⁴⁾。この Gill 型風速計の測定結果を他の計測結果と対比する時の参考にするため, その静的及び動的な特性について風洞中及び自然風中で測定した結果について本論文で報告する。

2. 風洞中での Gill 型風速計の特性の実験

Gill 型風速計の特性を調べるために, 京都大学防災研究所のゲッチングン型風洞(吹き口, 1.0m×1.0m)を用いて風洞気流中における静的及び動的な特性を測定した。今回の実験に用いた Gill 型風速計は R. M. Young Co., 製の Model 27100 で発泡スチロール製の4枚羽根(直径7インチ)のものである。別に参考のため小形4枚羽根(プロペラ直径6インチ)のものも同時に比較を行ってみた。この風速計(標準型のもの)の外観を Photo. 1 に示す。

(a) 風洞中での静特性の実験

風洞中においてこの Gill 型風速計のプロペラの回転軸を風洞気流に平行に設置して, 風洞風速と出力電圧(プロペラの回転数)との関係を測定した。その結果を Fig. 1 に示す。図の中の○印が今回測定に使用した風速計で得られた値である。風速が0~13 m/sec の範囲では両者の直線関係は成立している。この両者

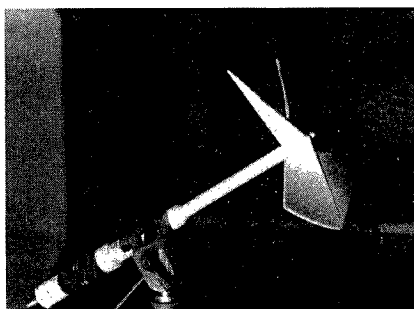


Photo. 1 A view of Gill anemometer.

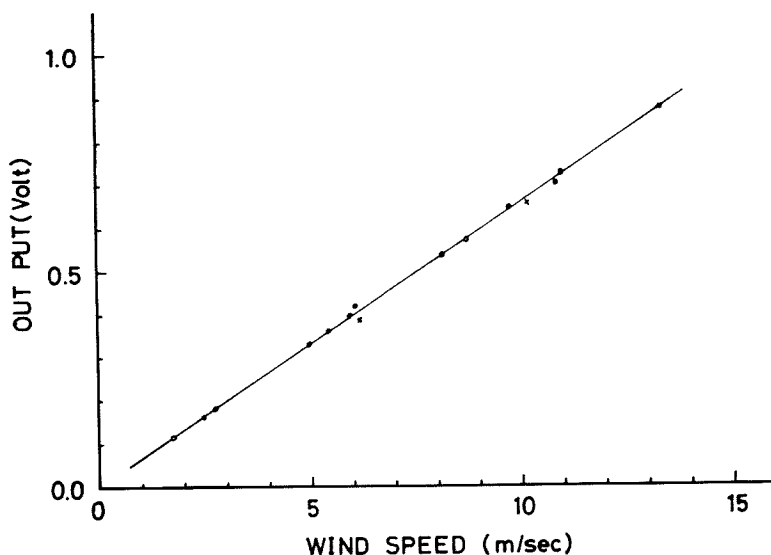


Fig. 1 Relation between the wind speed and the out put of Gill anemometer.

の関係を示す直線は原点を通過しており、Holmes et al.³⁾ の測定結果とも一致しているが、低風速での測定がないので起動風速がいくらかは、はっきりしていない。しかし、Young 社の取り扱い説明書⁵⁾ によればこの風速計の起動風速は 0.2 m/sec となっている。図の中の×印は参考のために行った同社製同型でプロペラの直径が 6 インチの風速計の測定結果であるが、プロペラのピッチが同じであるところから、プロペラの直径が異ってもその回転数は変わらないものと考えられる。

次に、風速計のプロペラの回転軸を風洞気流に対して種々の角度に設定して斜風に対する静特性を調べた。その結果を Fig. 2 に示す。横軸は迎え角で風がプロペラの回転軸に平行の場合を 0° 、直角の場合を 90° とし、風がプロペラの上側からあたる場合を正としてある。縦軸は風速計の指示風速 u_i の、同じ風で迎え角 0° としたときの指示風速 U に対する比を目盛っている。この図で○印は風洞風速が 5.1 m/sec、×印は 9.3 m/sec の場合の実験結果である。実験結果は風速によらず一つの曲線上にあることが判る。今、この風速計によってプロペラの回転軸方向の真の風速分値が測定されているものとする、この u_i/U の値は余弦曲線に一致するはずである。これに関しては迎え角 θ が 30° までは $\cos \theta$ によく一致するという測定結果もあり⁶⁾、また、 $\cos^2 \theta$ で近似できるとい測定結果もあるが⁷⁾、Fig. 2 から明らかな様に今回の測

