

クライオサンプリング法による 成層圏大気試料採取装置の開発

本田 秀之・皆川 博幸*・伊藤 富造

(1987年5月7日受理)

Development of Cryogenic, Whole Air Sampling System for Stratospheric Trace Gas Studies

By

Hideyuki HONDA, Hiroyuki MINAGAWA and Tomizo ITOH

Abstract: A balloon-borne cryogenic sampler using liquid helium as a coolant is described, which is used to collect stratospheric whole air samples for determining mixing ratios of minor constituents. The sampler can collect 6 samples of more than 10l STP at different altitudes. The collected samples allow measurements of the trace gases CCl_3F , CCl_2F_2 , CH_4 , CO_2 , and N_2O , and the carbon and oxygen isotope ratios ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ and $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) in CO_2 . The construction of the all-metal sampling system, experimental tests, operating procedures, and particular consideration for avoiding contamination are given.

はじめに

成層圏は人類環境にとって重要な部分であるが、近年種々の人為的要因によりこの領域を変化させつつあるという認識が高まってきた。大気は窒素や酸素などの主成分に加え非常に多くの微量成分から成っており、これらは複雑な光化学システムによってバランスが保たれている。しかし高高度を飛行する航空機から放出される窒素酸化物[1]や、地表より対流圏内に多量に放出されているハロカーボン類が成層圏にはいって太陽紫外線により

* 東京理科大（現在（株）キヨーセラ）

分解されて発生した塩素原子[2]のように、人工的原因によるオゾン層の破壊の可能性が指摘された。前者は、その後影響の程度は小さいとわかったものの、人間活動による汚染物質が成層圏のオゾン層の消長に深く関係しているということが、広く注目されるようになった。また化石燃料の消費や森林破壊により大気中に大量に放出されつつある二酸化炭素は、その約半分が大気中に留まり、またその濃度を増加させ[3][4]、温室効果による地球環境の悪化を懸念させている[5]。その他メタンや窒素酸化物もオゾンに直接的・間接的に影響を与えると考えられる。またこれらの微量成分は二酸化炭素に勝るともおとらぬ温室効果に影響を与えることが指摘されている[6]。このように種々の微量成分は自然の中でそれぞれ重要な役割を果たしており、これらの水平・垂直分布を高精度に測定して、大気の移送や化学を理解し、また人間活動が環境に及ぼす影響の評価や数値モデル実験の結果を確認するために、信頼性の高いデータを提供することが非常に重要なことになってきた。

ところで、成層圏大気微量成分の研究で使用されている方法には、蛍光法、リモート・センシング法、試料採取法などがあり[7]、それぞれ一長一短があるが、我々は試料採取法を採用している。この試料採取法には2種類あり、それらは大気の非選択的採取と選択的採取である[8][9]。非選択的採取とは、その場の大気をそのままに（非選択的に）採取してくる方法であり、選択的採取とは、ある特定（複数の場合もある）の成分のみを選択的に採取する方法である。

非選択的採取には2つの方法、グラブサンプリング法とクライオサンプリング法がある。前者は、事前に高真空中まで排気した清浄な容器に、その場の大気をそのままに（非選択的に）採取してくる方法であり、簡便なために気球・飛行機等を使って広く行われてきた。しかし、高度が増すごとに実質的採取量は減少して試料容器内壁との反応が無視できなくなってくるため、内壁に特殊な処理を施すことも必要とされた。従って、この方法は比較的大量に存在する安定な物質に対して使用され、使用する部品等は十分慎重に選択しなければならなかった[10]～[12]。

一方、後者は液体ヘリウムや液体ネオン内に高真空中で排気した試料容器を浸しておき、その中に外気を固化しながら採取する方法である[13]～[16]。この方法の最大の特徴は、比較的小容量の容器に大量の試料が採取できるため、前者と比較して採取量と内表面積の比を100倍以上改善することができ、容器内壁による汚染の影響を受けにくくなることがある。また低温のまま保持することができるようにしておけば比較的活性な成分の採取也可能となる[15]し、試料が大量であることからより多くの微量成分についても分析が可能となる。

我々は1980年から1985年にかけて、グラブサンプリング法による成層圏や対流圏上層における大気試料の採取と、各種成分(CCl_2F_2 , CCl_3F , CO_2)や二酸化炭素に含まれる炭素と酸素の同位体比($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$)の精密分析を行なった。1983年からは CH_4 の分析も加え、結果についてはすでに発表した[17]。

一方、グラブサンプリング法における上記の問題を一挙に解決すべく、液体ヘリウムを使用したクライオサンプリング法の開発も並行して行った[18]。1985年(B_{15-60})と1986

年(B₃₀-52)に各一回の大気球による飛揚を行い、システム全体を通しての動作と採取した試料の分析結果から、微量成分用の採取装置としての機能を確認した。

ここでは、本装置の構成、性能、各種室内実験の詳細を示す。なお、分析結果については、別に発表する予定である。

2. 試料採取装置

試料採取装置のシステムを図2-1に示す。基本的構成はグラブサンプリング装置[11]と同様であるが、ヘリウムを取扱うための種々の機器が付加してある。超高真空に排気した試料採取容器は7本あり、その内1本を配管部の換気と試料採取用に使う。導入系にもバルブがあり、これらのバルブはモーターで駆動される。導入口はガラス封じして高真空まで排気し、地上あるいは気球上昇中に導入系配管内が汚染されることを防いでいる。また、万一導入口が開かない場合(ガラス封じが割れない、バルブが開かない)のため、ガラス封じをしていない予備の導入口も設けている。液体ヘリウムデュワーは、軽量化のためアルミ製のものを採用した。ヘリウムガスの排気口には差圧弁を付け、液体ヘリウムデュワー内の圧力が下がりすぎないようにしてある。また、この排気口がつまつたりした場合のため、予備のヘリウム排気口としてコンダクタンスを大きくした配管系も設けている。バルブの開閉、ハウスキーピングデータの取得、データの伝送等は全てマイクロプロセッサベースの制御回路が処理し、簡単なコマンドで種々の処理モードに移行するようになっている。ゴンドラ自体は、耐圧・気密構造のアルミ製容器で、各機器や回路系の保温・緩衝用に用いている発泡スチロール等からの放出ガスによる試料の汚染を防ぐと共に、着水時の衝撃を緩和し、装置の水没も防ぐようにしている。

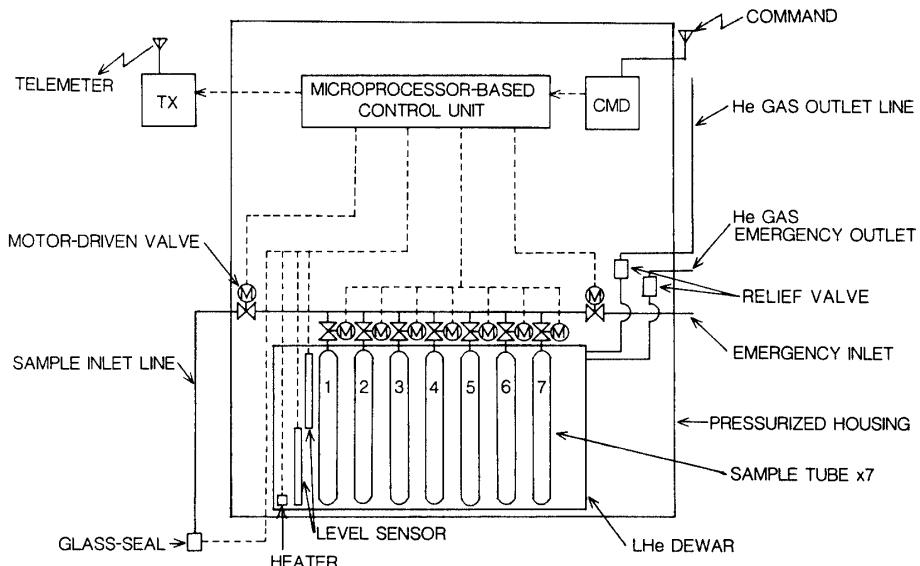


図2-1 クライオサンプラーのブロック図

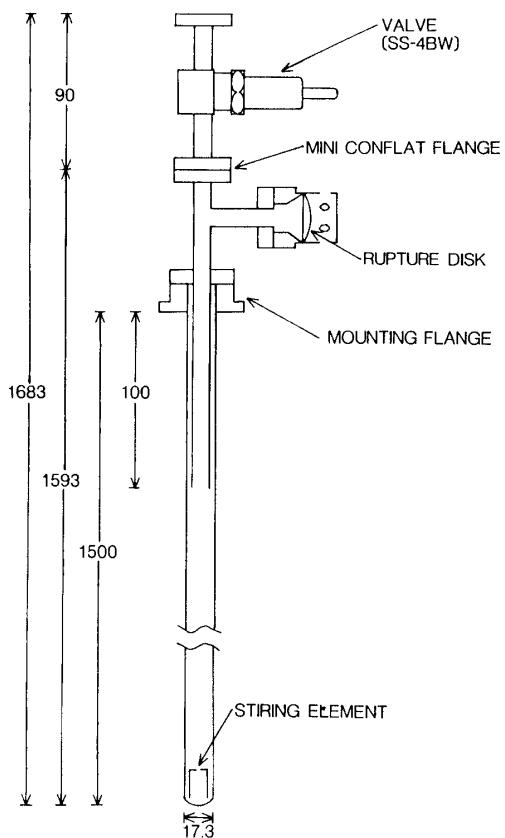


図 2-2 試料容器の構造

以下各部の詳細について述べる。

2-1 試料容器, ラプチュアディスク, バルブ (図 2-2)

試料容器の設計に当っては、耐圧、容積、伝導による熱の流入にも考慮しなければならず、費用の点からも既製の管を利用することにした。試料容器は外径 1.7 cm、長さ 150 cm のステンレス製で、上部には取付けフランジ(容器をデュワーのフランジに固定する部分)とラプチュアディスク(安全弁)が取付けてある。接続はミニコンフラットフランジを使用し、バルブとの接続や交換を容易にした。ラプチュアディスク部までを含めて容積は、配管部換気用のポンプとなる容器が少し長めに作ってあるため約 282 cc で、他の 6 本は約 272 cc である。製作時、内面には電解研磨、または酸洗いを施した。B₁₅-60 では、このうちの 4 本に化学的内面処理 (HMDS, Hexamethyldisilazane を使用) [11]を施した。なお B₃₀-52 では行なっていない。導入された大気のうち、短時間のうちに凝固しにくい成分が逆流するのを防ぐため、延長管を取り付けフランジより下に 10 cm 伸ばした。クライオサンプリング法では、各成分の融点、沸点が異なるため一般に fractionation が発生する。従って容器から試料を取り出す前に、十分均一に攪拌しておかなければならず、このため図 2-2 に示すように攪拌用素子を封入している。これは容器の内径ぎりぎりいっぱいの茶筒

形で、頭部に小さな穴をあけているものである。なお材質はステンレスである。

ラプチュアディスクは、試料容器の内圧が $36 \text{ kg/cm}^2 \pm 10\%$ ($B_{15}-60$)、 $80 \text{ kg/cm}^2 \pm 10\%$ ($B_{30}-52$) 以上になると破裂する安全弁で、試料容器やバルブを過大な圧力から保護するものである。しかもこれは全ステンレス、全溶接形式である。通常の安全弁は、次のような理由から使用できない。まず、ラインへの接続方式がネジであること、高分子材料を使ったO-リングを使用しているため、ハロカーボンの分析に有害であるし、高温までベーキングできること、微小なリークが発生する可能性があることである。最も重要な点は、試料採取直後は fractionation が起こっているため、ただ圧力を調整しただけでは成分比が変ることが避けられないためである。

バルブはニュープロ(NUPRO)社製の、全ステンレスのベローズシールバルブ(SS-4 BW-TW)を用いた。まずヘリウム・リーク・ディテクタを用いて、新規に購入した個々のバルブの締めつけトルク(リークがなくなる値($<1 \times 10^{-10} \text{ atm/cc/sec}$))を測定した。実際の使用にあたっては、トルクレンチを使って各バルブに固有のトルクで閉めるようにした。これはオーメタル・バルブであること、製作上の問題と考えられるばらつきがある[12]こと、複数の人間が同一バルブを開閉しなければならないためである。両端にはミニコンフラットフランジを溶接し、配管や交換、耐リーク性に配慮した。

容器はまず、ターボ分子ポンプで約15時間かけて $1 \times 10^{-7} \text{ Torr}$ 程度まで排気し、その後24時間 250°C でベーキングを行ないながら排気を継続した。ベーキング終了後も引き続き総計で7日間余りにわたり排気を行ない、最終的には $1 \times 10^{-8} \text{ Torr}$ 以下の真空中度を達成した。

2-2 試料導入系及びガラス割機構

導入系は、ゴンドラ外、ゴンドラ内の配管に分けられる。

ゴンドラ外の配管は、長さ1m、内径 $1/2"$ のステンレス製フレキシブルホース(SWAGELOK, SS-8 HO-6-L 8)5本を組み立てる。その先には、ガラス-ステンレス・パイプ変換(CAJON, G 304-8-GM-3)をその先端を封じて接続した。ゴンドラ内の配管(マニホールド)は、ステンレスのリング管に外径 $3/8"$ の足を6本出し、それぞれにミニコンフラットフランジを溶接して作ったものである。

