

南極昭和基地における大気球を用いた成層圏大気の クライオジェニックサンプリング実験 [II]

－打ち上げおよび回収オペレーション－

青木周司**・橋田 元**・町田敏暢***・岡野章一**・山内 恭**
森本真司**・本田秀之****・並木道義****・矢島信之****・中澤高 清*

Collection of stratospheric air with balloon-borne cryogenic sampler over Syowa Station, Antarctica [II]

- Balloon launching and payload recovery -

By

Shuji AOKI**, Gen HASHIDA**, Toshinobu MACHIDA***, Syouichi OKANO**,
Takashi YAMANOUCHI**, Shinji MORIMOTO**, Hideyuki HONDA****, Michiyoshi NAMIKI****,
Nobuyuki YAJIMA**** and Takakiyo NAKAZAWA*

Abstract: In order to elucidate the vertical distribution of greenhouse gases and the isotopic compositions in the antarctic stratosphere, an experiment of balloon-borne cryogenic air sampling over Syowa Station were planned in 1992. A feasibility study for recovering a sampler was made by using the last 10 years of aerological data obtained at the station. We have confirmed that the experiment would be possible to achieve. Preliminary experiments were made every summer between 1995 and 1997 at the station using small rubber balloons and simple payloads such as radio buoys and grab samplers. All the payloads landed on the sea ice or the antarctic continent and recovered by helicopters. Development of a cryogenic air sampler, a telemeter system of the sampler, and a communication system between Japan and the station have also been made. Test flights of the newly developed sampler were successfully made at Sanriku, Japan and Kiruna, Sweden in 1996 and 1997, respectively.

The cryogenic air sampling experiment was performed on January 3, 1998 at the station using a large balloon. Air samples were collected between 10 and 30 km. The sampler landed in Lüt zow-Holm Bay and recovered by the ice breaker "Shirase" on January 6. In this paper, we describe the instruments and the liquid helium used for the experiment, the station facilities, and how we managed the experiment.

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

概 要

南極域の成層圏における温室効果気体やその同位体の鉛直分布を求めるために、昭和基地における大気球を用いたクライオジェニックエアースAMPLING実験が1992年に計画された。昭和基地における過去10年間の高層気象観測データを用いて、サンプラー回収の可能性に関する検討が行われ、実験の実現性が高いことが明らかになった。その後、小型ゴム気球を用いた予備実験が1995年から1997年にかけて昭和基地で実施され、グラブサンプラーなどのすべてのペイロードがヘリコプタによって回収された。また、本実験用にクライオジェニックサンプラーやテレメーターシステムおよび日本と昭和基地間の情報交換システムの開発が行われた。さらに、開発されたクライオジェニックサンプラーを用いたテスト飛揚が日本の三陸で1996年に、さらにスウェーデンのキルナで1997年に実施され、両者とも成功させることができた。

大気球を用いたクライオジェニックエアースAMPLING実験は1998年1月3日に昭和基地で実施された。高度10~30km間で大気採集が実施された後、サンプラーはリュツォホルム湾に着水し、1月6日に砕氷艦しらせによって無事回収された。本論文ではこの実験に用いられた機器や液体ヘリウムおよび基地の設備について、また実験の経過について説明する。

重要語：南極、成層圏、クライオジェニックエアースAMPLING、液体ヘリウム、気球

1. は じ め に

南極域における物質循環の解明を目的とした極地研究所気水圏系気象グループの第5期5ヵ年計画が1997年から開始された。その一環として大気球を用いた南極成層圏大気の採集実験が1998年1月3日に実施された。得られた大気試料は日本に持ち帰られ、CO₂、メタン、N₂Oといった比較的安定な温室効果気体の濃度やそれらの同位体比、オゾンホール形成の原因物質であるさまざまなフロン類の濃度、および大気主成分である窒素と酸素の同位体比などの高精度分析が進められている。分析結果がまとめられ、これらの大気成分の分布から、これまで正確には知られていなかった南極成層圏での大気の循環が明らかにされるものと期待されている。また、大気微量成分の濃度と同位体比を組み合わせることにより南極成層圏における光化学反応過程に関する重要な情報も得られると期待されている。さらに、このような手法を用いた大規模な実験は南極域では今回が世界初であるという点で特に意義深いものと考えられる。

2. 実験計画と予備実験

昭和基地でクライオジェニックサンプラーを飛揚させ、南極成層圏の大気を採集する計画は1992年1月に発案された。その後、サンプラー回収の可能性についての検討 [1] や、サンプラーおよび実験設備などに関する検討 [2] が行われ、実現の可能性が十分にあることが確認された。1995年1月には昭和基地で2kgのゴム気球にラジオブイとレーウィンゾンデを付けて放球し、パラシュート降下させた後、しらせのヘリコプタで探査し回収するという予備実験が2回おこなわれた [2]。さらに1996年と1997年の1月には4kgのゴム気球にグラブサンプラーを付けて飛揚させる実験が3回ずつおこなわれ、サンプラーはすべてヘリコプタにより回収された [2]。また、昭和基地での実験用に改良されたクライオジェニックサンプラーを用いた予備実験が三陸大気球観測所で1996年9月に実施された。同時に開発された送・受信、追尾システムの性能試験も併せて実施された。さらに、スウェーデンのキルナで1997年2月から3月にかけておこなわれたADEOS衛星ILASセンサーの検証実験にこのクライオジェニックサンプラーを持ち込み [3]、北極成層圏の大気採集を行い、期待された成果を得ることができた。

3. クライオジェニックサンプラー

本実験で使用した空気試料採集装置には液体ヘリウムを冷媒としたクライオジェニックサンプリング法が採用されており、成層圏のような希薄な大気環境下でも高効率、低汚染で空気を採集することができる。本装置の概略を図1に示す。装置内には12本のサンプルシリンダーが液体ヘリウムによって -269°C の極低温に冷却されている。空気の採集は、地上からのコマンド信号により制御回路を介してモーター駆動バルブを開けることにより開始される。サンプルシリンダーに導かれた空気は極低温のシリンダー内部で直ちに固化するので、バルブが開いている間は連続的に空気を取り込むことができる。装置を収納するアルミ容器はOリングシールの完全密閉型で、装置が海上に着水した際に装置内部への海水の浸入を防ぎ、装置が海面に浮くように設計されている。以上の性能や機能は宇宙研の三陸大気球観測所における実験に使用されている装置[4]と同様であるが、南極での実験に対応するために、本装置には以下のような改良が施されている。第一に装置が露岩や海氷上に着地した際の衝撃に備えて、アルミチャンバーの外部にアルミ製のゴンドラフレームとアルミハニカム製のクラッシュパッドが備え付けられている。第二に、ゴンドラ内部の配管が衝撃で破損しないようにモータードライブに特殊な支持金具が取り付けられている。第三に放球時のトラブルをできるだけ避けるために、気球のコントロールゴンドラと観測ゴンドラが一体化されている。コントロールゴンドラは内部を発砲スチロールで保温したアルミ製の容器に収納され、本体のゴンドラフレーム脇に取り付けられている。さらに、パラストはゴンドラフレームのアルミ柱内に納めることによって体積の効率化が計られている。

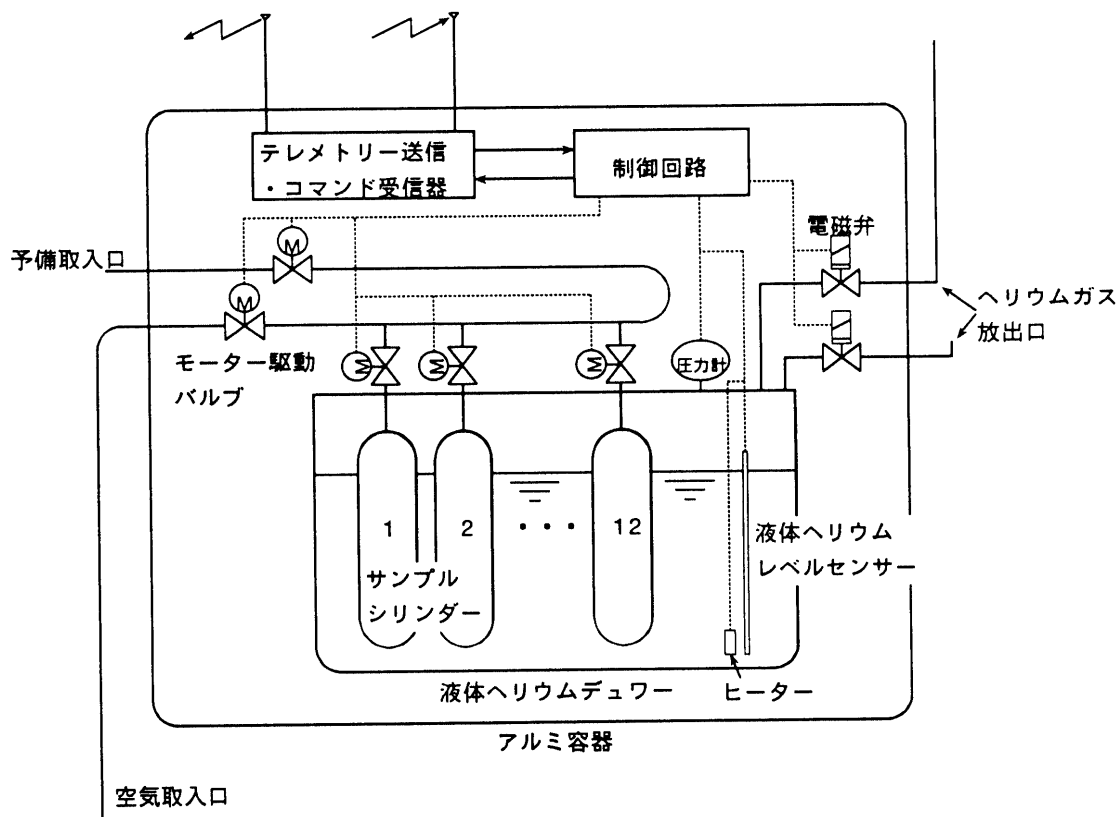


図1. クライオジェニックサンプラーの概略。

4. 液体ヘリウム

本実験は液体ヘリウムの使用が絶対条件である。昭和基地での液体ヘリウム調達は、リスクを分散させるため次の二通りの方法で行なわれた。第一は、昭和基地で液体ヘリウムを製造する方法である。昭和基地では第35次隊から、地学部門によって超伝導重力計の運用が開始され、この装置を維持するためにヘリウム液化機が導入され、年間2～3回の頻度で毎回およそ100リットルの液体ヘリウムが製造されている。本実験では地学部門の協力を得て、この液化機を使用することとした。この液化機では、100リットルの液体ヘリウムを製造するのに高純度ヘリウムガスボンベ（47l, 120kg/cm², 純度99.9999%以上）が約20本必要となる。今回は、本実験用として250リットル分の液体ヘリウムが製造可能なボンベ50本を昭和基地に持ち込んだ。我々は1997年12月20日から基地で液化作業を開始し、12月30日には84リットルの液体ヘリウムを得ることができた。

