

## 気象観測と測器\*

竹内 清 秀・花 房 龍 男・清 水 正 義・  
立 平 良 三・来 海 徹 一\*\*

### 1. 序 論

竹内 清秀

#### 1.1. 業務としての気象観測

気象の仕事は観測から始まる。現在の気象庁のもとになった東京気象台が創立されたのは明治8年(1875)6月1日であり、同月5日赤坂葵町3番において、いち早く気象観測が開始されている。当時の名前で、水銀晴雨計、乾湿球寒暖計それに雨量計などが用いられたらしい。これらは英国から取寄せられたものであり、お雇い外人の英国人ジョイネルが毎日3回(午前9時半、午後3時半、午後9時半)の気象観測を行ったと記されている(気象庁, 1975)。

もっとも、これがわが国最初の気象観測というわけではなく、このとき以前に長崎、函館、横浜、大阪などで一時的あるいは断続的に観測が行われた模様である。なお、天気予報が東京気象台から毎日発表されるようになったのは、観測開始から後れること9年、明治17年(1884)からである。

業務としての気象観測となれば、その目的がはっきりしているはずである。しかし気象観測開始当時、現在ほどその目的が明確であったとは思われない。ただ、純粋に気象学の探求というよりは、農業や漁業、あるいは航海などに利用するという応用気象のための観測と考えたほうが当たっているであろう。

現在では、観測・予報を問わず気象庁の行う業務、つまり気象業務の目的は、災害の予防、交通の安全確保、

産業の興隆等公共の福祉増進に寄与するとともに、国際協力を行うとなっている(1952年施行の気象業務法)。

この解説では、気象庁の行う業務を中心に気象観測と測器を述べることにしている。それは、質および量の両面から見て、気象業務に直接関係するものが圧倒的な地位を占めていること、またそれについて多くの記録が存在していることなどの理由による。

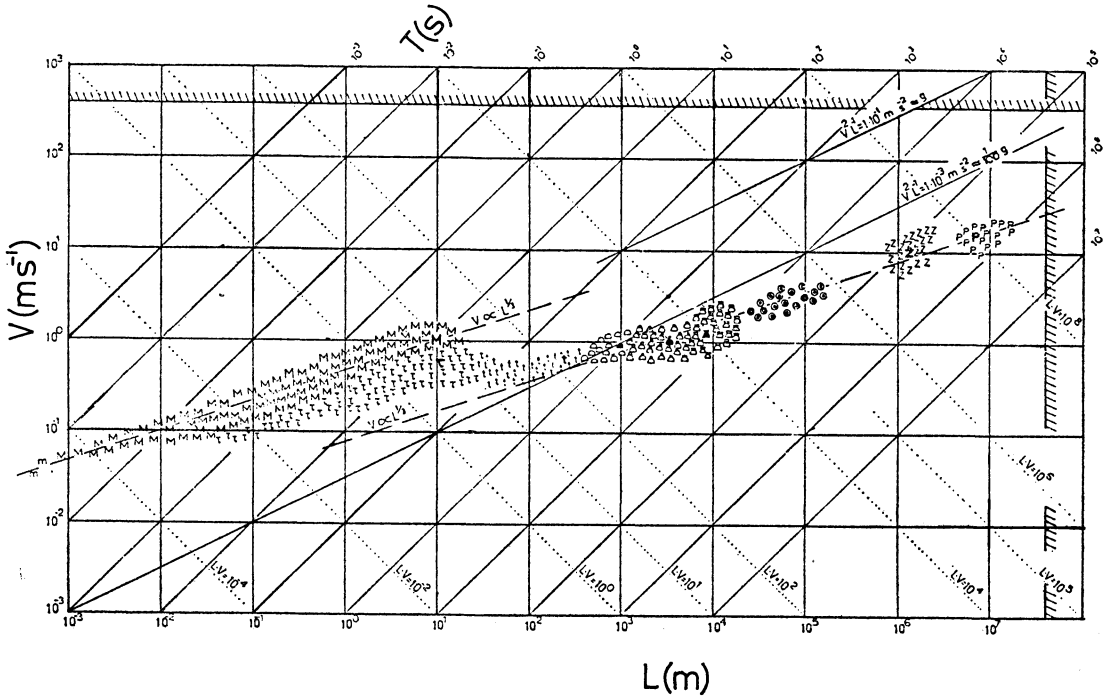
#### 1.2. 気象現象のスケールと観測

近年、気象観測は各種の測器でしかも観測対象も非常に広範囲に行われるようになった結果、種々の気象現象は時間的空間的スケールの特定の範囲内に限られていることがわかって来た。Wippermann (1971) にしたがって述べよう。いろいろな気象現象を、その特徴的な長さ  $L$  と速さ  $V$  (あるいは時間  $T$ ) の座標系にプロットしたのが第1図である。また第1表には、各種の気象現象の水平方向および鉛直方向の広がり、持続時間などが示されている。たとえば、機械的乱流  $M$  および熱的気泡  $t$  の目安としての特徴的な長さ・速さ・時間は、それぞれ 10 m, 1 m/s, 10 s および 250 m, 0.7 m/s, 6 min であり、また高低気圧では 1,000 km, 10 m/s, 2 日であることがわかる。

このような特徴をもつ気象現象を合理的かつ効果的に観測するにはどうしたらよいのであろうか。どのような特性をもつ測器をどのように配置して、どのような方法で測定すればよいのであろうか。しかも業務としての気象観測では前節で述べたように明確な目的があるはずであるから、それに応えるものでなければならぬ。つまり、あらゆる気象現象のスケールについて平等に行うというより、どのようなスケールに主眼を置いて観測をすべきかなどを予め決めておかねばならない。もし、2~3日の気象現象に重大な関心があるならば(たとえ

\* Meteorological Observation and Instruments.

\*\* Kiyohide Takeuchi, 東京管区気象台; Tatsuo Hanafusa, 気象研究所; Masayoshi Shimizu, 高層気象台; Ryozo Tatehira, 気象庁予報部; Tetsuichi Kimachi, 気象庁海上気象部.



第1図 気象現象のスケール (Wippermann, 1971). 図中の記号については第1表を参照のこと.

第1表 各種の気象現象のスケールなど (Wippermann, 1971).

運動形態	記号	水平の広がり	鉛直の広がり	鉛直/水平の比	特徴的な長さ (L)	継続時間	特徴的な時間 (T)	特徴的な速さ (V)
機械的乱流	M	<20 m	<20 m	1/1	10 m	<30 s	10 s	1.0 m/s
熱的乱流	$\tau$	<10 m	<20 m	2/1	10 m	<30 s	15 s	0.7 m/s
熱気泡	t	10~50 m	20~500 m	10/1	250 m	2~10 min	6 min	0.7 m/s
弱い対流	$\Delta$	50~500 m	0.5~2 km	5/1	1 km	10~30 min	20 min	0.8 m/s
並の対流	$\Delta$	0.5~2 km	2~5 km	2/1	2.5 km	20 min~1h	40 min	1.0 m/s
強い対流	$\boxtimes$	1~20 km	3~12 km	1/1	8 km	30 min~3h	100 min	1.3 m/s
クラスター	$\odot$	20~200 km	3~15 km	1/10	100 km	3~18 h	10 h	3 m/s
高低気圧	Z	500~3,000 km	3~12 km	1/500	1,500 km	1~3 d	2 d	10 m/s
プラネタリ-波	P	3,000~1,0000 km	5~12 km	1/1,000	6,000 km	2~8 d	5 d	15 m/s

ば2~3日の予報を行う場合には), 高低気圧の動向を十分に把握できるように観測計画を立てる必要がある。また, 数 km くらい距離の大気拡散を知るためには, 比較的详细な乱流 (特徴的な長さおよび時間はそれぞれ 10 m および 10 s) の観測を行う必要がある。

1.3. 業務と気象測器

われわれが暮していくうえで, なにかにつけ毎日の天

気に左右される。測器のなかった昔は暑さ寒さを肌で感じ, 雲の動きや木ずえのそよぎで風の強さを知ったことであろう。それによって着物を重ねたり, 漁に出るのを思いとどまったりしたことであろう。しかし, このような五感での気象観測には客観性が少なく, 科学としての気象学に発展させる基礎資料とはなりえない。やはり近代の気象学や気象業務に到達するためにはどうしても,

測器による気象観測が必要であった。ところで、気象要素である気圧・気温・湿度・風向・風速などを測定する器械は比較的早くから発明された。ガリレイが気体温度計を作ったのは1600年ごろ、トリチェリーが水銀気圧計を発明したのは1650年ごろであった（たとえば、岡田武松, 1931; Middleton, 1969）。

その後、気象測器は順調な発展をとげたと言いたいけれど、ごく最近まで一般に用いられていた測器は使いよいとは云えないものが多かった。佐貫（1953）は当時の気象測器の状態を慨嘆してつぎのように述べている。

「前世紀の終りごろ、欧州の物理学者や気象学者が機械師あるいは飾屋に試作させて実験室に持ち込んだ状態がそのまま凍結され、近代重工業の進歩をよそに平和に眠っている姿である。……」

事実、比較的最近まで、スプリング式自記気圧計（ドイツで作られた天秤式水銀気圧計）あるいはアネモネモグラフ（フランスで作られた自記風速計）が、正式現業測器ではないにしろ、二、三の気象官署で使われていた。両者とも19世紀末に作られたものであり、その原理は今でいうネガティブフィードバックの考えを利用した現在でも通用するもので、当時としては最先端を行く測器であった。物理学者をはじめとする理論家を大いに満足させるものであったであろう。しかし現在から見れば設計上問題の多いものであった。

最近の気象測器は、他の分野の測器と比べて特殊なものではなくなりつつある。そのうえ、測器から得られる情報を処理し、いろんな分野の要望に直接利用できるようなシステムを考えることが多くなった。このように、ますます他の分野との差はなくなって行く。

ところで、この解説では、気象観測と測器について述べるにあたって、便宜的に4つの部門（地上、高層、レーダー、海上）に分けて、それぞれの専門家が執筆することにした。

## 文 献

- 気象庁, 1975: 気象百年史。  
 Middleton, W.E.K., 1969: Invention of the Meteorological Instruments. Johns Hopkins Press, Baltimore, 362 pp.  
 岡田武松, 1931: 気象器械学。岩波書店, 337 pp.  
 佐貫亦男, 1953: 地上気象器械。共立出版, 252 pp.

## 2. 地上気象観測

竹内 清秀・花房 龍男

### 2.1. はしがき

気象庁の気象観測は100年以上の歴史をもっているが、技術の進歩と社会の気象業務に対する要請の変化に伴って観測方法も変って来ている。気候観測という立場から考えれば、測器や測定法の変更は好ましいことではないが、一方では客観性のある一層正確な資料を得るためには変更も必要なことと思われる。

まず、気象庁で業務的に使用されている気象測器について述べ、ついで最近に開発された気象測器の若干について記す。終りに、近年、業務的にも盛んに取入れられている観測システムについて述べる。

### 2.2. 業務用の地上気象測器

#### 2.2.1. 風

ロビンソンが4杯のいわゆるロビンソン風速計を作ったのは1840年ごろであり、これがわが国の気象業務に取入れられたのは1886年である（以後、この節は山田, 1979に負うところが多い）。しかし、風速変動のある気流の中では4杯風速計の応答が3杯風速計に比較して劣ることがわかってきたため、1961年から4杯風速計に代って3杯風速計が用いられるようになった。

また1961年から数年かかって、プロペラ型風向風速計が導入され、従来から用いられていたダインス風圧計に代って最大瞬間風速の測定に使用されるようになった。後に述べる超音波風速計が1975年に気象庁検定を受けられるようになり、業務用測器の仲間入りをしたと云えよう。この風速計は微風の資料が重要な役割りをする大気環境調査にしばしば使用されている。

測器の移り変りと同様に、観測方法にも変遷があった。たとえば、平均風速を考えるときの平均化時間およびその時刻も歴史的な変化があった。したがって、平均風速といっても、その内容が異なることを知らなければならぬ。

#### 2.2.2. 気温

わが国の気象業務では、1885年までは百葉箱内に設置されたガラス製温度計によって華氏の目盛りで測定されたが、1886年からは温度計の高さを地上1.2mと定めると同時に摂氏で0.1°Cまで読みとることとなった。その後、1950年からは通風乾湿球温度計に変わり、1971年ごろから現在使用されている白金測温抵抗体による隔測温湿度計が採用されている。これは、地上高1.5mに吸入口のある金属製二重シェルターに感部がはいってお

り、通風速度は 5~6 m/s である。したがって、露場の象徴ともいえる白い百葉箱は今や重要な位置を譲ったと思われる。

### 2.2.3. 湿度

気温の項で触れたように、1886年から百葉箱内の無通風の乾湿球湿度計により湿度（および水蒸気圧）が観測された。1950年からは通風乾湿球湿度計が用いられている。また日記湿度計としては従来から毛髪が使用されていたが、1971年ごろから塩化リチウム露点温度計が用いられ隔測化された。

### 2.2.4. その他

降水量について、1886年ごろは直径 10 cm の受水面をもつ雨量計が使われていたが、1888年には直径が 20 cm のものが用いられるようになった。日記雨量計について、従来からサイフォン型のものが用いられていたが、1968年ごろから転倒ます型のものに変った。また積雪深計には数年まえから超音波を利用したものが使われ始めている。

日射には、バイメタルを利用したロビッチ日射計が長く用いられていたが、1970年ごろから熱電堆式に変更されている。なお、日照時間の観測には、ジョルダン日照計が用いられて来たが、最近では太陽電池式のものも使われている。

最後に気圧の観測であるが、フォルトン型気圧計が現在に到るまで標準的な測器として使用されている。水銀温度計が白金抵抗温度計に代われつつある現在、フォルトン型気圧計は一番長命な気象測器と云えよう。

## 2.3. 新型測器

学問技術の急速な進歩に伴い、気象測器も限で読取る測器から、エレクトロニクスを駆使した測器に変わりつつある。この節では、比較的新しい気象測器について記すことにする。なかには業務用測器として使われているものがあるが、主に研究調査に用いられているものを選んだ。

### 2.3.1. 超音波風速（温度）計

超音波を利用して、風速および気温の変動を測定しようとする試みは1950年代からアメリカ等で実施されたが、気象測器として成功したのは Suomi と Businger (1959) が最初であろう。しかし、これは音波のドップラーシフトの周波数を検出する位相差方式を採用していたので、外来雑音に弱く、なお実験的な色彩を残していた。

これに対し、Mitsuta (1966) はパルス時間差方式を

採用し、上述の欠点をなくするとともに、位相差方式と比較して風速の広い測定範囲を得ることができるようになった。最近、Hanafusa ら (1980) はこれに改良を加え、大気の状態によって測定値が影響されないようにし、一段と使いやすい測器とした。

