

潮岬風力実験所における風力観測用測器について*

棚橋 諒・石崎 潑雄・光田 寧

ANEMOMETERS OF SHIONOMISAKI WIND OBSERVATORY

by Dr. Eng. Ryo TANABASHI, Dr. Eng. Hatsuo
ISHIZAKI and Yasushi MITSUTA

Synopsis

The Shionomisaki Wind Observatory of Disaster Prevention Research Institute of Kyoto University was established in 1961 to study mechanism of wind disasters on structures with actual constructions in natural winds. To obtain full knowledge of natural wind structures, which act on the constructions as external forces, various kinds of anemometers are used or under development in this observatory. They are an all-weather type bivane, pressure plate and pressure tube anemometers with high frequency resolution, a sonic anemometer, a portable anemometer and so forth. In this paper, brief notes on these anemometers are presented.

1. 実験所の概要

京都大学防災研究所潮岬風力実験所は暴風による構造物の災害を防止するための研究ならびに耐風構造の研究を進めるにあたり、自然状態の暴風の性状を知り、これが構造物におよぼす影響を明らかにする研究を現場において行なう目的で設置されたものである。この種の恒久的な風の総合観測施設としては本邦最初のものであり、現在のところ唯一のものである。昭和36年度より文部省災害科学研究事業費の配分を受けたのを機会に、財団法人建築研究協会の寄付により観測室を建てて開設されたもので、敷地は台風などによる暴風がしばしば襲来し、しかも研究を行なうための立地条件の良好な本州最南端潮岬の旧軍用飛行場跡に地元串本町の好意によって貸与されたものである (Fig. 1 参照)。現在敷地内には面積 46m² の鉄筋コンクリート造の観測室と他に 3 棟の実験家屋が建てられている (Fig. 2 参照)。

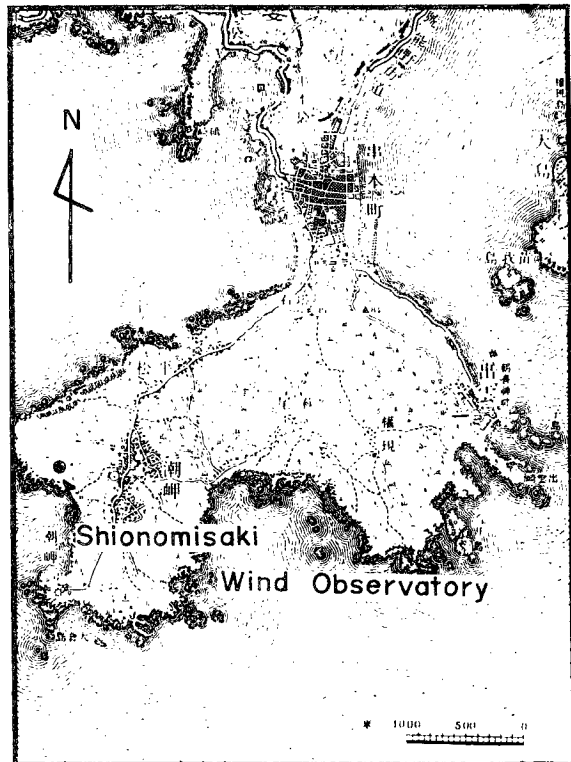


Fig. 1 General location of Shionomisaki Wind Observatory.

*本文の内容の一部は昭和38年11月第10回風のシンポジウムにおいて発表されたものである。

観測室の屋上には地上高10mの測風塔を設け、これに風の常時観測のための測器が取り付けられ、必要に応じて特殊観測用の測器も取り付けられるようになっている。常時観測としてはプロヘラ型風向風速計および3次元的な風向の変動を測定しうるパイペーンによる風の測定、ならびに気象庁型3杯および4杯の風杯型風速計の比較観測等が行なわれている。観測室内にはこれら常時観測用の測器および特殊観測用の記録装置があり、実験家屋による実験の記録もここで行なわれている (Fig. 3 参照)。

特殊観測は主に暴風時における風の乱れの構造、さらにそれによって構造物の受ける影響を知るために随時行なうもので、特に構造物の設計に重要な短周期の変動を調べることを主な目的としている。実験家屋は実験用に民間会社より寄付を受けたもので、この家屋を用いて実物の建物に対する風の影響を知るための研究が進められている。なお、間接的に暴風災害に関連した気圧、気温、湿度、降雨量、降雨強度の測定も同時に行なわれており、それらも全て観測室内で記録している。