導入系のホースを伸ばしたままでは、放球の邪魔になるし先端のガラス封じ部がショックで割れる心配もあるので、放球時にはゴンドラの周囲に巻きつけておく。水平浮遊状態にはいって十分ゴンドラのガス出しを行なった後、地上からのコマンドでたれ下げるようとした。

導入口の開口方法は、以前から採用している[11]もので、バネで動く刃でガラスを割る機構である。これは、刃を固定しているステンレスワイヤをワイヤカッタで切り、バネで刃を動作させてガラスを割るようになっている。これは地上からのコマンドで実行する。この機構は、ガラスが割れると同時に導入口から分離されるように、ガラス部に取付ける。なお、この部分は特に信頼性を要求されるため、独立に2系統ある。

2-3 バルブ開閉機構

バルブ開閉機構は、モータ、ウォーム及びホイル、チョッパ、フォトインタラプタで構

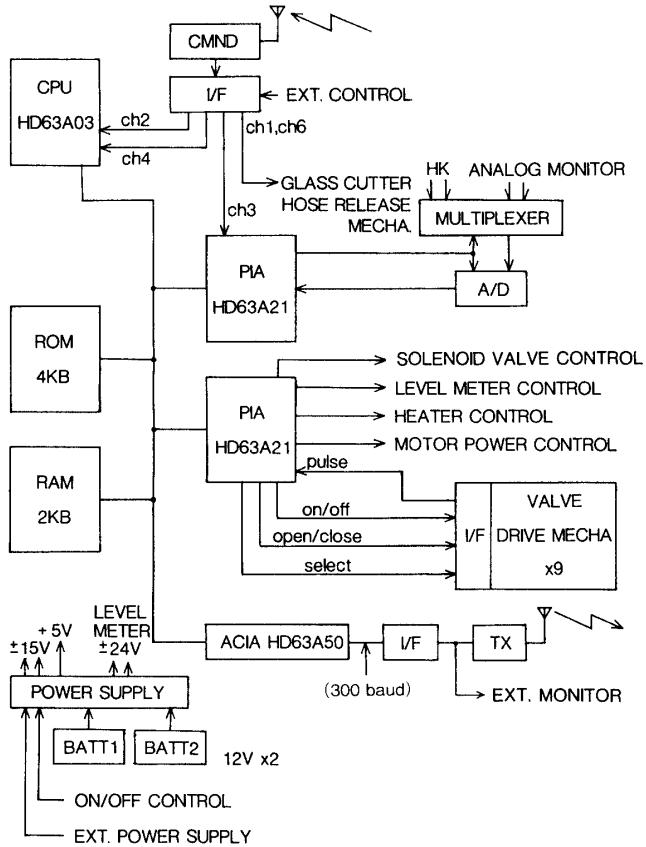


図2-3 クライオサンプラーの制御回路のブロック図

成されている。容器に各1台、取入口と予備の取入口に各1台で計9台ある。今回使用したバルブ(SS-4 BW-TW)は開閉によりバルブ軸が数mm出入りする。市販のウォームとホイルでは、この軸の移動を吸収できないため、特殊なギヤを切って使った。バルブ開閉に必要なトルクからモータの出力とギヤ比を決めた。モーターはオリソナス精機(株)のDCモータ(CL-4 B-U 60)を使用した[11]。

始めバルブはトルクレンチを用いて閉め、その状態でこの機構を取付ける。コマンドにより制御回路が作動してモーターが回転すると、それに比例してフォトインタラプタよりパルスが出る。これをカウントしながら決められた値になるまで回し続けて停止させる。これでバルブは開いた状態で停止することになる。閉める時にはモーターを逆転させパルスをカウントするが、開ける時より少しカウント数を増しておく。すなわち増締めするわけである。これはここで使用しているバルブがオールメタルであること、およびギヤ部の遊びを吸収しなければならないことから、リーグのない確実な締めを保証するため必要である。

2-4 回路系

制御回路は1)CPU部、2)モニタ部、3)テレメータ、コマンドインターフェース部、4)

バルブ開閉機構制御部, 5) レベルセンサ, ヒーター制御部, 6) 電源制御部より成り立っている(図2-3)。

2-4-1 CPU部

CPUは日立のCMOS 8ビットマイクロプロセッサ HD 63 A 03を使った。4キロバイトのEPROM (27 C 32)に制御プログラムを書き込み、作業領域用には2キロバイトのRAM (6116 LP-3)を使った。コマンド処理、A/D変換、タイマ及び伝送処理は、割込みによりそれぞれの処理プログラムに制御が移される。またCPUの処理速度には十分余裕があるので、ハードウェアを簡略化してソフトウェアに比重をかけ、システムの機能や動作に柔軟性と拡張性をもたらせた。ソフトウェアの内容については、2-7で述べる。

2-4-2 モニタ部

アナログ項目としては、各部の温度、液体ヘリウムデュワーの内圧、液体ヘリウムの残量、導入口の開口モニタがある。各々の信号には適当な増幅とレベル変換を施した後、4-1/2桁のA/D変換器 (ICL 7135)でデジタル化し、決められたフォーマットにしてテレメータにのせている。デジタル項目としては、各ステータス・フラグ、タイマの経過時間、各バルブ開閉機構のモータ電源のON/OFF、開閉方向、開閉量などで、これはその時の作業領域の内容をそのまま伝送バッファにコピーし伝送することにより実現している。

2-4-3 テレメータ、コマンドインターフェース部

テレメータは1チャンネルのみ使用しており、上記モニタ・データを300ボードで送っている。コマンドは5チャネル使った。それらは実行コマンド選択、実行開始指示、導入口のガラス割及び導入ホースのリリース(独立に2系統)、及びCPUリセットである。実行コマンド選択を受けると実行項目発生用のカウンタをインクリメントし、確認のためその項目番号をテレメータデータに載せ地上に送る。実行開始指示はCPUに対し割り込みをかけ、そのときの実行項目番号の処理ルーチンに制御が移される。なおこのコマンドを受けた後は、特別な場合を除いて、指示された項目の実行が終了するまで新しい実行開始コマンドは受け付けないようにし、誤操作を防止している。またガラス割コマンドは、直接ワイヤカット作動用のリレーを駆動するようとしてある。リセットコマンドは、CPUや出入力IC及びワークエリアの初期設定をするもので、フライト中に重大なトラブルが生じた場合にのみ使用する。

ところで我々のシステムでは、気球制御系とPI系は巻下げワイヤにより約100m離されるため、コマンドは2系統必要である。そこで、コマンド送信機のコマンド系切換えの不手際や、そのために発生するコマンドの誤送出に対する対策を施した。誤送出で問題が発生するコマンドは、ガラス割り、実行開始、CPUリセットの3項目4チャネルである。ガラス割りコマンドに対しては、送信機上でロックをかけることとPI側でもインターロックをかけることで実現している。インターロックは2-4-8)で述べるコマンド項目2を実行後でなければ、このコマンドを送出しても実際には動作しないようにすることにより実現している。实际上この項目を実行するのは水平浮遊状態にはいってからで、この後のコマンド誤送出は特に問題とはならない。次ぎに、実行開始指示の誤操作は実験上大変な不都合を生じる場合があり、特に考慮する必要があった。しかし操作や回路を必要以上に複

難にすると、それによる問題も生じてしまう。そこで、一定時間（ここでは10秒とした）内に、2度このコマンドを受け取って始めてそのときの項目の実行を開始するように、ソフトウェアで対応することにした。最後に、CPUリセットであるが、これは通常は使用しない。すなわち異常事態が発生したときのみに直接CPUにリセットをかけ、プログラムにより全システムを強制的に初期状態にもどすために使用するものである。逆に正常動作中にこのコマンドを送出すると問題で、通常は禁止できるようにしておかなければならない。これは、コマンド送信機上でロックをかけることで対応することにした。

室内での試験や放球直前の噛みあわせ時には、装置に電源を投入する他に手元でコマンドを打つ操作を行う必要があるし、テレメータ・データのモニタやバッテリの充電など、飛揚直前のゴンドラが組みあがった状態でコントロール・ユニットの操作や動作状況の監視を行わなければならない。このため、ゴンドラのフランジから外部接続用のコネクタを出し、コマンド・シミュレータを通して全てのコマンドの送出と必要最小限の項目のデータの表示、バッテリの充電ができるようにした。

2-4-4 バルブ開閉機構制御部[11]

バルブは合計9ヶ使っているため、開閉機構は9台ある。それらはパラレルインターフェース用IC(HD 63 A 21)を通して、CPUにより制御される。なお、同時に2ヶ以上動作させることはできない。

選択項目が試料採取のときに実行開始コマンドを受け取ると、CPUに割り込みがかかりその処理ルーチンに制御が移される。まず開けるべきバルブの開閉方向設定用リレーをopenにセットし、そのモータの電源用リレーをONにしてモータを回転させる。するとフォトインタラプタよりパルスが出力されるので、それをあらかじめ決められた数カウントし、モータ電源をOFFする。ここでソフトウェアタイマをスタートさせるが、この時間は試料の採取高度によりあらかじめ決め、プログラムしておく(5.参照)。一定時間経過後、開閉方向をcloseにしてモータの回転方向を変え、電源を再びONにする。決められたパルス数をカウントして電源をOFFするが、先に述べたように開けるときのパルス数よりも多くしてあるのがこの機構の特徴である。これら一連の動作は、実行開始コマンドを一回打つのみで、機上のマイクロコンピューターにより全て自動的に行なわれる。しかし実際の試料の採取においては、その時の高度が事前の計画とくい違う事がありうるため、試料の採り過ぎで機器が破損しないように、設定した待ち時間以前に強制的に終了させることも出来るようになっている。

2-4-5 レベルセンサ、ヒーター制御部

レベルセンサは超伝導線を使用したもので、液体ヘリウムの中につかっている部分が超伝導状態になり、抵抗がゼロになることを利用している。液面より上に出ている部分の長さ(抵抗)の変化を電圧の変化として取り出すような回路構成である(図2-4)。なお、使用したレベルセンサの規格より、回路系としては電源電圧がDC±24Vで70mAの一定電流を流す必要がある[25]。また、常時電流を流したままにしておくと、液体ヘリウムからでている部分の抵抗発熱によるヘリウムのロスが発生し、また回路系での消費電力が増大してゴンドラ内の温度上昇につながるため、通常は8秒間ON、112秒間OFFというモー

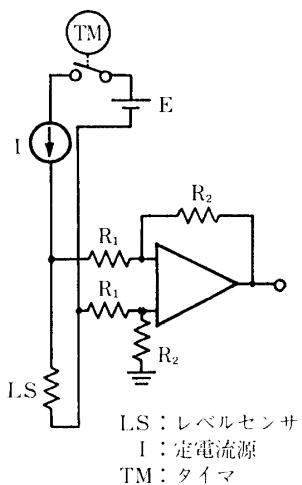


図 2-4 レベルセンサ用回路の概念図

ドで使用している。8秒という時間は、センサに通電後出力が確定するために必要な時間と、A/D変換器のサンプリング周期とを考慮して決めた。素子は規格品で、長さ24インチと20インチのものを各1本使用した。2本に分けたのは、測定時のヘリウム損失を押えることと、制御用電源の小容量化ができるためである。すなわち、超電導を使った方式では、ヘリウムに浸っていない部分の抵抗発熱による損失はその部分が短い方が少なくなること、また少なくともその部分の電圧降下分だけ電源電圧を上げなければならないからである。このような点から、2本のセンサを一部領域を重ねて試料容器に取り付けた。また、センサは動作させる方をコマンドで選択できるようにした。

全ての試料採取終了後に残った液体ヘリウムは、回収時の安全性等も考え、ヒーターにより強制的に気化させて放出するようにした。ヒーターとしては 10Ω のホーロー抵抗を使い、12Vの蓄電池から直接電流を供給する。蒸発速度は、液体ヘリウムにして40l/時(3.5l/Wh)程度である。なお、ヒーターに電流を流したときのレベルセンサの読みの時間間隔は、8秒ON, 22秒OFFとなるようにし、す早い変化を監視できるようにしている。

ところで、このように液体ヘリウムデュワー内から外部に多数の線が出入すると、それらを通しての熱流入も無視出来なくなることが予想され、このような場合には通常サーマル・アンカーを使用して熱流入を防止する。われわれの場合には、内部機器から直線的にデュワーのフランジまで線を引かず、チューブに巻き付ながら徐々に上方に線を伸ばすようにした。特に放射シールド部では念入りに巻き付け、効率良くまた十分に熱交換が行われるように配慮した。

$B_{15}-60$ の飛揚時の液体ヘリウム残量の変化の解析結果から、試料採取中や採取後しばらくの間液体ヘリウム残量の変化に興味がもたれた。そこで、 $B_{30}-52$ では試料採取中と採取後5分間は動作モードを変更し、ヒータON時と同様に、8秒間ON, 22秒間OFFとして、その間の細かい変化も観測出来るようにした。

