

## ETS-V を用いた大気球データ通信実験

橋本幸雄<sup>\*1</sup>・井出俊行<sup>\*1</sup>・鈴木龍太郎<sup>\*2</sup>・浜本直和<sup>\*1</sup>・太田茂雄<sup>\*3</sup>・本田秀之<sup>\*3</sup>・山上隆正<sup>\*3</sup>・矢島信之<sup>\*3</sup>

### Experiments of Data Communication for Balloon System via ETS-V

By

Yukio HASHIMOTO, Toshiyuki IDE, Ryutaro SUZUKI,  
Naokazu HAMAMOTO, Shigeo OHTA, Hideyuki HONDA,  
Takamasa YAMAGAMI and Nobuyuki YAJIMA

**Abstract:** In balloon based observation, a ground system radio link is used to control the flight, and to transmit the house-keeping data and the observation data. When the balloon exceeds the prospect distance (about 500 km - 600 km) from the base station, communication over the ground system radio link is not possible, thus to be limiting the flight range of the balloon. To use a geostationary communication satellite link, which has a wide area, removes this limitation. CRL and ISAS began studying mobile satellite communication with the balloon in 1990. A data communication link for the balloon was investigated using Engineering Test Satellite 5 (ETS-V). This report outlines the experiments and discusses the results.

### 概要

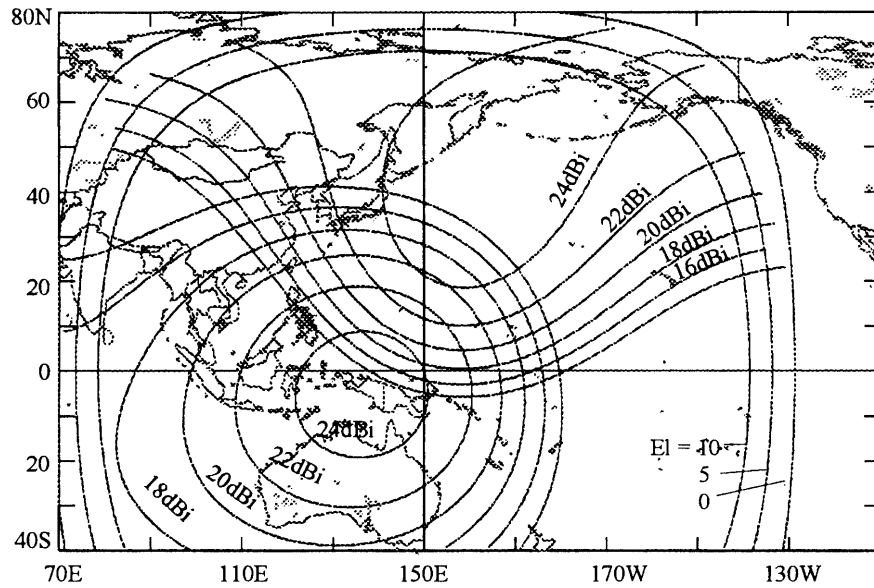
大気球による観測では、飛行高度の制御や機器温度、観測データの伝送などに地上系の無線回線を使用している。この無線回線では基地局からの見通し範囲（およそ500～600km）を越える通信が困難であり、気球の飛翔範囲を制限する大きな要因となる。広域性を持つ静止通信衛星回線を用いることにより、この制限を緩和することが可能と考えられる。通信総合研究所と宇宙科学研究所では、技術試験衛星5型（ETS-V）を用いた大気球のデータ通信回線の検討を行うこととし、1990年度より「気球による移動体衛星通信の研究」を開始した。これまでに2回の実験を実施し、良好な結果を得た。本報告では、実験の概要および結果について述べる。

#### 1. 大気球データ通信実験システムの概要

技術試験衛星5型（ETS-V）は、1987年8月、H-1ロケットにより打ち上げられた。移動体衛星通信用中継器を搭載し、Lバンドの対移動体地球局回線およびCバンドの対基地局回線により、衛星を経由する移動体地球局—基地局間および移動体地球局—移動体地球局間の回線を設定することができる。Lバンドアンテナとして南北2つのビームを持つ直径1.5mのパラボラアンテナを搭載することにより、移動体地球局の小型化を可能としている。第1図にETS-V搭載Lバンドアンテナのアンテナパターンを示す。

