

南極昭和基地における成層圏大気の クライオジェニックサンプリング実験 [I]

— 新たに開発された搭載機器および地上システム —

本田 秀之*・井筒 直樹*・森本 真司**・青木 周司***・橋田 元**
町田 敏暢****・岡野 章一**・矢島 信之*・山上 隆正*・並木 道義*
他気球グループ*

Collection of Stratospheric Air With Balloon-borne Cryogenic Sampler over Syowa Station, Antarctica [I]

— Newly developed onboard instruments and ground systems —

By

Hideyuki HONDA*, Naoki IZUTSU*, Shinji MORIMOTO**, Shuji AOKI***, Gen HASHIDA**,
Toshinobu MACHIDA****, Shouichi OKANO**, Nobuyuki YAJIMA*, Takamasa YAMAGAMI*,
Michiyoshi NAMIKI* and Balloon Groop*

Abstract: On January 3rd a cryogenic air sampling experiment was successfully carried out at Syowa Station, Antarctica. Large amounts of stratospheric air samples were collected over the Antarctic region up to 30 km altitude for the first time in history. This was the first balloon payload recovery trial at the station. For the balloon experiment, various systems and equipments are prepared including a scientific instrument, a telemetry and telecommand, a balloon rigging, a gas helium inflation, and a ground support system. Special considerations are made to be simple and easy-to-use because all the systems are operated by inexperienced personnel. The rigging system is simplified for an easy launching operation. The scientific instrument is equipped with shock absorbers for a recovery on sea ice and helicopter recovery fittings. All systems and procedures are tested by personnel who join the expedition in a flight test and ground tests. To help operations at the station, a real time bidirectional data transfer system is introduced utilizing a computer network between Syowa Station and National Institute of Polar Research.

概 要

1998年1月3日、南極昭和基地においてクライオサンプリング実験が行われた。南極圏で高度

*宇宙科学研究所
**国立極地研究所
***東北大学大学院理学研究科
****国立環境研究所

30km までの成層圏大気的大量採取に成功したのは、世界で初のことであった。同時に、南極気球実験としては、我が国初めての本格的な大型ペイロード回収実験でもあった。昭和基地に於ける気球実験は国内でのそれとは異なり、観測器のみならず気球工学関連（テレメータ、コマンド、荷姿、ガス充填、放球支援システムなど）機器も用意し、かつ操作しなければならない。そのため、従来までの経験をふまえ、出来るだけ取り扱いが簡単で確実に動作させることができるような各システムを準備した。また、放球作業を容易にするための荷姿構成や、氷上での観測器回収のための着地衝撃緩衝機構を採用し、ヘリコプタで回収するための装備や手順を用意した。これら全てのシステムや手順について、事前に現地へ赴く関係者らによって、国内での飛行テストや地上テストによる訓練や機能確認を行った。更に、現地人員の事前準備や飛行制御等の負担を軽減するため、昭和基地－極地研間の実時間データ伝送もこの目的のために用意した。

重要語：気球、南極、観測器回収、GPS、ネットワーク

1. はじめに

昭和基地に於ける気球実験では国内でのそれとは異なり、少数の気球実験エキスパートで実行しなければならない（今回は一人も参加出来なかった）。また、観測器のみならず気球工学関連機器（テレメータ、コマンド、荷姿、ガス充填、放球支援システムなど）も持参し、かつ操作しなければならない。そのため、従来までの経験をふまえ、これらは可搬型の機器として構成し、実際に現地へ赴く関係者が国内で操作訓練した後に運び込めるようにした。現地では速やかにセットアップができ、かつ取り扱いが簡単で確実に動作させることができるよう各システムを準備した。

また、放球作業を容易にする荷姿構成（バックドパラシュートと単一ゴンドラ）や、氷上での観測器回収のためのアルミハニカムによる着地衝撃緩衝機構を採用した。さらには、ヘリコプタで回収するための装備や手順を準備した。一方、観測器（サンプラー）は従来から国内で使用してきたものをほぼそのまま適用し、実験参加者の負担や新規開発の時間的制約に配慮した。これらは搭載気球工学系・地上系を含め、事前に国内で、現地での実験参加者も加わって飛行試験や地上試験を行った。

更に現地人員の負担を軽減するため、昭和基地－日本（極地研）間のネットワークを利用して実時間データ伝送を行い、極地研に待機したメンバーが、昭和基地に於ける事前準備作業、放球作業や飛行制御、飛行中の搭載機器の状態監視等も支援した。

2. 全体システムの概要

各部の詳細を述べる前に、ここで用いたシステム全体の構成の概要を説明する。

2.1 ゴンドラ

これまで国内では経験したことのない氷上回収のために着地衝撃吸収機構を装備する必要もあり、サンプラーのフランジを利用して緩衝機構を追加するような構成を考えた。以下の章で述べるように、緩衝機構としては、既にグラブサンプラで実績のあったアルミハニカムを採用することにした [1]。

2.2 気球システム

放球場での一連の作業を容易にするために、パラシュート回りを簡略化する事を考えた。このためにバックドパラシュートを採用した事が、国内に於ける通常の荷姿とは大きく異なる点である。更に、放球の容易さを考えて工学搭載機器とPIゴンドラを一体化し、巻下げを行わないことにした [2]。

気球は、観測に必要とされる最高高度、放球作業の容易さ、持ち込むべきヘリウムガス量などを考慮して、B30 (30,000m³)とした。

2.3 搭載機器

搭載機器には気球工学系と観測器系(PI)があるが、これらは保守に便利のように簡単にかつ完全に分離できる独立した構成にした。気球工学系も観測器系も、既に三陸実験で何度も使用実績のあるものである。この実験のために特に変更した部分は、昭和基地実験では不必要な気球工学搭載機器を降ろして簡略化したこと、気球工学とPIのデータ伝送を1波で行うこと、サンプラー内の各機器の着地衝撃に対する強度を増すことであった。また、サンプラーの現場での準備作業を簡略化できるように、配管系を全て組み上げかつ排気した状態で輸送できるような改造を施した。バックアップの送信機も周波数安定度が良い水晶型を使用することにし、容易に追尾受信が行えるように配慮した。

2.4 地上システム

地上系の諸設備は、いろいろな障害発生に対しても最低限の機能は維持できるように、機器の設計や構成に配慮した。

簡単に取り扱える可搬型の自動追尾受信系を用意した。受信された信号は気球工学 HK 信号と PI 信号に分離後、それぞれの QL コンピュータに渡され、データ処理と表示が行われる。同時に、HK 信号に含まれる搭載 GPS 受信機からの測位情報(緯度経度高度)は、追尾用のアンテナの方位角と仰角を計算するために使われる。

2.5 実時間データ伝送

昭和基地-極地研間の実時間データ伝送では、気球工学およびPIデータの転送と双方向メッセージ通信を行った。転送されたデータは、極地研ワークステーション(WS)に昭和基地と同一のQL画面として表示した。また、メッセージ通信によって、種々の助言やデータを誤り無く伝えることが出来た。

2.6 放球支援システム

ガス充填システムは、従来より問題となっていた配管系のコンダクタンスを改善するために新規にマニフォールドを導入し、各カードル単位でマニフォールドに接続できるようにしたことが大きな変更点である。

ローラー車は新規にブルドーザを購入し、PPBでのローラーをそのまま使用出来るようなアタッチメントを設計製作した。放球場は従来と同じくCヘリポートを使用したため、ランチャーは既設のものが使用できた。地上風測定用の風速計も用意した。

以下に各部の詳細について述べる。

3. ゴンドラの構成と荷姿

3.1 ゴンドラの構成

従来三陸で行ってきたクライオサンプリング実験では、サンプラーと気球工学系ゴンドラとは完全に分離し、その間を巻下げ機やロープで接続していた [3]。しかし、放球の容易さを考えると、工学およびPIの搭載機器を一体化した1ゴンドラ形式がよい。また、最近の三陸のサンプリング実験では、この昭和基地実験をにらんで気球上昇中の試料採取も試みてきたが、発泡スチロール製造時にフロンを使用しなくなったこともあり、採取した試料の汚染もほとんど検知されなくなってきた。このような経過から、ゴンドラを一体化し巻下げ機を使用しないことにした [4]。気球工学系の機器は外部の箱の中に収めることにした。幸いゴンドラ外周には着地衝撃緩衝機構を装備する必要があったため、その一部に機器を収納した箱を取り付けるよう設計した。ゴンドラの構成および寸法は、図1に示すようになった。

強固な4本の脚部の上にそれぞれハニカム製の高さ405mmのクラッシュパッドが載り、その上の厚さ27mmのハニカム製の天板がゴンドラをフランジ部で支えるようになっている。上部に取り付けたのは、下部にある大気採取口からなるべく離し、ハニカム部からの汚染を防ぐためでもある。脚の一つの面には、気球工学系機器を収納する箱が取り付けられている(なお図1では裏側に配置されているために見えない)。4本の脚は内部が空洞のアルミ角柱(100×100mm)で構成され、対角の2本はバラスト容器を兼ねている。なお、ほぼこれと同一構成のサン

プラー（但し工学系機器類は搭載していない）は、1997年2～3月に於けるスウェーデンのキルナでの2度の気球実験（ILAS地上検証実験）において使用され、雪中に降下した場合でも内部機器は無傷で回収できている [5]。

