

オメガ電波を利用した気球位置の決定

秋山 弘光・広沢 春任

1. はじめに

気球は風に乗って移動するので、ある時間の後には遥か遠方まで流され、地球の丸みのために、気球から送信される電波を地上の受信点で受信できなくなる。そこでさらに第二の気球を飛揚すると、気球間では見通しが効くので、第二の気球を中継点としたデータの伝送が可能となる。つまり、主気球による観測を継続して行うことができる。このような気球中継方式をリレー気球と名付け、長時間観測あるいは広い地域の観測への応用を目標として開発を進めてきている[1], [2]。

リレー気球方式をとる場合に、主気球については通常の測距測角による位置の決定が行えない。そこでそれに代わる位置の決定法について検討を加え[3]、システムの簡明さおよび信号伝送の容易さの点から、オメガ電波を利用して位置を求める方法を採用することとした。オメガ航法システムは全地球的な規模の電波航法システムとして現在実用されているものである。アメリカのNCAR (National Center for Atmospheric Research)でも既に気球位置を求めるのにオメガ電波を利用しており[4]、また、わが国においてもオメガゾンデ開発の例[5]がある。

昭和52, 53年の2年にわたり、搭載用の受信部の試作ならびに気球搭載試験を行った。結果は良好で、比較的簡単なシステムにより、およそ数kmの精度で位置を決定できることが確かめられた。リレー気球に搭載した試験では、約1,000 km 東方まで浮遊した気球の位置決定に役立つことができた。

以下に、採用した位置決定システムの構成、気球搭載試験結果および問題点などについて述べる。

2. オメガ航法システム

オメガシステムはVLF帯の電波を用いた双曲線航法システムである。地球上に八つの送信局が配置されており、周波数10.2, 13.6, $11\frac{1}{3}$ kHzの3波を送信している。10.2 kHzが基本周波数で、他の二つは冗長度を減らすための副周波数である。各局は定められたフォーマットにより、各波を時分割、10秒の周期で送信している。図1に10.2 kHzの電波の送信フォーマットを示す。

二つの局からの電波の位相差が零となる点の軌跡は地球上で双曲線となる。周波数が低い場合、二つの局間には位相差零の双曲線が多数描かれる。二つの局を結ぶ基線上で、位相差零の点の間隔は、周波数10.2 kHzの場合に、8海里(14.8 km)である。隣り合う二つの

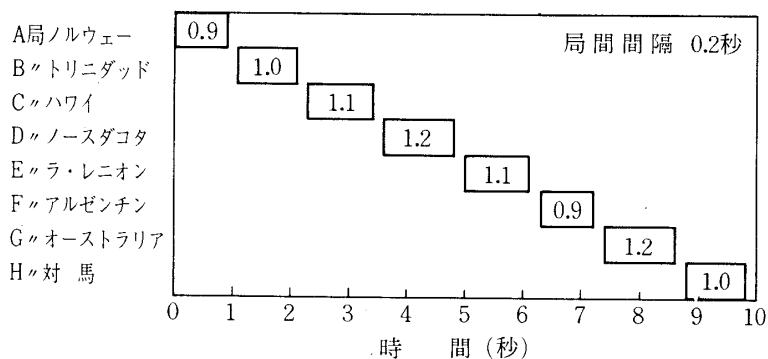


図1 10.2 kHz 送信フォーマット(G局は現在建設中)

位相差零の双曲線に囲まれる範囲はレーンと呼ばれ、各レーンに順次、番号が与えられている。1レーンを100等分した単位をセンチレーンと云う。

位置は2組の双曲線の交点として求める。したがって、受信機は少なくとも3局ないしそれ以上の局からの電波を受信する必要がある。また、絶対位置を求めるためには、移動とともに、横切ったレーンの数を数えておかなければならない。

三陸附近で利用可能なオメガ局は、A、C、D、E、H局（記号については図1参照）などである。図2に、三陸周辺におけるA-C局対およびC-H局対の零位相差線（6レーンごとに1本引いてある）を示す。

