

超音波風速計とその試作*

光 田 寧** 水 間 満 郎***

要約: 超音波風速計は、動いている媒質中の音波の見かけ上の伝播速度が、その伝播の向きによってことなることを利用して媒質の動き、すなわち風速を測定する近年開発された新しい測器であり、従来の風速計に比して数多くの利点を持っている。筆者等もこれを研究に用いることを計画し、まず現在までに作られたものについて検討し、パルス時間差法によるものが現在のところもっとも製作が容易でしかも利用価値も高いとの結論に達した。最初の試作機は最近完成し、試験的な観測を行なう段階に達した。

1. ま え が き

気象学およびそれに関連した学問の進歩にともなうて、気象要素のひとつである風速の測定にも従来になかったようなきびしい要求がなされるようになった。しかもその要求が精度あるいは周波数特性の向上といった根本的な問題に関連しているために、従来の測器の改良によっていたのでは飛躍的な向上は期待できないという悩みがあった。このような点を解決するために最近全く新しい機巧による測器が色々と開発されつつあるが、そのうちの顕著なものひとつに超音波風速計がある。この測器は第2次大戦中に急速に発達した超音波技術を応用したもので、1940年代に研究が始められたが、実用段階に達したのは最近のことである。

この測器は、風速のある方向の分値を直接測定するので、精度も高く周波数特性もよくすることができるなどの数多くの特色を持っている。筆者等は、先年来この非常に将来性のある測器に注目し研究に利用することを検討してきた。そして最近になって最初の実用化試作機が完成した。これは、従来から微細気象学において重要な要素でありながら正確な測定が非常に困難であるとされてきた風速の垂直成分を測定することを目的としたもので、特に数 cm/sec の低風速まで測定できるようにな

っている。今後引き続き強風用のものを作る予定である。本報においては超音波風速計の原理及び方式に関する考察、それにもとづいて選ばれた試作機の方式に関する説明、さらにその試作機による実測の結果について述べる。なお、この測器によって測定した結果の意義に関する考察および従来の測器による観測結果との比較の結果等については近く別に報告される予定である。

2. 超音波風速計の原理と特色

運動する大気中の音波の伝播は、音が風で流される、すなわち音波面の各点はその点における音波の速度との合成速度で動くと考えてもよい。いま、第1図のように距離 d をおいて相対した2点に送信器と受信器を一つづつおいて両方から音を出し他方でその音をとらえるという場合を考えて見る。

風は定常で一様に風速 V で吹いており、その2点を結ぶ方向の分値を T_1 から R_1 の方へ V_d 直角な向きの分値を V_n とする。 T_1 から R_1 への音波の伝播時間は、静止大気中の音速を C とすると

$$t_1 = \frac{d}{C \cos \alpha + V_d} \quad (1)$$

で示すことができる。一方、逆方向の伝播時間は

$$t_2 = \frac{d}{C \cos \alpha - V_d} \quad (2)$$

となる。この伝播時間の差 Δt は

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{2dV_d^2}{C^2 \cos^2 \alpha - V_d^2} \quad (3)$$

であるが、一方、第1図より明らかなように

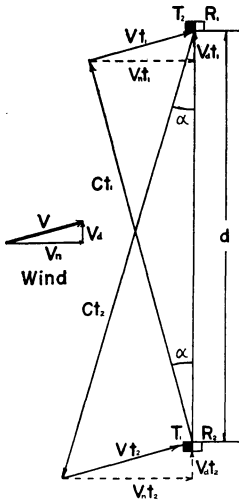
$$\cos^2 \alpha = 1 - \frac{V_n^2}{C^2}$$

* On the Sonic Anemometer.

** Yasushi Mitsuda, 京大防災研究所

*** Mitsuo Mizuma, —1963年12月22日受理—

本文の内容の1部は日本気象学会昭和38年秋季大会および第10回“風のシンポジウム”で発表したものである。



第1図 風の中の音波の伝播

という関係が成立し、一方 $V^2 = V_x^2 + V_y^2$ で、さらに一般に音速に比べて風速は小さいということを考えに入れると(3)は次のようにかける。

$$\Delta t = \frac{2dV_d}{C^2 - V^2} \approx \frac{2dV_d}{C^2} \tag{4}$$

したがって、この時間差 Δt を何らかの方法で測定すれば、この式によって風速分値を求めることができる。これが超音波風速計の基本原理である。

この時間差 Δt は、2点から同一位相の波が出された場合にはそれ互に対応する点に到達した時の位相の差として示すこともできる。すなわち、音波の周波数および角周波数を f および ω とすると位相差 $\Delta\phi$ は次のようにかける。

$$\Delta\phi = \omega\Delta t = \frac{4\pi f d V_d}{C^2} \tag{5}$$

したがって2つの受信波の位相差によっても風速が求められることになる。ただしこの場合は位相差が $\pm 360^\circ$ を越えるような時は判別できないから測定範囲には限界がある。