2. 実験所の設備

前節にもその概略が述べられているが、現在実験所におかれている研究用の設備をまとめると次のようになる。

風力観測用設備	{ 常時観測用測器 短周期変動測定用測器 調査用測器	
振動、変位観測用設備		ストレインゲージ、差動変圧器変位計、振動計
伝送、記録用設備		テレメーター (2Ch)、ペンレコーダー (8Ch)、電磁オッシロ
制御用設備		風速警報装置、親時計
予備電源設備		自家用発電機 (2KW)

風力観測用設備は自然状態の風の特性を知り、構造物に対して外力として働く風力に関する測定を行なうためのものであり、振動、変位観測用設備は風力によって生じる構造物の振動や変形を測定するための設備である。これらの測定の記録は全て観測室内におかれた記録設備で記録するが、特殊な条件での測定をも容易にするためにテレメーター用の無線伝送装置を有している。また制御用設備には各記録装置に同一の時刻信号を入れるための親時計及び風速が一定の値となった時にリレーが働いて記録装置を起動させる風速警報装置がある。予備電源はガソリンエンジン発電機で暴風時の停電にそなえるものである。

これらの設備のうちで、風力観測用の設備は研究の遂行のために最も重要なものであり、しかも従来からこのような研究があまり行なわれていなかったために適当な測器が少なく、一般に用いられる気象観測用測器の流用にも限界があるために、その多くのものは最近研究され、あるいは新たにこの実験所で用いるために開発されたものである。従って測器自体についても未だに多くの問題が残っており、本来の研究と同時に測器の研究をも併せ進めているのが現状である。本報においてはこれら新しい測器を中心に風力観測用の測器についてその特性あるいはそれによる研究の概要について述べる。



Fig. 2 General view of Shionomisaki Wind Observatory.

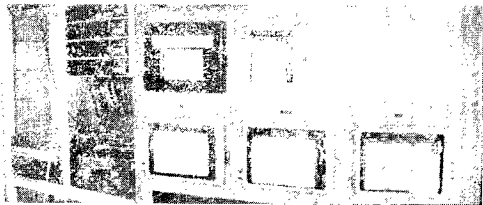


Fig. 3 A part of the instrument panel in the laboratory.

3. 風力観測用設備

風力観測用設備はさらにその機能によって 1) 長期間にわたって測定を続行して長周期の現象の変化あるいは現象の発現頻度、さらに気候学的な条件を調べるために用いる常時観測用測器、 2) 構造物に対する影響を考えるに際して特に重要な意味を持つとみられる数秒程度あるいはそれ以下の周期の風の変動を測定するための短周期変動測定用測器、および 3) 特殊な条件の下における風の分布を測定するための調査用測器に大別される。現在、本実験所で使用中あるいは開発中の測器は次のとおりである。

	種別	測器名	観測項目	記録装置	型式・台数	備考
1	常時観測用	風杯型風速計(3杯)	水平風速 (瞬間,平均)	専用 紙送り 15.3600mm/hr	気象庁型 5	風程 100m 2台 風程 50m 3台
2		風杯型風速計(4杯)	水平風速 (平均)		気象庁型 1	風程 100m
3		プロペラ型風向風速計 (Koshinvane)	水平風速 (瞬間,平均) 水平風向	専用 紙送り 15.3600mm/hr	気象庁型 1	風程 (100m) 接点付き
4		パイペーン	水平風向 垂直風向		試作 1	上下方向測定巾 45°
5		5素子電接記録計	水平向風	汎用 紙送り 15mm/hr	1	5つの成分について、2、3、6分間の同時平均値が求められる。 3、4杯及びプロペラ型の記録用 6打点 1. 地上10mでの乾球温度 2. 〃 〃 〃 湿球温度 3. 百葉箱での乾球温度 4. 〃 〃 〃 湿球温度 5. 室内温度 6. 予備
6		電子管平衡型記録温度計	気温、湿度	専用 紙送り 15~120mm/hr	1	1分及び10分間の降雨強度及び積算量
7	降雨強度計	降雨強度、雨量	専用 紙送り 5~50mm/hr	111型 1	1分及び10分間の降雨強度及び積算量	
8	自記気圧計	気圧	専用	気象庁型 1		
9	短周期変動測定用	風圧板型風圧計	風圧力		試作 5	
10		ピトー管型風圧計 (AT-4型)	風圧力		試作 11	
11		差圧測定器	圧力		1	
12		超音波風速計	風速		試作機	
13		(超音波空気密度計)	空気密度		試作中)	
14	(風圧変化率計)	風圧力時間変化率	試作中)			
15	調査用	小型風向計 (VH-1型)	風向	汎用 紙送り 5~200mm/hr 専用 紙送り 15mm/hr	試作 5	
16		小型風速計 (AH-3型)	水平風速 (平均)		試作 10	風程 50m
17		多素子記録計	平均風速		1	10成分の電接記録
18		携帯用風向風速計 (AS-1型)	水平風速 (平均) 風向		試作機	三脚によって支持、感部 地上高 1.5m
19		(磁気記録型記録計)	平均風速の記録		試作中)	