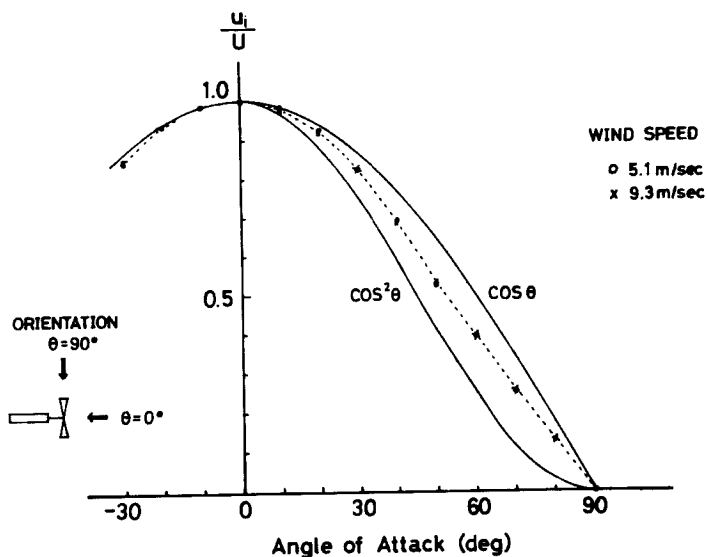


Fig. 2 Directional characteristics of the Gill anemometer.

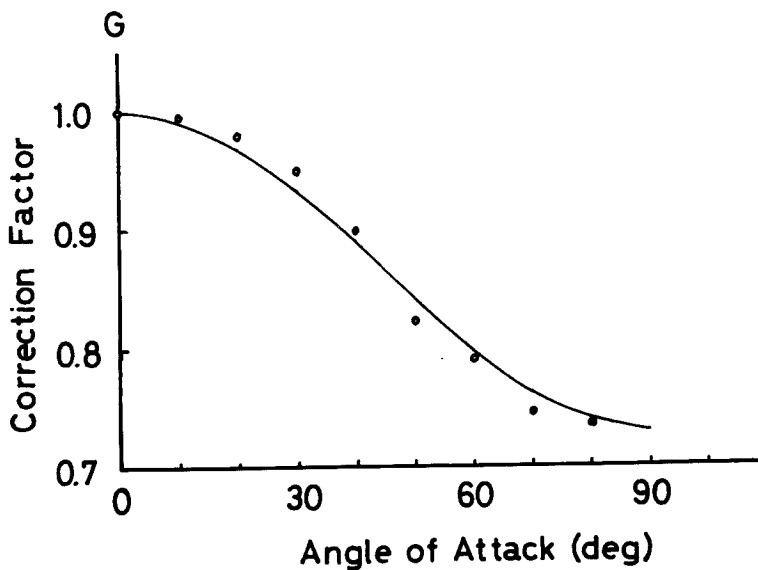


Fig. 3 Variation of the correction factor with the angle of attack.

定結果は $\cos \theta$, $\cos^2 \theta$ のいずれの曲線にも一致せず、両者の中間にある。いずれにしても、この風速計はプロペラの回転軸方向の真の風速分値を直接測定しているのではないことは確かである。そこでこの風速計の指示値 u_i は真の風速分値 $U \cos \theta$ に或る補正係数 $G(\theta)$ (迎え角 θ の関数) を掛けたもので表現されるとすると、次の様に書ける

$$u_i = U \cos \theta G(\theta).$$

従って、この $G(\theta)$ を別に知っておれば真の風速分値を求めることが可能となる。今回の測定で得られた実

験値から計算した $G(\theta)$ の値を Fig. 3 に示す。風速の補正を行うに際して Young 社の取り扱い説明書⁵⁾によれば $G(\theta)$ を一定として補正を行うように説明されているが、Fig. 3 から判る様に $G(\theta)$ を一定として取り扱うには多少無理がある。そこでこの $G(\theta)$ の関数形を実験的に求めることを試みた。即ち、 $G(\theta)$ の形を Fig. 3 の値の分布より考えて、 $A \cos 2\theta + B$ で近似できると仮定し、実験結果から最少 2 乗法で係数 A, B を決定した。その結果得られた関数形は次の様になる

$$G(\theta) = 0.14 \cos 2\theta + 0.86.$$

Fig. 3 の中に記入した曲線がこれである。得られた $G(\theta)$ を示す曲線は詳しくみると実測データとは必ずしも一致していないが、全体的な傾向は非常に良く一致しており、従来の $G(\theta)$ を一定とする補正法に比較して大幅に改良されているものと考えられる。

