



# 窓

## オメガ高層風観測システムの予備実験\*

浅井 富雄\*\* 石川 浩治\*\* 三沢 信彦\*\*  
 名越 利幸\*\* 青柳 二郎\*\*\* 吉留 英二\*\*\*  
 飯田 睦治郎\*\*\*

### 1. はじめに

オメガ航法援助システムを利用した高層風観測システムは、1965年に米国の Beukers 気象測器会社によって提案されて以来、米国の NASA, NCAR, Cambridge Engineering, フィンランドの Vaisälä 測器会社、日本の気象研究所などで研究開発されてきた。WMO は、第 1 回 GARP 全地球実験 (FGGE) における熱帯高層風観測システム (TWOS) の充実策の一つとしてオメガ高層風観測装置を取り入れ、現在15ヶ国がこれを採用している。

FGGE 期間中、GARP 副計画の一つであるモンスーン実験 (MONEX) の夏期強化観測に参加する東大海洋研究所研究船「白鳳丸」が、その観測期間中、熱帯高層風観測システムにも寄与することの重要性を認め、1976 年 MONEX 小委員会はオメガ技術検討小委員会を設けて検討の結果、気象研究所が開発し AMTEX で使用したオメガ高層風観測システムに改良を加え、新しい装置を白鳳丸に設置する方針を採択した。1978年、MONEX の一部としてオメガ高層風観測装置の予算が認められ、上記方針に基づき準備された。以下に、その装置およびシステムの概要と野外試験結果について報告する。

### 2. オメガ航法援助システム

オメガ航法援助システムは、超長波 (10 KHz 帯) の電波を使った位置測定システムで、船舶等の位置測定を目的として計画された。オメガ電波の送信局は、第 1 図と第 1 表に示されるように世界中に 8 局配置されており、このうちの 7 局は既に稼動しているが、オーストラ

リア局は1979年現在まだ開局していない (1980年開局予定)。

オメガシステムに使われている超長波の電波は、電離層伝搬で減衰が少なく位相も安定なため世界的規模の航法システムに最適であり、絶対位置の測定精度は 1 海里程度に達する。オメガ電波は、8 局が約 1 秒間ごとに切り換えながら10秒の周期で繰り返し発射されている。航法用に用いられているのは 10.2 KHz であるが、一波長分によって測定できる距離は約 15km に過ぎない。したがって、この識別距離を拡げる (約 530 km) ためにさらに 3 ヶの周波数、すなわち、11.05, 11.33 および 13.6 KHz のオメガ電波が発射されているので、高層風観測システムには距離分解能の最も高い 13.6 KHz が採用されている。

オメガシステムで位置を測定するには 3 局以上の電波を使い、二つ以上の電波の位相差を測定する必要がある。位相差、すなわち、送・受信局間の距離差が一定な位置線 (LOP: Line of Position) は双曲線を描くので、二つの位相差を測れば 2 本の双曲線の交点として受信点の位置が求まる。この方法は、一般に双曲線航法と言われているものである。時間的にずれのある信号の位相差を直接出すのは技術的に困難なので、実際には受信器の局部発振器を基に各局の位相を求め、その差で位相差を計算している。オメガ位相信号は空電のような大気雑音の影響を受け易く、しかもこの場合測定時間が約 1 秒間と決められているので、装置によりさまざまな位相測定方式が工夫されている。

オメガ高層風観測方式は、風に流されて動く浮遊ゾンデで受信したオメガ電波を地上局 (船舶) 側に転送すれば良いので、通常現業観測で用いられているレーダ方式で浮遊ゾンデを追跡するのに比べて、地上アンテナおよ

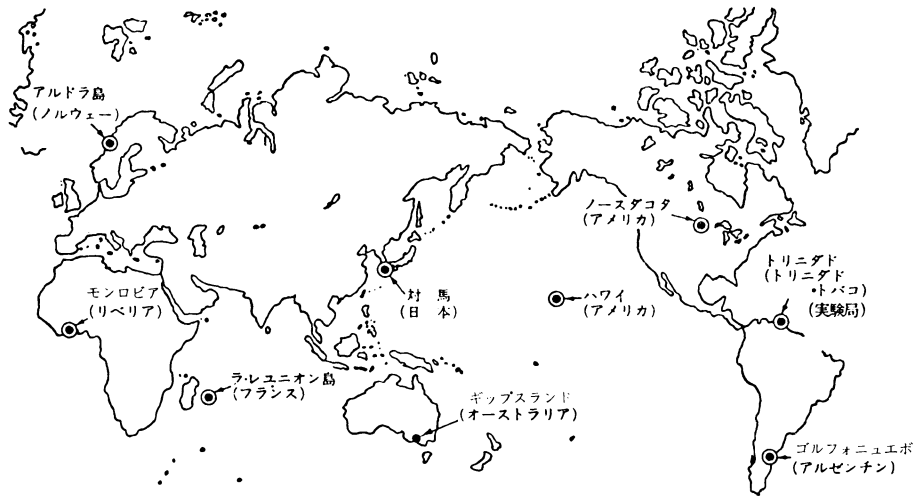
\* Field Test of Omega Wind Finding System in Japan.

