

気球による減速装置の実験

籾田元紀・秋葉 鐐二郎・西村 純
塚本茂樹・富田秀穂・秋山弘光
今沢茂夫・前田行雄・林 紀幸

1. はじめに

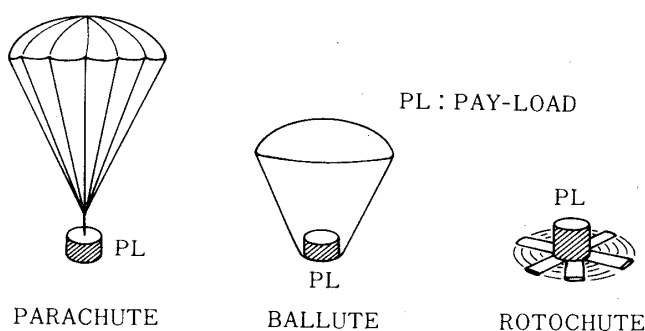
近年観測ロケットの搭載機器回収に対する要望が高まってきつつあり、工学側としても実用的なシステムを具体的に示すべき段階にさしかかっている。その第一歩として、単段式の観測ロケットであるS-310型の搭載機器回収に適用しうるものを開発することとなった。

回収システムは大別して二つの部分に分けられる。その一つは、高速で降下する搭載機器を緩降下させるための減速降下装置であり（S-310型では高度約70 kmでの降下速度は1.5 km/sec程度であり、これを海上面での降下速度換算で10 m/sec程度の緩降下に、ある高度以後で減速する必要がある。）、今一つは、海上回収を前提とした場合であるが、海上での浮遊装置である。

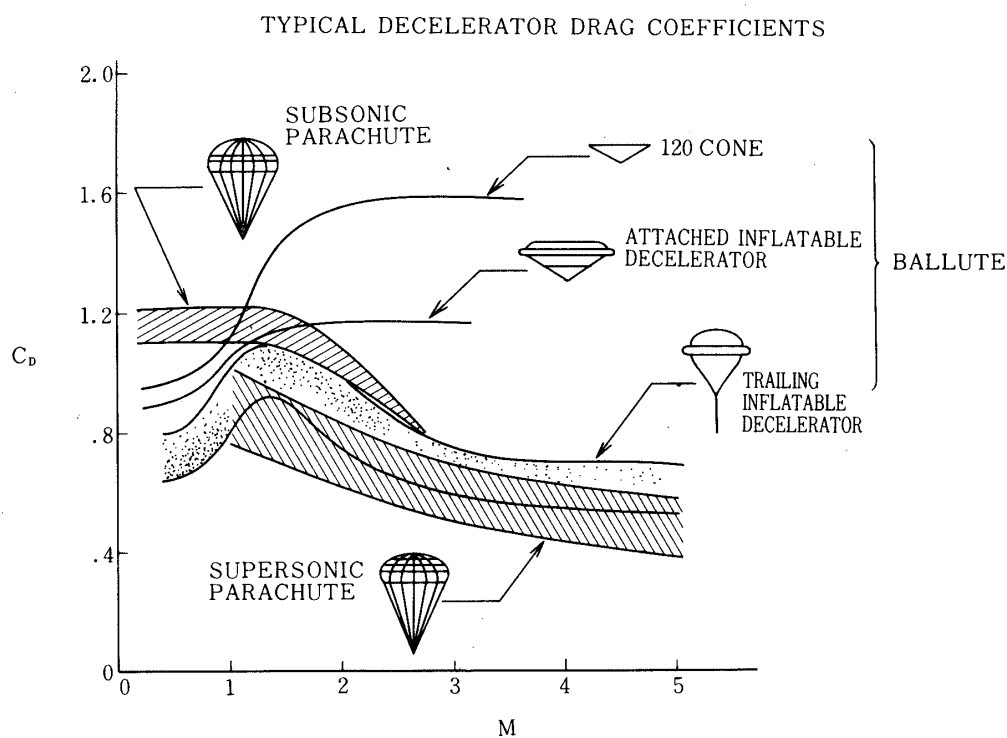
減速降下装置としてはパラシュート、バルート、ロトチュートにど種々のものを用いることが考えられるが（第1図）、そのうちで最もポピュラーなものはパラシュートを用いる方式である。パラシュート方式は簡便であるほか、第2図に示す降下時の飛しょうマッハ数Mと減速抵抗係数 C_D の関係から明らかのように、亜音速域において大きな抵抗係数をもつことが特徴的である。これに対し、バルート方式は超音速域において大きな抵抗係数をもち効果的な減速が期待されるが、バルート材の強度および重量上の制約からバルート内外の圧力差のある許容範囲内に常に調圧する必要があり、このための重量増とシステムの複雑さが欠点といえる。

パラシュート方式は、気象庁と共同で研究開発を行ったMT-135 Pロケット（最高々度約55 km）における頂点高度近傍からのゾンデの緩降下や、S-160型ロケットにおける同じく頂点高度近傍（約70 km）からの空中静電気あるいはエアロゾル観測機器の緩降下に用いられてきた。特に、S-160型では70 kmという高度度でのパラシュート開傘を確実にするために、パラシュートの縁に取付けたチーブをその内部におかれた少量の液体（メチルアルコール、水、あるいはそれらの混合液など）の蒸気圧でトラス状に膨らませてパラシュートを強制的に開傘される方式（強制開傘方式）が研究開発され、その有用性が実証された。

しかし、MT-135 P、S-160[1][2]型ロケットで用いられたものは2、5 kgという軽重量の観測機器を緩降下される減速装置であり、これをS-310型の搭載機器（全搭載重量で約40 kg）用にそのままスケールアップして用いるには無理があり、また、海上回収



第1図 種々の減速装置

第2図 パラシュートおよびバルートの抵抗係数 C_D (基準面積は最大断面積)