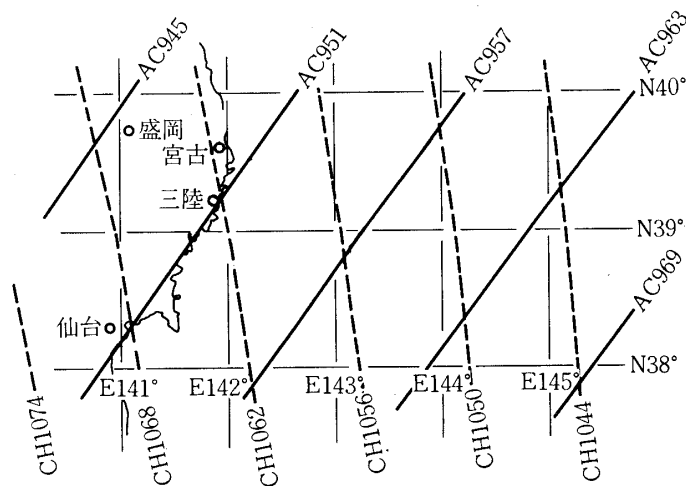


図2 三陸付近の零位相差線(A-CおよびC-H局対)

3. 気球位置決定システム

気球位置決定のためのオメガ電波受信システムの構成を図3に示す。

受信電波は10.2 kHzの1波のみとしている。気球の位置は連続的に追跡して行けるので、あいまいさに関する問題はない。3波のうちで周波数の高いものほどレーン幅が狭く、位置精度は上ることになるが、テレメータ信号と混合して送ることを考慮すると、IRIG規格FM-FM方式、No.12の副搬送波（中心周波数10.5 kHz）の帯域内に入る10.2 kHzが

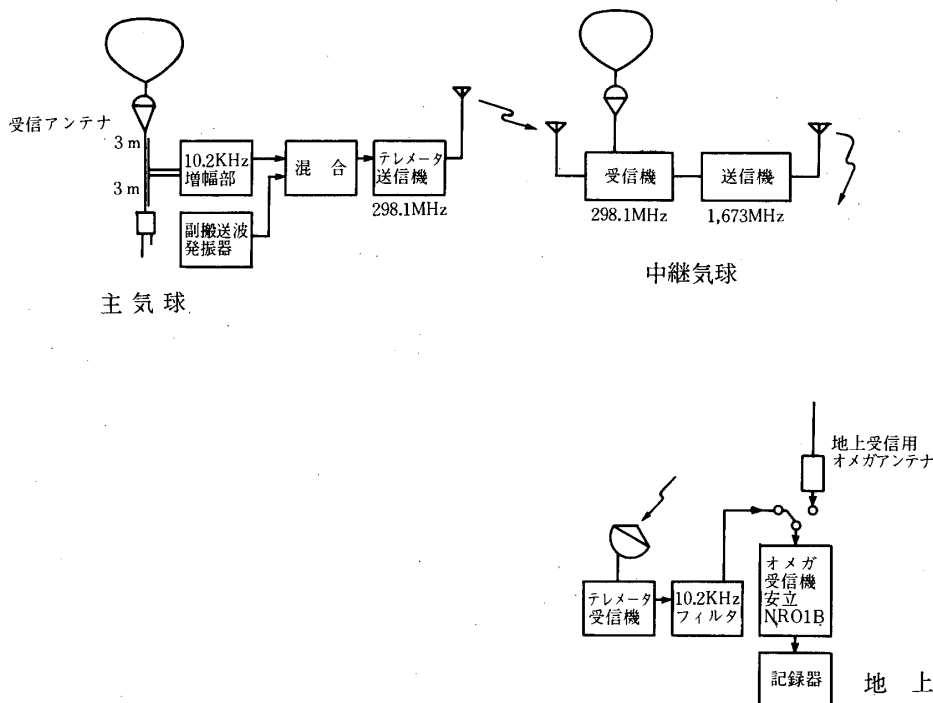


図3 リレー気球の構成と気球位置決定システム

適当である。

気球上で受信された 10.2 kHz の信号は、増幅された後、テレメータ副搬送波と混合されて地上に送られる。リレー気球システム[2]は、主気球から中継気球への伝送には周波数 298.1 MHz の搬送波を、中継気球から地上への伝送には周波数 1673 MHz の搬送波を用いている。変調は FM である。地上では、10.2 kHz のオメガ信号を分離し、市販の船舶用オメガ受信機に入力する。