\*\* T. Asai, K. Ishikawa, N. Misawa, T. Nagoshi, 東京大学海洋研究所.

\*\*\* J. Aoyagi, E. Yoshitome, M. Iida, 気象研究所.

第1表 オメガ送信局の緯度・経度

局別呼称 (13.6 KHz)	局名	緯度	経度
A	対馬 (日本)	34°36'53.26''N	129°27'12.49''E
B	アルドラ (ノルウェー)	66°25'15''N	13°09'10''E
C	モンロビア (リベリア)	6°18'19.39''N	10°39'44.21''W
D	ハワイ (アメリカ)	21°24'16.90''N	157°49'52.70''W
E	ノースダコタ (アメリカ)	46°21'57.20''N	98°20'08.77''W
F	ラ・レユニオン (フランス)	20°58'26.47''S	55°17'24.25''E
G	ゴルフオニューエボ (アルゼンチン)	43°03'12.53''S	65°11'27.69''W
H	ギップスランド (オーストラリア)	1980年開局予定	



注) ●は運用中を示す。なお、オーストラリア局が完成すれば、トリニダド局は廃局される予定

第1図 オメガ電波送信局の配置

び追尾施設を非常に簡略化できる特徴がある。また、オメガ方式ではゾンデの水平位置は双曲線航法により求め、高度は同じゾンデで測定している、気圧、気温および湿度から求めている。

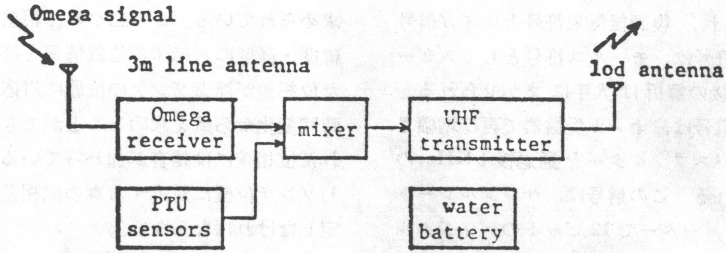
3. オメガ高層風観測装置

測風システムは、気球で飛揚されるオメガゾンデ部と地上処理部の二つの部分から構成されている。

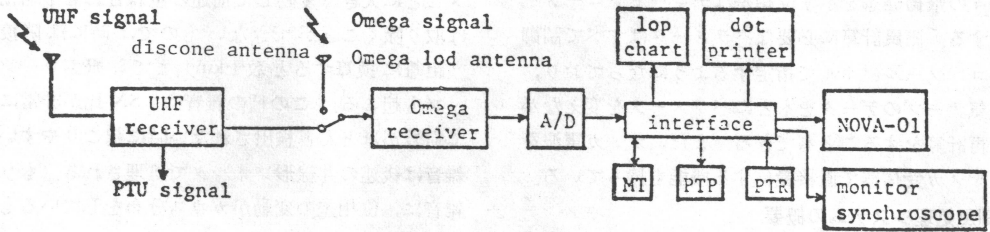
オメガゾンデ部は、第2図に示されるように、オメガ受信器、気象センサー、ミキサ、UHF受信器と注水電池から成っており、これらを800gの気球で飛揚させる。3mの線状アンテナで受信した13.6KHzのオメガ電波

を増幅器で60dB増幅し帯域幅500Hzのバンドパスフィルターに通す。これと、気象センサーから送られてくる400Hzのモールス符合を混合、周波数変調後UHF波(404.5MHz)で地上に送信する。気象センサーには、現業で用いているRSⅡ型の計器を使っている。UHF送信器の発振電力は0.5W、アンテナは1/4波長ロッドアンテナである。

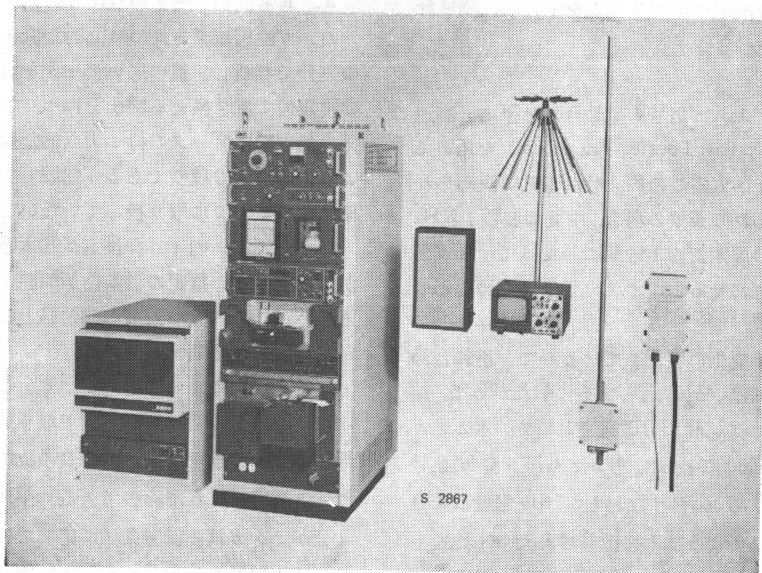
地上処理部は、UHF受信器、オメガ受信器、A-Dコンバーター、小型電子計算機(記憶容量16K語)、磁気テープ集録装置、紙テープ読取器、紙テープパンチャーおよび各種記録計とこれらを統括する制御装置で構成さ



第2図 オメガゾンデ部のブロックダイアグラム.



