

1992年度南極周回気球実験

並木 道義^{*1}・利根川 豊^{*2}・佐藤 夏雄^{*3}

他 PPB ワーキンググループ

Polar Patrol Balloons in 1992

By

Michiyoshi NAMIKI, Yutaka TONEGAWA, Natsuo SATO and

PPB Working Group

Abstract : The Polar Patrol Balloon (PPB) project aims to realize an extremely long duration circumpolar flight over Antarctica and to perform several unique scientific observations.

Since 1982, the National Institute of Polar Research and the Institute of Space and Astronautical Science have studied the feasibility of long term circumpolar flight at the polar region in the summer season. The PPB flight technologies and on-board systems have been developed through Japanese and Norway's balloon campaigns since 1984. The first PPB test flight was carried out from Syowa Station in December 1987 to obtain the fundamental data of balloon technologies.

Having the success of the previous test flights, the first PPB campaign for the purpose of scientific observations were consequently accomplished during the austral summer season in 1990 FY using two large zero pressure balloons, and many useful data were obtained. As the second campaign, from December 1992 to January 1993, three balloons were launched from Syowa Station in Antarctica by the members of the 33rd and 34th Japanese Antarctic Research Expeditions. We describe about the balloon launching operation and flight trajectories of these three PPBs in this paper.

概 要

南極周回気球 (Polar Patrol Balloon 以下 PPB) 実験は、南極域の夏期 (12月～1月) に安定して吹く高層の偏東風を利用して大型の観測大気球を南極大陸に沿って2～3週間で周回させ、長時間にわたって広域観測を実現させようとするものである。こうした気球実験の可能性

*1 宇宙科学研究所

*2 東海大学 工学部

*3 国立極地研究所

*4 神奈川大学 工学部

*5 理化学研究所

*6 東北大学 理学部

*7 京都大学 超高層電波研究センター

*8 名古屋大学 太陽地球環境研究所

(PPB ワーキンググループ)

矢島 信之^{*1}・山上 隆正^{*1}・太田 茂雄^{*1}

秋山 弘光^{*1}・松坂 幸彦^{*1}・本田 秀之^{*1}

鳥海 道彦^{*1}・鶴田浩一郎^{*1}・遠山 文雄^{*2}

平澤 威男^{*3}・江尻 全機^{*3}・山岸 久雄^{*3}

宮岡 宏^{*3}・門倉 昭^{*3}・小野 高幸^{*3}

西村 純^{*4}・小玉 政弘^{*5}・福西 浩^{*6}

山中 大幸^{*7}・藤井 良一^{*8}

は1982年より検討が進められ[1], [2], 1984年度からはオートバラスト装置など PPB システムの開発が国内およびノルウェーでの気球実験を通じて行われた。1987年（第28次隊）、1989年（第30次隊）には南極域で初の PPB 気球実験の基礎となる工学飛翔実験が実施され、周回飛翔の確実性を立証した。

1990年度からは、国立極地研究所の3年計画として科学観測を目的とした南極周回気球実験が実施されることになり、1990年度（第32次隊）では2機の観測器を放球し、PPB 気球の有効性が実証された[3], [4]。

ここで報告する1992年度は、観測最終年度となり、宇宙科学研究所および関連研究機関、研究者の協力のもとに3台の観測機器と大気球3機を昭和基地に搬入し、第34次隊夏期オペレーション中に第33次隊、第34次隊合同で3機すべての気球を放球し、観測を実施した。

1. 搭載機器および気球

PPB を行う上で特に必要となるシステムは、気球が飛翔中に高度を自動的に維持するオートバラストシステム、地上局と交信できない地域を飛翔中のテレメータ伝送、収録システムおよび長時間フライト中動作を続けるための電源システムである。

1.1 オートバラスト気球高度維持システム

本装置は精密気圧計から得られる気圧データを用い、設定高度を基準として観測器内部の判定回路によって判断し、あらかじめ設定された高度以下に気球が下降した場合、一定間隔で自動的にバラストを投下し、設定高度以下に気球が下降しないようにする高度維持装置である。投下するバラストはスチールショット（直径1 mm 以下のスチール製の細粒）であり、1回当たり10秒間（2 kg）バラスト弁の電磁石をON-OFF することによって投下する。バラストは3台の観測器とも150kg 搭載し、気球が設定高度以下になるとバラストの投下を行うが、2回目以降のバラストの投下は5分の間隔をおいて行い、バラストを最小限に投下するように設定されている。

1.2 長時間観測用電源システム

長時間飛翔用電源としてリチウムの一次電池を使用した。電池容量の算出は周囲温度を0℃として計算し、すべて2種類のリチウム電池（エレクトリックケム社：3B76, 30Ah, 松下電池：単2型LRC, 約3Ah）の各々の組み合わせによって行った。

観測器 PPB-4 号機、PPB-5 号機は25日間以上動作する電源として41W/hr. 分の電池を搭載し、PPB-6 号機は20日間以上動作する電源として27W/hr. 分の電池を搭載した。

1.3 気球

PPB 観測の最終年度では観測側の要望もあり、使用した気球は従来のものより大型化し B30型（39,667m³）2機および B50型（59,467m³）1機の計3機を使用した。気球は米国ウインゼン社製であり、その諸元を表1に示した。

気球は高度が低下した場合に気球下部が負圧となり排気口（気球下部2箇所）から空気が流入する恐れがあるので、長時間の飛翔を確実にするため気球の排気口にすべてゴム製の磁石を取り付け、逆止弁の効果を持たせた。（写真1）

放球した観測器の外観を写真2, 写真3に示す。

1.4 伝送システムおよび記録

データ伝送は2系統搭載し、1系統は見通し範囲内でのテレメータ伝送として、1.6GHz 帯を使用した1,200 bps のシリアル伝送方式を採用した。受信は狭帯域受信機の出力を直接モデムで復調させ、計算機に取り込む方式を用いた。また、8 mm ビデオ録画装置（SONY 製ステレオ6トラック, EV-S900）の音声帯域2チャンネル

表 1 使用した気球の諸元

項 目	PPB-4 号機 PPB-5 号機	PPB-6 号機
気 球 容 積 (m ³)	39,667	59,467
たたんである時の全長 (m)	66.45	75.34
満膨張時 直 径 (m)	45.57	52.68
高 さ (m)	40.23	44.20
重 量 (kg)	148.79	189.16
フィルム 厚 さ (μm)	17.8	17.8
ゴア数 (枚)	55	64
ロードテープ 数 (本)	55	64
ガス注入口 本 数 (本)	2	2
頭部からの長さ (m)	7.0	7.0
排 気 口 数 (本)	2	2
〃 総面積 (m ²)	2.8	3.7