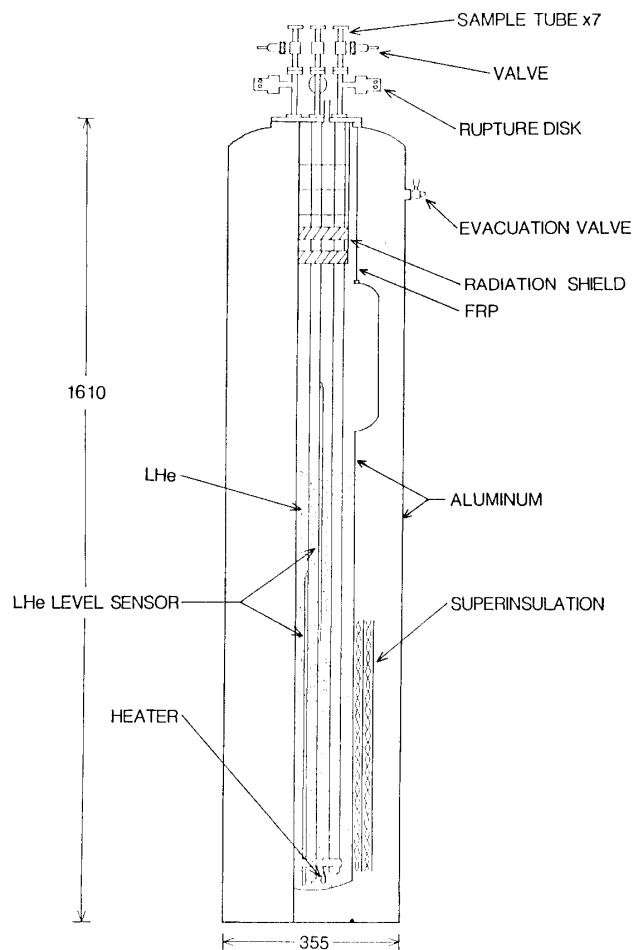


図 2-5 液体ヘリウムデュワーの構造とその中に挿入された試料容器

2-4-6 電源制御部

電源は、12 V 6 AH の鉛蓄電池 2 個からデジタル回路系の +5 V, アナログ回路系の ±15 V, レベルセンサ用の ±24 V をそれぞれ DC-DC 変換器を使用して作っている。リレーとモータ用の電源は、鉛蓄電池からの電圧をそのまま使用している。回路系の電源は、モータ, ヒータ, レベルセンサ用の電源とラインを分離し, ノイズの混入の防止に配慮している。4 本のワイヤカッタ用には、それぞれ単 2 乾電池 4 本を使用している。密閉型のゴンドラのため、蓄電池への充電や電源のオン／オフは、ゴンドラ外部からコマンド・シミュレータを通して制御できるようにしている。

2-5 液体ヘリウム用デュワー

デュワーは、新規開発のための時間や費用の点から既製品を使うことにし、試料容器の形状、液体ヘリウムの保持能力、容量、重量等を考慮し、International Cryogenics 社製 (MODEL SD-274 A) を使用することにした。これは総アルミ製(なお、口の内壁のみ FRP

を使っている)で、液体窒素シールドを使用せず、真空断熱とスーパーインシュレーターを使用したものである。大きさは $35.5\text{ cm}\phi \times 161\text{ cmH}$, 重量は約 35 kg, 液体ヘリウム貯蔵部の容積の公称は 25 l である(図 2-5)。このデュワーのカタログ上の蒸発率(Estimated Static boil off) は 0.3 l/h であるが、条件についての詳細な説明はない。放射シールドを付加しての実測によると、蒸発率は内部に機器を一切入れない場合約 0.35 l/h, 試料採取容器その他全ての機器を実装した場合には約 0.45 l/h である。この差が実装した機器を通して主に伝導によって流入する熱量による蒸発と考えられるが、潜熱のみで冷却したとして計算した値と比較すると遙かに小さい。これは顯熱によって徐々に冷却されている効果によるものである。

2-6 ゴンドラ

ゴンドラは大きさ $53\text{ cm}\phi \times 280\text{ cmH}$ の総アルミ製で、気密、耐圧構造のものを作った(図 2-6)。それは大きく二つ理由がある。その一つは内部に収納されている装置や保温材などからのアウトガス対策であり、もう一つは海上回収による衝撃や水没を防止するためである。ゴンドラは上下二つに分かれ、その間はバイトンの O-リングで密封する。下部には、液体ヘリウム用デュワーと試料容器が入り、上部には配管系、バルブ類、制御回路系、

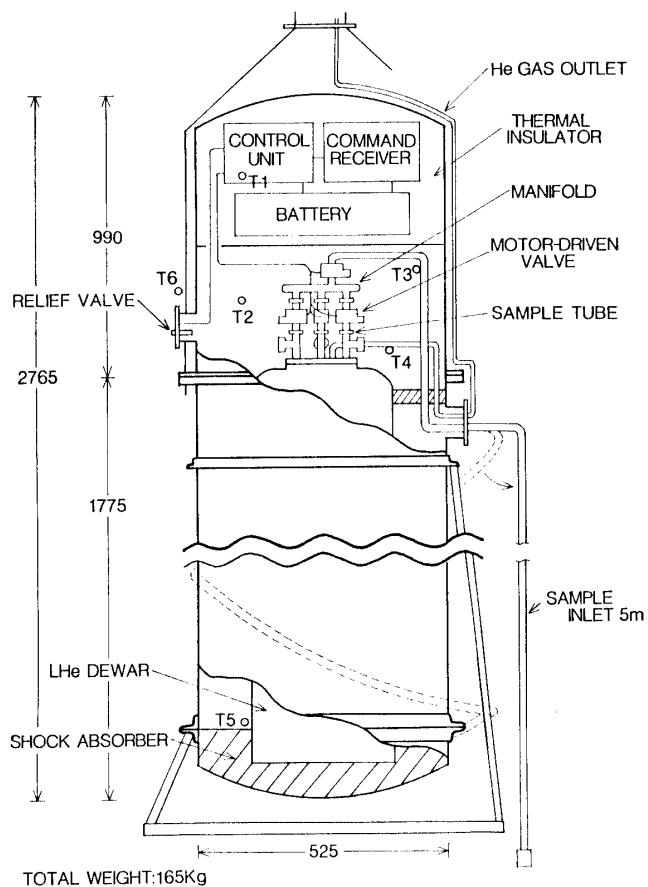


図 2-6 ゴンドラの構造とその中の機器の配置

コマンド受信機、電池が入るようにし、作業性の向上を計っている。これは、予冷用の液体窒素の転送や排出と液体ヘリウムの転送は、ゴンドラの上下を組み上げる前に行わなければならぬこと、転送終了後はできるだけ短時間で組立と外装、機能のチェックを行わなければならず、作業性を十分考慮しなければならないためである。上部側面、下部側面にはそれぞれ1ヶのフランジがある。上部側は、センサ及び外部制御（コマンド・シミュレータ用）のための配線用にし、下部側は導入口及び予備の導入口と、ヘリウムガスの排気口及び予備の排気口の取付け用に使っている。脚部は、移動に便利なように通常はキャスター付きのものを使用し、放球時には別に作った軽量な脚と交換した。

グラブサンプリング時代から同様な方式をとっているが、ゴンドラ内の機器が原因と思われる汚染や内部機器の損傷は皆無であり、またゴンドラそのものも殆んど無傷のまま回収できている。従って、使用した機器は殆ど全て再使用可能であった。

2-7 制御用ソフトウェア

CPUの処理速度に比べて各部の機械的動作速度は非常に遅いので、基本方針としてはハードウェア（回路）はできるだけ単純にし、できるだけソフトウェアで対処するようにした。これは初期のソフトウェア開発に時間や労力がかかるが、一旦完成するとシステムの動作や機能変更に柔軟に対応できるからである。

図2-7は、クライオサンプリング用制御プログラムの流れ図である。これは基本的にはグラブサンプリング用のものと変わりはないが、2～3の機能の追加がある。

メインプログラムでは、初期設定の後割込み待ち状態になる。割込みには5つの要因があり、それらはデータ伝送割込み、A/D変換終了割込み、パルス割込み（モータ動作時のみ）、コマンド実行開始割込み、タイマ割込みである。

データ伝送割込みがくると、通信用IC(HD 63 A 50)に1バイト送り出す。1フレーム分のデータを送ると、新しいデータを適切にフォーマットしてバッファ内に準備する。

A/D変換器(ICL 7135)からA/D変換終了割込みがくると、まず多重割込みを許可する。これはこのA/D変換器からのデータの取込みに多少時間がかかるためである。その後A/D変換器から1項目分のデータ（3バイト）を読み込む。それが変換項目の最後のものである場合には、デュワーの内圧の値が電磁弁の開閉条件に合致しているかどうか調べ、その結果により弁の開閉指令を出す。また、レベルセンサは先に述べたように常時作動しているわけではないため、レベルセンサがオンしているタイミングとレベルセンサデータのA/D変換のタイミングとが通常一致しない。このため、後のデータ解析に不都合が生じることが予想され、レベルセンサが作動している時のデータのみを選択して伝送バッファにセットするようにしている。

パルス割込みはバルブ開閉用モータが作動している時のみ発生し、モータの動作開始時に設定したパルスカウンタの内容をデクリメントする。なお、この値がゼロになるとモーターを停止させる。モータからのパルスに雑音が混入すると重大な問題を発生するので、回路的にもソフトウェア的にも工夫がしてある。

コマンド実行割込みがくると、まず多重割込みを許可し、その時の項目レジスタの内容により、各項目処理ルーチンに分岐する。各項目の内容は、表2-1に示す。

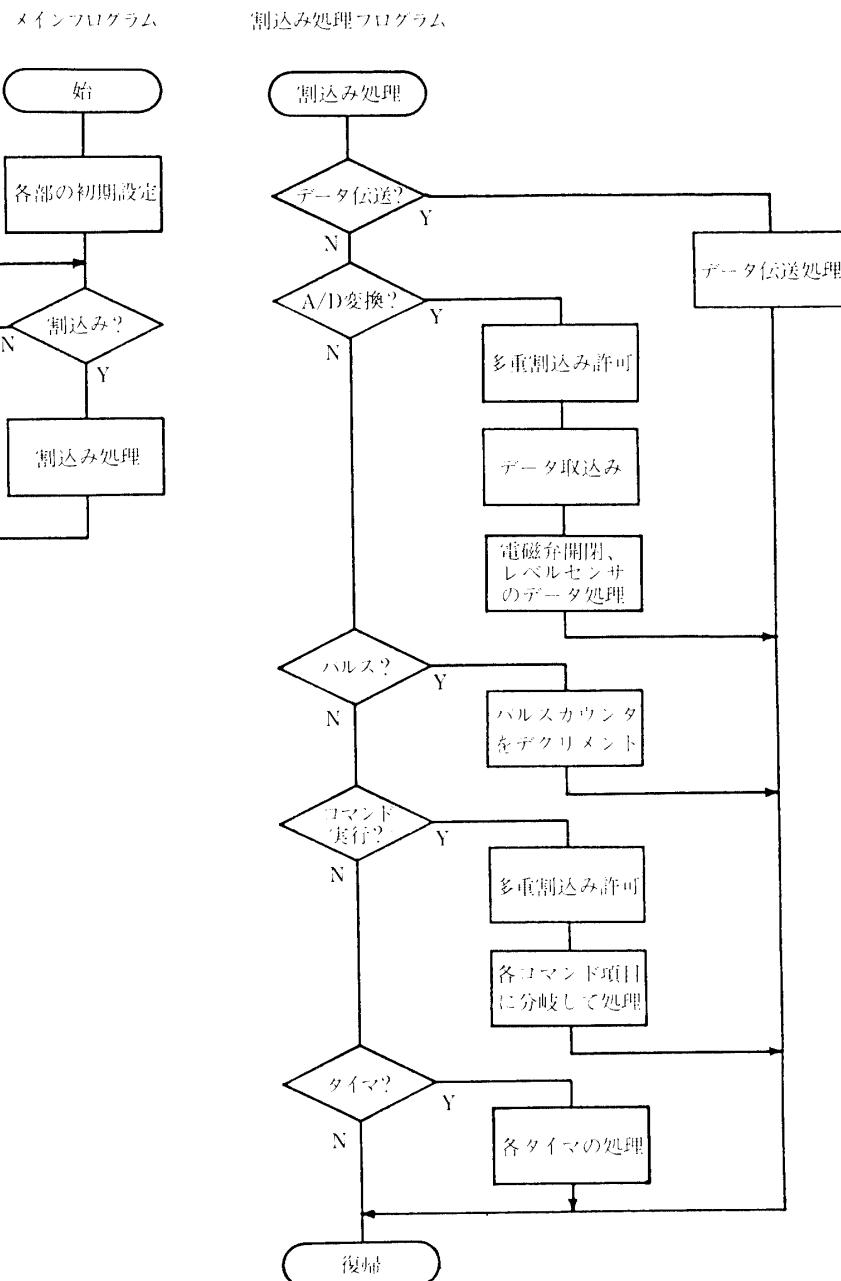


図 2-7 クライオサンプラーの制御用のソフトウェアの流れ図

タイマ割込みがくると、タイマの中でイネーブルされているものだけの内容をデクリメントする。タイマにはディレイタイマ、ヒーター用タイマ、レベルセンサ用の ON/OFF タイマがあり、それぞれに設定する値は、各操作や事象に対して事前にプログラム内に組み込んである。