第二は、液体ヘリウム製造機に不調が生じた場合に対処するため、日本から液体ヘリウムを輸送する方法である。用意した保存容器は容量250リットルのものが2基、容量100リットルのものが1基である。各容器は上部を解放した木箱に収納され、しらせの後部観測甲板に固縛されて運ばれた。各容器の液体ヘリウム残量の経時変化を図2に示す。液体ヘリウムは専用の保存容器に入れて室内に静置しても毎日1%程度は蒸発する。今回は船舶で輸送するため、船体の振動や動揺により蒸発が促進される可能性が大きい。実際、250リットル容器の一方のNIS250-201と100リットル容器のDS-100の晴海出航前からオーストラリアのフリーマントル入港までの蒸発率はそれぞれ1.4%/day、1.7%/dayと静置した場合より大きくなっており、船の動揺によるものと考えられる。これに対して、もう一方の250リットル容器であるNIS250-200は、蒸発率が3.0%/dayとNIS250-201の約2倍にも達した。これはNIS250-200の真空断熱層の性能がリーク等により著しく低下していたためであると推定される。オーストラリアのフリーマントル入港時には地元業者から液体ヘリウムを250リットル購入し、日本から持ち込んだ容器に注ぎ足した。その際、NIS250-201容器とDS-100容器を優先して満充填し、余った分を性能の落ちるNIS250-200に補充した。フリーマントル出航後は暴風圏を通過し、昭和基地接岸後は振動の激しい氷上輸送を経験したにも関わらず、液体ヘリウムの蒸発率はフリーマントル入港前とほぼ同様に推移し、NIS250-201とDS-100の容器には12月28日の時点で40～50%が残った。昭和基地への液体ヘリウムの持ち込みは、輸送中の動揺や振動の大きさからかなりの困難が予想されていたが、今回の成功により新たな方法として認知されて良いであろう。

5. 昭和基地の地上設備

5.1 道路および建物

昭和基地はリュツォホルム湾の北東部に位置する東オングル島に設けられた基地であり、その位置は69°00'S, 39°35'Eである。実験に関連した基地の建物と道路の配置を3に示す。第39次隊が到着した1997年12月上旬の昭和基地は例年より積雪が多く、除雪が間に合わなかったため、基地主要部の東をまわる道路は管理棟より先が不通となっていた。このため、夏期隊員用宿舎前に集積された気球実験関連物資のうち観測棟に運ぶべきものはゴムキャタピラが付いたクローラードンプを用いて、荒金ダムを南に回り込んで雪上輸送した。また、融雪のため第1ダムが溢れ、Cヘリポートに行く道が冠水し通行止めとなっていた。ポンプ4台をダムに投入し、日夜排水に努めたところ、車高のある大型車ならどうにか通行できるようになった。

クライオジェニックサンプラーの組立と調整には電源と広いスペースを必要とする。我々は前次隊にこれらを満足する建物の確保を依頼したところ、昭和基地西端のAヘリポート横にあるロケット組立調整室と基地主要部の北にある作業工作棟を提示された。作業工作棟は設備的には恵まれていたが、車両整備や夏作業の準備等で人の出入りが多く、我々が使える作業スペースがかなり限られていた。一方、ロケット組立調整室は現在では実質的な基地活動には利用されていないため、他のグループとの競合がなく、自由に使える空間が比較的広かった。

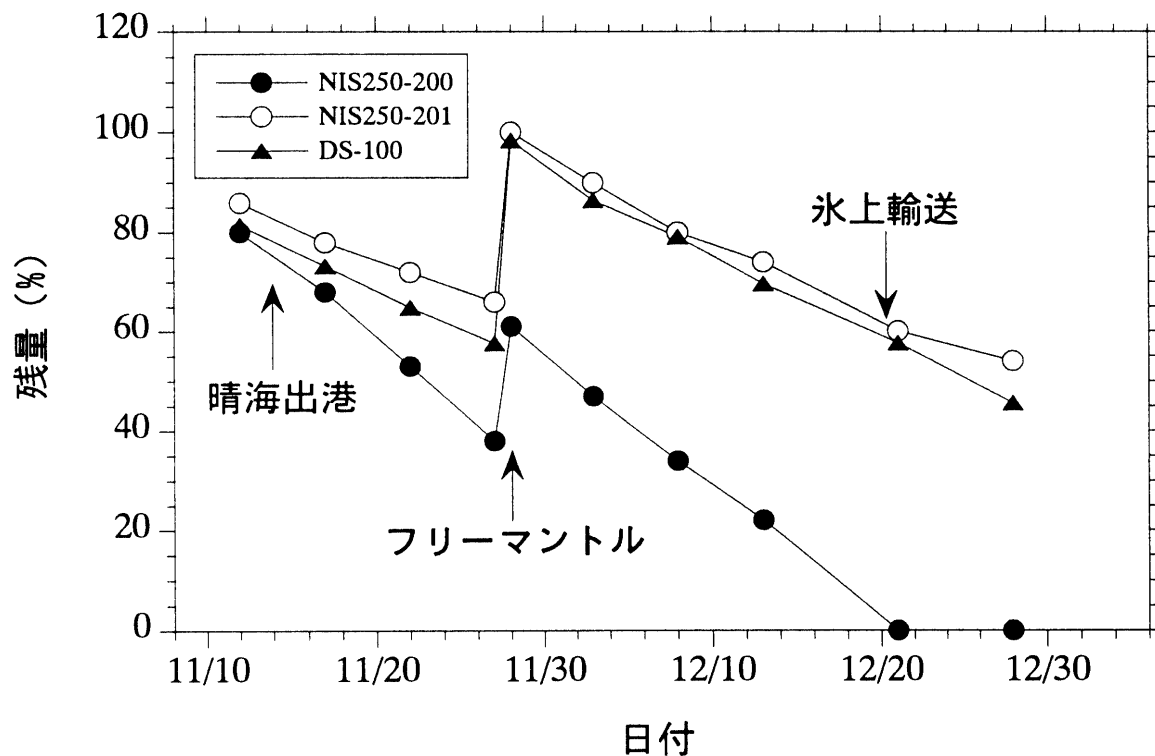


図 2. 日本から昭和基地までの保存容器中の液体ヘリウム残量の変化. NIS 250-200 と NIS 250-201 は 250 リッター容器であり, DS-100 は 100 リッター容器である. それぞれの容器は日本出港前に満充填され, オーストラリアのフリーマントルでも追加充填された.

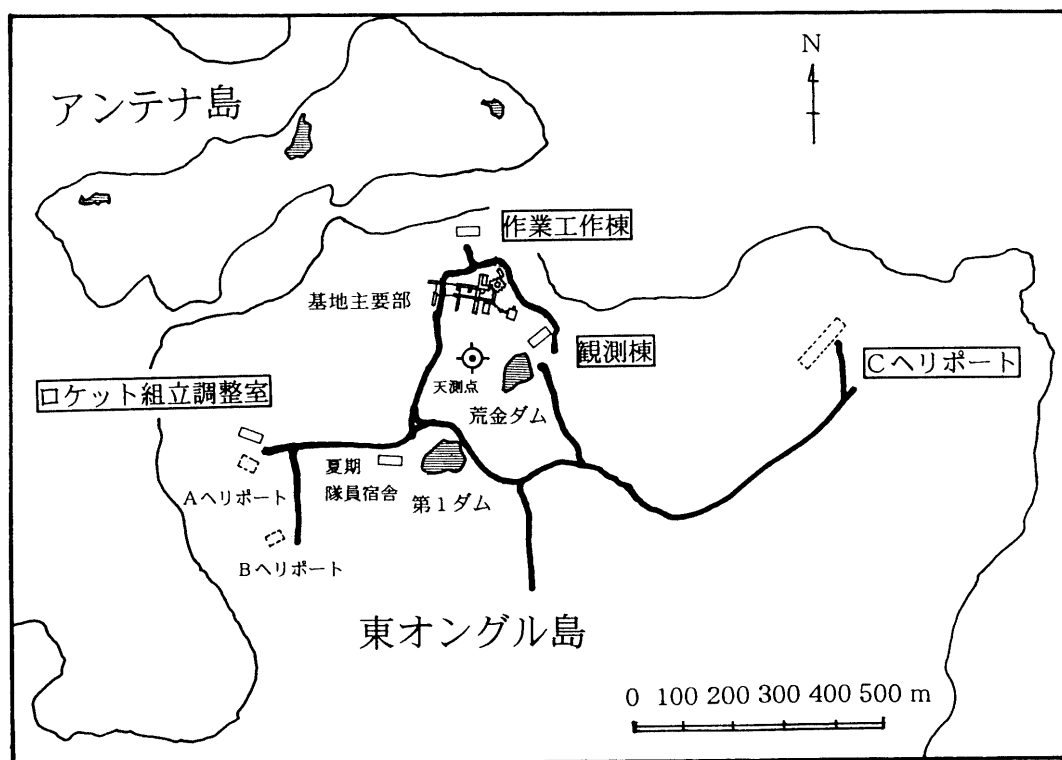


図 3. 観測に関連した昭和基地の建物の配置と主要道路. クライオジェニックサンプラーの組立と調整は基地西端の第 1 ヘリポート横にあるロケット組立調整室で行われ, サンプラーへのヘリウム充填および最終組み立ては基地主要部の北にある作業工作棟で実施された. 大気球の飛揚は基地東端の C ヘリポートで行われ, 基地主要部の南にある観測棟に設置された送・受信システムにより装置および気球のコントロールが行われた. 主要道路は太線で示した.