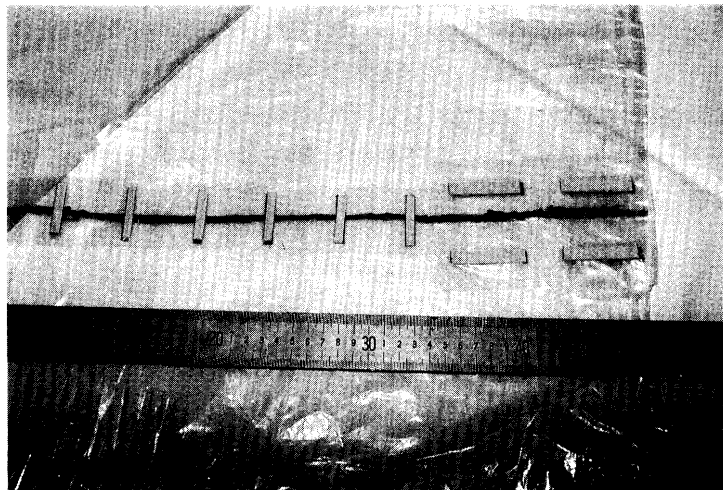


写真 1 気球の排気口に取り付けたゴム板磁石

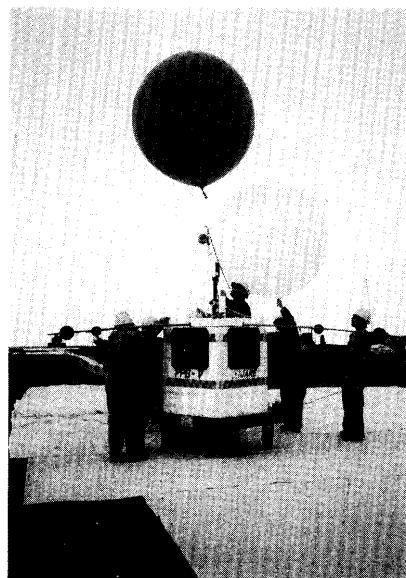


写真 2 PPB-4 号機の観測器

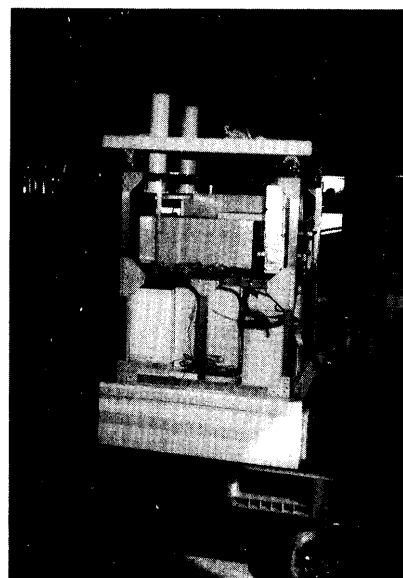


写真 3 PPB-6 号機の観測器

ルを使用し、1チャンネルにはIRIG-Bの時刻信号を、2チャンネルには狭帯域受信機出力からのビデオ信号を直接記録した。

2系統目はNOAA衛星経由でデータ伝送を行うアルゴスシステムを利用してデータの取得を行う方式である。PPB観測の伝送容量を増すため、1台のアルゴス送信機が複数台の役割をするマルチアルゴスシステムが開発され、1990年度実験から実用化された[3]。前回の実験では2IID（IIDは64ch）方式を採用したが、今回は4IID（IIDは32ch）方式を用いた。アルゴス送信機は基本HKおよび位置検出専用（IID）に1台と、観測データ伝送用および気球位置検出用（4IID）に1台と合計2台のアルゴス送信機を搭載した。この伝送データーは極軌道を周回するNOAA衛星を経由し、フランスのアルゴスサービスセンターにある大型計算機に伝送され蓄積される。この情報は昭和基地より直接テレックスでアクセスすることにより観測データーおよび気球の位置情報を取得することができる。

1.5 観測項目

PPB-4号機、PPB-5号機の観測器は全く同一に製作されており、できる限り日をおかずに打ち上げ、同時に周回飛翔させ、同一風系上の異なった2点の同時観測を目的としていた。ゴンドラにはオーロラX線の観測器、全磁場の観測器（フラックスゲート、プロトン磁力計）およびX、Y、Z3成分の電場と3項目の観測器が相乗りしている。電場の観測では気球本体から静電気の影響をできるだけ避けるため、巻き下げ器が搭載されており気圧スイッチにより気球本体から100m巻き下げた位置で観測が行われた。

PPB-6号機は宇宙、太陽、オーロラからのX線観測および宇宙線の観測を目的として、SSD検出器、CsI検出器、NaI検出器の3種類の観測器が搭載された。

2. 地上設備

2.1 昭和基地

昭和基地は周開約7kmの小さな島（東オングル島）にあり、位置は南緯69°、東経39°35′である。図1に主要部を中心にした昭和基地の全景を示す。

2.2 放球場およびランチャー

大気球放球に使用した場所は、基地中心部から東へおよそ1km離れた新ヘリポートである。また観測器の組立、調整には基地中心部にある作業棟を使用した。この作業棟は、平らなコンクリートの床でホイストクレーンを備えている。

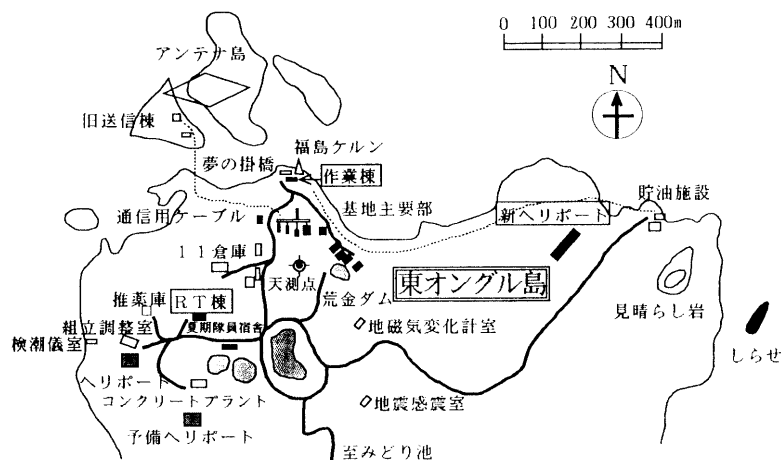


図1 昭和基地全景

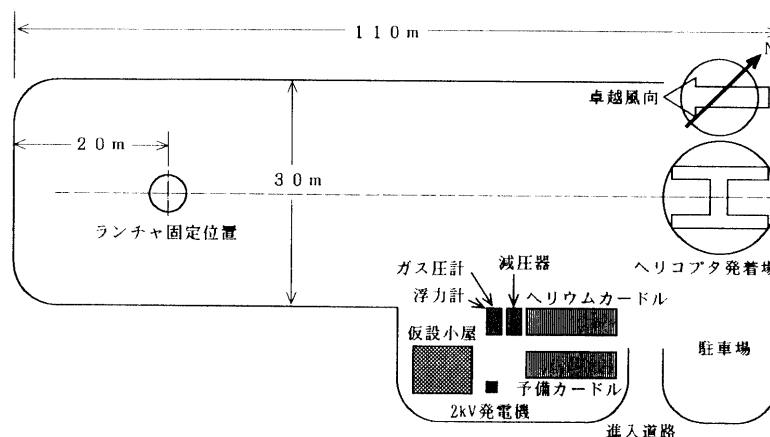


図 2 放球場設備等配置

今回は、使用した新ヘリポート（Cヘリポート）に隣接された荷物集積場の端に仮設小屋を建設した。仮設小屋の大きさは、外寸幅7,240mm、奥行き6,400mm、高さ3,400mmであり、実効内容積は幅5,280mm、奥行き4,440mm、高さ3,400mmである。入り口の開口部は幅1,640mm、高さ2,000mmである。図2に放球場として使用した新ヘリポートに設置した設備および仮設小屋の配置等を示す。

放球場の広さは幅30m、滑走路長110mであり、脇に荷物集積場および駐車場としての場所もあり、よく整備された所である。滑走路風下側の端から20m位置にはランチャーをセットするためにアンカーが打っており、取り付けも簡単にできた。ランチャーは、図に示すヘリウムガス圧力計の置かれた位置に32次で保存してあったが、3重にカバーをしてあったので全く傷んでいなかった。ロードセルは外してRT棟に保管されており、今回の実験終了後も同じように保管した。放球場の注意点は、滑走路全体に金網が掛けてあり、タールで固定されているが、所々金網が浮いており足を引っ掛けやすいことである。

2.3 ヘリウムガス供給および浮力測定装置

ヘリウムガス供給システムは、南極の気象観測用として使用されているシステムと同じもので一般に使用されている7m³のボンベ8本を組み合わせて1つのカードルとした。今回の実験ではすべて大型の気球を使用するため、新規に10カードル製作し、合計40カードル320本を昭和基地に搬入した。PPB-4号機およびPPB-5号機はほぼ同じ総重量であるため13カードル104本のボンベを使用した。ボンベ本数が多く、配管作業にかなりの時間を要した。また各カードル出口はボール弁で開閉できるようになっている。

13カードルの集合点に、アナログとデジタル表示の圧力計を取り付け、ボンベのガス温度を測定するための温度計をボンベの2箇所別々の場所に直接取り付けた。これらの圧力計、温度計より、ヘリウムガスの初期圧力、初期温度を正確に読み取れるようにし、それらの値と総浮力量より換算表を用いて最終圧力および最終温度を決定した。また放球に使用するランチャーには浮力を測定するためのロードセル張力計（浮力計）を設置してある。このロードセル張力計により気球についての最終浮力の確認および穴等による気球からのヘリウムガスの漏れの監視等を行った。これら圧力計および浮力計の2つの方法によって正確な浮力量の測定ができるようにした。

2.4 観測器用台車

今期、夏期オペレーション中に3機の気球（観測器）を放球するが、PPB-4号機およびPPB-5号機は同時観測が主要な目的であるため、作業が円滑に行えるよう32次で製作したゴムタイヤを取り付けた台車とほぼ同じ台車をさらに2台製作し、搬入した。1台は気球を伸長する際の台車として使用し、他の2台は観測器の台車として使用した。またPPB-6号機は、前日までに観測器を整備し、放球場の仮設小屋に移動し、安置させておくこ

とにした。

2.5 ローラー車

気球にヘリウムガスを注入する際、気球の保持および気球を立て上げる時に使用するローラー車は30次に製作されたもので、ミニブルドーザを改良して製作し、先端の機構を取り替えることにより通常はブルドーザとしても使用できるものである。古くなってきたためエンジンをかけると多少前後に移動しやすく停止させて置くのに熟練が必要である。気球を完全に立て上げた後、ランチャー上でローラーを開口させる際、ローラー部分が重く、油圧力も小さいためローラー部分を地上から2 m 位まで下げないと開口させることができないので注意が必要である。