このように、この風速計は、回転風速計のように風杯とかプロベラなどの感部を気流中にさらしたりしなくてもよいわけで、送受信器の影響さえ充分小さくできれば気流の状態を全く乱すことなしに測定ができる。これがこの風速計の大きな特色である。さらに上に述べたとおり機械的な変換器を用いた感部を使わない直接測定であることも、変換器の特性に起因した測定の限界がないという点で非常に有利である。そして時間差の測定技術の

みによってその精度および周波数特性が決定される。

風速の算定式である(4)あるいは(5)式からも明らかなように風速は時間差または位相差に対して直線的な関係にあるので、熱線風速計などに比べて非常に便利である。さらにこれらの式の中の定数は2点間の距離と静止大気中の音速でいずれも物理的に明確なものであるから、経験的に定数を決定しなければならない他のほとんどの風速計に比して測定値の意義ははっきりしている。

しかし、実際に使用した場合この風速計の示す風速は2点を結ぶ線分上での風速の平均値であって、ある点での風速ではない。したがって、この差が問題となるような現象の観測に用いる場合にはあらかじめよく吟味しておく必要がある。もっともこの点は d を小さくすることはよって改善されるが、そのためには送受信器を小さくし、より小さい時間差を検出するという技術上の問題を解決しなければならない。一方この空間平均を直ちに測定出来るという特性をうまく用いれば後にも述べるように滑走路の上の平均風速を直ちに測定出来るというような新しい用途が開発出来ることも当然である。

風速の算定式(4)(5)には静止大気中での音速 C が定数として入っている。この値は気温 (T : 絶対対温度)、気圧及び水蒸気圧力(それぞれ p および e : 両者同一単位)により、なかば実験的な次のような関係式によって決定される²⁾。

$$C = 20.067 \sqrt{T \left(1 + 0.3197 \frac{e}{p} \right)} \tag{6}$$

したがってこれらの気象要素特に気温の変化があれば測定値は補正をしてやらねばならない。

3. 現在までに作られた超音波風速計

超音波を用いて大気の動きを測定する装置を最初に作ったのは Carrier と Carlson であるといわれ、その装置は飛行船の真対気速度を測定するために作られたもので、1944年のことである。気象用測器としては、Suomi が1946年に製作したものが最初であり、その後今日までの間に何人かの人名によって種々の超音波風速計が作られて来たが、特に最近数年間の進歩は目ざましいものがあるといえよう。

これらの超音波風速計はいずれも先に述べた原理にもとづいていることは共通であるが、音波の発生方法、送受信器の配置あるいは時間差測定の方法によってその方式にはうつりわりが見られる。最初に Carrier と Carlson が作ったものは連続的な音波を出す音源の風上側と風下側の同じ距離に2つのマイクロフォンを置き、音源

とマイクロフォンの間を音波が伝播する時間の差を2つのマイクロフォンに受信された音波の位相差によって検出しようとするものであるが、完全な形にならずに終わったとのことである。

次に Suomi が作ったものも完全な形の測器とはいえないので、彼が Barrett と共にラジオゾンデ用に製作した温度測定のための音速測定装置²⁾を2台逆方向に並べただけのものである。彼等の温度計は、シングア라운드方式と呼ばれ以前から音速の精密測定に用いられてきた方式によるもので、一対の送信器と受信器を40cm 離しておき、送信器から最初に音のパルスを出しそれが受信器に到達した時にすぐまた次のパルスを送信器から出すといった動作を繰返す。この場合には一定時間内に何回パルスが出されたかを測定することによって音波の伝播時間を知ることができる。この温度計では風速による影響がそのまま指示の誤差として出てしまうが、この点を逆用して風の中で互に逆方向に音波が伝わるように並べてこの温度計を2台おけば、両者の指示の差は先に述べた音波の到達時間の差を示すことになる。

これらの試験的な研究に刺戟されて、超音波風速計の試作が各地で始まった。

今日までに作られたものの概要を示したものが第1表である。この表には発表者および発表年、測定要素、送受信器の配置法、時間差の検出法および使用音波の周波数等の細目が発表年代順に示されている。表からも明らかとなり、研究はすべて米国カソ連において行なわれていることが目立っている。また最近数年の間に発表されたものが大半を占めていることは先に述べた最近の急速な発達を示すものに他ならない。