4. 常時観測用測器

a) 気象庁型風速計

3杯および4杯の風杯型風速計(ロビンソン風速計)とプロペラ型風向風速計は気象庁の制式観測用測器であり、国内各地の観測所において広く用いられているものと同じである。これらの測器についてはすでに多くの人々によってその特性が調べられている¹⁾²⁾ので今さら述べるまでもないが、各々定常な風洞中の風で検定されたこれらの測器も自然状態の乱れた気流中において使用した場合には、その特性の差から必ずしも同一の指示を示さないという問題がある。すなわち特性の悪いものは慣性のために瞬間風速の指示の変動巾が真の風速変動の巾より小さくなるのに加えて風速増加時と減少時の過渡応答の仕方の差が大きいため平均風速の指示が真の平均風速よりも大きくなってしまふ。瞬間風速の変動については次節に述べる短周期変動測定用の測器でさらに詳細な研究が出来るから問題はないが、平均風速の過大指示はここでの研究の上のみでなく、さらに一般的な観測資料の解析の上でも大きな問題である。この点について自然状態の風における測定誤差に関する研究はあまり行なわれていないので、これら3種の風速計に風程接点(100m毎)を取り付けて測風塔上に並べて設置し比較観測を行ないつつある。なおこの比較観測の記録のためには同時性を得る目的で、同じ時間信号で制御され2分間毎の電接回数が5つの成分まで同時に同一自記紙上に記録される5素子電接記録計(Fig. 4)を用いている。この記録計による記録の1例を示したものがFig. 5であり、2分間毎に零に復帰する弧の先端が2分間の電接回数を示している。

この比較観測は現在も続行中であるが、1963年8月28日の台風11号接近時の風速測定値の比較を示したものがFig. 6である。この図は10分間平均風速に換算した値で示してあるが、3者にはかなりの差があり、極端な場合には3 m/sec を越える差となっている。理論的な考察からこれら3者のうちで誤差がもっとも小さいと考えられているプロペラ型の風速計を基準とした各時刻の風速の比をこの時間について平均すると、4杯1.17, 3杯1.06となる。この比は従来の考察から考えられていた値よりずっと大きい。たとえば矢島²⁾によれば真の平均風速が10 m/sec の時、周期4秒で振幅5 m/sec の正弦的な変動がこれに重なったと考えた時に各風速の示す平均風速は4杯10.6, 3杯10.5, そしてプロペラ型10.2となる。測器の検定後に生じた誤差、あるいは測器の位置による差が多少あったとしてもこの差に比して小さいと考えられるし、特に4杯との差よりは大きくなることはまず考えられない。この観測中の14時頃にプロペラ風速計で測定した評価時間1秒の風速の Intensity of Turbulence はほぼ0.27であり、乱れの様子としては普通の平地上で観測される値と大差ない。従ってこの程度の差は実際

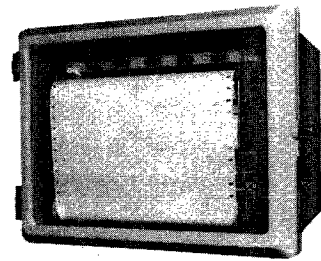


Fig. 4 5 channel pulse recorder.

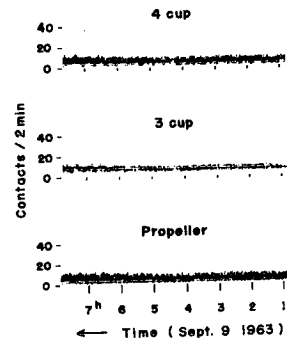


Fig. 5 An example of the trace of the 5 channel pulse recorder, which shows the comparison of three different types of anemometers. The total length of each arch indicates total pulse numbers in each two minutes.

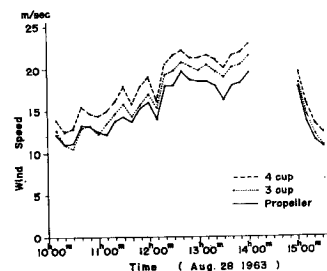


Fig. 6 Comparison of 4-cup, 3-cup and propeller anemometers in natural winds.