2.6 受信設備

2.6.1 受信設備

受信装置は、観測棟にある NOAA 衛星受信設備の性能は良く、気球からのテレメータも受信機の受信ユニットを交換するだけで使用できる装置であるが、アンテナを動かす制御機構が壊れており、使用できないので RT 棟のロケットレーダー用受信装置を使用して気球追尾受信を行った。

ロケットレーダー用の受信機は、1.6GHz 帯のテレメータ用電波を受信できるが、ワイドバンドであり、気球用テレメータとして使用するために狭帯域受信機を通して気球用テレメータを受信した。可視範囲におけるテレメータ復調は受信機のビデオの出力信号を1,200bps のモデム復調器で復調し、その出力を RS232C を介してパーソナルコンピュータに取り込み、観測データの処理および記録を行った。また同時にテレメータ信号で送られてくるデータは、狭帯域受信機出力の FM 信号を直接 8 mm ビデオデッキに記録した。

2.6.2 コマンドシステム

気球制御用のコマンド送信装置としては周波数72.3MHz、出力10W の送信機にダブルトーン方式による6項目の(制御)信号を送出することで制御を行う。28次隊で門倉氏が製作したコマンドアンテナをテレメータアンテナにスレーブさせるプログラムの一部を改良し、正確に動作するようにした。

32次の気球実験では、昭和基地に周回してきた気球に昭和基地より指令電波を送出し、観測器に搭載していたデータレコーダの蓄積データをテレメータにより回収する予定であったが、ダウンリンクが作動しなかった。この原因としては搭載機器、電源および地上設備の不具合が考えられた。今回はコマンドの地上設備の整備を本国で行ってきたので、現地での送信チェックを行った。コマンド用八木アンテナの素子は新品を持参し、交換した。図3に気球の追跡、送信システムを示す。

アンテナ交換後、終端型電力計を用いてケーブルの送信ロスを測定した。測定した箇所を図4に示し、A, B 端での測定結果を表2に示す。この結果、80m あるケーブルによっておよそ3 dB 減衰し、反射を考慮するとコマンドの実効出力は約4 W しか出ていないことが分かった。今後、できればアンテナ塔の真下に防水箱を設置し、送信部を収納してケーブル損失の低減を図った方が良い。地上からの測距信号により、気球までの距離を測定する測距のテストも行った。送信機および測距器本体の機能は正常であったが、コントロール回路の接続に問題があり、今回は測距を行わなかった。

3. ヘリウムガス注入量の決定

ヘリウムガスの注入量は観測器の総浮力とヘリウムガスの初期圧力、初期温度によって決定することができる。放球する気球、観測器の総浮力はあらかじめ得られるが、ヘリウムガスの初期圧力と初期温度は、ヘリウムガスの注入開始時に計測することにより正確な注入量を得ることができる。前回までは注入開始直前にヘリウムガスの初期圧力と初期温度を計測し、その場で注入量を計算し、必要なポンペの本数およびヘリウムガスの最終注入圧力等を決定しなければならなかった。今回第34次隊ではできるだけ作業を簡潔化するために、ヘリウムガスの注入量を決定するための浮力推定曲線図をあらかじめ作成しておく方法を採用した。

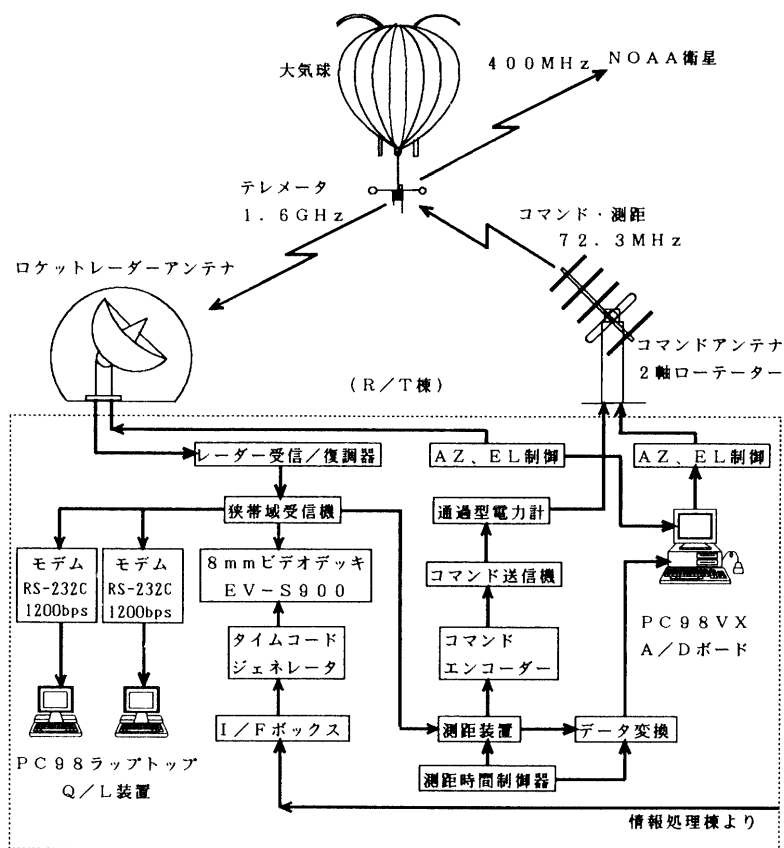


図 3 気球追尾、受信システム

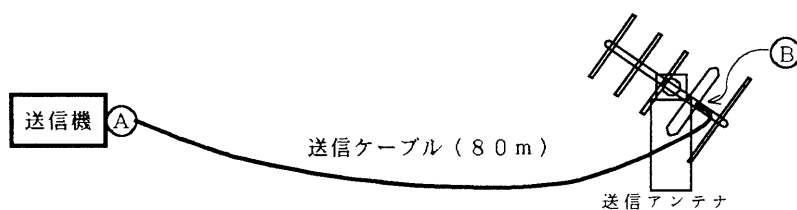


図 4 コマンドアンテナ

表 2 コマンド出力

測定箇所	送信出力	反 射
送信機の出力 (A)	10.0 W	0.0 W
ケーブル終端 (B)	5.2 W	1.2 W

過去の南極における気球実験から初期ガス圧力 (136~131 kg/cm²), 初期ガス温度 (8~0°C) の状態と南極で使用しているボンベ 1 本が 1 kg/cm² あたり 0.04725kg の浮力が得られることが分かっている。また, 総浮力から必要なボンベの本数もあらかじめ決定しておくことで, 初期ガス圧力と初期温度によって, 最終温度と最終圧力を推定することができる。南極におけるボンベでの浮力量は,

$$F=0.04725 \times B_N(X/(1+GX) - Y/(1+GY)) \quad (1)$$

で算出される。ここで, $X=293P_O/(273+T_O)$

$$Y=293P_F/(273+T_F)$$

$$G=5.03 \times 10^{-4}$$

P_O, T_O : 初期圧力, 初期温度

P_F, T_F : 最終圧力, 最終温度

B_N : 使用ボンベの本数

である。また, 最終温度 T_F の予測式は,

$$T_F=T_O-A(P_O-P_F)(273+T_O) \quad (2)$$

である。ここで定数 A は, 三陸のコンテナに使用している同じ値

$$A=3.5 \times 10^{-4}$$

を用いた。

(1), (2) 式より, 最終圧力 P_F を求められる。

$$P_F=(273+T_O) Y(1-AP_O)/(293-A(273+T_O)Y) \quad (3)$$

となる。当然, 最終温度 T_F は P_F を (2) 式に代入して求められる [5]

上式を用いて, 初期圧力 P_O を 130kg/cm² から 140 kg/cm² で初期温度を -6°C から 14°C までをパラメータとして最終圧力および最終温度を推定したものが図 5 である。

図 5 の X 軸下側の数値は初期温度, 上側は最終温度で Y 軸は最終圧力である。この図を使用して, 仮に総浮力 473.2kg, 初期圧力 136 kg/cm², 初期温度 1°C でボンベの使用本数を 96 本とすると X 軸 1°C 位置と初期圧力線 (136 kg/cm² ▲ の線) の交点を Y 軸 (最終圧力) 上で見ると, 28.5 kg/cm² となり, ヘリウムガスの注入は一次圧力が 28.5 kg/cm² になるまで注入すれば良いことになる。また最終温度が仮に 2°C 異なっても浮力の精度としては 1% 以下であり, あまり問題にならないことから, 今回はこの方式を採用することにした。