第3図 地上処理部のブロックダイアグラム.



第4図 地上処理部の概観.

れる(第3, 4図). ゾンデから送られてきた電波は, UHF受信器で受信され, 復調後気象符号とオメガ信号に分離される. 気象符号は, モールス符号としてスピーカから出され, 以後の解析は人手にまかせられる. 13.6 KHzのオメガ信号は, オメガ受信器で再び増幅され500 Hzのバンドパスフィルターを通過後1 KHzの中間周波数に変換される. この信号は, サンプルレート8 KHzのA-Dコンバーターで12ビットのデジタル量に変換されて計算機に入力される. 計算機では, 後述するように入力信号の位相検出, 位相差の計算, 測風計算などを行ない, 1分毎の風データはデジタルプリンターに, 8局全部の位相, 受信強度データは紙・磁気テープに, 刻々の飛揚経過を示す位相差はチャートレコーダーに出力する. 測風計算に必要なパラメータはすべて制御装置のコンソールパネルで指定するようになっており, 紙・磁気テープのデータをもとにパラメータを変えながら風の再計算をすることもできる. また, オメガ電波を地上のオメガ受信器で直接受信する機能も持っている.

#### 4. 測風処理システムの概要

われわれのシステムでは, 測風に必要な処理の大部分を計算器で行なっている. すなわち, 波形の位相測定, 位相差の推定, 測風計算, 各種データの入出力がそれである. ここでは, 測風システムを最も特徴づけている位相の測定と位相差の推定アルゴリズムを中心に, 測風計算の方法を簡単に述べる.

##### 4.1 位相の測定

位相の測定には, オメガ信号の重ね合わせ平均と高速フーリエ変換(FFT: Fast Fourier Transform)を用いている. すなわち, オメガ電波の周波数は正確に決められているので, われわれの装置の場合, 中間周波数1 KHzまたはその整数倍の周期で約1秒間にわたってオメガ信号を順次 $M$ 回重ね合わせると, オメガ信号は重ね合わせ回数 $M$ だけその振幅が増加する. 一方, 同時に存在している雑音の振幅は不規則に変化しているので, 重ね合わせをしたあとの振幅は $\sqrt{M}$ にとどまる. したがって, 結果的に信号対雑音比は $\sqrt{M}$ だけ改善されるが, 本オメガシステムでは $M=500$ にとってあるため, オメガ信号対雑音比(SN比)は $\sqrt{500}$ 倍すなわち27 dB程度改善されたことになる. このようにして改善されたSN比をもつオメガ信号から, FFTにより局部発振器の位相に対するオメガ8局各々の位相を求めている.

##### 4.2 位相差の推定

7局(オーストラリア局は1980年開局)のオメガ電波

の位相のうちから, 指定された2組の2局間の位相差が求められている. この二つの位相差データは, 地球上の緯度・経度に対応する位置情報を持っており, 観測された位相差が浮遊ゾンデの位置に対応する値であればその時間変化から風を求めることができる. しかし, 観測された位相差には雑音を加わっているため, これらを除きゾンデ位置に対応する真の位相差をその観測値から推定しなければならない.

このシステムでは, 位相差の観測値に対して2種類の処理を行ない, 真の位相差を推定している. これは, 2種類の性質の違う雑音を位相差データから除去するためである. 雑音のうちの一つは, 位相差が10秒間隔のデータごとに大きく変動して前述の重ね合わせ平均化だけでは取り除くことができないもので, 時には隣接レーン(距離に換算すると数十km)までも飛ぶレーン・スリップも起こる. この種の雑音は, SN比が非常に小さくて信号がほとんど検出されない時に起こりやすい. この雑音は後述の非線形フィルタで処理される. もう一つの雑音は, 位相差の変動がガウス分布をしているもので, 受信状態が良い時に通常見出される雑音である. この雑音には, 単純移動平均による平滑化が有効である. 現在のシステムでは, 観測した異常位相差データをまず取り除き, その後で単純移動平均による平滑化を行なう.