気球搭載受信部の構成を図4に示す。3m-3mの垂直ダブレットアンテナと単一同調回路2段を含む増幅器からなる。アンテナはゴンドラの吊り紐に沿って取り付けられる。増幅器の入力段には FET を使用して入力インピーダンスを高めている。増幅器の利得は 85 db である。同調特性は図5に示す通りで、-3db幅を 150 Hz にとってある。中心周波数の温度ドリフトは約 2 Hz / °C である。対馬局 (H局) は近距離にあるため、電界強度は最も大きい。副搬送波と混合するにあたっては、対馬局を受信した時の振幅値を用いて混合比を決定している。また、空電による雑音の振幅を制限するためにリミッタを回路内に設けてある。

地上用のオメガ受信機としては、安立電気製 NRO-1B 型受信機を使用している。任意の4局について自動的に位相追尾を行うことができる。位相追尾系はアナログ方式である。なお気球の最大移動速度 (200 km / hr に達する場合もある) は一般の船舶に比べて大きいので、位相追尾回路の応答速度を船舶用の場合のおよそ3倍に速めてある。位相差出力は、

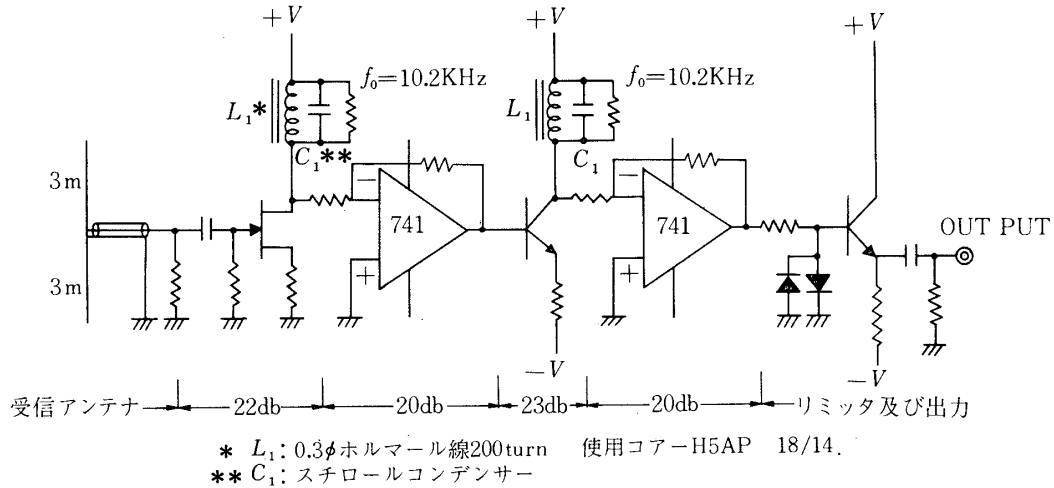


図4 気球搭載用オメガ受信機構成図

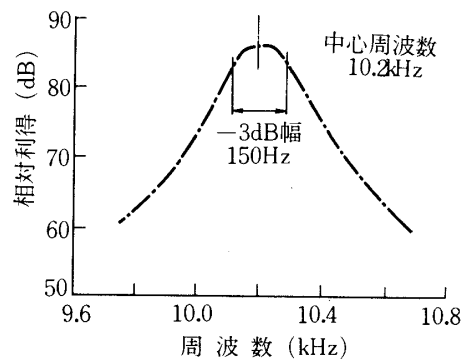


図5 気球搭載受信機と同調特性

二つの局対について、センチレーン単位でデジタル表示される。また、打点記録計にも記録される。

4. 実験結果

(1) 気球搭載試験

リレー気球に適用する前段階として、昭和52年10月に気球B₅-82において、また、昭和53年9月に気球B₅-93において気球搭載試験を行なった。これらの実験における伝送系の構成は、図3において、中継部分を省き、主気球の298.1MHz送信機を1673MHz送信機に置き換えた形となっている。つまり、オメガ信号はテレメータ副搬送波とともに1673MHzの

