

## 超音波風速温度計とその大気境界層研究への応用\*

光 田 寧\*\*

## 1. はしがき

大気境界層における乱流輸送量を正確に知ることは、大気境界層の研究の一つの重要な課題である。しかし、多くの人達の努力にもかかわらず、これを実験的に測定することは必ずしも満足には行なわれていなかった。その大きな原因は計測方法に信頼出来るものが無かったことに帰されるが、20年ほど以前から開発の始められた超音波風速温度計はその点を補うものとして多くの人達によって期待され、色々な努力がなされて来た。そして、今日ではほぼ野外観測用計測器として定着しつつある。この小文は、著者およびその協力者の開発したパルス方式のものを中心に超音波風速温度計の開発の概略とその応用に関する現状を概説するためのものである。

## 2. 超音波風速温度計について

超音波風速温度計の原理については既に多くの論文に説明されているので、詳しく述べる必要もないと思われるが、基本的には大気中の2固定点間を互いに逆方向に伝播する音波信号の伝播時間が、その点を結ぶ方向の風速成分と静止大気中の音速、すなわち気温、の関数であり、近似的に2つの伝播時間の差および和として両者を検知出来るという原理に基づいている。原理は特に目新しいというものではなく、比較的古くから気象観測に応用しようとする試みがなされた例はある。

しかし、これを大気境界層の乱流測定に用いるための測器としてまとめあげようという努力が始められたのは、従来の計測方法に限界が明らかとなって来たと同時に

に電子技術に大きな進歩のあった1950年頃からである。この時代にアイディアを出し、試験的な測器を作り上げることに大きな働きをしたのは種々の計測器の開発者として有名な Wisconsin 大学の Suomi 教授であった。そしてまた、その試験的な測器が実際に野外観測に用いられたのは、これまた境界層の研究において歴史的な意義を認められている1953年 O'Neill で行なわれた Great Plains Turbulence Field Program においてであったようである (Suomi 1957)。この器械の内容は、この Project の報告の1部として発表されているが (Suomi & Businger 1959) パルス信号を用いた方式のもので、ブラウン管上に指示が現われ、写真によって記録を取るというものであった。

その後、米国においては、これを実用的な計測器として仕上げるための努力が数多くなされた。しかし失敗ので連続 Suomi が最初に用いたパルス方式ではどうしても安定な計測が不可能であるということが信ぜられるようになり、音響信号として連続波を用い位相差から伝播時間を知るという Schotland (1955) などに始まる方式が開発の主流となって行った。この間に各方面に使われた研究費は多額に達したようで、超音波風速計とは金ばかりかかって実用にはならないものという考えが米国においては拡がってしまった。このような状態の中で研究用としてほぼ実用の域に達したのは Suomi の協力者であった Washington 大学の Businger と Kaimal が協力して作ったもの (Kaimal & Businger 1963) が初めて唯一のものであると言って好いほどである。

一方、ソ連における事情ははっきりしないが、やはり位相差方式が採用され集中的な努力がなされたようで、特に感度を小さくするという点に重点がおかれたのか、Guruich (1959) による sound path がわずか 2.5

\* Sonic Anemometer-Thermometer and its Application to the Study of Atmospheric Boundary Layer

\*\* Y. Mituta 京都大学防災研究所,  
—1971年7月30日受理—

cm という小さいものを含めて、いくつかの形式のものが作られた。その後 Tsvang を始めとする接地気層の研究グループによって実際に研究用に用いられ、現在に至っているものは Bovsheverov & Voronov (1960) によって作られた sound path 10cm のものようである。部分品は手造りのものが多く、特に Gurvich のものなどは、中ソの関係が悪くなった時中国人の技術者がいなくなったので、以後感部を作ることが不可能になったというような話しがまことしやかに西側では伝えられていた。1969年カナダで行なわれた国際比較観測にソ連グループの持って来たものは、Bovsheverov & Voronov のもので、未だに真空管式のものであったが、その古い器械を大切に取扱って最大限の成果を上げているという印象が強かった。

日本においても、Suomi の報告が入手された時から、これを研究に利用しようという考えが持たれ、著者らも直ちに基礎的な調査を始めた。始めの間には米ソにおける新しい努力に関する情報も充分ではなかったもので、Suomi のパルス方式のものを基本とし、それに独自の改良を行なうという方法で試作機を作って見た(光田および水間 1964)。これはやはりオッシロスコープを用いたもので取扱いは不便であるが、今も水間氏の手元で使用可能な状態にある。その後、パルス検出の方式の改良、アナログ出力回路の試作などを行なって、さらに実用的なものを作ることが出来た (Mitsuta 1966)。

この頃、外国での主流が位相差方式に移っていることが解って来たし、また日本でも位相差方式による試作機が作られ、実験にも用いられるようになった(塩谷1967)。しかし、著者らはパルス方式の零点の安定度が良く、測定範囲が自由に広く取れる、さらに雑音の影響を受けないなどという利点は大きいものであり、信頼性の高い計測器にするためには、この方式による他ないという判断から、パルスの到着時間の決定が確実に出来ないという従来のパルス方式の欠点は、新しい方式を考えて解決するという方針によって、パルス方式の改良を続けた。