##### a. 異常位相データの検出

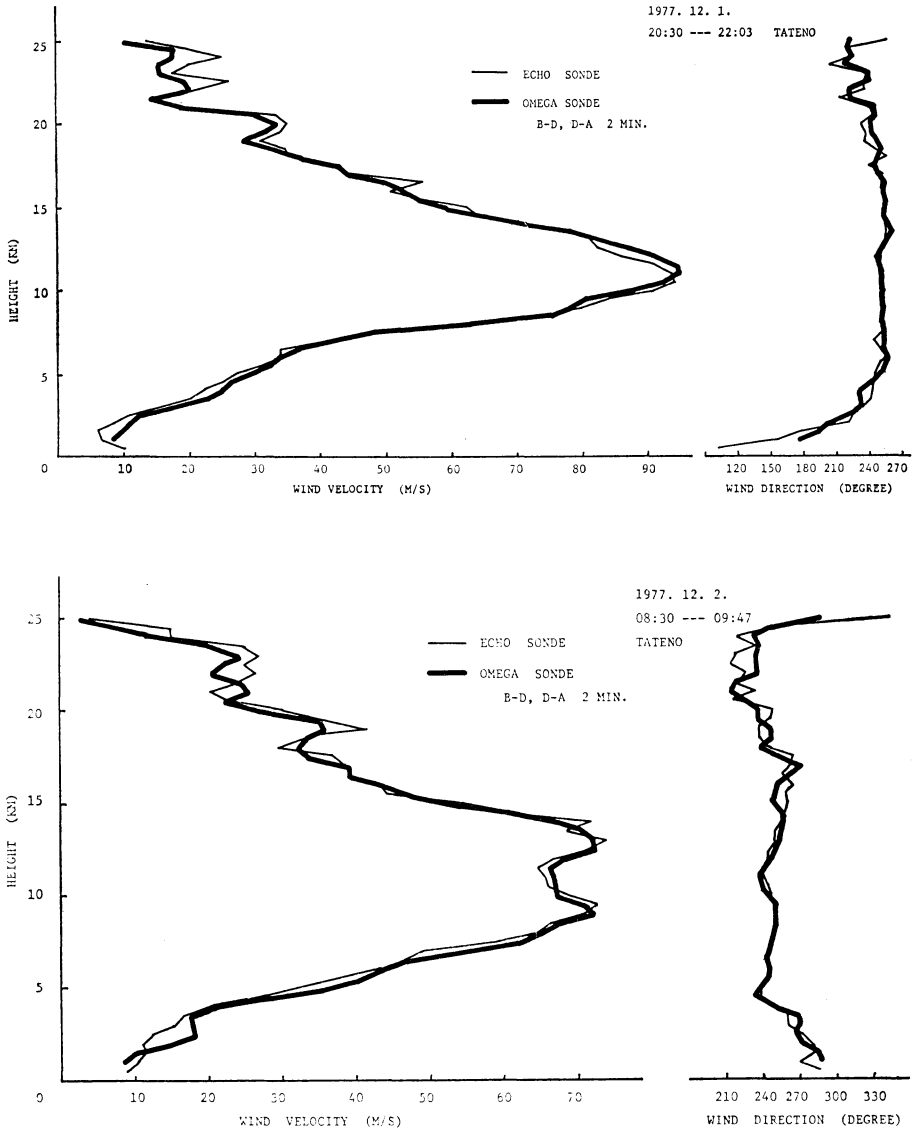
オメガ位相差データの時間的な変化過程を1次, 2次の差分で判断し, 質の悪いデータを質の良いデータからの推定値で置き換える機能を持つ. この, 内挿, 置き換えの処理ではデータの持つ大局的な傾向を見失なわないよう, データの塊りである「領域」を処理単位とし, 1個ずつのデータは取り扱っていないことが特徴である.

この処理は, 内・外挿推定が基本となるので異常領域が大きくなると推定の信頼性が問題となるため, 現在のところ, 10分間分に当たる60個以上のデータから成る異常領域は欠測区間としている.

##### b. 平滑化による推定

これは, 1分間に6個の割で取り込まれる位相差に数分間の単純移動平均をかけて真の位相差を推定する. ガウス性雑音はこれで除去できる. 平均時間は, 2分から4分がオメガ電波伝搬条件に応じて使い分けられる.

オメガ電波を利用した高層風観測ではオメガ電波の位相測定と位相差の推定が最も難しく, 最初に述べた各研究機関では, それぞれ工夫を凝らしている. NASA, NCARが信号の零交叉点から, Vaisäläは相互相関とフ



第5図(上), 第6図(下) 館野におけるエコー, オメガ両ゾンデによる風のプロファイルの比較.

ーリエ変換を組み合わせて位相を測定している。気象研究所では、最初、位相同期回路(PLL: Phase Locked Loop)を使って零交叉点から位相を測定していたが、新しい装置では重ね合わせ平均したフーリエ変換を使う方式に改めた。これは、オメガ電波の周期に合わせて1周期ごとに信号波形を切り出し、約1秒間重ね合わせ平均した後フーリエ変換で位相を出す方式で、SN比の小さい時にも良く働くのが特徴である。位相差の推定には、いずれのシステムにも2分~4分の移動平均が用い

られているが、NASAは前処理としてウィンドでデータの品質管理を行ない、Vaisäläでは平均に重みをつけ、Cambridge EngineeringではCubic Spline法による曲線のあてはめを組み合わせるなど、それぞれ異なっている。

5. 野外実験の結果

5.1 館野における試験

1977年11月30日から12月2日にかけて館野の高層気象台で、エコーゾンデとオメガゾンデの比較測風観測が実

第2表 館野におけるデータ取得状況.