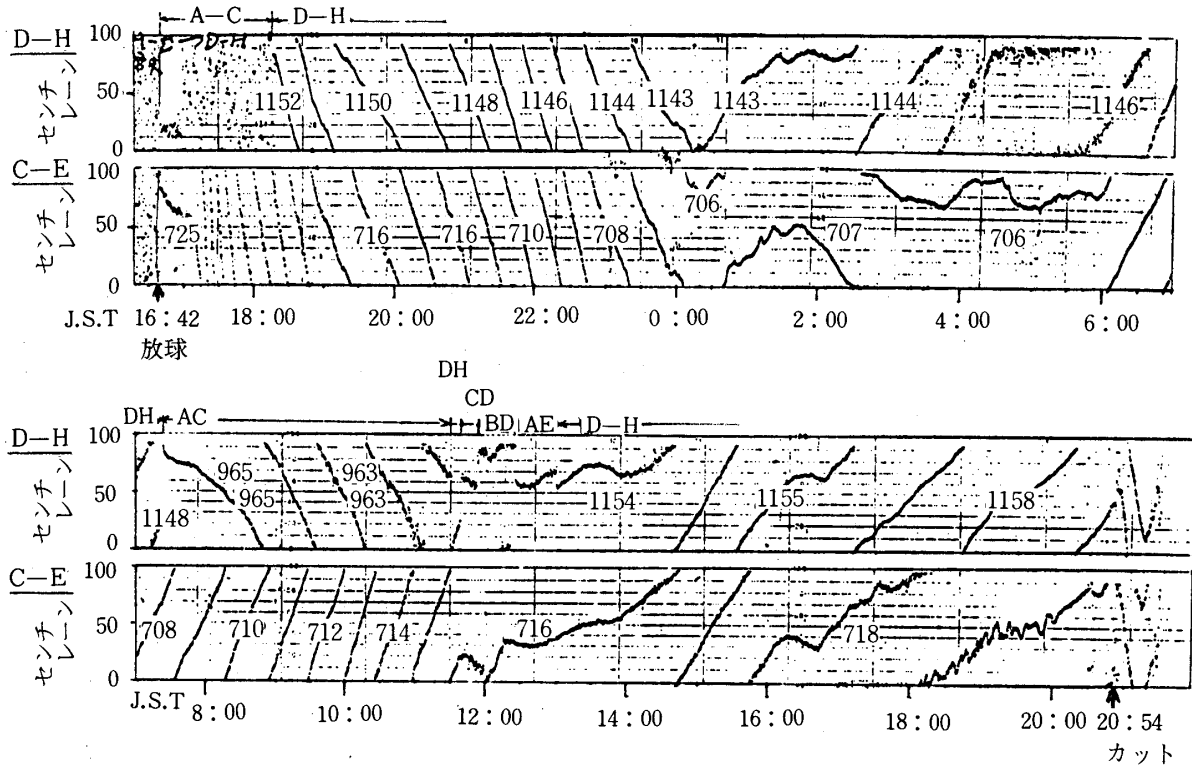


図6 B₅-82 気球搭載実験における受信記録 (昭和52年10月)

搬送波によって直接地上に送られる。

いずれの実験においてもオメガ受信系の動作は良好で、性能の評価を行うためのデータを十分に得ることができた。図6に、一例としてB₅-82の実験における受信記録を示す。図は2組の局対について位相差を記録したもので、フルスケールは1レーン幅に対応している。気球が次々とレーンを横切って進行する時には、斜めの線が繰返して記録されることになる。チャートの上段はD-H局対を主として記録しており、時にA-Cやその他の局対に切り換えられている。下段は、連続してC-E局対を記録している。図中の数字はレーン番号である。なお、放球後1時間半程の間、A-Cの記録が正常に行なわれていないが、これはA局が同日同時刻頃送信を停止していたためである（後にオメガセンター発行の週間オメガ情報により判明した）。

測定された2組の位相差データから気球の位置を求め、それを測距測角から決まる位置と比較することによって精度を検討した。オメガ航法に使われているデータとして、U. S. Navy Oceanographic Office 発行のオメガテーブルと伝播補正表がある。前者は双曲線格子網の位置を緯度、経度で与える表である。ただし、伝播速度は光速（真空中）と仮定している。後者はそれに対する補正を行うためのもので、各局ごとに、季節、時刻、地理的位置の相異に対する補正值が、センチレーン単位で与えられている。この位相変化はかなり大き