1964年頃に、米国 Washington 大学の Businger 教授および Miyake 博士等のグループから、超音波風速温度計の開発を協力して行なおうとの申し入れがあり、農技研・井上栄一博士らの御努力もあって、本格的な協力が1965年より始められた。その一環として日本で作ったパルス方式のものと彼等の位相差方式のものと比較観測が米国で行なわれ (Businger et al. 1969)、その結果と

して両者は全く同じ性能を有し、従来の技術では不可能であったような観測を行なうことが出来る可能性を持っているものであることが確認された。そして、さらに将来の開発という点について討論した結果、やはり、動作が安定していること等の機構上の点から日本の方式のものが優れているということになり、日本側が中心となって新しいトランジスター化したパルス方式の3次元型超音波風速温度計を開発することになった。その結果、1967年に1号機が完成し、再び米国で試験観測を行なった。この機器から新しいパルス検出方式を採用したためその動作はより確かなものとなった (Mitsuta, Miyake & Kobori 1967)。これによってほぼ実用化が完了し、野外実験でも容易に利用されるようになった。そして同型のもは、他の研究グループによっても利用されるようになり、その性能試験も米国、カナダ、ノルウェーなどの第三者によって色々な面から行なわれた。このような諸外国での試験の結果をも参考にして若干の改良を加えたものが次章に説明する現在のもの (Mitsuta 1971) である。またこの基本的なものを基として他の分野への応用も行なわれるようになった。

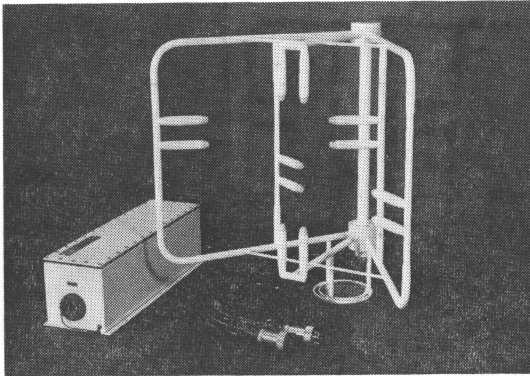
### 3. パルス式超音波風速温度計の概要

最終的に著者およびその協力者によって完成された超音波風速温度計については既に先きに示した文献に述べられているが、その外観は第1図のようなものであり、3組の sound path を持った感部と前置増幅器および本体とからなっている。水平成分の二つの sound path が直交しておらず120°の交差をしているのは、送受波器の影響を受けない範囲を前方に広くとるためである。sound path の長さは、10cm 以下にもできるが、ここでは精度を下げないという目的もあって 20cm に取ってある。その鉛直成分と気温の測定ユニットのブロックダイヤグラムは第2図に示すとおりである。水平2成分は、これから main oscillator と温度ユニットを除いたものである。動作順序は main oscillator からのパルスで二つの発信器が作動し (T)、反対側の受信器で受信される (R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>)。この間、受信器は信号が受信される直前まで不感状態におかれて、他からの雑音による誤動作を防ぐようになっている。さらにこの受信信号の発生は、後に述べるような新しい方式によっている。

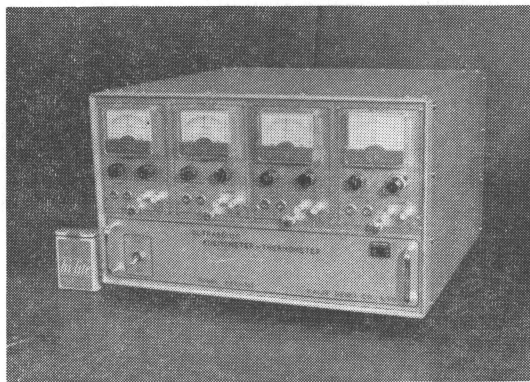
この二つの信号の受信時刻の差  $\Delta t$  は風速に比例する量で次のように示される。

$$\Delta t = 2A\Delta V_a / C^2 \quad (1)$$

ここでAは、全風速に対する補正係数であるが一般には



a) 感部および前置増幅器



b) 本体

第1図 超音波風速温度計の外観

数%以下の誤差で1と見て良い。d は、sound path の長さ、 $V_a$  は風速分値、そして C は 静止大気中の音速である。1気圧、 $20^\circ\text{C}$ 、乾燥大気という条件の下で、 $d=20\text{cm}$  とすると、

$$V_a = 295 \Delta t \quad (2)$$

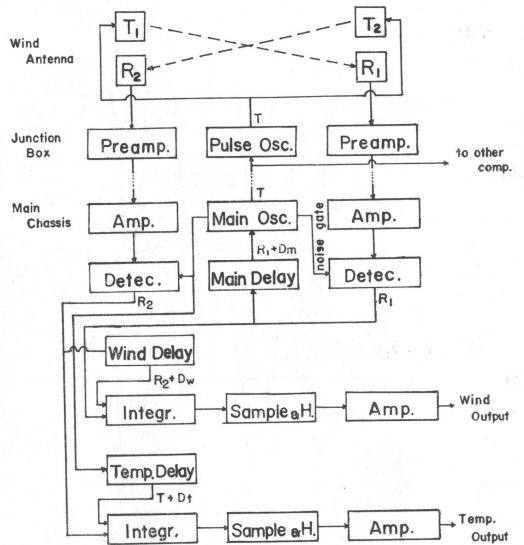
となる。但し、ここで  $V_a$  は、m/sec、 $\Delta t$  は、msec の単位で示す。そして気温が異なれば音速の差による補正を行なえば良い(詳細については Mitsuta 1966)。