プログラムの大きさは約 1.5 k バイト、実際使用した作業領域は 256 バイトである。これ

らのプログラムは、全て自作のアセンブラーの下で開発した。

2-8 コマンド項目

全コマンド項目を表2-1(B₃₀-52)に示す。電源投入時あるいはCPUリセット・コマンド送出時には、項目0になる。この状態では、実行開始指示コマンドを送出しても何もない。項目1を実行すると、液体ヘリウムのレベル計の動作／非動作をトグルして切り換える。なお通常は動作状態にして放球する。水平浮遊状態にはいると項目2を実行し、いくつかの内部機器の電源投入と、ガラス割り／ホースリリース・コマンド回路のイネーブルを行う。項目3は取入れ口バルブの開口を、項目4～9は各試料容器に試料の採取を行う。これらの項目の実行を開始すると、バルブの開閉など一連の操作は、すべてプログラムに従って自動的に行われる。項目10は自動採取の開始を指示する項目で、パラシュート降下中の試料採取と取入れ口を閉めること、その他ヒーターの点火等も行う。実行内容の詳細については第5章で述べる。

項目11～15は、補助あるいは異常事態が発生した場合の対処で使用するものである。項目11はなんらかの事情で項目10の自動採取が実行不可能となった場合、取入れ口を閉めるために使用する。項目12は、項目2がディスエーブル時には2つのセンサのうちの一方を選択するために使用し、イネーブル時にはLHe強制蒸発用のヒーターの電源をオン／オフする。これらはトグル動作する。項目13はモーター電源をディスエーブルし、内部のいくつかの機器への電源もあわせて切る。項目14と15は、ガラス封じが割れなかったことが確認されたり、項目3で取入れ口が開かなかったりした場合、予備の取入れ口を使っ

表2-1 コマンド項目一覧

コマンド番号	操作内容
0	無操作
1	レベルメータの電源を入れる
2	モータ用電源イネーブル
3	取入れ口を開ける
4	1番目の試料採取
5	2番目の試料採取
6	3番目の試料採取
7	4番目の試料採取
8	5番目の試料採取
9	6番目の試料採取
10	自動採取
11	取入れ口を閉める
12	レベルセンサの選択、ヒーターのオン・オフ
13	モーター用電源ディスエーブル
14	予備の取入れ口を開ける
15	予備の取入れ口を閉める

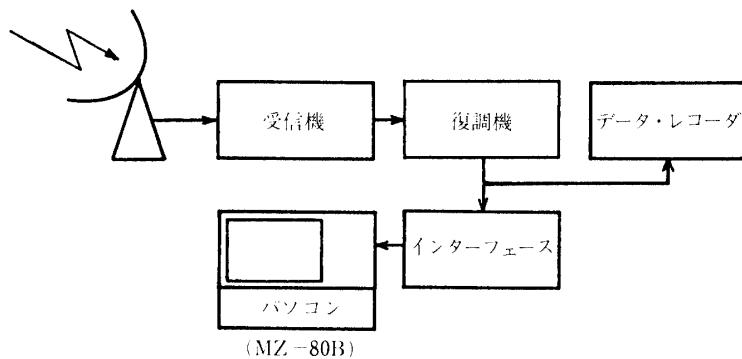


図2-8 クイックルック・システムのブロック図

** B30-52 QUICK LOOK ** DATE 05/28/86 TIME 11.8.54				
<Status/Monitor >Flag		<Ana. mon. >	<Command>	
FRCT : 00169D	*CTRL*	+50°C = +1.6617V	CM00 : nop	
CMND : 04	CMFL=OF	カイロ = +0.9143V	CM01 : レベルメータ on↔off	
FLAG : 00010001	TIMR=OF	AD02 = +0.8676V	CM02 : モータ power on	
00100000	EXEC=OF	AD03 = -0.1475V	CM03 : トリイレグチ open	
VO/F : 00000000	MPWR=ON	AD04 = +0.0978V	>CM04 : sample 1 (33km, 35min)	
VO/C :	CINH=OF	カマソコ = +0.0187V	CM05 : sample 2 (30km, 21min)	
VSTA : 00000001	RLFG=OF	ガイキ = +0.9158V	CM06 : sample 3 (27km, 13min)	
TMRC : 000049		-50°C = -1.6635V	CM07 : sample 4 (24km, 8 min)	
TMNW : 0	*RELY*			
HRNW : 0	SNSR=L	LEVL = +0.4143V	CM08 : sample 5 (21km, 5 min)	
LTIM : 203	LTMR=OF	ナイアツ = +0.1098V	CM09 : sample 6 (18km, 3 min)	
DMON : 01000011	LOPR=ON	カイコウニヤヤヤヤヤ	CM0A : auto sample(13km, 1 min)	
00101001	LPWR=OF	GND = -1.9917V	CM0B : トリイレグチ close	
ADPT : 00BB	HETR=OF	+5V = +1.1066V	CM0C : sel sensr/heater on/off	
TXPT : 0080	OPMN=OF	+12V = +1.4179V	CM0D : モータ power off	
PULS : 0	PLFV=OF	-12V = -1.6533V	CM0E : ヨビトリイレグチ open	
STCK : C7F8		LEVL = +0.4112V	CM0F : ヨビトリイレグチ close	
<INLET>		<VALVE>		
HOSE : OF	INLT : OP	CYL3 : CL	CYL6 : CL	EXTP : +1.7911V
GLS1 : OK	CYL1 : CL	CYL4 : CL	PUMP : CL	EXPR = -1.4556V
GLS2 : OK	CYL2 : CL	CYL5 : CL	EXIN : CL	EXPR = -1.0087V

図2-9 クイックルック画面のハードコピーの一例

て採取するために設けてある。

2-9 クイックルック装置とそのソフトウェア

気球からのデータは全てデジタル的に伝送されてくるため、刻々の動作状況やハウスキーピングのデータは、パソコンを使用して解読・表示させるようにした。図2-8にブロック図を示す。

復調機で復調されたデータはデータレコーダで時刻と共に記録され、同時にインターフェース内の通信用IC(8251A)を経てパソコン(MZ-80B)に入力される。QL用ソフトウェアは、インタープリタ言語であるGAME[26]をシャープのFDOS[27]上で動作するよう改造したものを使って開発し、後にコンパイル[26]して実行速度の高速化を図っている。これにより、リアルタイムで完全に全伝送データを解読・表示可能である。また必要時には画面をそのままハードコピーすることもできる(図2-9)。

3. 汚染対策

微量あるいは活性な物質を取扱う場合には、それが何らかの原因により本来の量より増加あるいは減少するのが一般的であり、そのようなことが起ったとき汚染されたという。今回の実験の場合には、汚染源として試料採取容器、バルブ及び導入系配管、ヘリウムガス、ゴンドラ、排気系、気球本体、パラシュート、ロープ類などが考えられる。ここでは各々に施した対策を述べる。

3-1 試料採取容器

超高真空まで排気すると容器の内壁は活性化され、ここに外気が導入されればその中に含まれる物質のあるものは壁面に吸着され、あるものは反応を起こして分解される。特に微量成分であるハロカーボン類は吸着されやすいことが報告[10]されており、対策が必要となる。

B₁₅-60では、7本のうち4本にシラン処理を施した。方法は[11]で述べた通りである。B₃₀-52では特に内面処理は行なわなかった。これは始めに述べたように、試料量／内面積の比が非常に大きくなつたこと、B₁₅-60で特にその効果が確認されたわけではなかつたことによる。

3-2 バルブ、導入系配管、ヘリウムガス放出管

試料が触れる部分は全てステンレスを使用し、配管の接続及びバルブにもハロカーボン類の分析に有害な高分子物質(例えばバイトン等)は一切使用していない。バルブはシラン処理した容器(B₁₅-60)に付いているもの以外は処理を施していない。B₁₅-60のときは、開口直後と各試料の採取直前に、容器の中の1本を使用して配管部の換気を行なつた。B₃₀-52の場合は、開口直後ののみ換気を行なつた。これはこの容器を後のパラシュート降下中の試料採取に使用するためである。導入系の入口はガラス封じしてあり、放球前や気球上昇中に付近の大気により配管内が汚染されないようにしている。導入系配管は、試料容器からマニホールド部までを組立て、ベーキングを行ないながら十分に排気をし、真空封じをしたまま三陸大気球実験場に運んだ。これはゴンドラの輸送の都合上、ゴンドラ内に組み立てたままでは不便なためである。従つて三陸大気球実験場での最終的に組立てるとき一

且大気にさらなねばならないが、その時は純窒素をリークし、組立てた後再度ベーキングをしながら数時間ターボ分子ポンプで排気することにした。このような処置はグラブサンプリング時代から繰返しているが、一番最初に採取された試料（高度が最も高い）の分析結果をみても、特に汚染はみられなかった（ハロカーボン類の分析を行なえば汚染状況はたちどころに判明する）。この事実より、この部分の処置法の妥当性が確認された。

導入系のゴンドラ外のホースは約5mあり、上空で入口のガラスを割ると同時にゴンドラへの固定を解き、垂れ下がる様になっている。これはゴンドラから導入口を出来るだけ離すためである。

液体ヘリウムデュワー内から気化して出るヘリウムガスは、差圧弁を通してゴンドラ下部のフランジまで導き、そこからは銅パイプでゴンドラの上部（約2m上）まで配管して、上方に向かって放出するようにした。

3-3 ゴンドラ

ゴンドラは、アルミニウム製の耐圧、気密構造の容器を製作した。その理由の一つは内部の装置及び保温材等からのアウトガス封じ込めであり、もう一つは海上で回収するために完全な防水が必要なためである。ゴンドラは上部、下部及び脚より成立っており、上部と下部との間はバイトンのO一リングで気密が保たれる構造になっている。内部回路と外部の機器との接続及び配管の出入のためのフランジが、上部と下部にそれぞれ1ヶずつ設けられており、この部分もO一リングを使って気密を保つようになっている。

放球前にゴンドラ周囲及び吊金具、導入ホース、脚、コマンドアンテナ、配線コード等をエチルアルコールで十分にふいた。その後はゴミなどの付着がないように、また素手などで直接触れないように注意した。

テレメータの送信機は、通常発泡スチロールの箱の中に納められているが、これも使わずむき出しのまま脚部よりつり下げた。

3-4 排気系

試料採取容器の排気には、図3-1に示すようなターボ分子ポンプ系を用いた。この系も真空ゲージがガラス製であること、ゲートバルブにバイトンのO一リングが使ってあるほか全てステンレス製で、高温までベーキング可能である。試料採取容器の真空度は、図に示す部分に取付けたB-Aゲージで測定した。容器、ラプチュアディスク、バルブ及びポンプとの接続変換部は、特製のヒーターやテープヒーターを巻き付けることによりベーキング可能である。

三陸実験場で導入系配管を組立てた後の排気にもターボ分子ポンプを用い、配管部分はテープヒーターによりベーキングを行なった。

このように、排気系はオイルフリーであり、長時間にわたる連続排気用の安全装置にも配慮している。また十分高温でベーキング可能なように、排気系及び配管、試料採取装置に使用する部品等を選定している。

3-5 卷下げ

気球本体、パラシュート、ロープなどは地表付近や上昇中に汚染物質を多量に付着したまま上空にいくことが考えられる。これらによる汚染を防ぐためには、これらから十分な

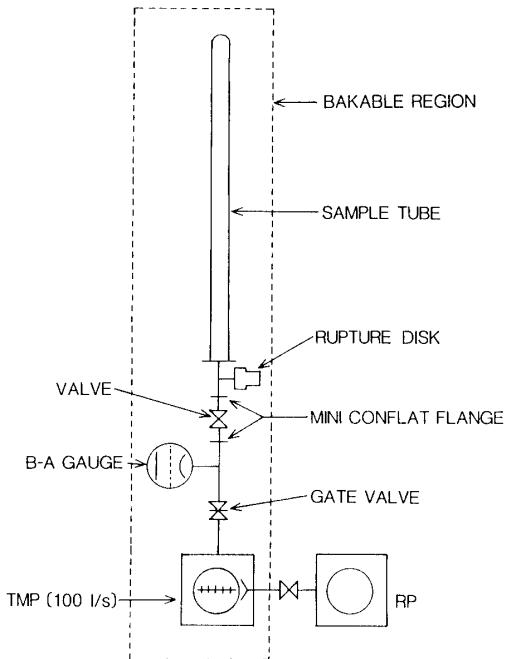


図 3-1 試料容器の排気システム

距離をとることが効果的な方法であり、そのために巻下げ機を使った(図 3-2)。これは気球と観測器ゴンドラの間に取付け、放球後それに巻きつけてあるロープを伸ばし気球とゴンドラの距離をとることができる装置である[19]。巻下げに使うロープは、ナイロン製にするとアウトガスの問題と太くなるために距離を十分にとれないということがあり、長さ 100 m, 4 mm ϕ のステンレスワイヤを使った。このワイヤの引張り強さは 1 ton 以上あり、重量は 10 kg 程度である。これを事前にアセトンで十分脱脂し、その後汚染しないよう注意しながら巻下げ機に巻きつけた。

3-6 その他

気球が水平浮遊状態にはいってただちに試料採取操作を始めるのではなく、まず十分にゴンドラ表面からのガス出しを行う。また試料採取は気球を緩降下させながら行なう。これはゴンドラ付近の大気や気化して放出されるヘリウムガスが、相対的に上方(ゴンドラから気球に向かう方向)に移動するようにするためである。しかも、試料入れ口がゴンドラより下方に位置するように導入系のホースを垂れ下げるこにより、採取される大気は気球やパラシュート、ゴンドラからの放出ガスによる汚染を受けにくくなる(図 6-1)。

