

# 強風測定に関する研究

奥田 穰

気象研究所台風研究部

## Study on the Measurement of Strong Wind Mainly about the Sonic Anemometer and Thermometer

By M. Okuta

*Meteorological Research Institute, Tokyo*

### Abstract

Purpose of this study is to make clear the turbulent structure of strong winds of typhoon and other severe storms.

First, the process of developing an anemometer using an ultrasonic (100kc) phase measuring technique is described.

Wind velocity is obtained by measuring the phase difference between signals received by two microphones(receivers) respectively located windward and leeward from a continuous source of sound transmitter.

Distance from the transmitter to the receivers is 50 mm, and the distance between two receivers for horizontal component is 20 mm, and that for vertical component is 43 mm. To gain better accuracy in measurement, sinusoidal continuous waves of 100 kc are transformed into 10 kc, and then phase difference caused by wind is measured by the phase meter.

This system is inherently more stable and less noisy than pulse system, and has attractive characteristics, namely, its very short response time and linearness of the response.

Secondly, results of efficiency test in wind tunnel and of experimental observation over a pond are given.

### 1. はしがき

本研究は防災科学技術センターを中心とした共同研究の一環として行なわれているのであるが、最初に次ぎのことを断っておきたい。すなわち、本研究の遂行に当って、気象研究所内では測器研の根本茂技官、物理気象研の相馬清二技官の御協力をいただいたこと、本測器の開発に当っては沖電気KKの宮沢久、清水良次、磯川昭の3氏があずかって力があつたこと、研究の具体的推進には筆者と同研究室員である当舎万寿夫技官が主として当り、筆者は単に現在までの成果をとりまとめたにすぎない。

い。風洞の実験結果は主として沖電気KKよりいただいたものである。以下、研究過程と中間的な結果について報告する。

風害は強風によってひき起こされることは、すでに承知していることである。しかし、強風の如何なる性質が破壊現象に最も強い影響を与えるのか、強風の構造は如何なるものであるかという点になると、われわれの知識は非常に少ない。この現状は主として強風の乱流構造を測定する測器に適當なものがなかつたことから発生している。本研究において、われわれが超音波風速温度計の

試作および、それによる観測に重点を置いたのは以上の理由による。現在までに試作と Test 観測および2号機の製作だけしか行なっておらず、本格的な観測にはまだ立入っていない。本報告では超音波風速温度計の開発過程と問題点にしばって報告したいと考える。

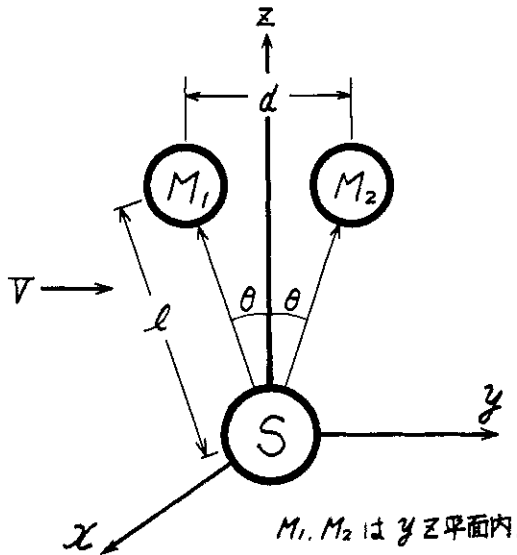
2. 超音波風速温度計の原理

(1) 超音波風速計の原理

超音波風速計は、空気中において超音波の音速が風速の影響を受け、風上に伝搬する場合はおそくなり、風下に伝搬する場合は早くなることを電気的に検出し、風速を測定する装置である。方式としては、連続波の超音波を用いた連続波位相差法とパルス波を用いたパルス法がある。

基本原理は以上のようなものであるが、まず、音波によって風速が測定される原理を、位相差方式によって述べる。

第1図は本測定器の受感部の送・受波器配置図であるが、この図の配置を使って測定原理を説明する。



第1図 受感部の送受波器配線図

今、送受波器の配置に対して風速Vが吹いているとする。この場合、送波器Sから受波器M<sub>1</sub>、すなわち、S→M<sub>1</sub>の音道に対する垂直成分をV<sub>n1</sub>、平行成分をV<sub>p1</sub>とし、同様に、S→M<sub>2</sub>の音道に対する垂直成分をV<sub>n2</sub>、平行成分をV<sub>p2</sub>とする。このような配置において送波器Sより連続波超音波が発振される。送波器Sより受波器M<sub>1</sub>、M<sub>2</sub>までの超音波の伝搬時間t<sub>1</sub>、t<sub>2</sub>は次のようになる。

$$t_1 = \frac{l}{C\sqrt{1 - \left(\frac{V_{n1}}{C}\right)^2} + V_{p1}} \quad (1)$$

$$t_2 = \frac{l}{C\sqrt{1 - \left(\frac{V_{n2}}{C}\right)^2} + V_{p2}} \quad (2)$$