4. 気球放球準備作業

4.1 放球場準備

12月17日に昭和基地までおよそ 50km と近づいた「しらせ」は, ヘリコプターのテストフライトおよび第一便を飛行させる予定であったが, 悪天候のため延期され, 翌12月18日に初飛行が行われ, その後次々と観測隊員および観測機材の輸送が行われた。翌日は新ヘリポートに気球用仮設小屋が建設され, 放球場となる滑走路の除雪作業, 小石等の除去も行われた。昭和基地到着後 4 日目には作業棟において PPB-4 号機, PPB-5 号機, および必要物品の開梱作業とヘリウムガスコンテナの配管作業等が順次行われ, 24日に予定されていたリハーサルも予定どおりに行うことができた。リハーサルでは各人の作業を直接体験することを主眼とし, 実際に昭和基地に保存してあった予備気球を使用し, 繊細な気球の展開等を注意深く行う練習を実施した。なお, 放球場となった新ヘリポートは, 34次が到着する前に33次の宙空隊員達によって除雪されていたおかげで, 放球場としての準備作業がスムーズに行えた。この新ヘリポートは滑走路をもう少し平端に改善する必要があるが, 他の場所と比較するとはるかに整備されているといえる。表 3 に夏期期間中気球実験に実施した作業項目等を示した。

4.2 放球時刻の決定

大気球を放球する際, 最も重要なことは地上風が弱く, 安定している時間帯を捜すことである。日本での大気

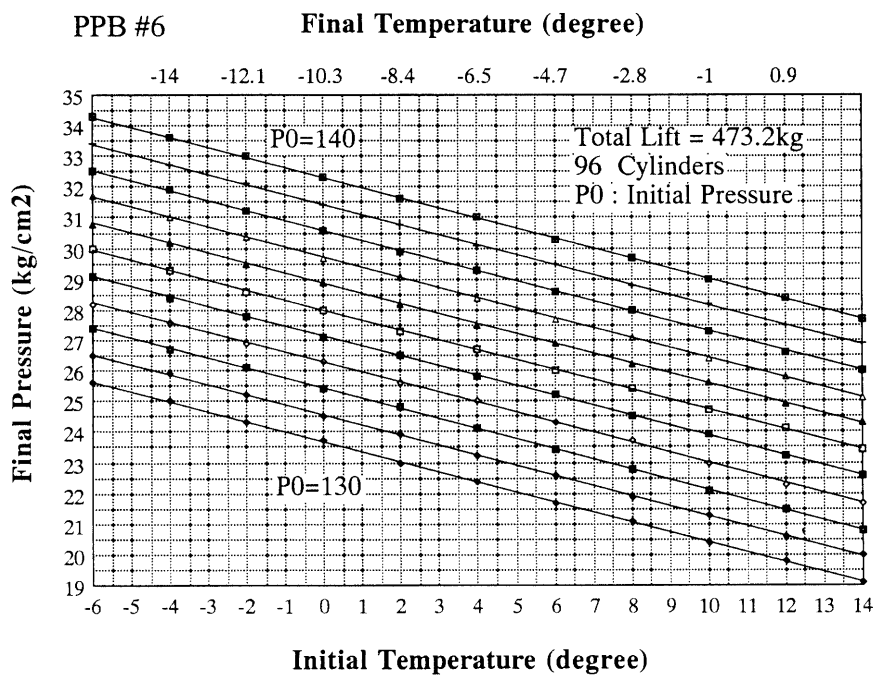


図 5 ヘリウムガス浮力決定曲線

表 3 気球実験の実施作業項目

月 日	実 施 作 業 項 目
12月	
18日	昭和基地に隊員輸送および物資搬入, 33次宙空隊員と打ち合わせ
19日	放球場に仮設小屋の建設
20日	滑走路上の除雪, ヘリウムガス搬入
21日	ヘリウムガス配管, ランチャー設置とロードセルの取り付け
22日	作業棟にて PPB-4 号機, PPB-5 号機開梱, 電源チェック, 鉛の較正, RT 棟コマンドアンテナ交換, コマンドチェック, 4, 5 ともバラスト注入
23日	ヘリウムガス漏れチェック, ミニブルローラー取り付け, ランチャー較正
24日	電波試験, データ取得確認, 気球開梱, 午後放球リハーサル
25日	観測器最終チェック
26日	※ PPB-4 号機放球 16時24分
27日	ヘリウムカードル交換, PPB-5 号機最終調整, 電波試験
28日	一日中風速 10~20 m/sec のため, 放球延期
29日	風速 6~7 m/sec のため, 再度放球延期
30日	※ PPB-5 号機放球 17時33分, 「しらせ」接岸
31日	34次隊員全員「しらせ」に帰艦
1月 1 日	一日休養日
2 日	PPB-6 号機開梱, ヘリウムガス配管撤去作業
3 日	残ヘリウムガス搬入, ガス配管, PPB-6 号機調整
4 日	回路一部取り外し, 観測器最終チェック, 電波試験
5 日	※ PPB-6 号機放球 11時55分
6 日	あとかたづけ
7 日	仮設小屋撤去

表 4 1992年12月18日～1993年1月6日の昭和基地における地上風

月日\時間	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
12/18	5.0	2.5	5.0	4.0	2.0	1.0	1.0	2.0	4.0	1.0	0.0	2.5	2.5	4.0	3.0	2.0	2.0	2.0
19	12	11	10	8.0	7.0	6.0	4.0	3.5	2.5	2.0	2.0	1.0	2.0	3.0	4.0	4.5	2.5	8.0
20	8.0	4.0	7.0	5.0	9.0	5.5	4.5	4.0	4.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	2.0	0.0	2.0	6.0
21	9.0	10	9.0	7.0	5.0	4.0	3.5	2.0	1.0	3.0	3.0	4.5	3.5	4.0	4.0	3.0	3.0	3.0
22	5.0	5.0	4.0	3.0	1.0	2.0	1.0	2.0	2.0	4.0	4.0	5.0	4.0	4.0	3.0	2.5	2.5	4.0
23	6.0	6.0	1.0	5.0	4.0	1.0	3.0	3.0	3.0	4.0	4.0	5.0	5.0	5.0	4.0	3.0	3.0	3.0
24	10	9.0	9.0	8.0	6.0	4.0	4.0	2.5	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0	2.0	2.5	2.5	1.0	1.0
25	5.5	4.0	5.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.5	6.0	5.5	5.5	5.0	4.5	2.0	1.0	2.0	1.0
#4 26	0	0	0	1.0	1.0	1.5	1.5	1.5	1.5	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.5	0.5
27	0.5	0.5	2.0	2.0	3.0	3.5	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0	2.0	3.0	2.0	2.0	2.5	1.0	3.0
28	11	14	12	13	13	11	16	15	12	11	16	16	16	16	16	18	15	15
29	14	14	13	13	12	11	9.0	10	7.0	7.0	4.5	3.5	3.5	6.0	2.0	4.5	4.0	2.0
#5 30	3.0	4.0	7.0	4.0	4.0	3.5	2.0	2.5	3.0	3.0	0.5	2.0	2.0	1.5	1.0	0.5	2.0	3.0
31	10	11	9.0	12	10	7.0	2.0	1.0	7.0	8.0	8.0	2.0	4.0	2.0	1.0	2.0	0.5	1.0
1/1	16	14	15	14	16	14	12	12	13	16	16	20	19	16	13	12	12	10
2	8.0	8.0	8.0	8.0	7.0	7.0	6.0	8.0	5.5	5.0	5.0	3.0	2.0	2.5	3.0	4.0	4.5	4.0
3	8.0	6.0	5.5	5.0	6.0	4.5	5.0	5.0	4.0	2.0	4.5	5.0	5.5	5.0	3.0	3.0	1.0	2.0
4	2.0	0	0	2.0	1.0	2.0	3.0	3.0	2.5	4.0	4.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.5	3.0	2.5
#6 5	1.0	1.0	2.0	3.5	3.5	4.0	4.0	4.0	4.5	4.5	4.5	4.0	4.0	4.0	4.0	3.0	2.5	2.0
6	1.0	0.5	0.5	0.5	0	0.5	0.5	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.5	2.5	3.0	4.0	4.0	3.5

数値は m/sec である。

: 放球した号機を示す。

* : 放球したおよその時間帯を示す。

球放球では毎日、朝夕に風の時間帯があり、その時間帯の無風状態を利用してヘリウムガスの注入を行い、放球を行っている。昭和基地でも地上風の状況を把握し、地上風の弱い時間帯を探すために昭和基地の気象の方々に協力をお願いした。データ量は多いほどより正確に判断することができるが、昭和基地に到着後からのデータをもとに、放球時間を決定することにした。1992年12月18日～1993年1月6日の昭和基地における地上風を表4に示した。

表に示した時間は、放球に適した時間帯として午前5時～午後10時までを対象とした。ここで■の部分は、3 m/sec 以下の地上風が2時間以上続いている放球に適した時間帯を示している。

当初 PPB-4 号機（第34次1号機）は1992年12月25日を放球日として予定していたため、12月18日～12月23日までの地上風データにより放球時刻を決定することにした。表4のデータから、大きく分けて3つの時間帯に気球の放球可能な時間帯があることが分かった。この結果、放球時刻として12時、17時、22時の時間帯が適している。また、大勢の協力者にサポートしてもらうことを考慮に入れると、最終的に放球時刻は、17時頃を第1候補の放球予定とし、第2、第3の放球時刻の候補にはそれぞれ12時、22時とすることにした。今期第34次隊では、一週間の地上風データより気球の放球時刻を決定したが、今年度のこの時期では2日に1回の割合で放球可能な日があるように思われた。