---

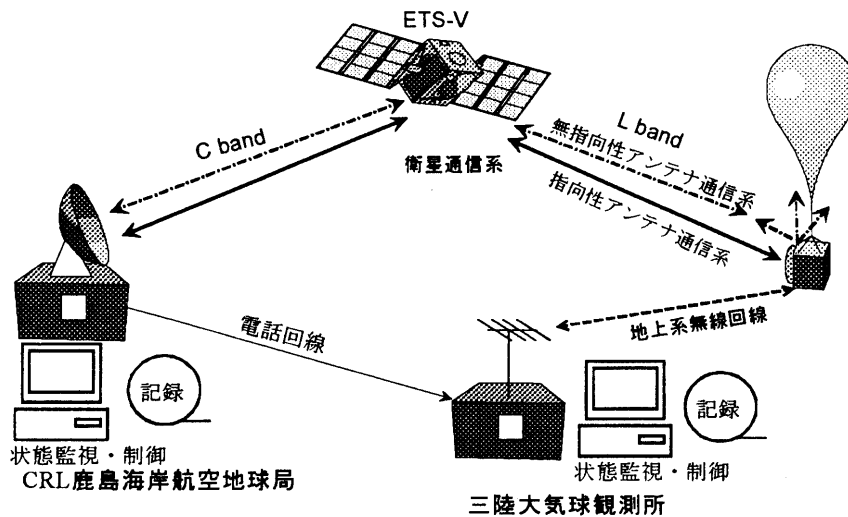
\*1 通信総合研究所   \*2 放送教育開発センター   \*3 宇宙科学研究所



第1図 T E S - V 搭載 L バンドアンテナのパターン

大気球データ通信実験システムの構成を第2図に示す。通信総合研究所鹿島宇宙通信センター（茨城県鹿島郡鹿嶋市）を基地局とし、ETS-Vを介して大気球に搭載した小型地球局と双方向通信を行う。鹿島では気球からの状態監視データを受信するとともに磁気テープに記録する。またコマンドを送り気球の制御を行う。受信データは電話回線で気球の打ち上げ場所である三陸大気観測所にも送られる。三陸から見通しの範囲では地上系無線回線も同時に使用する。

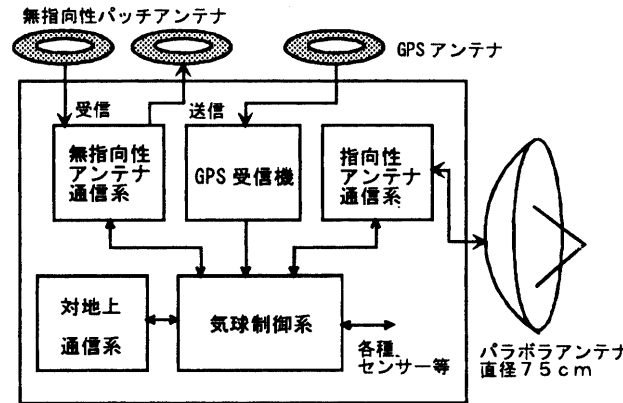
地上系無線回線を使用した測位が利用できない見通し外では、GPS（Global Positioning System）による測位を用いる。



第2図 大気球データ通信実験システム

実験は1991年5月および1994年10月の2回実施した [1、2]。第1回目の実験では、FM-FSK 変調方式の通信システムを用い、気球搭載地球局および衛星回線の特性を調べるため、地上系無線回線の通信可能範囲において実験を行った。第2回目の実験は、気球の飛行のための気象条件が整わず実験実施が遅れたが、この間に、PS

K変調方式の簡易な小型地球局を開発することができた。第2回目の実験では地上系無線回線、第1回で使用したFM-FSK 変調方式の通信システムと、新たに開発した PSK 変調方式の通信システムの3系統を用いて実験を行った [3、4]。実験に用いた気球搭載通信機・地球局の構成を第3図に示す。