ただし、V<sub>p1</sub> = Vy cos θ + V sin θ

$$V_{n1} = \sqrt{V^2 - V_{p1}^2}$$

$$V_{p2} = -Vy \cos \theta + V \sin \theta$$

$$V_{n2} = \sqrt{V^2 - V_{p2}^2}$$

C : 空気中の音速

それ故、両者の時間差t<sub>1</sub>~t<sub>2</sub>は、C<sup>2</sup> ≫ V<sup>2</sup>と考えると、

$$t_1 - t_2 = \frac{2l Vy \cos \theta}{C^2 - V^2} \approx \frac{2l Vy \cos \theta}{C^2} \quad (3)$$

となる。時間差t<sub>1</sub>~t<sub>2</sub>を連続波位相差Δφで表わすと次式になる。

$$\Delta \phi = \frac{2l Vy \cos \theta}{C^2} \cdot f \cdot 360^\circ \quad (4)$$

ここでfは使用周波数%である。

したがって、上式より位相差Δφは風速Vのy方向成分Vyに比例することがわかる。

(2) 基本的に考えられる誤差

空気中の音速Cは気温により多少変化する。その他、含有水蒸気量の多い場合などについて、音速の変化による誤差を検討する必要がある。連続波の位相差を風速におきかえる場合に、誤差として次のようなものがある。

- (a) (3)式において、C<sup>2</sup> ≫ V<sup>2</sup>として、V<sup>2</sup>を省略したことによる誤差
- (b) 音速Cの変化による誤差
- (c) 寸法精度による誤差
- (d) 角度θの非対象による誤差
- (e) 反射波による誤差

以上の考えられる誤差について若干の考察を加える。

(a) C<sup>2</sup> ≫ V<sup>2</sup>とし、V<sup>2</sup>を省略したことの誤差

(3)式を変形すると、

$$t_1 - t_2 = \frac{2l Vy \cos \theta}{C^2 - V^2} = \frac{2l Vy \sin \theta}{C^2} \left(1 - \frac{V^2}{C^2}\right) \dots \dots (5)$$

となる。(5)式から見て、風速が大きくなった場合に誤差が現われることがわかる。例えば、風速60 m/sのとき

には、誤差が3%程度となる。したがって、風速がこの程度以上になったときには、測定値の吟味をする必要があることもあるが、普通には無視してもよい値である。

(b) 音速Cの変化による誤差

空気における超音波の音速は主として媒質である空気の温度変化によって影響を受ける。空気中の超音波音速は次式で表わされる。

$$C = 20.067 \left\{ T \left( 1 + 0.319 \frac{e}{p} \right) \right\}^{1/2} \dots\dots(6)$$

ここで、T：空気中の温度（°K）

e：蒸気圧（atm）

p：大気圧（atm）

(6)式を見ると、音速Cは気温のほかに水蒸気圧および気圧にも関係するが、気温以外の影響は極めて小さいと考えられる。試みに音速が $340 \pm 20$  m/sの場合を上式によって考えると、 $15^\circ \pm 25^\circ$  程度の温度変化に対応する。音速Cの変化に対する時間差 $t_1 - t_2$ を(3)式によって考えると、

$$t_1 - t_2 = \frac{2l V_y \cos \theta}{C^2 - V^2} \dots\dots(7)$$

$$= \frac{2l V_y \cos \theta}{C^2} \left( 1 - \frac{2\Delta C}{C} \right)$$

となる。音速の変化量 $\Delta C$ を $\pm 20$  m/sとすると誤差は $\pm 12\%$ 程度、温度変化が $\pm 5^\circ$ 以内であれば4%以内である。精度を問題にする場合は、音速を測定して補正を加える必要がある。この補正は、音速の変化に対して応答直線の傾斜が多少変化するのみであり、比較的容易である。

(c) 寸法精度による誤差

送・受波器配置において、左右の受波器から送波器までの距離 $l$ が、左右 $\Delta l$ だけ差があった場合に生ずる誤差は、同じく(3)式より誤差項として次式が得られる。

$$\frac{\Delta l (C - V_y \cos \theta)}{C^2} \dots\dots(8)$$

(d) 角度 $\theta$ の非対称による誤差

送・受波配置において、左右の角度 $\theta$ の非対称による誤差項は同様に次式で表わされる。

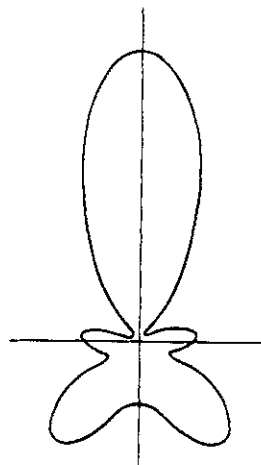
$$\frac{\Delta \theta l V_y \cos \theta}{C^2} \dots\dots(9)$$