実際に2つの時間差を電圧になおすには、どちらかの信号が先きに来るようにした方が良く、風速の零点を出力の中央に持ってくるために一方の信号を少しだけ ( $D_w$ ) 遅らせてやってから、その時間差を積分して電圧になおすという方式を取っている(第3図参照)。

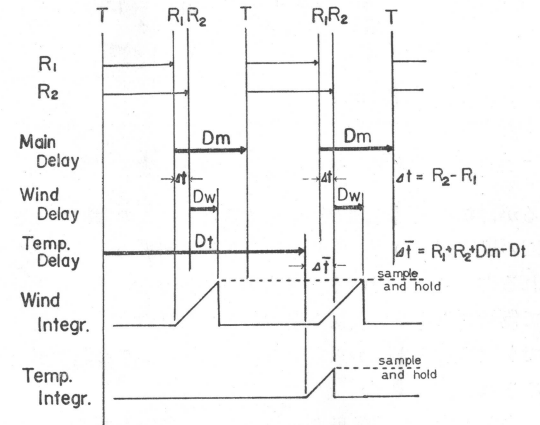
次に、2方向の信号の伝播時間の平均値 ( $\bar{t}$ ) は、静止大気中の音速で決定され次のように示される

$$\bar{t} = Bd/C \quad (3)$$

ここで B は横風速に対する補正項であるがこれも A と同



第2図 超音波風速温度計、鉛直成分および温度測定回路のブロックダイアグラム



第3図 超音波風速温度計の動作順序説明図 (鉛直成分および温度)

程度に1に近い。そして、音速は音仮温度 ( $T_{sv}$ ) の平方根に比例し、次のように示される。

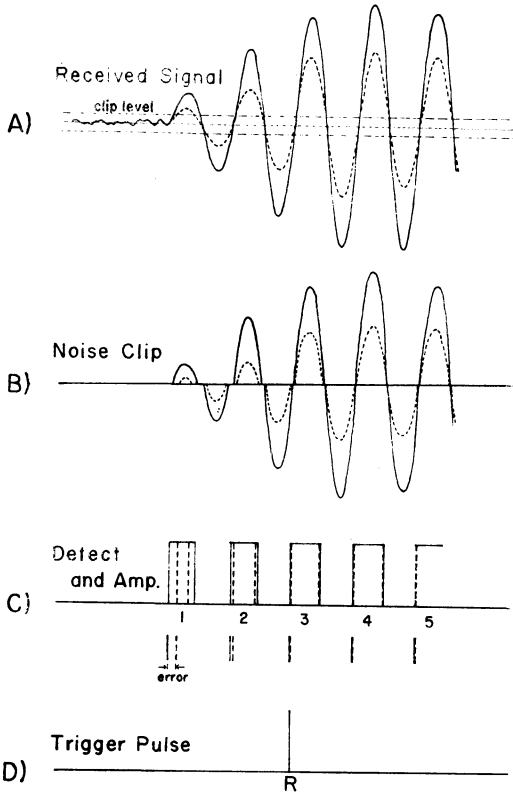
$$C = 20.067 T_{sv}^{1/2} \quad (4)$$

温度の変動が実際には問題になり、しかもその変化の幅は、絶対温度に比して小さいから、ある基準温度からの温度差 ( $\Delta T_{sv}$ ) は次のように近似的に示される。

$$\Delta T_{sv} = -2(d/20.067)^2 \Delta \bar{t} / \bar{t}_0^3 \quad (5)$$

ここで  $\Delta \bar{t}$  は、音の伝播時間の和の基準温度に対応する値 ( $\bar{t}_0$ ) からの差である。

このようにして気温(音仮温度)の変動分が測定され



第4図 パルス到着時刻の決定法

るが、この伝播時間の和を求めるためにこの器械では2回の風速測定のカイクルが用いられ、両者の和が求められるようになってい。すなわち、発信は、 $R_1$ によって制御されるので最初の発信から2回目の  $R_2$  の受信までを取ると第3図からも明らかとなり、2つの和が求められる。

先きに述べた、信号パルスの到着時刻は次のようにして決定される。すなわち第4図の上段は、受波の波形を模式的に示したものであるが、パルスの最初の波はどうしても立ち上がりが良くなく、受信レベルの変動によってその振幅は大きく左右され、これをあるレベルでクリップして波の到着を決定したのでは受信レベル変動によって誤差を生じることになる (B, C参照)。そこで、ここでは充分大きな振幅がどのような場合にも期待できる第3波の立ち上りを受信の時刻として検出することにし、第1波は波の数の計測を始める信号としてのみ用いるという方式を用いている。音響信号としては、100kcの超音波を用いており、パルスの繰返し(風速測定)は、ほぼ440cpsである。これによって風速および気温が測定