1950年に発表された Corby³⁾のものは、水平面内での風速分値を測定してブラウン管スコープ上のXY軸にその分値を入れ、各瞬間のベクトル的な風速をスコープ上の点の位置として示そうとしたものである。風速受感部は中央に送信器をおき互に直角な向きの等距離(150cm)の点に4つの受信器をおいたもので、送信器からパルスを出し向かいあった2つの受信器においてそれを受信する時刻のずれを検出する方法である。

この方式の送受信器の配置法は、送信器が1つでよいという利点もあってその後も多く用いられ、水平面内での風速測定の場合の標準的な型となっている。しかし2方向に進む音波は異なった経路を通ることになるので、測定しようとする現象のスケールがこの2つの経路の間隔に比して充分大きい場合には問題はないが、短周期の

変動を測定しようとする場合には誤差の原因となる。さらにこの送受信器の配置による方式の誤差の原因となるものに、気温の不均一ともなる音速の局所的な変動がある。Suomi の計算⁴⁾によれば1mの距離だけ離れた点での音速の差の標準偏差は0.4m/secにも達する場合があり、この2つの経路での音速の差はそのまま時間差となって現われて来る。しかもこれらの風速と気温の局所的な変動には相関があるから、問題はさらに複雑になる。したがって近年になってこの配置法を採用している Bovsheverov 等⁵⁾や Kaimal⁶⁾は、この経路の長さを10cm というような小さなものとして誤差を小さくすると共に一点での風速とし得るような測定値を得ようと試みている。しかしこの経路の長さが短くなったことのために、パルスを用いるには時間差が小さすぎ、いずれも位相差を検出する方式に変わっている。

1955年に発表された Schotland⁷⁾の風速計は、直角2等辺三角形の頂点に送信器を両底角の位置に受信器を置いたもので、送信器からは連続的に音波を出し、送信時の位相と各々の受信器で受信した音波の位相差を Holman の位相差計で検出し2つの風速成分を求めようというものである。この場合の音の経路の長さは100cmで、周波数は風速35m/secの時位相差が位相差計で検出できる最大位相差の半分である70°になるように663cpsに選ばれている。この場合には音波は一方向にしか発射しないので、風速は(1)式を用いて計算することになる。そのため(4)または(5)式によって計算するのに比べて誤差は大きくなり、温度変化に伴う音速変化の影響も大きく受ける。またこの方法では後に述べるようなSATとしての利用が出来ずあまり良い方法とは言えない。事実その後この方法を採用したものはでていない。

第5番目の Suomi^{4), 8)}の機械は風速の垂直分値を測定しようとするもので、1m離れた位置に送受信器を1対づつおいて、この間を逆方向に伝わる音の伝播時間の差を検出するものである。80kcの超音波のパルスを用い、1秒間に200回の割合でパルスを出している。

この送受信器の配置は風速の一方の分値のみ、特に風速の垂直成分を測定する場合の標準的なものとなっている。これによれば2つの音の経路がことなっていることによる誤差は問題ではなくなる。今回筆者等の試作したのもほぼこの測器と同じものであるので詳細は後に述べる。

次の Bovsheverov と Voronov⁵⁾によるものは水平の2つの風速成分を測定するもので、Corbyと同じ配置

に送受信器をおいているが先に述べたとおりその間隔が10cmと小さくなっている点がことなっている。そして中央の送信器から25または100kcの連続波を出し向かいあっている2つの受信器に到達した音波の位相の差を測定している。周波数が2種類あるのはこれによって測定範囲を切り換えようとするもので、高い方は低風速、低い方は高風速用である。9番目のKaimal⁹⁾のものもこれとほとんど同じであるが、送受信器によって生じる乱れの影響を小さくするために送信器が受信器のある面より離れていて音が斜めに進むようになっている点が異なっている。

Gurvich⁹⁾の製作したものは彼自身マイクロアナモメーターと称しているとおりの送受信器の間隔が2.5cmしかない小さなものである。そして彼はこれを風速の垂直成分の測定に用いているが、これによれば非常に細かい変動まで測定することができその値は大きい。しかしどのような方法で時間差を求めているのか、あるいはいかにしてこのように小さな送受信器を製作することができたかは文献入手の都合もあって未だに明らかではない。