(8)、(9)両式によって誤差を吟味すると、実際上は問題にしくなくともよいことがわかる。ただ、衝撃などで著しく歪められたような場合だけが問題となる。

(e) 反射波による誤差

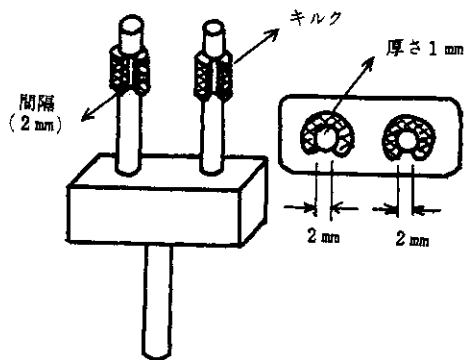
連続波信号に対して反射波が入って合成された場合に

は、その影響によって位相変化が起こり、誤差となることが考えられる。その影響を知るために、受波器と同形の円筒に平面波が入射した場合の散乱波を吟味した。その結果だけを第2図に示した。図を見て明らかなように散乱波の影響が対となっている他の受波器に十分影響を



第2図 円筒に表面波が入射した場合の散乱波の分布

与えることが考えられる。その影響を避けるために受波器にキルクを巻いて反射波を防ぐ処置を施した(第3図)。その結果は良好である。



第3図 反射波の影響を除くためのキルク巻きの概要

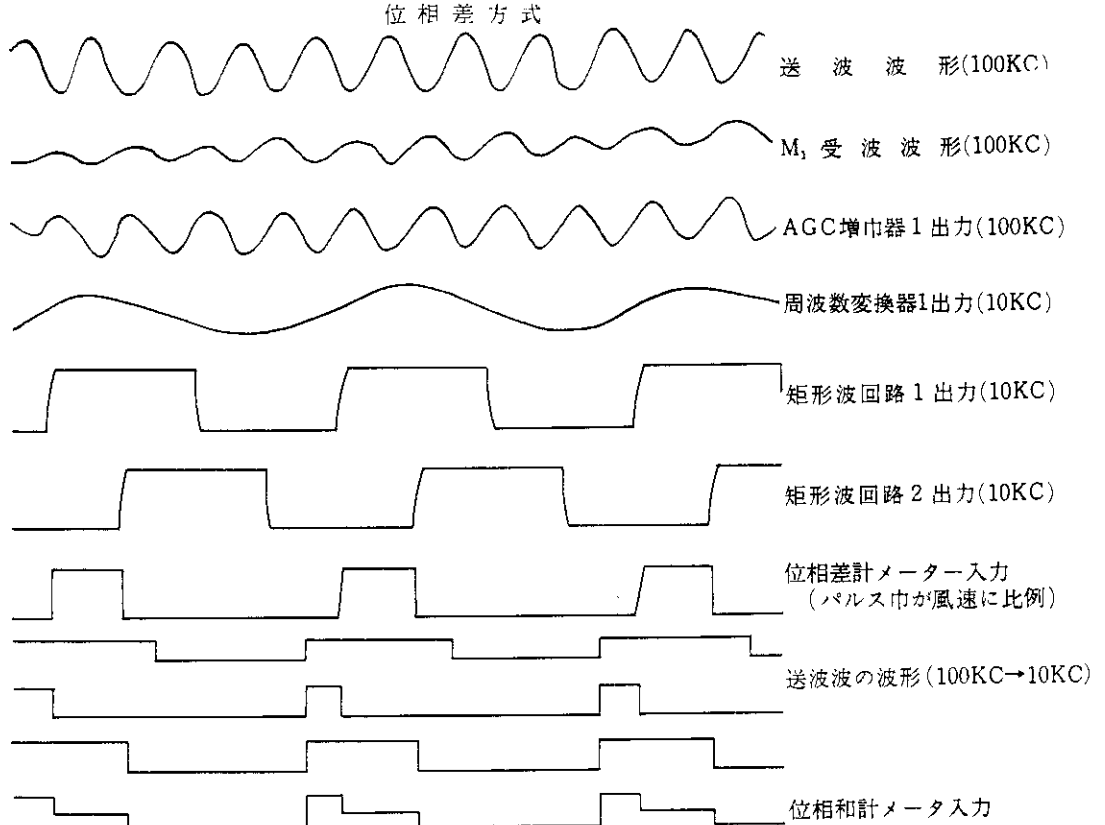
以上のような、原理的に考えられる誤差以外に、実際に風洞実験に当たって幾つかの問題点が出され、小修正を経て試作器が完成されたのである。次に作動概要と構成について述べることにする。

## 3 超音波風速温度計の作動概要と構成

第4図を基にして超音波風速温度計の作動概要を述べる。まず、100 KCの周波数を持った連続波が送波器から発振され、 $M_1$ 、 $M_2$ という2個の受波器によって受波さ

## 〔超音波風速温度計の構成〕

以上のような作動概要からおわかりと思うが、本測器の構成を第5図の構成図に示す。さらに説明の要はないと思うので、説明を省くが、サーミスター温度計が付い



第4図 位相差式超音波風速温度計の測定原理

れる。受波波形は途中の媒質の変化によって多少の乱れを生じる。これをAGC増巾器によって振幅変動をおさえ、周波数変換器によって100 KCの周波数を10 KCに変換する。10 KCに変換する目的は、矩形波に直して位相差を検出するのであるが、位相計の立上がり特性による影響を小さくするためである。10 KCに変換された $M_1$ と $M_2$ それぞれの回路から導びかれた波の間の位相差が取出され、両者の位相差が風速として入力する。これが風速測定の作動概要である。