探索作業の観点からは着水点の予測誤差を極力避けることが望ましく、そのためには緩降下の時間ないしは距離を少なくして風によるドリフトをおさえることが得策であることなどの点を考慮して、新規にS-310型および現在開発中のS-520型(全搭載重量140kg)の搭載機器回収に利用しうるパラシュート方式の減速降下装置を開発することとなった。

S-310型に利用することを当面の目標とし、減速降下装置を試作し、その機能試験がまず昭和53年8月29日埼玉県北葛飾郡栗橋町にある建設省所轄の渡良瀬遊水池(面積33km²)において、ヘリコプタによって高度2.3kmの上空から投下して行われ、良好な結果が得られた。ついで、より高空からの投下試験として、気球によって高度約26km上空から減速降下

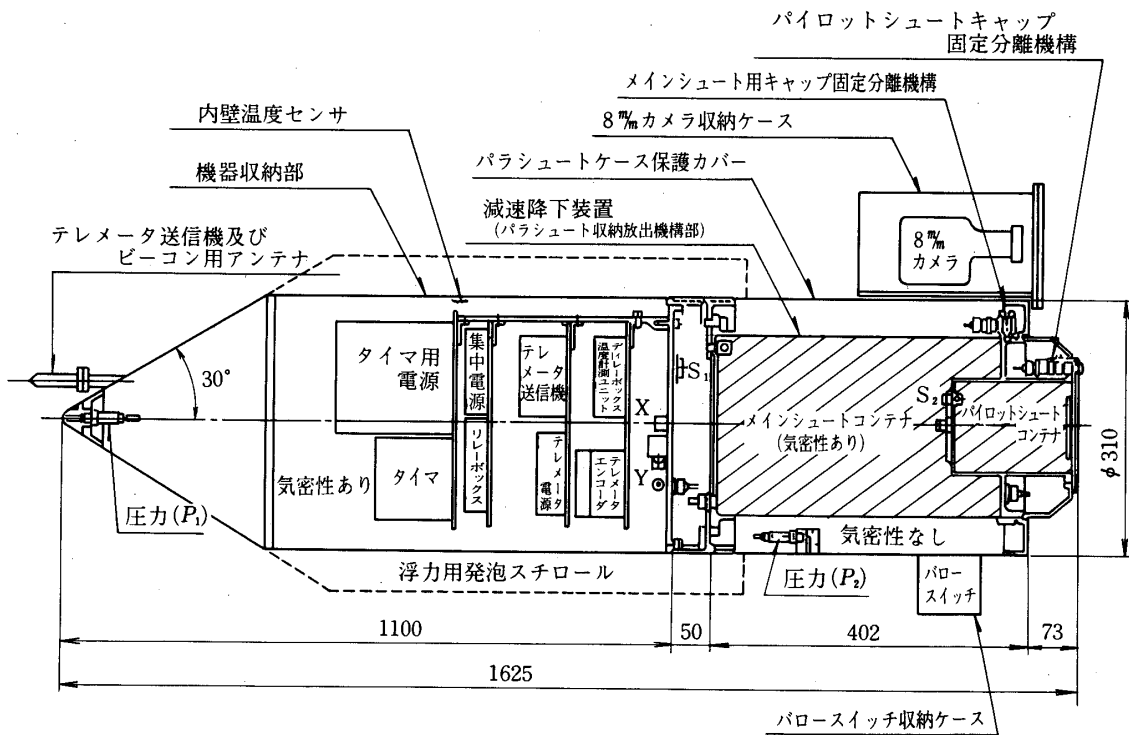
装置を投下し、その機能を確認するための実験が昭和53年9月4日三陸大気球観測所において行われた。

ここでは、気球からの投下実験についてその概要を述べる。なお、回収システムの今一つの柱である浮遊装置については現在炭酸ガスを利用した浮遊ブイを試作中であり、ロケット搭載用のものを供しうるめどもつきつつある段階にきていることを付記しておく。

2. 減速降下装置

新規に開発された減速降下装置は、高速度で降下してくる搭載機器（減速降下装置自体も含める）の姿勢を所定の向きにするとともに若干の減速を行うための傘体直径0.9mのベイン型のパイロットシュートと本格的な緩降下を行うための傘体直径5.5mの楕円型のメインシュートを持ち、これらのパラシュートは最初、すなわち作動前は第3図の斜線部で示すパイロットシュート・コンテナ（容積約1.5ℓ）、メインシュート・コンテナ（容積約12ℓ）にそれぞれ1気圧に気密を保った状態で収納されている。

減速降下装置の作動順序はつぎの通りである（第6図参照）。すなわち、搭載機器がある高度まで降下すると、まずパイロットシュート・コンテナの蓋（重量約1kg）が20 m/sec程度の相対速度で切離される。この蓋はパイロットシュートの天がいに結び付けられているため、蓋と一緒にパイロットシュートがコンテナから放出される。つぎに、パイロットシュートが開傘し十分にその役割を材すだけの時間経過ののち、メインシュート・コンテナの蓋（重量約1.3kgでパイロットシュート・コンテナの一部も含んでいる。）を切離し、パイロ



第3図 気球による開傘実験装置概観図

ットシュートに働く空気力でメインシュートをコンテナから放出してこれを開傘させる。ただし、メインシュートの傘体部は最初風呂敷仕掛の収納袋に包み込まれているが、パイロットシュートによってメインシュートの傘体部が、その長索が張る位置にまで引き出される時点で収納袋から外される仕組みとなっている。

この減速降下装置は、S-310型で利用することを想定しており、その場合の装置の作動開始（パイロットシュート放出）高度はつぎのような考えで決められている。すなわち、内之浦の宇宙空間観測所（KSC）とロケット間のテレメトリが確保されている間に、パイロットシュート放出の項目が実行され、かつその作動確認がKSCで行われうるような高度として、パイロットシュート放出高度は約13 kmにされている。なお、その項目の実行命令はバロースイッチ、タイマ、あるいはKSCからのコマンド電波によって与えられる。メインシュート放出の項目はパイロットシュート放出後1分前後経過したのち高度7～10 kmでタイマからの信号を受けて実行される。