John¹⁰⁾はこの超音波風速計を滑走路上の風の測定に用いることを考え、Carbyのものと同じ方式の、しかしその目的上送受信器の間隔が50m以上もあるものを製作している。使用周波数は長い距離を伝えるために減衰の小さい可聴音の範囲に入る3kcを用いている。彼の測器は同時に両方の伝播時間の平均を作って静止大気中の音速(c)をも測定できるようになっており、これによって気温も同時に知ることができる。このような測器は超音波風速温度計(Sonic Anemometer-Thermometer)略してSATと呼ばれ、このように出来るのは超音波風速計の特色でもある。Sucmi⁸⁾もこのような気温測定と両用のものにするのを試みているのであるが、気温の方はうまく行かなかったようである。この種の飛行場用のものは日本においてもかなり以前から研究が始められていたようであるが、未だに実用の域に達したとの報告を見てない。

KaimalとBusinger¹¹⁾が1963年に発表したものは風速の垂直成分を測定することを目的としたもので、送受信器の配置はSuomiのものと同じであるが、2組の送受信器で異なった周波数を用い、連続音による送信音と受信音の位相差の検出を行なっている点が違っている。この装置にも静止大気中の音速の測定も同時に行なうことができる回路が附属しているのでSATとして用いることができる。Kaimal等はこの風速と気温の記録にべ

ンレコーダーとテープレコーダーを併用して短周期の変動まで記録することを試みている。またこの場合には送受信器間の間隔を変えることによって感度および特性の切り換えを考えているようである。

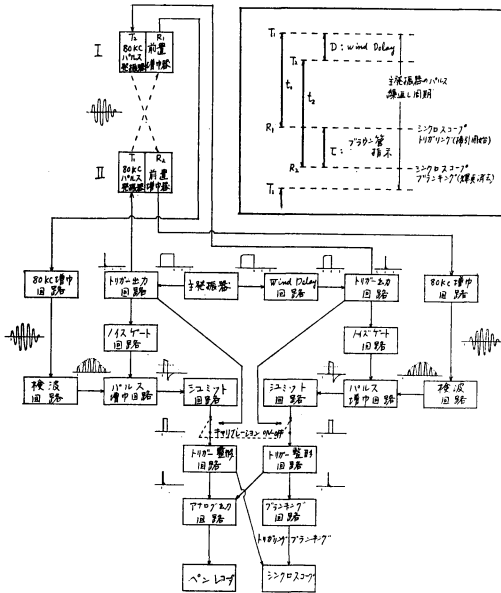
以上が現在までに発表された超音波風速計の概要であるが、これらの説明において、測定精度および周波数特性については全く触れなかった。これは、この種の測器においてこれらの特性はすべて電子回路の特性によって決定されてしまうからである。次に時間差検出の技術を比較してみる。まずパルスを用いる場合にはパルスを短形波として出し、また短形波を忠実に受信する必要があるから、送信器および受信器の過渡応答特性が問題となる。パルスの立上りの悪いことあるいは不安定なことは誤差の原因となる。このパルスを用いてシングアラウンドの方式で時間差を検出する方法は、精度がよいという特色を持っているが、ある時間の間に送るパルスの回数を測定するという方式であるため、どうしてもある程度以上測定時間を短くすることは困難になってくる。また測定時間内に雑音が入った場合には直ちに送信器の方から次のパルスをも出してしまふので誤差の原因となり、しかもそれを記録の上で見分けるのは困難である。パルスの到達時間の差を測定する方法は回路を比較的簡単にすることができ、ブラウン管上に時間差を表示する方式にすれば全装置を非常に簡単にまとめることができしかも精度の高いものにできる。また雑音に対してもある程度までその影響を減らせるようにでき、雑音に対して最も影響されない方式である。また雑音の影響を記録の上で検出することもできる。しかし、パルスの到達時間が小さくなると測定上の誤差が大きくなっていく欠点がある。使用周波数を上げてても現在の技術では送受信器の間隔を数十cmよりも短くすることは困難である。さらにこの方式のものからアナログ形式の出力を得ることは他の方法に比して困難である。

連続音を出してその位相のおくれを検出するという方法は、アナログ出力を得るには最も適している。この場合の特性は主に位相差検出回路の特性によって決定される。しかし位相差検出回路の直線性は現在のところ数%以下にすることは困難で、パルス時間差法でブラウン管上へ直接指示させたものに比してよくない。また現在用いられている位相差計の多くは時定数が大きくこれを用いた測器の総合的な周波数特性はあまりよくないという難点もある。また位相差検出においては波形のひずみあるいは雑音が誤差として入ってくることも問題である。