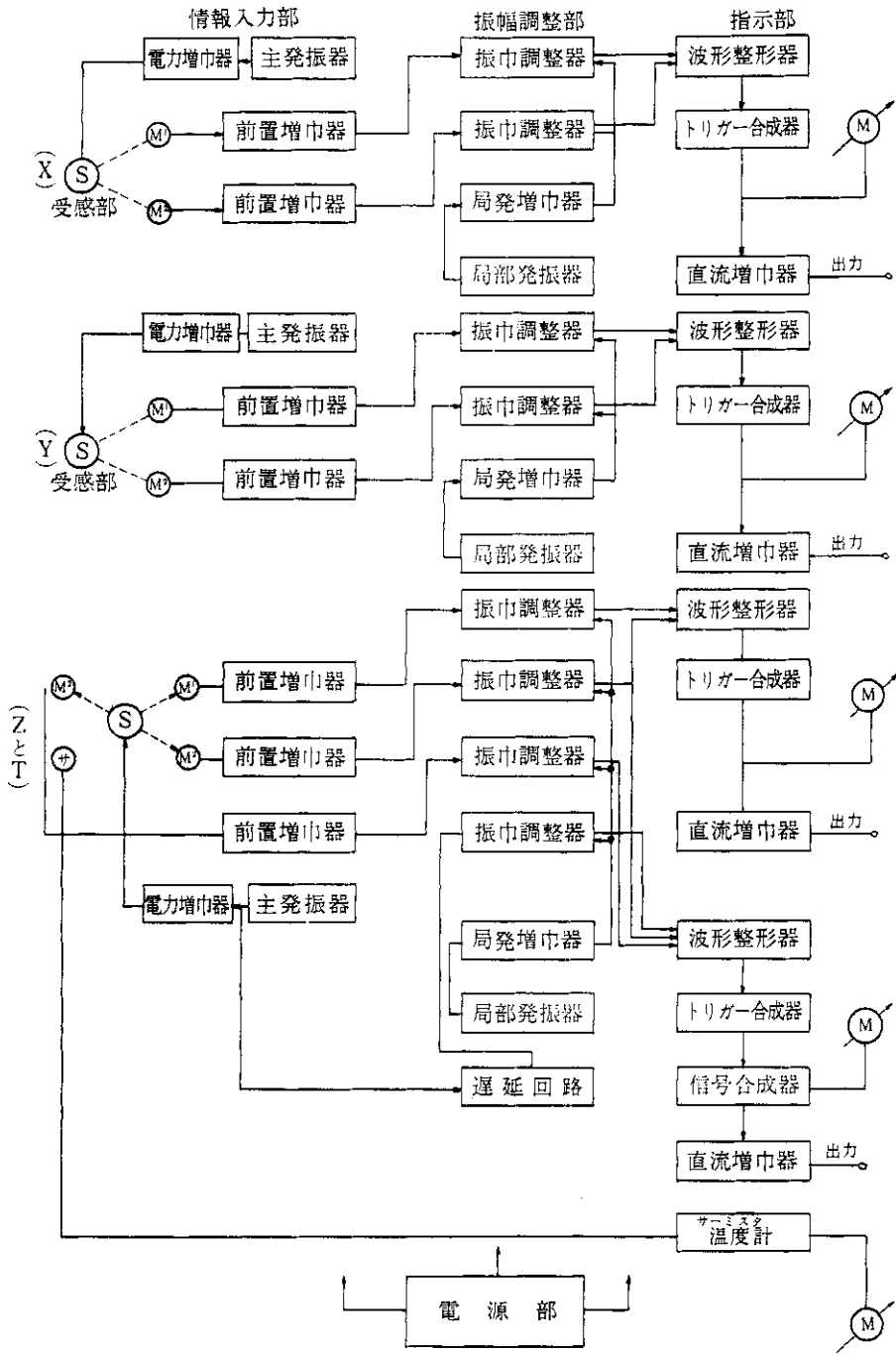
温度測定は第4図下から4段目以下の部分にあたる。送波波形を100 KCから10 KCに変換して、矩形波に整形したところが第4段目である。以下、2個の回路から来た矩形波を合成して位相和計に入れる。以上が本測器の作動概要である。

ているのは、音速が温度によって変化するが、本測器の指示器では音速指示範囲が狭いために、サーミスター温度計の指示値によって測定範囲を切替えるためである。（作動概要のところで書き忘れたので付記する。）

なお、本測器の概要を写真によって示すと、写真1は試作器の受感部の水平成分と垂直成分および温度測定部を示し、写真2は振巾調整部、写真3は指示器と記録計である。写真4は平塚の観測塔に設置する2号器の感部で根元の円筒の中に前置増巾器が内蔵してある。写真5は同じく観測塔内に設置する計測部分で、記録計はない。