いま座標原点に超音波発信器をおき、 $x$  軸上で原点からの距離  $d$  に受信器をおく。 $x$  方向の風速を  $u$ 、音速を  $c$  とすれば、伝播時間  $t_1$  はつぎの式で表わされる。 $t_1 = d/(c+u)$ 。もし、発信器と受信器を取替えて伝播時間  $t_2$  を測ると、 $t_2 = d/(c-u)$ 。したがって  $u = (d/2)(t_2 - t_1)/(t_1 t_2)$ 、これが超音波風速計の原理である。また  $t_1$  と  $t_2$  から音速  $c$  が計算される。一方、音速  $c$  と気温の間には比較的簡単な関係が成立つので、気温の測定にも使用できる。

このように、この測器は感部に可動部分がないため風速変動に対する応答特性がよいこと、1つの感部で風速と気温の同時測定ができること、さらに風速の3次元の成分が容易に測定できることなどの利点がある。しかし雨や霧に対して弱点があり、50 m/s 以上の風速に対して正確な測定ができないなどの欠点もある。それはともかく、大気乱流の研究には不可欠の測器となっている。

### 2.3.2. ギル型風向風速計

風速の3次元成分を測定するのに、前述の超音波風速計のほかに、比較的簡単に使われるプロペラ型風速計が米国で開発された (Holmes ら, 1964)。プロペラは軽量にするため4枚の発泡スチロール製であり、直径は6あるいは7インチで、その回転軸がたがい直角となるように設置した3台をセットとして使うことが多い。回転軸にはトルクの小さい特殊の直流モーターが直結されており、風速と出力との間には直線関係がある。

プロペラの回転軸と風向とのなす角度を  $\theta$  とすれば、理想的には出力が  $\cos \theta$  に比例するはずであるが、ギル型風速計は  $\cos \theta$  と  $\cos^2 \theta$  の間にあることが報告されている。感部が強風や雨に弱いことを除けば簡単に使用できるので、乱流の観測などに比較的良好に用いられる。

### 2.3.3. 水晶温度計

物質の弾性係数は温度によって変化する。この性質を利用したものに水晶温度計がある (Benson ら, 1974)。時計や通信機器の周波数の標準として作られている水晶振動子は、この温度依存性がきわめて小さいカット法を用いているが、逆に温度依存性が大きく、しかも温度と周波数がほぼ直線関係にあるカット法が開発され、これ

が温度計のセンサーとして使用されるようになった。

水晶温度センサーには、 $0^{\circ}\text{C}$  で 28.208 MHz の共振周波数をもつものと、 $30^{\circ}\text{C}$  で 10.594 MHz のものがあり、どちらも 1 kHz/K の温度係数をもっており、信頼性の高い温度計として使用されている。

### 2.3.4. 赤外線湿度計

水蒸気による赤外線の吸収を利用したもので、最初に考案したのは Fwole (1912) といわれている。その後、主として米国とソ連で開発された。乱流研究者の中では Elagina (1962) がよく知られている。わが国で気象測器として実用化されたのは Chen と Mitsuta (1967) が最初である。

彼等の測器は全く水蒸気による吸収のない波長域 ( $1.65\ \mu\text{m}$ ) と水蒸気のみによる吸収をもつ波長域 ( $1.87\ \mu\text{m}$ ) の2種類の光の信号を光路中に通し、その間の減衰を比較することによって水蒸気量を測定するものである。太陽光に多少とも影響されること、感部の大きさ等に問題はあがるが、将来の期待は大きい。

### 2.3.5. 紫外線湿度計

しばしば用いられている Lyman- $\alpha$  湿度計は、水素を封入した放電管から射出された紫外線 (Lyman- $\alpha$  線、波長  $0.12156\ \mu\text{m}$ ) の水蒸気による吸収を利用したものである。Lyman- $\alpha$  線の入射光と透過光の関係は次式で表わされる。 $I = I_0 \exp[-k(\rho/\rho_0)x]$ 。ここに、 $I_0$  と  $I$  はそれぞれ入射光と透過光の強度、 $k$  は水蒸気の吸収係数、 $\rho$  と  $\rho_0$  はそれぞれ対象とする水蒸気密度と標準状態の水蒸気密度、 $x$  は光路長である。

検出器としては酸化窒素ガスを封入した電離箱が用いられることが多い。光源と検出器に使用されている窓はフッ化マグネシウムが用いられ、測定路の長さは水蒸気量の多少によって調節できるようになっている。

赤外線湿度計と異なって測定路が短かく(数センチメートル)、1 Hz くらいの湿度変動まで測定することができるが、水蒸気量の絶対値を得ることは現在の段階では非常に困難である。

### 2.3.6. ソーダー (SODAR)

オーストラリアの McAllister (1968) が音波による大気境界層の探査装置 (Acoustic Sounder または SODAR と呼ぶ) を開発し、米国の Little がその可能性を検討し、また米国の Bearn ら (1972) がはじめてソーダーの実用化を行った。

もし、音波を散乱する空気が動かないとすると、散乱波の周波数は発射波のものと同じであるが、空気が動い

ていると、ドップラーシフトによって風速の成分に比例した周波数だけ、もとの周波数からずれることになる。受信器で、その周波数を測定すれば、風速の成分の直接の指標となる。この測定による成分の方向は、送信器、散乱点、受信器によって作る角の二等分線に沿ったものである。

いろいろの高さからの散乱信号は、受信器に到達する時間で区別される。いうまでもなく、最も低い高度からの信号が最初に到達し、より高い高度からのものは遅れて到達する。

それぞれの高度について受信された信号は、その時間変化ではなく、周波数スペクトルが調べられるように変換される。原理的には受波信号のドップラーシフトを測定するだけで十分であるが、1個のパルスに対して得られる周波数スペクトルでは一般に雑音で邪魔されることが多い。そこで受波信号のドップラーシフトの確実な評価を行うために、連続したパルスに対応する数多くの周波数スペクトルを各々の高度について平均する方法がとられている。

### 2.3.7. ラス (RASS)

気温の絶対値を測定する手段として、電磁波と音波とを組合せて用いるラス (RASS, Radio Acoustic Sounding System) が最近開発された。これは、電磁波の反射媒体のない空間に、音波によって空気密度の粗密を作り、そこからの電磁波の散乱を測定することによって大気の情報を得ようとするものである。

空気中の音速  $c(\text{m/s})$  は次式で表わされる。つまり  $c = AT^{1/2}$ 。ここに  $A = 20.053$ 、 $T$  は絶対温度 (正確には仮温度) である。ところで、電波の波長  $\lambda_e$  が音波の波長  $\lambda_a$  の2倍のとき、受信信号の強度が最大となることが知られている。したがって  $\lambda_e/\lambda_a = 2$  の関係が成立していることと、送信音波の周波数とを知ることによって、絶対温度が求められる。

音波の周波数を  $f_a$ 、波長を  $\lambda_a$  とすれば、 $c = f_a \lambda_a$ 。したがって  $T = (f_a \lambda_a / A)^2$ 。ここで、上に述べたような  $\lambda_e/\lambda_a = 2$  の場合には  $T = (f_a \lambda_e / 2A)^2$  となる。

実際の大气では、音波の波長によらず鉛直風速の影響を考える必要があり、また風が強くて音波が流れられ疎密波がなくなり電磁波の散乱が起こらなくなることがあるなど、そう簡単に気温分布が測定できるわけではない。

## 2.4. 観測システム

観測目的を達成するため、適切な感部を選択するだけ

第2表 気象観測鉄塔の測器（気象研究所）.

高度 (m)	測定項目	測器
213	平均風向風速	プロベラ型風向風速計
	風速変動（2次元）	超音波風速計
	平均気温	白金抵抗温度計
	平均湿度	容量型湿度計
200 100 50 25 10	平均風向風速	プロベラ型風向風速計
	風速変動（3次元）および気温変動	超音波風速温度計
	平均温度	白金抵抗温度計
	平均湿度	容量型湿度計
	気温および湿度変動	熱電対乾湿計

でなく、設置方法をよく考慮し、得られた信号は処理して、すぐ利用できる形で出力することが望ましい。最近ではエレクトロニクスを駆使し、1つのまとまった系（つまり観測システム）として計画・作成されることが多くなった。その例を挙げよう。

#### 2.4.1. 気象観測塔

地上約1kmまでの大気境界層は、地表と自由大気との間のエネルギーや物質の交換の場であり、またわれわれの生活の場であることから、その一層の研究が必要である。この大気境界層の下部の気象要素を連続的に正確に観測するため建設された気象研究所の気象観測用鉄塔について述べよう（花房ら、1979）。

この鉄塔による観測を大別すると、(1)気象要素（風向・風速・気温・湿度）の平均値の連続測定、(2)大気乱流特性の2項目である。なお、観測項目および測器名などを第2表に示す。

(1)気象要素の平均値の連続測定風向風速については、微風向風速計を用いて測定を行い、鉄塔頂部（地上213m）に設置されている微風向風速計によって得られた平均風向の信号を用いて、同じ高度の3個の感部のうち風上側の感部を選択するようになっている。風向風速の信号については、平均化回路を用いて処理を行い平均風速と平均風向が得られるようになっている。温度湿度については、白金抵抗温度計と容量型湿度計を用い、ともに強制通風を行っている。データ収録は、マイクロコンピューターを用いたカセット式デジタル磁気テープ装置により、1時間ごとに行っている。また1時間ごとにタイプライターで印字作表を行っている。なおアナログ記録計によって常時モニターしている。

(2)大気乱流特性の測定 運動量、顕熱、水蒸気等の鉛直乱流輸送量、および関連する乱流統計量を測定するため、3次元超音波風速温度計、熱電対乾湿計を各観測高度に設置している。これらから得られた風速（3成分）・温度・比湿の変動は、アナログ処理装置によって実時間処理し、これから得られた平均値・標準偏差・共分散等は、磁気テープ収録装置によって、長時間自動収録できるようにになっている。

気象要素の平均値の連続測定は昭和52年（1977）11月ごろから開始され、大気乱流特性の測定は研究目的によって随時実施されている。

#### 2.4.2. 係留気球による観測

観測塔は一般に移動できないのに対して、係留気球によれば移動が可能で測定高度1,000mくらいまでの観測は比較的簡単に行える。係留気球による観測の歴史は古いが、最近では各種の部品の改良開発が行われ、光ファイバーを使って係留索と信号ケーブルを兼用する方法も採用され始めている。

従来は感部が比較的重かったので気球自体も大きくなり、その操作に多くの人手と気球昇降に大きなウィンチを必要とした。しかし最近アメリカで開発されたものは、上空の風向風速・気温・湿度・高度を一人の操作で測定できるようになっている。わが国でも各種の改良が行われている。

#### 2.4.3. 航空機による観測

自由に観測対象の場所に行き観測できるのは航空機観測の最大の利点である。米国を中心に発達したものであるが、1970年代になってわが国でも公害資源研究所などで盛んに行われるようになってきた。

観測装置は航空機というプラットフォームに設置されているため、観測値は航空機に対して相対的なものとなる。したがって航空機の動きも同時に測定して、観測値に補正を行う必要がある。

風の乱れの測定には、熱線風速計、水平および垂直のベーン、超音波風速計などが使われている。また温度測定については、相対風速が大きくなり昇温の影響があるので、特殊なシェルターを設置する必要がある。

赤外放射温度計を搭載して、地表面や海面温度を測定することができる。広範囲の地域を短時間に観測でき、有用な情報が比較的容易に得られ各方面に利用されている。

#### 2.4.4. 地域気象観測システム（AMeDAS）

気象官署の観測だけでは中小規模の気象現象を把握す

ることができない。地域気象観測システム (Automated Meteorological Data Acquisition System, 略して AMeDAS) は、比較的小規模の現象を、ほぼ即時的に観測するもので、局地的な異常気象を監視し、適切な防災対策をたてることを目的としている。

このシステムは、雨量 (測器は転倒ます型雨量計)、気温 (白金抵抗温度計)、風 (風車型風向風速計)、日照 (太陽電池式日照計) のいわゆる 4 要素を測る観測点と、雨量だけを測る観測点から成立っている。前者は全国で 838 か所 (ほぼ 21 km 間隔)、後者は 478 か所 (雨量観測については約 17 km 間隔) であり、1978 年度に完成した。さらに最近では超音波の反射を利用した積雪深計が展開され、このシステムに加えられている。

各観測点からの情報は公衆電話回線を利用して自動的に毎正時にセンターに集信され、点検・編集され、本庁および地方の官署に配信される。また同時に統計資料として保存される。

## 文 献

- Bearn, D.W. and S.F. Clifford, 1972: Acoustic doppler measurements of the total wind vector, Proc. Second Symp. on Met. Observations and Instrumentation, Am. Met. Soc., pp. 100-109.
- Benson, B.B. and D. Krause, 1974: Use of the quartz crystal thermometer for absolute measurements, Rev. Sci. Instr., 45, 1499.
- Chen, H.S. and Y. Mitsuta, 1967: An infrared absorption hygrometer and its application to the study of water vapor flux near the ground, Special contributions, Geophys. Inst., Kyoto Univ., 7, 83-94.
- Elagina, L.G., 1962: Optical device for measuring the turbulent pulsations of humidity, Izv., Geophys. Ser., 8, 1100-1107.
- Fowle, F.E., 1912: The spectroscopic determination of aqueous vapor, Astrophys. J., 35, 149-162.
- Hanafusa, T. et al., 1980: Single head sonic anemometer thermometer, WMO the Boulder low level intercomparison experiment, pp. 7-13.
- 花房龍男ら, 1979: 筑波研究学園都市に新設された気象観測用鉄塔施設, 気象研究所技術報告, 第 3 号, 50 pp.
- Holmes, R.M., G.C. Gill and H.W. Carson, 1964: A propeller-type vertical anemometer, J. Appl. Met., 3, 802-804.
- McAllister, L.G. et al., 1969: Acoustic sounding — A new approach to the study of atmospheric structure, Proc. IEEE, 57, 579-587.

Mitsuta, Y., 1966: Sonic anemometer-thermometer for general use, J. Met. Soc. Japan, 44, 12-24.

Suomi, V.E. and J.A. Businger, 1959: Sonic anemometer-thermometer, Geophys. Res. Pap., No. 59.

山田三郎, 1979: 気象観測講座, 気象, No. 12, 30-31.