さて、ここで 2 台の Gill 型風速計を水平面内に直交して (x, y 方向) 設置して、水平 2 成分の風速分値 u_x, u_y を測定する場合 (風速 U , 風向は x 軸方向と θ の角をなす)、2 台の風速計の指示値をそれぞれ u_{ix}, u_{iy} とすると、これらは次の様に書ける

$$\begin{aligned} u_{ix} &= U \cos \theta G(\theta) = u_x G(\theta), \\ u_{iy} &= U \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) G\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) = u_y G\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right). \end{aligned}$$

従って、真の風速分値は次の様になる

$$\begin{aligned} u_x &= \frac{u_{ix}}{2A \cos^2 \theta - A + B}, \\ u_y &= \frac{u_{iy}}{-2A \cos^2 \theta + A + B}. \end{aligned}$$

しかし、ここで問題となるのは上記の式に含まれる $\cos \theta$ は、真の風速分値 u_x, u_y を用いて求められるものであり、自然風中における観測においては測定値から求めることができないことである。従って、この $\cos \theta$ の値は風速計による指示値 u_{ix}, u_{iy} を用いて近似的に求めざるを得ない。即ち、 $\cos \theta$ は近似的に次の様になる

$$\cos \theta \simeq \frac{u_{ix}}{(u_{ix}^2 + u_{iy}^2)^{1/2}}.$$

この場合、 u_x, u_y のかわりに u_{ix}, u_{iy} を用いて求められた $\cos \theta$ の値は、誤差が最も大きくなる $\theta = 45^\circ$ のときでも相対値にして約 1% にしかならず、風速の補正を行うにあたっては実用上殆んど問題はないものと考えられる。

(b) 風洞中での動特性の実験

プロペラ型の風速計の動特性については、風がプロペラの回転軸に平行に吹いた場合は近似的に線型一階の応答をするものとして従来から取り扱われているが⁷⁾、風がプロペラに斜めにあたった場合の応答については詳しいことは判っていないのが現状である。そこで、この Gill 型風速計について前述の風洞中で風が斜めにあたった場合の過渡応答特性について風洞実験を行ってみた。Fig. 4 は風速計を斜めにおいて風洞中で Step 型の風速変動を与えた場合 (一定風速の中でプロペラを止めている状態から急に自由に回転させる) の過渡応答を示したものであるが、風が斜めにあたった場合も近似的に線型一階の応答をしているものと考えてもよさそうである。これに関しては後に述べる様に自然風中における観測から求めた周波数応答からもその妥当性が確認されている。それで以後の風洞中での動特性の測定の解析においては、風速計は斜めの風に対しても線型一階の応答をするものとして解析を行った。

従来の研究⁷⁾によればプロペラ型風速計を軸が風に平行な方向で用いた場合、その時定数は風速に逆比例し、時定数と風速の積として特性距離 (characteristic length) と呼ばれる風速に関係しない定数を定義することができる。この特性距離はプロペラの形状と材質から決定される定数であり、各々の風速計に固有な値である。即ち、迎え角 θ が 0° のときの時定数を T_0 とし、その時の風速を U とすると特性距離 L は次の様に定義され、風速に関係しない、

$$L = UT_0 = \text{const.}$$

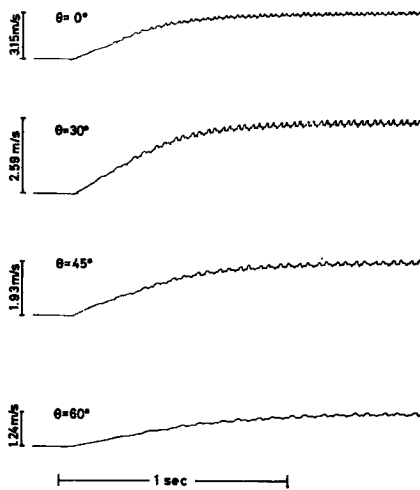


Fig. 4 An example trace of the transitional response experiment of the Gill anemometer.