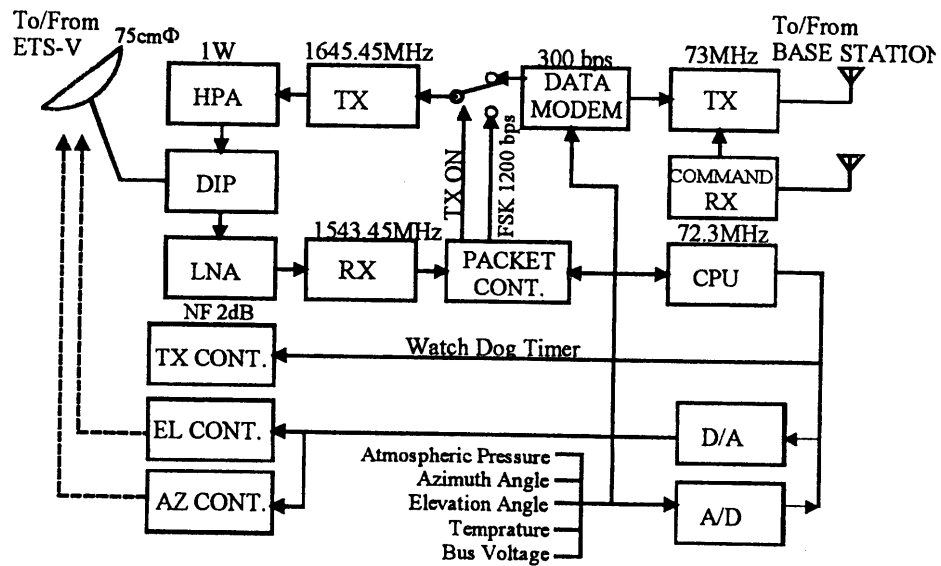
第3図 気球搭載通信機・地球局

### 2. FM-FSK 変調方式通信システム

観測データをリアルタイムで収集する場合などでは高速データ回線が必要とされることがあるが、気球の制御、状態監視を行うためには数100bps 程度の双方向通信回線で十分と考えられる。第1回目の実験では開発期間の短縮を図るため FM-FSK 変調方式を採用した。FM-FSK 変調方式の搭載地球局の主要諸元を第1表に示す。FM変調方式は比較的高い C/No を必要とするが周波数変動に強く、回路が簡易であり、また電話回線を置き換える場合などに利用しやすい。アンテナとして直径75cmのオフセットパラボラアンテナを使用し、ゴンドラ側面に取り付けた。アンテナは指向性を持つため指向方向制御が必要とされる。仰角はモーター駆動により±10度の範囲で地上よりコマンドで制御することができる。また、方位角は気球の「より戻し制御」により行うこととした。より戻し制御は、気球本体とゴンドラを繋ぐロープの間にロタリージョイントを入れ、ゴンドラに取り付けられた地磁気センサーの出力にしたがってロタリージョイントを回転させることにより、ゴンドラの姿勢を制御する方法である。この制御のオフセット量をコマンドで変えることにより、アンテナの方位角を変える。

第1表 FM-FSK変調方式気球地球局の主要諸元

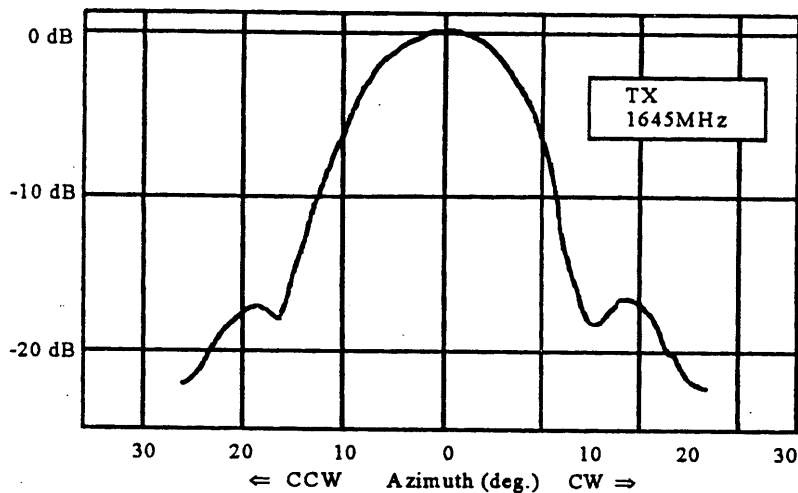
アンテナ	直径75cmパラボラアンテナ
アンテナ利得	19.3 dBi
送信電力	1W (5W MAX)
変調方式	FSK-FM (15 kHz BW)
伝送速度	1200 bps, 300 bps
パケット長	128 byte/パケット
仰角制御	10度 (コマンドによる)
方位角制御	より戻し制御による