## 3. 高層気象観測

清水 正義

### 3.1. はじめに

高層気象観測とは、気球またはロケット等により気象測器を上空に持ちあげ、自由大気中の気象現象を観測することを言う。上空の雲などを地上または衛星から観測することは、現在では高層観測の概念には含まれていない。前者と後者を区別する大きな特徴は、高層観測が in situ (その場所における) 観測であるのに対し、後者がリモートセンシングにあると言えよう。

本稿は、高層観測に使われてきた手段や測器 (ゾンデ) の概要を紹介することを目的とするが、それぞれの項の詳細は引用した文献を見ていただきたい。

### 3.2. 初期の高層観測

風圧に測定器をつけて地面から離れた高さの温度などを測った例は 18 世紀中頃から見られ (和達, 1974 の気象年表)、以後 19 世紀後半まで有人気球による観測が試みられているが、生命の危険をはらんでいたため組織的なものではなかった。19 世紀末に軽量の自記装置 (メテログラフ) を無人気球で飛ばし、気球破裂後はこの装置をパラシュートで緩降下させて回収してから記録を解析する技術が実用化され、これによって Teisserenc de Bort は (1 か月おくれで Assmann が) 成層圏を発見した (1902 年)。

1930 年頃から気球により上昇中の観測値を電波で送信するラジオゾンデが、独・米・仏・フィンランド・ソ連などで開発され、ようやく毎日利用し得る可能性が開かれた。

日本では 1920 年 (大正 9 年) に茨城県に高層気象台が設立され、気球が浮上して風に流されるのを 2 つの経緯儀で追跡する上層風観測や、風や係留気球、または自由気球に自記装置をつけて下層大気各層の気温・湿度・気圧・風向・風速を観測することが行われていた。

### 3.3. 日本におけるラジオゾンデの開発

中央気象台がラジオゾンデの開発にとりかかったのは 1932 年頃で、飛揚テストなどを経て、中央気象台 1 号型ラジオゾンデによる高層の定常観測が始まったのは、

1938年(昭和13年)6月19日、布佐出張所においてであった。このゾンデは、気温変化に対して10~12 MHz、気圧に6.2~7.4 MHz、湿度に7.5~10 MHzの3つの電波を出し、3台の受信器で各周波数の変化を追いかけたという。この頃の部品の製作状況や終戦前後の状況は気象庁百年史(気象庁、1975b)を見られたい。

上記の周波数変化式のゾンデは電波の使用帯域が広く混信などが多いため、固定周波数を使用する必要が感じられていたが、1948年、27 MHz 1波を使う符号式ゾンデが気象研究所で開発され、S 48型として翌年より現業的に使われ出した。以後、日本のゾンデは1981年2月末まで符号式ゾンデを使うことになるので、完成された形での符号式ゾンデは章を改めて述べることにし、ここでは以後の相次ぐ改良を見ておく。

1949年に国際的なゾンデ周波数 402 MHz の採用(S 49型)、1950年真空管変更による電池軽量化(S 50型)、1952年符号発生機構改良(S 52型)、1953年S 52型のパイメタル取付部の熱遮断、1953年二社製造による若干の差(気圧計部分を除いて)統一した(S 53型)。

ゾンデ電波の方位測定による上層風観測は戦前から試みられたが測角誤差が大きく、もっぱら経緯儀による測角に頼ったため、雲により中断されることが多かった。

ゾンデの周波数を400 MHz帯にあげたことによりアンテナの指向性も鋭くなり、ゾンデの高度角方位角の測定から高層風を算出することも実用的となった。この電波による高層風観測の飛揚器材をレーウィン(Radiowinds)と呼び、高層風と気温・湿度などを観測する器材をレーウィンゾンデと呼ぶようになった。これらの地上測角装置は等感度レーウィン受信機D49E型と呼ばれ、4本の八木アンテナをゾンデの方に向け、ブラウン管に表示されるそれぞれのアンテナの受信出力が等しくなるようにアンテナ系を手動調整するものであった(中央気象台、1951)。

さらに測角精度の向上を期して、搬送波に1,680 MHzを使用するアメリカの自動追跡型方向探知機GMD-1Aの導入が図られ(気象庁、1975b; 北岡、1956, 1981)、1,680 MHzを送信するゾンデとしてRS II 53型が作られて、1955年に始まるGMD-1A(7台)の導入官署から使われた。GMD-1Aは屋外移動用として設計されていたので、これを定置して定常的観測に適するように改良されたD55A(小熊、1969)が日本で作られるようになり、1956~57年頃から使われてきて、おりから始まった国際地球観測年(IGY、1957~58)の観測要請に

第3表 ゾンデ観測の測定範囲と各測定要素の変化率(ゾンデの上昇速度を400 m/minと仮定)。

	測定範囲	測定要素の変化率
気温	+30°C以上~ -80°C以下	5°C/km $\equiv$ 2°C/min
気圧	1,000 mb以上~ 10 mb以下	(1,000 mb $\rightarrow$ 500 mb)/ 10~15 min (100 mb $\rightarrow$ 50 mb)/ 10~15 min
湿度	100~0% RH (低温においても測 定)	10% RH/100 m $\equiv$ 40% RH/min 50% RH/2 km $\equiv$ 10% RH/min

応え、上層風観測の精度と到達高度を飛躍的に向上させた。

1956年、完全な統一型ゾンデとしてS56, RS II 56が作られて日本のゾンデはほぼ完成した。(Sはゾンデ, RSはレーウィンゾンデ, IIは1,680 MHzを意味する。1980年製作のRS 2-80からはIIの代りに2)。

ゾンデの完成と前後して(1950年代)、受信した符号を自動記録させる装置と、ゾンデを観測地点に供給する前に行う計器部の検定を自動化する装置が開発された(北岡、1981)。これらは画期的なものではあったが、機械的な面に多くの苦勞が払われており、“自動化”の程度も今ほど進んでいなかったのは止むを得ない。

1957年2月に設立された昭和基地では、1959年にS III 56ゾンデ(符号式, IIIは27 MHz)(気象庁、1964)と短波受信機および経緯儀による観測が、1960~61年にはRS II 56ゾンデとD55A地上装置による観測が行われたが、基地閉鎖を経て再開後の1966年からは省力化を目ざした変調周波数変化式(後述)のRS II 64ゾンデとなり、二、三の改良を経て、全自動処理用の南極-78型(1980年から使用)となった。

1981年3月、国内でも変調周波数変化式のRS2-80型ゾンデを使用することとなり、永く使われた符号式ゾンデは(一部を残して)栄光の座をおりた。

### 3.4. ラジオゾンデの一般的特性

#### 3.4.1. ラジゾンデに必要な特質

ゾンデは消耗品であるため地上気象測器にくらべて簡略に作られていると思われがちであるが、そう簡単ではない。

第3表に示すように、気温・気圧の測定範囲は地上観測の数倍であり、湿度は-30°C前後の低温においても



測れることが必要である。また観測要素の変化率においても、地上観測ではめったに出会わないような急な変化にさらされるのである。その上、気球の下で揺れながら測定すること、降水や日射に対するシェルターは地上装置ほどは完全にしにくいこと、小型・軽量・安価にするため材料・構造を（複雑な装置以上に）吟味し、製造のしやすさ、取扱い易さも必要条件である。

### 3.4.2. 各種センサーの特徴と誤差の原因

#### (1) 気圧センサー

アネロイド：材質と断面波形、成形法、熔接法などがヒステリシスや経時変化に影響する。また材質と空ごう内の残留空気が温度係数の原因となる。

沸点気圧計：低圧の測定によいと思われるが、まだ現業的には使われていない。

最近、水晶振動子または金属円筒の振動数が気圧によって変わることを利用した気圧計も研究されているが、ゾンデ用としてはまだ実用化されていない。いずれにしてもゾンデ用としては 1,000 mb 以上から 10 mb 以下まで 1つのセンサーで測定可能なことが望ましい。

#### (2) 気温センサー

バイメタル：形の大きさから熱容量が大きく、おくれ・日射誤差が大きい。成形時の歪はヒステリシスのもととなる。

サーミスタ：形・おくれ・日射誤差は何れも小さい。ジュール熱をさけるため抵抗測定用の電流をなるべく小さくして使用する。おくれが小さいことは望ましいことではあるが、雨や雲の中を通過して附着する水滴が凍結すると感部の温度が上がり、逆に高湿域から低湿域にはいると水滴が蒸発して感部の温度が下がるので注意しなければならない。

金属線：温度対電気抵抗の特性は安定で、おくれや日射誤差も小さいが、抵抗値を大きくするため非常に細い線を使うので、現業的には扱いにくい。

#### (3) 湿度センサー

ゴールドビータースキン（豚の腸の皮膜）：毛髪より湿度変化に敏感ということで外国では割合に使われている。

毛髪：平らに圧延することによりゴールドビータースキンより改良され、日本では1980年以前のゾンデにずっと使われてきた。

抵抗湿度計：電解質の抵抗変化を利用する湿度計であり、おくれは小さいが温度影響がある。高湿または雨水によって電解質が破壊されないようにしなければならない。

い。

#### (4) 信号変換系

機械的変換：センサーの機械的変位を検出して電気信号に変える方式であるが、摩擦とかバックラッシュを小さくする必要がある。

電気的変換：センサーの電気的性質（抵抗値など）を信号に変えることは比較的容易であるが、変換回路の温度特性とか電源電圧の変動に注意しなければならない。

#### (5) 気球飛揚中の問題

各センサーをゾンデにとりつける位置は、日射や雨雪の影響をできるだけ避けてしかも外気そのものに効果的にさらす必要がある。

日射にさらされる気球に吊されたゾンデは、周囲より暖かい空気中を通過する（鈴木・旭, 1978）ので、吊り紐は充分長くなくてはならない。

#### (6) 総合的誤差

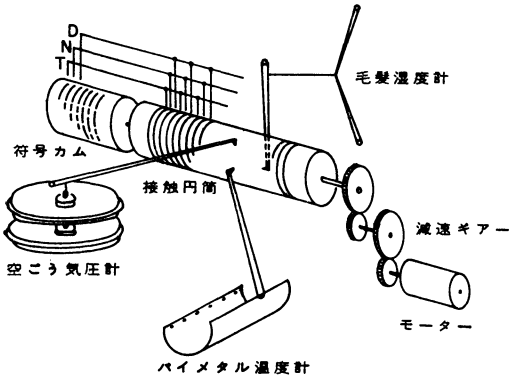
高層観測値の誤差は、センサー個々の精度のほかに、信号変換器の特性、受信記録装置の特性、資料処理の方法など、各段階の誤差の集積となる。日本の符号式ゾンデの精度や外国ゾンデとの比較結果などについては、清水（1981）を見られたい。

### 3.5. 符号式レーウィンゾンデ RS II-56

1956年に完成し、1969年に低周波発信器を Tr（トランジスター）化した RS II-56T, 1976年に低周波発信器を IC（集積回路）化し搬送波発信器を Tr 化した RS II-56A としたが、計器部分は本質的な変更のないまま 1981年 2月末まで25年にわたって使われて、日本の高層観測を代表したゾンデである。詳しい仕様とか使用法は気象庁（1963, 1972 a, 1973 a, 1976）にゆずり、ここでは特徴的なこと原理的なことに限って述べる。

#### 3.5.1. 計器部と符号発生機構（第2図）

温度計はバイメタル（40×45 mm）、気圧計は鱗青銅空ごう（直径 40 mm×2 個）、湿度計は圧延処理した毛髪（60 mm×10本）よりなり、それぞれの変形を指針により拡大し、その先端が接触円筒と接触する。接触円筒と同軸に符号カムがあり、モーターにより回転する。接触円筒は140枚の金属板と絶縁板とが交互に重ねてあり、符号カムは互に絶縁した金属円板で、そのうち9枚はそれぞれ4つの象限ごとにモールス符号の T（—）、N（—・）、D（—・・）、B（—・・・）、O（——）、C（—・—・）、Z（——・）、M（——）、G（——・）の歯形をもっており、他の2枚は1つの象限に5（・・・・）およびロング T（——）の歯形をもっている。



第2図 符号式ゾンデの温度計・気圧計・湿度計と符号発生機構の概念図。

接触円板は符号カムと TNDEO の5符号 (1ブロック) の順をくり返すように接続されているが、何ブロック目かを区別しやすくするため、特定のブロックにはC, Z, MまたはGに代えてある。

接触円板は実は偏心カム状で、約4秒に1回転すると、温度・気圧・湿度の順に各指針が1秒づつ接触し、接触した位置に接続されている符号を発生する。残り1秒はどの指針も接触しないが、この間に次は温度であることを示す区別符号(.....または——)を発生する。

切断式温度計と呼ばれる小型水銀温度計2本があって、1本は $-30^{\circ}\text{C}$ 以下で湿度回路を切り、他は $-50^{\circ}\text{C}$ 以下で区別符号を——から.....に変える。したがって湿度信号がなくなった時と区別符号が変わった時にバイメタルによる温度測定をチェックでき、この切断温度計が符号式ゾンデの温度精度の維持に果たした役割りは大きい。

### 3.5.2. 発信器、電源、全重量

符号カムの歯形と符号ブラシが接触している時は375 Hz、接触していない時は750 Hzの低周波発振が行われ、これが搬送波1,680 MHzを変調して出力(0.4W)される。

電源は、モーター用6V、150mA、発信器用20V、150mA (RS II-56Aの場合)で、100分以上の使用に耐える注水電池(注水した重さ約300gr)である。

RS II 56型の重さは約1,275gr、RS II 56Tで約1,100gr、RS II 56A約950gr(何れも電池を含む)であった。

### 3.5.3. 受信符号の気象値への換算

飛揚したゾンデから発信される1,680 MHz電波は、

地上の自動追跡記録型方向探知機D55Aまたはその改良型D55B(小熊, 1969)で受信し、復調して(375 Hz)のモールス符号のみを取り出し、符号自動記録装置(気象庁, 1963, 1973 a, 小熊1969)で記録する。

ゾンデが上昇するにつれて、気温・気圧・湿度が変化し、これに応じて送信されてくる符号も次第に変化するが、あらかじめ3つの感部それぞれについて何番目のブロックの何符号は温度(気圧・湿度)が幾らであることを検定しておけば、この検定記録と受信符号とを照合しながら順次換算できる。1符号が代表する幅は、温度約 $1^{\circ}\text{C}$ 、気圧は1,000 mb付近で約25 mb, 200 mb付近で約10 mb, 20 mb付近で約4 mb, 湿度2~3%であるが、符号のvarietyの気象値を検定しておくことにより、 $0.1^{\circ}\text{C}$ 、1 mb、1%単位の観測値が得られる。

### 3.6. 新型ゾンデ(変調周波数変化式)の採用

受信信号の自動処理を目ざして、1970年前後から新しいゾンデとその資料処理システムの検討が行われ(気象庁, 1974, 1975 a), 1975~77年の気象研究所の特別研究を経て具体化することとなった。この近代化構想では、(a) 新型ゾンデの採用とこれに伴う検定装置・観測装置等の導入と、(b) 受信信号の直接自動処理と観測資料報告の自動化までを含んでいたが、1980年度に(a)の部分のみを実施することになり、1981年3月1日以降、全国的にRS2-80型ゾンデによる観測に切換えられた。