さらに、作業工作棟は床の油よごれが気になった。我々はこれらの点を勘案してロケット組立調整室を選んだ。しかし、この建物は長年人が居住しなかったため、吹き込んだ雪が固まった氷があちこちに堆積し、土埃もひどく、大掃除が必要であった。また、昭和基地で除去された廃棄アスベストの保管場所として利用されていたため、片づけに1日かかった。さらに、前次隊の除雪作業中に過ってこの建物に於ける電源ケーブルが切断され、そのまま放置されていたため、復旧させるのにさらに半日を要した。また、この建物の暖房設備は完全に壊れており、夏とはいえ外気と同じ温度で作業しなければならず、快適な作業環境とはとても言えなかった。気球放球前日の液体ヘリウムの転送作業とアルミ容器をゴンドラフレームに固定する作業にはクレーンが必要になる。ロケット組立調整室には備え付けの小型クレーンがあったが高さが不十分なので、放球前日には装置と周辺機器を作業工作棟へ移動し、備え付けのホイストクレーンを利用して最終作業を行った。

5.2 放球場

30次、32次、34次の大型気球実験 [5]、[6] にならって、我々もクライオジェニックサンプラーの放球を基地主要部から東へおよそ1km離れたCヘリポートで行うことにした。ヘリポートは幅約30m、長さ約110mで、長手方向は卓越風向である北東に向き、気球の展開、立て上げ、放球作業に適した配置となっている。図4に放球場での設備配置を示す。ヘリウムカードルは1基が47リットルボンベ8本で構成されている。クライオ実験のための大気球用とその予備用にそれぞれ14基、放球訓練およびゴム気球用に2基の計30基のカードルを放球場に持ち込み、クレーン車を用いて上下2段7組と8組の2列にまとめた。カードル列の中央にヘリウムガス用マニホールド、圧力計、減圧ユニットを置いた。圧力調整担当者が圧力計と気球本体を見ながら作業できるようにそれぞれの配置を考慮した。ランチャー用およびヘリウムガス圧力計用ロードセル指示計(ユニパルス製・F252)、ロードセル用ペンレコーダー、ヘリウムガスボンベ用デジタル温度計、風向・風速計用ペンレコーダーは、圧力計および減圧ユニットの傍らに置き、放球に関わる情報を一箇所で見るように配置した。また、ヘリポート脇に雪上車(SM50)を駐車し、実験準備中戸外に放置できない計測器類の保管場所として使用した。

ヘリウムガス供給系も前の隊にならってほぼ同じものを新調したが、配管中のストップバルブからのガス漏れが無視できないとの指摘があったため、各カードル毎に配置されていたストップバルブは全て除き、マニホールドの両端と圧力計の終端部のみの使用に限ることとした。さらに、ヘリウムガス流量をできる限り上げるため、各カードルにつないだ8枝管の先は3/8インチの耐圧フレキシブルホースによりマニホールドに集中させ、そこ

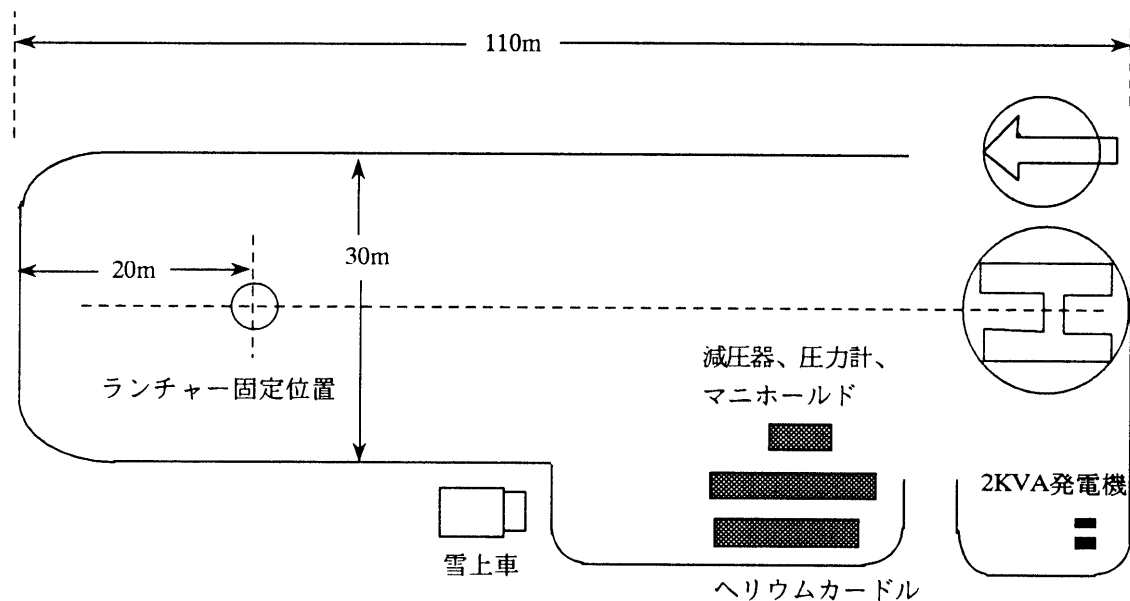


図4. 1998年1月3日に昭和基地で実施された成層圏大気採集実験の際に使用されたCヘリポート放球場の設備配置。

からは太さ 1/2 インチの耐圧フレキシブルホースで大流量がとれる圧力調整器（田中製作所 JET-5-1）に接続した。なお、将来の大型気球実験にも対応できるように、我々は今回 20 口のマニホールドを新たに製作し、昭和基地に持ち込んだ。気球のガスガイドに挿入するガス注入口も新たに製作し、圧力調整器とガス注入口の間は長さ 50m、太さ 1 インチのフレキシブルホースで接続した。ガスが流れる配管中では正確な圧力測定ができないため、アナログ圧力計(GP25-141D)とデジタル圧力計はマニホールドのガス凝み部に取り付けた。温度計のセンサーはカードルに組み込まれたガスボンベの下面 2 箇所へ直射日光が当たらないように取り付けた。

ランチャー（株式会社サイトウ製）は第 30 次隊が昭和基地に持ち込み、第 32 次、第 34 次の気球実験でも使用されたものである。その後は、ヘリポート脇に厚手の布で覆って固縛・保管されていたので 1994 年 1 月に状況調査を行い、保管状態が良好であることが確認されたため、持ち帰り整備はしていない。実際、回転部のギア、浮力計測用の天秤ともにスムーズに動き、今回使用上の問題は全くなかった。一方、ランチャーを固定するためのアンカー部はアスファルトで埋設されていたため、掘り出すのに半日以上かかった。これは多分 34 次以降にヘリポート整備をした隊が用途不明のため埋めてしまったものと推量される。今後は注意を要する。幸いアンカー部を覆っていたアスファルトがきれいに剥がれたことと、アンカーボルトの保存状態が良かったことにより、今回の使用には問題がなかった。ランチャーには、気球完全立て上げ後の浮力が計測できるようロードセル（ミネベア製・C3P1-1T）を取り付けた。

ヘリポートの表面はアスファルト簡易舗装が施されており、気球の展開部分の表面は被覆針金ネットで覆われている。このような表面が、気球本体およびガスガイドを痛めないよう、必要部分に厚手シートを敷きつめた。さらに、ローラー車の軌道には道板を置き、キャタピラでアスファルトが痛まないよう配慮した。さらに、ランチャーの回りには薄手シートを敷きつめ、パラシュートや他の構成物品が地面に触れても傷がつかないようにした。なお、従来使われていたローラー車(ミニブル)が使用に耐えなくなったため、今回極地研の観測協力室によって小松ドーザーショベル(DD31Q)をベースとした新型ローラー車が導入された。また、気球展開用およびクライオジェニックサンプラーの移動用として直径 30 cm の空気タイヤ付台車 (1.2m×1m) を 2 台用意した。

放球のタイミングを図るためには、放球前数時間に渡って現場の風向・風速の変化傾向を知る必要がある。さらに、放球時には風向・風速に応じて、ランチャーからのクライオジェニックサンプラーの位置を変えなければならない。そこで、ヘリウムカードルに 4m 長のスチール製単管を固定し、その先に風向・風速計を取り付け、現場の風を直接測定した。

放球場に設置された機器の電源は 2KVA の発電機から供給した。なお、発電機はヘリポートの東端に据えつけ、騒音により放球作業に支障をきたさないように配慮した。また、故障を考慮して予備の発電機も用意した。