レーウィンゾンデと ARGOS 送信機はテレメータ送信機との電波干渉や GPS 受信機動作への悪影響に配慮し、ゴンドラ本体とは離れたパラシュート下部とゴンドラ間のベルトに、お互いに適当な距離をとって取り付けることとした。なお、ここで使用したパラシュートや荷姿に関しては、後に述べる。

気球(130.2kg)を含めた重量は 488.9kg、バラストは 30kg(6%)として、総重量は 518.9kg となった。自由浮力を 10%(51.9kg)とすれば総浮力は 570.8kg となり、1カードル当たり 48kg (6kg×8本)の浮力が使用可能とすれば、約 12 カードル分のヘリウムガスが必要と計算できる。

3.2 クラッシュパッドの設計

サンプラーの陸上（水上）回収を行うためには、サンプラーを着地(水)時の衝撃から保護する必要がある。この目的のために、アルミハニカムの衝撃吸収力を用いた緩衝装置を製作した。その設計条件は、サンプラーの着地時の重量が 350kg、着地時の降下速度が 7 m/s、サンプラーの垂直方向に加わる衝撃が 10G 以下となることとした。サンプラーは、図 1 に示すように、一辺 1200mm のアルミハニカム製天板の中央にあけた直径 915mm の円形穴にサンプラーのフランジ部をのせ、ボルトで天板と共締めされる。一方、この天板は脚部構造物と 4 隅に配置した三角柱状のアルミハニカム製緩衝装置を通して結合される。着地時にはこれらの緩衝装置がつぶれることにより、エネルギーを吸収してサンプラーを衝撃から保護することになる。ただし、このままではバラストを内蔵した脚部分の荷重が吊下げ荷重としてアルミハニカム部に直接作用することになるので、緩衝装置の重心部を縦に貫通する穴を設け、脚部分がこの貫通穴を通して 4 本の丸棒により天板から吊下げられる構造とした。この丸棒は吊下げ荷重のみを受け、ハニカムが圧縮する際にはその頭部が天板より上方に持ち上がるようにした。

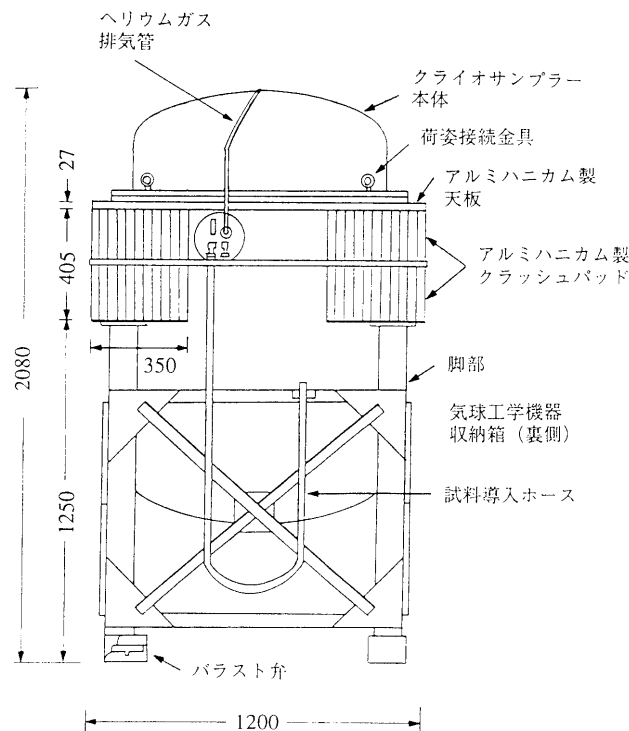


図 1. ゴンドラの構成

工学および PI の搭載機器を一体化した形式を採用した。サンプラーは国内で使用してきたもので、気球工学系の機器は外部の箱の中に収めた（図では裏面側に配置）。強固な 4 本の脚部（内 2 本はバラスト容器を兼用）の上にアルミハニカム製のクラッシュパッドが載り、その上のハニカム製の天板がゴンドラをフランジ部で支えるようになっている。試料取り入れ口は、上空に達してから垂れ下げる。

また、各緩衝装置を天板に固定する部分の形状は、中央に収めるサンプラーの形状と寸法から、天板の4隅から縁にそって各350mm長さの三角柱とした。

アルミハニカムのコアが受ける圧力 σ_{cr} は、作用する重量を W 、許容 g 限度を G 、受圧面積を A とすると、

$$\sigma_{cr} = \frac{GW}{A}$$

で表される。アルミハニカムは通常全長の約70%しか吸収には役立たないので、必要なコアの厚さ H は、衝突速度を V 、アルミハニカムの押しつぶし強さを σ とすると、

$$H = \frac{1}{0.7} \frac{WV^2}{2g\sigma A}$$

で求められる。ここで、 $G=10$ 、 $W=350\text{kg}$ 、 $A=0.245\text{ m}^2$ を代入すると、 $\sigma_{cr}=1.43\text{kg/cm}^2$ となる。この値より小さい押しつぶし強さのコアを選択することになる。緩衝パネル用ハニカムコアとして昭和飛行機工業(株)製のハニカムコア AL3/4-5052-0015P を用いた。これは、セルサイズが3/4インチ、箔厚0.0015インチ、押しつぶし強さが $\sigma=1.3\text{kg/cm}^2$ のもので、計算により必要とするコアの厚さ $H=0.39\text{m}$ となる。そこで、3辺が350mm、350mm、495mmの三角形を底面とした高さ200mmのアルミハニカムを2段積み重ねて全長400mmの緩衝装置を構成した。なお、コア部はプレクラッシュ操作を施し、衝撃が加わった当初に過大な加速度がサンプラーにかからないようにした。

このような緩衝機構の上にサンプラーが載った状態のまま作業や移動を行おうとすると、一部に集中的に加重がかかるような事態が発生した場合、ハニカムがつぶれ始めることが懸念された。そこで放球直前になるまでは、緩衝機構の作動を防止するための機構も付加した。また、製作時接着剤中に気泡が残ることがあるが、成層圏内で減圧されたときに内部のガスが放出され、大気試料を汚染することが懸念された。これは、製作時に脱泡処理を施し気泡が残らないようにした。

3.3 回収用パラシュートシステム

回収用パラシュートシステムの設計方針は以下の3点とした。

- (1) 荷姿を取り扱いやすくするために、バック収納方式のパラシュートを用い、できるだけ簡単な構成とする。
- (2) サンプラーをなるべく水平に保ったまま着地させるために、安定性の高いパラシュートを使用する。
- (3) サンプラーの着地後、パラシュートが横風を受けてサンプラーが転倒して引きずられないように、着地分離装置を使用する。

通常的气球実験においては、回収用パラシュートは气球サスペンションリンクの一環としてパラシュートを伸長した形で使用しているが、荷姿が長くなり取り扱いも不便である。これに対して、カッター等まで装着しバックに収納した形式のパラシュートを使用すると、現場ではパラシュートシステムを气球およびサンプラーと接続するだけで荷姿の結線結索が完了するため、取り扱い性や安全性が増すことになる。ただし、パイロットシュートを用いた開傘方式を採用するとパラシュートシステムの構成が複雑になるため、ここでは static-line-deployment 方式を採用した。この方式によれば、气球を足場にしてパラシュートを引き出すため、パイロットシュートを使用しなくてもパラシュートを開くことが可能である。

パラシュートシステムの連結図を図2に示す。パラシュートを収納したバックの上側を气球と接続し、パラシュートの接続帯末端をサンプラーと接続する。接続帯の途中部分をバックの下部を閉じている輪に固定する。この輪をカッターで切断することにより、パラシュートは气球の浮力とサンプラーの重量によりバックから引き出される。パラシュートはスリーブに収納されており、このスリーブの頭部はバック内部に固定されている。パラシュートがスリーブから抜ける際にこの頭部の仮縛が切れ、その後、气球引き裂き紐が伸長して气球を引き裂く

ようになっている。気球引き裂き紐はバックの頭部の穴を通過するため摩擦に強いケブラ製とした。また、引き裂き紐末端がバック頭部の穴を通過しない場合を考慮し、引き裂き紐とパラシュート頭部の間は仮縛してある。また、カッターを動作させる前に気球が破壊した場合が問題となるが、この場合でも気球よりサンプラーの初期降下速度がはるかに大きいため、気球破壊後すみやかにカッターを動作させることにより、パラシュートの正常な開傘が可能である。したがって、通常の伸長したパラシュートと同等以上の安全性が確保されている。また、収納バックは気球サスペンションリンクの一環であるので、放球時および浮遊時の荷重に耐えられる強度に製作した。

サンプラーの着地時に緩衝装置が効率よく働くようにするために、できるだけサンプラーを水平に保ったまま垂直に着地させたいという要求から、リングセイル傘を採用した。使用したパラシュートの傘体直径は 14.6m、最大吊上げ重量 400kg、開傘衝撃は 0 m/s 伸長開傘時に最大 3G、地上換算降下速度は 400kg 重量の場合に 7m/s である。また、パラシュートの安定性は±10 度以内である。