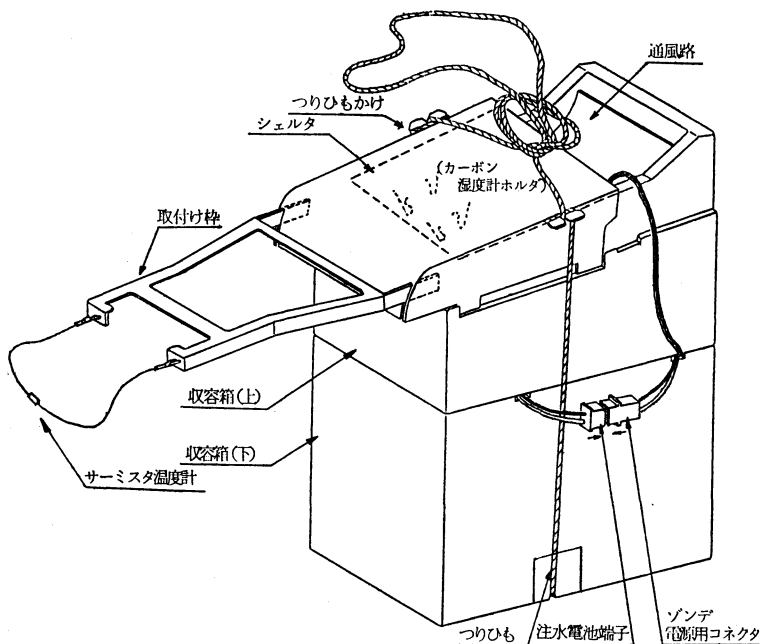
#### 3.6.1. RS2-80型レーウィンゾンデの概要

サーミスタ温度計、カーボン湿度計、接点抵抗式空こう気圧計を用い、気温・湿度・気圧の変化により各センサーの電気抵抗が変わり、この抵抗を組み合わせた発振回路で発振周波数を変化させて搬送波を変調する方式のレーウィンゾンデである(詳細は気象庁, 1980)。

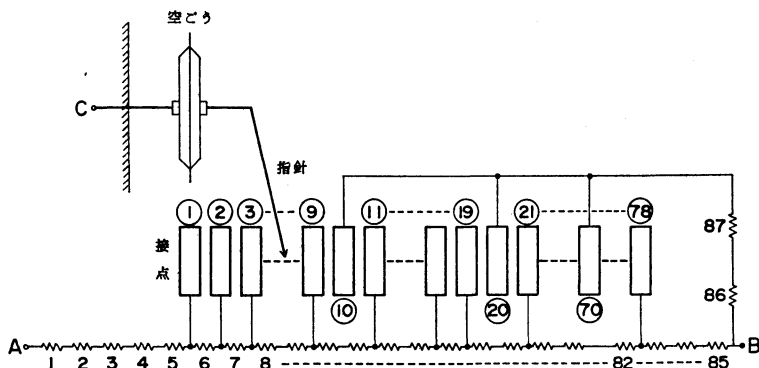
このため、このゾンデは周波数変化式と呼ばれることが多いが、1948年頃以前のごく初期のゾンデを搬送周波数変化式または波長変化式と呼び、新型ゾンデは変調周波数変化式または抵抗変化式と呼んで区別する。

RS2-80型ゾンデの外観を第3図に示す。収容箱は長さ18 cm、幅10.5 cm、高さ26 cmであるが、サーミスタ取付枠約17 cmが突出し、重さは約350 gr(電池を除く)である。

(1) 収容箱は白色発泡スチロール製で、下箱の約2/3の容積に気圧計と信号変換部・発信器部を入れ、残り約1/3に注水電池を入れる。これらを上箱でおさえ、その上に白色スチロール製のシェルターを重ねる。シェルター



第3図 RS2-30型レーウィンゾンデの外観図。



第4図 接点抵抗式空ごう気圧計の接点(①, ②, …… , ⑧)と抵抗(1, 2, …… , 87)の等価回路。

ーと上箱との間は通風路を形づくり、シェルタの下に湿度計をとりつける。またシェルタの一端からサーミスタ取付用の枠がのびる。この枠は輸送・保管時にはシェルタ内にたたみ込める。

(2) サーミスタ温度計は、本体約 2mmφ×4mm のダイオードタイプでガラスコートしてあり、両側にリード線をもち、(全長約 20cm)、白色塗装してあり、温度が下がると抵抗が増す。

(3) カーボン湿度計は、アクリル基板(65×17mm)に、微粒子カーボンに吸湿剤や安定剤を配合して塗布し

たもので、湿度が増すと抵抗が増すが、温度によっても抵抗が変わる。

(4) 気圧計は、温度依存度の小さい弾性係数をもつ材質で作られた空ごう(60mmφ)の動きを指針で拡大し、この指針が接点板上を摺動するようになっている。接点(78個)の間および外側に約 6kΩ の抵抗が87個はいており(第4図)、地上気圧では指針は接点①～⑤くらいの間であって、たとえば③の上であればBC間の抵抗は8～85番の抵抗値(6×78=468kΩ)、③と④の間であればBC間の抵抗は無限大となる。気圧が減るにつれ

て指針は接点⑩の方へ動き、接点番号が1つ増えるごとにBC間の抵抗は6kΩ減り、接点と接点の間にくるごとに抵抗は無限大となる。指針が接点⑩⑪……⑯の上にある時はBCの抵抗は12kΩであって、これらの接点を気圧チェック接点と呼んで、他の接点番号の確認や、指針の接点とびなどの判定に使う。

(5) 信号変換部は、時間パルス発生回路からの信号で、気圧計P・温度計T・湿度計Uの抵抗値とRef(レファレンス抵抗≒6.3kΩ)とを3秒毎にRef—P—T—P—U—P—T—Pの順に切換えてくり返す。それぞれの抵抗値RはR-F変換回路によって周波数F(0~2,000Hz)に変換され、これによって搬送波1,680MHzを変調する。

(6) 電源は、出力17~20V, 150mAで100分以上の使用に耐える注水電池で、水を含んだ重さは約170grである。

### 3.6.2. 飛揚と受信

各ゾンデの3つの感部およびR-F変換回路と発信器は、飛揚前に幾つかの点検を行ない、きめられた規準に合格すれば気球につないで飛揚する。

ゾンデからの電波(1,680MHz)を自動追跡記録型方向探知機D55B(小熊, 1969)で受け、復調して信号部分(0~2,000Hz)をとり出し、F-V変換器で電圧(0~100mV)に変え、自動平衡型アナログ記録器で記録する。

### 3.6.3. 気象値への換算

受信したアナログ記録は、Ref—P—T—P—U—P—T—Pの順に3秒毎に切換えられていることその他の特徴から、気温・湿度・気圧に対応する記録を判別でき、それぞれの目盛Lを読みとって次の関係から気温Tと湿度Uに換算する。

$R = f_R(L) \rightarrow$  飛揚前のゾンデ点検で変換特性 $f_R$ の係数をきめておく。

$T = f_T(R)$   
 $U = f_U(R, T)$  }  $f_T$  または  $f_U$  の係数が検定記録として各感部に添付してある。

気圧については、アナログ記録上で、気圧計指針が何番目(N)の接点に触れたかを判断し、各気圧計に検定記録として添付してある $P = f_P(N)$ の表から気圧値を得る。なお昼間の気温観測値には日射補正を行なう。

高度Hの計算は測高公式で行ない、気圧計接点にない特定の気圧における気温・湿度などは内挿によって算出する。

このゾンデはもともと受信信号の全自動処理を目指し

て開発されたものであるが、今のところ、アナログ記録の読取りとその読取り値の計算器への入力に人間が行い、その後のT・U・H等の計算や内挿はプログラム化されている(気象庁, 1980別冊)。

### 3.7. 特殊ゾンデおよび温度基準ゾンデ

IGY(1957~58)頃から、大気中の特殊な物理量の鉛直分布を観測して大気物理学の発展に寄与するため、種々の特殊ゾンデが開発された。それらの測器としての説明は、気象庁の資料(気象庁, 1972a; 気象庁, 1973c)にゆずり、ここでは観測の意義を説明する。

(1) 露点ゾンデ: 大気中の湿度(水蒸気量)を、より精度よく、より低温においても、より高い所でも測るために開発された。成層圏の水蒸気は非常に微量(混合比≒10<sup>-6</sup>gr/gr)で、非常に測定が難しいが、オゾン層などに関連した成層圏の光化学反応に水蒸気が大きく関与しているため、成層圏の水蒸気量の測定は非常に重要である。日本の露点ゾンデはIGYに始まり、露点面の冷却加熱などに何回か改良が加えられてきた。

(2) 気象電気ゾンデ: 対流雲(雷雲)で発電された大気電気は上向きに流れて電離層に達し、電離層内で水平に流れて晴天域で下降し、地表を流れて悪天域で対流雲にはいる回路を作っているが、この電流の強さや収支を観測し、また空気の電導率などを観測するため開発されたゾンデで、IGY以後何回かの改良を加えられてきた。

(3) 輻射ゾンデ: 地表面はその温度に応じた赤外放射を上向きに出し、この放射は大気中の雲や水蒸気・炭酸ガス・オゾンなどに吸収され、それぞれの物質から再放射されて上方に伝わる。ある高さの空気塊にはいる放射と出る放射との差がその空気を暖めたり冷やしたりするので、大気の大循環や大気物理の重要な因子であるとして、これらを測るために開発され、1965年頃から使われてきた。

(4) オゾンゾンデ: 成層圏の熱源分布に関して、また空気の南北方向・上下方向の運動の指標としてのオゾン観測の重要性は早くから言われていたが、最近では成層圏の汚染に関連して、オゾン量の増減による紫外線量の変化や、気候変動の要因としてのオゾンの鉛直分布の観測が強く要望されている。よう度カリ溶液とオゾンとの反応電流を測る方式の化学式オゾンゾンデは、1966年昭和基地で使われ始め、1968年からは国内でも使われている。

(5) 温度基準ゾンデ: 現業用ゾンデの精度を極限まで高めることは費用や取扱い易さなどから困難であるが、

特別観測用として一番重要な要素である気温測定の基本となる温度基準ゾンデが数か国で使われた。日本の温度基準ゾンデは、温度センサーとして直径 0.02 mm の鉄ニッケル線 120 cm を用いており、温度変化による抵抗変化をパルス周波数の変化に換えて搬送波を変調する(気象庁, 1972 a)。測定誤差は 0.2~0.3°C で、外国の温度基準ゾンデとの比較や、国内でのルーチンゾンデとの比較も行われた(比較の結果は清水, 1981)。

### 3.8. 上層風の観測

気球は上昇しながらそれぞれの高さの風に流されるので、一定時間間隔(普通 1分, 高くなると 2分または 4分)ごとの、気球の水平面内の位置と高さを観測すれば、水平面内の位置の時間差分がその高さでの風向・風速となる。

気球が数 km 以上上昇し観測点よりかなり流されて高度角が低くなると、地球の曲率の補正を行なう(補正法は気象庁, 1973 b)。

#### 3.8.1. 高さと高度角・方位角を利用する方法

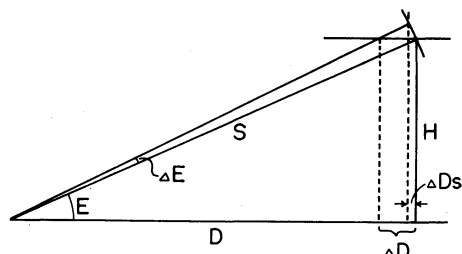
(1) レーウィンゾンデ(例えば RS2-80 型)を飛揚すると、気圧 P・気温 T・湿度 U の他に、電波の方向測定によりゾンデの高度角 E・方位角 A がわかる。P・T・U から高さ H がわかり、 $H/\tan E$  が水平距離 D を与えるので、D と A とで気球の水平軌跡が得られ、これの時間差分で風向・風速を得る(気象庁, 1973 a)。

(2) レーウィン(W60T 型については気象庁, 1972 a, 1973 a, 現用は W75 型)は簡単な接点式空ごう気圧計をつけて飛揚する。搬送波 1,680 MHz の電波追跡により高度角・方位角がわかり、復調音を聞いていると空ごう指針が接点上にきた時に音の高さが変わる(750 Hz から 375 Hz へ)ので、あらかじめ何番目の接点は何 mb ということを検定しておけば気圧 P が分かる。6 時間前のレーウィンゾンデ観測による P 対 H (高さ)の関係を準用するなどして高さ H を求めれば、あとはレーウィンゾンデの場合と同じ計算で風向・風速がわかる。

(3) バイポール観測(気象庁, 1973 a)。小気球に一定の浮力を与えた時の上昇速度(したがって放球後の毎分の高さ)を仮定し、経緯儀で方位角・高度角を観測しても上層風を計算できる。簡便ではあるが電波を使わないので雲にさえぎられる可能性が大きい。

#### 3.8.2. エコー方式(直距離と高度角・方位角を利用する方法)

気球が上層風に流されて高度角が低くなった場合、こ  
1982年 1月



第5図 直距離 S を測る方式(エコー方式)では、高度角誤差  $\Delta E$  による水平距離の誤差は  $\Delta D_s$  に過ぎない(本文参照)。

れを電波で追跡していると高度角の値が振幅 0.1~0.5 度, 周期 1~2 分で波打つことが多い(方位角も波打つ)。経緯儀による観測ではこのようなことは現われないので、観測点近くの地面や建造物による反射電波の影響と考えられる。

第5図に示すように高度角にわずかの誤差  $\Delta E$  があっても、高さ H と高度角 E から水平距離 D を出す方式(3.8.1.項)では水平距離の誤差  $\Delta D$  はかなり大きくなり測風精度に影響する。しかし観測点とゾンデとの直距離 S を測った場合、高度角誤差  $\Delta E$  による水平距離の誤差は  $\Delta D_s$  に過ぎない。

この原理にもとずき測風精度をあげるためにエコーゾンデとそのシステムが開発された(気象庁, 1973 a)。これは地上の RD 56 または RD 66 エコーゾンデ観測装置(小熊, 1969)からのパルス信号を受けて、ゾンデ側で新たにパルスを発生して返信する方式で、この電波の往復時間から直距離を出すシステムである。1958年の ES-58 型に始まり(ES-61A については気象庁, 1972 a に説明)、ES-78 が最近まで使われたが1981年 4月廃止された。ただ日本の気象ロケット用ゾンデにはこのエコー方式が今も使われている。

### 3.9. 気象ロケット観測

気球による高層観測の平均到達高度は 25~30 km であり、それより上の観測は別の手段によらねばならない。

1920年代から1940年代中頃までは流星跡や音の異常伝播によって高さ 50~100 km の気象が推論されていたが、1946年 V2 ロケットによる上層大気の観測が成功し、以後ロケット技術の進歩によって、大気の組成・電離現象・地磁気・太陽からの種々の放射強度など、地球物理的現象の全てにわたって in situ (その場所におけ