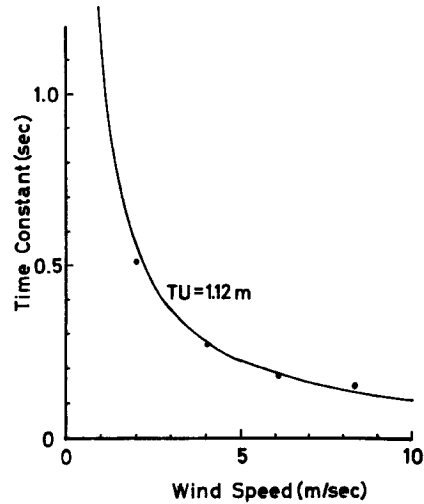


Fig. 5 Relation between the wind speed and the time constant.

今回のプロペラについて軸を風に平行において実験的に求めた時定数 T_0 と風速の関係をもとめた結果は Fig. 5 に示すとうりであり、その特性距離は 1.12 m となる。

一般に風速計に対して風が斜めに当たった場合にも上に述べた様に時定数が決定でき、その値を T_i とすると、この時定数 T_i が風速 U 、及び迎え角 θ に対してどのような性質を示すか、ということが問題となる。この点についての理論的な解答は未だに与えられていないので、これは実験的に決定する他ない。実際に Gill 型風速計を風洞中に設置して、種々の風速、種々の迎え角の条件の下で Step 型の風速変動を与えて実験し、得られた過渡応答特性から時定数 T_i を計算した。そしてその時定数とその時の風洞風速 U に対して風速計が迎え角 0° の場合の時定数 T_0 との比、 T_0/T_i を迎え角の関数として示したのが Fig. 6 である。得られた値は風洞風速には関係なく、一つの曲線上に分布しており、迎え角が 0° のときは当然ながら 1 であり、角度の増大と共に小さくなっている。これらの値から先の方向特性を示す式と同じ形を仮定し、最小 2 乗法で求めた実験式は図中に鎖線で示したとおりで、次の様な形になる

$$\frac{T_0}{T_i} = 0.22 \cos 2\theta + 0.78.$$

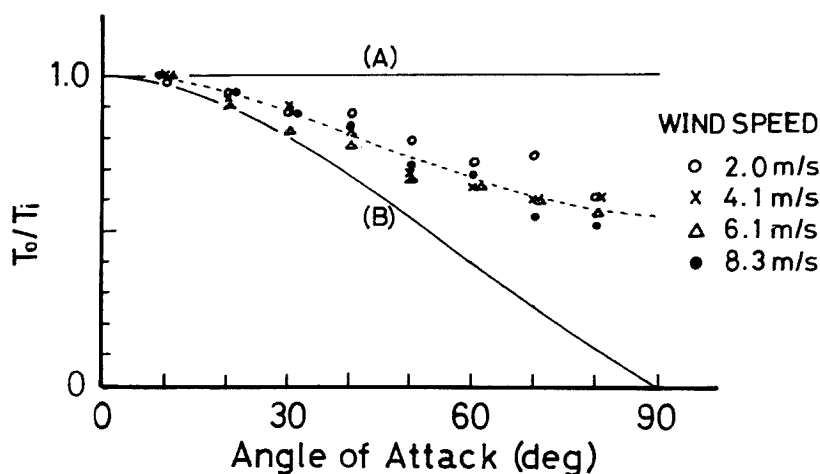
Camp et al.⁶⁾ はこの関係が、迎え角の余弦で説明される、即ち、時定数 T_i は実際にプロペラが示している平衡速度 $U \cos \theta G(\theta)$ (但し、Camp et al. の場合は $G(\theta)=1$) で決まると考えた。この考えに従えば次の関係が成立する

$$L = UT_0 = U \cos \theta G(\theta).$$

従って T_0/T_i は次の様になる

$$\frac{T_0}{T_i} = (A \cos 2\theta + B) \cos \theta \quad (A=0.14 \quad B=0.86).$$

この T_0/T_i の値は Fig. 6 に曲線 (B) で示したとうりである。この考えによれば迎え角が 90° に近づけば時定数 T_i は非常に大きな値になることになり、実験値からの差は大きくなってしまふ。実験の結果からみると、図に示すとうり迎え角が大きくなっても T_0/T_i は 0 に近づかず、一定の値となっていることからこの考えは現実的ではない。むしろ約 40% の誤差を認めるならば、 T_0/T_i は迎え角にかかわらず一定であり、全風速 U のみで時定数が決まるとすることができ、むしろその方が応用するのにも簡単である。この場合

Fig. 6 Relation between the angle of attack and T_o/T_i .