5.3 連絡系統

実験中は、放球作業を行う C ヘリポート、サンプラーや気球の制御を行う観測棟、レーウィンゾンドの受信を行う気象棟、回収にむかうヘリコプタが待機するしらせ間での緊密な連絡が不可欠である。このため、各々の場所で通信担当者を定めて VHF による無線通信を行った。また、C ヘリポートにおいては、気球立て上げが完了するまで、ローラー車のエンジン音や気球へのヘリウム充填音により、多数の作業員間の連絡が肉声では難しい。そこで、指揮担当者がハンドマイクを持つほか、ヘッドセット付の小型小電力携帯無線機を、指揮、PI、記録、ガス圧調整、ガス注入口保持、ローラー車運転の各担当者が携帯してお互いの連絡を行った。また観測棟では国内支援者とインマルサット電話により適宜連絡をとった。

5.4 送受信・追尾システム

我々は昭和基地既設の大きな追尾受信システムに代わる設備として、独自に開発した八木アンテナ使用のシステムを採用し、昭和基地での設置や調整に要する時間と手間を大幅に削減することができた。このシステムは可搬型の装置として設計され、さらにクライオジェニックサンプラーに搭載された GPS 受信機からの測位情報によってアンテナ指向方向を計算し、自動追尾を行うものである [3]。

アンテナとその駆動部は観測棟の屋上に設置し（写真1）、気球自動追尾システムと送・受信機などは、その内部に設置した（写真2）。一方、クライオジェニックサンプラーの組立と調整を行ったロケット組立調整室ではテレメトリー送信機を屋外に出し、コマンド受信アンテナを室内天井に吊り下げることによって、観測棟との電波の送受信テストをおこなった。途中に小高い丘があるため、観測棟屋上からはロケット組立調整室が直視できなかったが、送受信には全く支障がなかった。同様に観測棟屋上からは気球放球場であるCヘリポートもやはり途中の小高い丘のため直視できなかったが、放球直前の嘯み合わせテストの際の電波の送受信にも問題はなかった。

この装置のアンテナ制御は自動追尾モードのほか手動追尾モードにも切り換えられるように設計されており、アンテナドライブには八木アンテナの指向方向に向けてITVカメラが取り付けられている。気球放球直後は仰角と方位角の変動が大きいので、カメラの映像を追いながらアンテナドライブを手動で制御することによって、気球の追尾を確実に行うことができた。さらに今回の実験では、気球が雲に隠れるまではカメラを用いた手動制御で追尾を行い、以降はGPSデータを用いた自動追尾に切り替えた。また、気球カット後のパラシュート降下中はGPSデータの受信が頻繁に途切れたため、最も受信強度が強くなる方向を手動で探知しつつ追尾を行った。その結果、高度190mまで電波を受信しデータを復調することに成功した。この高度で得られたデータはヘリコプタによる搜索作業に大いに役立った。また、ヘリウムガスを充填して立ち上がった気球をITVカメラにより監視できたので、観測棟内部に居ながら放球作業の進行を知るのにも役立った。

テレメトリーシステムで受信したデータはノート型パソコンに送られ、画面表示や保存がおこなわれると同時に、昭和基地LANに接続しているノート型ワークステーションにも送られ、ノートパソコンと同様に画面表示とデータの保存がおこなわれた。

5.5 昭和基地と極地研間の情報交換

今回、昭和基地と極地研間でネットワークを利用した実時間データ伝送を行うため、ワークステーション(WS)を2台昭和基地に持ち込んだ。このWSはあらかじめ国内で各種の設定がなされており、1997年12月24日に昭和基地LANに接続した後は、極地研WSから直接uucp, telnet, ftp接続することによって日本からも昭和基地のシステムの動作確認が可能になった。12月27日から28日にかけて、昭和基地ではクライオサンプリング実験の気球工学とPIの機器全体を通しての嘯み合わせが実施され、極地研でも作業進行中の各種データの同時監視が行われた。

1998年1月3日の実験当日は、極地研でも放球の4時間前から各種データの監視が開始され、放球直前の各種機器の最終チェック状況や、放球後のクライオサンプラーの位置や、大気試料採取操作などの搭載機器の動作状況の確認が昭和基地と極地研で同時に続けられた。さらに、WS上でtalkコマンドを用いた文字通信による情報交換が昭和基地と極地研で行われ、国内から助言を得たり、お互いの情報を交換するのに役立った。クライオサンプラーの着水を確認した後、昭和基地と極地研間のデータ通信を終了した。

昭和基地のWSに蓄積されたクライオサンプラー飛揚中の気球工学とPIデータは、1月5日から11日にかけてuucp伝送により極地研のWSに吸い上げられ、宇宙科学研究所でデータ解析が行われた。12月24日にWSが昭和基地ネットワークに接続されてから、1月11日にクライオサンプリングデータの極地研への吸い上げが終了するまでのデータ転送量は、合計約20MByteであった。

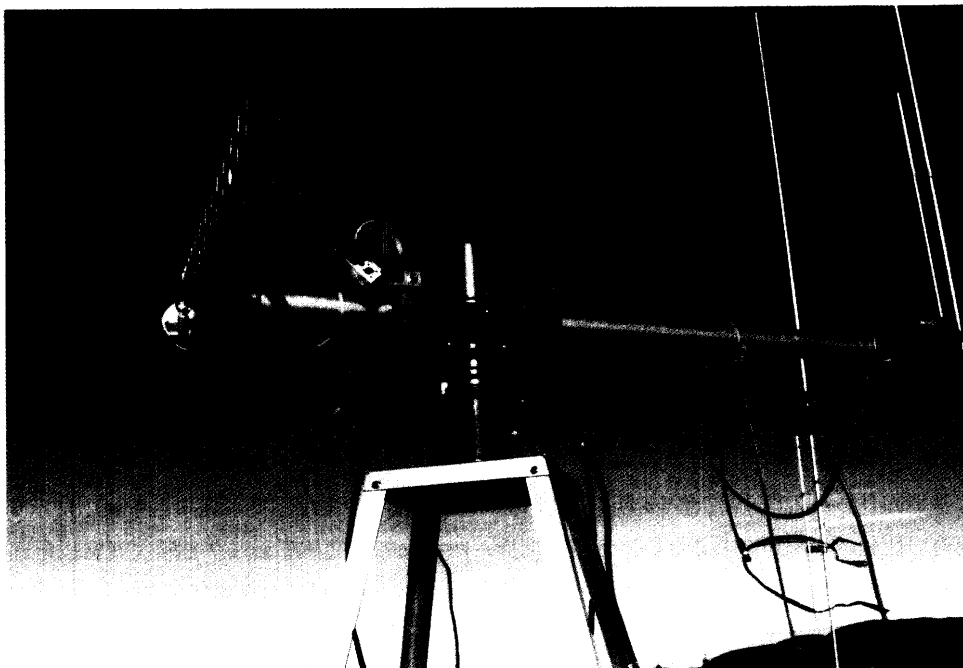


写真 1. 昭和基地の観測棟屋上に設置されたアンテナとその駆動部。二素子のアンテナは 72MHz の送信用で、多素子のアンテナは 1.6GHz の受信用である。両者はエモータに取り付けられており、エモータドライバにより方位角と仰角がコントロールされる。また、アンテナ架台にはアンテナと同じ向きに ITV カメラが取り付けられている。

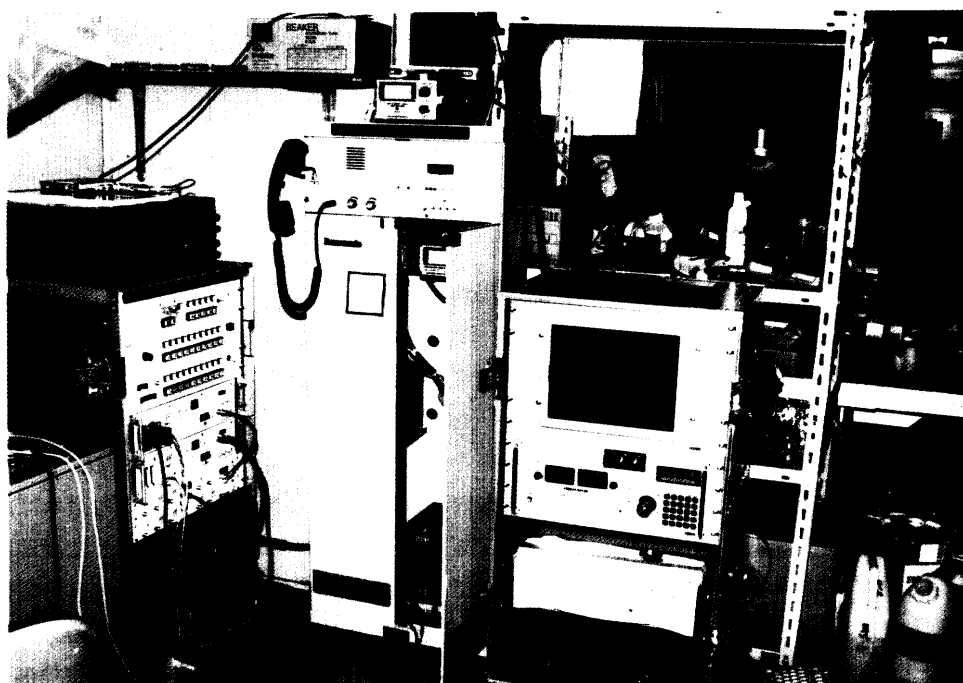


写真 2. 昭和基地の観測棟に設置された気球自動追尾システムと送・受信機。右から気球自動追尾システム、送信機本体、受信機システムの順で並んでいる。なお、受信機システムのラックにはフィルターおよび復調器のほかコマンド発生器も組み込まれている。