また導入口を開口直後に配管内に流入した外気は、管壁との反応や分解の可能性があるため、試料採取を行う前に容器のうちの 1 本を用いて導入配管内の換気を行なうようにした。このために設定したページ量は、その時の気圧に換算すると、外気が通過する配管系全体の容積の数倍~10 数倍程度である。

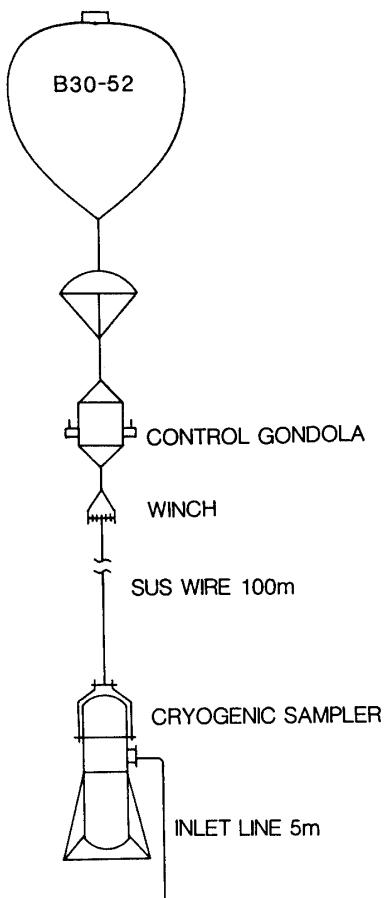


図 3-2 荷姿

4. 基 础 実 験

4-1 サンプリングレート

適切な量の試料の採取は、バルブ開口量と採取時間によって制御することにした。ところが長く複雑な配管を通して試料の採取を行なうため、採取しようとするそれぞれの高度の気圧での、この配管部のコンダクタンスを知る必要がある。しかし配管は複雑でバルブも挿入されているため、計算により求めることが困難である。そこで実際にフライトで使用する配管系を使い、流量を測定する実験を行なった。その時の機器構成を図 4-1 に示す。図中で太線になっている部分が流量を測定したい部分（フライトで使用する部分）を示している。バルブ 5 は導入系配管部の、バルブ 6 は容器のバルブとして機能する。301 と 2001 のバッファは、実験中の急激な圧力変動を緩和する役目を果たし、それぞれ外気側、試料容器側の圧力を設定する。その圧力はそれぞれセンサ 1, 2 で計測する。

まず 2001 側はできるだけ高真空まで排気し、301 側には測定したい圧力まで乾燥窒素をリークする。ここでバルブ 5 は全開、バルブ 6 は $1/4$, $1/2$, $3/4$, 1 , $1-1/2$, 約 2 回転開

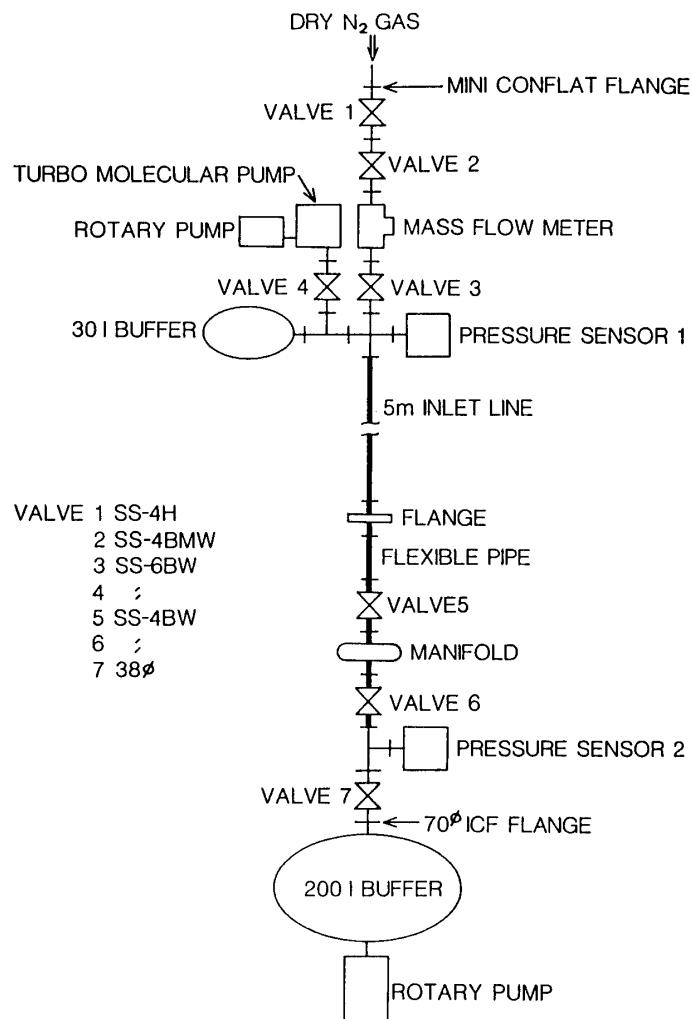


図4-1 試料導入系のコンダクタンス測定システム
太線は実際フライトイで使用する部分を示す

け、それぞれの場合の流量を質量流量計で測定する。これを実際に採取を行なう予定の高度の気圧各々について求めたのが図4-2である。なおこの流量は空気に換算してある。

これから、採取を行う高度の気圧、気圧の変化量、バルブ開口量、待ち時間を与えると、全採取量を計算するプログラムを作った。詳細は5.で述べる。

4-2 液体ヘリウム、蒸発ガス、内圧の制御

飛揚前、飛揚中の液体ヘリウム量の監視、制御、また飛揚時の液体ヘリウムの必要量を正確に求めることは大変重要である。このため、液体ヘリウムの残量を直接監視する超電導を利用したレベルセンサ、デュワーの内圧を監視する圧力センサ、飛揚中の外気圧低下による液体ヘリウムの過度の蒸発を防止する排気用の差圧弁、急激な内圧上昇（先の差圧弁で排気しきれない場合）時に使用する少し高めの差圧に設定してある差圧弁（B₁₅-60），

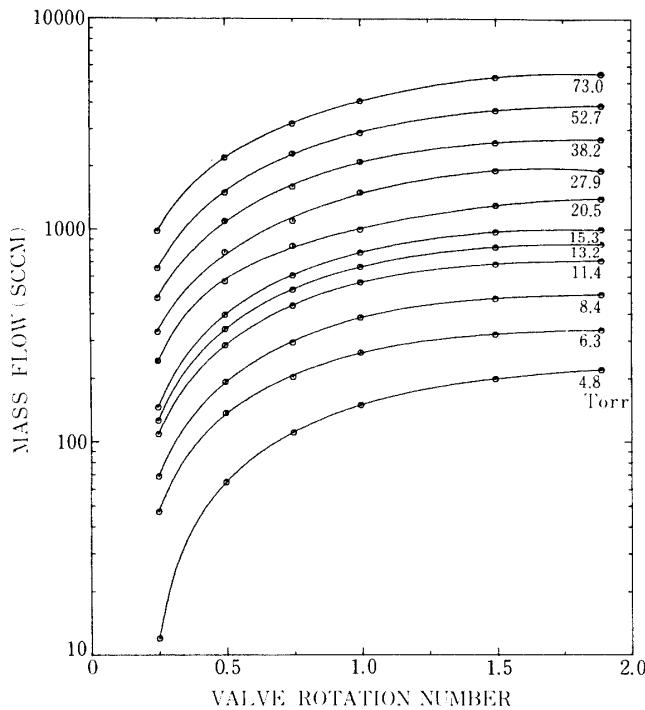


図 4-2 バルブ開口量に対する全システムを通しての流量
パラメータは外気圧を示す。(SCCM=Standard Cubic Centimeters per Minute)

電磁弁(B₃₀-52), 最後の試料採取を終えた時点で残っている液体ヘリウムを強制的に蒸発させるためのヒーターが取付けてある(図4-3参照。なおこれはB₃₀-52の構成である)。

これらの機器がソフトウェアも含めてお互いにうまくかみ合って動作するかどうか, また実際の飛揚時の動作確認のため種々の基礎実験を行なった。

液体ヘリウムに関しては, 地上からレベルライト高度(約30 km)まで上昇する間に, 気圧変化による蒸発分を含めて約3 l, レベルライト中あるいはその後の試料採取を含むライト中では, およそ0.45 l/hの割合で消費する(この値は1気圧下での静的な蒸発速度と等しく, 実際の試料採取に必要な液体ヘリウムは少量でよい)ことがわかった。またヒーターの能力は, 液体ヘリウムをおよそ0.3~0.5 l/minの割合で蒸発させることができることを確かめた。

レベルセンサは超電導を利用している(NbTi, ~9.3 K)ため, デュワー内圧の低下による温度降下のため, 正しいレベルを得ることができない場合がある(実際より多めに出る)ことが予想されるが, この誤差は実際上あまり問題とはならないことも確認した。

使用した差圧弁はニュープロ社製(B-4 CPA 2-3)で, 内部構造はO-リングのついたピストンをバネで押して作動圧力を決める形式のものである。このバネの力を変化させれば, 必要とする差圧に調整できるようになっている。バイトンのO-リングを使用しているため, 温度が下がりすぎた場合に凍りついたりすることが心配されたが, B₁₅-60, B₃₀-52両者

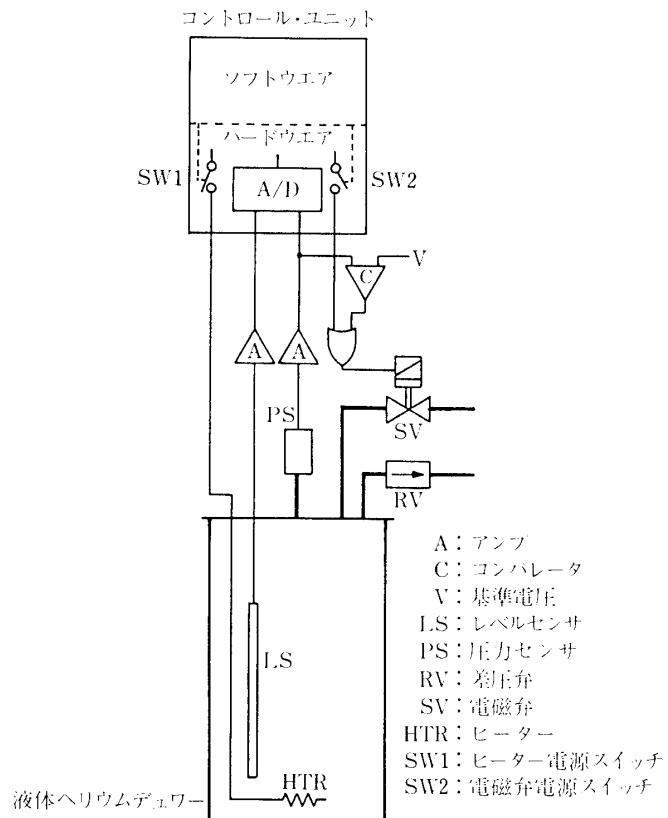


図4-3 ヘリウム制御システムの概念図

の結果から、特に問題にはならないことがわかった。

$B_{15}-60$ の実験より、デュワー内圧測定用センサや回路系の信頼性が高いこと、ヒータ点火時にすばやくヘリウムガスを排出する必要があること、また試料採取時に予備の排気弁が開かないようにすること（これは、この弁の排気口がゴンドラ下部のフランジから直接外気にヘリウムガスを排氣するようになっているため、試料の汚染が懸念されるからである）が必要であることがわかった。このため、先に述べたように、 $B_{30}-52$ ではこの部分には電磁弁を使用し、ヒータ一点火時とそうでない場合で、動作モードを変えることにした。すなわちヒータ一点火時には内圧が $+0.25\text{kg}/\text{cm}^2$ 以上で、それ以外のときは $+0.75\text{kg}/\text{cm}^2$ 以上で電磁弁を開けるようにした。内圧センサの出力に雑音が混入して不必要に電磁弁が開かないようにするために、内圧センサの値が一定時間規定以上の値を示していることを確認するようなプログラムにした。なお A/D 変換部やソフトウェアに障害が発生した場合を考え、ハードウェアによる独立したルートで、 $+0.83\text{ kg}/\text{cm}^2$ 以上の圧力になると電磁弁を開けようにもしてある。

またこの電磁弁の選定にあたっては、低温特性のみならず最高動作差圧力と流量係数も考慮に入れた。これは万一内圧センサに不具合が発生して必要時に電磁弁を開ける指令が出せない場合、最高動作圧力が高すぎるとヒータ一点火時に排気しきれないことが起こる

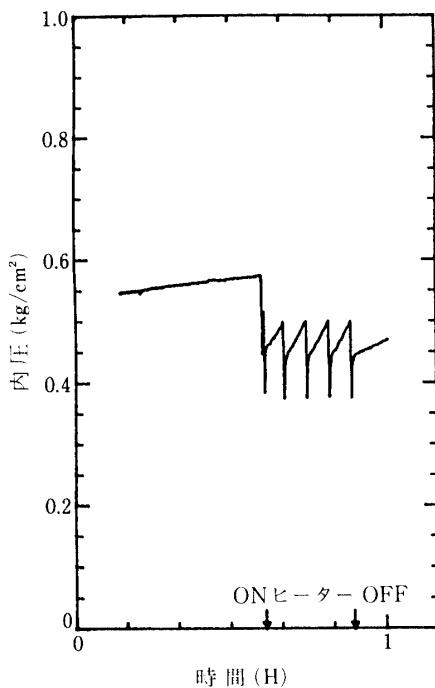


図 4-4 液体窒素を使った蒸発試験の結果

ことが予想されるためである。しかしこの圧力の適当なものを選択しておくと、このような場合にも一定以上の差圧がかかると弁は開いて排気可能になり、フェールセーフになる。またヒーター点火時には液体ヘリウムが急激に気化されるため、排気速度が十分大きくなれば、内圧が上昇し過ぎて内部機器に損傷が発生する事が心配されるからである。