サンプラーが着地後にパラシュートが横風をはらみ、サンプラーが引き倒され地上を引きずられることを防ぐため、着地分離器をパラシュート接続帯の片側に挿入し、パラシュート収納バック内に収めた。使用した着地分離器は IRVIN GD500 で、使用荷重（片側荷重）が 34~227kg 耐衝撃性は 12G、動作温度範囲は -51℃から 71℃ である。本装置は、パラシュート開傘時の初期の不安定状態での分離を防止するために機械式タイマーを内蔵しており、動作までの時間遅延を 5 から 20 秒の間で設定することが可能である。22.7kg 以上の荷重がかかった時点からタイマーが作動し始め、この荷重がかかった状態が設定された時間以上継続すると、初めて分離機構が作動待機状態となる。その後荷重がほぼ 0 になった瞬間に分離機構が作動し、接続帯の片側を切り離す。

立て上げ放球方式では、気球の最下部をランチャーに固定し、そこからサンプラーを地上風の強さと荷姿の長さによって決定される距離だけ風下に位置させ、その間の荷姿部分をゴム気球でつることになる。その際、荷姿の全長が放球可能な地上風の強さを制限することになる。今回の場合、荷姿の全長は 12.5m であり、荷姿の構成と使用する気球の条件を用いて、地上風の強さによるサンプラーの最適位置をシミュレーションした結果を図 3 に示す。本構成による放球可能最大値上風は 2.8m/s となる。なお、本パラシュートシステムは、1996 年の第 2 次大気球実験においてほぼ同一の構成で実際に使用し、設計通りの動作と性能が確認されている。ただしこの時は国内での実験であるため、より高い安全性を確保するため、気球とパラシュートの間にパイロットシュートを入れた構成にした [4]。

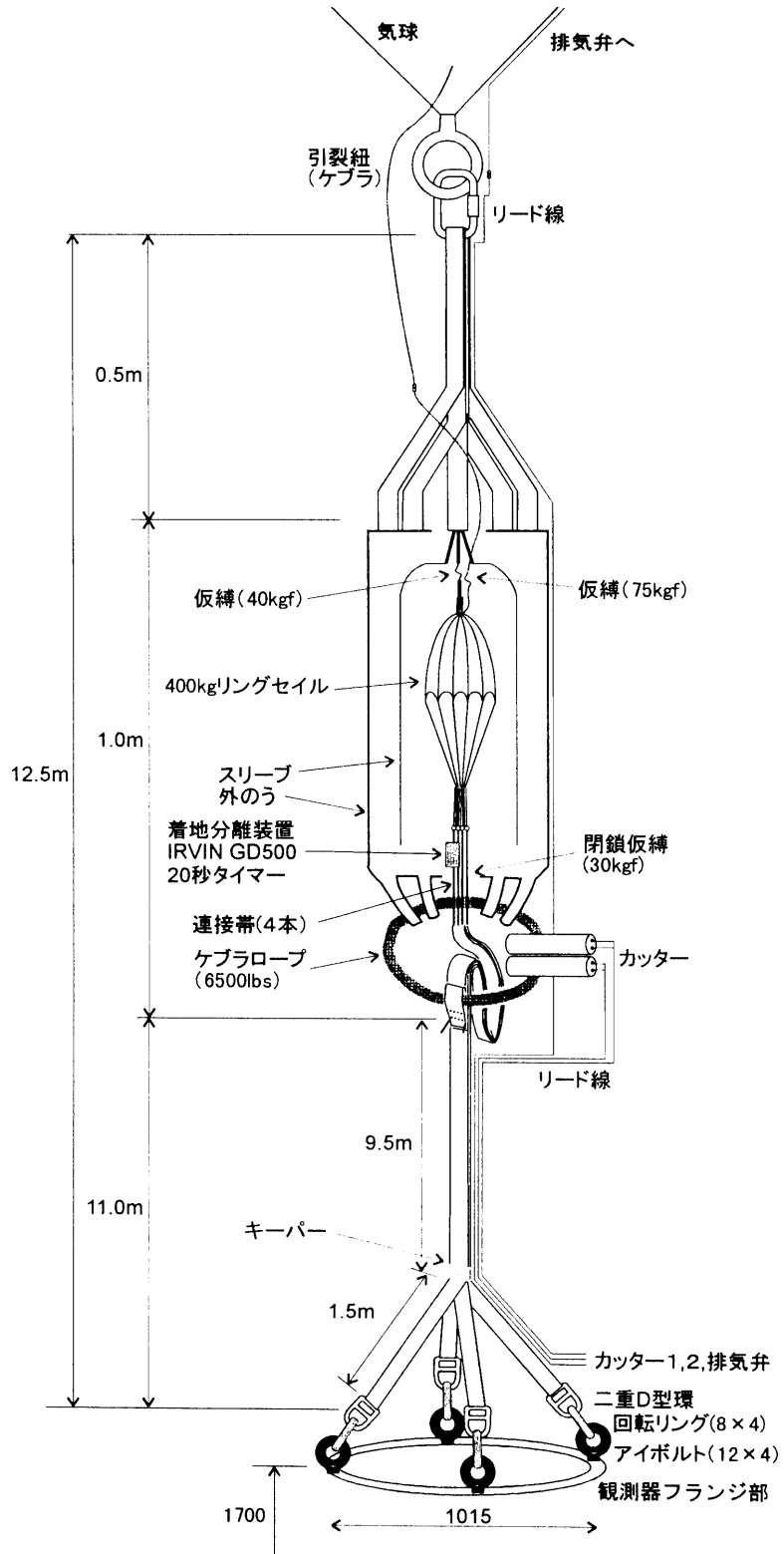
4. 搭載機器

4.1 気球工学

気球工学搭載機器には、国内に於ける実験で使用してきた構成 [6] に一部変更を加えた。主な点は、昭和基地での実験には不要な機器(トランスポンダ、ラジオバイなど)を降ろし、ARGOS 送信機を加えたことである。更に、システム簡略化と信頼性全般について比較検討した結果、非常用コマンドも使用しないこととした。また送信機は主副共水晶型を採用し、追尾受信系の操作を簡略化出来るように配慮した。

搭載系および受信系簡略化のために電波は 1 系統としたかったので、工学データ(HK データ, 1200bps FSK)と PI(19.2kbps Biφ)データとを混合して送る方式を採用した。この方式では、搭載系(混合部)と地上系(分離復調部)が多少複雑になるが、システム全体から見ればコンパクトに構成できるためである。図 4 に工学および PI の搭載回路構成のブロック図を示す。

追尾受信に搭載 GPS データを使用することから、国内での伝送レート(15-20 秒に 1 回)より上げて 10 秒に 1 回送るように、搭載エンコーダのソフトウェアを変更した。なお、全ての機器を組み上げた状態で、電磁ノイズによるコマンド受信動作への悪影響も問題ないことを確認した。この気球工学系機器はバックアップも含め 2 組用意した。



パラシュートシステム連結図

図 2. 回収用パラシュートシステム連結図

パラシュートを収納したバックの上側を気球と、接続帯末端をサンプラーと接続する。接続帯の途中部分をバックの下部を閉じている輪に固定し、この輪をカッターで切断することにより、パラシュートは気球の浮力とサンプラーの重量によりバックから引き出される。

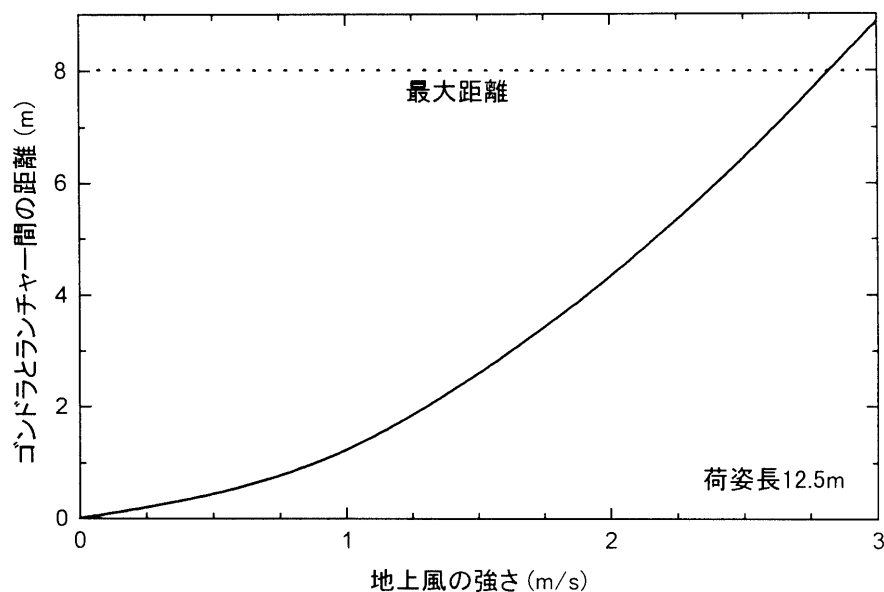


図 3. 地上風の強さとゴンドラ位置の関係

今回の荷姿構成と使用する気球の条件を用いて、放球時の地上風の強さによるサンプラーの最適位置をシミュレーションした結果である。

万一サンプラーからの通信が途絶えたりGPSなどが不調になった場合には、正確な着地場所が分からなくなる可能性がある。そのような場合にはAGOSシステムによる位置決定が助けとなる。また、レーウィンゾンデは基本的な大気状態の情報を得るためと、バックアップの追跡を行うためのものである。