の観測においても生じているものと考えなくてはならないことになる。このように大きな差の生じた原因は自然風中での短周期の変動が従来考えられていた以上に大きな働きをしているためではないかとも考えられる。

B) バイベーン

風の垂直方向の変動成分は気象現象において重要な働きをするものであり、強風時において風速の水平成分すなわち普通と呼ぶ風速の数パーセントに達することがあるという報告もある。しかしその測定が困難なこともあって、現在のところ常時観測を続けているところは世界でもほとんどない。本実験所においてはまずこの風の垂直変動成分の常時観測を行なうことを計画し、新しい全天候用のバイベーンすなわち3次元の運動をする風向計を作製した。外觀は Fig. 6 に示すようなもので、回転軸から羽根の後縁までの長さは約55cmで羽根の大きさは水平、垂直面共に約30cm×30cmである。そしてこの矢羽根は水平面内の全方位と上下45°の範囲内で自由に運動する。このバイベーンの観測結果とプロペラ型風速計によって得られた水平風速とを組み合わせることによって風の3次元の変動を得ることが出来る。短周期の変動をも記録出来るように記録装置は1mm/secの早送り機構が付いている。

このバイベーンの固有振動周期は風速に反比例し、水平面内では $15.7/V$ 、垂直面内では $15.2/V$ 秒 (但し V は m/sec 単位で示した風速) となる。また制動比はほぼ風速に無関係で水平0.14、垂直0.15である。これらの値は一般の風向計の特性と大差ないが、矢羽根型の本質的な欠点として制動が悪いために過渡応答時には60%程度の行き過ぎが生じ、また固有振動周期と一致した風向変動に対しては利得が3倍ぐらいにもなってしまう。そのため短周期の変動までこの測器で分解することは不可能で、ほぼ $45/V$ 秒ぐらいより長い平均値についてでなければ正確な値を示しているとは言えないという欠点がある。この測器による研究の結果については著者の1人³⁾によって報告されている。

c) その他の測器

その他の常時観測用の測器は一般に用いられているものと大差ないが、打点式の温度記録計 (Iio E-74型) の感部の内4つは2組の通風乾湿球温度計になっており、1個は百葉箱に、今1つは測風塔上10mの高度において大気密度の算定あるいは大気安定度の目安を得るのに用いられるようになっている。また雨量計 (Koshin 111型) は降雨強度計を兼ねており、1分間及び10分間の単位での降雨強度が測定出来るようになっている。

5. 特殊観測用測器

a) 風圧板型風圧計

この風圧計は直径10cmの円型の受圧板にかかる風圧を受圧板のために生じるひずみによって測定しようとするものであり、変換器にはストレインゲージを用いている。これは数年前著者の1人⁴⁾によって開発されたものでその構造は Fig. 8 に示すとおりである。この受圧板の固有振動周期は非常に短く、測定可能範囲の下端はほとんどの場合記録装置の特性によって決定される。また静的な特性は Fig. 9 に示すとおりで、風圧と出力とは直線的な関係にある。

この風圧計はその構造上固定式であって、特定の問題となる走向を持つ面にかかる風圧を測定することになり、構造物への影響を知る上においては有利であるが、一般的な測定のためには斜めに風が当たった場合、 Fig. 10 に示したように必ずしも

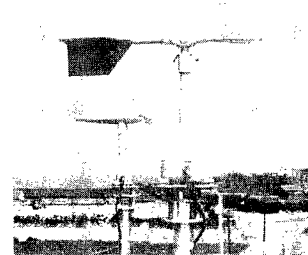


Fig. 7 New all-weather type bivane and propeller anemometer on the wind tower.

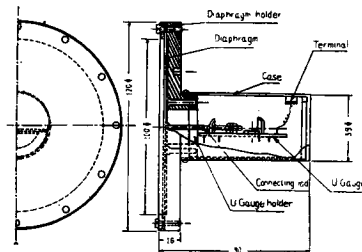


Fig. 8 Pressure plate anemometer.

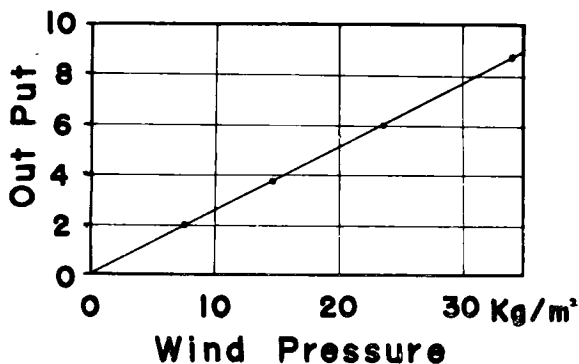


Fig. 9 Statical characteristics of the pressure plate anemometer.