## 4. 風洞その他の実験結果

本測器の試作に際し、一番問題になったのは、受感部の構造と配置である。第6図a.)は試作開始時に採用し



第5図 超音波風速温度計のブロック・ダイアグラム

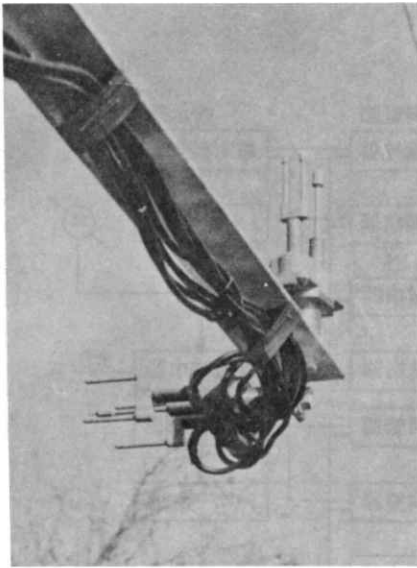


写真1) 試作器の受感部（左は垂直成分および温度測定用、右は水平成分）(気象研で試験観測中のもの)

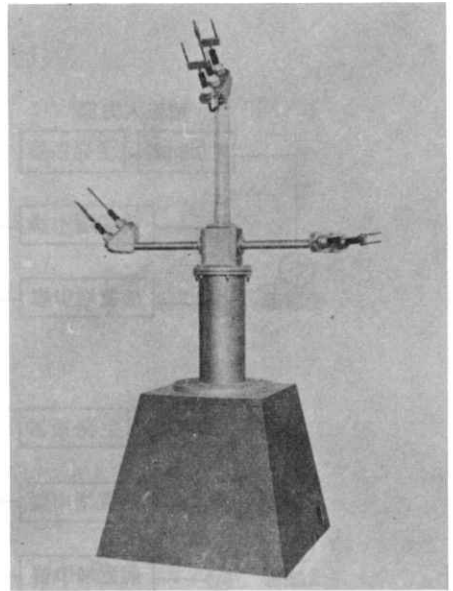


写真4) 2号器の受感部

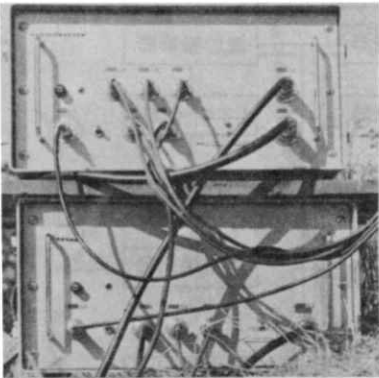


写真2) 試作器の振巾調整部

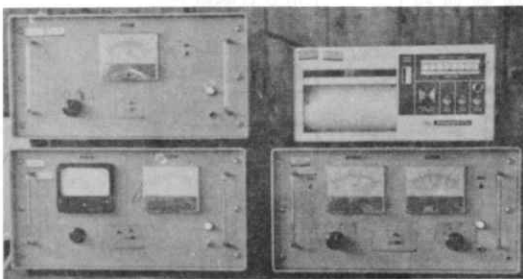


写真3) 試作器の指示部および記録計（電磁オシロ）

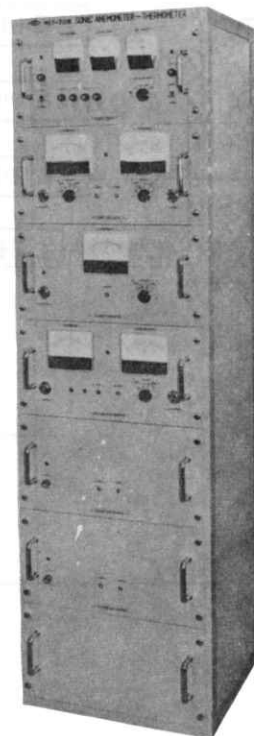
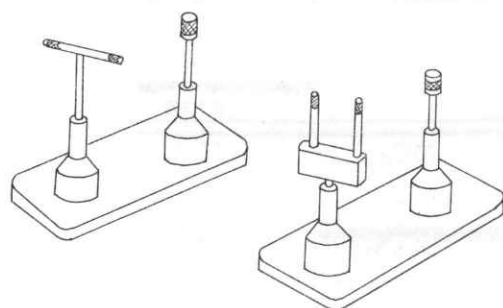


写真5) 振巾調整部及指示部

た受感部の形であるが、T字型受波器は指向性および受波円筒による乱渦の影響があるので、次ぎに写真6に示す形に換えた。この受感部による風洞実験では、まだ受



( a ) ( b )