る) 観測が可能となった。

### 3.9.1. 日本の気象ロケット MT-135P

日本の気象ロケットは東京大学宇宙航空研究所と気象庁との協力のもとに開発され、1964年以来、内之浦で発射実験をくり返した後、MT-135Pとして1970年夏から岩手県綾里の気象ロケット観測所ではほぼ週1回の観測が行われている。

MT-135Pは(清水ら, 1974), 全長 3.3 m, 直径 135 mm, 発射時重量 68 kg で、発射後約10秒間燃焼加速し、発射後約110秒で最高点(約 60 km)に達し、タイマーで頭胴部をモーター部から切り離してゾンデを放出する。ゾンデとモーター部(ロケットのもえがら)とは、それぞれのパラシュートにより緩降下し、この降下中にゾンデ観測が行われる(気象庁, 1972 b)。

### 3.9.2. MT-135P 用エコーゾンデ ES64B-P

このゾンデは RD66 エコーゾンデ観測装置(小熊, 1969)からの電波(1673 MHz)に搬送される 4 msec ほどのパルスに応答して2つのパルスを 1,687 MHz の搬送波で返信する。このうち第1の返信パルスは観測点とゾンデとの間の直距離を与え、第1と第2のパルス間隔が温度情報となる。

温度センサーは直径 0.02 mm, 長さ 18 cm の鉄ニッケル合金で、 $30^{\circ}\text{C}$ ~ $80^{\circ}\text{C}$  の変化に対して電気抵抗が  $150\ \Omega$ ~ $100\ \Omega$  に変わり、これに応じて返信パルスの時間間隔が 850  $\mu\text{sec}$  から 350  $\mu\text{sec}$  に変わるようになっている(気象庁, 1972 a)。

4 msec ごとに直距離と温度の情報が得られる(実用上は連続的)が、30 秒ごとに  $150\ \Omega$  と  $100\ \Omega$  の2つの基準抵抗信号がそれぞれ約 2 秒(温度信号の代りに)挿入される。地上装置 RD66 で受信した信号は復調した後、電圧に変換して記録する。

直距離と高度角(地球曲率補正を行う)とからゾンデの高さと水平距離を出し、水平距離と方位角によってゾンデの位置がわかるから、これの時間差分をとって風向・風速を算出する。

温度記録は、発射前に検定した温度センサーの温度対抵抗特性から先ず“生の温度”を計算する。“生の温度”とはセンサー自体の温度であるが、落下中の空力加熱、日射の影響、抵抗測定用電流のジュール熱、センサー自体の熱放射、空気との熱伝導などの影響を補正(Yata, 1970)して気温を得る。気温と高さから気圧を算出する。

ロケット用ゾンデで特に注意しなければならないこと

は、各種の振動・衝撃に耐えるような部品と構造でなければならないこと、地上の  $1/1,000$  以下の空気密度においても電気回路に放電を生じたり、電池の液が吹きこぼれたりしないことなどで、発射前にはこれらについての厳重な試験(普通の動作試験の他に)が必要である。

### 3.10. 今後の発展のために

(1) 1981年3月、それまで永く使われた符号式ゾンデに変えて変調周波数変化式 RS2-80 型レーウィンゾンデが定常観測に採用された。後者はもちろん30年のゾンデ観測の経験と試験研究の結果生まれたものではあるが、現業的に使って見て始めて顕在化した問題もある。当面は、これらの問題の解決を図りながら、現在、受信記録を人間が読みとって計算機に手入力しているのを、オンライン自動処理にもっていくことが次の目標である。このことは、人間の介入によるミスあるいは誤差を防ぎ、電報通報時間を早くし、省力化を図るものであり、既に昭和基地で行われていることから見て技術的には可能である。

(2) 高層観測は in situ(その場所での)直接観測の到達高度を上げることへの努力の積み重ねであった。成層圏がその名に反して決して層を成した静かな世界でないことは観測から明らかであるし、日本上空のジェット気流の観測事実が大気大循環論の発展に果たした役割りは大きい。また、時間積分によって将来を予測する数値予報に使われる資料の大部分は高層観測資料であり、予報モデルは次第に成層圏の資料もとり入れるようになり、近い将来には 10 mb 資料もモデルに組み入れられようとしている。

一方、高層観測は衛星によるリモートセンシングに代えればよいという声も聞かすが、リモートセンシングから気温の鉛直分布を計算するのは、理論的には「積分方程式を解く」ことに相当するものの、実用的にはゾンデ観測の種々の高さの気温と衛星観測の種々の波長の赤外強度との多重回帰方程式を計算することであり、しかもこの回帰係数は過去2週間のゾンデ資料を使って毎週更新されているという(南半球ではゾンデ観測がすくないので4週間の資料が必要)(Phillips *et al.*, 1979)。したがってゾンデ観測は衛星観測のチェック程度に残せばよいという議論も当然なのであって、衛星観測から気温鉛直分布を出すには本質的にゾンデ観測を必要としているのが現状である。もとより日進月歩の技術開発を否定するわけではないが、リモートセンシングから統計処理によって鉛直分布を出すことに含まれる本質的な欠点を充

分見きわめる必要がある。

(3) 高層観測の概要を、多くのことを割愛または他の文献にゆずりながらここまで書いてきたが、ゾンデ計器部の検定装置には全く触れなかった。しかし、高層観測は観測ごとに飛揚器材を消耗するので、“検定および補給”ということは定常的な高層観測業務というシステムの大きな要素であることを強調しておきたい。このようなシステム全体から計器部指針の先端の工夫にいたるまで、種々の改良発展に尽くされた先輩関係諸氏の努力に(その多くは研究論文にまとまるような性質のものでなかった故に一そう)あらためて驚きと敬意の念をいだかざるを得ない。

文献

中央気象台, 1951: 高層観測指針.  
 気象庁, 1963: 高層気象観測指針.  
 ———, 1964: Aerological data at the Syowa Base. Antarctic Met. Data, obtained through the Japanese Antarctic Research Expedition 1956-1962, 3.  
 ———, 1972 a: 現用のゾンデ, 測候時報, 39, 323-353.  
 ———, 1972 b: 気象ロケット観測指針(暫定版).  
 ———, 1973 a: 高層気象観測指針.  
 ———, 1973 b: 高層気象常用表.  
 ———, 1973 c: 特殊ゾンデ観測実施要領; 1974: 同観測資料整理編.  
 ———, 1974, 1975 a: 高層気象観測の近代化計画について, 同(II), 測候時報, 41: 39-88; 42, 83-129.  
 ———, 1975 b: 気象百年史.  
 ———, 1976: RS II-56A型レーウィソゾンデ取扱要領.  
 ———, 1980: 高層気象観測暫定実施要領, 同別冊 1980: 計算機による高層気象観測の作業手順.  
 北岡龍海, 1956: GMD-1A 引受けの経緯とこの方式採用の理由, 高層気象, 2.  
 ———, 1981: 高層気象観測の思い出, 「気象」(日本気象協会)の1981年3月号から連載中.  
 小熊一人, 1969: 高層気象観測装置, 気象研究ノート, 99, 150pp.  
 Phillips, N., L. McMillin, A. Grube and D. Wark, 1979: An evaluation of early operational temperature soundings from TIROS-N. Bull. AMS, 60, 1188-1197 (これと他の同様な論文2つとの抄訳紹介, 清水正義, 1980: 衛星による気温鉛直観測の精度と数値予報に及ぼす影響について, 測候時報, 47, 119-135.)  
 清水正義, 五月女敬太郎, 鈴木剛彦, 1974: 気象ロケット観測について——綾里における観測を中心として——, 天気, 21, 59-69.

清水正義, 1981: 高層気象観測用ラジオゾンデの測定精度について, 「環境科学」研究報告書(S508)の「気候変動と人間活動」, 27-50.  
 鈴木茂, 旭満, 1978: ラジオゾンデのつりひもの長さの変化における日射の気温測定に及ぼす影響, 研究時報, 30, 93-97.  
 和達清夫監修, 1974: (新版)気象の事典, 東京堂.  
 Yata, A., 1970: Correction for the temperature data obtained by MT-135 system, Geophys. Mag., 35, 99-121.

4. 気象レーダー観測

立平 良三

レーダはもともと航空機や船舶を探知する兵器として開発されたもので、第二次世界大戦に初めて使用された。この場合、降水粒子からのエコーは航空機などの探知を妨げるものとして認識されていたわけである。その後、1940年代後半からハリケーンや雷雨などの気象現象の探知に積極的に利用されるようになってきた。

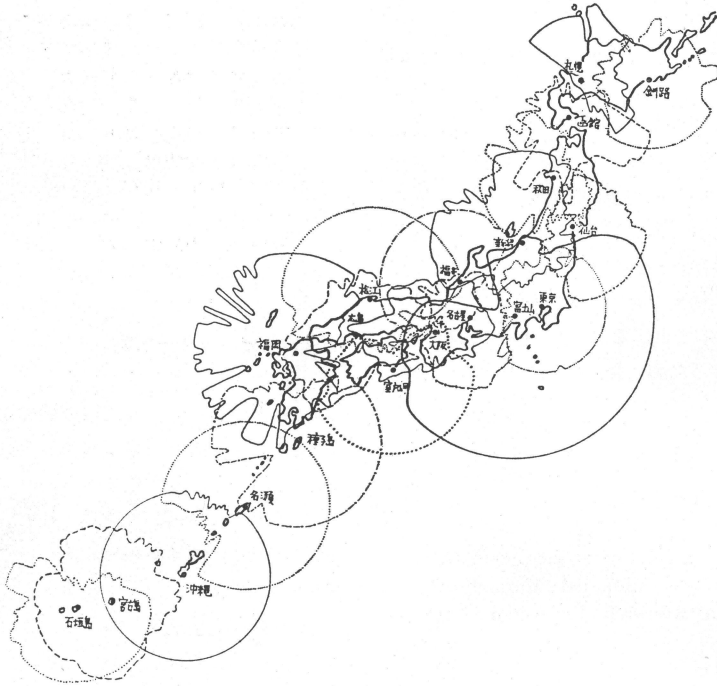
レーダー気象学の分野では、やはり米国が質量共に世界をリードしている感じであるが、米国の代表的なレーダー気象学者である D. Atlas や L.J. Battan が大戦中に空軍のレーダー担当将校だったことは興味深い。

我国では終戦後しばらくはレーダーの研究は駐留軍の制約を受けており、やっと1949年になって気象研究所高層気象研究部で基礎的な研究が開始された。その後、日本の気象レーダーの開発は気象研究所を含め気象庁が中心となって進められてきている。筆者が気象庁に所属している関係もあって、本稿の記述は気象庁関係に重点を置くことになりがちであるが御了承願いたい。

4.1. 気象レーダー観測網の整備

日本で最初の本格的な気象レーダーは、1954年に気象研究所に設置された。これは3.2 cm波を用いており、アンテナは直径2 mのパラボロイド型であった。同じ年に、ほぼ同規格の気象レーダーが大阪管区気象台に設置され、ルーチン観測を開始した。これが気象庁のレーダー観測網の第一歩である。

1955年には福岡管区気象台と東京管区気象台に5.7 cm波を用いたレーダーが設置された。パラボロアンテナの直径は3 mとなり、以後ほとんどのレーダーがこの仕様で製作されていくことになる。福岡の場合は、レーダー波の見通しを良くするため、背振山に設置され、マイクロ波のリレー回線でレーダー映像を管区気象台の遠隔指示装置に表示するという方法が採用された。この方式は、その後各地の山岳気象レーダーでも踏襲されてい



第6図 気象庁のレーダー観測網。各レーダーサイトのまわりの曲線は3,000 m の等ビーム高度線を示す。

る。

以上の3台の現業用気象レーダーは、いわば気象業務にどの程度利用できるかを探る試みとも言うべきもので、特に台風災害の多い大都市における台風予報への実用化テスト的な意味を含んでいたものと思われる。

これらの気象レーダーで幾つかの台風が観測され、台風探知に有効であることが確認されたので、1959年から1960年にかけて、台風をできるだけ遠方で探知することをねらいとして種子島、名瀬、室戸岬の各レーダーが新設された。

室戸岬レーダーは、我国初めての10 cm 波レーダーである。できるだけ台風を遠方から捉えるために途中の雨による減衰の少ない10 cm 波が選ばれたわけである。波長が長くなるとビームがシャープさを失うので、これを補うためアンテナの直径は4 m とされた。しかしその後の経験で、途中の雨による減衰は実用上問題にならないことがわかり、1974年の更新時には5.7 cm 波に変更された。

このように気象庁のレーダーの第1目標は台風の探知であったが、このほか雷雨の探知にも極めて有効であることが認められた。

気象研究所では、小平邦彦室長を中心として1950年代後半から、気象レーダーによる雨量測定の研究に力を入れていた。このため気象研究所のレーダーには、日本で初めての等エコー装置やレーダーエコー強度積分装置などが付加されていた。この研究成果を受けて、1961年設置の名古屋レーダー以後は、等エコー装置が付加され、Aスコープと併用してエコー強度をできるだけ定量的に観測し、降水予報に利用しようという傾向がでてきた。

レーダーの新設もこれに対応して、名古屋レーダー以後はあまり台風の来ない北日本や日本海側の各地方予報中枢に拡大された。さらにこれだけではカバーできない地域のために、幾つかの府県予報中枢にも設置された。

1964年には、南方洋上より関東東海を直撃する台風に備えるため、600 km 以上の探知範囲を持つ大型レーダーが富士山頂に設置された(吉武他, 1960)。探知距離が長いので、途中の雨による減衰を避けるため10.4 cm という波長が使われた。しかもビームは極力シャープにせねばならないので、直径5 m の大型アンテナが用いられている。それでも、ビーム半値幅は600 km 先になると15 km 程度に拡がり、遠方では定量的な測定は無理である。



1972年には沖縄が本土に復帰し、那覇、宮古島および石垣島の3レーダーが加わり、第6図のような20台のレーダーによる気象レーダー観測網が完成した。

米国では1979年の時点で56台の10cm波レーダーによる気象レーダー観測網が形成されており、さらに局地的な予警報のために5cm波レーダーが61台設置されている。数では日本より遙かに多いが、国土面積からすれば必ずしも十分でなく、西部諸州ではかなりまぼらで航空局のレーダーを補助的に使っている。しかし、これらのレーダーをネットワークとして使うことにかけては、日本よりもかなり進んでおり、全米のレーダー合成図などはかなり以前から作成されている。

気象レーダーの耐用年数は15年前後で、現在では気象庁のほとんどのレーダーが2代目となり、大阪は3代目のレーダーになっている。

以上は陸上のレーダー観測網であるが、これと併行して、1966年から1969年にかけて気象庁の観測船（凌風丸、啓風丸）と海上保安庁の巡視船（いず、みうら）にそれぞれ気象レーダーが設置された。これらのレーダーは集中豪雨特別観測（1968～1972）やAMTEXなどの調査研究には活用されたが、巡視船のレーダー観測は1975年に打ち切りになった。