3. 気球による開傘実験計画

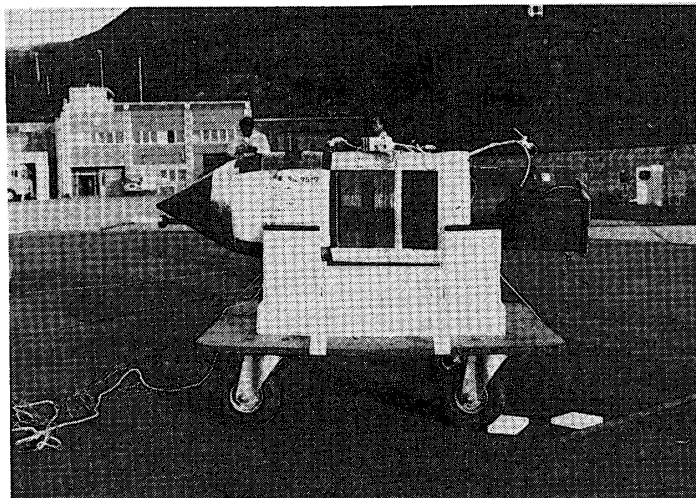
2節で述べた減速降下装置の機能試験をできるだけS-310型の場合に近い条件で行なうため、大気球を利用した減速降下装置の投下、開傘実験が計画された。

3.1 形状および諸元

実験装置の寸法、形状は大略S-310型搭載機器部に模したものとした（第3図）。内部には、機能試験の主体である減速降下装置のほか、その機能の作動状況を確認するための計測器、そのデータを地上に送信するためのテレメータ・エンコーダおよび送信機、あるいは各項目を設定通りに実行するためのタイマ、さらにはこれらの機器に必要な電源などが搭載されている。

計画当初、回収は行わない方針であったため、開傘実験装置に浮遊装置を特別に用意することは考えていなかったが、その後の検討の結果、チャーター船（漁船）による回収作業の実施が比較的簡単に行えることが分かったため、急きょ計画を変更し回収も実施可能なものにした。実験装置の自重は着水時で56.3 kg（後述の発泡スチロール分を加えると60 kg）であり、これに打勝つだけの浮力として、円錐・円筒ケースのうち、各機器が収納されている側を気密になるよう工夫することによって、完全水没状態で約66 kgの浮力が確保されるようにした。一応浮力が自重を上まわっているが、着水後もメインシュートは実験装置につながれたままであり、これが‘シーアンカー’の効果を及ぼすことが懸念される。そこで、これを償うための処置として、第3図において点線で示すように、円筒部外壁に外側直径410 mm^φ、長さ900 mmの円筒状の発泡スチロールを取付け、完全水没状態で約46 kgの浮力が追加されるようにした。したがって、全浮力は完全水没状態で約112 kgが見込まれた。

回収を実施することにしたため、パラシュートの開傘状況を撮る8 m/mカメラも搭載されることになった。カメラはカメラボックス内に入れられ、10 mmの亚克力板の蓋を通して開傘状況が撮影されるようにした。また、カメラボックスは、内部への漏水がないよう十分な防水処置がとられた。開傘実験装置の写真を第4図に示す。

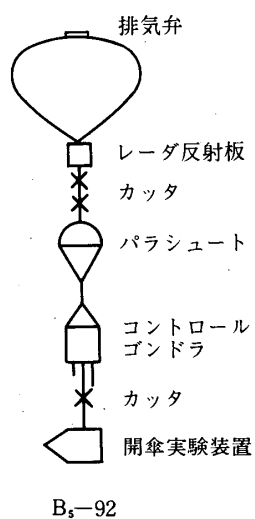


第4図 開傘実験装置の写真(ランチャ・エリアにおいて動作チェック中)