第6図 超音波風速温度計の受感部 a) は最初の型, b) は最後の型式

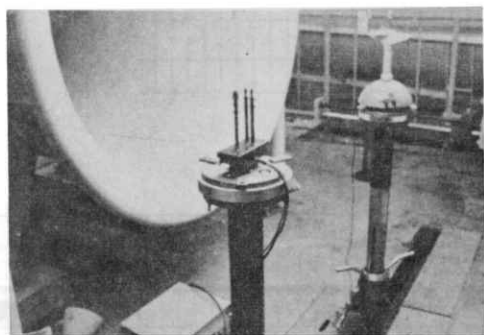
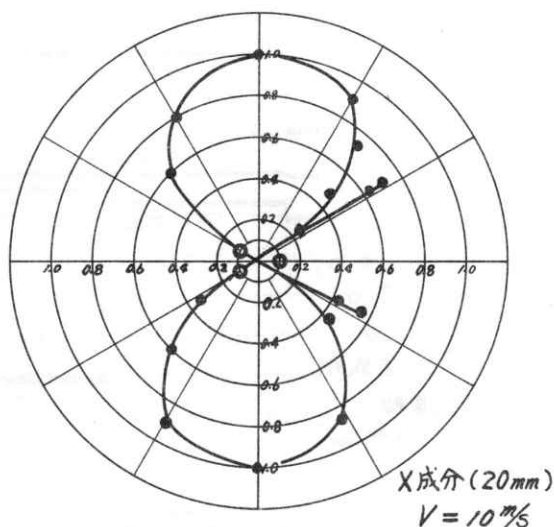


写真6) 試作段階における受感部風洞実験, 受感部の形は中間段階のもの (気象研中野分室の風洞にて)

波素子をキルクで捲いてはいない。この形の受感部の指向性は第7図に示すようにほぼ8字型であるが、送・受波器を結ぶ線上、送波器が風上になる配置になると、その影響が著しく現われることがわかった。さらに、それを確かめるため各風速毎に送・受波器の風向に対する配置を変えて、その記録を電磁オシロにとり、調べた。第8図の場合は、送・受波器の影響がないと見られる配置の記録である。図から明かなように、風速に比例したnoiseが観測される。また、第9図は送・受波器の配置を風向に対して変化した場合の風速記録の変化を示したものである。申しおくれたが、記録の上部にある十一検出というのは、風向の正負を意味する。十一検出記録がどちらか一方を安定して指示しておれば乱れが少ないし、十