また、先にも述べたとおり位相差は常に 360° 以内の範囲になければならず、さらに精度の向上のためには測定範囲が検出可能範囲の全域と一致するような方法が望まれる。そのため使用周波は測定範囲と送受信器の距離によって一意的に決められることになる。しかし距離を短かくして周波数を上げると位相差検出が技術的に困難となる。このため色々な新しい位相差検出の方法が考えられつつある。

4. 試作された超音波風速計 (F-PT-1 型)

先に述べたとおり、著者等は風速の垂直分値の測定にこの超音波風速計を用いることを計画し、その方式をいかなるものにするかについて検討したが、その結果選ばれたものは第2図にそのブロック・ダイアグラムを示し



第2図 試作超音波風速計のブロックダイアグラム

たようなものである。これは図からも明らかなように第1表の5番目に示した Suomi のものとほぼ同じ方式である。チタン酸バリウムの振動素子を2組送受信器に用い、間隔1.2mで相対する位置に配置されている。そしてこの間を周波数80kcの超音波パルスを1秒間に200回の割合で発射し互に逆の向きに伝播する時間の差を検出しようというものである。このパルス時間差法を採用した理由は、この方法が最も回路が先きにも述べたとおり簡単で確実性があり、しかも精度の方もブラウン管表示を用いるために決して悪くはなく、直線性も秀でていと判断したためである。ただカメラによる記録を行な

| 発表者 (国名) | 発表年 | 測定方向 | 送受信器間距離 (距離 cm) | 測定方法 | 使用周波数 | パルス運用周数 |
|------------------------------------|---------------------|------|-----------------|---------------|-----------------------|----------------|
| Gaier and Carlem (米) | 1944 | 水平 | — | 位相差法 | — | — |
| V.E. Suomi (米) | 1946 ⁴⁾ | 水平 | 60 | シンクロスコープ法 | — | × |
| R.E. Corby (米) | 1950 ³⁾ | 水平 | 110 | パルス時間差法 | — | 60 pulses/sec |
| R.M. Schotland (米) | 1955 ⁷⁾ | 水平 | 100 | 位相差法 | 663 Kc/sec | 連続波 |
| V.E. Suomi (米) | 1957 ⁹⁾ | 垂直 | 100 | パルス時間差法 | 80 Kc/sec | 200 pulses/sec |
| W.E. Suomi and J.A. Businger (米) | 1959 ⁸⁾ | 垂直 | 100 | パルス時間差法 | 25 Kc/sec | 216 連続波 |
| H.M. Babiker and W.P. Vosters (イタ) | 1960 ⁵⁾ | 水平 | 10 | 位相差法 | 100 Kc/sec | — |
| A.S. Green (イタ) | 1960 ⁶⁾ | 垂直 | 25 | — | — | — |
| R.S. Joha (米) | 1960 ¹⁰⁾ | 水平 | 450 | パルス時間差法 (連続波) | 3 Kc/sec | — |
| J.C. Kaimal (米) | 1962 ⁴⁾ | 水平 | 10 | 位相差法 | 10 Kc/sec | 連続波 |
| J.C. Kaimal and J.A. Businger (米) | 1963 ¹¹⁾ | 垂直 | 10 | 位相差法 | 10 Kc/sec & 75 Kc/sec | 連続波 |

第1表 現在までに作られた主な超音波風速計

わねばならない点は多少不便であるので、別に多少特性は落ちるが、位相差法と同じ手法でペン書き記録を同時に行ない得るような補助回路を付属させることとした。

試作機においては都合で時間差の検出指示に既製のシンクロスコープ (Iwasaki SS-5022) を用いることとした。またシンクロスコープの精度の都合で時間差を小さくすることが好ましくないこと、および指示の長さを適当な単位のものにする必要もあって、送受信器間の距離は1.2mに選ばれた。これは試作機という特殊な条件のため送受信器が大きくなってしまったためこのような大きな距離が選ばれただけであって、観測の目的のためにはさらに短かくする必要がある。測定レンジは (1) 0.5~1m/sec, (2) 1.5~3m/sec 及び (3) 5~10m/secの3つで、各レンジの測定誤差は(1)±10%以下、(2)±3%以下、および(3)±1%以下と風速測定範囲の広いものほど誤差は少ない。

この測器の動作は第2図に示したブロックダイアグラムからも明らかであるが、まず主発振器で200 cpsのパルス間隔を決定する波を作り、トリガー出力回路IとWind Delay回路に供給する。このWind Delay回路は風速測定範囲を負の範囲にまで広げるために付属された回路で、2つの送受信器から同時にパルスを出さずにT₂