次の様に考えることになる

$$L = UT_o = UT_i \quad (T_o/T_i = 1).$$

この様に考えることによる時定数の誤差は上に述べたとおり高々 40% であり, 時定数が風速に逆比例して大きく変化することから考えると実際的な問題は少い。事実, 後にも述べる様に自然風中での観測結果からも, 風向に直角な方向成分で測定する場合にも時定数は全風速で決まるとして大過ないということが得られている。次に比較のため直径が 6 インチの小さなプロペラを持つ風速計の時定数 T_s を同様な実験によって決定し,

Table 1 The results of comparison of the time constants of the standard (T_t) and the small (T_s) propeller obtained by the wind tunnel experiment.

Tunnel Flow Speed (m/s)	Angle of Attack (deg)	Time Const. (sec)		T_s/T_t
		T_t	T_s	
7.6	0	0.14	0.17	1.2
	40	0.15	0.19	1.3
10.4	40	0.15	0.17	1.1
	65	0.18	0.26	1.4

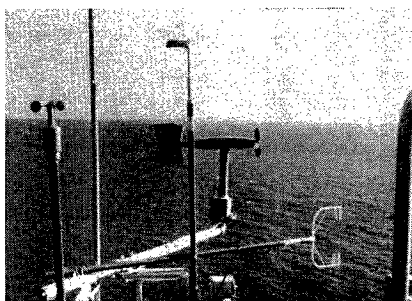


Photo. 2 A view of the field observation.

標準の7インチのものの時定数 T_L との対比を行った。その結果は **Table 1** に示すとおりである。この結果によるといずれの場合も直径の大きいものの方が時定数が小さくなっており、動特性についてみる限り、ピッチが同じであればプロペラの直径が大きい方が優れているものと考えてよい。

3. 自然風中での Gill 型風速計の動特性の測定

自然風における Gill 型風速計の動特性を測定するために、昭和 43 年 1 月 26 日から 30 日まで神戸市須磨区の海岸において、Gill 型風速計と超音波風速計の比較観測を行った。測器は海岸から約 200 m 沖合まで突き出した工事用の棧橋の上にある高さ約 40 m の鉄塔の頂部に、鉛直風速が測定できる様に設置した。また、別に平均風速を測るために小型の 3 杯風速計を設置した。観測の様子は **Photo. 2** に示すとおりである。観測は塔や陸地の影響のない SW の風向の場合に限って行った。各観測のときの状態及び得られた標準偏差を **Table 2** にまとめて示した。この表からも判る様に Gill 型風速計及び超音波風速計で得られた結果の差は大きくない。

次に、各々の測器によって得られた風速変動から求めたパワースペクトルを **Fig. 7, Fig. 8** に示す。今

Table 2 The list and results of the observation in natural wind.

Run No.	Mean Wind Speed (m/s)	Sampling Duration (sec)	Averaging Time (sec)	Standard Deviation (m/s)	
				Sonic	Gill
A	4.5	792	0.4	0.51	0.55
C	5.8	300	0.2	1.50	1.55

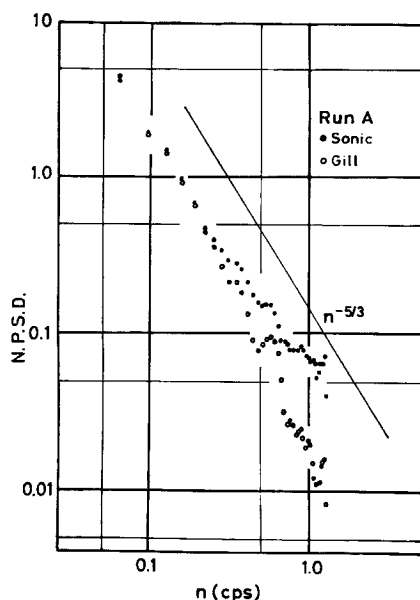


Fig. 7 Power spectra of the vertical component of wind obtained by the sonic and the Gill anemometer in natural wind (Run A).