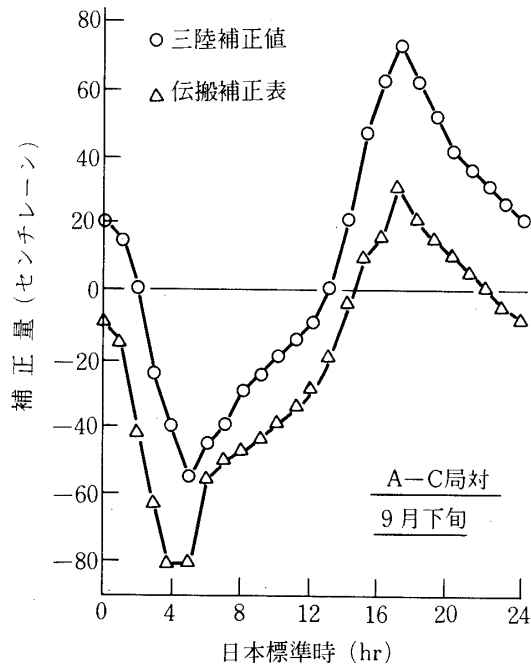


図7 位相補正量の例—AC局対

(三陸補正値は昭和53年9月21日から10月5日までの期間の
平均値, 伝播補正表の値は9月16日から30日の期間の値)

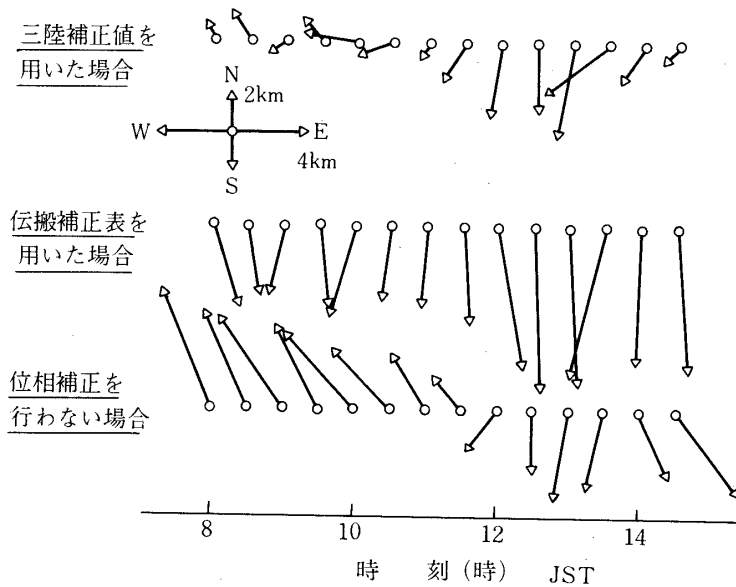


図8 オメガ電波によって求められた位置と測距測角によって
求められた位置の差—B_s-92 気球における実験結果

いもので、例えば位相差の日変化は、一般に、1レーン幅以上に及ぶ。したがって、位置の精度は位相補正の適否に大きく依存する。そこで、補正法として次の二つの方法をとって、比較を行った。一つは上述の伝播補正表を用いるものであり、他方は、三陸大気球観測所において、気球実験の前後、オメガ受信機を連続して働かせ、位相差の日変化量を記録して、それを補正量として用いるものである。図7に一例としてC-H局対に対する補正量を示す。伝播補正表による値と、三陸での観測に基づく補正值（以後三陸補正值と呼ぶ）との間には、一般に、かなりの差が見られる。

図8に、B₅-92気球における実験結果を示す。図は、オメガ電波によって求められた位置と測距測角によって求められた位置の差を、ベクトルの的に、時間の経過に沿って図示したもので、全く補正を行わない場合と、上述の二つの方法によって補正を行った場合とが比較されている。なお、測距によって決まる位置の精度は300 m程度であるので、比較の基準として用いることに問題はない。図を見ると、まず、全く補正を行わない場合、位置決定の誤差は2 kmから8 km位で、ずれの方向が時間とともに系統的に変化していることがわかる。伝播補正表によって補正をほどこした場合、補正の効果はほとんどなく、むしろある方向に偏差を与えすぎた結果となっている。それに対して三陸補正值を用いた補正はかなり良好に作用しており、ずれの方向もランダムに近くなっている。これらの位置のずれについて、位置の差のヒストグラムをとると図9のようになる。データとしては15分ごとの値を用いてい