の方だけ一定のおくれをもって発射するためのものである。Wind Delay でおくれをつけられた波はトリガー出力回路Ⅱを通して T_2 のチタン酸バリウムに瞬間的な高圧を加え、80kc の超音波パルスを発生させる。パルスは図に示されているような減衰振動で継続時間は 1msec 以下である。一方トリガー出力回路Ⅰは主発振器からの信号で直ちに T_1 をトリガーしパルスを発生させる。そしてこの径路を互いに逆方向に伝わったパルスは R_1 および R_2 の受信器で受信されることになる。各々の受信器の支持柱の根元には同調型の前置増巾器があって一度増巾した上で本体に導かれる。そこでふたたび同調型の増巾器を通して 80kc の信号のみが増巾されて検波回路に導かれる。検波された信号はパルス増巾器に入ってパルス化されシュミット回路であらかじめ設定されたレベル以上に達した部分で矩形波を作り、トリガー整形回路で微分されてトリガー信号が作られる。ここで R_1 で受信された信号によるトリガーはそのままシンクロスコープのスイープをトリガーしブラウン管上の輝点が走り始める。一方 R_2 で受信された信号によるトリガーはブランキング回路に入ってブランク信号を作り、シンクロスコープのスイープをブランクする。したがって R_1 でパルスを受けて R_2 に逆方向のパルスが受信されるまでの時間がシンクロスコープの輝線の長さとして示される。この τ は

$$\tau = (t_2 + D) - t_1 = D + t_2 - t_1 = D + \Delta t$$

で示されるから、ブラウン管上の輝線は D に相当する風速だけ原点をずらした形の風速を示すものと考えればよい。この風速計では D の長さはレンジ(1)では $10\mu\text{s}$ 、(2)で $100/3\mu\text{s}$ 、さらに(3)では $100\mu\text{s}$ に選ばれている。これが風速では各々 0.5、1.5 および 5m/sec に相当することになる。

なお、イズゲート回路はパルスが受信器で受信される前後のわずかの時間だけ増巾器が動くようにするための回路で、必要でない時に受信される雑音によって誤動作が生じるのを防止している。またシュミット回路のレベルの方においても不必要な雑音では動作しないようにできる。これらの回路によって自然界からの雑音または二次的な反射パルスによる誤動作が防止できる。

なおトリガー出力回路における送信前の信号によってシンクロスコープを動かさず、Wind Delay の長さ、すなわち風速の零点を点検あるいは調整するようになっている。この動作はキャリブレーション ON-OFF のスイッチで行なわれる。

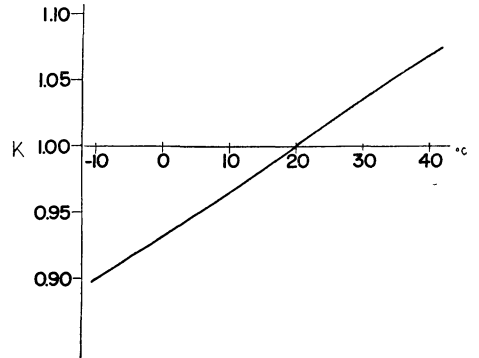
シンクロスコープの目盛面には 20°C の乾燥空気中の音速に対する目盛がうってある。しかしこの目盛で読取った値は先に述べたとおり気温湿度の差があれば音速に対する次の補正をしなければならない。

$$U_{true} = KV_{obs} \quad (7)$$

ここで補正係数 K は次の形で示される。

$$K = \left(\frac{C_t}{C_{20}} \right)^2$$

ここで C_t はその状態の音速、 C_{20} は 20°C の標準の音速である。音速の値は式(6)によって計算されるが、実際に生じる湿度の変動量は小さなもので、湿度による補正値は 1/100 の程度以下のことがほとんどであるから補正は気温のみについてで充分である。この補正係数を図示



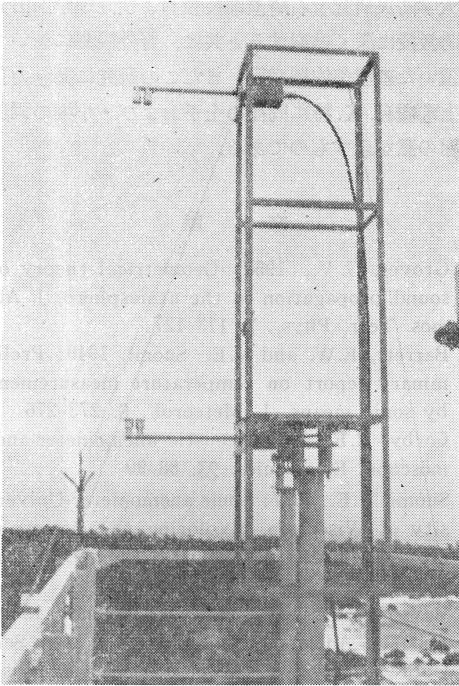
第3図 温度補正曲線

したものが第3図である。この図からも明らかなように $20^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ の範囲でも高々 $\pm 4\%$ ぐらいの差である。