第4図 FM-FSK変調方式気球局の構成

第4図に FM-FSK 変調方式の気球地球局の構成を示す。FM 変調器にパケット通信制御装置からの1200bpsのFSK信号と、300bpsの気球のテレメトリ用モデム出力を切り替えて伝送する。データパケット信号は300bpsの気球テレメトリ信号の合間に気球搭載CPUの制御で間欠的に送信される。送信機は最大5Wであるが標準1Wで使用する。

また、気球搭載CPUは、基地局からのコマンドにより、搭載アンテナの方向制御を行う。気球は三陸気球観測所から放球後、三陸沖の太平洋上を飛翔するため、ETS-VのLバンドアンテナの北ビーム中心方向に向かうこととなる。気球の移動に伴い、衛星の方角、仰角は徐々に変化する。基地局からのコマンドにより、アンテナ指向方向を制御修正することが必要とされるが、第5図に示すように気球搭載アンテナのビーム幅は約16度と広く、細かな修正は不要と考えられる。



第5図 気球搭載アンテナのパターン

第2表 PSK変調方式気球地球局の主要諸元

アンテナ	円形プリントアンテナ x2 (送受分離)
アンテナ利得	3dBi(衛星方向)
送信電力	1W (2W MAX)
変調方式	BPSK, パケット方式
変調速度	1200bps
パケット長	128byte/パケット
誤り訂正	畳み込み/ビタービ復号(1/2,k=3)
情報伝送速度	600bps

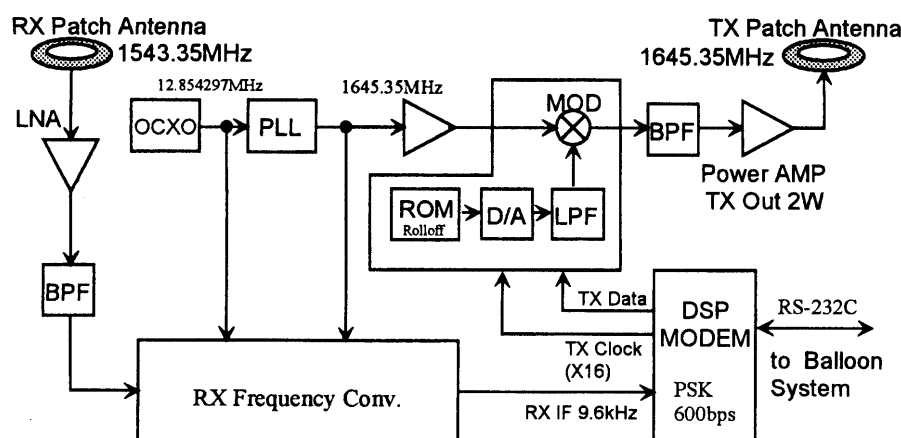
## 3. PSK 変調方式通信システム

FM-FSK 変調方式は回路が簡易であり、製作が容易であるが、高い回線C/Noを必要とするため、ETS-Vを用いる回線では指向性アンテナの使用が不可欠となる。指向性アンテナを用いたシステムでは、気球の姿勢が見通し範囲外で不安定となった場合、通信を確保することが困難となる。無指向性アンテナを用いた通信システムでは、このような場合でも通信を確保することができる。このため、通信総合研究所ではPSK変調方式等の通信システムを開発した。性能を評価し、BPSK変調方式の通信システムを採用することとした [5]。第2表にPSK変調方式通信システムの主要諸元を示す。送受信系ともにBPSK変調方式を用いて、情報伝送速度600bpsのデータを信頼性を向上させるためレート1/2の誤り訂正を行い、変調速度1200bpsとしてパケット方式で伝送する。