5. 実験結果

5.1 実験実施態勢

気球実験を実施する放球場では全体を把握する総指揮官 1 名, ローラー車を運転操作するローラー車係 1 名, 気球周辺とランチャー操作の気球・ランチャー係 5 名, ガス計測・調整係 2 名, 観測器を見るゴンドラ係 2 名, ガス注入・保持係 3 名, RT 棟にて受信追尾のための受信係 3 名, 実験進行記録係 1 名, 映像・写真等の記録に 2 名の総勢 20 名の参加により気球実験を遂行した。

33 次, 34 次合同大気球実験参加者は以下のとおりである。

33 次隊 山崎一郎, 高橋幸弘, 峯野秀美

34 次隊 利根川豊, 蒔田好行, 六山弘一, 並木道義, 山口隆司, 森内秀樹, 村松金一, 薬科秀男, 高尾俊則, 鎌田吉治, 杉田興正, 桜井敬三, 角 貞巳, 熊崎博久, 松永重年

また, 33 次隊の松原和正気象チーフ他気象班の方々には, 地上気象の予報と気球放球直後から上昇中に, 気象観測用の受信機により気球の追跡等を行っていただいた。

各所への連絡を行う通信方法は, 放球場内ではワイヤレス送受信機(子局 4 局, 親局 1 局を総指揮官, ガス調整係, ローラー車係, 気球係)を使用し, 各実施作業の項目についてはハンドマイクを用いて行った。気象棟との連絡には無線式内線電話, RT 棟(受信場所)との連絡には専用の UHF 帯のトランシーバーを用いた。図 6 に各所への通信系統図を示す。

5.2 PPB-4 号機

(1) 気球, 観測器の構成および重量

PPB-4 号機の気球, 観測器の構成を図 7 に示し, その重量を表 5 に示す。

全磁力を測定するプロトン磁力計は重量約 6 kg でしかも他の金属部分(バラスト等)の影響を受けないように, 観測器から 15m 離れた。

PPB-4 号機, PPB-5 号機とも, 巻き下げ器および回転モーターは気圧スイッチにより動作させた。

(2) PPB-4 号機の放球

34 次大気球実験では PPB-4 号機, PPB-5 号機をできるだけ同時期に飛翔させ, 同時観測をさせることを 1 つの目的としているため, 両観測器の内容はすべて同一に製作されており, 観測器の調整作業も同時に進行させた。

PPB-4 号機の放球予定日とした 12 月 25 日は朝からやや風が強く, 平均風速 5~6m/sec であり, 午後 2 時になってもおさまらず翌日に延期した。12 月 26 日は風がおさまリ, PPB-4 号機を地上平均風速 1~1.5m/sec で放球することができた。表 6 に PPB-4 号機タイムスケジュールを示す。

(3) PPB-4 号機飛翔結果

テレメータの直接受信終了後の気球位置および観測データは, 昭和基地よりテレックス回線を使用し, フランスのアルゴスセンターのコンピュータに直接通信することにより, 最新のデータを取得した。搭載機器は当初すべて順調に動作していたが, 12 月 29 日分のアルゴスデータ(取得は 12 月 30 日 21:00 LT)を取得した結果, 温度計の出力が異常になっていることが分かった。ついで高度計の出力も異常となり, それ以降はオートバラストの投下回数も増加せず, バラストの投下が停止した。気球は放球後 9 日目の 1 月 4 日, 8 時 51 分(UT) 南緯 60 度 36 分, 西経 91 度 37 分の海上に着水した。図 8 に PPB-4 号機の飛翔航跡を示す。

5.3 PPB-5 号機

(1) 気球, 観測器の構成および重量

PPB-5 号機の気球, 観測器の構成は PPB-4 号機と全く同一で, 総重量もほとんどおなじで 486.85kg であった。

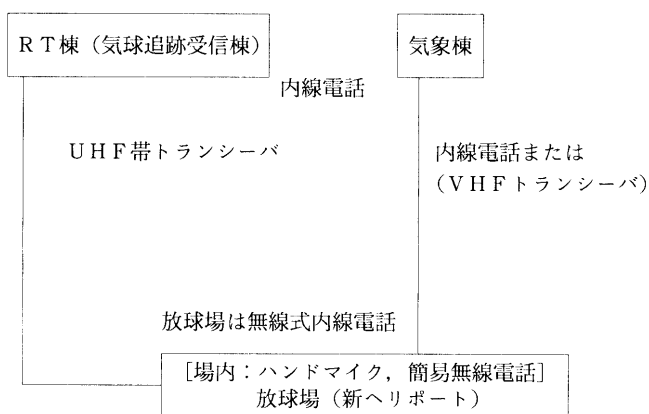


図 6 各所への通信方法

表 5 PPB-4 号機重量

気球	148.80 kg
観測器	143.52 kg
バラスト	150.00 kg
プロトンセンサー	6.45 kg
巻き下げ器等	33.90 kg
電場アンテナ	2.50 kg
電場アース板	2.60 kg
総重量	487.77 kg
自由浮力	48.8 kg(10%)
総浮力	536.57 kg
ランチャー浮力	387.77 kg

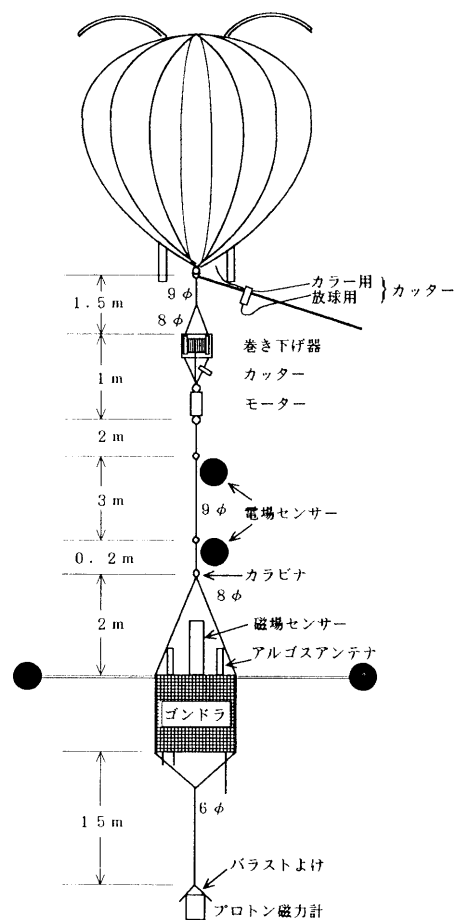


図 7 PPB-4 号機の気球，観測器の構成

PPB-5 号機は12月27日には放球準備が整ったが，12月28日，29日とも地上風が強く放球を順延し，地上風が弱くなった12月30日に放球準備を開始した。

(2) PPB-5 号機の放球

12月30日の午前中は地上風速も 6~7 m/sec と強く午前中の放球は順延した。しかし，午前11時には地上風速が 3 m/sec 前後となったため，午後 1 時から PPB-5 号機の放球準備を行った。表 7 に PPB-5 号機のタイムスケジュールを示す。

(3) PPB-5 号機飛行結果

PPB-4 号機は PPB-5 号機の放球した夜にアルゴスのデータにより，気圧計およびオートバラストが動作不良となったことが判明したが，PPB-5 号機の改良には間に合わなかった。したがって，PPB-5 号機も放球後，4 日目に同じ不具合により気圧計回路が動作不良となり，オートバラストが動作しなくなった。しかし PPB-4 号機と異なり，PPB-5 号機は図 9 に示すように長期間飛行した。これは PPB-4 号機が低緯度側を飛行したのに対し，PPB-5 号機はやや内側の高緯度側を飛行しているため，太陽高度角変化が少なく，結果としてガス温度による高度変動が小さかったためと考えられる。

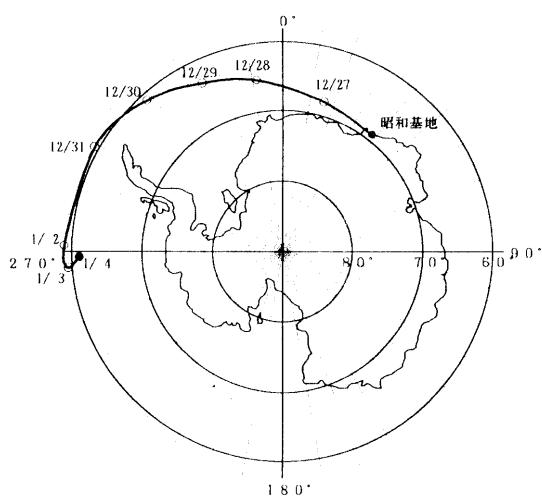
このように PPB-5 号機は予定高度より低かったが，南極大陸を周回し，さらに高度を下げて反対回りの風系に乗って飛行を続け，43日間にも及ぶ最長期間を飛行した後，1993年 2 月11日20時42分 (UT) 南緯39度58分，