4. 2 サンプラー

クライオサンプリングとは、液体ヘリウム等の冷媒を使用して、成層圏内のように気圧の低い大気でも、固化して効率よく大量に採取する方式である。今回使用した装置には試料容器が12本有り、従来まで三陸で使用してきたものと同一の密封型容器内に封入されている。これは新規開発の時間を節約するためばかりではなく、従来装置との互換性を図り、バックアップ機器の準備や取り扱いの訓練も容易になるためである。サンプラー単体の重量は250kg、大きさは100cmφ×160cmHである [2] [3]。

試料取り入れ口開口機構は、装置の輸送や放球作業の容易さのために、従来のガラス封じを割る方式からアルミ製キャップを折り取る方式に変更し、既に三陸における実験においても使用を始めていた [4]。三陸での実験では、取り入れ口ホースはゴンドラ周囲に巻き付けて、先端をスカート状の脚部に固定していたが、ここではそれができず、緩衝機構の脚部を連結する横棒部分に先端を固定するようにした (図1)

南極実験のための大きな改造点は、真空配管系を全て組み上げた状態で運搬出来るようにしたことである。この改造により、試料容器から取り入れ口配管系までを接続し、予め国内でそれらのリークテストと排気までを終える事ができるわけで、昭和基地での準備作業に必要とされる時間と労力を大幅に短縮する事が可能となった。

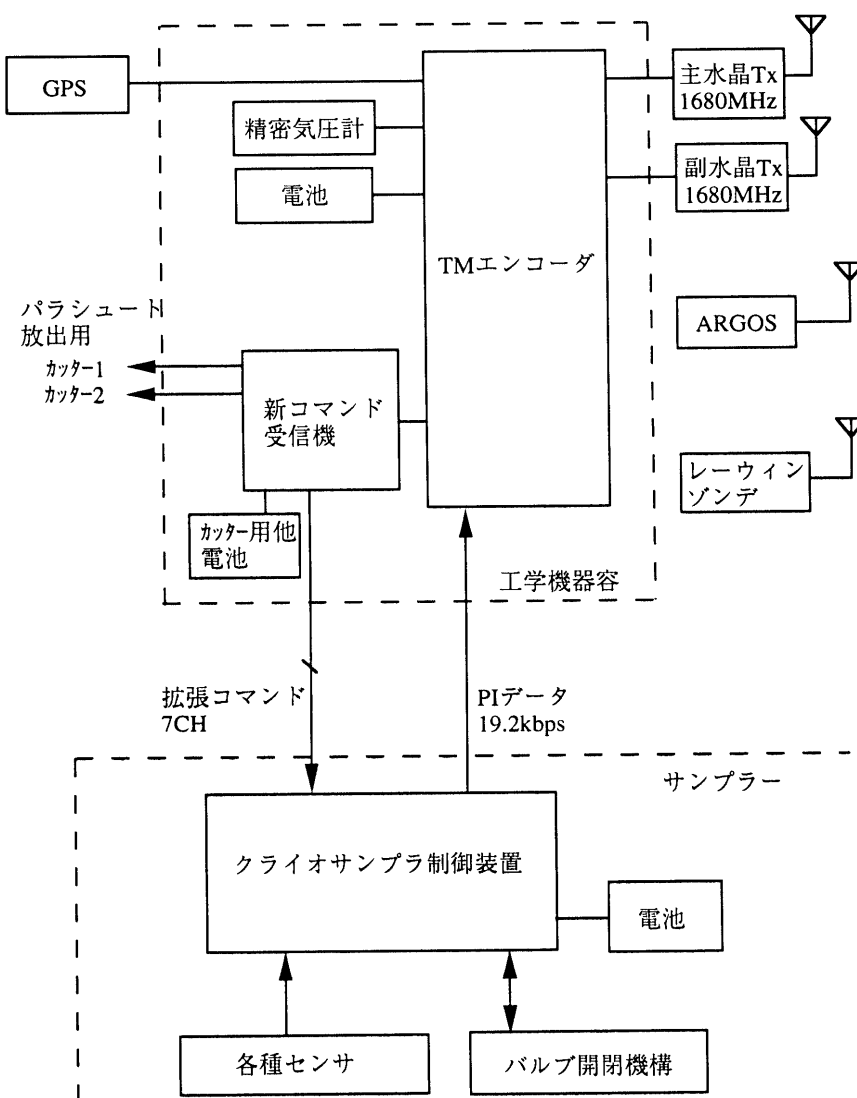


図 4. 工学およびPIの搭載回路構成のブロック図

気球工学搭載機器では、昭和基地での実験には不要な機器（トランスポンダ、ラジオバイ、非常用コマンドなど）を降ろし、ARGOS送信機とレーウインゾンデを加えた。またテレメータ送信機は主副共水晶型を使用し、1波伝送とするために工学データとPIデータとを混合して送る方式を採用した。

5. 気球追尾受信, コマンドシステム

5.1 システムの設計方針

このシステムは、三陸大気球観測所(SBC)での通常の気球実験と同様に、以下の機能を扱う。

- (1) 気球を追尾し、基地の送・受信アンテナを気球の方向に向ける。
- (2) テレメータ信号を受信し、解読した信号を出力・表示する。
- (3) コマンド信号を生成し、送信機を通じて気球に送信する。

なお、(1)の機能には、SBCにはない昭和基地内のLANに接合する機能も含まれている。

三陸大気球観測所では、上記機能は約5km離れた山頂に無人の通信基地を置き、気球基地より遠隔操作をしている。気球の追尾はモノパルス方式と呼ばれる高度な方式を用い、口径3.6mのハイゲイン狭ビームアンテナをレドーム内に収納する大掛かりなものである。毎年、定常的に大型気球実験を行っているSBCとは異なり、数年おきに行う昭和基地にこうした装置と同等のものを設置するのは、あまりに費用投下効率が悪い。かつ、そうした複雑な施設を間欠的に使用するとなると、実験を再開する場合前もって保守を行わねばならず、かつ操作者は昭和基地に到着して初めて装置の現物に触れることになり、操作の習熟、動作不良の場合の対応策等、実験にとってリスクが増える。時には、実験の実施が困難な状況も起こりうる。従って、こうしたシステムは昭和基地のような隔離した場所で、かつ人員、物資両面で制約がある場合、気球実験にとって適当ではないと考えられる。同様の高度な装置一式が昭和基地にロケット実験用として設置されており、今回この装置の利用可能性も検討した。受信装置は一応動作することを確認したが、設置してから15年以上が経過しているために信頼性に問題があり、かつ事前の保守・点検、部品交換も容易な作業ではないことも判明した。11.1で述べるように、既に昭和基地において、我々はGPS受信機を搭載したグラブサンプラーを回収予備実験の一環として飛揚している。搭載したGPS受信機による測位は問題なく行われ、その結果は追跡や回収に威力を発揮している。

こうした事情および大気サンプリング実験に必要な要件を勘案すると、以下の方式が適当と判断された。

- (1) 野外設置となるアンテナ類は、気球の飛翔範囲が100km以内でよいので、小型・軽量なものを用いることができる。このため、駆動メカニズムを含め、実験担当者自身が現地に持参し、屋上等に容易に設置できる簡易な方式とする。
- (2) アンテナを気球に向ける追尾機能は、搭載GPSから送られる気球測位データをもとにしてアンテナ指向角度をパソコンで計算し、アンテナ駆動機構の角度制御機能で気球を追尾する簡易な方式を用いる。SBCで用いられている電波の強度の中心を自動追尾する方式は、複雑な装置となるので止める。
- (3) 上記GPS追尾方式を用いることで、直線距離測定装置も不要となる。テレメータとコマンドを同時に用いる折り返し通信をする必要がなくなり、システムの簡略化が図れる。
- (4) 電波の強度中心を求める自動追尾を止めたため、簡単な受信機を用いることができる。最近では、テレメータの周波数である1,600MHz帯まで十分なゲインを持って安定に受信できる市販の受信機があり、そうしたものを極力利用する。
- (5) コマンド送信装置は電波監理局の免許を必要とするために一定の要件を備えねばならず、必ずしも簡易型とはいかない。既存のものが昭和基地にないため、SBCで使用実績のある方式を使用することになる。必要な免許も新たに取得する。
- (6) 上記気球追尾・受信およびコマンド装置の中で室内に設置する機器は、運搬が容易なようにコンパクトな可搬型ラックに内部結線をした状態で組み込み、現地では蓋を外して外部機器と相互結線をするだけでただちに使用可能となるようにする。
- (7) 上記装置は現地に常設せず、実験のある時にあらかじめ担当者が出発前に国内で操作のトレーニングを受け、自身で昭和基地に運び設営して使用することにする。

- (8) 機器に部分的故障が発生しても実験をあきらめる事態に至らないよう、可能な限りの故障対応モードを用意する。この故障対応モードは、実験の準備段階ばかりでなく、気球飛翔中にも速やかに対応できる即応性を備え、気球飛翔の安全性の確保にも役立つものとする。