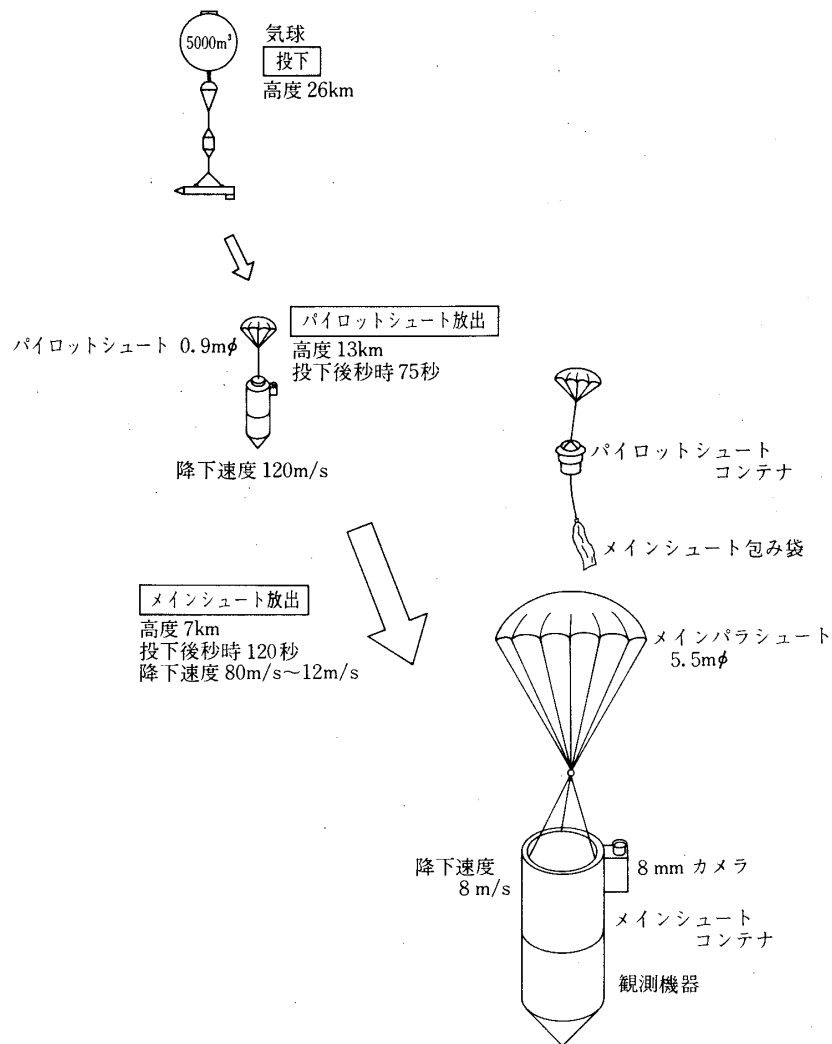
3.2 実験方法

B₅-92号機を用い、第5図に示すような構成で(ランチング時の全重量は約141 kg)、開傘実験装置をその機軸を水平にして吊し、水平飛行高度(約26 km)までもって行く。気球が水平飛行に入ったのち(30分程度後)、気球コントロール用コマンドを利用して開傘実験装置内に搭載されているタイマを起動させ、タイマ信号でカッターを作動させて吊下げひもを切り、開傘実験装置を投下する。

投下後は、第6図に示すような順序に、マイマ信号を受けて各項目が実行される。すなわ



第5図 B₅-92号機全体構成図

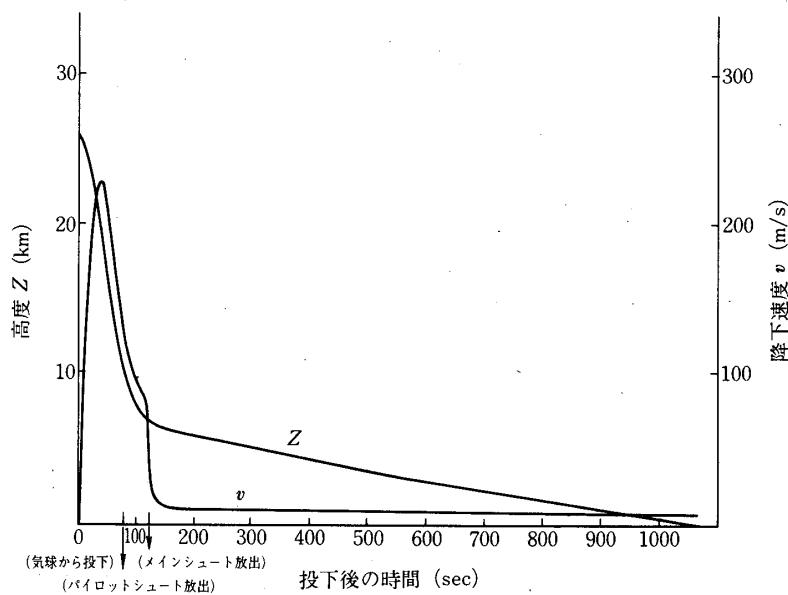


第6図 気球による開傘実験装置の実験概念図

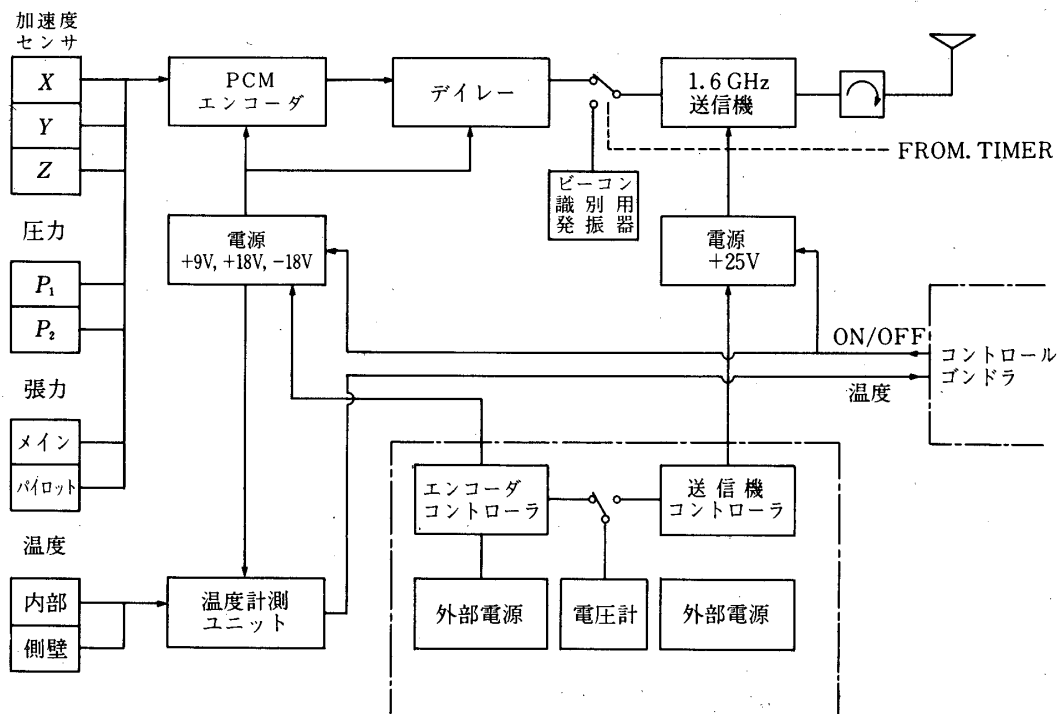
ち、投下後 75 秒でまずパイロットシュートが放出される（このときの高度は約 13 km）。万一タイマ信号でこの項目が実行されない場合、あるいは降下速度が大きすぎて予定高度より下りすぎる場合のバックアップとして、高度 11 km で作動するように設計されたバロースイッチからもこの項目を実行させる信号が送られるようになっている。ついで、パイロットシュート放出の 45 秒後に（高度約 7 km で）メインシュートが放出され、開傘実験装置が緩降下に入る。投下後の高度および速度の時間履歴の予想曲線を第 7 図に示す。