NO.	DAY	LOCAL TIME	ALTITUDE RANGE		NOTE
			from	to (Km)	
1	'77.11.30.	20:30 --- 21:12	0.5	--- 17.5	
2	'77.12. 1.	08:30 --- 09:25	0.5	--- 12.5	echo stopped at 09:04
3	'77.12. 1.	14:29 --- 15:36	1.5	--- 24.0	
4	'77.12. 1.	20:30 --- 22:03	1.0	--- 25.0	
5	'77.12. 2.	08:30 --- 09:47	0.5	--- 25.0	
6	'77.12. 2.	14:26 --- 16:04	0.5	--- 25.0	unavailable

第3表 館野における測風解析結果.

NO.	SCALAR (M/S)	BIAS (DEG)	SCALAR RMS ERROR (M/S)	RMS ERROR (DEG)	MEAN VECTOR ERROR (M/S)	DATA AMOUNT
1	0.0	1.8	1.7	2.5	2.9	25
2	-0.9	0.8	1.6	2.5	2.4	22
3	-0.6	0.5	1.5	1.8	2.5	25
4	0.8	-0.6	2.2	2.8	3.3	25
5	1.1	0.6	2.6	2.4	3.7	25
MEAN	.0.1	0.6	1.9	2.4	3.0	

施された。エコーゾンデとオメガゾンデを連結して同一の気球で飛揚する観測を、全部で6回行った。第5図と第6図は、この時の2例の風の鉛直プロフィールを示している。オメガゾンデ(太い実線)の方は、LOP構成局を、アルドラ-ハワイ、ハワイ-対島に選び、2分平均を行なったもの、エコーゾンデ(細い実線)の方は、全高度にわたって、1分ごとに測風計算したものである。これらのうち1例は観測の際にアルドラ局の受信電波が弱く、風のプロフィールを出すことができなかった。飛揚に関するデータを第2表に示す。

オメガゾンデの測風誤差解析は、風のプロフィールが計算できた5例について、エコーゾンデの風を基準にとり、高度2 km から14 km の間で0.5 km ほどの値を用いて行なわれた。3分間平均に対する結果を第3表に示す。風速・風向とも平均的なずれはなく、rms 誤差として風速は約  $2 \text{ ms}^{-1}$ 、風向は約  $2^\circ$  となる。これら統計値の平均時間に対する変化は第7図に示される。平均時間を何分にするかは目的に応じて決まるであろうが、2

分から4分の間が適当であろう。高度分解能と測風誤差の相反する要求のバランスを取ることが必要である。

ベクトル誤差の絶対値の平均は、位相差推定で取り除くことのできなかつた「オメガ電波を使う方式」そのものに起因する雑音の平均的な大きさで、静止地点でオメガ電波を受信し、測風計算した時に生じる風速の平均である。したがって、真の風速の小さいときには避け難い障害となり得る。

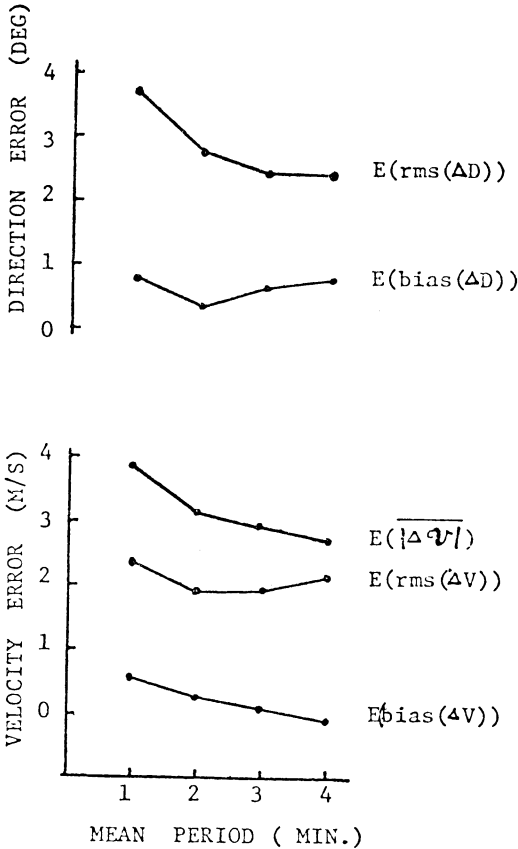
### 5.2 相模湾海上での総合試験

館野での陸上試験に基づき、オメガ高層風観測装置の総合試験が、1978年11月12日~14日、相模湾における東大海洋研究所研究船「淡青丸」船上で行なわれた。

第8図に示されるように、試験観測点は、館野、八丈島、浜松を結ぶ三角形のほぼ中央に位置する。12日と13日の、09時、12時、15時の計6回の観測を予定していたが、13日に低気圧が相模湾南方を通過し海上は大シケとなったため、12日と14日の2日にわたり計5回の飛揚を行なった。日時などは第4表に示される。