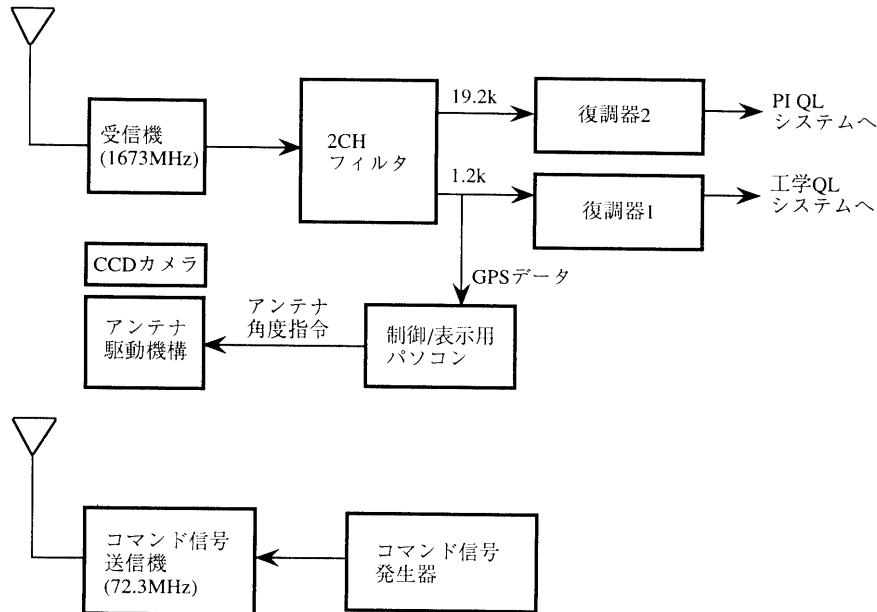


図5. 追尾受信システムの構成

テレメータ系統では、受信機出力を前置フィルタに通し、気球工学 HK 信号と PI 信号に分離後それぞれ復調する。気球工学出力信号はアンテナ制御用パソコンにも入力され、これは GPS 信号によってアンテナの仰角方位角を計算し、アンテナ駆動機構へ制御指令を出力する。なお、コマンド系統はテレメータ系統とは完全に独立し、コマンドエンコーダおよび送信機から成り立っている。

5.2 システムの具体的構成

昭和基地に設置したシステムの構成図を図5に示す。テレメータ系統は、受信機出力をまず前置フィルタに通し、気球工学用の 1200bps の FSK 信号と PI 用の 19.2kbps の Bi ϕ 変調信号に分離する。次に復調器で各々の信号の復調を行い、RS232C 規格のシリアル信号として出力する。そのうち気球工学出力信号は、アンテナ制御用パソコンおよび以下に述べるように、バックアップのデータ表示用ノートパソコンと昭和基地 LAN に接続されたプロトコル変換器のそれぞれに入力される。アンテナ制御用パソコンは、気球工学テレメータ信号の中から GPS 信号のみを取り出し、昭和基地と気球の緯度、経度、高度からアンテナの仰角、方位角を球面三角法で計算し、アンテナ駆動機構の制御回路へと出力する。なお、コマンド系統はテレメータ系統とは完全に独立し、コマンドエンコーダおよび送信機から成り立っている。

屋上に設置したアンテナには、ズームレンズ付のモニタ用 ITV カメラも取り付け、アンテナの指向方向を写した。この ITV 画像は、気球放球作業中はその進行状況を室内でモニタする役割を持ち、放球後気球が写っている間は、マニュアル操作で画面の中央に気球を移動させて気球追尾を行った。特に後者の機能は、放球直後に気球の追尾を逃す心配がなく、安心して作業を進めることができた。

これらの装置を設置した場所は観測棟内部の部屋であり、アンテナおよびその駆動装置はその建屋の屋上に設置した。設定に要したおおよその時間は、アンテナシステムの屋上設置に半日、室内システムのセットアップに半日、両者をケーブルで接合し動作テストまで実施するのに2時間程度と短時間で終了した。

表1に、各構成要素の機能、仕様の概要を記す。

表 1. 追尾・受信, 信号復調・表示およびコマンド信号発生器・同送信機の仕様

項目	仕様
テレメータ受信アンテナ	15 素子八木型, ゲイン 16dB, ゲイン 30dB の前置アンプ付
コマンド送信アンテナ	2 素子八木型, ゲイン 6.3dB (ダイポール比)
アンテナ駆動台座	仰角・方位角 2 軸駆動 (仰角: 0-90 度, 方位角: ±180 度)
	駆動分解角 ±1 度
	重量 15kg
駆動台座制御装置	角度表示, 手動駆動スイッチ付, コンピュータを接続して角度設定制御可
受信機	アイコム社製 IC-R9000 型
	感度 15dB μ 以下
	受信帯域幅 WFM レンジで 150kHz
	その他の機能 AGC, AFC, 受信周波数記憶, シリアル通信ポートを通じ, 外部コンピュータで制御可
コマンド送信機	松下通信機工業製 EA-1458-SU 型 出力 25W, FM
2 チャンネル	前置フィルタ部 2 チャンネルテレメータ信号の分離
テレメータ信号復調装置	気球工学用 低速 FSK 信号 (1,200bps), NRZI 同期分離, 復調 科学観測用 19.2kbps Bi Φ 同期分離, 復調 出力 いずれのチャンネルもコンピュータシリアルポート適合出力.
制御コンピュータ	富士通 FMV5166 シリアルポート 2 ch (気球工学テレメータ信号 [GPS], アンテナ駆動台座制御装置操作, 受信機操作)

6. 気球工学およびPI用地上データ処理システム

昭和基地に設置した追尾受信システム以降の, 解析表示部(QL)およびネットワークを介したデータ伝送系の構成を図 6 に示す. 図 7 には, 表示画面の例を示す.

本システムの動作の概要は以下の通りである.

- (1) 気球工学用, PI 用復調器の RS232C ポートから出力されるシリアルデータは, それぞれ気球工学用, PI 用プロトコル変換器に入力され, プロトコル変換器のデータバッファに蓄積される. 同時にバックアップのノートパソコンにも入力される.
- (2) それぞれのプロトコル変換器は, WS1 からのデータ送出要求を受信したとき, データバッファに蓄積されたデータを昭和基地 LAN を通して WS1 に送出する.
- (3) WS1 は受信したデータの処理を行い, その結果の表示とハードディスクへの保存を行う. また, 最新の 1 フレーム分の生データを, 別ファイルに保存する.
- (4) WS2 は, 10 秒に 1 回昭和基地 LAN を通して WS1 に受信したデータの送出要求を出し, 気球工学および PI それぞれの最新の 1 フレーム分のデータを受け取る.

なお, WS1 と WS2 の機能は QL プログラム立ち上げ時のコマンドによって決まる. 従って, 現在の WS1 の機能に障害が発生した場合, 直ちにもう 1 台の WS を置き換えることが出来る. WS1 と WS2 のソフトウェア上の違いはデータ取り込み部分のみで, データ処理と表示部分は全く同一である.

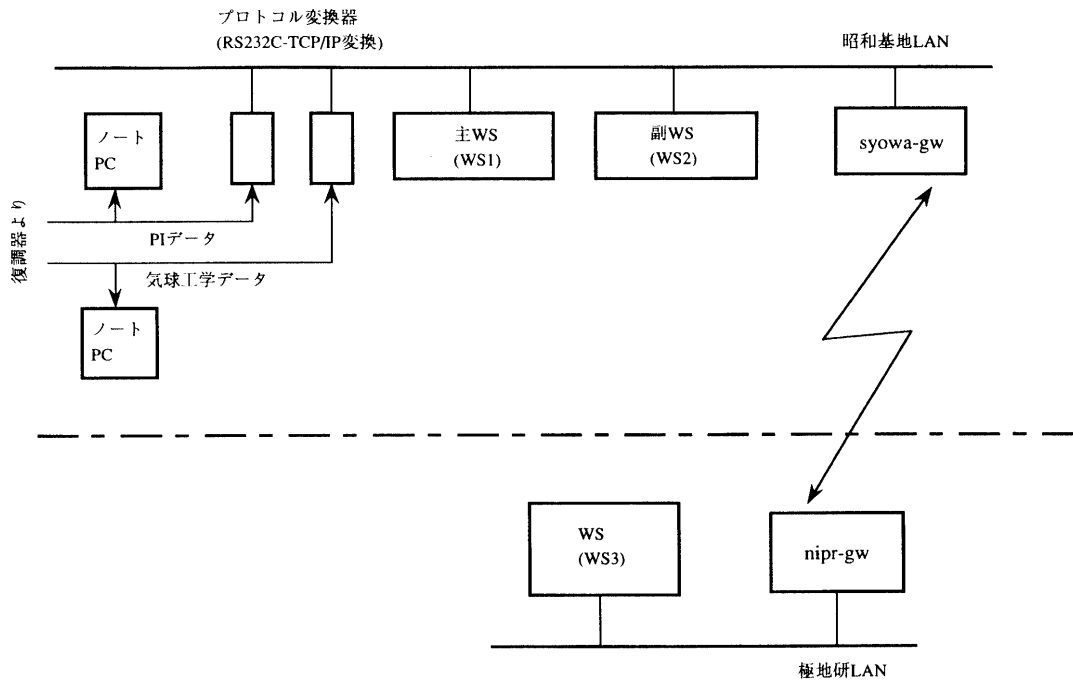


図6. 気球工学およびPI地上データ処理システムの構成

気球工学用とPI用復調器から出力されるデータは、それぞれプロトコル変換器に入力されると同時に、バックアップのノートパソコンにも入力される。WS1は受信したデータのQL処理を行い、その結果の表示と保存を行う。WS2はWS1のバックアップである。極地研-昭和基地間の衛星回線を介して、WS3はWS1内のデータを取得するQL処理とメッセージ通信を行う。