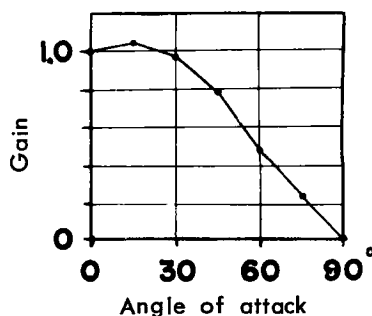


Fig. 10 Characteristics of the pressure plate anemometer to slant wind.

風圧力の分値を示さないのに注意を要する。

b) ピトー管型風圧計 (AT-4型)

この風圧計は上述のような固定式の欠点を排して、一般的な観測に用いられるように作られたもので **Fig. 11** のような外観を有するピトー管 (厳密には静圧穴の位置が多少異なっている) の全、静圧差をステ

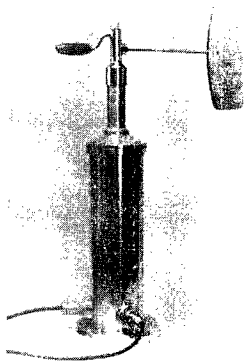


Fig. 11. A view of pressure tube anemometer (AT-4).

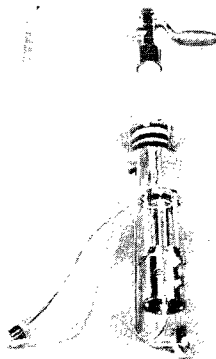


Fig. 12 An inside view of the pressure tube anemometer (AT-4).

ンレス鋼製ベローズの変位として検出し、それを差動変圧器によって電気出力に変換するものである。さらにピトー管は矢羽根によって常に風向方向に向うようになっており、その風向はポテンショメーターによって検出される。ベローズの変位は圧力と変位の直線的関係の得られる範囲内におさえられており、内部の構造は **Fig. 12** 及び **Fig. 13** に示すとおりである。差動変圧器の1次電源には特殊回路によって安定された1.2Kcの交流が用いられており、**Fig. 14** に示すような電源、検出部 (Shinko MI-11型) が付属している。この検出部には1、3および6成分のものがあり、写真のものは6成分のものである。

この風圧計のベローズを含む動作状態での固有振動周期は $\frac{1}{67}$ 秒で風速にはほとんど影響されない。従って制動の点を考えに入れても $\frac{1}{10}$ 秒程度の変動は充分測定することは可能である。ただこのような特性を得るために弱風時の感度は多少悪くなっており、風速が5 m/sec ぐらい以上なければ使用出来ない。この風圧計の風圧と出力との関係の1例は **Fig. 15** に示すとおりである。またこの風圧計によって得られた記録の

1例を Fig. 16 に示す。

検出部のみを取り出して多少感度を良くし、水柱数ミリメートル程度以下の圧力差でも検出出来るようにしたものが差圧測定器である。

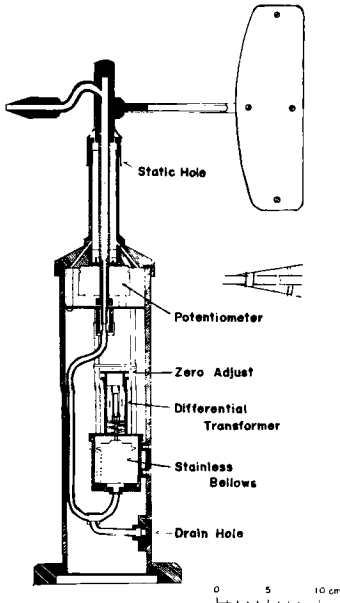


Fig. 13 Pressure tube anemometer AT-4.

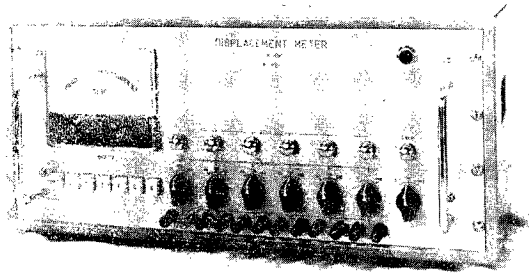


Fig. 14 Detector of the pressure tube anemometer (AT-4) (6 channel type).