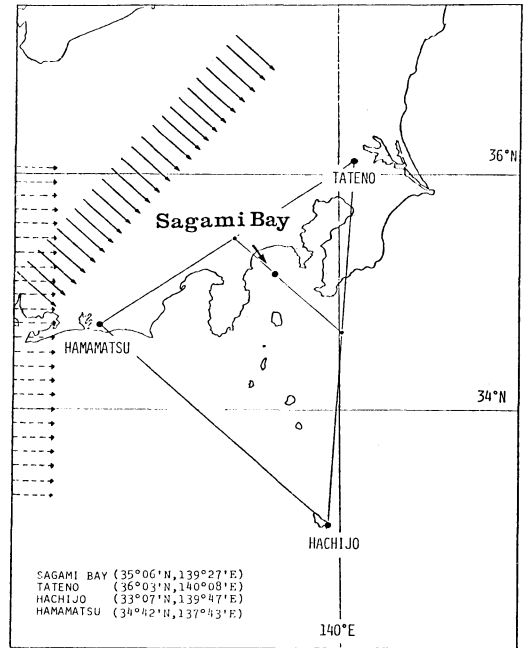
第4表 相模湾におけるデータ取得状況.

NO.	DAY	LOCAL TIME	ALTITUDE RANGE FROM TO (KM)	NOTE
1	'78.11.12.	09:24 --- 10:41	1.3 --- 23.0	COMPARISON
2	'78.11.12.	11:47 --- 13:02	1.4 --- 26.0	
3	'78.11.12.	15:17 --- 16:38	( UNKNOWN )	PRESSURE DATA UNAVAILABLE
4	'78.11.14.	11:53 --- 13:07	1.4 --- 13.0	
5	'78.11.14.	14:33 --- 15:45	1.5 --- 23.0	COMPARISON



第7図 測風誤差統計値と平均時間の関係.

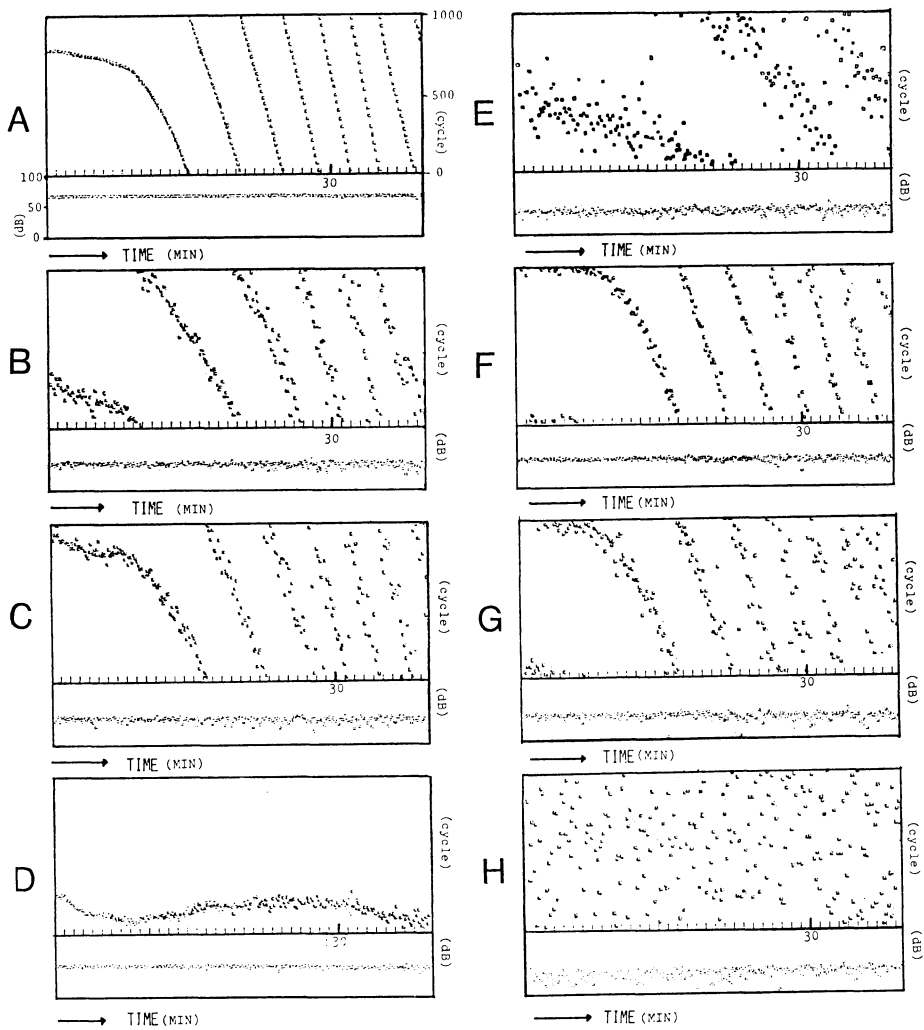
この装置では、オメガゾンデからのデータをオンラインで処理し、また観測後、磁気テープと紙テープに記録されたデータを使って任意の選局で測風計算が可能である。第9図は、11月12日の09時に飛揚したオメガゾンデに入力した各局の位相と電界強度を、観測時間のほぼ半分の40分間について示したものである。電波状態はデータのバラツキによって判断でき、バラツキが小さいほど良い。全8局を示した中で、オーストラリアを除き受信



第8図 オメガゾンデとレーウィンゾンデ観測点の位置.