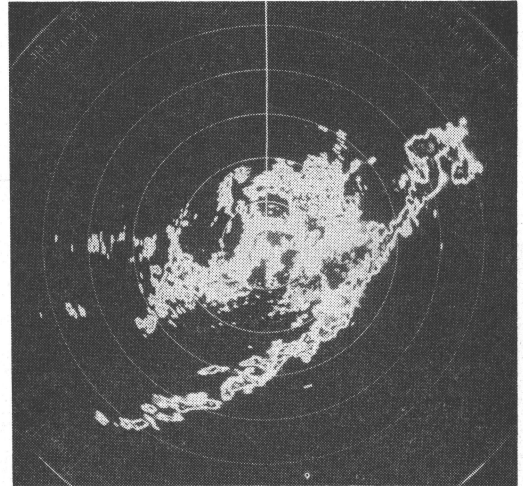
また1979年からは、国際空港における空港予報のために、気象庁の標準型よりやや小型の「空港気象レーダー」の設置計画が進められている。既に1980年に新東京航空地方気象台と千歳航空測候所に、1981年には大阪航空測候所に設置されて観測を開始している。また1982年には東京航空地方気象台と福岡航空測候所に設置される。

#### 4.2. レーダーエコーの処理技術

初の現業用レーダーが稼動し始めて約30年を経過した。この間のエレクトロニクスの進歩は目をみはるものがあり、気象レーダーのハード面についても著しい改善があった。しかし、そのかなりの部分は一般の航空機や船舶を探知するレーダーの改善と共通している。ただ、気象レーダーは探知対象が3次元的な拡がりを持ったものであり、またエコーの強度が定量的に取扱われる所に特色がある。ここでは、気象レーダー独特の付加装置とか、エコー処理技術の発展を中心に述べることにする。

##### 4.2.1. レーダー指示機

降水エコーは3次元に広範囲に分布するので、これを使いやすく表示するために色々な指示装置が開発されて



第7図 Gray Scale 表示の例（1981年8月13日 5時48分、富士山レーダー、距離円は100kmごと）。中心（富士山）から200～300km以内はほとんど地形エコーである。中心の南東象限には寒冷前線に対応して長さ1,000kmを越える長大な帯状エコーが観測されている。帯状エコーの中核部にある灰色は16mm/hr以上の強度を示している。

きた。最も基本的なものはPPI (Plane Position Indicator) で、当初からすべての現業レーダーに備えられてあった。その後、エコー強度を定量的に測定するためにAスコープが使われるようになったが、これは要するにシンクロスコープで、1968年の2代目の大阪レーダー以後は市販のシンクロスコープが指示機に組込まれる形式になっている。

PPIは近似的に雨雲の水平断面とみなせるが、鉛直断面を表示するものとしてRHI (Range Height Indicator) がある。1961年設置の名古屋レーダーでは、PPIを利用して簡易なRHI表示を可能にする工夫がされていたが、かなり歪のある表示であった。その後、1968年の2代目大阪レーダー以降のいわゆる「気象庁標準型気象レーダー」では歪のないRHIが付加されるようになった（小平、1972）。

標準型気象レーダーが制定される前は、波長、出力、アンテナ直径などのごく基本的な仕様は別として、細部の仕様はメーカーによってかなりまちまちであった。そこで、少なくとも観測作業に密接に関連する諸機能や操作部分は、できるだけ共通させようという意図で標準型レーダーが制定されたわけである。標準型レーダーで

特記すべきことは、エコー強度を3段階に区分して、3階調の濃淡でPPIに表示する、いわゆるGray scale表示が採用されたことである(第7図参照)。

PPIは近似的には降水雲の水平断面と考えてよいが、厳密には水平でなくレーダーサイトから遠ざかるにつれて高度が増大している。気象観測測器としては水平断面を表示できることが望ましいので、幾つかの仰角におけるPPIをリング状に合成してCAPPI(Constant Altitude PPI)を表示する装置が考案されていたが、日本では富士山レーダーに略式のものが付けられたほかは使用されたことはない。ただ、1982年には名古屋レーダーと福井レーダーに「レーダーエコーデジタル化装置」が付加されるが、これは3仰角のPPIから近似的なCAPPIを合成する仕様になっている(4.4.節参照)。また研究用ではあるが、1980年に更新された気象研究所のレーダーはほぼ完全なCAPPI機能を備えている(内藤, 1980)。

#### 4.2.2. エコー強度の処理

エコー強度を定量的に取扱うというのが気象レーダーの特色であるが、最初の現業レーダーである初代の大阪レーダーはAスコープを持たず、エコー強度はPPI上のエコーの輝度から定性的に判断するほかなかった。しかしアンテナ仰角は変えられたので、いわゆる「エコー頂高度」の測定は可能であった。このため「エコー頂高度」が唯一の定量的データとして重要視され、雨量強度や発雷との関係が精力的に調査された。

このような初期の特殊事情による「エコー頂高度」重視の傾向は、エコー強度について定量的なデータが豊富に得られるようになって、まだ残っているように見える。例えば、物理的に考えて地面近くのエコー強度とともにも相関の高いはずの大雨の推定にあたって、むしろエコー頂高度にまず注目するというようなことが時に行われている。

その後の各レーダーはAスコープを備えるようになり、PPI上に現われたエコー域中の主要な数点について強度の定量的測定が行われるようになった。

当初のAスコープによる測定は、精度の維持にかなりの努力を必要とした。レーダーエコーはマイクロ波として受信されるが、それをAスコープに表示するまでに、中間周波数を経てビデオ周波数にまで変換しながら増幅しなければならない。これらの回路は、探知用レーダーでは問題がなくても、エコー強度の定量的測定を生命とする気象レーダーには必ずしも十分ではなかった。この

ため、エコー強度測定の精度を維持するのに、Aスコープを頻繁に校正する必要があった。

Aスコープでは、定量的測定とはいふものの単に数箇所での値しかわからない。これを改善するため1961年の名古屋レーダーから等エコー装置が導入された。等エコー装置は、幾つかの定められたエコー強度レベル以上の領域のみをPPIあるいはRHIに表示する装置で、エコー強度の2次元的な分布が描き出される。

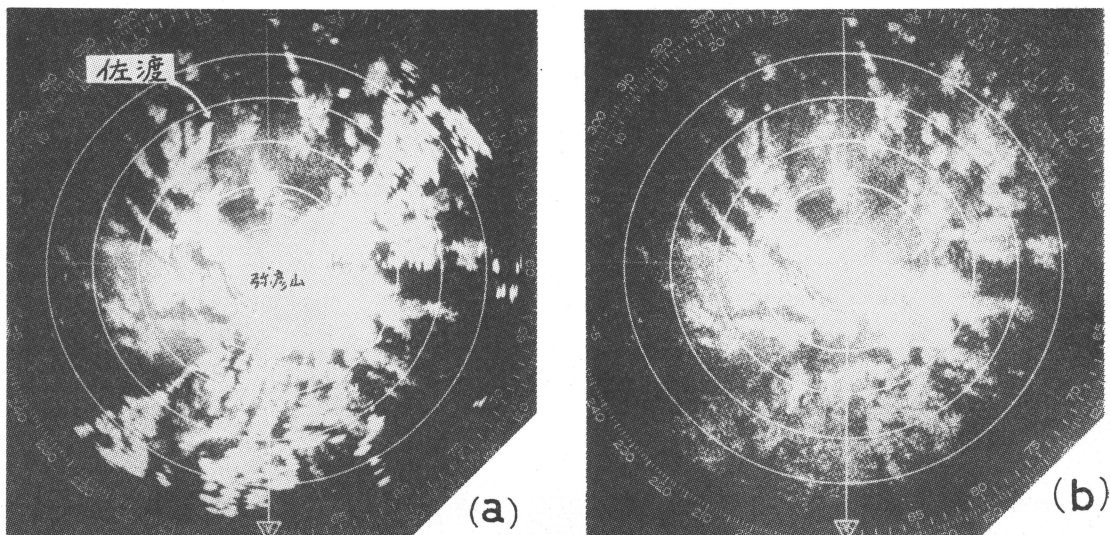
しかし、同じ雨雲でも距離が遠くなるとエコー強度が弱まるので、等エコー装置ではまずレーダーエコーに距離補正を施している。距離補正後のエコー強度は近似的に降雨強度と対応するものとみなすことができる。現在の等エコー装置では、標準的なZ-R関係を用いてエコー強度を降雨強度に換算し、1mm/hr未満、1mm/hr以上、4mm/hr以上、……、128mm/hr以上の各レベルのエコーを表示できるようになっている。

このようにレーダーエコーの距離補正は、気象レーダーでは重要な意味を持っている。初期の距離補正は、エコーがビデオ周波数になってから距離補正波形を加算する方法であった。この方法では受信回路の性能の変動がそのまま距離補正の精度に影響し、精度の維持に苦しんだ。

1964年、米国でPIN-Modulatorと呼ばれるマイクロ波の減衰器が開発された。この減衰器に距離補正の波形をバイアス電流として入力すると、それに応じて受信されたばかりのマイクロ波周波数のエコーを減衰させるものである。受信直後の補正であるため、この方法は受信回路の性能の変動には影響されず、精度のよい距離補正を安定して行うことができる。PIN-Modulatorは1966年から富士山レーダーでテストされ、そのあと気象庁標準型レーダーに採用されている(立平, 1974)。

気象レーダーの信号処理で、もう1つ重要なのは、降水エコーの平均化である。船や航空機からのエコーと異なり、雨雲のような多数の降水粒子の集合体からのエコーは、その強度が時間的に激しく変動する。これは個々の降水粒子が風のシャーや乱流によって激しい相対運動をしているからである。

所で、降雨強度はいわゆるZ-R関係によって統計的に雨粒群の「レーダー反射因子」に結びつけられており、またレーダー反射因子は「レーダー方程式」によってエコー強度に結びつけられている。ここでエコー強度というのは正確には時間的に平均化されたものを指す。従って、レーダーを降雨の測定に使うには、エコー強度



第8図 新潟レーダーの雪エコー (1977年3月3日16時30分, 距離円は20kmごと). (a) 通常のPPI写真, (b) 地形エコー除去後.

の時間平均 (1/10秒程度) を行うことが必要である。

エコー強度の時間平均はハード的に行うとすれば遅延素子を必要としコストがかかるので, エコーを Low-pass-filter に通して距離方向の平均化を行うことで代用する方法がまず標準型レーダーに採用された。

その後, エレクトロニクスの急速な進歩により, 受信されたエコーを即時的にデジタル化する, いわゆる A/D 変換が容易に低コストで行えるようになり, デジタル演算によって平均化を行うようになった。この場合, 距離補正の演算もついでに実行することができる。この方式は1971年の函館レーダー (2代目) から実用化された。

この方式の導入によって, 等エコー装置は一層安定で精度のよいものになり, また Gray Scale 表示も輪画のはっきりした鮮明なものになった (第7図参照)。

#### 4.3. 地形エコーの除去

前節まで述べてきたように, エコー強度の定量的測定やその表示方式の改善の努力が長年にわたってつづけられてきた。エコー強度の分布は予報業務に利用されるほか, 気象学の各分野の調査研究にも活用されてきた。その結果, 強く感じられたことは, レーダーから得られるエコー強度の情報量は非常に大きく, 人手で処理していたのではとても十分な利用はできないということであった。つまりレーダーは半径数百 km 以内の3次元空間内を数 km の分解能で時々刻々に測定する能力があるの

で, 発生する情報量は非常に大きいのである。

そこで, レーダーから得られる情報をコンピュータに入力して迅速に処理し, 各利用者の使用しやすい形にまとめて出力することが計画された。このためにはまず, 本来アナログデータであるエコー強度をデジタル化する必要がある。

狭義のデジタル化なら, 既に1971年の函館レーダー以後, 部分的に実施されていたわけであるが, コンピュータで処理させるためにはまだ幾つかの問題が残されていた。その内の最大の難問は, 降水エコーと共存する地形エコーを除去することである。コンピュータに両者を識別させることはまず不可能と言ってよい。

気象庁は1976年に, 降水エコー強度には殆んど影響を与えずに地形エコーを除去する技術を開発し, 1977年にまず新潟レーダーに取付けてテストした (立平他, 1976)。第8図はその一例で, 海上の雪エコーは除去前と殆んど変化なく, 陸上では雪エコーのみが明瞭に表示されていることがわかる。

このあとこの技術は, 新東京航空地方気象台を始めとする空港気象レーダーに正式に採用になり, また1982年に更新される3代目の福岡レーダーにも採用されている。気象レーダーに関する技術は, 一般の探知レーダーについて開発された技術の応用が多く, また諸外国からの輸入が大部分であるが, 地形エコー除去技術は気象庁が独自に開発したもので, 諸外国でもこれを採用するこ

とが計画されている。これはやはり、日本の複雑な地形が大量の地形エコーを生じさせるため、地形エコー除去に対するニーズが高かったためであろう。

この地形エコー除去技術は、降水粒子群からのエコー強度が時間的に激しく変動する性質を利用したものである。この変動は、個々の降水粒子からの反射波の位相が少しずつ違っていることに起因する。位相の違う波の合成振幅は、位相の重なり具合によって変化するが、降水粒子が乱流などにより相互運動すると、それに応じて位相の重なり具合が変化し、合成振幅（つまりエコー強度）の変動が生ずるのである。

一方、地形エコーの強度の変動は小さいので、エコーの変動成分のみを一種の High-pass Filter で取出せば地形エコーの除去ができる。所で、都合のよいことに、降水の平均エコー強度は近似的にこの変動成分の大きさに比例するという性質があり、これを利用してもとの降水エコーを復元するわけである。

また、この変動成分の周波数は、降水粒子の相互運動の激しさに関係している。降水粒子の水平速度は近似的に風速に等しいので、結局この周波数はシャワーや乱流の大きさの目安を与えるものである。この性質を利用して、空港気象レーダーには PPI 上に大気の「じょう乱度」を表示する機能を持たせてある（志崎、1980；立平、1980）。

この大気じょう乱度の表示とか、地形エコー除去は、レーダーエコーの強度だけでなく位相も利用した技術とすることができる。しかし、レーダーエコーの位相を完全に利用するには普通のレーダーでは無理で、ドップラーレーダーが必要である。つまり普通のレーダーでは位相を利用して降水粒子相互間の相対速度は測定できるが、絶対速度（ただしレーダービームの動径成分のみ）を測定するにはコヒーレントなマイクロ波を発射できるドップラーレーダーでなければならない。