7. 昭和基地-極地研間のネットワークを利用した実時間データ伝送

クライオサンプリング実験を南極昭和基地で実施するにあたって、気球工学・PI双方の複雑なシステムの準備・動作確認・コントロールを南極観測隊に参加する少人数の関係者にすべてゆだねることは、現地に大きな負担を強いることが危惧された。そこで、気球関係機器の準備段階および実験実施時に、昭和基地で受信した気球工学側・PI側各種データをリアルタイムで日本に送信し、日本側サポートチームも気球工学・PIシステムの動作確認や、実験準備・実施状況の把握、発生した問題の解決あるいは助言等を行うことが出来るようにした。

昭和基地-極地研間のインマルサット衛星回線を利用したデータ通信と昭和基地LANは、1993年より極地研・情報科学センターによって整備が進められてきた。当初はインマルサットA音声回線とアナログモデムを用いてデータ通信が行われていたが、順次機能強化が図られ今日に至っている。1998年1月の昭和基地LANの現状を図8に示す。昭和基地-極地研間のデータ通信には、TCP/IPで動作するTaylorUUCP(Unix-to-Unix CoPy)を使用した。これは、昭和基地と極地研間の通信経路がインマルサットB衛星のデジタル回線を使用しているため、より信頼性の高い通信方法が必要とされることによる。UUCPは、もともと信頼性の低いアナログ電話回線を用いたデータ転送用に開発されたものであり、通信中のエラー訂正機能に優れている。今回の実験においては、一度も通信の中断は起こらなかった。極地研側でのネットワークを介してのデータ転送は、6.で説明した昭和基地のWS2とデータ取得間隔が異なるだけで、動作は同一である。すなわち、極地研側WS3の場合は、20秒に一度昭和基地側WS1に向けてデータ送出要求を発行し、その時の最新の気球工学とPIの1フレーム分の生データを昭和基地側WS1からコピーし、昭和基地と同一のソフトウェアでデータ処理後に画面表示を行う。実際に転送されるのは生データのみであるため、転送されるバイト数を最小限で済ませることができる。さらに、昭和基地

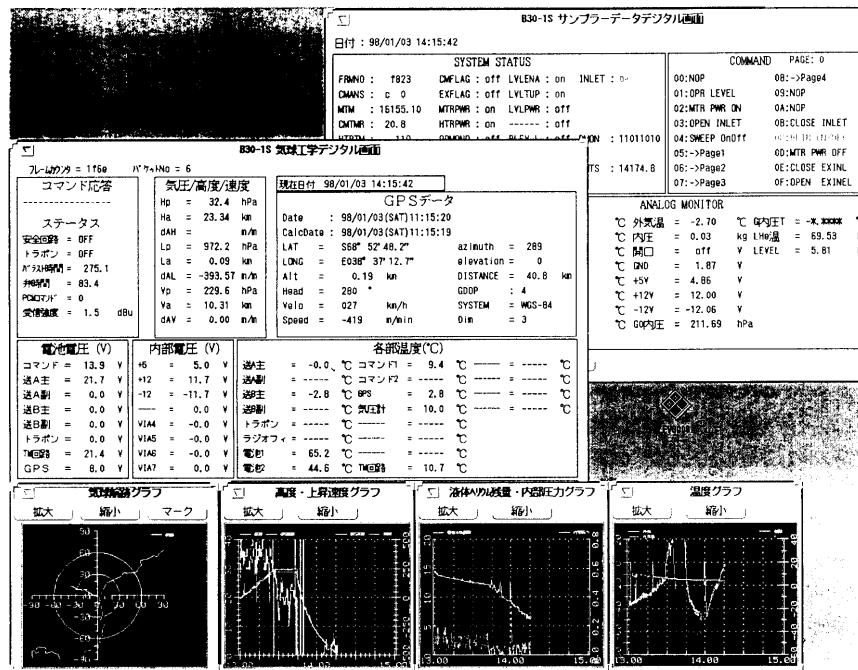


図7. WS上のQL画面構成

左上が気球工学デジタル画面，右上はPIデジタル画面である。下段は，左から航跡，高度・上昇速度，液体ヘリウム残量・デュワー内圧，PI各部温度のグラフである。

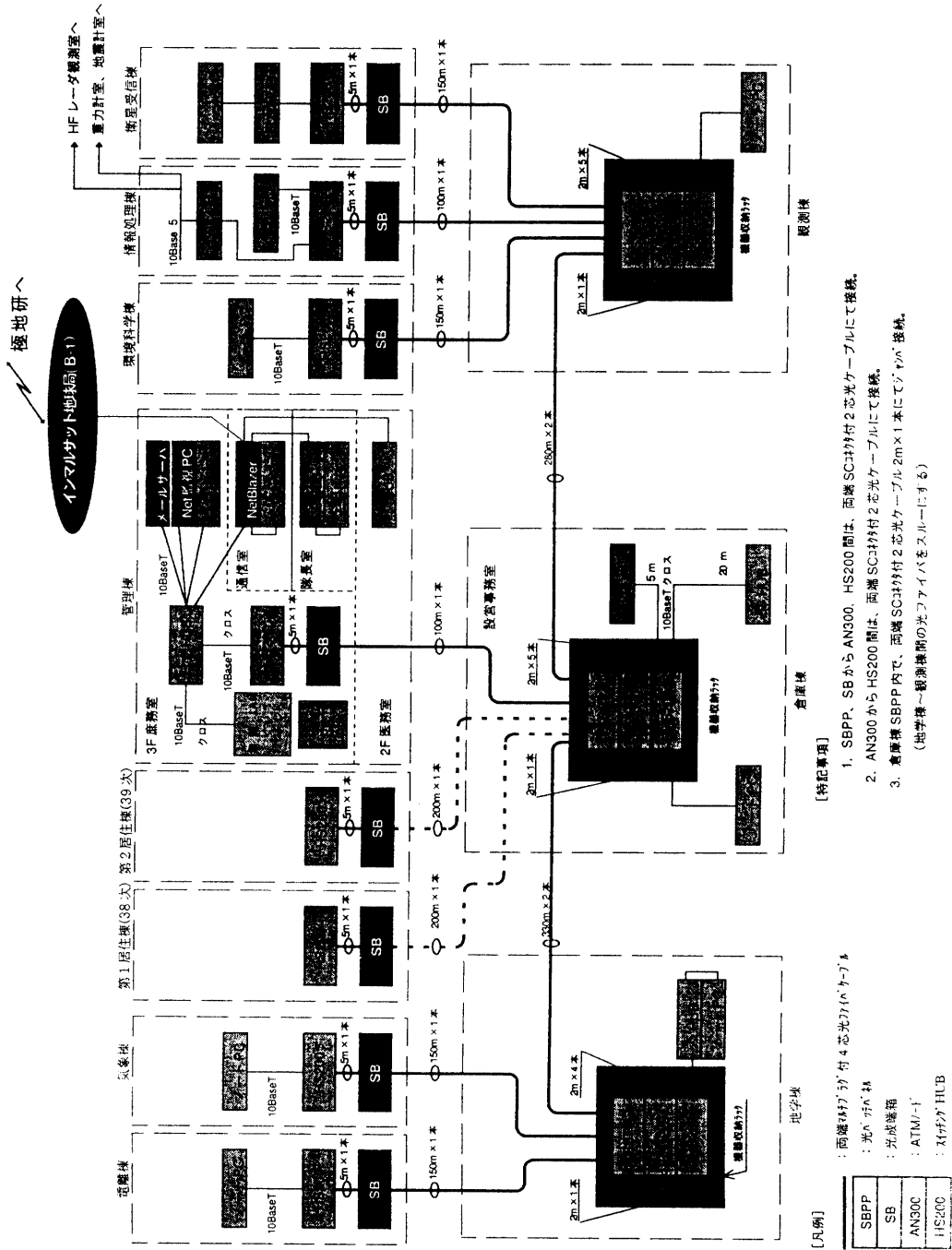
側のWSデータ転送の主体にせず，極地研側がその時の回線状態を見ながらデータ取得間隔を設定するため，昭和基地側のWSは衛星回線の状態の変動に関して全く無関係でよいと見做され，最悪でも現地のデータ処理や表示が影響を受けるような事態は避けられる。

8. 工学およびPI用地上支援機器

気球工学およびサンプラーの動作試験や各種作業時に使う特別な機器類（地上支援機器という）を用意する必要があった。取り扱いの容易さを考慮に入れて設計した。また，5. で述べた追尾受信系と同様に，相互に関連する機器を簡単に梱包し輸送するため，前後に蓋の付いたラック内に全て取り付けられた。同様に，サンプラーの準備作業のための機器も製作した。