表 6 PPB-4 号機タイムスケジュール

時 間	実 施 項 目
12月26日	
6:00	気象棟にて地上風の検討を行う。
10:00	作業棟より観測器を搬出。
:20	新ヘリポート着, ヘリウム圧力およびランチャー校正。
11:00	電場アンテナ, アース抜取り付け終了。
:20	RT 棟と電波チェック。
12:00	夏宿(レークサイドホテル)にて昼食。
13:20	新ヘリポートに再到着。
:57	グランドシート敷き開始。
14:17	33次, 34次サポート隊到着。
:49	観測器をランチャー位置へ移動。
:51	気球搬出開始。
15:06	気球をランチャーに取り付け, 結線, 結索。
:26	気球をローラー車にセット。
:34	ガス注入開始。
:40	気球頭部立て上げ。
16:10	ガス注入終了。
:11	気球立て上げ開始。
:14	気球立て上げ終了。
:16	ローラー車撤去。
:17	浮力測定, 確認。
:22	風向風速確認用パイロットゴム気球(赤玉)放球。
:23	安全コネクタ装着。
:24	PPB-4 号機放球。
18:24	高度 31.4 km で水平浮遊に入る。
12月27日	
1:40	気象のゾンデが発信を始め, 気球からの信号を受信できなくなったため地上での直接受信を終了する。

1992年12月26日, 16時24分(UT) 放球

○印は各日の最初に受信された位置



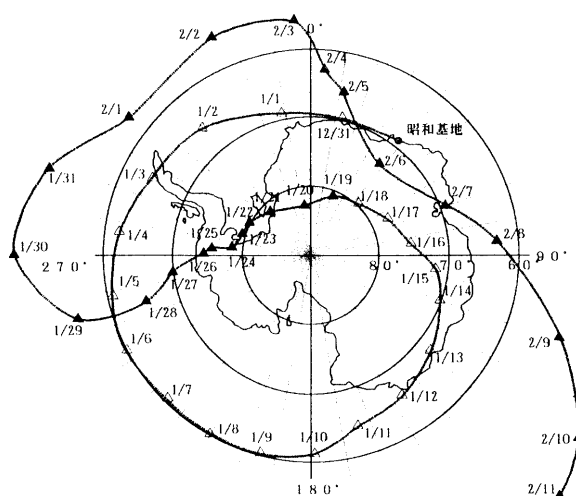
最終気球位置: 1993年 1 月 4 日 8 時51分

西経91度37分, 南緯60度36分

図 8 PPB-4 号機の飛行航跡

1992年12月30日, 14時33分(UT) 放球

○印は各日の最初に受信された位置



最終気球位置: 1993年 2 月11日 20時42分

東経133度49分, 南緯39度58分

図 9 PPB-5 号機の飛行航跡

表 7 PPB-5号機タイムスケジュール

時 間	実 施 項 目
12月30日	
6:00	気象棟にて地上風の検討を行う。
11:00	〃
13:00	観測器作業棟出発。
:20	新ヘリポート着, EFD プローブ取り付け, シート敷き開始。
14:10	ヘリウム圧力およびランチャー校正。
15:06	電波チェック開始。
:16	サポート隊到着。
16:03	気球搬出開始。
:11	気球をランチャーに取り付け, 結線, 結索。
:15	RT 棟よりコマンドテスト。
:43	ガス注入開始。
:47	気球頭部立て上げ。
17:11	ガス注入終了。
:12	気球立て上げ開始。
:15	気球立て上げ終了。
:16	ローラー車撤去。
:20	浮力測定, 確認。
:22	観測器移動。
:27	観測器再移動。
:31	風向風速確認用パイロットゴム気球(赤玉)放球。
:32	安全コネクタ装着。
:33	PPB-5号機放球。
19:30	高度 31.4 km で水平浮遊に入る。
12月31日	
1:00	データの復調が悪くなったため, トラッキングを終了した。

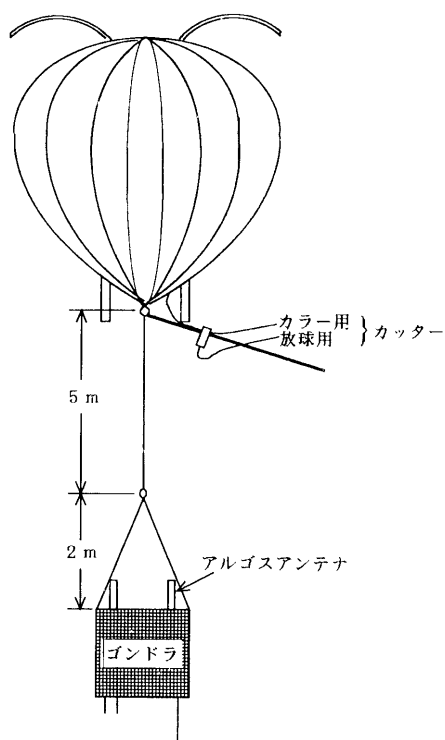


図 10 PPB-6号機の気球, 観測器の構成

表 8 PPB-6号機重量

気球	189.20 kg
観測器	95.00 kg
バラスト	150.00 kg
総重量	434.20 kg
自由浮力	43.4 kg(10%)
総浮力	477.60 kg
ランチャー浮力	288.40 kg

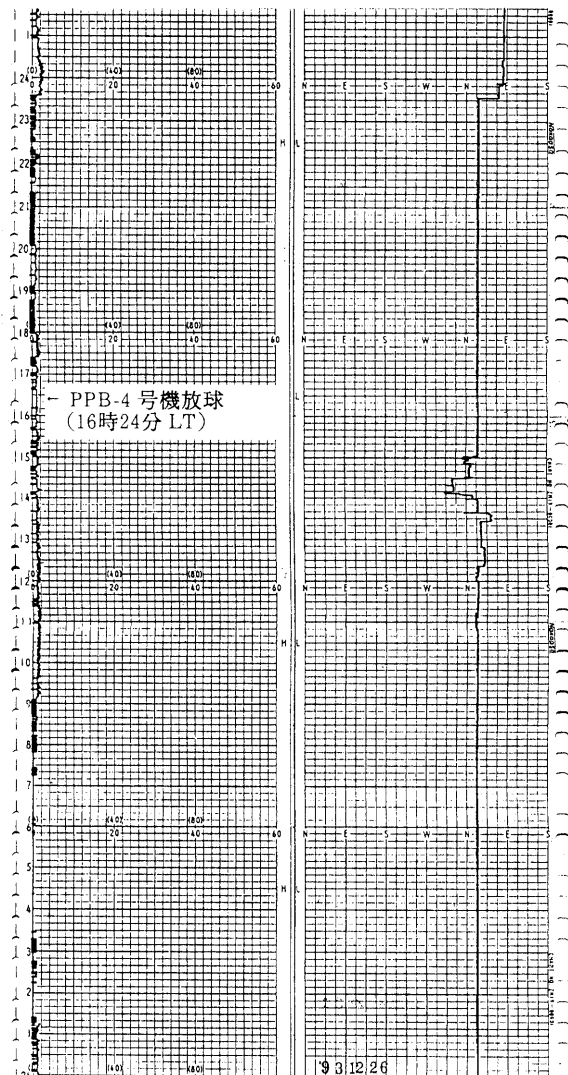


図 11 1992年12月26日 地上風の変化

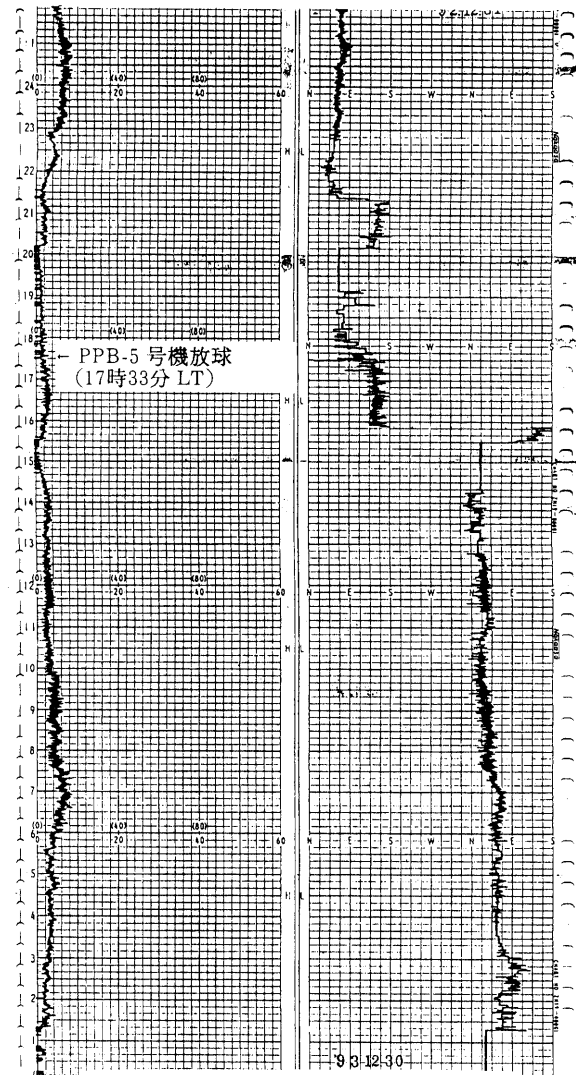


図 12 1992年12月30日 地上風の変化

東経133度49分の海上に着水した。

5.4 PPB-6 号機

(1) 気球, 観測器の構成および重量

PPB-6 号機の気球, 観測器の構成を図10に示し, 重量を表8に示す。

この観測器は宇宙線観測およびオーロラ X 線等の観測が目的である。外観の形状は PPB-4, PPB-5 号機のようにあまり突出している物はない。高高度へ飛翔させるため, 気球の大きさは PPB-4, 5 号機の1.5倍の59,467 m³を使用した。全長は75.3m であり, 南極の昭和基地で放球した気球の中で最も大きい気球である。