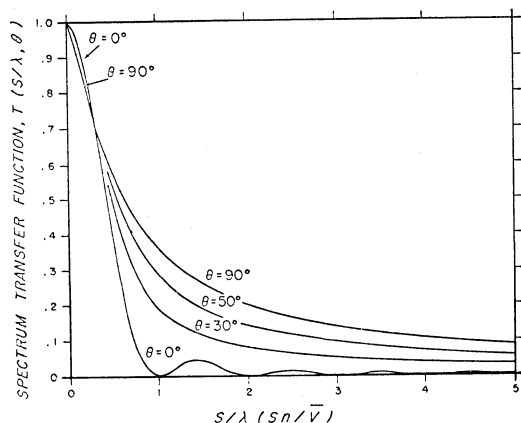
されるのである。

#### 4. 超音波風速温度計の特色と問題点

超音波風速温度計はいろいろな特色を持っているが、同時に利用上注意しなければならない点も多い。特色については、すでにいろいろなところで強調されているので詳しく述べる必要もないと思われるが、まとめると次のようになる。空気の動きを直接測定するものであり風洞検定を特に必要としない。機械的に動く部分が無いので摩擦や慣性に防げることなく感度および動特性を必要だけ電子回路で良くすることができる。出力が直線的である。任意方向の分速度を測定することができる。

動特性については、上に述べたとおり電気回路で決定され、上に説明したものでは、出力段階で100cpsぐらいのcut off特性を持っているが、風速変動の測定においては他の面からの制限がある。それは、今までの説明からも明らかとなり、この風速計で測定した結果は、風速の sound path 上での平均値であるということである。従って、動特性は良くても空間的な平均化が行なわれるために高周波側の変動を検出出来ないということがあり得る。このような問題に左右されないように感度を小さくする努力が行なわれるのであるが、やはり充分な感度と安定性を確保するためにはある程度の長さが必要である。この空間平均による乱流成分の測定結果の平滑化については、Gurvich (1962) および Mitsuta (1966) によって検討されていたが、その結果は多少異なっていた。しかし、その後 Silverman (1968) によって、一般的な場合についての研究が行なわれ、前2者の結果は、その特殊な場合として含まれる。第5図に示されるような結論が導かれた。さらにその結果は、Kaimal (1968) によって実験的に調べられた。

また、風速変動の3次元的な変動を測定する時には、3つの方向成分毎に測定するが、その各部分の感度が離ればなれになっていると、合成して得られた風速変動の測定結果の高周波数側に見掛け上の変動が生じることがあるのが Kaimal, Wyngaard & Haugen (1968) によって指摘された。これは往復の音響信号の経路が同じ場合においても生じるのであって、2つの経路が異っている時にはこの種の誤差はたとえ1成分のみの測定においても生じる。これらの誤差は、感部の占める空間の大きさに比べて充分大きな波長の変動しか問題としない時には、特に気にすることは無いが、スペクトル解析の結果を解釈する時には、先きに述べた空間平均の問題と共に注意を要する。



第5図 Spectrum transfer function (空間平均による spectral density の減率) と測器の無次元化長さ (sensing path の長さ,  $S/\lambda$ ) との関係。但し  $\theta$  は sensing path と風向のなす角度を示す。(Silverman(1968)による)

この測器は、大気の流れを乱すことなく測定出来るのが大きな特色であるが、実際には送受波器の大きさが有限であり、それを流れの中に置くことになるのでどうしても流れに変形が生じ、風洞中の流れのように乱れの少ない流れの速度を流れに平行に sound path をおいて測定すると、送受波器の後流の影響を小さくするため、送受波器は流線形に作られてはいるが第1図に示したものでも約5%の過小評価になる。そのため先に述べたとおり、後流の影響の全くない空間を広くするために120°の交叉という方法を取っている。しかし、目的によっては全ての方向からの風を測定せねばならない場合もあるので、目的に応じた感部の形を選ばなくてはならない。そのためいろいろな形の感部が実際に作られている。その一つは、後にも説明する。

また、乱流輸送量の測定においては、鉛直風速成分を測定せねばならないが、この鉛直軸が少しでも傾くと水平方向成分が、その出力に混入することになるので測定結果には誤差を生じることになる。この水準誤差がどれくらいまでは認められるかということが、ある時期、大きな議論を呼んだ。これに関連した議論に参加した人は、Kraus, Pond, Kaimal, Deacon, Dyer さらに日本の竹田氏などがあるが、非常に興味ある問題であるので、いずれ別の機会に紹介する方が良いと思われる。しかし、いづれにしても、鉛直成分の測定には水準を出来るだけ正確にしないと問題が生じる。

さらに、この超音波風速温度計で測定される温度は、

音仮温度 (Mitsuta 1966) と呼ばれるものであって、水蒸気量の多い時には気温より多少大きな値を示す。そして、これから求めた顕熱輸送量は、真の値とは多少異った値となり、水蒸気輸送量に関係した誤差を含んでいる。これについては、岡本 (1966) によって指摘されたとおりであるが、水蒸気輸送のある場合の顕熱輸送量の定義そのものにも検討すべき余地がある (Mitsuta 1968) ので、この問題についての結論は出ていない。