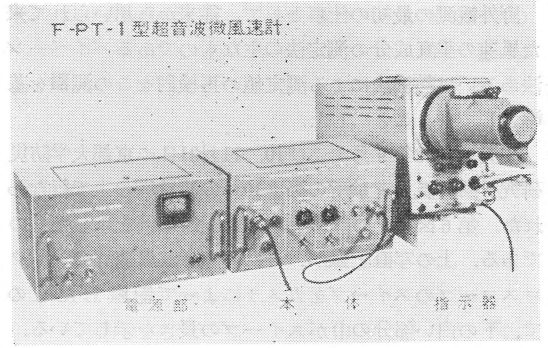
ペン書き記録用のアナログ出力回路は、シュミット回路からの2つの出力によってパルス巾変調の矩形波を作りそれを整流平滑して出力を得るものである。

シンクロスコープ上に現われたスイープの長さの変化は 35mm フィルムを連続的に送る (6 mm/sec) 装置を有するカメラによって記録される。

このようにして作られた、試作超音波風速計 (F-PT-1型) は第4図および第5図に示すようなものである。すなわち第4図はその感部を示したもので、送受信器は前置増巾器から約 35cm の位置に並べて設置されている。第5図の写真に示されるものは左から電源部、本体及び指示器の順である。本体と感部との距離は約 150m までは延長することができる。本体の外部調整部分にはできるだけ少なくするようにしてあり、スイッチ類の他にレンジ切り換えと Wind Delay の調整があるだけである。



第4図 超音波風速計の感部

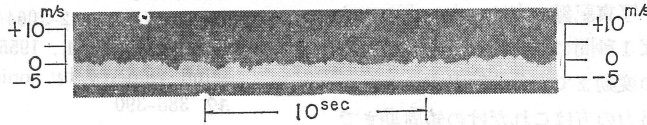


第5図 超音波風速計

5. 試作器による観測例

完成した試作器は種々試験の結果充分実用に耐えることが明らかになったので、これを野外における観測に利用して見ることが計画された。風洞等による検定を行なわなかったが、その理由は弱風速においては適当な準器がなく、むしろ絶対測定とも言えるこの測器による方が基準となるものであるところから、電気回路等の試験のみを行なったのである。ただしアナログ出力回路の方は直線性が未だに充分とは言えず解析に利用し得るだけの記録を得るところまでは至っていない。

Example of S.A. record taken with photographic recorder (Sept. 11, 1963. $\bar{U}=53\text{m/s}$)

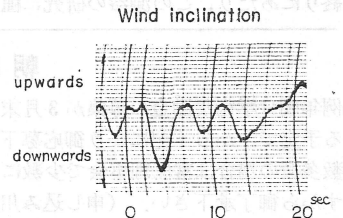
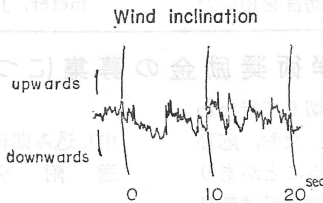
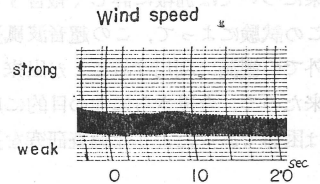
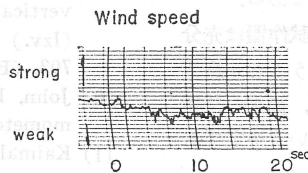
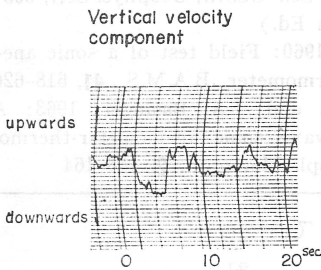


Examples of records taken with pen recorder (Oct. 31, 1963)

超音波風速計

熱線法

バイブーン法



第6図 超音波風速計による観測記録の例

野外観測の最初の仕事として、従来から用いられて来た風速の垂直成分の測定法の主なものであるバイベーン法あるいは熱線法による測定値の再検討をこの測器を基準としてやることにした。