3.3 計測、通信、タイマ

開傘実験装置投下後の姿勢の様子や各パラシュート放出時の状況を観測するため、つぎのような項目の計測機器が搭載された。すなわち、各パラシュート放出開傘時の衝撃を測定するための加速度計 X, Y, Z（X は機軸方向、Y は横軸のうちカメラボックスを含む方向、



第7図 気球投下後の開傘実験装置の高度および速度の時間履歴予想曲線



第8図 搭載テレメータ系ブロック図

Zは前二軸に直交した横軸方向の加速度をそれぞれ検出する.)、周囲の気流の状態を調べるための圧力計 P_1 , P_2 (P_1 は円錐先端部の圧力を, P_2 は円筒ケース内部の圧力「外気の静圧」をそれぞれ測定する.)、各パラシュートにかかる張力を間接的に測定するためにパラシュート・コンテナ底部に貼られた歪計 S_1 , S_2 (S_1 , S_2 はそれぞれメインシュート張力, パイロットシュート張力に対応する.)、搭載機器収納部内および同収納ケース内壁の温度を測定するためのセンサ T_1 , T_2 などである。ただし、温度計測では開傘実験装置にあるのはセンサだけで、アンプなどの他の機器はゴンドラ側に搭載された。更に、パラシュート放出開傘時の状況を撮影するために8 m/mカメラボックスに入れられて、実験装置外壁に取付けられた。このカメラは投下後20秒で始動し、以後200秒間撮影可能である。

データ処理・伝送方式については、メインシュート開傘時に予想されるような大きな衝撃的加速度(40 G程度)をうけても、その履歴を安定に処理し地上に送りうるものとして、つぎのような方式が用いられた(第8図)。すなわち、まず各センサにより検出された信号はPCMエンコードで時分割多重化され、PCM信号に変換される(サンプルレート32 Samples/sec)。ついで、衝撃の影響を回避するため、デレイを通してPCM信号に5秒の遅延が与えられたのち、これを変調信号とした1.6 GHzの電波が送信機から出力0.5 Wで送信される。なお、実験装置投下後約30分から、この送信機の変調信号はPCM信号から順次トーンの変る識別し易い捜索用のビーコン信号に切替えられる。

実験の各項目実行の信号を与えるタイマとしては最大可能項目数6、最大決定可能秒時4095秒のものが用いられ、第1表に示すようなタイムシーケンスで各項目が実行された。タイマのスタートは地上からゴンドラにタイマスタートのコマンドを送信した時点である。

第1表 タイムシーケンス

設定秒時	項目	備考
0 sec	タイマ・スタート	ゴンドラからの信号でスタート
10	カッター作動	開傘実験装置投下
30	8 m/m カメラ始動	以後約200秒間撮影
85	パイロットシュート放出	バロースイッチでも実行される
130	メインシュート放出	
1800	送信切替	PCMからビーコンへ

また、パイロットシュート放出の項目の実行をより確実にするため、降下速度が予定より大きく、タイマ設定秒時までの高度が低くなりすぎる恐れのあるときはタイマのバックアップとして高度12 kmで作動するように設定されたバロースイッチが用意されており、バロースイッチの信号からでもパイロットシュート放出以後の項目がそのままの時間間隔で実行可能である。

上述の各機器やこれに必要な電源などの配置は第3図に示される通りである。

4. 実験結果

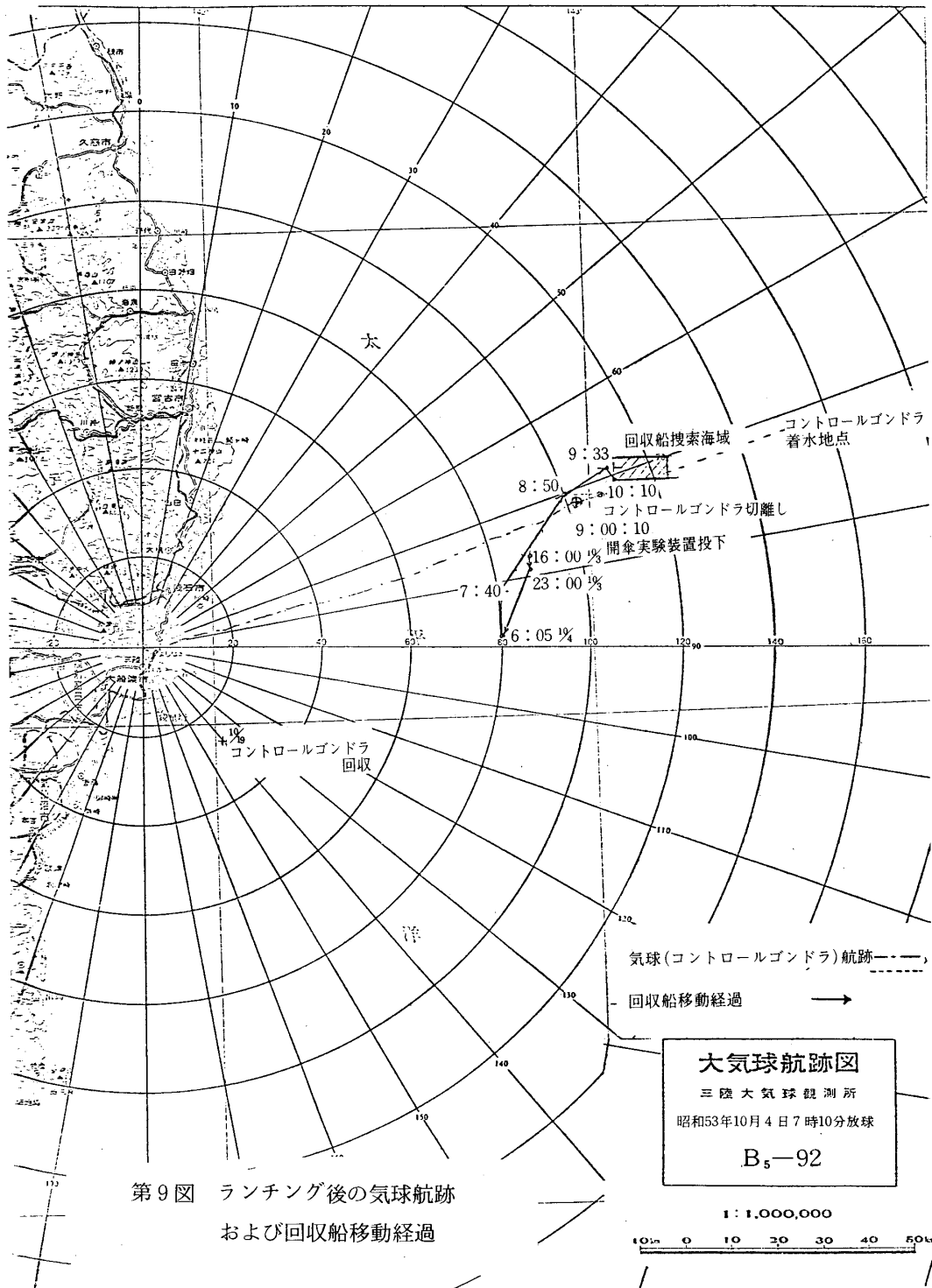
三陸大気球観測所における大気球からの開傘実験装置の投下実験は、昭和53年10月4日行われた。午前7時10分、B₅-92号機は放球され、毎分270mの割合で上昇し、8時23分観測所の東北東約90km、高度25.5kmで水平浮遊の状態に入った。以後同機は東北東に進行をつづけ（水平浮遊高度における風速は30km/hrであった。）、9時00分受信点からみて方位72°、水平距離102kmの上空25.8kmの高度で、地上からゴンドラへ送られたコマンドによって開傘実験装置のタイマが作動させられた。そして、その10秒後に装置が投下された。気球はその後上昇し、高度30kmに達し水平浮遊状態に入ったが、9時21分コマンドによりコントロールゴンドラが気球から切離され、観測所東北東約160kmの海上パラシュートで降上させられた。第9図にランニング後の気球の航跡が示されている。