6. 実験経過

6.1 しらせの行動

南極観測船しらせは1997年11月14日に東京港を出港後、太平洋を南下し、インドネシアのロンボク海峡からインド洋に入り、11月28日に西オーストラリアのフリーマントルに入港した。そこで5日間停泊している間に越冬中の38次隊から急病人が出たとの連絡が入った。しらせは予定どおり12月3日に同港を出港したが、予定されていた海洋観測やアムンゼン湾での設営作業を取りやめ、昭和基地に急行することになり、予定より5日早い12月16日に昭和基地に接岸した。さらに、急病人を搬送するため、しらせが南アフリカのケープタウンを往復することとなり、39次隊の夏期オペレーションも大幅な組み替えが行われ、気球実験実施可能期間も1998年1月8日までに短縮された。このため、我々は得られる成果が最も大きいと期待されるクライオジェニックサンプラーの飛揚のみに専念することとし、その他に2機用意したグラブサンプラーの飛揚は見送ることとした。

6.2 昭和基地での準備作業

我々が昭和基地入りしたのは1997年12月17日である。それ以降の主な作業実施項目を表1に示す。我々は、空輸された物資の仕分けや配送をおこない、装置の開梱、組み立て、動作チェックを順次実施した。さらに、ヘリコプタによる氷上偵察や、関係者への事前説明をおこない、12月27日には準備作業がほぼ完了した。

クライオジェニックサンプリング実験に先立ち、1997年12月27日の夜に昭和基地Cヘリポートにて小型気球(B1 エパール気球)を用いた放球リハーサルを行った。本番と同じ38次隊2名、39次隊16名の人員構成で、ガス注入準備から放球までの一連の作業をおこない、地上風が5 m/s を越えるような悪条件にもかかわらず無事気球の放球に成功した。このリハーサルは参加者の実地訓練としてたいへん有意義であった。

6.3 海水状況

計画段階では、クライオジェニックサンプラーは昭和基地から30マイル以内の海氷上か、あるいは大陸上でクレバスなどの危険がない場所にパラシュート降下させ、大型ヘリコプタで回収する予定であった。しかし、昭和基地のあるオングル島を含む広大なリュッツォホルム湾の定着氷は、1997年冬の段階で大幅に流失するという異例の事態が発生した。昭和基地で越冬中の38次隊から日本に送られてきた1997年7月19日の人工衛星NOAAの画像を図5に示す。図によれば、昭和基地西方の湾内の氷が幅約80km、長さ約150kmにわたって舌状になくなっている様子がとらえられている。我々は、冬から春にかけて開水面が再凍結し定着氷が再びリュッツォ・ホルム湾を完全に覆うことを期待したが、結局図6に示すように開水面の周囲を縁取るような薄い1年氷ができてだけで夏を迎えた。このため、当初の計画通りクライオサンプラーをヘリコプタで回収することが困難な場合が十分ありうることになり、その対応策としてしらせ自体が出動する回収も考慮してもらうように観測隊やしらせに申し入れをおこなった。我々が昭和基地入りした1997年12月中旬には昭和基地周辺の定着氷の上に多数のパドルやクラックが見られるようになり、日時の経過とともに氷状はますます悪化の一途をたどった。

6.4 気象状況

クライオジェニックサンプラーを大型気球によって飛揚させるためには、地上風が5 m/s 以下で、しかも極力弱いことが望まれる。このためには、昭和基地が高気圧圏内にあり、さらにカタバ風も弱くなければならない。そのような条件の日的確に予測するのは素人には無理であるため、今回我々は1年間越冬して現地の気象の特性を心得ている38次定常気象隊員の判断に頼ることにした。さらに、サンプラーの回収可能範囲は昭和基地を中心とした56km (30マイル) 圏内とされているため、上層風にも制限が加わる。飛揚したサンプラーが30km 高度に達し、気球を切り離して地上に降りてくるまでに最低2時間半かかる。我々は、1988年から1996年にかけての12月および1月のレーウインゾンデの風データを用いて、実際より厳しい4時間飛行の条件を適用してサンプラーの飛揚シミュレーションを行い、上層風とサンプラーの着陸地点の関係を調べた [1]。その結果、12月から1月にかけてサンプラーが56km 圏内に着陸するような上層風の弱い日が5割以上に達することが明らかとな

表 1. 昭和基地でのクライオジェニックサンプリング実験の主な準備作業実施項目

月 日	主 な 作 業 項 目
12月17日	気球実験関連物資の空輸
18日	気球実験関連物資の組調室と観測棟への搬入、ローラー車氷上輸送
19日	物資の開梱・配置作業、アンテナ架台取り付け、ローラーアタッチメント氷上輸送
20日	デュワーおよびグラフ容器の真空引き、送受信系の配線・電波送信テスト
21日	液体ヘリウムデュワー氷上輸送、気球工学ゴンドラのチェック、ヘリウム液化機の立ち上げ、クライオサンプラー組立
22日	ヘリによる氷状偵察、ヘリウム液化機の立ち上げ、ランチャー据え付け基礎の掘り出し作業、ドザーショベルへのローラーアタッチメント取り付け
23日	アンテナ・エモテータ系のチェック、気象ゾンデ受信テスト、ヘリウム液化作業、38次隊長への気球実験概要説明、クライオサンプラー組立
24日	ヘリウムカードルの荷受けとクレーンによる配置、クライオサンプラー組立
25日	排気弁、カッター、バラストのチェック、予備コマンド送信機の配線と動作チェック、ITVカメラの取り付けと動作チェック、38次隊員関係者への気球実験説明
26日	ヘリウムガス配管系組み立て、放球場の気象計設置、クライオサンプラー組立
27日	配管リークチェック、クライオサンプラー組立、放球リハーサル
28日	昭和基地と極地研間のネットワーク通信チェック、気象棟にて上層風検討、29日夕方放球に向けて準備を進めることを決定し各方面に連絡
29日	クライオサンプラーおよび関連機器を作業工作棟へ移動、放球設備チェック、昼のミーティングで夕方の放球中止を決定し各方面へ連絡
30日	観測隊の夏作業に従事
31日	観測隊の夏作業に従事、夕食後39次隊全員しらせに移動
1月1日	休日日課、夕方しらせから基地に戻る
2日	クライオサンプラーの組み立て準備、気象棟にて実験会議を実施し、明日午前放球に向けて準備を進めることを決定し各方面に連絡、VHF無線機のテスト
3日	12時59分クライオサンプラー放球、13時45分高度30kmで気球カット、14時15分サンプラー着水、ヘリにより着水地点確認
4日	ヘリによるサンプラー位置確認
5日	実験に使用した液体ヘリウムデュワーの船積み、ヘリオベなし
6日	しらせによるサンプラー搜索・回収作業