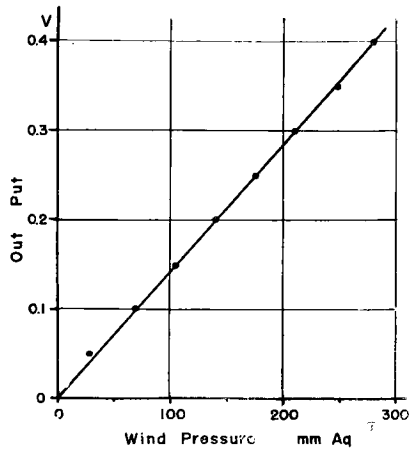


Fig. 15 Static characteristics of the pressure tube anemometer (AT-4).

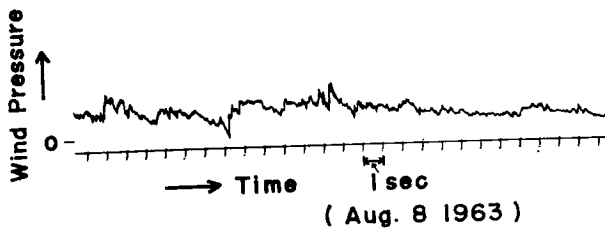


Fig. 16 An example of the trace of the pressure tube anemometer (AT-4)

c) 超音波風速計

この風速計は音波が空气中を伝播する速さが空気の動きによって影響を受け、風に沿って伝播する時は早く、逆らう時は遅くなることを利用して、2点間を相互に伝播する超音波パルスの伝播時間の差から空気の動き、すなわち風速を測定するものである。感部は **Fig. 17** に示すようなもので、前置増中器及びパルス発信器の納められたケースから突出した腕の先端に発信及び受信のチタン酸バリウム振動素子が1個ずつ取り付けられ、それが1組1.2メートルの間隔をおいて設置されている。従って測定される風速はこれら2つを結ぶ向きの方速度の1.2mの間の平均値である。検出部及び指示部等は **Fig. 18** のようなものであり、

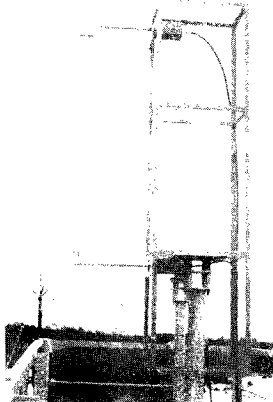


Fig. 17 A view of the sensor of sonic anemometer.

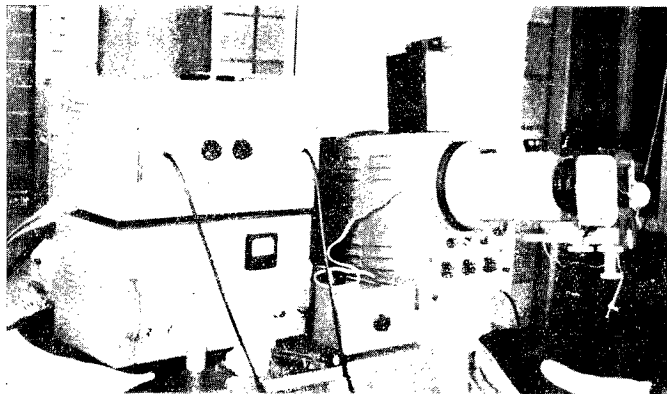


Fig. 18 A view of the detector of the sonic anemometer.

風速はブラウン管上の輝線の長さとして指示される。

この方法によれば空気の動きを直接測定することが出来、原理的な問題が少ないので精度の向上が容易に期待出来る。さらに1秒間に200回の周期でパルスの発振を行なうので $\frac{1}{200}$ 秒毎の風速の測定が行われ非常に短い周期の変動が測定出来るという利点がある。また測定素子の方向に沿った速度分値のみが正確に指示されるので種々の研究に応用範囲が広い。この風速計は米ソにおいては既に実用の段階に達しているが、日本では今回本実験所で理学部気象学特別研究所と協力して開発したこの試作機(Kaijo PT-1型)が最初のものである。なおこの試作機については別に報告されている⁵⁾。また本実験所ではこの試作機に基づいて最大測定風速 100 m/sec の実用機を作製の予定である。

d) 超音波空気密度計

この測器は超音波風速計の変形であり、超音波の空中での伝播速度が空気密度の関数であることを利用して、風速計の場合とは逆に風の影響を取り除いた音波の速度を測定して密度を求めようとするものである。これは超音波風速計の付属回路として取り付けることが出来るとの見通しで目下開発中である。

e) 風圧変化率計

この測器は風圧の短周期変動を研究するに際して風圧を直接測定せず、風圧の時間変化率を測定しようとするものである。この方法によれば短周期変動のみを簡単に取り出すことが出来、さらに絶対測定に比して簡単な構造の測器で測定が可能となる。現在のところ風圧板と電磁式変換器との組み合わせによって試作を進めつつある。