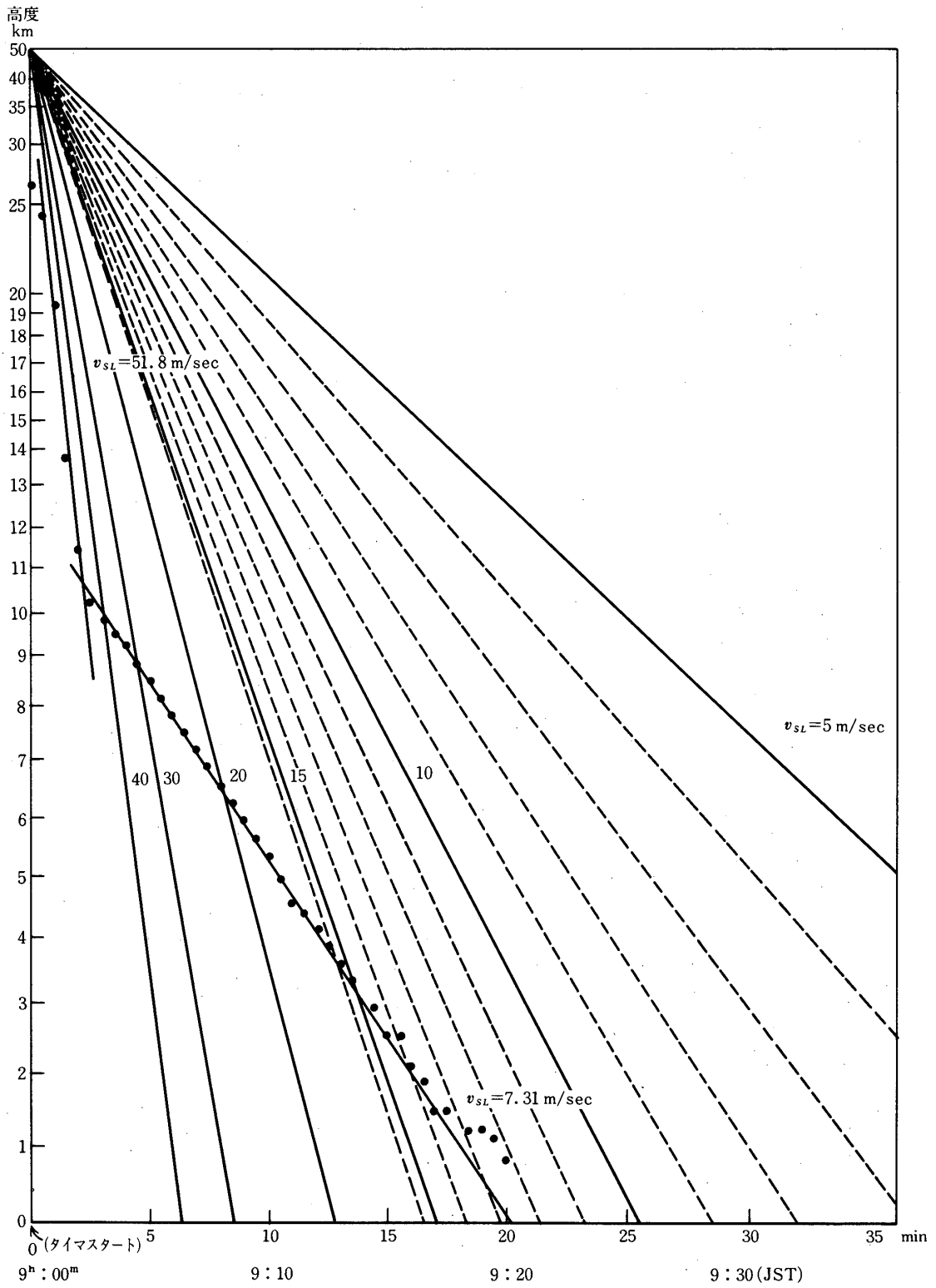
開傘実験装置投下後、観測所受信点からは高度約1kmまで、また、首崎に派遣された受信車からは着水（9時20分すぎ）まで、それぞれテレメータ電波が正常に受信された。同時に受信点からみた上下角、方位角および直距離のデータも記録された。着水点は東経143°04′、北緯39°29′の近くと推定された。