観測は1963年9月および10, 11月31日に京都大学防災研究所潮岬風力実験所の高さ10mの測風塔の上で行なわれた。第6図はその際に得られた記録の例を示したものである。上の写真記録が、今回の超音波風速計のシンクロスコープのスweepをカメラによって記録したもので、下の白い部分の中がスweepの長さを示している。この白い部分と黒い部分との境界線の形が風速の変化を示しているのである。この際のレンジは $-5 \sim 10$ m/secで、外側に示した目盛によって、風速を読取ることが出来る。第6図の下左は今回試作したアナログ出力回路を用いた記録の一例で、下段中央はそれと同じ時の熱線法による風速と風向の上下偏角を示したものである。下段右側は、プロペラ型の風速計とバイベーンの記録を示している。この時の風速は数 m/sec 程度の弱いものであったために、バイベーンの自由振動周期が長く、制動も充分でないので自由振動に対応する変動がはつきり出て自然の風の短かい変動が消されてしまっている。熱線法による記録と超音波風速計のアナログ記録とはかなり似た変化をしているのが解る。写真記録の方は一本一本のスweepまで分解して見れば1秒間に200回の測定が行なわれているから100cpsの変動まで充分分解出来ることになる。しかしアナログ出力の方はこれだけの短周期まで追従するようにすることは未だに困難である。しかし、この測器では120cmの経路の平均の風速を測定しているのであるから先きにも述べたとおり不用意に周波数特性を上げることに疑問が生じる。これらの比較観測の結果については別報に詳しく報告する予定である。

この試験によって、この超音波風速計の試作器は充分野外での観測に利用することが出来るということが確認出来たので、今後さらに他の目的に応用し、従来の技術では困難であったような調査研究を進めていく予定である。

終りにあたり、この測器の研究に種々の助言を頂いた

京都大学防災研究所石崎澄雄教授および同理学部山元竜三郎助教授に深く感謝すると共に、野外観測において御指導頂いた理学部佐橋謙氏、またこの研究に御協力頂いた海上電機K. K. 特に同社の土子および・小堀の両氏にも感謝の意を示すものである。

文 献

- 1) Groves, G. V., 1955: Geometrical theory of sound propagation in the atmosphere, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **7**, 113-127
- 2) Barrett, E.W. and V.E. Suomi, 1949: Preliminary report on temperature measurement by sonic means, *J. Meteorol.*, **6**, 273-276
- 3) Corby, R.E., 1950: Acoustic anemometer-anemoscope, *Electronics*, **23**, 88-90
- 4) Suomi, V.E., 1957: Sonic anemometer-University of Wisconsin, Exploring the Atmosphere's First Mile, (Lettau, H.H. and B. Davidson, (eds.)), Vol. **1**, 255-266
- 5) Bovsheverov, V.M. and V.P. Voronov, 1960: Acoustic Anemometer, *Bull. (Izv.) Acad. Sci. USSR., Geophys. Ser.*, 586-588, (English Ed.)
- 6) Kaimal, J.C., 1962: A sonic anemometer for the study of turbulent wind loading of missiles, AFCRL-62-1064 (Research Report)
- 7) Schotland, R.M., 1955: The measurement of wind velocity by sonic waves, *J. Meteorol.*, **12**, 386-390
- 8) Suomi, V.E. and J.A. Businger, 1959: Sonic anemometer-thermometer, *Geophys. Res. Pap.*, No. 59, (Project Prairie Grass, A Field Program in Diffusion, Vol. **3**, Chap. 14)
- 9) Gurvich, A.S., 1960: Frequency spectra and functions of distribution of probabilities of vertical wind velocity components, *Bull. (Izv.) Acad. Sci. USSR., Geophys. Ser.*, 695-703, (English Ed.)
- 10) John, R.S., 1960: Field test of a sonic anemometer-thermometer, *B.A.M.S.*, **41**, 618-626
- 11) Kaimal, J.C. and J.A. Businger, 1963: A continuous wave sonic anemometer-thermometer, *J. Appl. Meteorol.*, **2**, 156-164

朝日学術奨励金の募集について

例年朝日学術奨励金の募集が3月末日締切りで行なわれる予定ですから下記により御応募下さい。なお、応募件数多数の場合は常任理事会で少数にしぼることがありますから御了承下さい。(申し込み用紙は学会又は朝日新聞社へ直接御照会下さい)

記

申し込み期日: 昭和39年3月15日

送 附 先: 東京都千代田区大手町気象庁観測部測器課気付, 日本気象学会賞および奨励金委員会