(2) PPB-6 号機の放球

PPB-4, 5 号機と同じトラブルを避けるため, 不具合が生じたと思われる回路を取り外した。1993年1月4日には観測器の調整, ヘリウムガスの配管準備等も整い, 観測器をあらかじめ新ヘリポートの仮設小屋へ運んでおいた。1月5日午前6時15分, この時点では地上風も弱く安定しているように見え, 午前中にも放球できると判断し, すぐに放球準備を始めた。放球場にでると地上風が少しあったので, すぐに風見用のゴム気球を製作し,

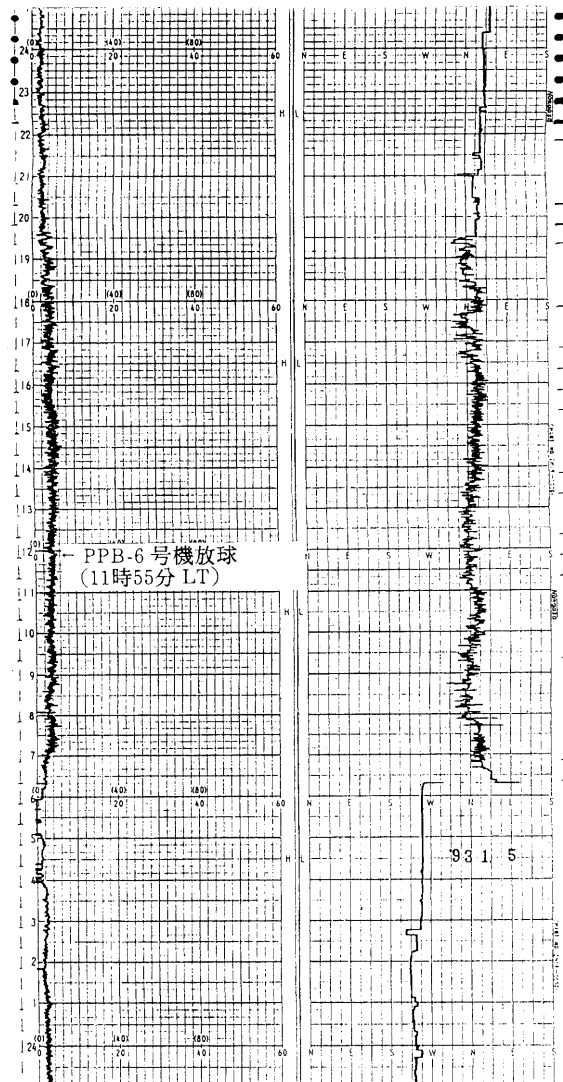
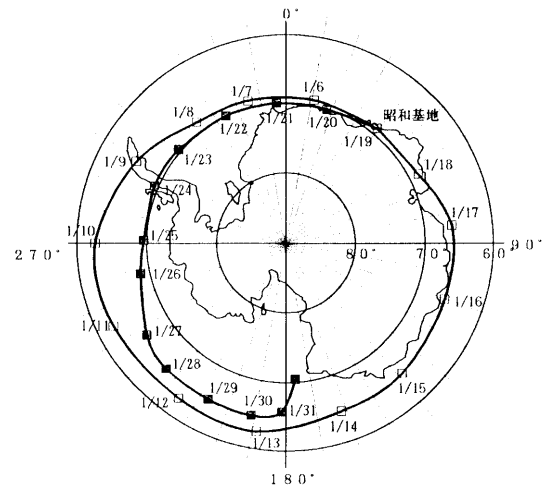


図13 1993年1月5日 地上風の変化

1993年1月5日, 8時55分 (UT) 放球
○印は各日の最初に受信された位置



最終気球位置: 1993年1月31日 22時45分
東経176度49分, 南緯70度38分

図14 PPB-6号機の飛行航跡

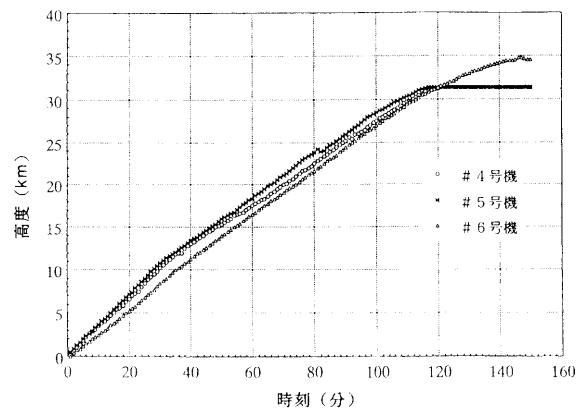


図15 気球上昇時の高度曲線

80m に立て上げた。この時の地上の平均風速は約 4 m/sec であったが、風見のゴム気球がある角度を持ったままほとんど静止しており、風が息をつかずコンスタントに吹いていた。そこで気球を放球することができると判断し、放球のための準備を開始した。結果的には非常に良好に気球を放球することができたが、地上風速 4.5 m/s での放球となり、放球時に 2 人が観測器を押して移動させ、放球するタイミングを合わせた。表 9 に PPB-6 号機のタイムスケジュールを示し、図11～図13には各々の気球放球日の地上風を示した。

(3) PPB-6 号機飛行結果

PPB-6 号機は気球放球後 2 時間28分の14時23分 (LT) に高度 34.6 km で水平浮遊に入った。その後、前 2 機よりもさらに内側 (高緯度側) を順調に飛行し続け、14 日後の 1 月19日19時30分頃正確に昭和基地の上空を通過し、周回に成功した。この日の夕方は残念ながら雲が空を覆ってしまったため、周回してきた気球を目視で確認することはできなかった。同機はさらに順調に飛行を続け、放球22日後 1 月27日に、およそ 1 周と 1/3 を飛行し

表 9 PPB-6 号機タイムスケジュール

時 間	実 施 項 目
1 月 5 日	
6 : 15	気象棟にて地上風の検討を行う。
8 : 00	夏宿（レークサイドホテル）出発。
: 15	観測器のチェック，準備作業
9 : 00	風見ゴム気球製作，地上の風向風速チェック。
: 15	サポート隊到着。
: 45	シート敷き開始。
: 51	電波チェック。
: 57	RT 棟よりコマンドチェック。
10 : 38	気球搬出開始。
: 50	気球をランチャーに取り付け，結線，結索。
11 : 00	気球をローラー車にセット。
: 07	ガス注入開始。
: 12	気球頭部立て上げ。
: 26	カラー装着。
: 35	ガス注入終了。
: 36	気球立て上げ開始。
: 42	ローラー車撤去。
: 54	安全コネクタ装着。
: 55	PPB-6 号機放球。
14 : 23	高度 34.6 km で水平浮遊に入る。
21 : 20	昭和基地西方約 400 km 地点で電波消感のため，受信を終了する。

表 10 南極周回気球実験結果一覧

項 目\気 球	PPB-4	PPB-5	PPB-6
放 球 日 (1992年度)	12月26日	12月30日	1 月 5 日
放 球 時 刻 (L T)	16時24分	17時33分	11時55分
気 球 容 積	39,667 m ³	39,667 m ³	59,467 m ³
気 球 重 量	148.8 kg	147.0 kg	189.2 kg
観 測 器 重 量	339.0 kg	336.5 kg	245.0 kg
バ ラ ス ト 重 量	150 kg	150 kg	150 kg
自 由 浮 力	10%	10%	10%
平 均 上 昇 速 度	262 m/min	268 m/min	269 m/min
水 平 浮 遊 高 度	31.4 km	31.4 km	34.6 km
観 測 終 了 日	1 月 4 日	2 月11日	2 月 1 日
観測終了時刻(UT)	8 時54分	20時42分	23時20分
観 測 継 続 期 間	9 日間	43日間	26日間
消 感 位 置	60.6 S, 91.6 W	40.6 S, 133.8 E	70.6 S, 176.7 E
飛 翔 距 離	約 7,000 km	約 36,000 km	約 25,000 km
放 球 時 地 上 風	NNE 1.3 m/sec	ENE 1.7 m/sec	N 4.5 m/sec
放 球 時 気 温	-0.5℃	1.7℃	-0.6℃