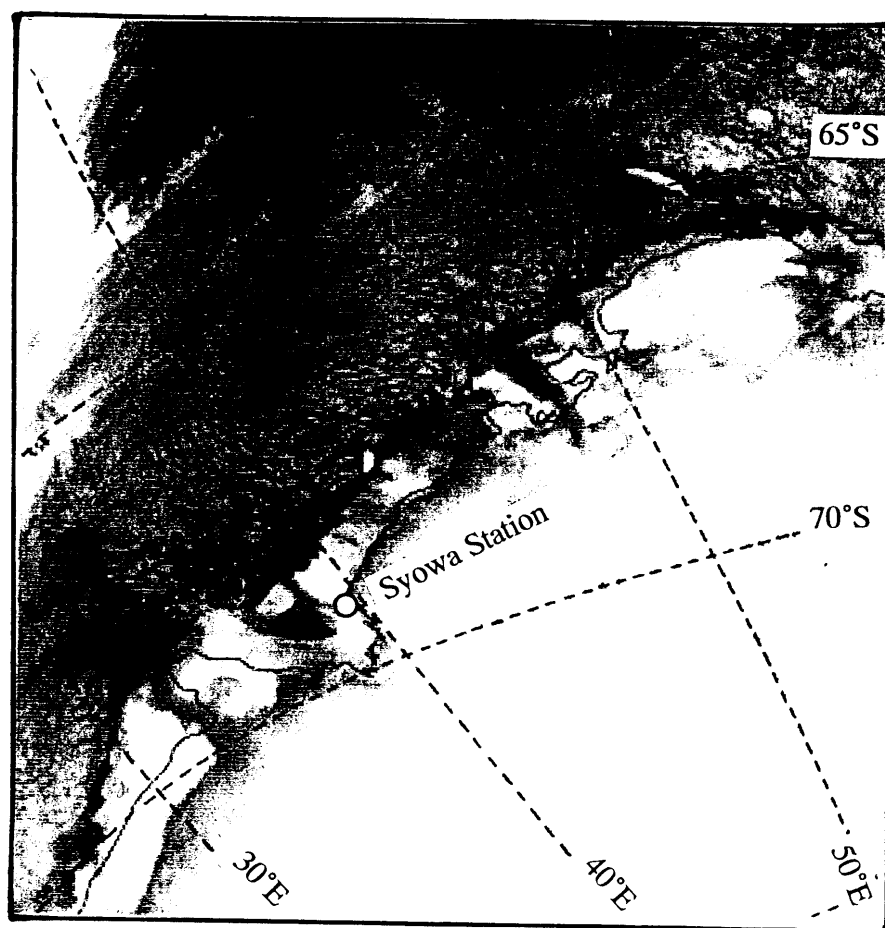


図 5. 1997 年 7 月 19 日に昭和基地で受信された人工衛星 NOAA の画像。昭和基地西方のリュツォホルム湾の定着氷が大幅に割れて流出した。

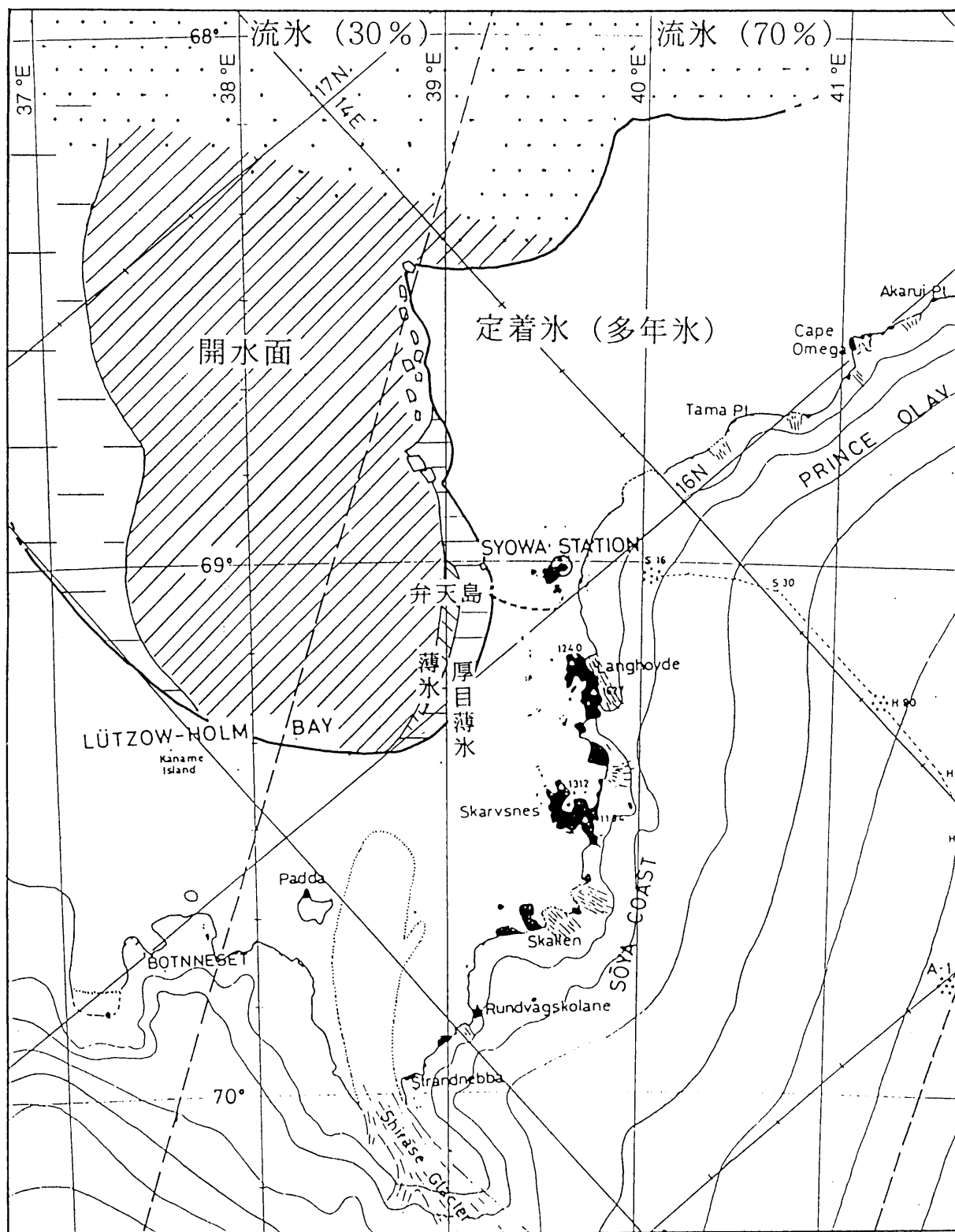


図 6. 1997 年 12 月中旬の昭和基地付近の海水分布.

り、サンプラー回収が現実的であることが明確になった。さらに、昭和基地から着陸地点までの直距離は10日から20日程度の周期でほぼ滑らかに変化していることもわかった。このため、我々はレーウィンゾンデのデータから上層風が弱まる時期を推定することは可能であると判断した。サンプラーを回収するためには、その作業が安全に行える場所であることが前提条件となる。そのため、我々は装置の回収可能領域を図7の陰影部に限定した。サンプラー回収可能日を予測するために、昭和基地で日々得られたレーウィンゾンデデータと実際の飛揚パターンを用いた航跡のシミュレーションが宇宙研で実施された。その結果を図8に示す。図によれば、サンプラーの飛翔方向は、いずれの日もほぼ南東から北西の範囲内になっており、昭和基地から着陸地点までの直距離は10日程度の周期で変化していることがわかった。放球準備が整った12月27日以降をみると、28日は対流圏下部では西風、対流圏上部から成層圏にかけては東風という複雑な風が吹いており、その結果として着陸地点が昭和基地から20km程度とたいへん近くなっているため、我々は放球のチャンスであると判断した。このため、28日夕方放球に向けて準備を行ったが、地上風が止まないため実験を中止した。さらに、1月1日から2日にかけて風が急激に弱まる傾向を示しており、しかも着地予想地点が昭和基地西方の開水面上であるため、我々は1月3日が次の放球チャンスであると判断し、さらに地上風も弱いとの予測を得て、実験を実施した。その結果、後述するようにサンプラーは予想通りの場所に着水した。なお、すべての準備が整い実験実施可能となったのは年末であったため、日本やオーストラリアなどからの天気図が入手できず、総観場の予測には昭和基地でのレーウィンゾンデデータとNOAA衛星の雲画像データのみが頼りであった。

6.5 打ち上げ

1998年1月3日早朝に作業工作棟で液体ヘリウム充填と最終組み立てが行われたクライオジェニックサンプラーは、クレーンのついたキャタピラー車（クローラークレーン）で放球場であるCヘリポートまで運ばれた。この車が選ばれた理由は、雪上走行できるため道路の冠水部を避けられる点と、悪路走行時の装置に与える振動が大型トラックより少ない点である。

本実験で飛揚した機器の構成を図9に示す。打ち上げに用いられた気球はRAVEN社製B30型である。その諸元を表2に示す。気球の体積は約32,600 m³、本体重量130.2 kgであり、0.8 kgの排気弁を含めると131.0 kgとなる。現場での作業を軽減するため、気球頭部の排気弁はあらかじめ日本で取り付け、動作チェックも済ませた。400 kg物傘は藤倉航装社製で、重量は33.7 kgである。通常、三陸大気球観測所ではパラシュートは裸の状態で気球吊り紐の途中に組み込まれるが、昭和基地では素人が扱いやすいように厚い外套に収納されたパケットパラシュート方式が用いられた。クライオジェニックサンプラーは、幅および奥行きが1.2 m、高さが2 mあり、バラスト30.0 kgを含む重量は354.2 kgであった。さらに、サンプラーの下には海上を漂流する際に位置情報を提供するアルゴスブイと、飛揚中の気象データを得るためのレーウィンゾンデが紐で結び付けられた。構成機器全体の総重量は518.9 kgであった。これに標準の10%の自由浮力をつけるとすれば、総浮力は570.8 kgとなる。

大気球に注入するヘリウムは、14基のカードルに組み込まれた計112本の47リッターボンベから供給された。ヘリウム注入前にマニホールド部で計った初期圧力は134.7 kg/cm²であり、ボンベの温度は+4.4℃であった。我々は現場にパソコンを持ち込み、宇宙研の気球グループによって開発されたプログラムを用いて浮力計算を行った。ボンベの温度が-7.4℃で安定し、圧力が19.4 kg/cm²となった時点でヘリウム注入作業を終わらせた。その結果、計算による総浮力は588.1 kgとなった。この時の自由浮力は標準より多少多い13%であり、計算上の上昇速度は346 m/minとなった。当日午前3時(現地時間)の上層風データを見ると、高度4 kmから10 kmの範囲には風速10 m/secを越える領域があり、そのために飛翔距離が延びることを防ぐため、少し多めの浮力をつけた。なお、充填中のヘリウムガスの温度と圧力は極地研にも文字通信で送られ、そこでも浮力計算をすることにより二重チェックが行われ、計算結果は昭和基地に送り返された。

気球をたて上げてからランチャーのロードセルによって浮力の確認を行ったところ、計算した浮力と完全には一致しなかった。今回の現場ではロードセル指示値の絶対値はあくまでも参考とし、主に浮力の変化から気球の

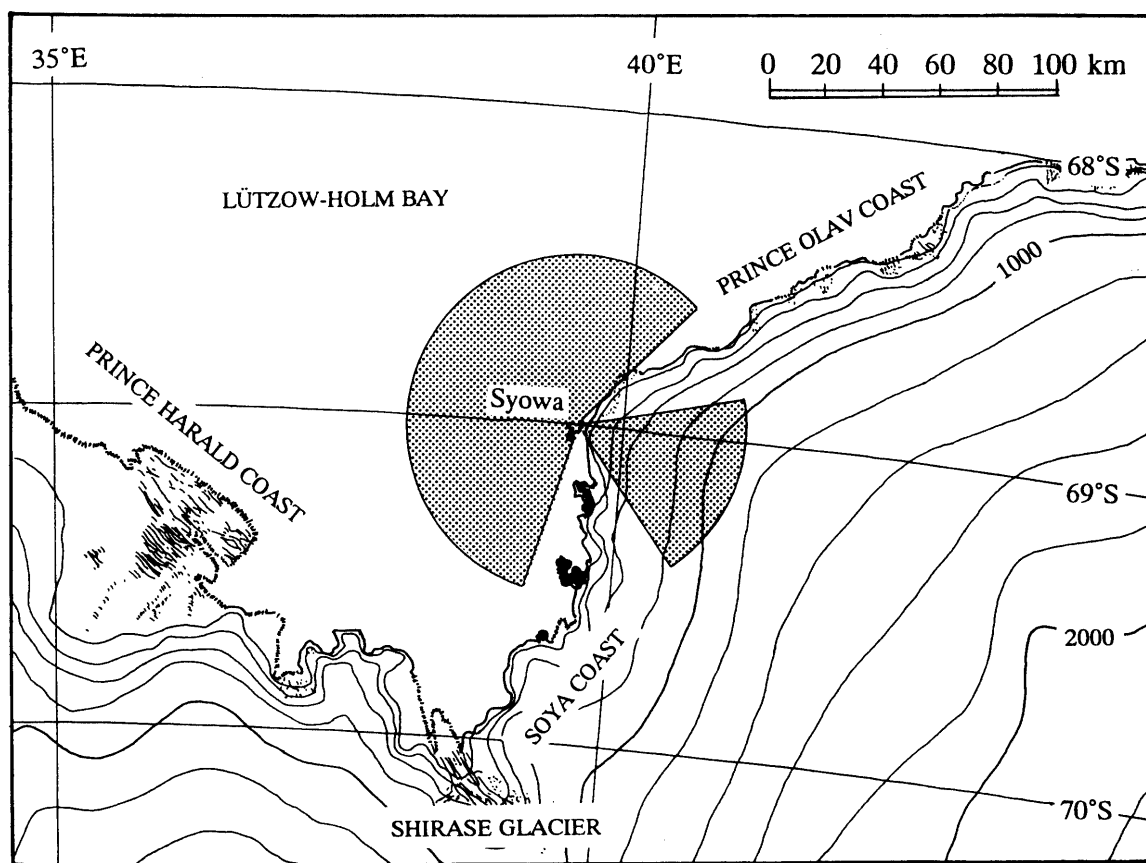


図 7. クライオジェニックサンプラーの回収可能領域. 昭和基地を中心とした半径 56km (30 マイル) の円内のうち、陰影部をサンプラー回収可能範囲とした。