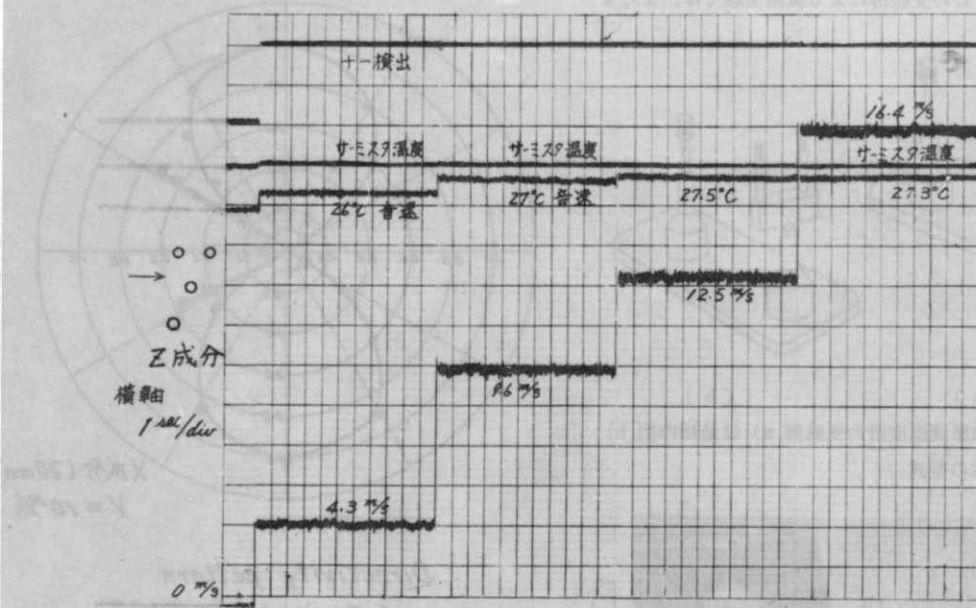


Directivity pattern of Sonic Anemometer

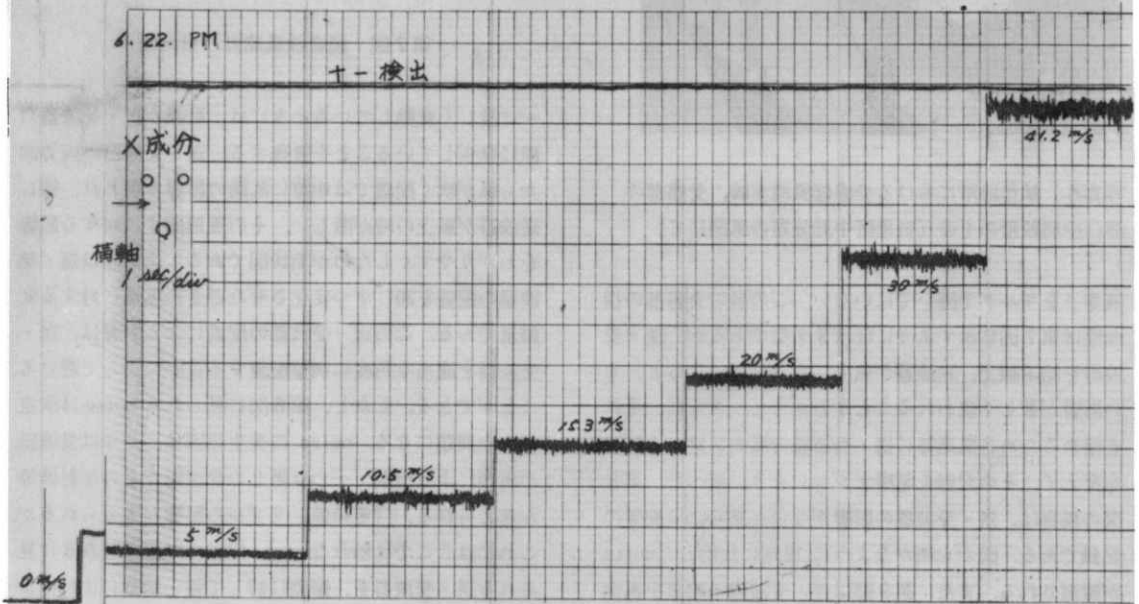
第7図 超音波風速計の指向性

一に激しく変動しているときには、乱渦が送・受波器の間に発生していることを意味する。送・受波器の両方向から風が吹く配置では明瞭に乱渦の影響が現われ、特に送波器が風上の時が激しい。その風速測定に対する影響をわかりやすくしたのが第10図である。第10図は送・受波器の配置を $30^\circ$ ずつ変化したときの風速に対する変動量である。この送・受波器の配置による影響は、送・受波器を適当な角度に調整配置することによって避けることができる。しかし、第8図に見られる noise は測定精度上問題になる。noise の発生原因は、一つは受波器の風速による振動、一つは隣りの受波器からの反射波等が考えられる。(その他、リップルの影響が考えられるが、これにはここでは触れない。) 振動の影響は写真6に見られる送・受波器を、振動に対して強い構造にすればよい。その点から第6図bの形に最終的に変えた。その結果、noise level が明らかに低下した。さらに、反射波の問題は、風速が $4.0 \text{ m/s}$ 程度になると、本測器の風速指示が真風速より小さい傾向が出たことから検討され