9. ガス系

気球へのヘリウムガス供給システムは， 600m^3 のヘリウムガスを20～30分で注入する事を目標に設計し，充填速度や使用効率を改善した。このシステムは，ヘリウムガスカードル，バッファータンク，圧力計，減圧ユニット，注入口により構成され，各構成要素間は高圧用フレキシブルチューブで接続されている。構成の概略を図9に示す。ヘリウムガスカードルには容量47リットルのボンベが8本組み込まれており，この8本のボンベは直径8mm，長さ50cmの高圧ホースで8枝管に接続し1系統にまとめる。8枝管とバッファータンクの間は直径3/8インチ，長さ15mの高圧フレキシブルチューブで接続する。バッファータンクは最大20個の8枝管と接続することが可能であり，その他，減圧ユニットおよび圧力計と接続するためのポートもある。減圧ユニットおよび圧力計とバッファータンクとの接続は，直径1/2インチ，長さ3mの高圧フレキシブルチューブで行う。圧力計は0.25級のアナログ圧力計と半導体圧力計（ロードセル）の2種類が装備されており，ロードセルの出力はペンレコーダーを用いて記録することが出来る。なお，圧力計の配管にはストップ弁と大気圧解放弁が取り付けられてあり，



昭和基地の LAN 構成
(国立極地研究所・情報科学センター：1998)

図 8. 1998 年 1 月の昭和基地 LAN の現状

圧力計の校正等が迅速に行えるように配慮した。減圧ユニットは、最大 $250\text{kg}/\text{cm}^2$ の入り口圧力を $0\sim 10\text{kg}/\text{cm}^2$ 範囲に減圧・調整が可能であり、気球へのガス充填が迅速に行えるよう、流量が大きな調圧器を選択した。注入口は保持者の負担を軽減するよう軽量化を図り、さらに各種気球用ガスガイドに対応すべく、直径 22, 17, 13 cm の 3 種類を用意した。減圧ユニットと注入口の間は、直径 1 インチ、長さ 30m の高圧フレキシブルホースで接続する。気球のサイズによっては、30m を 2 本連結することも可能である。

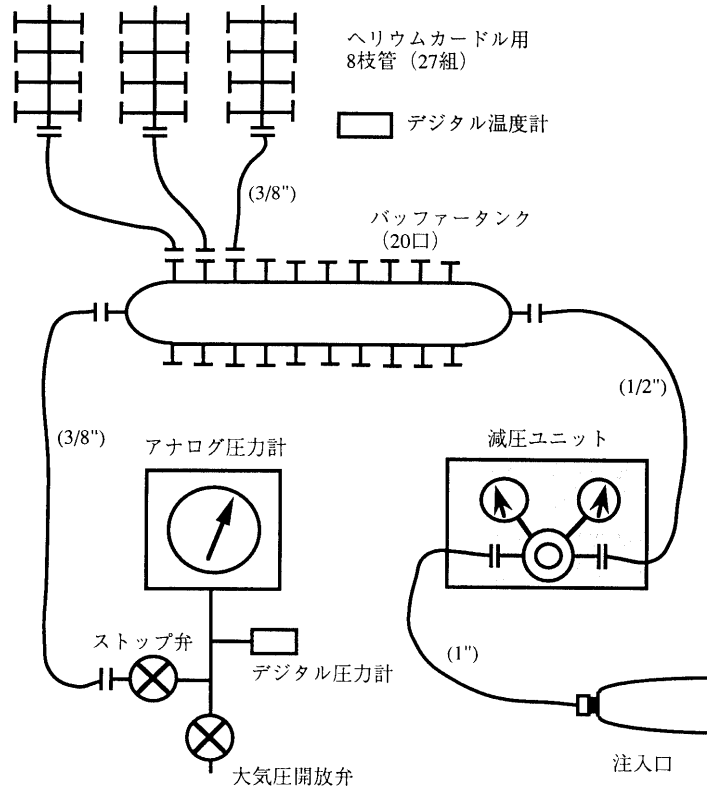


図 9. ヘリウムガス供給システムの概略図

システムは、ヘリウムガスカードル、バッファータンク、圧力計、減圧ユニット、注入口により構成され、各構成要素間は高圧用フレキシブルチューブで接続されている。バッファータンク導入による高流量化を目指した。

10. ロ ー ラ ー 車

本実験における気球の立て上げには、ローラーアタッチメントを装着したドーザーショベル（株式会社小松製作所製・D31Q-20、以下ローラー車）を用いた。このローラー車を図 10 に示す。ローラーアタッチメントはバルーンガイドローラーとフレームで構成される。バルーンガイドローラーは、第 32 次および第 34 次南極観測隊における気球実験（PPB）で使用したアルミニウム製のものをそのまま使用し、フレーム部のみ新たに製作した。前述の実験において使用したローラー車のベース車両である小型ブルドーザーが使用不可能となったため、第 39 次隊で昭和基地に搬入した D31Q-20 をベース車両として、ローラーアタッチメントを取り付けるよう設計した。ローラー車は、バルーンガイドローラーにて最大 2 トンの下方支持力を持つような、加重配分ならびにボルト取り付け強度を有している。すなわち、総浮力 2 トンの気球の立て上げが可能である。ローラーアタッチメントのダンピングリーチおよび傾斜は、ベース差車両のバケット制御機構を変更することなく使用でき、本実験で使用したランチャーを上方にかわすクリアランスは十分に確保できた。気球の完全立て上げ後、バルーンガイドローラーから気球の解放等の動作が必要となる。それは、ドーザーショベル本体から供給される 1 系統の油圧シリンダにより、バルーンガイドローラーのフレームからの解放および収納動作、そしてバルーンガイドローラーのフレ

ームへのロック開閉動作が切り替えて行われる。さらに、ロックが解除されなければローラーアタッチメントが解放されないような安全機構が組まれている。ローラー車の足回りは湿地用のトラックシューであり、アスファルトで簡易舗装された実験場では舗装を痛めることが予測された。このため、トラックシューの凹部にはめ込むゴムシューを準備した。尚、D31Q-20は、気球実験時以外には夏期の土木作業や冬期の除雪作業に使用される。この際にはローラーアタッチメントをバケットへ交換し、油圧系統を接続し直す作業を要する。また、このローラーアタッチメントは昭和基地で稼働しているパワーショベル(株式会社小松製作所製・PC-40)にも装着可能である。これは、万が一第39次隊行動においてしらせが接岸できなかった場合に、D31Qの昭和基地への輸送ができず、気球実験が実施困難になる事態を避ける措置である。

11. 事前準備

11.1 回収予備テスト

このクライオサンプリング実験では、サンプラーを海氷上に降下させ、しらせのヘリコプタを用いてすばやく搜索・回収する事が重要である。未経験のこのようなヘリコプタ運用・探索、航跡予測等の問題点を洗い出すため、1995年より昭和基地でゾンデや小型観測器(グラブサンプラー)を飛揚し、予備的な回収オペレーションを実施してきた。

1995年1月の36次予備実験では、昭和基地からラジオバイを付加したレーウィンゾンデを放球し、海氷上に降下したゾンデをヘリコプタで搜索・回収する方法を確立することを目的とした。降下地点の推定には、上層の風向・風速データを用いた航跡予測プログラムと、レーウィンゾンデ追尾システムによるゾンデの追尾結果を使用した。また、ヘリコプタからは携帯受信機を使用して海氷上のラジオバイ信号の方向探査を行った。このとき放球した2機は、無事発見し回収できた。この実験により、上層風の観測データを用いたゾンデの降下位置予測計算の精度がよいこと、ラジオバイ信号を用いた方向探査によって海氷上のゾンデを発見できることを確認した。また、「しらせ」との共同作業に関する経験を得ることができた [7]。

1996年1月(37次隊)と1997年1月(38次隊)では、GPS受信機とデータ送信機等を搭載した簡易型グラブサンプラー各3機を放球した。本実験では、昭和基地でグラブサンプラーから送信されるデータを受信することによって、サンプラーの現在位置・降下位置の把握が可能か確認すること、海氷上に着地する際の衝撃を吸収するためにサンプラー本体に付加した、アルミハニカム製の衝撃緩衝部の有効性を確認することを目的とした。昭和基地におけるサンプラーの追尾とデータ受信は、気球上昇中・パラシュート降下中ともに問題なく行われ、サンプラーの位置・高度及びサンプラーの状態を常に把握することができた。また、昭和基地においては、サンプラーが海氷上に着地する直前の高度150m程度までデータを受信することが可能であった。放球した装置は全て発見・回収に成功した。この予備実験の成功によって、サンプラーに搭載したGPS受信機による位置データの取得と昭和基地でのデータ受信が、海氷上に降下したサンプラーの搜索・回収に非常に有効であることを確認した。また、衝撃緩衝部は、設計通りの性能を持つことを確認した [8]。

11.2 スリングテスト

大型ヘリコプタによるスリング輸送は、物資の形状によっては飛行の安全を損なう場合があるので慎重な対応が必要となる。空気抵抗が物資の一部に及ぶと、物資が旋回することが予想される。また、スリング輸送を行うためには、物資とヘリコプタ下部のフックを連結する作業をホバリングしているヘリコプタの直下で行う。この作業は極めて危険であり、連結作業は小人数で迅速に行わなくてはならない。

以上に述べたスリング輸送の特殊事情を踏まえ、しらせ飛行科の協力を得て、1997年7月24日に海上自衛隊館山航空基地において、一連の作業訓練を実施した。この作業では、ダミーウエイトで350kgに調整した実際と同一形状のゴンドラを用いた。また、図2のパラシュート-ゴンドラ間の吊り下げベルト部を別途製作し、ヘリコプタとサンプラーの連結に用いた。吊り下げベルトの下部はあらかじめサンプラーに取り付けておき、吊り下