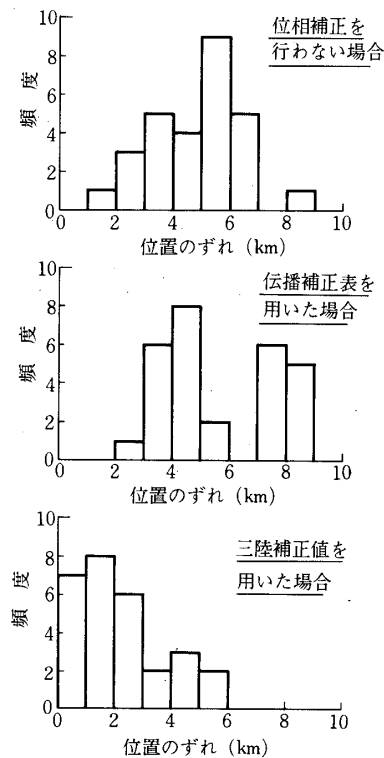


図9 位置のずれのヒストグラムと補正の効果

る。図9は、三陸補正値を用いて補正を行った場合に、90%のデータは誤差5 km 以内に入っており、60%のデータが誤差2.5 km 以内に入っていることを示している。

三陸で観測した位相差の日変化は、日によるばらつきを示し、補正値にはその平均値を用いている。日変化データのばらつきの大きさには時刻依存性があり、B₅-92 気球において実験を行った時間帯は、ばらつきの大きい時間帯に当たっている。したがって、ここに得られた位置の誤差は、平均的な値よりも大きい値をとっている状態に相当すると考えてよい。

B₅-82 気球における実験においてもほぼ同様の結果が得られており、やはり三陸補正値を用いた場合に精度が最も良い。

以上のように、オメガ電波を利用することにより、ほぼ数 km 以内の精度で気球位置を決定できることが確かめられた。また、そのためには実験に先立って地上観測を連続して行い、補正用のデータを集積しておく必要のあることが判明した。なお、昭和52年と昭和53年の補正用データを比較してみると、同じ時期であるにもかかわらず必ずしも一致した値をとっていない。従って、補正データはその年ごとに作製する必要がある。

また、オメガ伝播補正表は、日本附近に関してはまだ必ずしも的確な補正値を与えるものとはなっていないと云われているが、上述の実験結果にもその状況が反映されているようにおもわれる。

(2) リレー気球への適用

昭和52年10月および53年9月に行われたリレー気球実験において、オメガ電波利用位置決定システムの試験を行うことができ、いずれの実験においても、見通し外まで浮遊した主気