このシステムで、液体窒素を使いヒーター点火時の内圧変化と電磁弁の動作の確認を行なった(図 4-4)。なお、この時はヒーター点火時の内圧が $+0.50\text{ kg}/\text{cm}^2$ 以上で、それ以外のときは $+0.75\text{ kg}/\text{cm}^2$ で電磁弁を開けるようにしてある。電磁弁が作動すると、急速にガスが排出されてデュワーの内圧が低下し、またその値も設定値以上にならないことから、非常時の排気口としての排気能力にも問題ないことが確認された。この結果と B₁₅-60 のときの内圧の変化を基にして、先に述べたように B₃₀-52 では $+0.25\text{ kg}/\text{cm}^2$ 以上で電磁弁を開けるように設定した。

4-3 液体ヘリウムの転送効率と購入量

必要とする液体ヘリウム量を実験用デュワーに転送するとき、保存用デュワー内に最低何1必要であるかは、三陸実験場に持ち込む液体ヘリウム量の見積りに不可欠である。宇宙研における室内実験のときの転送効率(実際転送できた量／全使用量)は、およそ 30 %であった。実際のフライトでは約 121 転送できれば十分なため、液体ヘリウムの必要量は約 361 である。なお、液体ヘリウムの場合、保存容器から汲み出すことができる量は熱損失がないとしてその容積の約 86 %で、残りはガスとして容器内に残る[21]。従って、501 容器で購入しても実際には 431 しか転送に使用できず、上で述べたようにそのうち 361 は不可

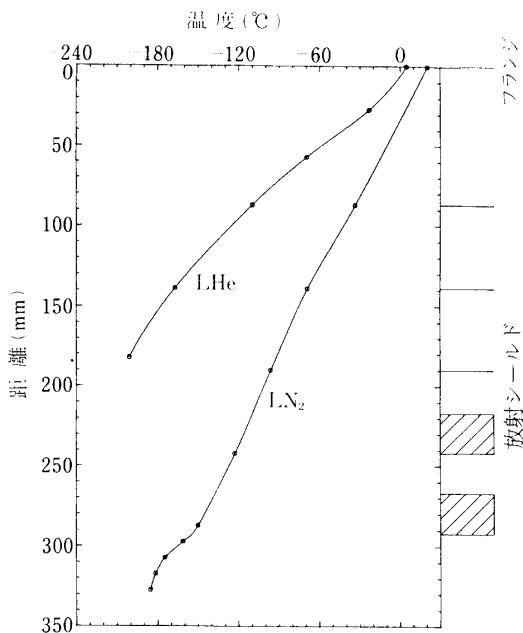


図4-5 液体ヘリウムデュワー内の温度分布

縦軸はデュワーのフランジ下面からの距離。LHe, LN₂ はそれぞれ液体ヘリウム、液体窒素を入れた場合の温度分布である。右手は放射シールドの位置を示す。上3枚はアルミ板、下2枚はアルミ板+ネオプレンゴムで構成されている。

欠の量である。一方液体ヘリウムを購入する場合、購入量は工場出荷時のもので、輸送中の損失は購入者が負担しなければならない。また三陸実験場で、種々の事情で実験日が延期になることは当然予想され、その間の損失分も考慮しなければならない。しかも三陸で追加購入をするためには、容器の確保を含めて少なくとも数日から1週間かかるため、最初の購入量には十分余裕を持たせておく必要がある。これらの検討から、液体ヘリウム 100 l を購入し、三陸実験場に運ぶことにした。

4-4 その他

図4-5には、液体ヘリウムデュワー内に液体ヘリウムと液体窒素を入れた場合の、各々温度分布を測定した結果を示す。縦軸はディューのフランジ下面からの距離で示してある。図の右手には放射シールドの位置が示してあり、その上3つはアルミ板で、下2つは25 mm 厚のネオプレンゴム板とアルミ板を示している。なお、これは熱電対を用いて測定したが、熱電対では-200°Cまでしか測定することができないため、その温度より低い部分の温度分布は示していない。液体窒素の場合、放射シールド下までほぼ直線的に減少し、そこで急激に変化している（測定時にはデュワー内には一切の機器は実装されていない。またその時の液面はフランジから 1240 mm 下）。また液体ヘリウムの場合には、フランジ下 180 mmあたりで既に-200°C以下となっている（この時は全ての機器が実装されており、液面は 925 mm 下）。従って、温度の低下分はフランジ下面から高々30 cm 弱で殆んど

が支えられており、それ以下はなめらかに変化していることが予想される。これらの事実から、フランジから 200 mm～300 mm 下のあたりで水素、ヘリウム、ネオンを除く全ての物質が液体あるいは固体になる温度となっている。従って、試料採取中にある程度の速度で外気が流入していれば、逆拡散で失われる成分の量は非常に少ないことが期待できる。

デュワー内に全機器の実装時の、液体窒素の静的な蒸発率（液を転送後約半日経過後測定）は、気体として約 1000 SCCM (Standard Cubic Centimeters per Minute) (液体として 0.11/l/h) である。この値は、三陸実験場において行う液体ヘリウムデュワーの性能試験の基準値として使用する。

5. 試料採取高度の決定と試料採取時間の計算

気圧、気圧の変化量(降下させながら採取するため)、バルブ開口量、開いた状態での待ち時間を与えると、全採取量を計算するプログラムを作った。このプログラムでは、まず図 4-2 の値から、最小二乗法を使い、バルブ開口量に対する流量(気圧を一定として)と気圧に対する流量(バルブ開口量を一定として)を補間する 3 次曲線を求める。つぎにこの結果を使い、バルブ開口量と気圧変化とを計算に入れながら刻々の流量を計算し、積分していく。図 5-1 はこのプログラムの計算過程をグラフに出力したものである。実線と破線は、それぞれ表 7-1(b)の容器 No. 3 と No. 6 に対応している。なお、実際に採取する気体の温度は実験時と異なっているため、採取量にきいてくるはずであるが、ここではそれを考慮に入れていない。また高度の変化分も小さいため、その間の気圧変化は線形と仮定している。

試料採取高度は、従来どうり到達高度から高度 18 km までをほぼ等間隔にとることにした。高度が決まればその高度の気圧が求まり、先に述べたプログラムを使用して試料採取時間を種々変化させ、適切な量の試料採取ができる時間に決定する。気圧が低い(高度が高い)領域では、実際バルブが開閉動作している間に採取される量は少なく、バルブが開いた状態で待っている間に採取される量が支配的である。しかし、気圧がある程度高くな

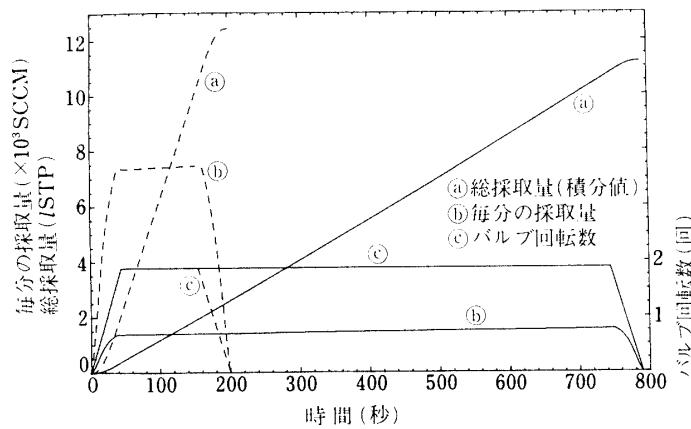


図 5-1 総採取量、毎分の採取量、バルブ開口の時間変化

表5-1 パラシュート降下時の試料採取のタイムシーケンス
(B₃₀-52)

+ X (sec)	操 作	予想高度 (km)
-120	自動採取モードの起動と確認	~18
0	気球切り離し	18
+240		13
{	(試料採取)	
+280		12
+281		
{	(取入れ口のバルブを閉じる)	
+326		
+327		
{	(ヒーター作動)	
+1527		0

ってくると、バルブ開閉動作時に流入する量も無視できなくなってくる。バルブ開閉動作時の流量は比較的誤差が大きくなりやすいため、このような場合にはバルブをいっぱいには開けずに適当なところで止め、その状態で時間をかけて採取するようにした方が、採取量を精度よく制御しやすい。B₁₅-60 では最低高度での採取、B₃₀-52 ではパラシュート降下中の採取にこのやりかたを採用している。

実際の計算では、まず採取高度が決るために、待ち時間のみ変化させて（高度がある程度高ければ、バルブは無条件に全開する）適切な量を採取できるようにする。これを各採取高度について求めたものが、表7-1の採取量の項である。これにより十分制御できない場合にのみ、開口量を小さくするようにしている ((b)の容器 No. 7 の場合)。また、高度 10~18 Km の間は飛行機高度と気球高度のちょうど狭間に位置し、しかも春から秋にかけて通常その間に（対流）圏界面がある。圏界面は種々の微量成分の濃度分布の変曲点にあたり、その上下の近傍で試料の採取はぜひ行ないたいという要望が以前からあった。グラブサンプリング法でパラシュート降下中に試料採取を実行したことがあり、その時は貴重なデータを取得できた。グラブサンプリング法では試料が取れすぎて容器が破壊されるということがないため、採取高度と高度分解能のみを考慮してバルブ開口量と待ち時間を決めればよかったです。しかしクライオサンプリング法では、それら以外に急激な気圧変化による試料流入量の大巾な変動、残った液体ヘリウムの強制排気を行なう時間的余裕をも考慮しなければならない。しかも降下時は電波状態が悪化し、またバラスト投下等のためにコマンド送信機が使えないこともあります。全て機上で自動的に一連のシーケンスを実行させなければならない。

B₃₀-52 の場合は、まず採取高度を 12~13 Km の間と決めた。B₁₅-60 のパラシュートでの降下チャートより、気球切り離し（高度 18 Km とする）後、上記高度に達するまでの時間を 180 秒と出した。この高度から採取をはじめるとして、適切な採取量を考慮に入れ、先

のプログラムによりバルブ開口量と待ち時間を決めた。実際の場合、種々の都合によりこの採取高度の変動が予想されるが、高度が予定より高くなる場合は、結果的に試料の量が少なくなるだけで特に問題は生じない。しかし低くなる場合は問題で、このような時のために採取量は容器1～6の場合に比較して少な目に設定した。高度約12Kmで採取が終了したとして、着水までに約20分ある。 $B_{15}-60$ の結果から、残った液体ヘリウム量が71以下の場合には、この間に十分排気できることが確認できた。逆に、最終的にこの範囲に液体ヘリウム量を収めるためには、充填量を適切に制御しなければならない。これらの検討をもとに、表5-1に示すようなタイムシーケンスで、機上のマイクロコンピュータにより、全て自動的に降下時の試料採取と残ったヘリウムの排気を行なうプログラムを作成した。また、気球の飛揚状況や回収の都合等により、降下時の採取が不可能になる場合も予想され、これに対応するようなコマンドも用意した(2-8参照)。

6. 準備状況と飛場経過

三陸実験場での準備期間は、 $B_{15}-60$ と $B_{30}-52$ ではそれぞれ5日と4日だった。1日短縮したのは、我々スタッフの経験が増したため、特に問題が発生しなければ各種作業は十分消化できると考えたからである。この間の主な作業は、液体ヘリウムデュワーの性能チェック(液体窒素を使って蒸発量を測定する)、その後導入配管部の組立てと排気、各種機器・回路系の動作チェックである。 $B_{15}-60$ では、巻下げ機へのワイヤの巻き付けは三陸の実験場で行ったが、 $B_{30}-52$ のときには宇宙研で事前に準備し、三陸での作業時間に余裕を持たせるようにした。一応の準備が終ると、予冷のために液体窒素を液体ヘリウムデュワーに転送し、放球日を待った。

液体ヘリウムの転送は、放球前日の夕方から取かかった。我々が開発した手順に従って、まず予冷用の液体窒素を排出し、その後3時間程度かけて液体ヘリウムの転送を行なった。機器の最終チェックを行なった後にゴンドラ上部と下部を結合し、外装と最終の動作チ

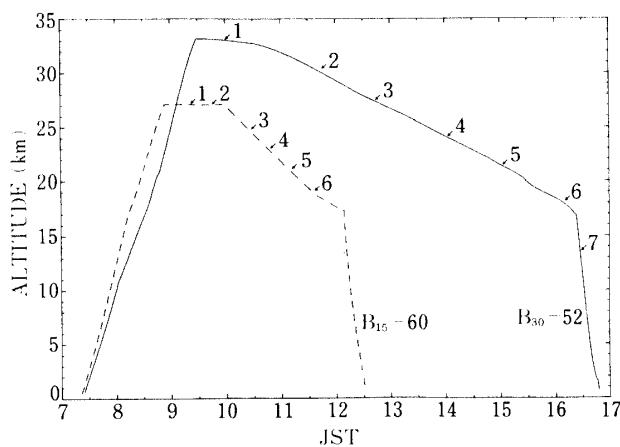


図6-1 時間-高度線図

ックを行った。これら一連の作業は、 $B_{15}-60$ の場合途中でのトラブル等もあり午前5時近くまでかかったが、 $B_{30}-52$ のときには少し早目に作業に取りかかったため、午前2時前に終了した。