### 電磁オシロ記録結果(I)

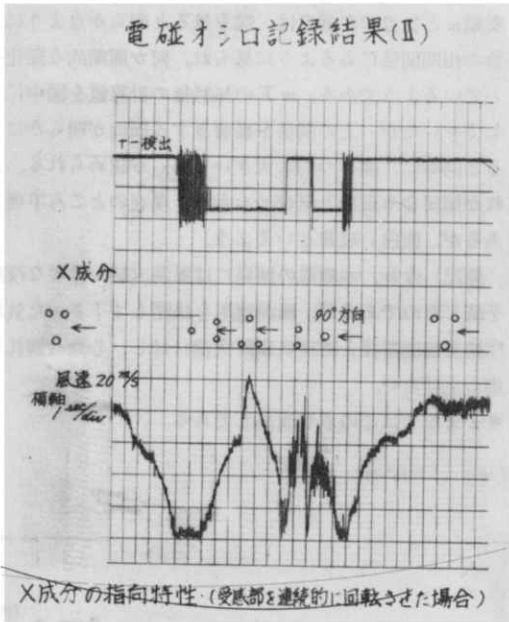


Z成分および音速計の風に対する  
応答結果



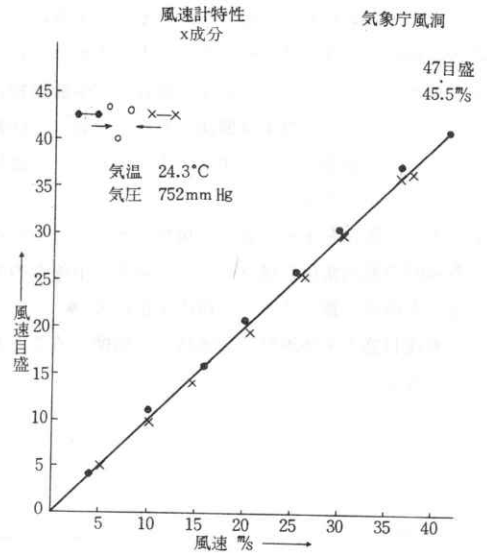
X成分の風速に対する応答記録結果



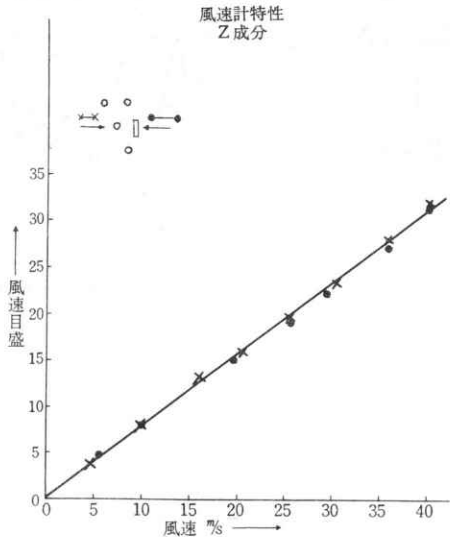
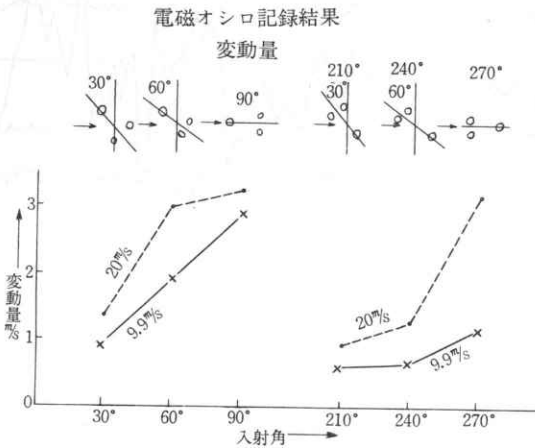


第10図 受感部を30°毎に風向に対する角度を変えた場合の風速記録の変動量

た。キルクで巻き、送・受波器の支持構造を現在の形にした後の風洞実験結果を、X成分の感部で測定したものを第11図、Z成分の感部のを第12図に示した。45.5m/sまでの実験結果であるが、ほぼ満足する結果を得た。



第11図 垂直成分受感部による風速と風速目盛との関係 (目盛調整を厳密にはしていない。測点が直線上にあればよい)



第12図 水平成分受感部による風速と風速目盛との関係 (目盛調整を厳密にはしていない。測点が直線上にあればよい)

5. 自然風内での試験観測

試作器は、上記のような種々の風洞実験の後、気象研究所の池上で試験観測を実施した。しかし、本測器はその性能が極めて応答時間の短いものであるため、これに対応する測器がなかなかそろわず、現在、試験観測続行中のところである。写真1は観測のために設置した状態のものである。観測によって次ぎのことがわかり、部分改造を施す予定である。

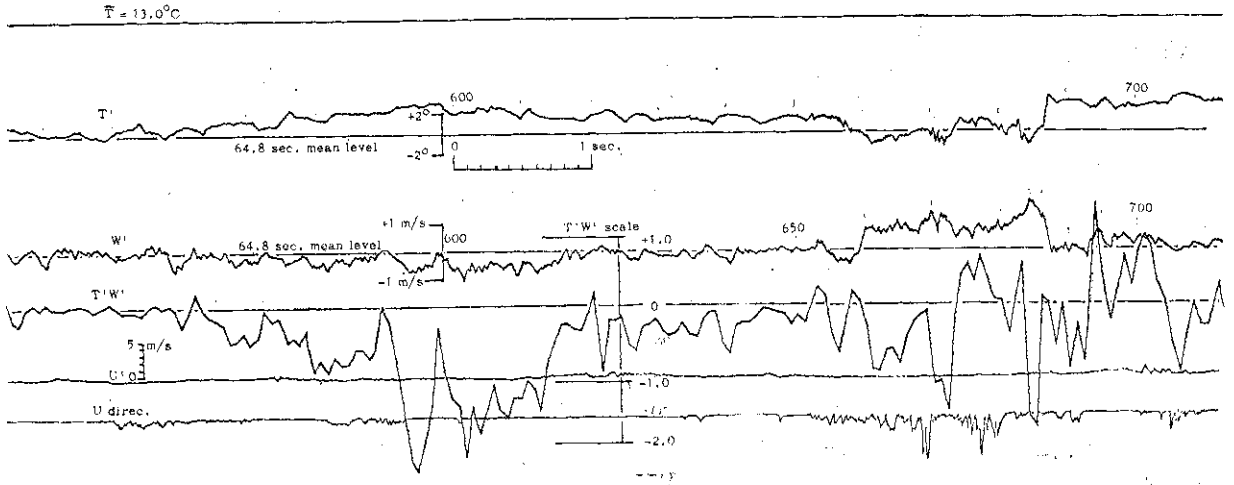
- (1) 風向の変化を+1-によって検出するようにしたが、微風時の風向変化を読みとるのに非常に不便なので零点を中央に置いて+1-の検出を止める。\*
- (2) 風速目盛りを強風時と弱風時とに切換えることができるようにする。

試験観測中に得た記録と、その解析の1例を第13図に示す。読取りは1/10秒毎に行なったが、風速の垂直成分の変動 $w$ と気温の変動 $T$ は、図を見ると明らかなように、負の相関関係にあるように見られ、何か周期的な変化をしているようである。 $w$   $T$ の1/10秒毎の計算値を図中に示しておいたが、上の関係を裏書きする傾向が明らかになると同時に、間接的に大きい flux が認められる。これが如何なる現象と結びつくかは、現在のところ不明であるが、面白い現象といえよう。

追記) なお、本測器の開発には風洞実験が重要な役割を演じたのであるが、風洞使用を快諾して下さいった気象庁観測部測器課と物理気象研究部に対し、心から御礼を申し上げたい。

\* 2号器ではこの点を改良してある。

12 November, 1965 15<sup>h</sup> 28<sup>m</sup>



Note: The meteorological elements are measured at 1.5 m level over the wave surface.