6. 調査用測器

a) 小型風向計 (VH-1型), 小型風速計 (AH-3型)

両者は組として用いるために開発されたもので、それぞれ **Fig. 19** のような外観を有する小型の測器である。小型とした理由は変動に対する追従性を良くすると共に取り扱いを容易にするためである。そして小型とするために生じる感度の低下を防ぐために風向計の矢羽根の形あるいは風速計の風杯の形を一般に用いられている大型のものとは異なったものとしてある。その構造は **Fig. 20** 及び **Fig. 21** に示すとおりである。

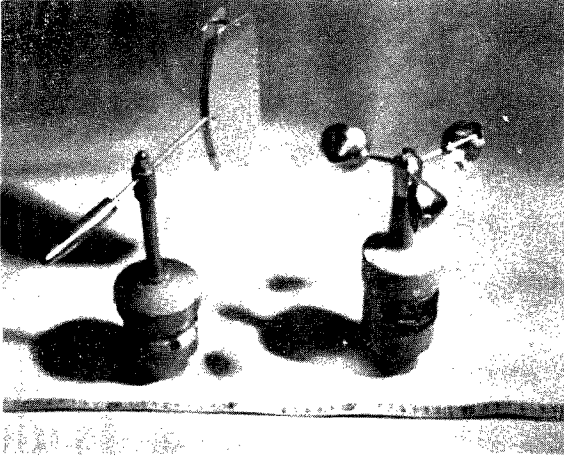


Fig. 19 A view of the small vane (VH-1) and the small anemometer (AH-3).

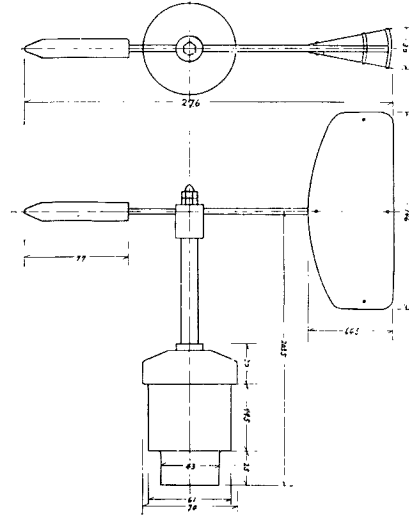


Fig. 20 Small wind vane VH-1.

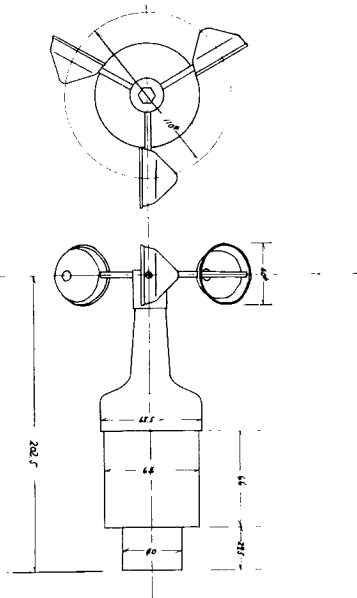


Fig. 21 Small anemometer AH-3.

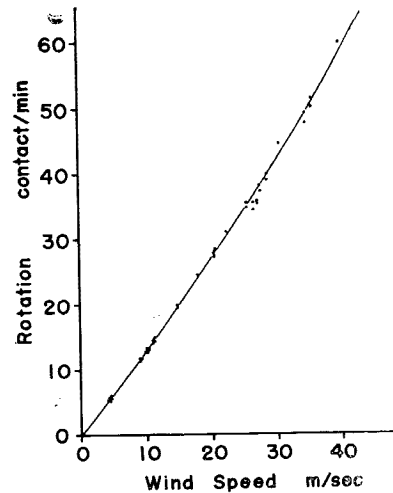


Fig. 22 Static characteristics of small anemometer (AH-3).