第3表にPSK変調方式通信システムの回線諸元を示す。無指向性アンテナを使用することによりアンテナ利得が3dBと低くなるが、誤り訂正を用いることにより気球から基地局の回線においても4.3dBのマージンを確保す

第3表 PSK変調方式の回線計算

		PSK変調方式	
		forward	return
送信電力	W	10.0	1.0
アンテナ利得	dB	54.7	3.0
地球局EIRP	dBW	61.2	3.0
衛星受信G/T	dB/K	-8.1	-4.8
C/No(up)	dBHz	82.0	38.4
衛星EIRP	dBW	29.4	-19.8
地球局G/T	dB/K	-19.0	32.7
C/No(down)	dBHz	47.0	43.1
総合C/No	dBHz	47.0	37.1
要求C/No	dBHz	31.8	31.8
回線マージン	dB	16.3	4.3



第6図 PSK変調方式気球地球局の構成

ることができる。基地局から気球への回線はコマンド用であり、十分な信頼性が要求されるが、衛星から最大の送信EIRP35.5dBを出力した場合には20dB以上のマージンが確保でき、余裕を持った運用が可能である。

第6図にPSK変調方式通信の搭載地球局の構成を示す。アンテナは円形型のプリントアンテナとし、送受分離回路を省くため送信用と受信用のアンテナを個別に使用した。利得は天頂方向で7dB程度あるが仰角約45度の衛星方向では約3dBとなる。送信系は、誘電体発振器を用い、1/512の基準水晶発振器による位相制御により、直接送信周波数を発生し、Lバンドを変調を行う。送信機はHEMTを用いた最大出力2Wのモジュールを使用し、歪みを抑えるため1Wで運用する。受信系は送信用発振器の出力をローカル信号として用いるとともに、以下のローカル信号源として基準水晶発振器より発生させて用いる。4段の周波数変換後、受信信号は9.6kHzのIF信号となり、DPS (Digital Signal Processor) を用いた復調器に供給される。受信信号はパケット化されたデータであり、DPSではキャリア再生、フィルタリング、クロック再生、誤り訂正を行った後、パケット処理を行い、ゴンドラに搭載されたCPUにデータを送られる。DPSによるデジタル処理で変復調動作を行うことで、アナログ方式の変復調器に比べて特性を向上することができたほか、環境の変化に対して安定な動作が期待できる。[6]