されており、対島、ハワイ、ラ・レユニオン、アルドラ、……の順で良好であることがわかる。相模湾域ではアルドラ-ハワイ、ハワイ-対島、あるいはアルドラ-ラ・レユニオン、ハワイ-対島の組み合わせが好ましく、また精度の点から考えると3局よりも4局の方が良いので、以下の解析では、アルドラ-ラ・レユニオン、ハワイ-対島を採用した。

相模湾でのオメガゾンデによる風の鉛直プロフィールを、第10図と第11図に太い実線で示す。ほぼ同時刻の、館野、八丈島、浜松におけるレーウィンゾンデによる風のプロフィールをそれぞれ比較のために記入してある。レーウィンゾンデのデータには、オメガゾンデと対等な比較ができるように4分平均操作を施してある。相模湾で



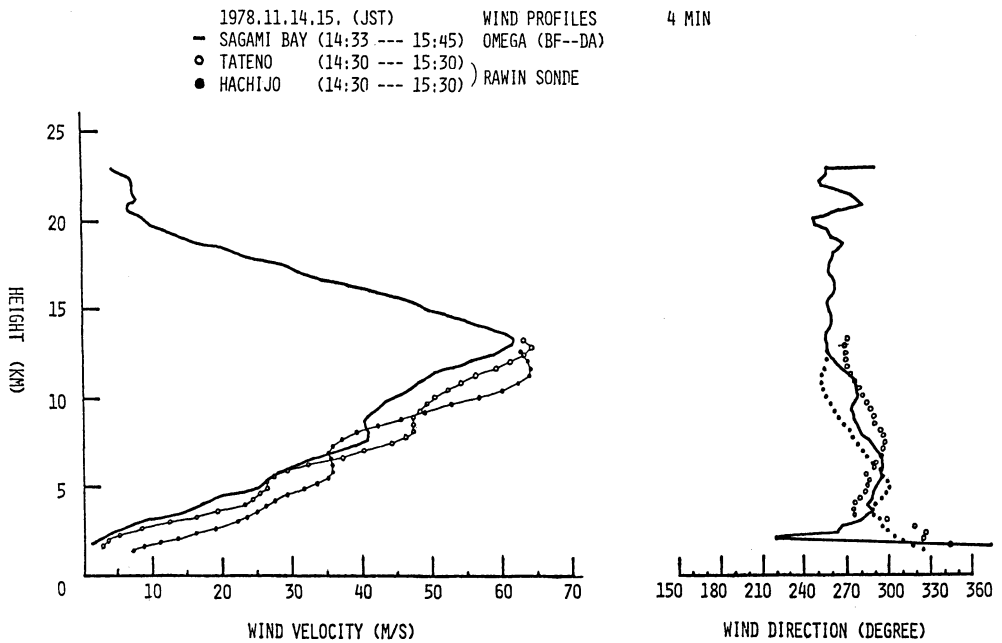
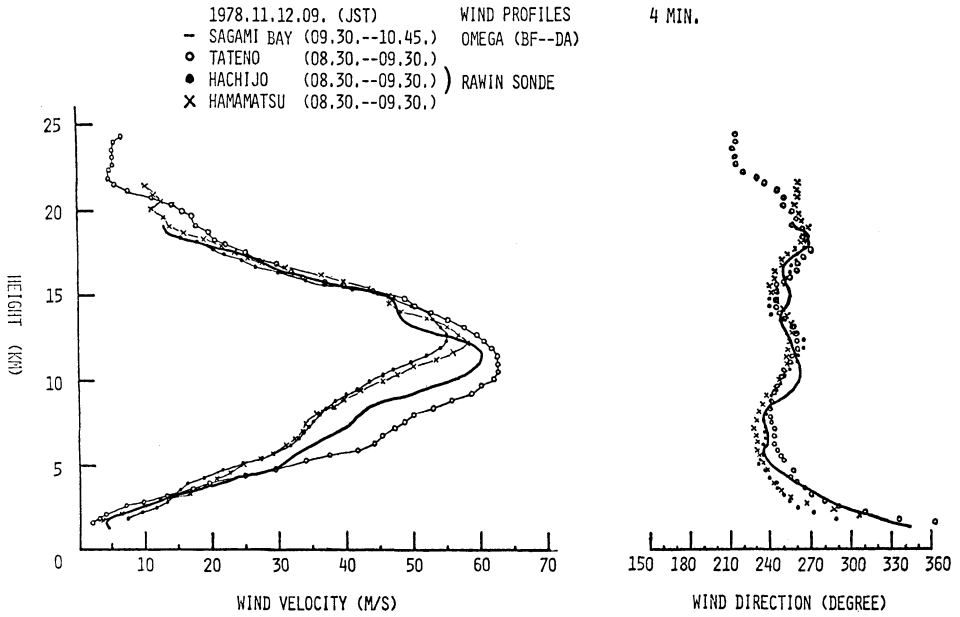
第9図 各局の位相および電界強度 (上: 位相, 下: 電界強度相対変動値).

第5表 相模湾における測風解析結果.