小型風速計の第1期製作分5台の検定曲線は **Fig. 22** に示すとおりであるが、起動風速も大型のものに比して大差なく、個々の器械の特性の差もあまり大きくはない。この小型風速計は現在風程50m毎の接点を取り付けて平均風速測定用としているが、これを小型発電機に取り替えることも可能である。また風向計の動特性についてはまだ風洞検定は終わっていないが、試験的な観測においては満足な結果が得られている。なお小型風速計を同時に多く用いる場合の記録には多素子記録計を用いる。これを用いれば10成分までの電接記録を種々の紙送り速度で記録することが出来る。

b) 携帯用風向風速計 (AS-1型)

この測器は理学部気象学特別研究所と協力して開発したもので、野外における移動観測用のものである。その構造は簡単で三脚の上に感部と記録部を一体としたものを取り付けるだけで測定が出来るようになってゐる。外観は **Fig. 23** に示したとおりで、取り付けた時に感部は地上 1.5m の高さになる。自記紙は1日巻きて 12 mm/hrの紙送り速度である。そして自記紙の下半分に風速 上半分に風向を記録するが、風速

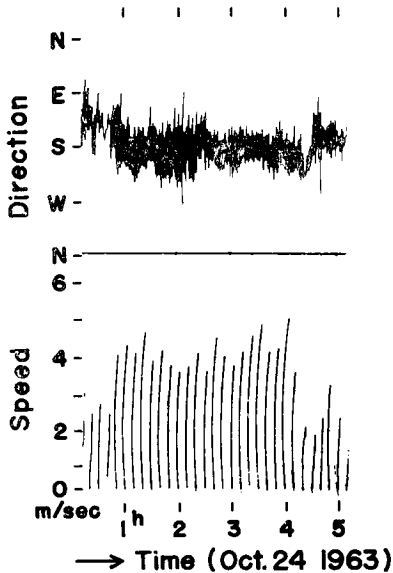


Fig. 24 An example of the trace of the portable anemometer (AS-1)

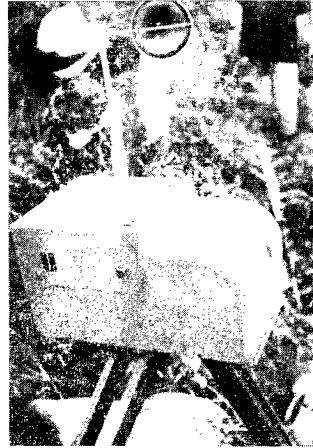


Fig. 23 A view of the portable anemometer AS-1.

は10分間毎にその間の平均値が直示され、また風向は2本のペンをを用いて360°の全方位を連続的に記録する方式が新たに開発され使用されている。その記録の1例は **Fig. 24** に示したとおりである。

c) 磁気記録型記録計

この記録計は磁気テープをパルス記録に用いようとするものであって、上述の小型風速計と組み合わせて用いる電接記録計の代りになるような簡単なものにすることが目的である。従って、普通用いられるような磁気記録装置とは逆に極端に簡易化を計るもので、現在試作中である。

1. 結 語

以上、現在風力実験所において使用され、あるいは開発中の測器について説明したが、いずれも完全な形にまで改善されているとは言い難く、今後測定を行なう過程において必要な点の改良を行なっていかなければならない。また多くの研究は始められたばかりであって今日までにこれらの測器を用いて得られた成果は少ないが、現在多くの研究が進められつつあり、さらに多くの研究が近く着手される予定である。最後にこ

これらの測器の計画，設計に協力して頂いた理学部気象学特別研究所及び地球物理学教室工作室の諸氏の御好意に感謝すると共に，各測器の製作に当られた光進電気工業，新光電機，海上電機，東洋測器，測機舎および飯尾電機の各社の御協力に感謝する次第である。

なお，ピトー管型風圧計（AT-4型）は理学部田中耕三郎氏に，小型風向計（VH-1型）及び小型風速計（AH-3型）は防災研究所羽野淳介氏に設計して頂いたものであることを付記して特に両氏の努力に感謝の意を示したい。

参 考 文 献

- 1) 佐貫亦男：地上気象器械，共立出版，1953.
- 2) 矢島幸雄：変動風速時における風速計の応答，研究時報，12巻1号，p. 55～57，1960.
- 3) 光田 寧：暴風時における風速の垂直成分について，京都大学防災研究所年報，第7号（発表予定）.
- 4) Ishizaki H.: Variations of Wind Pressure Against Structures in the Event of Typhoons. Disaster Prevention Research Institute Bulletin, No. 30, 1950.
- 5) 光田寧，水間満郎：超音波風速計とその試作，天気，11巻2号，1964.