$B_{15}-60$ と $B_{30}-52$ は、それぞれ1985年9月3日、1986年5月28日に宇宙科学研究所三陸大気球実験場 ($141^{\circ}49'30''E$, $39^{\circ}09'30''N$) より放球された。いずれも気球上昇中に巻下げ機を作動させ、ゴンドラを気球本体より 100 m 離した。当日の風の具合や回収時刻を考えて、水平浮遊時間をあまりとることはせず、導入口のガラス割りとホースリリース用のコマンドを打ち、引き続き排気用容器の作動と最初の試料の採取を行なった。その後緩降下させながら、2～6番目の容器に試料の採取を行なった。図6-1は両者の時間高度線図である。図中の番号は、各容器にそれぞれ試料採取を行なった高度を示す。図6-2は航跡図である。同様に各番号は容器にそれぞれ試料採取を行なった地点を示す。

6番目の容器に試料の採取を終えると、 $B_{15}-60$ ではヒーターに点火し、残った液体ヘリウムが全て排出されたことを確認後、気球を切り離した。 $B_{30}-52$ では、ここで自動採取シ

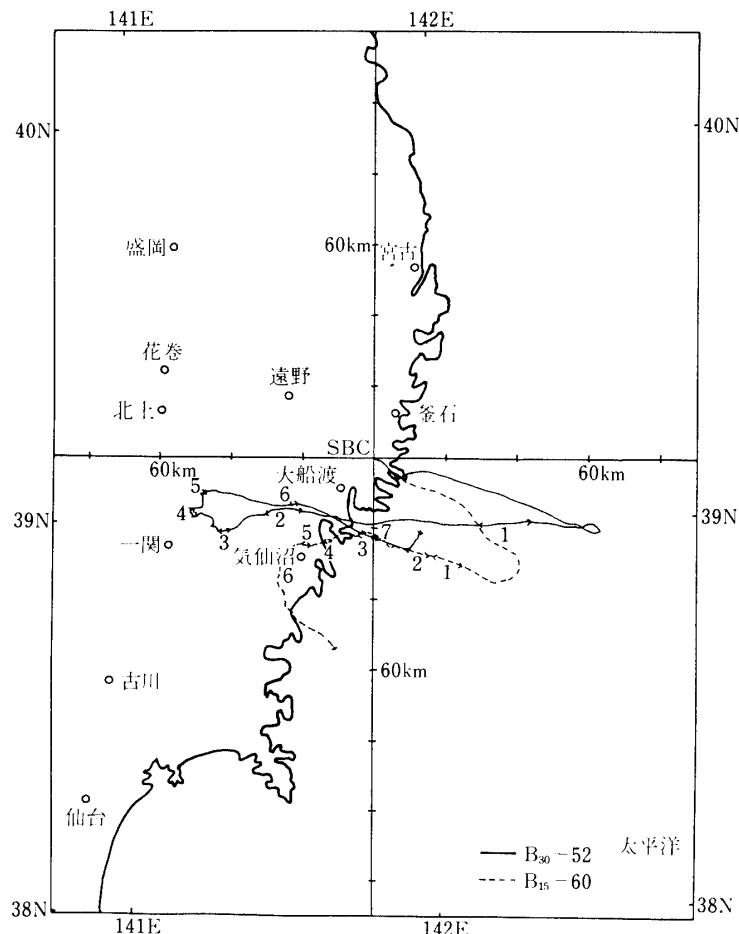


図6-2 航跡図

一ケンスを起動し、制御を全て機上のマイクロコンピュータに移した後、気球を切り離した。いずれも海上に着水後、付近で待機していた回収船に短時間の後引き上げられた。特にB₃₀-52の場合には、予測した位置で待機していた回収船の前に着水した。共に回収地点に近い大船渡港で陸あげされ、B₁₅-60の場合はその場で水洗の後、運搬の都合上一部分解して(途中のトンネルの高さに不確定の要素があったため)、またB₃₀-52の場合はそのままの状態で、三陸実験場に運んだ。実験場では十分に水洗後分解し、内部機器の状態をチェックした。

B₁₅-60の場合は上から2つの高度の容器のラプチュアディスクが破裂したが、B₃₀-52の場合にはその原因が究明されていたため、これ以外の事も含め特に問題は発生しなかった。

7. 考察

表7-1の(a)と(b)は、それぞれB₁₅-60とB₃₀-52における試料採取高度、実際に採取できた量、および計算上求めた採取量との比較を一覧表にまとめたものである。各高度の気圧は、放球当日午前9時の秋田の高層気象データから算出したものと、Balloon Manual [20]の付表5からとったものの両者を示した。実際採取できた試料の量と計算によって求めた値はよく一致(<±10%の誤差)しており、飛揚時の高度(気圧)の決定、採取量の計算法、そのための一連の基礎実験全てが良好に行なわれたことを示している。表7-1(b)では、高層気象データは高度約27Kmまでしかなかったため、それ以上の高度ではBalloon Manualの値を使っている。なお、この値は夏の時点のもので、春の時期にそのまま

表7-1 試料採取量の予想と結果の比較

項目	容器 No.	1	2* ⁵	3	4 * ⁵	5	7 * ⁵	6 * ⁵
採取開始高度 (km)		27.1	27.1	25.1	23.1	21.2	19.1	-----
ノ 気圧 (mb)* ¹	18.2	18.1	25.5	34.3	45.1	63.6	-----	-----
採取終了高度 (km)		27.1	27.0	24.5	22.8	20.9	19.0	-----
ノ 気圧 (mb)* ¹	18.2	18.6	27.5	35.7	47.2	64.6	-----	-----
採取量 (cc STP)* ³	20745	15580	7757	5052	3820	3343	6024	
試料圧 (atm)* ³	76.3	57.3	28.5	18.6	14.0	11.8	22.1	
採取所要時間* ⁴ (sec)	1391	1042	364	191	121	88	-----	
バルブ 閉>開>閉	1890	1040	360	190	120	72		
試料圧の実測値 (kg/cm ²)	-----	-----	27.2	17.6	13.6	11.0	-----	
圧力比 計算値／実測値	-----	-----	1.048	1.057	1.029	1.073	-----	
備考	ラプチュアディスクが破れる						各高度で排気	

(a) B₁₅-60

(b) B₃₀-52

項目	容器No.	1	2	3	4	5	6	7
採取開始高度 (km)	33.2	30.8	27.7	24.2	21.5	18.0	33.2	13.7
ノ 気圧 (mb)	-----* ¹ 8.1* ²	----- 11.5	16.7 18.4	29.0 30.6	44.3 47.3	75.9 81.8	----- 8.1	150.0 165.3
採取終了高度 (km)	33.2	29.8	27.1	23.9	21.2	17.8	33.2	13.3
ノ 気圧 (mb)	-----* ¹ 8.4* ²	----- 13.2	18.6 19.9	30.6 32.4	45.9 49.2	78.2 84.4	----- 8.1	161.1 177.5
採取量* ³ (cc STP) (予想)	----- 10590* ²	----- 12190	11210 12290	12190 12980	11680 12560	12410 13440	----- 1310	2670 4010
試料圧* ³ (atm) (予想)	-----* ¹ 38.9* ²	----- 44.8	41.2 45.2	44.8 47.7	43.0 46.2	45.6 49.4	----- 4.6	9.5 14.2
採取所要時間 (sec)	1888* ⁵	1231	791	480	308	183	188	未確認
バルブ 閉>開>閉	1890* ⁶	1240	790	490	310	200	190	40
試料圧の実測値 (kg/cm ²)	36.2	38.9* ⁴	40.6	42.4	38.0* ⁴	45.8	7.1	
圧力比 試算値／実測値	-----* ¹ 1.075* ²	----- 1.152	1.015 1.113	1.057 1.125	1.132 1.216	0.996 1.079	-----	
備考	~Sample×300/(300+280)cc取り分けた。 300:保存容器の容積 280:試料容器の容積						排気	採取

(注) *1) 秋田の当日午前9時のデータより算出。

*2) BALLOON MANUAL 日本の夏より。

*3) 予想(試算)値 ただし18°Cの空気として。

なお、試料容器1～6の容積は272cc、7は282ccとして計算。

*4) 上段はモニタデータより、下段はプログラムの設定値。

*5) シラン処理をしたもの。

*6) ポンプとして使用。各高度で少しづつ採取。

適用するには問題があり、今後は自前で測定できるようにすることが必要である。表7-1(a)で容器No.1とNo.2はラプチュアディスクが破裂したと書いてあるが、これはB₁₅-60のときの試料採取量の基礎実験に一部不備があったため、過大な量を採取したためである。なおこの表中の値は、その不備を改善したものを使って計算してある。B₃₀-52の容器No.7の採取量が計算値とかけ離れているのは、パラシュート降下時の採取が予定通り行なわれなかったことを示している。この原因としては、試料導入用ホースのリリース機構が完全に動作しなかったためにホースを垂れ下げることができず、外気の流れの方向(ゴンドラの降下方向の逆)と導入口が直角となり、効率のよい採取ができなかつたためと考えられる。

えられる。

表7-1(b)の容器No.2とNo.5の予想試料圧と実測値の比を見ると、他のものと比較して少し大きいように思える。これは後に、両者のバルブの弁座に小さなリークがあったため、測定時までの間に減圧したことが判明した。B₁₅-60の場合には、三陸実験場でマニホールドから試料容器を取り外し、各容器に小型のバルブを付加してバルブ間を排気後、分析担当者宛に発送した。しかしB₃₀-52の場合にはそれをせず、マニホールドに固定したままの状態で送った。そのため試料容器から漏れた大気がマニホールド内にたまり、容器内とマニホールド内の圧力が平衡するまで漏れ出したものと考えられる。これは容器No.2とNo.5の圧力がほぼ同じことからも推察できる。グラブサンプリング時代にも、実験に使用したバルブに発生する弁座のリークに悩まされた。従来までの経験からして、一旦バルブを選択したら使用にあたって十分に注意すれば、突然に弁座からリークは発生しない。従って、これは試料採取時に流入する小さな粒子が付着したものと考えられ、実験終了毎に弁座のリークの有無を確認する試験をする必要があることがわかった。

図7-1は放球後の時間に対する温度変化を示すグラフで、実線はB₃₀-52、破線はB₁₅-60のものである。全般的に両者の変化の傾向は似ていることがわかる。各測定個所は図2-6のT_nで示した位置のものである。各温度は放球後徐々に下がり、圏界面を通過したと思われる時刻以降ゆっくり上昇している。前半はヘリウムの急激な蒸発、外気温や太陽輻射熱の影響をそのまま受けていることを示しており、ゴンドラや排ガス系の断熱については更に検討する必要がある。なお回路①とゴンドラ底部⑤の温度は、これらが最も保温状態の良い場所にあるため、比較的この領域での温度変化が小さいことからも説明できる。B₃₀-52の放球直前のゴンドラ内気温②の急激な上昇は、ゴンドラを移動したときに導入口配管用フランジに太陽光が直接当るようになったためと考えられ、この部分の断熱も再検討しなければならない。また、試料採取時には差圧弁やヘリウムガス排出用ホースが急激に冷却

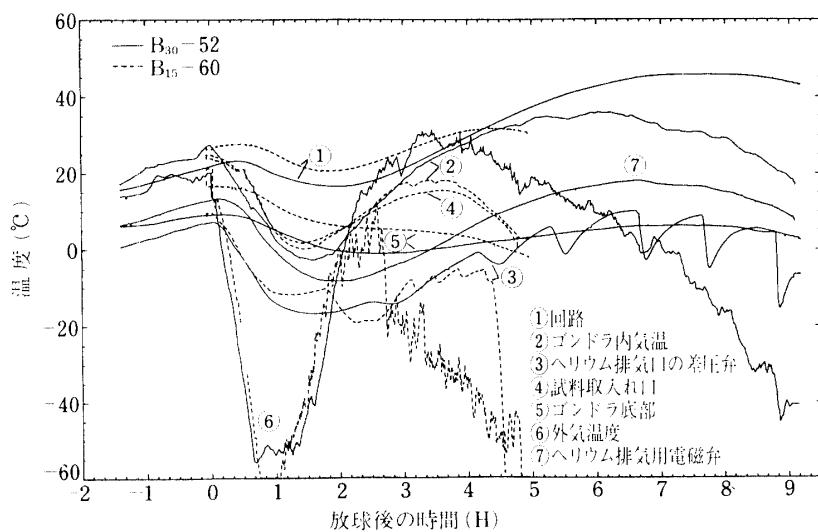


図7-1 各部の温度変化

されるため、一応の保温を行っているにもかかわらず、その影響もでていることがわかる。

ヘリウムガス排出用差圧弁の温度③は、気球上昇中の液体ヘリウムの急激な蒸発により、急速に低下している。又試料採取時の温度低下が明瞭に判別できるため、弁の機能は正常であったことが確認できる。 $B_{15}-60$ では試料導入ホース④にも温度センサを取り付けたが、これはコンドラ内気温②と殆ど同様の変化しか示さなかった。また、先に述べたように、 $B_{15}-60$ では試料採取時に予備の差圧弁も開いている可能性があった。そこで $B_{30}-52$ では、予備の排出口についている電磁弁の温度⑦を測定することにした。図を見ると回路①やゴンドラ内気温②と同様な変化を示しており、差圧弁の温度③のような試料採取時のヘリウムガスによる急激な冷却を受けていない。これはこの間にこの弁を通してヘリウムガスが排出されていないし、誤動作で開いたりもしていないことを示している。