表 11 ヘリウムガス注入量による浮力の比較

項 目\気 球	PPB-4	PPB-5	PPB-6
総 浮 力 (A)	541.46 kg	540.40 kg	481.96 kg
気 球 重 量 (B)	148.80 kg	147.00 kg	189.20 kg
計算浮力(A)－(B)	392.66 kg	393.40 kg	292.76 kg
ランチャー浮力	392 kg	390 kg	330 kg
実際と計算の差	－0.66 kg	－3.40 kg	＋37.24 kg
ガス量の計算浮力	539 kg	540 kg	483 kg
総 浮 力－ガ ス 量	＋2.46 kg	＋0.40 kg	－1.04 kg
測定時地上風速	0 m/sec	1 m/sec	4 m/sec
実質自由浮力	約11%	約11%	約11%

表 12 上昇速度の一覧

高 度\気 球	PPB-4	PPB-5	PPB-6
0～10 km	350 m/min	361 m/min	294 m/min
10～20 km	249 m/min	263 m/min	259 m/min
20～30 km	238 m/min	236 m/min	254 m/min
平均上昇速度	262 m/min	268 m/min	269 m/min

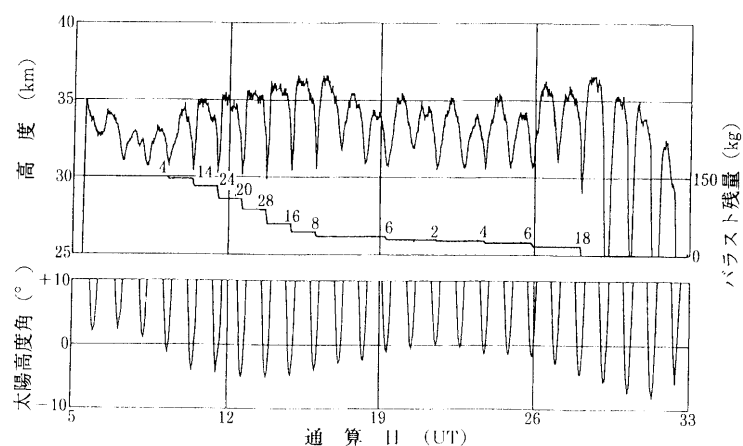
PPB-6 号機の飛翔高度と太陽高度角の関係
1993年1月5日, 8時55分 (UT) 放球

図 16 PPB-6 号機の飛翔高度と太陽の高度角

た時点で搭載したバラストを使い果たした。その後同機はさらに飛翔を続けていたが、放球後26日目となる1993年1月31日22時45分東経176度49分, 南緯70度38分の海上に着水した。同機は観測終了まで搭載機器すべてが正常に動作していた。

図14に PPB-6 号機の飛翔航跡を示す。表10に南極周回気球実験結果の一覧を示す。

5.5 注入した He ガス量の検討

(1) He ガス量

昭和基地のような極地で気球を放球する場合, ヘリウムガスの注入量を総浮力と初期ガス圧力と初期ガス温度で推定することが重要である。今回は2.3.6で述べたように簡単なグラフ方式で推定することができた。表11に

各実験の He ガス注入量による浮力の比較を示す。

注入した時の He ガスの圧力等は以下のとおりである。

PPB-4 号機：137.0 kg/cm² (T=5.2°)～23.0 kg/cm²

PPB-5 号機：136.5 kg/cm² (T=4.0°)～22.7 kg/cm²

PPB-6 号機：135.0 kg/cm² (T=1.5°)～25.5 kg/cm²

表12の実際と計算の差の項は単純にランチャーの実測浮力から計算浮力を差し引いたもので、特に PPB-6 号機は地上風の影響がでており地上風による増加浮力を考慮しなければならない。また、PPB-4, 5 号機のランチャー浮力とガス量の計算浮力から、両者の差は-0.66kg および-3.4kg である。これは総浮力に対しておのおの約0.12%, 0.6%となり、ランチャー浮力とガス量の計算浮力とが良く合っていることを示している。7 m³ のボンベ 1 本では 1 kg/cm² あたり 0.04725kg の浮力が得られ、ボンベ100本では圧力で 1 kg/cm² 多く注入しても 4.7kg の浮力にしかない。今回の気球にあてはめると 1 %自由浮力を増加したことになり、気球が上昇中に問題を起こす暴走にはなりえないことが分かる。注入したガス量は、3 機とも +1% 余分に注入してみたが、実測値とほとんど変わらないことが分かる。したがって、今回のヘリウムガス注入で使用した注入表はかなり精度の高いものであり、今後、恒久基地以外で気球実験を行う際、この方法を採用して、ヘリウムガス注入量の決定に役立つ物と思われる。

(2) 上昇時の高度曲線

各々の気球実験で放球後から水平浮遊に至るまでの高度曲線を図15に示す。

この上昇高度曲線からも 3 機とも安定した上昇を続け、水平浮遊に入ったことを示している。

(3) 上昇速度

表12に上昇速度の一覧表を示す。

(4) 気球の飛翔高度と太陽の高度角

PPB-4, 5 号機に搭載した一部の機器に不具合があったため、全期間の高度データを取得したのは、PPB-6 号機のみであった。図16に PPB-6 号機のほぼ全期間にわたる飛翔高度と太陽の高度角の関係を示し、同時にバラストの残量も示した。

図16から太陽の高度角は気球放球 4 日後には負の領域に入りだしている。負の領域は太陽が日没になることを示しており、それに伴ってバラストの投下が行われていることが解る。さらに気球は飛翔を続け、太陽の高度角が高くなると急激にバラストの投下回数が減少していることが分かる。通算日28日付近ではバラストの全量を使い果たし、その後気球の高度はしだいに降下している。バラストの搭載量は、3 機ともおよそ25日間を目標に搭載量を決定しており、この図からほぼ予定どおりの結果を得られた。

お わ り に

PPB 気球は、ゼロプレッシャー気球を用いて高度30km 以上を保ちながら、南極の上空を周回させて長時間観測を行う目的で、1987年より国立極地研究所、宇宙科学研究所および多くの他の科学者が中心になり、その意義と可能性が検討され、何回もテスト飛翔を繰り返しながら基本搭載機器、電源、テレメータシステム、データ収録システム、コマンドシステム、オートバラストシステムおよび放球システムが開発、作成され改良されてきた。

本年度は、この PPB 気球プロジェクトの最後の年にあたり、今までの成果を基に、3 機の大気球による科学観測を行った。特に PPB-4 号機と PPB-5 号機は同時観測を目的としたため、4 日の間隔で放球を行い、5 日間の同時観測を行うことに成功した。特に PPB-5 号機は一部不具合はあったが、43日間の長時間飛翔を続けることができた。

最後に放球した PPB-6 号機は、これまで南極で放球した気球の中で容積で最大の 6 万 m³ 気球であったが、

無事放球に成功し、一周後昭和基地のほぼ真上を通過するという理想的な飛翔航跡を飛び、26日間の長時間観測に成功することができた。

これまでの PPB 気球の成功により、ますます南極における長時間観測の道が開かれた。今後さらに開発および改良を行うことによって多くの有益な科学観測が行われていくことが期待される。

参 考 文 献

- [1] J. Nishimura, M. Fukunishi and Co-members of PPB Working Group, "Feasibility Studies of Polar Patrol Balloon," *Adv. Space Res.* Vol. 5, 1985, pp. 87-90.
- [2] M. Yamanaka, K. Yamazaki and H. Kanzawa, "Studies of Middle Atmosphere Dynamics under the Polar Patrol Balloon (PPB) Project : Present Status and Future Plans," *Proc. NIPR Symp. Upper Atmos. Phys.*, 1, 1988, pp. 65-74.
- [3] R. Fujii, H. Akiyama, S. Kokubun, N. Yajima, J. Nishimura and T. Hirasawa, *Proc. Japan Acad.*, Vol. 67, Ser. B, No. 3, 1991, pp. 17-21.
- [4] T. Hirasawa, M. Ejiri, N. Sato, R. Fujii, H. Miyaoka, A. Kadokura, J. Nishimura, N. Yajima, T. Yamagami, S. Kokubun, H. Fukunishi, M. Yamanaka and M. Kodama, "Polar Patrol Balloon Experiment During 1991-1993," *Proc. of Int. Symp. of Space. Tech. and Science*, 1990, pp. 1593-1597.
- [5] 西村 純：ヘリウムガスの浮力推定，宇宙科学研究所報告，特集第13号，1985，pp. 73-86.