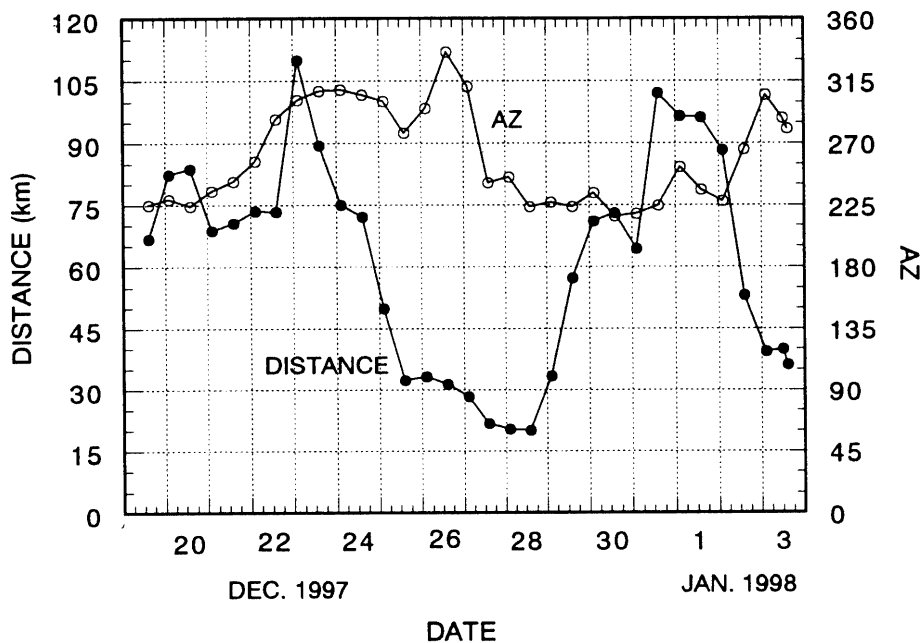


図 8. 1997 年 12 月 19 日から 1998 年 1 月 2 日までのクライオジェニックサンプラーの着陸予測地点の変化. 予測地点は、サンプリング装置を打ち上げて、30km 高度に達した後、10 分間水平飛行し、パラシュート降下させた場合（総飛揚時間 2 時間 30 分）の軌跡を、昭和基地における日々のレーウィンゾンデの風データによってシミュレートしたものである。

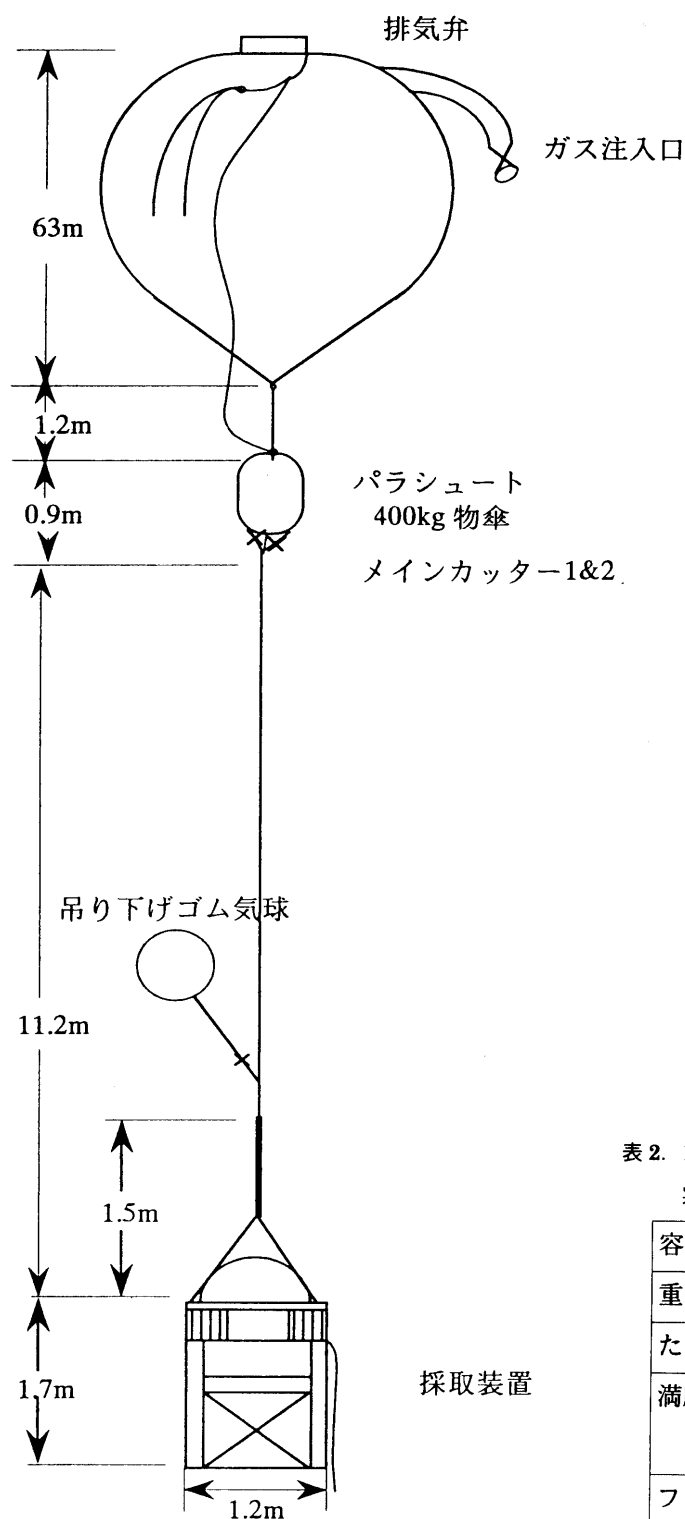


図9. 1998年1月3日に昭和基地で実施された成層圏
大気採集実験における気球および機器の構成。

表2. 1998年1月3日のクライオジェニックサンプリング
実験に使用した気球の諸元。

容 積	32,561m ³
重 量	130.2kg
たたんである時の全長	62.50m
満膨張時 直径	42.51m
高 さ	38.16m
フィルム 厚さ	17.8μm
ゴア数	53枚
ロードテープ数	27本
ガス注入口	2本

ガス漏れを知るための手段として使った。

昭和基地の現地時間で 11 時 59 分にクライオジェニックサンプラーを搭載した大型気球が打ち上げられた。打ち上げ時は快晴で、地上はほぼ無風状態であった。ランチャーに対するゴンドラの位置設定は適切であり、サンプラーは小さなショックでほぼ真上に引き上げられた。放球時の液体ヘリウムの消費量からも、きわめて静かな放球であることが確認できた。

図 10 はサンプラーの高度と時間の関係を示したものである。サンプラーは最初約 340 m/min の速度で上昇し、8.7 km の圏界面を通過して風速の弱くなった成層圏では約 325 m/min で上昇するという理想的なパターンとなった。約 90 分後に 30 km 高度に達し、約 15 分間水平飛行した後、気球を切り離してパラシュート降下し、14 時 16 分に昭和基地の西北西 42.8 km 地点 (68°53' S, 38°37' E) に着水した。サンプラーが上昇する際の 10 km から 30 km 高度の間 2 km 毎に、1 気圧に換算して 10~20 リッターの空気を 11 本の容器に採集することに成功した。

6.6 回収

1 月 3 日 15 時頃、ヘリコプタによるサンプラー着水地点付近の偵察飛行が実施された。我々は、GPS によって求められた着水地点の氷板上にパラシュートが広がり、サンプラーがその横に浮いているのを確認した。ヘリコプタの搭乗員がマーカーを落とし、回収時の目印となるよう氷板上 2 箇所を赤く着色した。1 月 4 日と 6 日にも偵察飛行を実施し、4 日には着水地点から 6 km ほど南南西の地点 (68°53' S, 38°37' E) に着色された氷板とサンプラーが前日と同じ状態で漂流しているのを確認したが、6 日には細分化された着色氷板の一部が確認されただけで、サンプラーはヘリコプタからは確認できなかった。なお、アルゴスブイは 1 月 5 日の早朝までは位置データを送っていたが、それ以降は情報が途絶えたため、搜索の困難さがより大きくなった。同日 18 時過ぎ、氷上輸送を完了したしらせが昭和基地を離岸し、着色氷板が見つかった地点を起点として行方不明となったサンプラーの探索を開始した。浮水が多数見られる海域での銀色のサンプラーの搜索はかなりの困難を伴うと思われたが、19 時過ぎに 69°06' S, 38°35' E 地点でしらせ乗員により装置が無事発見され、しらせに収容された。なお、このときパラシュートは海中に沈んでいたが、アルゴスブイがそれに引きずられて海中に沈んでいたどうかは確認できなかったため、位置データ送信停止の原因は不明のままとなった。