一方、実際にこの測器を野外で用いる場合に、霧などで送受波器の送受波面に水滴が付くと、見掛け上 sound path が変化したことになり、零点が移動してしまう。風が強ければ大きな水滴とならないので大した問題とならないが、風の弱い時にこの誤差が生じやすく、霧や雨の中でもどうしても測定を行なわねばならぬ時には、水滴がたまらないように水切りを取り付けてやらねばならない。もっとも、この誤差が大きく生じるのは、鉛直成分のみである。

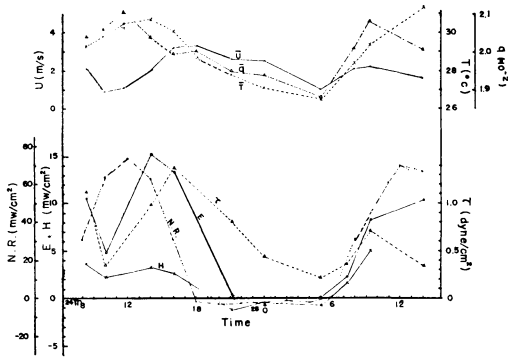
##### 5. 超音波風速温度計の大気境界層研究への応用

この超音波風速温度計を大気境界層の研究に用いることについても既に色々論文に議論されているが、その利用上の問題点の実例の指摘については、Mitsuta (1968) の論文に詳しい。

運動量輸送の測定については Mitsuta (1968 b) が drag-meter との比較を示しており、また Smith, Banke & Johannessen (1970) は、氷原の上での摩擦係数の測定を行なっている。一方、Fujitani, Hanafusa, & Mitsuta (1970) は、裸地上での運動量輸送について観測をして風速の鉛直成分の長周期変動成分は、その振幅はかなり大きくても運動量輸送にはあまり貢献しておらず、また陸地上で風速が 1~2m/sec 以下になると摩擦係数がむしろ風速の減少と共に増加することを示している。

顕熱輸送の測定については、Businger et al. (1967) がオーストラリアの草原で行なった観測結果が初期のものであり、さらに米国での実験結果から運動量を含む乱流輸送量と平均値の高さ方向分布との関係については、Businger et al. (1971) に議論されている。また Mitsuta, Hanafusa & Maitani (1970) は、1日の間の乱流輸送量のほぼ連続的な測定を行ない、その日変化について議論している。その結果は、第6図に示すとうりである。

蒸発量の直接測定もこの測器と水蒸気変動の測器との組合せによって行なうことが出来るが、Sahashi (1967) の観測がその最初のものであり、その後、赤外線湿度計



第6図 裸地上の運動量( $\tau$ ), 顕熱(H) および潜熱(E)の乱流輸送量の日変化。なお NR は net radiation,  $\bar{U}$  は平均風速,  $\bar{q}$  は平均比湿,  $\bar{T}$  は平均気温(いずれも地上 1.5m)を示す。

との組合せについては, Chen & Mitsuta (1967) によって試みられ, Lyman- $\alpha$  湿度計との組合せについては, Miyake & McBean (1970) によって報告されている。また, 最近では, 霞ヶ浦において, 水損失の研究においても利用されている (Mitsuta, et al. 1970)。

なお, これらの物理量以外のものについては, Mitsuta (1966 b) による渦度輸送の測定, Maitani & Mitsuta (1967) による kinetic energy の輸送の測定などが発表されている。

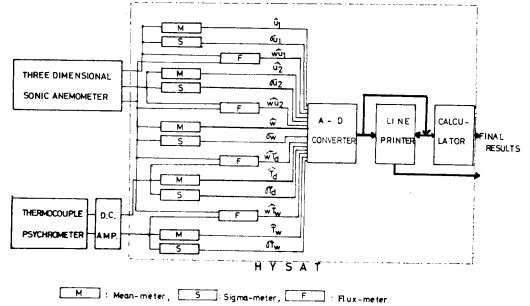
またこれまで述べてきた測定は, すべて接地気層中に固定した感部で測定したものであるが, 境界層の中での研究を進めるには, 種々な条件での測定が必要となることが多く, 特別なプラットフォームからの測定が行なわれている。Yokoyama (1971) は, 川口の無線塔の 313m の高さまでの間に数台の超音波風速計を取り付けて乱流特性の測定を行なっている。同種の観測は, Kaimal & Haugen (1967) によっても米国で行なわれており, これは, 高さ 430m の塔で観測を行なっている。海洋上のブイに取り付けて観測を行なうことは鹿児島大高橋教授, 東大竹田氏によって試みられており, さらに竹田氏は, 広い海上での測定のため, 船のブームの先端で測定を行なっている (Takeda et al. 1969)。また移動している船の上からでも乱流輸送を測定しようという試みは, 光田等によって行なわれている (光田, 他 1969, 1970)。また, 航空機によって測定を行なうことは, Miyake, Donelan & Mitsuta (1970) によって試みられたが, 日本でも最近, 横山, 蒲生氏等によって計画が進められている。