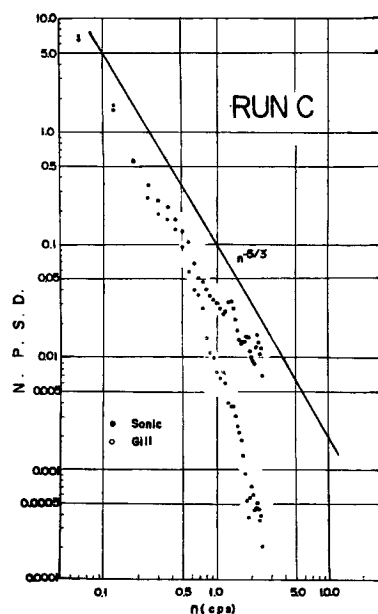


Fig. 8 Power spectra of the vertical component of wind obtained by the sonic and the Gill anemometer in natural wind (Run C).

回の観測に用いた超音波風速計の感部の sound path は 20 cm であり、このための空間平均による高周波数側での感度低下を Mitsuta¹⁾の方法によって求めると、振幅の 90% cut off frequency は Run A で 6.0 cps, Run C で 7.5 cps となる。従って、今回解析した範囲内では超音波風速計による測定結果には減衰は殆んどないものとみなせる。事実 Figs. 7, 8 にみられるとおり超音波風速計で得られたパワースペクトル密度は周波数の $-5/3$ 乗に従って減少しており、慣性小領域に対して理論的に求められた関係と一致している。従って超音波風速計で得られた測定値は今回解析した周波数範囲内では、大気の流れの状態を忠実に代表しているものと考えられ、これを基準に考えてもよいと判断される。一方 Gill 型風速計で得られたパワースペクトル密度は Run A で 0.2 cps, Run C では 0.7 cps 付近から急激に減少する傾向を示している。これは風速計の動特性から生じる高周波数側での感度の低下が原因となっているものとして説明できる。超音波風速計が真の風速変動に近いものを測定しているとする、この密度と超音波風速計で得られたパワースペクトル密度、即ち真の風速変動のパワースペクトル密度との比を各周波数毎に求めると、Gill 型風速計の周波数応答特性を示すものが得られる。この様にして求めた Gill 型風速計の周波数応答の値を Figs. 9, 10 に示す。図からも判る様に、得られた周波数応答の形は風洞実験から求められているとおり線型一階の応答関数と一致している。一方、この観測に用いた Gill 型風速計の特性距離は風洞での測定から 1.12 m となっており、これと平均風速から求めた時定数を用いて計算した線型一階の応答関数も同じ図に示してある。これを見ると、今回の自然風中での観測は鉛直速度を測定するため迎え角は 90° に近いにもかかわらず、応答関数はよく一致しており、斜風に対してもプロベラは全風速（平均風速）から決定される時定数を持つ線型一階の応答をしているものと考えられる。Table 3 に特性距離を用いて求めた時定数 T_L 、自然風中での観測から求めた時定数 T_N 、更に前に求めた実験式を用いて求めた時定数 T_E をまとめて示してある。この表をみると T_C と T_N の差は T_E と T_N の差に比べて小さく、自然風中での時定数も全風速で決まると考えても良いということを示しているものと考えられる。