NO.	SCALAR (M/S)	BIAS (DEG)	SCALAR (M/S)	RMS ERROR (DEG)	MEAN VECTOR ERROR (M/S)	DATA AMOUNT (N)	COMPARISON HEIGHT (KM)
A	0.3	0.7	2.4	7.0	5.6	22	3.0 ---14.0
B	-0.5	2.1	2.7	6.9	5.1	22	3.0 ---14.0
C	-2.5	0.8	3.3	5.5	4.7	20	3.0 ---13.0

A --- HACHIJO, TATENO VS. SAGAMI BAY NO.1 SONDE  
 B --- HAMAMATSU, TATENO VS. SAGAMI BAY NO.1 SONDE  
 C --- HACHIJO, TATENO VS. SAGAMI BAY NO.5 SONDE





第10図(上), 第11図(下) 相模湾におけるオメガゾンデと周辺の各高層気象観測点におけるレーウィンゾンデによる風のプロファイルの比較.

のオメガゾンデによるものは、館野と八丈島、館野と浜松のほぼ中間の数値を示すことが認められる。

館野でのテストがエコーゾンデとの連結飛揚をしているのに対し、海上のテストはかなり離れた地点での観測と比較している点が異なる。そこで、地形などの地域的な差異による影響が著しいと考えられる境界層を除き、3 km から 14 km までの層について、第 8 図に示されているように、風系が下層で北西、上層で西寄りであることを考慮して、他の観測点の内挿値を基準として各種統計量を計算し、それらを第 5 表にまとめた。風速・風向の rms 誤差は、それぞれ  $2.8\text{ms}^{-1}$ 、 $6.5^\circ$  であり、ベクトル誤差は  $5\text{ms}^{-1}$  となる。

## 6. あとがき

NASA は 4 分平均で  $1\text{ms}^{-1}$ 、Vaisälä は  $2.5\text{ms}^{-1}$ 、NCAR は 3 分～4 分の平均で  $2\text{ms}^{-1}$ 、Cambridge Engineering では 2 分平均で同じく  $2\text{ms}^{-1}$  のそれぞれ rms 誤差を報告している。さらに、最近 WMO が FGGE のために採用したシステムでは、電波状態が良い時には風速・風向の rms 誤差がそれぞれ、 $0.89\text{ms}^{-1}$ 、 $1.45^\circ$  となっている。これらの値は実験が行なわれた時や場所が異なるため一様には論じられないが、最も新しい WMO のシステムはかなりの水準に達しているものと推測される。しかし、原理などについての詳細は不明である。FGGE の要請精度は、4 分以下の平均で風速については、 $10\text{ms}^{-1}$  未満の時  $\pm 1\text{ms}^{-1}$ 、 $10\text{ms}^{-1}$  以上の時風速の  $\pm 10\%$ 、風向については、風速が  $25\text{ms}^{-1}$  以上の時  $\pm 5^\circ$ 、風速が  $25\text{ms}^{-1}$  未満の時  $\pm 10^\circ$  である。

今回のテストの結果は、この要請をほぼ満足している。しかしながら、1979年5月に予定されている西太平洋赤道海域での高層風観測においては、一般に風が弱いこと、オーストラリア局がまだ開局していないこと、などのためになお気がかりな点が残っている。

**謝辞** 実験に際して協力をいただいた、館野高層气象台の職員、淡青丸乗組員、オメガ高層風観測システムに関する諸外国の最近の情報を提供していただいた気象庁の新田尚博士に、また、観測資料を提供していただいた八丈島、浜松の係員の方々に謝意を表する。

## 文献

- 青柳二郎, 1974: オメガ高層風観測システムについて, (1), (2), 船と海上気象, 18, No. 1, 1-7, No. 2, 1-6.
- , 吉留英二, 1978: オメガ航法システムを利用した高層風観測方式, 気象庁技術報告, 93, 327-360.
- Danielsen, E. F., Duquet, R. T., 1967: A comparison of FPS-16 and GMD-1 measurements and methods for processing wind data, J.O.A.M., 6, 824-836. GARP, 1978: Newsletter, No. 36.
- , 1978: The FGGE special observing systems, PART A: Tropical wind observing ships (TWOS) and other FGGE ship operations, Global weather experiment, 5.
- Govind, P. K., 1975: Omega windfinding systems, J.O.A.M., 14, 1503-1511.
- Jägermalm, O. and K. Luukkonen, 1973: Vaisälä upper air wind finding system, Vaisälä news, No. 60.
- Nybo, L. W., 1973: Omega windfinding system designed to meet accuracy requirements of GARP Atlantic Tropical Experiment, B.A.M.S., 54, 926-932.
- Olson, M. L., 1977: Central Pacific VLF signal survey and Omega wind error prediction, NCAR Tech. Note, 120+EDD.
- オメガ航法編集委員会, 1968: オメガ航法, 鶴巻書房.
- Passi, R. M., 1975: On some aspects of Omega windfinding, J.O.A.M., 14, 1499-1502.
- Poppe, M. C., 1977: Western Pacific and Indian ocean Omega signal survey, Cambridge Eng.