なお, 乱流輸送量の測定を行なうに当っては, 相関を

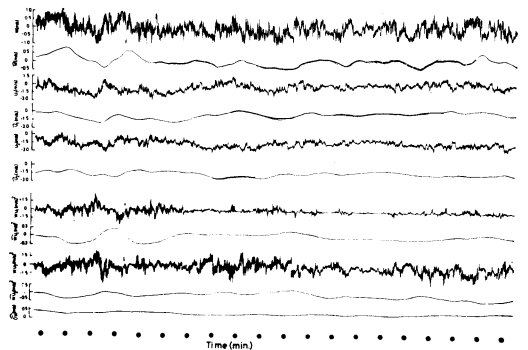
求めるために大量の計算が必要となる。そのため実験の回数に制限がかかることさえある。そこで Kaimal, Haugen & Newman (1966) は, 電子計算機を積み込んだ大型トレーラーを観測現地に運んで測定を行なっているがこれは, 余りにも大規模であり, 費用も安くない。そこで, Hanafusa はアナログとデジタルの両方式を併用した hybrid analog 方式による簡単な輸送量の測定装置 (HYSAT) を開発した (Hanafusa 1971, 1971 b)。これによれば, 乱流輸送量および変動の標準偏差を現地で実時間に測定出来る。第7図は, そのブロックダイアグラムを示すものであり, 解析の途中で得られた変動成分の cross term, およびそれらの平均値の時間変化の例を示す。

### 6. 超音波微風計

従来の風速計では, その特性上 1m/sec 程度以下の微

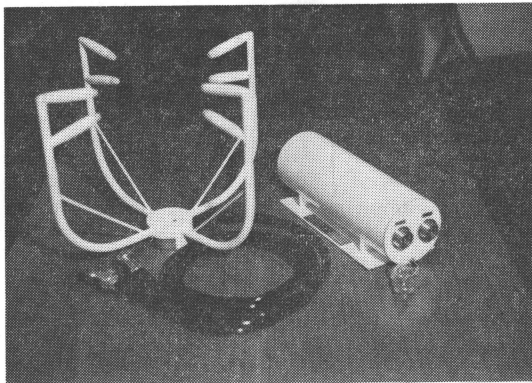


第7図 乱流輸送量の hybrid analog 解析システムのブロックダイアグラム。(Hanafusa (1971 b) による)



第8図 乱流輸送観測の記録の1例。上から鉛直風速成分, その平滑値, 水平成分およびその平滑値(2組), 鉛直風速成分と水平成分の積とその平滑値(2組)および鉛直風速成分の標準偏差。(Hanafusa (1971) による)

風を正確に測定することが困難である。微風時の風の特性については従来あまり問題とされなかったが、大気汚染などの関係で次第にその知識が要求されるようになって来た。超音波風速計は風速が小さくても問題なく測定を行なうことが出来、しかも強風が吹いても感部が破壊されるということも無いから、微風計として応用するには非常に適している。しかし、そのままでは分速度しか示さないで、従来の計測方法と同じ結果を得るためには極座標で示した風向、風速の出力を得ることが出来るようにしなければならない。そのようにして作られたのが第9図に示したような超音波微風計で、全方向型の