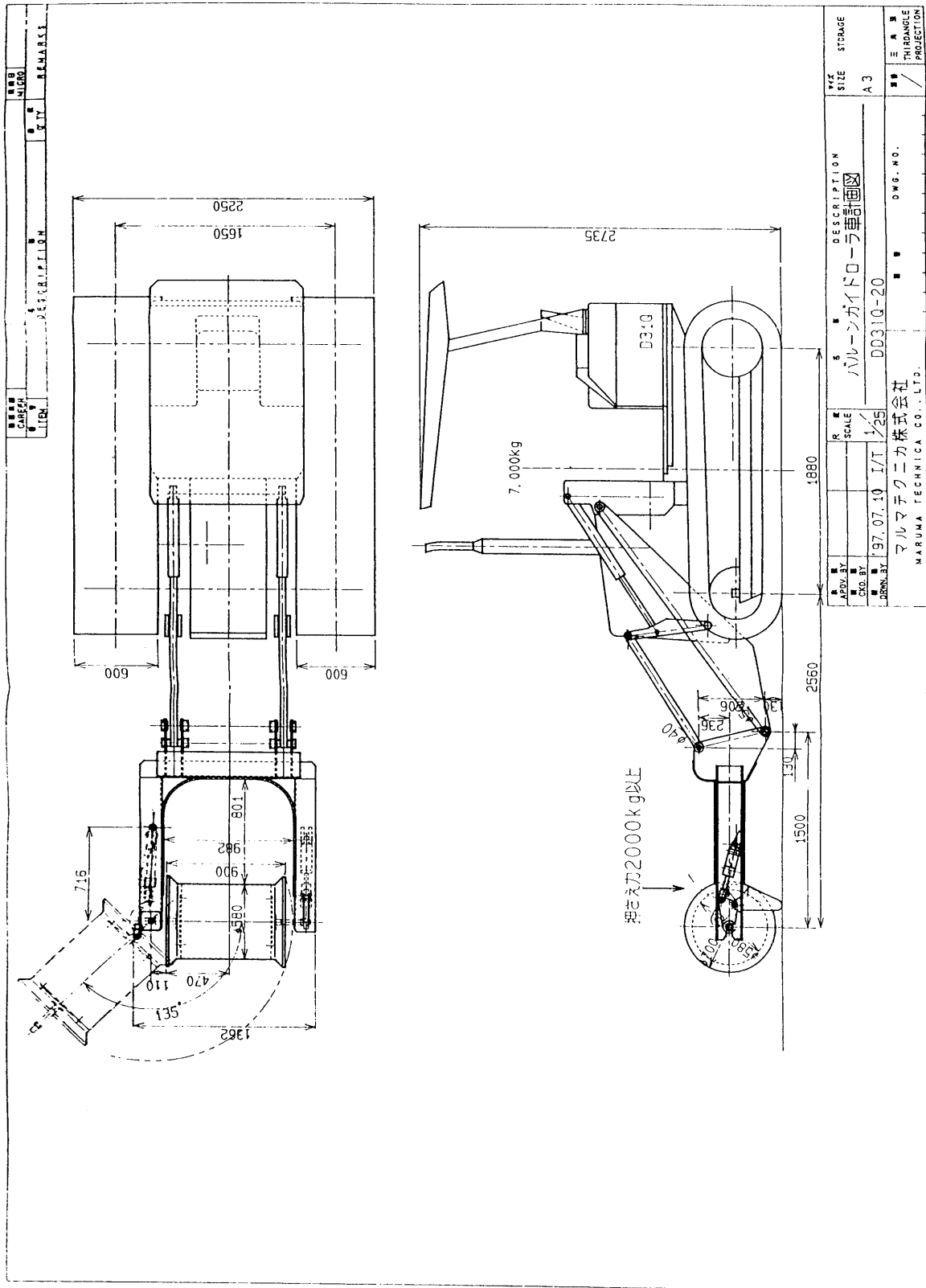


図 10. ローラー車

ローラーアタッチメントを装着したローラー車の設計図。ベースには、株式会社小松製作所製ドーザーショベル (D31Q-20) を用いた。ローラーアタッチメントは、バルーンガイドローラーとフレームで構成される。

げベルト上部とフックを吊下棒で地上作業員が連結する。着地しているサンプラーにヘリコプタが接近、連結作業、飛行、着地、連結解除という一連の飛行を3回繰り返して行った。その結果、吊り下げベルトとの作業性に大きな問題はなかった。但し、サンプラーが回転した場合に、それがヘリコプタの飛行に影響を及ぼすことを防止するため、本実験ではスウィベル(より戻し)を使用することとした。またスリングしての飛行では、50~90ノットの増減速、上昇・下降、旋回において、非常に安定している結果が得られた。

11.3 三陸での実地訓練

1997年9月3日と4日、昭和基地における気球実験に参加予定の39次隊員は、三陸大気球観測所において気球放球に関する一連の作業の実地訓練を行った。この訓練は、実験参加者に実験手順内容の周知をすること、実物あるいはダミーを用いて実際の放球手順の訓練をすること、使用する重機や機器類を実際に操作使用して、それらに不十分な点が見つければ改修をするためであった。

9月3日には、B1気球と昭和基地用のガス充填システムを使用し、放球までの一連の作業を実施した。翌4日には、B50気球と昭和基地実験のサンプラーを模擬するほぼ同重量のダミーを使用し、ガス充填とローラー車の機能確認試験、地上風を見ながらの放球タイミングのとりかたを2度にわたって練習した。この訓練中に判明した機器の問題点は、その後修復した。また、訓練状況をビデオに撮り、昭和基地に向かうしらせ船上での実験参加者の打ち合わせに使用した。

12. おわりに

昭和基地における大気球を用いたクライオサンプリング実験が成功裡に終了した。この要因は、困難な諸条件の下で実験を遂行した現場関係者の努力に負うところが大きかったが、これまで述べてきたように、周到な事前の計画や準備作業、システム構成、各機器の設計方針も見逃すことは出来ないと考えている。特に、昭和基地で取得した各種データをリアルタイムで日本国内に転送することにより、国内の関係者がサポートすることが出来たことが大きな要因であろう。これまで、昭和基地と日本の間の連絡手段は、電話・faxやe-mail・サマリーデータの送信等に限られており、昭和基地現地のデータを国内においてリアルタイムで監視する方法がなかった。そのため、昭和基地で大規模な実験を行う際には、現地で実際に作業を行う観測隊員に非常に大きな負担を強いていた。今回の実験では、現地と国内サポートチームの間でリアルタイムにデータを共有し、両者で作業を分担あるいは補完し合うことによって、現地の観測隊員の負担を大幅に軽減することができたと考えている。欲を言えば、放球場からのデータ(ガス圧、ガス温度など)までもリアルタイムに送ることが出来れば、より充実した支援も可能となるであろう。このような実時間データ伝送の試みは、今後の昭和基地における各種の実験においても適用が可能であろう。

謝辞

最後に、本実験に参加あるいは協力を惜しまれなかった、第39次および38次南極観測隊隊員各位、砕氷艦しらせの飛行隊をはじめ乗組員各位、国立極地研究所の関係者に感謝いたします。また、実時間データ伝送システム開発にあたっては、昭和基地LANの構成や昭和基地-極地研間のデータ通信方法について様々な助言をいただき、またデータ通信試験時にも助力を頂いた極地研・情報科学センターのスタッフに感謝いたします。

参考文献

- [1] Honda, H., S. Morimoto, H. Akiyama, G. Hashida, S. Aoki, H. Ui, T. Nakazawa, N. Yajima and T. Yamanouchi, A newly developed grab sampling system for collecting stratospheric air over antarctica, *Antarctic Record*, **40**(2), 156-168, 1996.

- [2] Honda, H., S. Aoki, T. Nakazawa, S. Morimoto and N. Yajima, Cryogenic air sampling system for measurements of the concentrations of stratospheric trace gases and their isotopic ratios over Antarctica, *J. Geomagn. Geoelectr.*,48,1145-1155, 1996.
- [3] Honda, H., Balloon-borne cryogenic whole air sampling system, ISAS RN 433, 1990.
- [4] 本田秀之, 井筒直樹, 矢島信之, 森本真司, 橋田元, 山内恭, 青木周司, 中澤高清, 昭和基地用採取装置の試験, 大気球シンポジウム, 7-10, 1996.
- [5] 本田秀之, 青木周司, 町田敏暢, 菅原敏, 川村賢二, 吉村悟, 中澤高清, キルナ(スウェーデン)における大気微量成分の観測, 大気球シンポジウム, 5-8, 1997.
- [6] 本田秀之, 矢島信之, 気球工学系集中制御装置・データ伝送システム, 大気球シンポジウム, 4-8, 1993.
- [7] 山内恭, 森本真司, 召田成美, 青木周司, 本田秀之, 松坂幸彦, 南極昭和基地での気球回収予備実験, 大気球シンポジウム, 25-28, 1995.
- [8] 森本真司, 橋田元, 山内恭, 本田秀之, 秋山弘光, 矢島信之, 青木周司, 中澤高清, 宇井啓高, 召田成美, 南極昭和基地におけるグラブサンプリング実験-37次隊での実験結果, 大気球シンポジウム, 5-6, 1996.