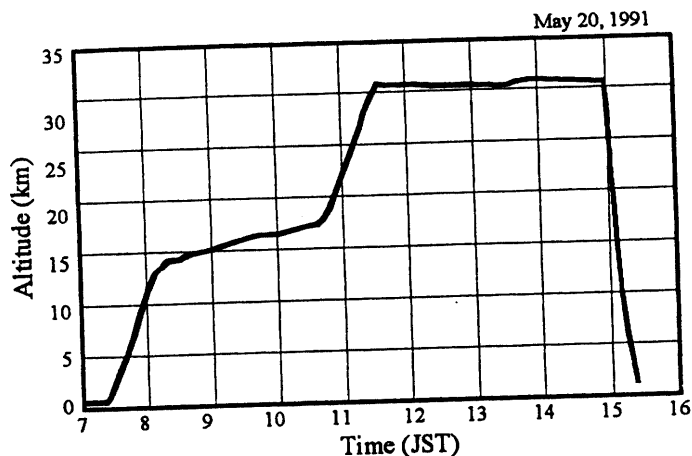
#### 4. 大気球データ通信実験の概要および結果

##### 4.1 第1回目の実験の概要および結果

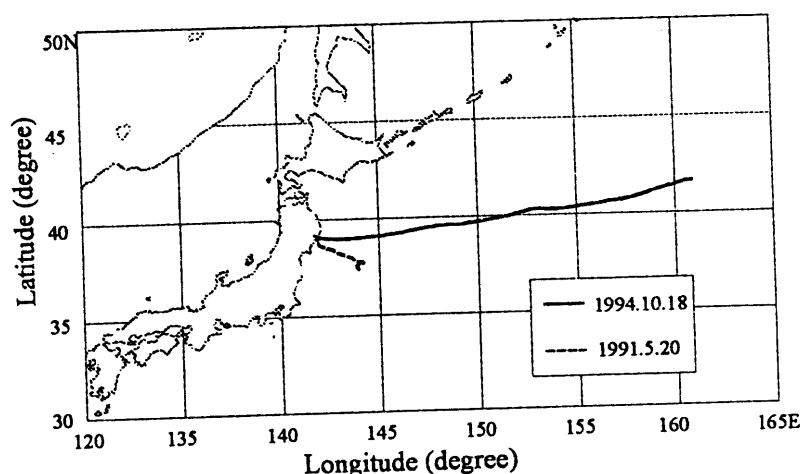
第1回目の気球通信実験は1991年5月20日にFM-FSK変調方式の通信システムを用いて実施された。実験用気球は宇宙科学研究所三陸大気球観測所から放球され、通信総合研究所鹿島宇宙通信センターを基地局とするETS-Vを経由する回線を用いて行われた。気球搭載地球局および衛星回線の特性を調べるため、地上系無線回線の通信可能範囲において実験を行った。気球の飛行高度の変化を第7図に、航跡を第8図に示す。気球は長時間飛行に用いるブーメランフライトという方法で飛行した。気球の高度を制御し、初めに第一レベルフライトと呼ばれるジェット気流付近の高度約15kmで水平飛行を行う。時速100km程度で東方向三陸沖合へ飛行後、成層圏高度まで上昇し、第二レベルフライトを行う。季節により高度30km付近の成層圏では弱い西向きの気流があり、この風によって陸地方向に戻る。

実験では、3時間の第一レベルフライト後、コマンドにより気球高度を上昇させ、3時間の第二レベルフライトを行った。第一レベルフライト中、気球からの信号は非常に安定に受信することができ、ゴンドラの姿勢制御も正常に機能した。第二フライトレベルでは通信用の電源制御系の不具合により測定不能であった。より戻し制

御によるゴンドラの方角角の変動は、気球の速い第一レベルフライト時においても最大±3度程度であり、アンテナの半値幅の16度に対して十分小さく、信号品質に対する影響はなかった。



第7図 第1回目の飛行高度の履歴

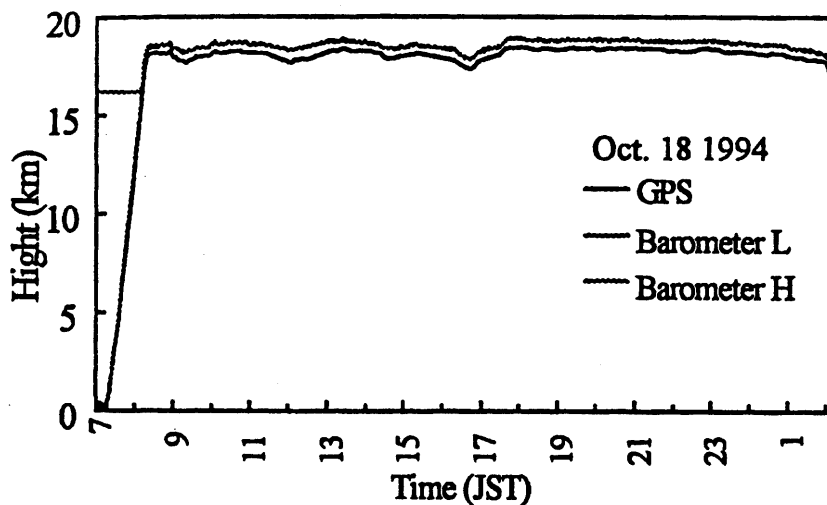


第8図 気球の航跡

#### 4. 2 第2回目の実験の概要および結果

第2回目の実験は1994年10月18日に実施した。第2回は衛星通信によって気球の運用を行うこととし、長時間、長距離の飛行を試みた。気球は三陸大気球観測所から午前7時に放球後、19日午前2時までの約19時間にわたり高度18kmで見通し範囲の600kmを越える約1600kmの飛行を行った。ブーメランフライトが可能な気象条件であればより長時間の飛行が可能であったと考えられる。