外気温⑥は、その時の圏界面高度を特定するために測定している。なお $B_{15}-60$ では一部スケールオーバーしている。また到達高度付近まで上昇以降は、周辺大気の密度や流量が小さくなるために太陽輻射熱の影響が支配的となり、外気温としては信用できない。温度センサによる観測では、圏界面高度は10.77 km(午前8時3分30秒通過)、当日の秋田と仙台の年午前9時の高層気象データによるとそれぞれ10.65 kmと10.83 kmであり、相互に非常によく一致していることがわかる。

図7-2は、放球後の時間に対する液体ヘリウム残量とデュワーの内圧の変化を示すグラフで、実線は $B_{30}-52$ 、破線は $B_{15}-60$ のものである。

両者の液体ヘリウム残量の変化の傾向は似ているが、内圧の変化は大幅に異なっている。 $B_{15}-60$ で放球の2時間後付近で一見ヘリウム残量が増加しているようにみえるが、これは、レベルセンサが超電導を利用している形式のため、内圧の減少による液面付近の温度低下が原因と考えられる。 $B_{30}-52$ の曲線の領域④の部分は、本システムの地上での静的な蒸発率を表し、値は約0.45 l/hである。領域⑤の部分は上昇中の急激な圧力変化による蒸

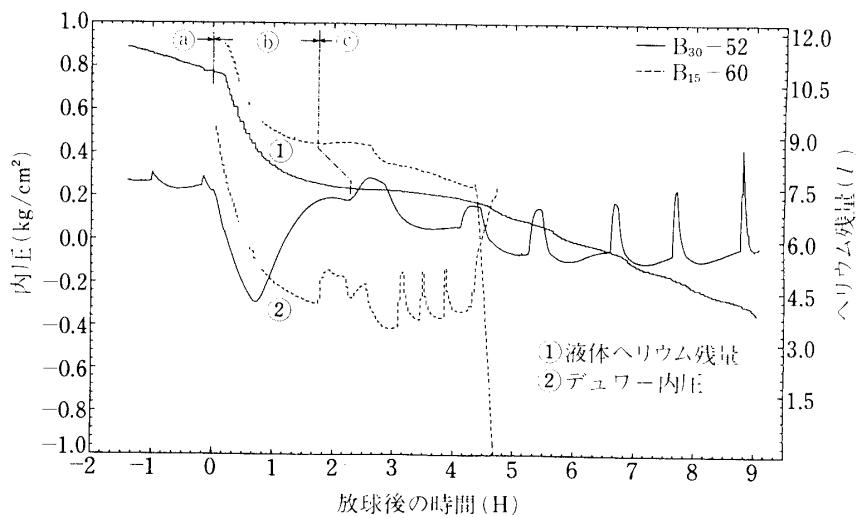


図7-2 ヘリウム残量、内圧の変化

発分で、液体ヘリウムを約3.37l消費している。その後の試料採取期間の平均的消費量は、地上での静的な蒸発率に等しく約0.45l/hであることが興味深い。これはこの曲線の傾きをみてもわかるように、最初や2番目の採取時には液体ヘリウムの消費が、他の部分に比べそれほど多くないことに原因がある。この理由としては、デュワーの内圧低下により内部の温度が下がっていること、また試料の流入速度が他の場合に比べて比較的小さいため、試料を効率よく冷却でき、結果的にヘリウムの消費量が少なくすんでいるものと考えられる。

$B_{15}-60$ の4時間20分後からヘリウム残量と内圧が急激に変化しているのは、ヒーターによる強制排気によるもので、このときは~0.35l/minで減少している。 $B_{30}-52$ では、9時間後以降でパラシュート降下時の試料採取を行ない、その後ヒーターによる強制排気を行なったが、電波状態が悪くデータの取得ができなかった。

デュワーの内圧に関しては、 $B_{15}-60$ のグラフにその変化状況が端的に現われている。気球が上昇するにつれ内圧は減少し（途中データが途切れているのは、巻下げ時の電波状態不良による）、試料の採取毎に、またヒーター点火時に液体ヘリウムの蒸発量が増加して、内圧が上昇していることがわかる。このときのデータの取得率は約2分に1回のため、細かな変化はよく解らない。一方 $B_{30}-52$ の方は、放球前の値が設定値の約半分程度であることから、差圧弁に何かゴミでもさまっていたのではないかと考えられる。放球前に2回内圧が急激に増加しているのは、放球態勢にはいってゴンドラを移動させたときに、液体ヘリウムの蒸発量が増加したためである。また、気球上昇中、 $B_{15}-65$ と $B_{30}-52$ では異なる内圧の変化を示している。 $B_{30}-52$ の場合ちょうどこの時点で巻下げ機を作動させたが、ゴンドラはなめらかに降下せず、何度も引っ掛かったり動いたりした。最終的には完全に伸び切ったが、相当の時間がかかった。従って、その間ゴンドラは継続的に揺すられたはずで、液体ヘリウムの蒸発量の増加は当然考えられる。しかも $B_{15}-60$ のときには、2つの差圧弁を通して十分な速度で排気が行われたため内圧は外気圧に比例して減少したが、 $B_{30}-52$ の場合には開いていたのは差圧弁1つのみで電磁弁の方は閉じていたため、図のように内圧が上昇する結果になったものと考えられる。その後の変化は予想どおりであるが、絶対値については問題が残る。1, 3~5番目の試料採取後の内圧変化（一旦下がって少し上昇する）は、この差圧弁のヒステリシスによるものである。すなわち、開き始める圧力>再度完全に閉まる圧力であり、その大きさは約0.1kg/cm²である。なお回収後差圧弁と内圧センサを調べたが、設定値や動作に以前と変化は見出せなかつたので、初期に設定値より低い値を示していたのは、やはりゴミでもさまっていたと考えるのが妥当であろう。

8. まとめ

グラブサンプリング法の欠点を改良すべく開発に着手したクライオサンプリング法は、システム全体の概念としてはグラブサンプリング法と同様のため、比較的容易に取かかることができた。しかし初期に発生した液体ヘリウム取扱いに関する様々なトラブル（主に経験の浅さによる）も、協力者らの努力もあって、一応原因の究明と対策をとることが出来た。この間に得た貴重な経験より、我々のシステムに関して、液体ヘリウムの取扱いに

関するマニュアルを作ることが出来た。1985年三陸での実験の経験をふまえ、さらにそれを改良した。1986年の実験に関しては、我々スタッフの経験が増したことも考えられるが、そのマニュアルに従ってほぼ予定どおりに問題なく消化することが出来るようになった。しかし、今だ経験や勘に頼る部分があり、それらを排除する計測システム等を考慮中である。

また、このクライオサンプリング法によれば、所期の予想どおり良質で多量の大気試料が採取可能であり、また分析精度の向上により多くの成分についての観測が可能になることがわかった。なお、このたびの分析結果に関しては、別に発表する予定である。

成層圏大気微量成分の地球環境に及ぼす影響は大きく、今後も定期的な観測は必要とされている。我々もその一助となるべくさらに努力するつもりである。また可搬型ヘリウム液化機等が手入できれば、赤道域や極域での試料採取も行ってみたい。それは、これにより大気循環に関する情報が得られると考えられるからである。

9. 謝 辞

本研究を行うにあたり、各方向の方々に大変御世話になった。気球の飛揚とそれに関連する諸々のことは、宇宙研の西村純・廣澤春任両教授と両研究室のスタッフの諸氏、楨野文命・奥田治之両教授に御世話になった。東大理の巻出義紘、東北大理の中澤高清両氏には、準備段階や容器の処理等に適切な助言をいただいた。宇宙研の久保治也氏には本計画の初期の段階で御世話になった。東大洋研の堤真、東大理の久保祐治、東北大理の村山昌平の各氏には、実際の飛揚時のスタッフとして協力していただいた。ここに深く感謝する次第である。

参 考 文 献

- [1] Johnston, H. S., Reduction of stratospheric ozones by nitrogen oxide catalysis from supersonic transport exhaust, *Science*, **173**, 517-522, 1971.
- [2] Molina, M. J. and F. S. Rowland, Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: Chlorine-atom catalyzed destruction of ozon, *Nature*, **249**, 810-815, 1974.
- [3] Keeling, C. D., R. B. Bacastow, A. E. Bainbridge, C. A. Ekdahl, Jr., P. R. Guenther, L. S. Waterman and J. F. S. Chin, Atmospheric carbon dioxide variations at Mauna Loa observatory, Hawaii, *Tellus*, **28**, 538-551, 1976.
- [4] Keeling, C. D., J. A. Adams, Jr., C. A. Ekdahl, Jr., and P. R. Guenther, Atmospheric carbon dioxide variations at the South Pole, *Tellus*, **28**, 552-564, 1976.
- [5] Manabe, S., and R. T. Wetherald, The effects of doubling the CO₂ concentration on the climate of a general circulation model, *J. Atmos. Sci.*, **32**, 3-15, 1975.
- [6] Kerr, R. A., Trace gases could double climate warming, *Science*, **220**, 1364-1365, 1983.
- [7] Ehlalt, D. H., In situ observations, *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A* **296**, 175-189, 1980.
- [8] Heidt, L. E., Whole Air Collection and Analysis, *Atmos. Tech.* **9**(Spring), 3-7, 1978.
- [9] Fabian, P., Atmospheric sampling, *Adv. Space Res.* **1**, 17-27, 1981.
- [10] Schmeltekopf, A. L., P. D. Goldan, W. J. Harrop, T. L. Thompson, D. L. Albritton, M. MacFarland, A. E. Sapp, and W. R. Henderson, Balloon-borne stratospheric grab-sampling system, *Rev. Sci. Instrum.* **47**(12), 1479-1485, 1976.

- [11] 本田秀之, 伊藤富造, 気球搭載用成層大気採取装置, 宇宙科学研究所報告, 特集第4号, 107-125, 1982.
- [12] 伊藤富造, 久保治也, 本田秀之, 富永健, 卷出義紘, 横畠彰人, 酒井均, グラブサンプリング法による成層圏大気微量成分の観測, 宇宙科学研究所報告, 特集第11号, 59-69, 1984.
- [13] Gould, R. P., Cryogenic whole air sampler system, *Tech. Rep. AFCRL-TR-74-0452*, Air Force Cambridge Res. Lab., 1974.
- [14] Lueb, R. A., D. H. Ehhalt, and L. E. Heidt, Ballonn-borne low temperature air sampler, *Rev. Sci. Instrum.* **46**(6), 702-705, 1975.
- [15] Gallagher, C. C., and R. V. Pieri, Cryogenic, whole-air sampler and program for stratospheric composition studies, *Tech. Rep. AFGL-TR-76-0161*, Air Force Geophys. Lab., 1976.
- [16] Ehhalt, D. H., L. E. Heidt, and E. A. Martell, Concentration of CH₄, CO, CO₂, H₂, H₂O and N₂O in the upper stratosphere, *J. Atmos. Sci.*, 163-169, 1975.
- [17] Makide, Y., A. Yokohata, T. Tomonaga, H. Honda, H. Kubo, and T. Itoh, Vertical profiles of CCl₃F, CCl₂F₂, and CH₄ in the stratosphere and troposphere over Japan observed by grab-sampling and gaschromatographic analysis, *Bull. Chem. Soc. Japan.*, **60**, 1540-1542, 1987.
- [18] 伊藤富造, 本田秀之, 久保治也, 皆川博幸, 富永健, 卷出義紘, 久保祐治, 酒井均, 堤真, 蒲生俊敬, 中澤高清, クライオサンプリング法による成層圏大気微量成分の観測, 大気球シンポジウム, 宇宙科学研究所, 110-114, 1985.
- [19] 松坂幸彦, 狩豊, 山上隆正, 西村純, 大気球搭載用巻下げ機, 宇宙科学研究所報告, 特集第8号, 33-49, 1983.
- [20] 東京大学宇宙航空研究所大気球実験班, Balloon Manual, 1975.
- [21] 東京大学物性研究所低温液化室編, 液体ヘリウムの上手な使い方, 1982.
- [22] 山本純也, 液体ヘリウムのやさしい取扱い方, 低温工学, **11**(5), 222-228, 1976.
- [23] 小林俊一, 物理工学実験 7 低温技術, 東京大学出版会, 1983.
- [24] 信貴豊一郎, 平井章監修, 低温工学ハンドブック, 内田老鶴圃新社, 1982.
- [25] American Magnetics, Inc. Model 110A Liquid Helium Level Meter Operation Manual.
- [26] 間宮信義, 月刊アスキー, アスキー出版, **3**(10), 30-36, 1979.
- [27] シャープ(株), Personal Computer MZ-80 B 用 FDOS SB-7020, 1981.