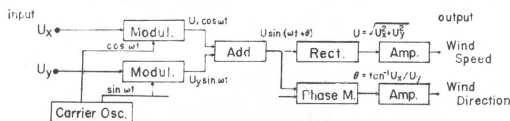


a) 感部および前置増幅器

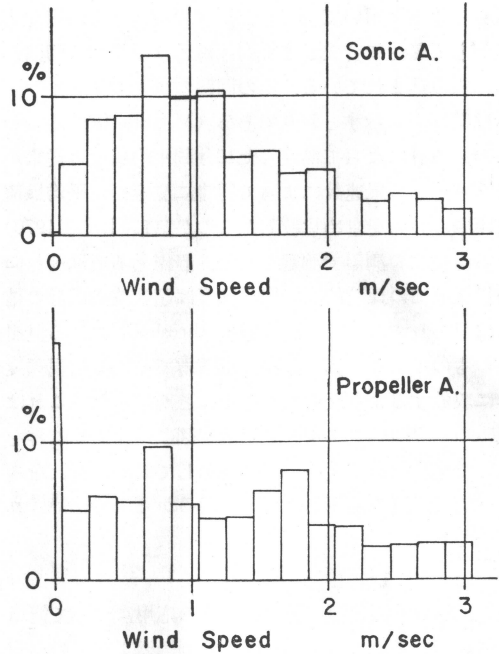


b) 本体

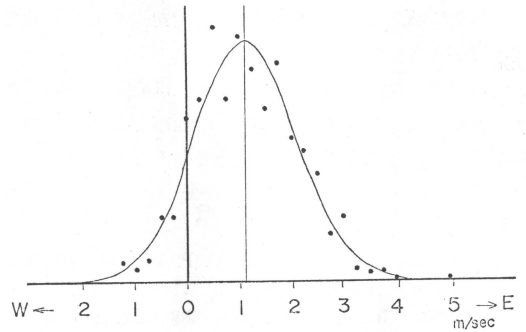
第9図 超音波微風計



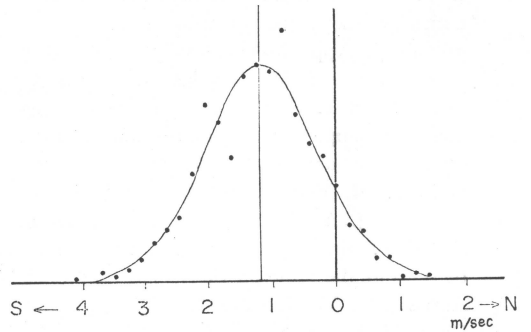
第10図 超音波微風計風向風速計算ユニットのプロックダイアグラム



第11図 超音波微風計(上)とプロペラ型風速計(下)で測定した10分間平均風速の頻度分布の比較



第12図 a) 東西成分



第12図 b) 南北成分

第12図 微風時の風速のベクトル成分の頻度分布

2成分の感部を用いて得られた風速の東西および南北方向成分を電氣的に合成して風向、風速に換算する回路が本体に組み込まれている。その回路のブロックダイアグラムは第10図に示すとおりである (Mitsuta 1971)。

この微風計によって測定した10分間平均風速と従来からのプロペラ型風速計によって同時に測定した平均風速の発現頻度分布を求め比較したものが第11図(光田1970)である。従来の測器で測定された。静穏あるいはそれに近い微風域での比較的高い出現頻度は超音波微風計の結果には見られず、これが風速計の threshold による見掛け上のものであり、真の分布は風速零でやはり出現頻度も零に収斂するようなものであることが解った。これは微風時の風速のベクトル成分が第12図に示すように零をまたいで正規分布に近い形の分布をしており、それをスカラー的な風速に換算したものであるから当然期待されるものである。

## 7. むすび

以上、超音波風速温度計およびその応用について簡単に述べたが、多くの方々が今後この測器およびその測定結果を利用される上で少しでも御参考になれば幸いである。

おわりにあたって、この開発、研究を進めるに当って献身的な努力をして下さった多くの協力者、そして理解と援助を賜った諸先輩、諸機関の皆様は心から感謝したい。多くの人々の援助なしにはこの仕事をこれだけ短時間に進めることは不可能であったであろう。

## 参 考 文 献

- 1) Bovsheverov, V. M. and V. P. Voronov, 1960: Acoustic Anemometer, Bull. (Izv.) Acad. Sci. USSR, Geophys. Ser., 586-588 (English ed.)
- 2) Businger, J. A., M. Miyake, A. J. Dyer and E. F. Bradley, 1967: On the direct determination of the turbulent heat flux near the ground, J. Appl. Meteor., Vol. 6, 1025-1032.
- 3) Businger, J. A., M. Miyake, E. Inoue, Y. Mitsuta and T. Hanafusa, 1969: Sonic anemometer comparison and measurements in the atmospheric surface layer, J. Meteor. Soc. Japan, Ser. II, Vol. 47, 1-12.
- 4) Businger, J. A., J. C. Wyngaard, Y. Izumi and E. F. Bradley, 1971: Flux-profile relationship in the atmospheric surface layer, J. Atmos. Sci., Vol. 28, No. 1.
- 5) Chen, H. S. and Y. Mitsuta, 1967: An infrared absorption hygrometer and its application to the study of the water vapor flux near the ground. Special Contributions of Geophysical Institute, Kyoto Univ., No. 7, 83-94.
- 6) Fujitani, T., T. Hanafusa and Y. Mitsuta, 1970: Measurement of eddy momentum flux near the ground. Special Contributions of Geophysical Institute, Kyoto Univ., No. 10, 85-91.
- 7) Gurvich, A. S., 1959: Acoustic microanemometer for investigation of the microstructure of turbulence. Acoustics J. (USSR), Vol. 5, 368-369.
- 8) Gurvich, A. S., 1962., Pulsation spectra of the vertical component of wind velocity and their relations to the micro-meteorological conditions. Akad. Nauk SSSR, Inst. Eiz. Atmos. Tr., No. 4, 101-136.
- 9) Hanafusa, T., 1971: A new method of on-site data analysis of turbulent transports near the ground. Contributions of Geophysical Institute, Kyoto Univ., No. 11 (to be published).
- 10) Hanafusa, T., 1971 b: New hybrid analog data acquisition system for atmospheric turbulence (HYSAT). Contributions of Geophysical Institute, Kyoto Univ., No. 11, (to be published).
- 11) Kaimal, J. C., 1968: The effect of vertical line averaging on the spectra of temperature and heat flux. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., Vol. 94, 149-155.
- 12) Kaimal, J. C. and J. A. Businger, 1963: A continuous wave sonic anemometer-thermometer, J. Appl. Meteor., Vol. 2, 156-164.
- 13) Kaimal, J. C. and D. A. Haugen, 1967: Characteristics of vertical velocity fluctuations observed on a 430m tower. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., Vol. 93, 305-317.
- 14) Kaimal, J. C., D. A. Haugen and J. T. Newman, 1966: A computer-controlled mobile micrometeorological observation system. J. Appl. Meteor., Vol. 5, 411-420.
- 15) Kaimal, J. C., J. C. Wyngaard and D. A. Haugen, 1968: Deriving power spectra from a three-component sonic anemometer. J. Appl. Meteor., Vol. 7, 827, 837.
- 16) Maitani, M. and Y. Mitsuta, 1967: A direct measurement of vertical transport of turbulent kinetic energy in the air layer near the ground with sonic anemometer. Special Contributions of Geophysical Institute, Kyoto Univ., No. 7, 71-81.
- 17) Mitsuta, Y., 1966: Sonic anemometer-thermometer for general use. J. Meteor. Soc. Japan, Ser. II, Vol. 44, No. 1, 12-24.
- 18) Mitsuta, Y., 1966 b: Direct measurement of