回収後のサンプラーには大きな外傷はなかったが、4 箇所のクラッシュパッドのうち 1 箇所が大きくつぶれていた (写真 3)。このことから、装置は開水面上ではなく、一旦氷板上に落下した後に海水中に転落したものと考えられる。着地時にサンプラー外側のフレームは大きな衝撃を受けていたにもかかわらず、アルミチャンバー内のバルブや配管等に損傷は認められなかった。このことにより、アルミハニカム製のクラッシュパッドが効果的に衝撃を吸収し、モータードライブに取り付けた支持金具が有効に機能したことが明らかになった。

回収されたサンプラーは昭和基地に運ばれ、ロケット組立調整室にて解体された。アルミチャンバーのフランジを開けようとしたところ、フランジのボルトが回転しにくい状態になっていた。これは、パラシュート降下中に蒸発しきれなかった液体ヘリウムが着水後に気化してアルミチャンバー内の圧力を高めたために、フランジのボルトに負荷がかかっていたことによる。アルミチャンバーには液体ヘリウムの突沸に備えてラプチュアディスクが取り付けられているが、ラプチュアディスクの破壊圧力である 0.7 MPa 以下でも回収後の作業に支障をきたすことがこの経験から明らかになった。今後は逆止弁を取り付けて圧を外部に逃がす対策が必要と考えられる。

アルミチャンバーから取り出した試料容器は直ちにマニホールドが取り外され、かわりに分析用のバルブが取り付けられた。試料容器のバルブと分析用のバルブとの間は試料の汚染を防ぐためにターボ分子ポンプを使って $1 \sim 3 \times 10^{-6}$ Pa まで真空排気を行った。真空排気の際にいくつかの試料容器バルブの弁座からわずかなリークが見つかったが、バルブを 30~31 kgf・cm で増し締めすることでリークは止まった。全てのバルブのリークを解消し、バルブ間を十分に排気した後は分析用バルブの末端をブラインドフランジで封じ、試料容器を専用の木箱に収納した。試料容器は運搬の際に衝撃が加わらないよう細心の注意を払って日本に持ち帰られた。

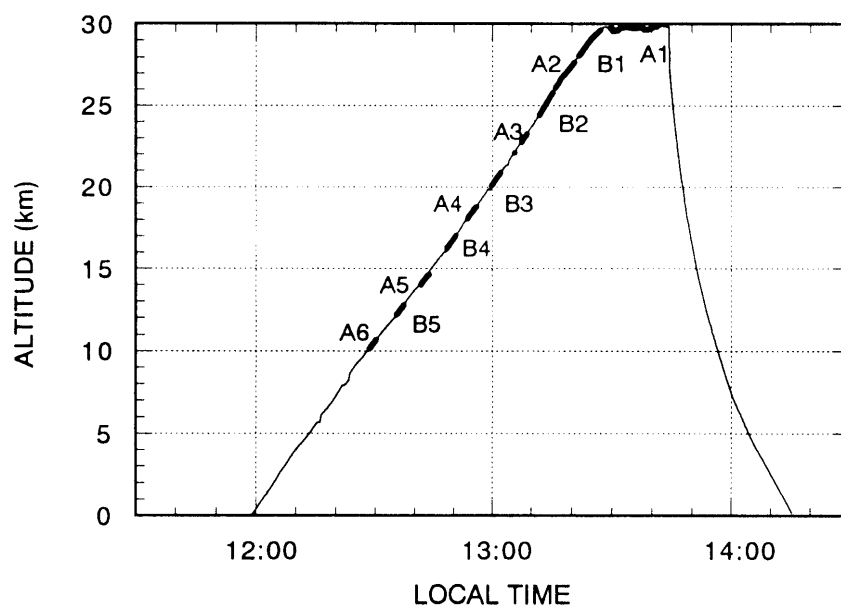


図 10. 1998 年 1 月 3 日に昭和基地で飛揚されたクライオジェニックサンプラーの高度と時間の関係. 図中の文字はサンプル容器の記号であり, 太線は空気採集が行なわれた区間を示す.

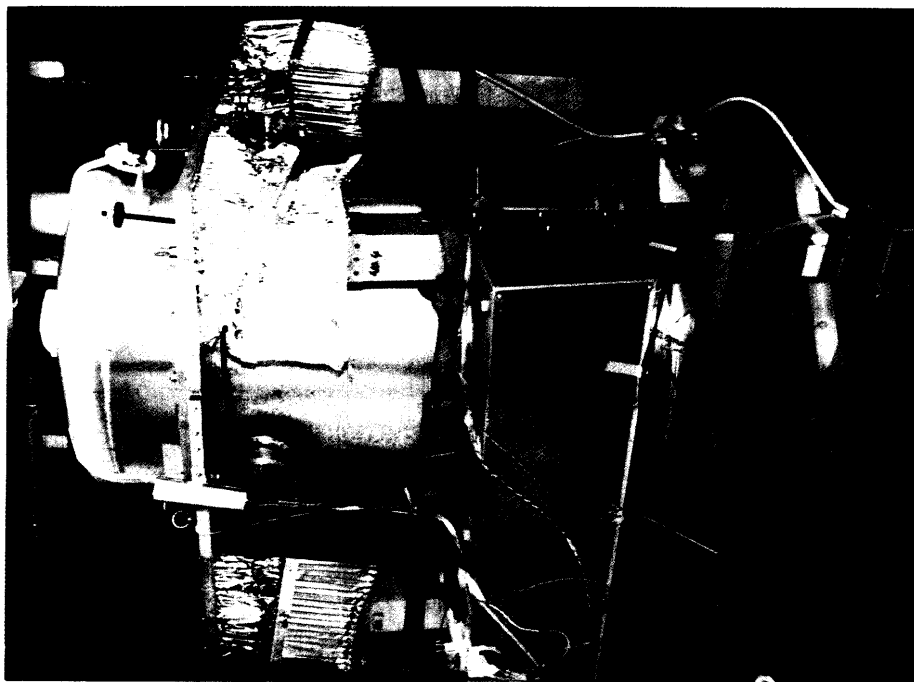


写真 3. しらせに回収されたクライオジェニックサンプラー.

表 3. 1998 年 1 月 3 日に昭和基地で実施されたクライオジェニックサンプラー放球のタイムスケジュール.

時 間	実 施 項 目
1月2日 17:00	実験実施検討会議、関係者への連絡
17:30	放球場最終準備
1月3日 0:30	クライオジェニックサンプラーへの液体ヘリウム充填と最終組み立て
6:00	気象ブリーフィング
6:50	サンプラー組み立て完了
7:00	サンプラーの作業工作棟から放球場への移動
8:30	関係者各配置に集合
8:40	グランドシート展開
9:30	気球工学・PI かみ合わせ
10:00	気球展開
10:12	気球をランチャーにセット、結線、結索
10:34	気球をローラー車にセット
10:44	ガス注入開始
11:01	気球頭部立て上げ
11:10	気球へのカラー取り付け
11:37	ガス注入終了
11:44	気球立て上げ終了
11:45	浮力の確認
11:57	風向風速確認用パイロット気球放球、安全ベルト解除
11:58	カラーカット
11:59	クライオジェニックサンプラー放球
13:30	クライオジェニックサンプラー30km 高度に到達
13:45	気球切り離し
14:15	クライオジェニックサンプラー着水

7. お わ り に

1998年1月3日に昭和基地でB30気球を用いてクライオジェニックサンプラーを打ち上げ、10~30km高度で11点の大気試料を採集し、サンプラーを回収することに成功した。今回の実験は、観測隊の急病人発生に伴うスケジュール変更や海水の大幅流出による回収作業の変更など、大きな問題に直面しながらも結果的には計画通りに遂行することができた。これは、幸運に恵まれたことも否めないが、それ以上に準備段階においてさまざまな人々の協力を得て、あらゆる場合にも対処できるような周到な準備がなされた結果であると考えられる。

8. 謝 辞

本実験を実施するにあたり大変お世話になりました。第39次および第38次南極地域観測隊員、南極観測船しらせの乗員、国立極地研究所の関係者および宇宙科学研究所の関係者に感謝いたします。

参 考 文 献

- [1] 本田秀之, 橋田元, 森本真司, 青木周司, 山内 恭, 中澤高浩, 南極昭和基地の気球実験における観測器回収の可能性に関する検討, 宇宙科学研究所報告, 印刷中, 1999.
- [2] 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, 南極昭和基地における大気球を用いた成層圏大気のクライオジェニックサンプリング実験(Ⅰ)ー新たに開発された搭載機器および地上システムー, 宇宙科学研究所報告, 印刷中, 1999.
- [3] S. Aoki, T. Nakazawa, H. Honda, N. Yajima, T. Machida, S. Sugawara, K. Kawamura and S. Yoshimura, "CO₂, CH₄ and N₂O Concentrations and $\delta^{13}\text{C}$ in CO₂ and CH₄ in the Stratosphere Over Scandinavia and Japan". Proc. of 21st Intern. Symp. on Space Tech. and Sci., volume II, 1568-1571 1998.
- [4] H. Honda. Ballon-borne cryogenic whole air sampling system. ISAS Research Note 433. 1-39, 1990.
- [5] 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, 1593-1597, 1990.
- [6] 並木道義, 利根川豊, 佐藤夏雄, PPBワーキンググループ, 1992年度南極周回気球実験, 宇宙科学研究所報告 第32号, 3-22, 1995.