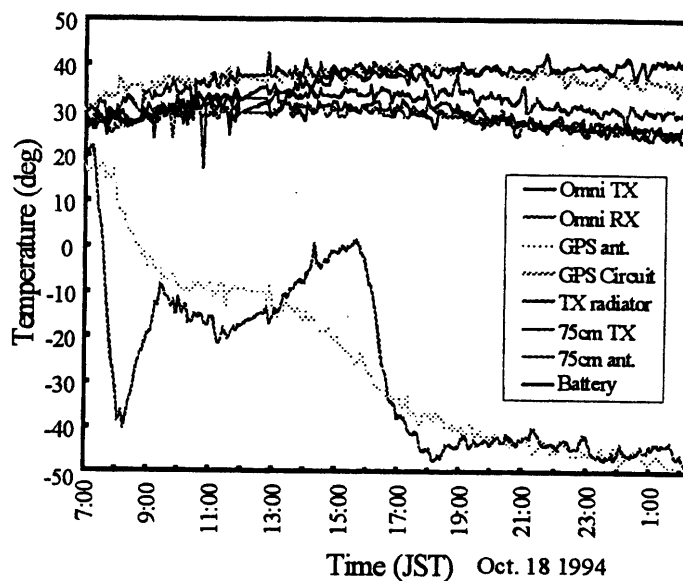
第1回目の実験で用いたFM-FSK変調方式通信システムその他、気球の上昇中などゴンドラの姿勢が安定しない場合でも通信可能な無指向性アンテナを用いたPSK変調方式通信システムを開発して搭載し、同時運用可能な冗長構成とした。また、地上系通信システムの利用できない三陸からの見通し範囲外では気球の測位が不能となるため、GPSによる測位装置を搭載した。基地局および回線の構成は第1回目の実験と同様である。



第9図 第2回目の飛行高度の履歴

気球は順調に飛行し、通信もゴンドラの切り離しまで確保することができた。気球の航跡および飛行高度の変化を第8図、第9図に示す。航跡は気球より伝送されたGPSデータをプロットしたものである。また、高度はGPSのほか、気圧計によるデータを示す。気圧計とGPSによるデータはよく一致しており、GPSによる測位は有効であると考えられる。

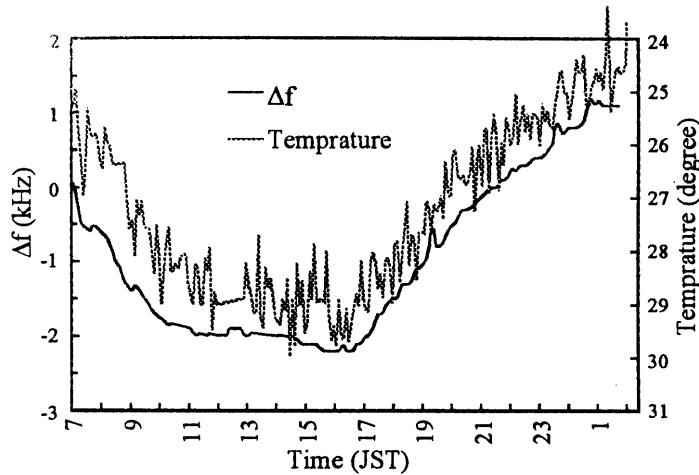
大気球では飛行高度が高いため、通常の移動体地球局では問題とならない、気温変化、気圧、日照などによる影響が問題となる。第10図に各部温度の変化を示す。断熱材で保護されたゴンドラ内では20～30度程度であるが、外気にさらされたパラボラアンテナの支持部は-40度以下となっている。第11図にPSK変調器の温度と送信周波数の偏差を示す。周波数変動特性は約 $5 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C}$ であるが温度変化が大きく周波数変動幅は3 kHzと復調器のロックレンジを越えるものであり、変調速度が1200bpsと低速な場合、改善がより必要とされる。