- vorticity near the ground. Special Contributions of Geophysical Institute, Kyoto Univ., No. 6, 43-46.
- 19) Mitsuta, Y., 1968: Application of sonic anemometer-thermometer to the studies of vertical eddy transport processes in the atmospheric boundary layer. Special Contributions of Geophysical Institute, Kyoto Univ., No. 8, 45-60.
  - 20) Mitsuta, Y., 1968b: Some results of direct measurements of momentum flux in the atmospheric boundary layer by sonic anemometer. J. Meteor. Soc. Japan, Ser. II, Vol. 46, 29-35.
  - 21) Mitsuta, Y., 1971: Sonic anemometer-thermometer for atmospheric turbulence measurements, Paper presented at Symposium of Flow, Its Measurement and Control in Science and Industry, Paper No.1-9-124 May 1971, Pittsburgh.
  - 22) 光田 寧, 1970: 種々の風速計の比較について 京都大学防災研究所年報, 第13号A, 441-448.
  - 23) Mitsuta Y., T. Hanafusa and T. maitani, 1970: Experimental studies of turbulent transfer processes in the boundary layer over bare soil. Bulletin of Disaster Prevention Research Institute, Kyoto Univ. No. 19, Part 4, 45-58.
  - 24) Mitsuta, Y., T. Hanafusa, T. Maitani and T. Fujitani, 1970: Turbulent fluxes over the Lake Kasumigaura. Special Contributions of Geophysical Institute, Kyoto Univ., No.10, 75-84.
  - 25) Mitsuta, Y., Miyake and Y. Kobori, 1967: Three dimensional sonic anemometer-thermometer for atmospheric turbulence measurement, WDD Technical Note, Disaster Prevention Res. Inst., Kyoto Univ., Occasional Report.
  - 26) 光田 寧, 花房龍男, 米谷俊彦, 1969 および 1970: 航行中の船舶による海上での乱流測定法について, (1), (2). 京都大学防災研究所年報, 第12号A, 245-259, および第13号A, 419-432.
  - 27) 光田 寧, 水間満郎, 1964: 超音波風速計とその試作, 天気, Vol. 11, 33-40.
  - 28) Miyake, M., Donelan and Y. Mitsuta, 1970: Airborne measurement of turbulent fluxes, J. Geoph. Res., Vol. 75, 4506-4518.
  - 29) Miyake, M. and G. McBean, 1970: On the measurement of vertical humidity transport over land. Boundary-Layer Meteor., Vol. 1, 88-101.
  - 30) 岡本雅典, 1966: 超音波風速・温度計により測定された乱れの顕熱フラックス. 天気, Vol.13, 367-368.
  - 31) Sahashi, K., 1967: Estimation of evaporation rate by the use of a sonic anemometer. Special Contributions of Geophysical Institute, Kyoto Univ., No. 7, 95-109.
  - 32) Schotland, R. M., 1955: The measurement of wind velocity by sonic waves, J. Meteor., Vol. 12, 386-390.
  - 33) Silverman, B. A., 1968: The effect of spatial averaging on spectrum estimation. J. Appl. Meteor., Vol. 7, 168-172.
  - 34) 塩谷正雄, 1967: 暴風時における突風の横方向の構造, 日大習志野, 物理学研究室, 60pp.
  - 35) Smith, S. D., E. G. Banke and O. M. Johannessen, 1970: Wind stress and turbulence over ice in the gulf of St. Lawrence, J. Geoph. Res., Vol. 75, 2803-2812.
  - 36) Suomi, V. E., 1957: Sonic anemometer. Exploring First One Mile, ed. by Lettau and Davidson, Pergamon, 256-266.
  - 37) Suomi, V. E. and J. A. Businger, 1959: Sonic anemometer-thermometer, Geoph. Res. Paper., No. 59.
  - 38) Takeda, A., K. Taira, K. Ishikawa and Y. Ogura, 1969: Bow-boom measurements of wind fluctuations and waves, Preliminary Report of the Hakuho Maru cruise KH-69-3, (GARP cruise), Ocean Res. Inst., Univ. of Tokyo. 4-5.
  - 39) Yokoyama, O., 1971: An experimental study on the structure of turbulence in the lowest 500 meters of the atmosphere and diffusion in it. 公害資源研究所報告, 第2号.