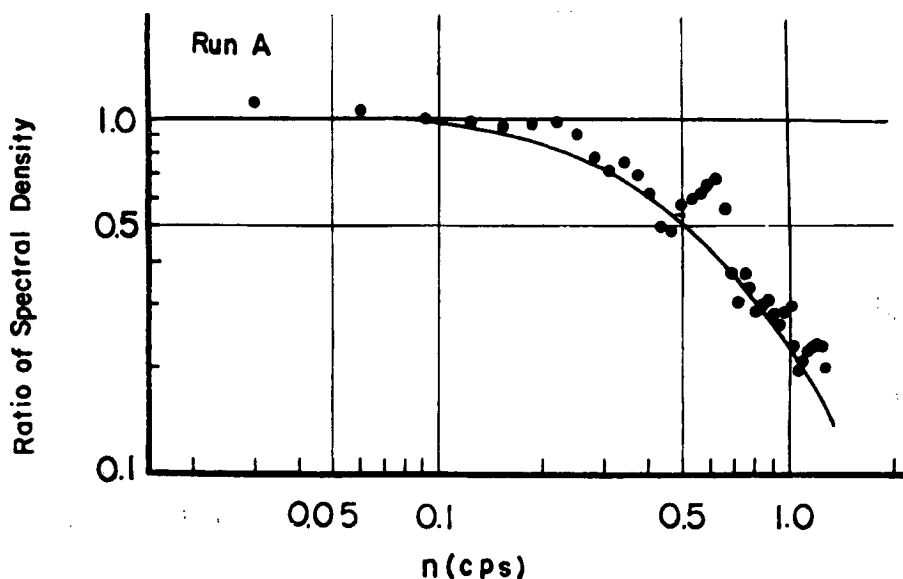


Fig. 9 Ratio of the spectral densities obtained by the sonic and the Gill anemometer, which corresponds to observed frequency response, and calculated frequency response function of the Gill anemometer (Run A).

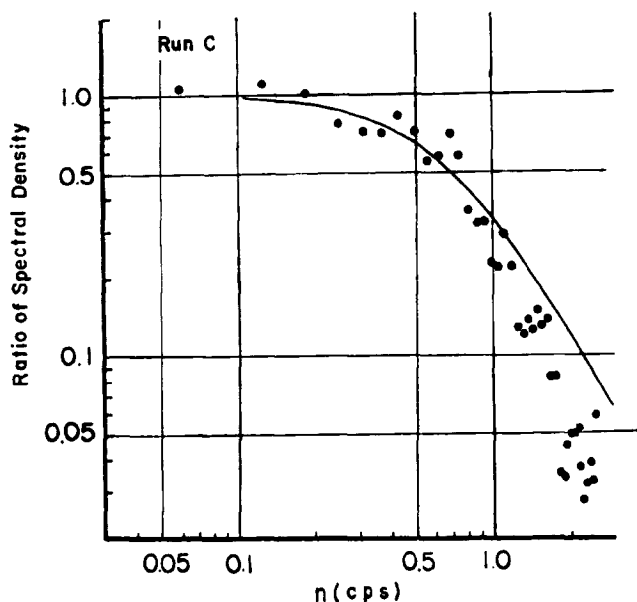


Fig. 10 Ratio of the spectral densities obtained by the sonic and the Gill anemometer, which corresponds to observed frequency response, and calculated frequency response function of the Gill anemometer (Run C).

Table 3 The results of comparison of time constants obtained by various methods.

(T_N : natural wind, T_L : wind tunnel total wind speed, T_E : wind tunnel experimental formula)

	Mean Wind Speed (m/s)	
	4.5	5.8
T_N (sec)	0.29	0.22
T_L (sec)	0.25	0.19
T_E (sec)	0.44	0.34

4. 結 語

Gill 型風速計の静的及び動的な特性を風洞中及び自然風中で測定した。この風速計ではプロペラの回転軸方向の真の風速分値は測定できないが、この補正方法に関して従来の補正方法の欠点を改良し、新しい補正式を求めた。また、自然風中での測定から、この風速計は斜風に対しても線型一階の応答をし、その時定数は迎え角に無関係で、全風速で決まるとしてよいことが明らかとなった。風洞実験で求められた特性距離(時定数×風速)は 1.12 m である。

参 考 文 献

- 1) Mitsuta, Y.: Sonic Anemometer-Thermometer for General Use, J. Met. Soc. Japan, Ser. II, Vol. 44, pp. 45-60, 1966.
- 2) Mitsuta, Y.: Sonic Anemometer-Thermometer for Atmospheric Turbulence Measurements, Symposium on Flow, Paper No. I-9-124, 1971.
- 3) Holmes, R. M., G. C. Gill and H. W. Carson: A Propeller-Type Vertical Anemometer, J. Appl. Met., Vol. 3, pp. 802-804, 1964.
- 4) Dyer, A. J., B. B. Hicks and K. M. King: The Fluxatron — A Revised Approach to the Measurement of Eddy Fluxes in the Lower Atmosphere, J. Appl. Met., Vol. 6, pp. 408-413, 1967.
- 5) R. M. Young Co.: Instructions, Gill Propeller Anemometer Model 27100.
- 6) Camp, D. W., R. E. Turner and L. P. Gilchrist: Response Test of Cup, Vane and Propeller Wind Sensors, J. Geophys. Res., Vol. 75 pp. 5265-5270, 1970.
- 7) MacCready, Jr. P. B. and H. R. Jex: Response Characteristics and Meteorological Utilization of Propeller and Vane Wind Sensors, J. Appl. Met., Vol. 3, pp. 182-193, 1964.