日本における気象用ドップラーレーダーは1965年に気象研究所で製作された。これはアンテナが鉛直方向に固定された 3 cm 波の小型レーダーで、用途が降水粒子の鉛直速度の測定に限られていた（青柳、1967）。

その後、気象研究所の研究学園都市移転に伴い、1980年に3次元走査のできる 5.7 cm 波の大型レーダーが完成した。降水粒子の動径速度を即時的に PPI 表示できるなど、優れた機能を備えている（内藤、1980）。

#### 4.4. レーダーエコーデジタル化装置

地形エコー除去が可能になったので、降水エコーのみ

をデジタル化してコンピュータに入力し、利用しやすい形に処理する計画が具体化されることになった。気象庁はまず名古屋と福井のレーダーにレーダーエコーデジタル化装置を取付け、1982年からデジタルエコーを気象庁に集信してコンピュータ処理を行うことにしている。処理されたエコーはファクシミリで各予報官署や部外利用者に送信される。このあと年次計画で他の気象レーダーにも順次この装置を取付けることが計画されている（下島、1981）。

レーダーエコーデジタル化装置の機能の概要は、気象庁観測部によれば次のとおりである。

##### (1) 地形エコー除去

##### (2) エコー強度のデジタル化

約 1°, 2°, 3° の 3 つのアンテナ仰角によるエコーパターンを合成して、近似的な CAPPI エコーパターンを作成し、これを 5 km メッシュごとに 10 段階の強度レベルでデジタル化する。このような操作は約 7.5 分間隔に行われる。

##### (3) 1 時間積算降水強度の計算

上記のデジタルエコーを 1 時間ごとにまとめて積算する。これは雨量計による毎時雨量に対応させうる量で、単位も mm/hr で計算される。この積算結果は 5 km メッシュごとに 64 レベルでデジタル化される。

##### (4) エコー頂高度のデジタル化

毎正時にはアンテナ仰角を 10 段階に変化させた観測が行われ、その結果を使って 5 km メッシュごとのエコー頂高度が計算される。この計算値は 2 km 間隔でデジタル化される。

##### (5) 気象庁への送信

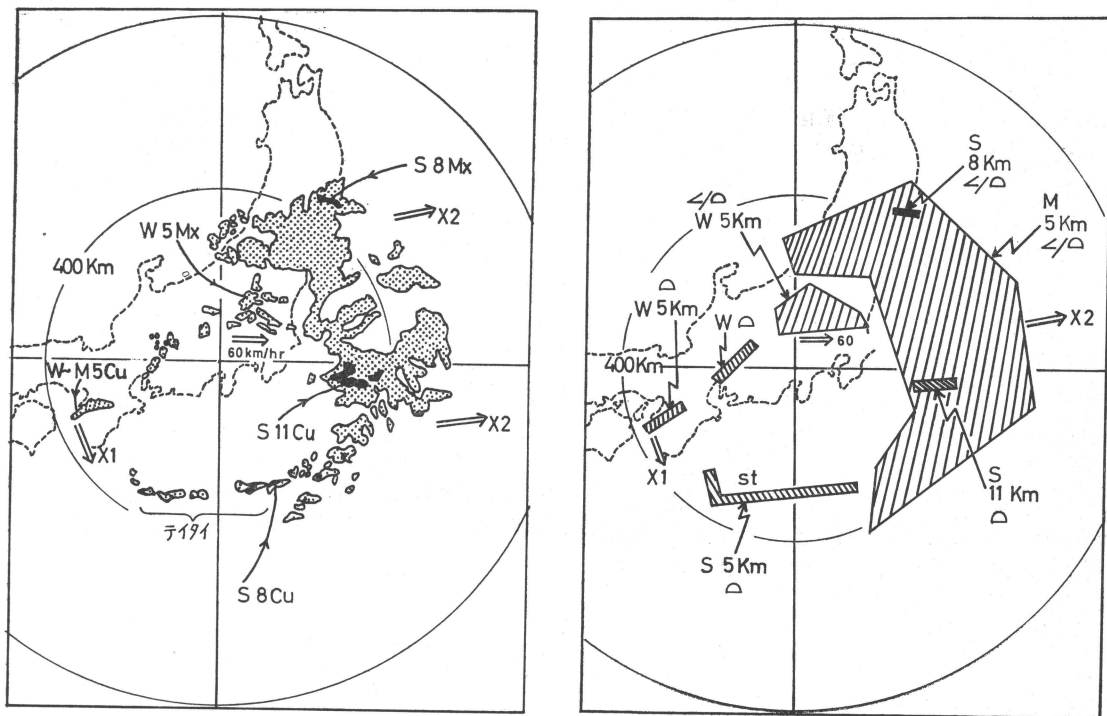
毎正時の数分後、正時のエコー強度とエコー頂高度、および過去 1 時間の積算降水強度のデジタルデータが気象庁のコンピュータへ送信される。

##### (6) 監視用ディスプレイへの送信

約 7.5 分間隔のエコー強度データは、直ちにレーダーの所属する地方予報中核の予報現業へ送られ、監視用ディスプレイに表示される。この場合は 2.5 km メッシュでデジタル化されたより細かいデジタルエコーになっておりエコー強度はカラーで表示される。気象庁へは 1 時間ごとにしか送信しないので、その間の細かいエコーの変動はこのディスプレイで監視される。

##### (7) 部外利用者への分岐

レーダーエコーはまず予報業務に使われるものであるが、利用者によってはエコーの現況そのものを即時的に



(a)

(b)

第9図 レーダーエコー図 (1969年10月1日15時, 富士山レーダー). (a) レーダースケッチ図 (スケッチ図の黒く塗った部分は等エコー装置により 4 mm/hr 以上と推定されるエコー域). (b) レーダー通報式の再現図.

受取れば十分有効な場合もある。このため、監視用ディスプレイに送られるものと同じエコー画像を特定利用者に送り出せる能力を持たせてある。また普通のダイヤル電話からもエコー画像を呼び出せるシステムも付加できるようになっている。米国では10年以上も前からこのようなシステムを運用している。日本でこのようなレーダー画像の部外分岐が遅れたのは、大量の地形エコーが混在するために専門外の人には解りにくかったということが大きな理由であろう。

#### 4.5. レーダー情報伝送網の整備

気象庁の各レーダーにレーダーエコーデジタル化装置が付加されれば、レーダーエコーの伝送は4.4節のような形で行われることになる。しかし現状では気象庁のレーダーのエコー伝送はファクシミリを利用した「レーダー情報伝送網」によっている。

気象庁の現業用レーダーが設置された当初の1957年～1962年までは、エコーの状況を各気象官署に通報するの

に米軍の英語平文形式の通報式を借用していた。このあと数字符号式が制定された。しかし通報式の内容を再現したものは第9図のように基だ不完全なもので、改善が要望されていた。これに対応して、1964年～1966年にかけて「レーダーエコー伝送委員会」が設けられ、技術的業務的な検討が加えられた。

この委員会の主要な結論は、少なくともレーダーの所属する地方予報中樞には生のエコーに近いものを送画すべきだということであった。

この結論を参考にして、レーダー情報伝送網の整備が開始され、まず1970年に東京、富士山、名古屋の各レーダーの画像伝送が開始された。その後、1975年までの間に、気象庁のすべての現業レーダー (20台) が画像伝送を行うようになり現在に至っている (浅田, 1975)。

レーダー情報伝送網で送画されるものは第9図 (a) のようなスケッチ図である。これはレーダー観測者が地形エコーの混在する PPI 画面から降水エコーのみを識

別して透明地図の上にスケッチしたもので、地形エコー除去技術が開発されるまでは最も利用しやすいエコー画像であった。

画像の送り先について、静岡地方気象台などは東京レーダーと名古屋レーダーを受けることになっており、また長野地方気象台のように3箇所のレーダー画像を受信する所もある。

レーダー情報伝送網によって送られてきたエコー画像は各府県予報区担当官署が発表する注意報警報の改善には特に大きく寄与した。

なおここで、レーダー観測の体制についても一寸ふれておきたい。当初のレーダー観測は2~4名程度の定員で運用され、十分な監視は無理であった。レーダー観測を必要とする降水現象は突発的なものも多く、オールワッチ体制の確立が要望されてきた。その後、関係者の努力によって次第に定員増が実現し、1974年度には気象庁のすべての現業レーダーがオールワッチ体制に入ることができた。

#### あとがき

気象レーダーの効用は気象庁以外でも各方面で認められ、今では建設省がダム管理用に3台(赤城山,三つ峠,深山)、防衛庁が航空基地の予報用に美保基地ほか12台、東京電力や関西電力の雷雨探知レーダーなどが活躍している。また研究調査用にも、名古屋大学(武田他,1980)、群馬大学、防災センターなどが利用している。これらについては本稿ではふれることはできなかったが、基本的には気象庁のレーダーと変りがないものと考えている。

またレーダーの中でも、マイクロ波を使用して降水粒子を探知するものに話を限ったが、これ以外のレーダーについて述べることは筆者の力の及ばない所である。

#### 文 献

- 青柳二郎, 1967: ドップラー・レーダ, 気象研究ノート, 90, 153-174.  
 浅田暢彦, 1975: ある過程. 気象百年史(資料編), 258-261.  
 小平信彦, 1972: 気象レーダーの基礎, 気象研究ノート, 112, 247-302.  
 内藤恵吉, 1980: 気象研究所の新レーダーシステム, 気象研究ノート, 139, 350-356.  
 下島省吾, 1981: レーダーエコーデジタル化の計画について, 測候時報, 48, 1-15.  
 志崎大策, 1980: 空港用じょう乱探知レーダ, 気象研究ノート, 139, 340-345.  
 武田喬男, 岩坂泰信, 1980: 名古屋大学水圏科学研

究所のレーダーシステム, 気象研究ノート, 139, 345-350.

立平良三, 1974: 富士山レーダー, 気象研究ノート, 118, 75-87.

立平良三, 清水紀雄, 小佐野慎悟, 1976: 地形エコーと重畳した降水エコーの強度測定(地形エコー除去の方法), 研究時報, 28, 313-316.

立平良三, 1980: レーダーエコーの位相の利用(地形エコーの除去など), 天気, 27, 837-842.

吉武素二, 藤原寛人, 下島省吾, 西山 宏, 1960: 富士山頂気象用レーダーの設置計画, 測候時報, 27, 283-293.

### 5. 海上気象観測

来海 徹一

#### 5.1. まえがき

海上気象観測は、古くから目視観測を主として行われ、次第に測器が導入された。海上気象観測は陸上と基本的に変わらないものと、陸上にはないものがある。前者に用いる測器の母体は陸上用であるが、海上では測器を設置するプラットフォームが固定していないことが相違している。すなわち、船舶はピッチング、ローリング、ヨーイング、上下振動など絶えず動いている。航行中の船舶は絶えずその位置を変えており、漂泊中の船舶も海流、風のために流されている。さらに、強風、高波による振動、衝撃、高湿などのきびしい環境条件のもとで、しぶき、排気、煙、船体放射、船体構造物による気流の乱れ、機関の振動、測器設置場所とスペースの制約、腐蝕と錆の発生などの問題がある。

#### 5.2. 気 圧

船舶用水銀気圧計と船舶用アネロイド型指示気圧計とがある。船舶用水銀気圧計は、船の振動、急激な動揺などに耐え得る構造になっている。反面、感度は鈍く、読み取り、保守に熟練が必要なことなどから、利用率は低い。

アネロイド型指示気圧計は、陸上用が原型であって、振動、動揺による補正值の変化、温度影響が大、腐蝕などのため精度が低かった。しかし、昭和30年代に入ってから、耐振性に優れ、温度影響も少い精密級と称せられるものが製作され始めた。この結果、船舶での気圧観測の精度は次第に向上した(寺田, 1962)。

海面気圧=(気圧計の示度)+(示度に対する器差補正值)+(海面更生値)

海面更生値は、同じ船でも積荷の状態で変る。

#### 5.3. 気温と露点温度

観測船では、船体影響が少なく風通しの良い場所に、

第4表 一般商船の百葉箱，温度計，湿度計の使用状況（昭和54年1月1日現在）。

(1) 温度計の使用状況

種類	百葉箱		アスマン通風式	振り回し式	計
	強制通風	自然通風			
隻数	0	487	0	0	487
%	0	100	0	0	100

(2) 温度計

種類	水銀温度計	アルコール温度計	電気抵抗温度計	計
隻数	121	361	5	487
%	25	74	1	100

(3) 湿度計

種類	乾湿度球計	毛髪湿度計	計
隻数	487	0	487
%	100	0	100

陸上と同じく百葉箱を設置し，その中の乾湿度球温度計を用いて観測した。乾湿度球温度計は通風装置付きとなり，近年では隔測温湿度計が導入されて百葉箱は姿を消した。隔測温湿度計は，しぶきの防止対策が必要であり，両舷の適当な場所に設置し，風上側のものを使用することが望ましい。片舷で風下側の場合あるいは弱風時で甲板などが熱せられて影響がある場合は，アスマン通風乾湿度計を風上側の日陰，またはできるだけ船外に突き出して観測する。

一般船舶では，小型百葉箱を船体の壁に取り付けたり，移動したりした。百葉箱が利用できない場合は，棒状温度計を糸で釣りを，日陰で身体を風下に置いて観測した。

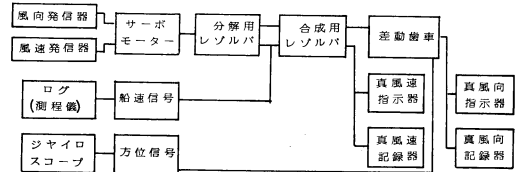
現在では一般商船の場合には，自然通風の百葉箱の中で，アルコール温度計，水銀温度計によって観測されていることが多く，電気抵抗温度計を使用する船舶も出はじめている（第4表）。

5.4. 風

目視観測では風浪の寄せて来る方向を風向とする。又，海面状態を観測し，ビューフォート風力階級表にあてはめて風力を求める。現在では，船舶気象観測指針（1975）の風力階級表を用い，風浪階級の写真も参照す

第5表 一般商船の風速計の使用状況（昭和54年1月1日現在）。

種類	風車型風速計	風程型風速計	手持式風速計	測器なし	計
隻数	475	13	25	1	514
%	92	3	5	0	100



第10図 真風向風速計の構成図

る。

5.4.1. 風向・風速計

目視観測は夜間ほとんど不可能であるし，又風速がある程度以上強くなると，波の状態にはそれほど著しい変化が現われなくなる。したがって風速計の導入は観測精度を著しく向上させた。

一方，風向計は構造上その真下に風向方位盤を設置する必要があり，設置場所に制約があった。

その後風車型風向風速計が導入され，船体影響の小さい場所を選んで設置できるようになった。気象庁の観測船では，昭和27年（1952）に北方定点の志賀丸が設置したのが始めてである。一般商船では第5表のとおり，風車型及び風杯型風速計，主に小型船舶で用いられる手持式風速計が使われている。