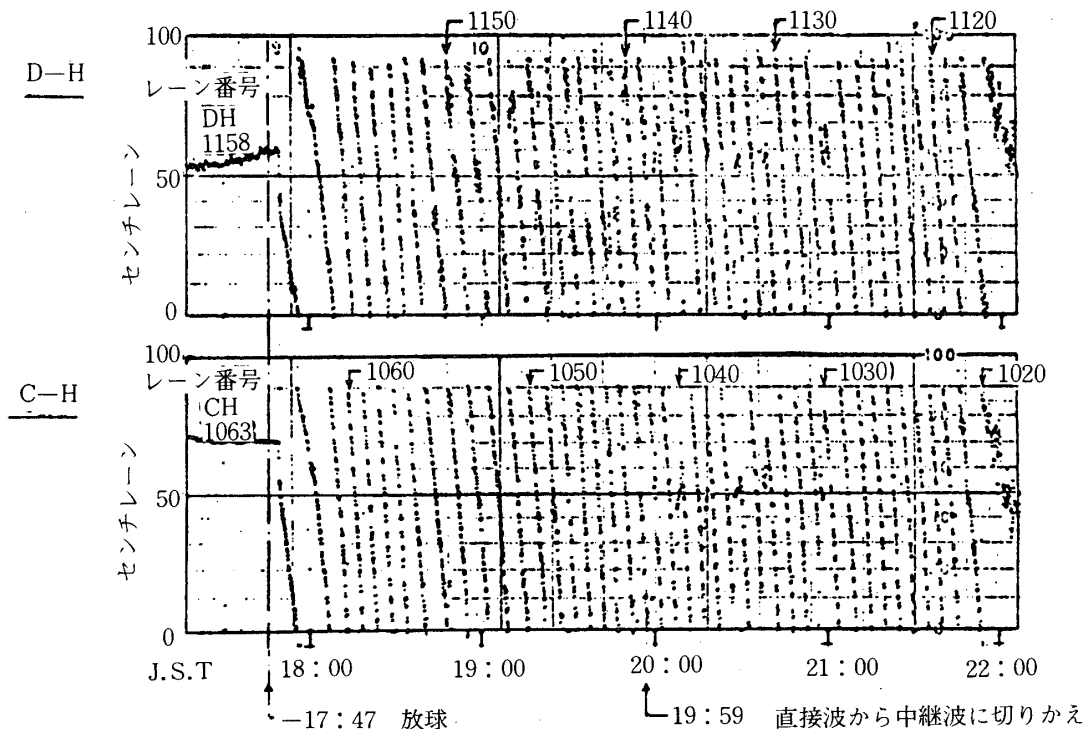


図10 リレー気球実験における受信記録(昭和52年10月)

球の位置決定に役立てることができた。

昭和52年10月の実験では、主気球は、高度約15 kmを保って東進し、三陸東方約500 kmの地点で見通し限界に達した。以後は中継によってデータを取得し、三陸東方990 kmの地で着水するまでの航跡を確定することができた。また、昭和53年9月の実験では、主気球は、高度11 kmで水平浮遊状態に入った後徐々に高度を下げながら東進し、三陸東方280 kmにおいて見通し範囲外に達した。以後は中継により、三陸東方730 kmにおいて着水するまでの位置を追跡した。

図10に、昭和52年の実験におけるオメガ受信記録の一部を示す。気球は17時47分に放球された。はじめは、主気球からの直接波（主気球には298.1 MHzの送信機のほかに、1680 MHz帯のテレメータ送信機も積んでおり、両者は同じ信号を送信している。ここで直接波とは1680 MHz帯の電波を指す。）を受信し、19時59分に中継波に切替えた。選択したオメガ局はC、D、H局であり、C-HとD-Hの局対についての位相差が記録されている。図は気球が急速に東方へ進行している状況を明瞭に示しており、例えばC-H局対を見ると、1時間に約150 kmに相当する。直接波から中継波への切り替えの際の位相差記録は滑らかに行われており、中継が正常に行われていたことを示している。

5. む す び

オメガ電波を利用して気球の位置を検出することを試み、ほぼ期待通りの成果を得ることができた。リレー気球における位置決定法として、今後十分に活用できるものと考えている。3～5 kmという位置決定誤差は、ある固定点で同時刻に位相変化を観測して補正を行う方法（ディファレンシャルオメガ方式）をとらない限りは避けられないものとおもわれるが、1000 kmないしそれ以上遠方の太平洋上を浮遊する気球に関しては、十分な精度であるといつてよい。今後は搭載装置の規格化をはかるとともに、実時間で位置を算出するシステムの整備を進めたい。

終りに、オメガシステムの利用を検討するにあたって、種々ご教示いただいた鹿児島大学田口一夫教授ならびに本研究所伊藤紘二助教授、ならびに、気球搭載受信機の試作にあたってご協力、ご助言いただいた安立電気株式会社吉村裕光氏に厚くお礼申し上げる。

1979年5月9日 新設部（工学）

参 考 文 献

- [1] H. Hirosawa, et al.: Relay Balloon, Proc. 11th International Symposium on Space Technology and Science, 867, Tokyo, 1975.
- [2] 西村純, ほか: リレー気球, 昭和52年度大気球シンポジウム, P.73, 東京大学宇宙航空研究所, 1977.
- [3] 秋山弘光, 広沢春任: オメガ電波を利用した気球位置の決定, 同上, P.83.
- [4] E. E. Smith: Balloon Tracking System, Atmospheric Technology, National Center for Atmospheric Research, No. 5, March 1974.
- [5] 青柳二郎: オメガ高層風観測システムについて(I)および(II), 船と海上気象, 第18巻, 第1号および第2号, 1974.