投下後の高度の時間履歴の結果を第10図に示す。これは風によるドリフトの効果を補正したものである。図では、9時01分25秒のパイロットシュート放出前後で降下速度に顕著な変化は認められない。これはつぎのような理由によるものと推測される。すなわち、気球から投下後、実験装置は揺動を伴ないながらもほとんど横向きのまま、投下直後の約3.0秒間を除いて、平衡速度で降下したものである（これは加速度およびAGCレベルデータからも裏づけられる）。この状態での有効面積 $C_D S$ は、基準面積 $S=0.55\text{ m}^2$ 、 S を基準とした抵抗係数 $C_D=0.5\sim 0.7$ として、 $C_D S\approx 0.3\sim 0.4\text{ m}^2$ 程度である。そして、装置の重量 W は65Kgであるから地上換算での平衡速度 v_{SL} は $v_{SL}=[2W/\rho_{SL}C_D S]^{1/2}$ （ ρ_{SL} :地上での空気密度）より50~60m/sec程度である。このような状況下で装置が降下しているとき、完全開傘時の有効面積 $C_D S=0.35\text{ m}^2$ 程度のパイロットシュートを放出しても、パイロットシュートが装置風下に入ってしまうようなことは十分に起りうることであり、このような場合パラシュートによる減速効果の増分は、あまり期待できないが、この実験の場合もまさにこのような状況であったものと推測される。

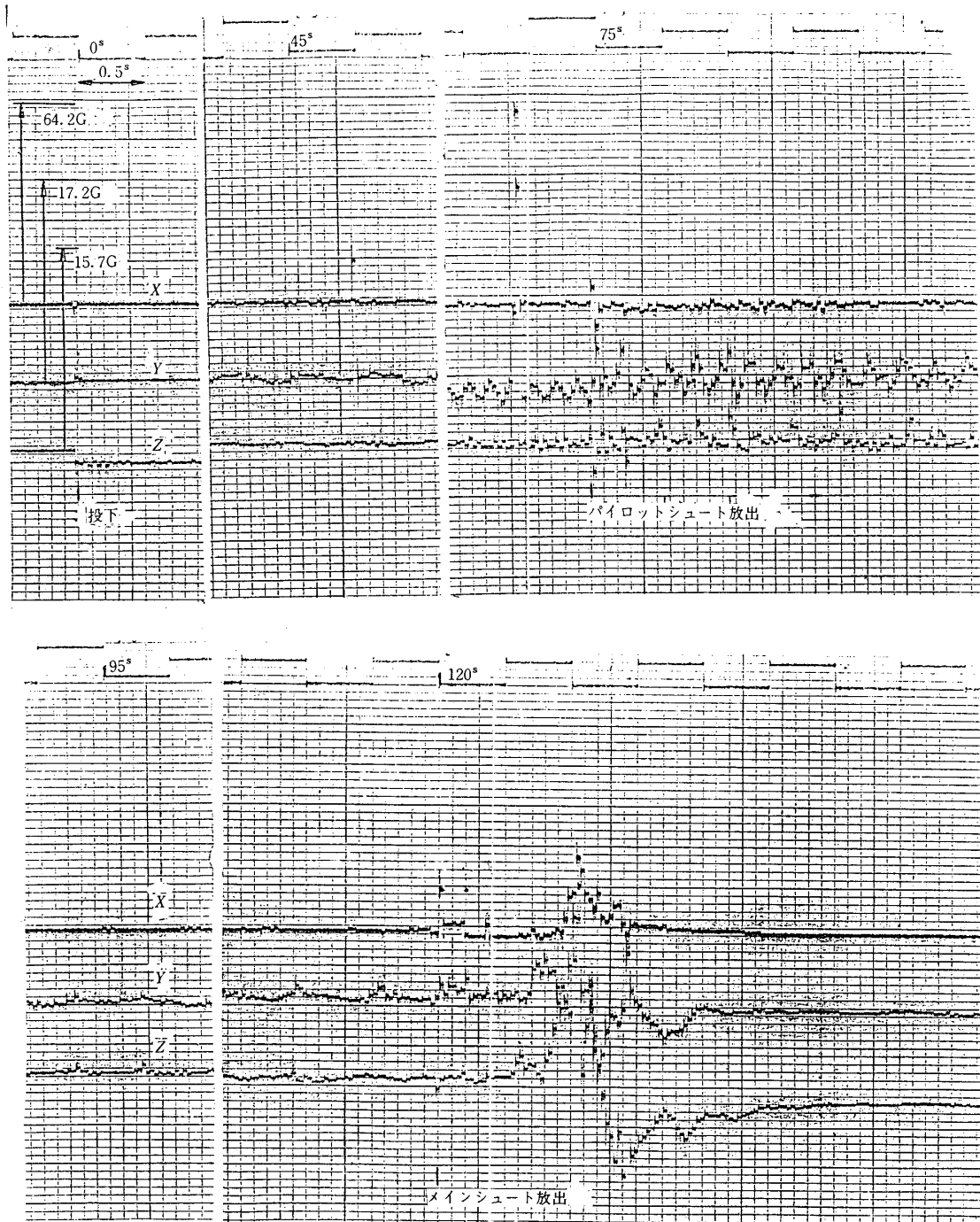
第10図において、9時02分10秒のメインシュート放出前後では明らかに大きな減速が認められる。メインシュート放出後のデータより求めた v_{SL} は $v_{SL}=7.3\text{ m/sec}$ であるのに対し、メインシュートの有効面積 $C_D S=15\text{ m}^2$ 、 $W=60\text{ kg}$ として求めた v_{SL} の予想値は $v_{SL}=8.0\text{ m/sec}$ であり、従って、メインシュートは予想通り正常に機能したものと考えられる。なお、投下からメインシュート放出前までのデータから求めた平均的な v_{SL} は $v_{SL}=51.8\text{ m/sec}$ となっているが、これは有効面積 $C_D S=0.39\text{ m}^2$ に対応した値であり、実験装置が横のまま降下した場合と大略一致している。