5.4.2. 真風向風速

航行中の船舶の測器は，真の風と船の運動によって生ずる風とで合成された見かけ上の風を示す。したがって真の風は，この見かけ上の風から船の運動によって生ずる風をベクトル減算して求める。船舶の運動の方向は船首の方向から，又速度はログ（測程儀）あるいは機関の回転数などから求める。

5.4.3. 真風向風速計

気象庁の観測船凌風丸が昭和42年（1967）に取付けた装置を第10図に示す。風向風速計の観測値から，ログからの船速及びジャイロスコープからの方位を，レゾルバなどを利用して差引く。船の位置の測定精度が向上し，船の運動方向，速度が容易に求まるようになれば，より小型で簡易化されるであろう。

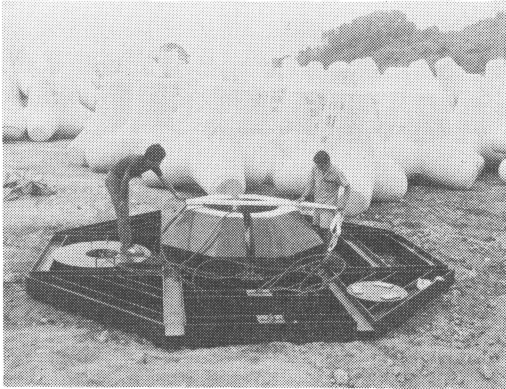
5.4.4. 風速計の高さ

一般商船が大型化するにつれて，風速計の設置高度は

第6表 一般商船の風速計の高さ\*(昭和54年1月1日現在)。

高さ(m)	5~9	10~14	15~19	20~24	25~29	30~34	35~39	40~44	45~49	50~54	55以上	計
隻数	1	3	14	51	95	124	119	62	15	2	0	486
%	0	1	3	10	20	26	24	13	3	0	0	100

\* 平均吃水線からの高さ。



第11図 超音波波浪計の送受波器の外観と架台(直径約5m)。

高くなり、現在では50mを越すものもある(第6表)。このように設置高度に差があるので、風速値は基準高度(例えば10m)に更生する必要がある。しかし、基準高度、更生方法に論議があって、まだ国際的な統一はされていない。

### 5.5. 降水量

船の動揺、振動のため転倒ます型は不適で、貯水型、電接型などが用いられている。例えば気象庁の観測船啓風丸では、0.5mmごとに排水する電接式雨量計をマストの上部に取付け、自記部を船内に設置しており、比較観測もされている(鶴岡, 1974)。

一般に船舶上での雨の捕捉率は小さい。ことに荒天時には小さく、又船体構造物によるはね返り、しぶきの混入などがある。

### 5.6. 波浪

波浪の観測は沿岸と外洋の船舶とで行われて来た。しかし、いずれも適当な測器がないために、目視観測の歴史が長い。

#### 5.6.1. 沿岸における波浪観測

測器による観測が定期的に行われ、データのリアルタイム利用が可能になったのは、昭和30年代になってからである。

中央気象台海洋課は、昭和19年(1944)に伊豆白浜で、架台の中心から突出した目盛柱を読取って、波高と周期を観測した(渡辺, 1949-1950)。観測者が読み取る代わりに、電気的に記録させる階段型抵抗波浪計、電気抵抗の代わりに静電容量を用いる方式も開発された。

富山測候所は昭和25年(1950)に、富山湾でスタスコープを用いて波形を記録し、波のエネルギーも調べた(富山測候所, 1949-1950)。その後、波浪による水圧変動を測定し、波形を求める圧力式波浪計としてMR-Mark III 波浪計が開発された(Furuhata, 1962)。受圧装置を海底に設置し、水圧変化を差動トランスで交流信号として取り出し、ケーブルで陸上に導いて記録させる。この水圧変化を、波高は大きくないと仮定し、周期を考慮して海面波形に換算する。

港湾関係では、運輸省港湾技術研究所を中心に超音波波浪計の開発が進められ、昭和40年代に入って実用の域に達した(高橋その他, 1973)。

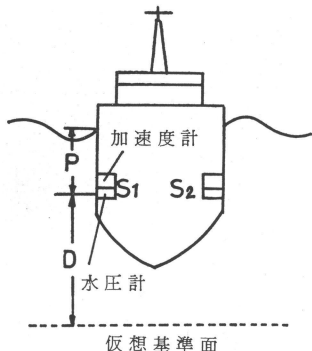
現在気象庁で展開している沿岸波浪計は、深さ約50mの海底に超音波送受信器(第11図)を設置し、観測データは海底ケーブルを経て海岸の観測局舎に入り、変換されたうえ有線で気象官署に送られる。気象官署ではミニ・コンピュータでデータ処理し、波高、周期などを気象専用線を用いて伝送する(山下・増田, 1980)。

#### 5.6.2. 海上における波浪観測

神戸海洋気象台の観測船春風丸は、昭和13年(1938)大阪湾においてフルード波浪計(中空の目盛柱の下に重りと安定板を吊り下げた“うき”方式)を用いて観測した(日高他, 1938)。その後、1952年にイギリス国立海洋研究所のTuckerにより船舶用波浪計が発明された(気象百年史, 1975)。

Tucker式波浪計(第12図)は、 $S_1(S_2)$ にパイプで海水を導き、水圧計と加速度計で同時に水圧と鉛直加速度を測定する。水圧により海面から $S_1(S_2)$ までの距離 $P$ が分り、鉛直加速度を2度積分することにより、仮想基準面からの距離 $D$ が求まる。 $P+D$ の変化は海面の変化を示す。





第12図 船舶用 Tucker 式波浪計。



第13図 霧観測装置の霧濃度計。

S を海面近くに設置すれば、Pは無視できるから加速度計のみで良い。海洋ブイロボット（後述）の波浪計はこの方式である。

PMS 式波浪計 (Pressure Minature Type Semiconductor Wave Recorder) は、センサー（半導体を用い、ピエゾ抵抗効果を利用）をブイから海中（約 70m）に吊り下げ、ブイと共に漂流させながら、波浪を静水圧の変化として観測し、船に無線送信する。ブイの放流、回収は荒天時には不適なので、観測終了後に自動的に沈む小型投げ棄て方式が開発されている。

5.6.3. 波向計

目視観測には目盛板、トランシットなどが用いられる。海底にセンサーを置き水の粒子の運動から求める方式、海象レーダーを用い波峰線の分布から求める方式、ブイを用い波の方向スペクトルを測定して求める方式などがある。

5.7. 海面水温

5.7.1. 採水バケツによる方式

海水を汲み上げ、その中に温度計を入れて読み取る。

5.7.2. インテイク方式

機関の冷却水の取り入れ口に温度計を設置する方式で、採水バケツによる方式よりも安全である。

5.7.3. 隔測方式

船底や冷却水の取り入れ口にセンサー（白金あるいはサーミスターを用いる）を取付け、指示部を船内に置く。

5.8. その他の観測

海上気象のみの観測項目として海水、船体着氷がある。

5.8.1. 海水

明治以来の長い歴史がある。形状、種別、水量、漂流状況、分布状況を観測する。沿岸、船舶のほか、現在では北海道大学流水レーダー、自衛隊などの航空機観測があり、また静止・軌道衛星による画像解析がある。

5.8.2. 船体着氷

着氷の状態、種類、着氷速度、厚さなどを観測する。

5.9. 狭水道および内湾の霧

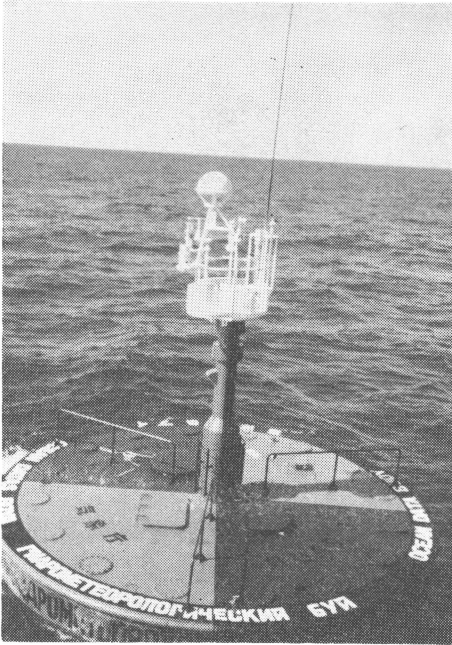
気象庁は霧観測装置を昭和47年（1972）から瀬戸内海と東京湾に展開した。投受光器を1つにした反射型霧濃度計（第13図）で、投光部より大気中に光ビームを投射する。ビームの通る大気中に霧などの微小浮遊物があると、ビーム光は吸収、散乱される。散乱光のうち、後方散乱光を受光して光度変換し、受光量に比例した直流電圧を得る。微小浮遊物の濃度と後方散乱光とは相関関係にあるので、後方散乱光の受光量から霧濃度が求まる（藤野，1980）。

5.10. 海洋ブイロボット

海洋ブイロボットは一地点に錨で係留するものと、係留せずに海流などで漂流するものがある。係留ブイロボットは、台風などの荒天時にも、観測船と違って避難しないので、連続的にデータを取得できる利点がある。しかし、強風、高い波浪に耐え、転倒や流出しない構造が要求される。また長期間、無保守で必要精度を維持できる測器と安定したデータ伝送装置が必要である。精度維持のために、ある一定期間運用すると、一時撤収して点検修理が必要であり、製作、運用には多くの経費と労苦を伴う。現在、世界の海で約50個が活躍している。

5.10.1. 開発から運用まで

昭和43年（1968）、気象庁、海上保安庁、船舶技術研



第14図 海洋パイロロボット。南方海上で観測中の気象庁海洋パイロロボット（円盤の直径約 10 m）。高さ約 5 m のマスト上に各種測器，コンパス，標識燈，HF 通信用ホイップアンテナ（右側），UHF 通信用アンテナの半球カバー（左側）がある。

究所，電波研究所などが各分野を担当して 1 号機を試作した。昭和44～46年の試験運用のあと，実用機として 3 号機が昭和48年（1973）四国南方約 400 km（深さ4,200 m）に係留され，観測通報を開始した。

#### 5.10.2. 観測と通報

パイロロボット（第14図）は，3時間ごとに観測し，データを短波で送信する。気象衛星センター情報伝送部（東京都清瀬市）で受信し，自動的に点検，計算し国際気象通報式のコードに組み，通信回線によって国内，国外に伝送する。観測状況（第7表）の詳細は，例えばパイロロボット観測資料（気象庁，1977）に，またパイロロボットと気象観測船とのデータの比較は河野（1975）が報告している。

静止気象衛星“ひまわり”を経由する超短波通信方式が昭和54年（1979）から付加され，有効である。

#### 5.10.3. 漂流パイロロボット

漂流パイロロボットは海流や風に流されて観測場所を移動するが，係留パイロロボットに比べて小型で製作費は安

第7表 海洋パイロロボットの観測要素と測定範囲。

観測要素	測定範囲
風向	0～360°
風速	0～120 kts
気温	-10～40°C
湿球温度	-10～40°C
気圧	920～1,040 mb
海面水温	-10～40°C
水温（20m）	-10～40°C
水温（50m）	-10～40°C
波高	0～20 m
波周期	0～20 sec
日射	0～2 cal/cm <sup>2</sup> min
方位	0～360°
流向	0～360°
流速	0～10 kts
電気伝導度	3.5～5×10 <sup>-2</sup> /Ωcm
傾斜	0～45°

い。しかし位置が変わるので，多数を適当な間隔に分布させる必要がある。FGGE では南半球の海上に200個以上の漂流ブイが投下された（新田・田巻，1979）。

#### 5.11. 将来展望

海上気象観測の重要なデータ源となっている一般船舶では，通信士の減少などから特に夜間の通報減少の傾向がある。この対策の1つとして観測，通報の自動化がある。この自動化は技術的には可能な部門もあり，今後のデータの入手の安定化と精度の向上が期待される。

広大な海では，観測船，一般船舶，パイロロボットによる観測網の展開には限度がある。軌道・静止衛星による面のリモート・センシングに期待するところが甚だ大きい。この場合観測船などによる直接観測は，シートルースとしての重要な任務を負うことになる。

終りに，資料および写真の収集，選択などについて，気象庁海洋課および関根補佐官はじめ海上気象課のかたがたのご協力を得た。厚く感謝する。

#### 文 献

Furuhata, T., 1962: New electric-ocean wave recorder, MR-Mark III, for the coastal wave stations, 日本海洋学会誌, 18, 130-140.

藤野六郎, 1980: 沿岸防災業務（その4）—狭水道及び内湾における霧観測装置による観測業務について—, 測候時報, 47, 207-211.

日高孝次・安井善一・篠田政吉, 1938: 海の波の研

究(4), 海と空, 18, 165-171.  
 河野幸男, 1975: プロロボット(第3号)観測値の吟味, 測候時報, 42, 278-285.  
 気象庁, 1975: 船舶気象観測指針, 12-20.  
 ———, 1975: 気象百年史, 694.  
 ———, 1977: 海洋気象プロロボット観測資料, 第1号.  
 新田 尚・田巻 健, 1979: FGGE 観測網とデータ処理の現状(中間報告), 天気, 26, 413-417.  
 高橋智晴・佐々木弘・菅原一晃・鈴木禧実, 1973: 超音波式波高計について, 運輸省港湾技術研究所報告, 12, 59-82.

寺田一彦, 1962: 応用気象学講座5, 海上気象学(上), 地人書館, 10.  
 富山測候所, 1951-1952: 波形の観測及び波のエネルギーの測定, 中央気象台海洋報告, 2, 95-102.  
 鶴岡保明, 1974: 啓風丸船上の降雨について, 気象庁技術報告, 86, 431-443.  
 山下 旭・増田良一, 1980: 沿岸防災業務(その3)—沿岸波浪計による観測業務一, 測候時報, 47, 107-114.  
 渡辺信雄, 1949-1950: 伊豆白浜に於ける波浪観測報告, 中央気象台海洋報告, 1, 3-13.

気象学会および関連学会行事予定

行 事 名	開 催 年 月 日	主 催 団 体 等	場 所
第2回水資源に関するシンポジウム	昭和57年8月3日～5日	空気調和・衛生工学会ほか	科学技術館(東京)
International conference on the physics, chemistry, and meteorology of precipitation scavenging, dry deposition, and resuspension	1982年11月29日～12月3日	American Meteorological Society et al.	Los Angeles
日本気象学会創立100周年記念式典	昭和57年5月25日	日本気象学会	日本教育会館
昭和57年日本気象学会春季大会	昭和57年5月26日～28日	日本気象学会	日本教育会館
第19回理工学における同位元素研究発表会	昭和57年7月5日～7日		国立教育会館