第10図 気球飛行中の各部温度



1600kmと長距離の飛行では、衛星の仰角、方位角はそれぞれ44～40度、170～192度と変化する。実験中、特にパラボラアンテナの方向制御を行わなかったが、FM-FSK変調方式の回線においても誤りの増加は認められなかった。アンテナの半値幅に比較して方位角の変化は大きい、衛星搭載アンテナのビーム中心に向かうことやFM-FSK変調方式の回線マージンが大きかったためと考えられる。また、飛行中に仰角、方位角をコマンドで制御し、5度程度変化させたが受信電力に大きな変化は認められなかった。



第11図 P S K送信器の温度と送信周波数の偏差

## 5. 気球データの衛星中継における課題

ETS-Vを用いて気球データの静止通信衛星による中継技術の検討をするため、気球搭載用の小型地球局の開発および実験を行ってきた。これら研究を通じ、以下のことが明かとなった。

- (1)無指向性アンテナを使用した通信システムは、気球の姿勢に関らず通信できるため有用である。
- (2)気球のより戻し制御によるアンテナ指向方向制御は有効であり、1.5m規模のLバンドアンテナを搭載することが可能である。
- (3)気球の飛行中の環境変化が大きく低速な伝送システムでは温度による周波数変動を十分考慮することが必要とされる。

ETS-V相当の衛星を利用した効率的な通信システムとして、監視・制御データの伝送には常時通信可能な無指向性アンテナを用いたシステムを使用するとともに、指向性アンテナを用いて観測データの高速度伝送を図ることが有効であると考えられる。

気球を用いた実験では天候に左右される要素が大きく、特に長時間飛行をねらったブーメランフライトに適した機会は少ない。第2回目の実験もETS-Vの運用終了が近づいてきたため、見通し外への飛行を優先し、通信実験のみと限定して実験を実施した。このため、実際の観測データの伝送を行うことはできなかった。大気球データ通信実験は、ETS-Vの運用期間中に搭載地球局の改良や新たな搭載地球局の開発が困難であることから、終了することとなった。今後、新たな衛星利用を図り、気球の長時間運用を実現するためには、本共同研究で明らかになった課題について検討していくことが重要である。

## 6. まとめ

大気球に搭載して監視・制御データの伝送に使用できる衛星通信用小型地球局を開発した。変復調器にDSPを用い動作の安定化を図るとともに、無指向性アンテナを使用することによりゴンドラの姿勢にかかわらず安定に動作する監視・制御データ回線を提供することができた。実験はETS-Vの運用期間から終了することとなったが、今後、気球観測の長時間化を検討する上で役立つデータが得られたと期待する。

本研究は、通信総合研究所と宇宙科学研究所の共同研究として実施された。実験を行うに当たり、ご協力いただいた宇宙科学研究所気球工学部門および通信総合研究所鹿島宇宙通信センターの関係各位に感謝の意を表します。

## 参考文献

- [1] 鈴木龍太郎、門脇直人、田中正人、矢島信之、「静止衛星による気球データ伝送の検討」、1991年大気球シンポジウム、宇宙科学研究所
- [2] Suzuki R., Yajima N., “Balloon System for Data Collection and Command Sending by means of Geostationary Satellite” , 18th ISTS, May 1992
- [3] 鈴木龍太郎他、「無指向性アンテナを用いる気球用衛星通信システムの開発」、1992年大気球シンポジウム、宇宙科学研究所
- [4] Suzuki R., Hamamoto N., Yajima N., “Mobile Satellite Communication Terminal with Omnidirectional Antenna for Balloon System” , 19th ISTS, May 1994
- [5] 鈴木龍太郎他、「ETS-Vを用いた気球実験のための小型地球局の開発—その1 RF系の開発」、通信総研季、Vol.41, no.1, pp.11-27, March 1995
- [6] 浜本直和他、「ETS-Vを用いた気球実験のための小型地球局の開発—その2 DSPを用いたパケット変復調器の開発」、通信総研季、Vol.41, No.1, pp.29-41, March 1995