パラシュート放出時の衝撃はX（機軸）、Y、Z（互に直交した横軸で、特にZは投下直前までの実験装置の吊下げ方向）3軸の加速度計で測定された（第11図）。パイロットシュー





第10図 投下後の高度の時間履歴 ・観測値(ただし風によるドリフトの影響を補正したもの)
 v_{sl} : 地上換算の平衡速度



第11図 加速度計 X, Y, Z の結果

ト放出時の加速度は最大値でX方向1.8 G, Y方向1.2 G, Z方向1.1 Gであり, 特に大きな加速度は認められなかった. これは, パイロットシュート放出前後で有効面積 $C_D S$ 値に大して変化の無かったことを意味しており, そしてこのことから実験装置は気球から投下後ほとんど横のまま降下し, パイロットシュート放出後も同パラシュートによる減速の増分はなかったことを裏付けている. ただし, 投下後40秒頃から始まったZ軸まわりの揺動はパイロットシュート放出直前には, Y方向加速度で周期0.16秒, 振幅2 G程度にも達したが, 放出後はメインシュートによってこれが徐々に収まり, メインシュート放出直前頃には周期0.5秒振幅0.5 G程度となった. メインシュート放出時の加速度は最大値でX方向25.7 G, Y方向2.9 Gであった. 開傘の衝撃は2秒以内で静まっており, また, 開傘時間は約0.1秒であった. これらの結果はメインシュート放出開傘が正常に機能したことを示している. なお, 1.6 GHz 送信機のアンテナパターンは機軸(X軸)方向に大きな切れこみがあり, このためAGCレベル変動から姿勢の様子がある程度推定できる. 取得データから推定される姿勢の状態は, 加速度計の結果が示すものと定性的にもよく一致している.

歪計 S_1, S_2 を用いた開傘時の張力測定の結果についていえば, パイロットシュート放出開傘時の張力は微少でありはっきりとは断定できないが, 高々60 kg程度であったと考えられる. メインシュート放出開傘時の張力は, オーバー・スケールのため歪計が途中で断線し確定はできないが, 途中までのデータから少なくとも1 ton以上であったと推定される. なお, 機軸方向の加速度データより算出したメインシュート放出開傘時の張力の最大値は1.6 tonである.

圧力測定の結果についていえば, 投下後50秒頃からメインシュート放出まで, 先端の圧力 P_1 にY方向の加速度データと対応した変動が認められる. 変動圧(特にパイロットシュート放出前後における変動圧)は動圧程度(0.02 kg/cm^2)になっており, これは横向きに落下している装置に更にかかなりの揺動が加わったことを示している. これに対し, メインシュート放出後に P_1 はほとんど変動がなくなっている. また, 円筒の内部圧 P_2 は常に静圧を検出しており, これには P_1 に匹敵するような変動は認められない. ランチングから開傘実験装置投下まで, 搭載機器内部および円筒ケース内壁温度 T_1, T_2 が測定されたが, その間の変化は $T_1: 22.5^\circ\text{C} \rightarrow 13.5^\circ\text{C}$, $T_2: 23.0^\circ\text{C} \rightarrow 9.0^\circ\text{C}$ であり, 機器を作動させるのに支障はなかった.

最後に, 不首尾に終わったが回収について簡単にふれておく. 開傘実験装置回収のため釜石漁連の漁船一船(速度10ノット弱の船)をチャーターし, 実験前日の9月3日夕刻より着水予定海域に待機を依頼した. 同船には, 実験装置から発信される1.6 GHzの電波を方向探知する受信機を宇宙研より貸与し, これを用いた搜索方を依頼した. 9月3日16時00分以後新しいデータが入り次第適宜最新の目標位置(着水予想点)を予測しこれを回収船に指示した. 回収船は三陸観測所, 釜石漁業無線局を経て送られる指示に従い第9図に示すような経路を辿った. 9月4日8時50分の時点で回収船は気球に直視可能な距離まで接近したが, 9時00分10秒の投下時までに気球が時速30 km/hrで東北東に流されたため, 回収船と気球の距離は広がった. このため投下後緩降下する装置を直視することもできず, また, 受信機取扱い不慣れのため1.6 GHzの電波も受信できないまま, 開傘実験装置は9時20分す

ぎに東経 $143^{\circ}04'$ 、北緯 $39^{\circ}29'$ の近くに着水した。そこで、着水点近くの海流（1ノット程度）を考慮して、第9図中の斜線で示した海域を搜索するよう重ねて指示した。同海域の搜索は日没まで続けられたが、ビーコン電波の受信もまた装置の回収もできなかった。ビーコン発信機の電源容量は10時間分しかないこともあって、以後の搜索は打切られ偶然に漁船などにより回収されることに望みを託したが、現在になるまで回収されていない。なお、コントロールゴンドラは昭和53年10月19日第9回に示す位置で漁船により回収されている。

1979年6月26日 新設部(工学)

参 考 文 献

- [1] 雛田元紀, 寺田守男他: 気球によるパラシュートの強制開傘実験, 宇宙航空研究所報告 9, (B) (昭和48年3月), P.P. 223 ~ 230.
- [2] 雛田元紀: 液体蒸気圧を利用したパラシュートの強制開傘実験, 宇宙航空研究所報告 8, 2 (A) (昭和47年4月), P.P. 225 ~ 247.
- [3] 塚本茂樹, 雛田元紀: 減速装置の開発 i) 全体計画, 宇宙航行の力学シンポジウム予稿集 (昭和53年11月), P.P. 141 ~ 144.
- [4] 富田秀穂, 林 友直他: 減速装置の開発 ii) 計測系および通信係, 宇宙航行の力学シンポジウム予稿集 (昭和53年11月), P.P. 145 ~ 148.