

# 大気球による無重力実験

並木道義・太田茂雄・秋山弘光  
山上隆正・粕 豊・西村 純

(1982年6月22日受理)

## Microgravity Experiments by Balloons

By

Michiyoshi NAMIKI, Shigeo OHTA, Hiromitsu AKIYAMA,  
Takamasa YAMAGAMI, Yutaka KOMA and Jun NISHIMURA

**Abstract:** A microgravity experiment system using stratospheric balloon is developed. A free-fall body is designed of a shape of a cylinder with a nose cone and tails. The cylinder contains a parachute, accelerometers, attitude sensors, a telemetry transmitter, an electric timer, an experimental room, and a floating mechanism for recovery.

In the flight test in 1981, a body with a length of 1.8 m, a diameter of 0.31 m and a weight of 90 kg was released from a balloon at the altitude of 29 km. The observed accelerations were almost as expected and a gravity less than  $2 \times 10^{-3} G$  for a period of 10 seconds or more was realized.

### 1. はじめに

ロケット、衛星又はシャトルによる無重力実験では、地上において予備実験を行なうことが有用であることは論をまたない。しかし、20 m 程度の高さの真空槽を用いても地上では無重力状態を数秒程度実現するにすぎない。

地上より高度 30 km 程度に昇ると、空気密度が地上のおよそ 1/100 となり、落下する物体に対する空気抵抗が少なくなる。したがってこの高度から物体を落下させることによっ

て無重力に近い状態を実現することが可能であると考えられる [1]。たとえば、重量 100 kg, 断面積  $0.1 \text{ m}^2$ , 抵抗係数 0.2 程度の物体をこの高さから落下させると、約 10 秒間にわたって  $10^{-3} \text{ G}$  以下、20 秒間にわたって  $4 \times 10^{-3} \text{ G}$  以下の無重力状態を得られるものと推定される。

そこで昭和 55 年と昭和 56 年の 2 度にわたって気球に無重力実験装置を搭載し、高高度からの自由落下によって無重力状態をシミュレートすることを試みた。

昭和 55 年 9 月 30 日に予備実験として重量 37 kg, 全長 1 m, 直径 0.235 m $\phi$  のロケット形状試作機を B 5-103 に搭載し、高度 25 km より投下した。

昭和 56 年 6 月 10 日には、搭載機器の各部機能試験を目的として、重量 90 kg, 全長 1.8 m, 直径 0.31 m $\phi$  の実用試験 1 号機を B 15-47 に搭載し、高度 29 km より投下した。これは昭和 55 年度のものと同様の形状をもっているものである。

ここでは実用試験を目指した昭和 56 年度の例を中心に、その結果について報告する。

## 2. 無重力実験装置の構造および構成

気球実験に先立って実験体の空力特性を調べるために、予備実験と同じ形状、大きさ 3/4 のモデルについて風洞実験を行なった。結果は図-1 に示したように  $C_D$  は 0.26 程度、空力中心は先端より 65% の所にあることが明らかとなった。

昭和 55 年の予備実験の装置外観を写-1 に、また昭和 56 年の試験 1 号機の外観を写-2 に示し、構造と機器の配置を図-2 に示した。

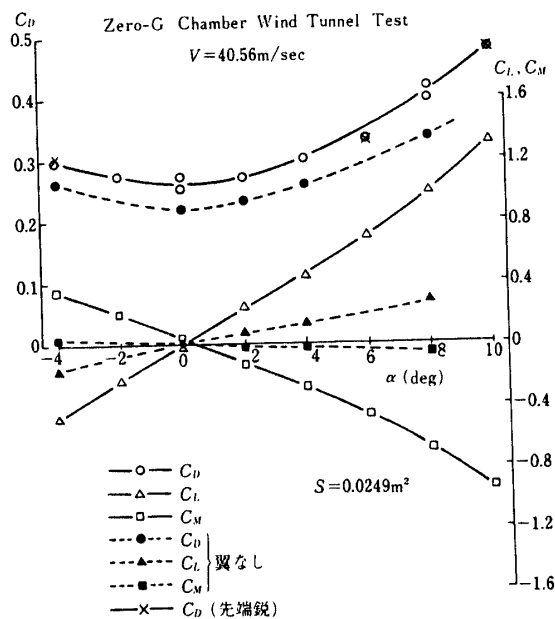
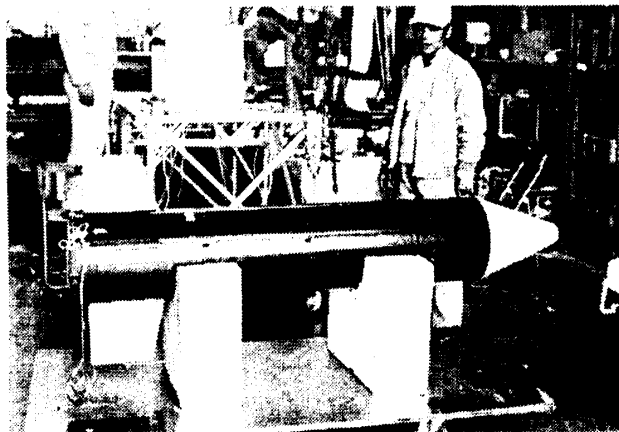


図-1 風洞実験結果



写-1 昭和55年度の試作実験体



写-2 昭和56年度の実用試験1号機

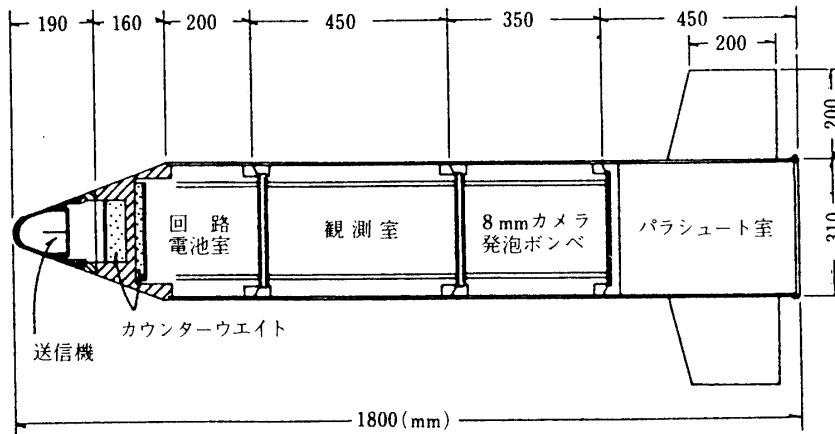


図-2 実験体の構造および機器の配置

## 2-1 構造

実用試験1号機のノーズ・コーンの先端190 mmの部分は、アルミ基部に厚さ5 mmのFRPを組み合せ、1.6 GHzの送信機を組み込んである。本体外筒の部分は厚さ5 mmの耐蝕アルミを使用し、先端部40 R、半頂角20度の円錐体と、直径310 mm、長さ1.450 mmの円柱を組み合せたロケット形状である。

内部構造は、厚さ5 mm、直径250 mmのアルミ基板に10 mmφのステンレス・ロッドを組み合せて外筒のフランジ部に固定し、海上に降下することを予想して気密構造となっている。

## 2-2 構成

機器の構成は前段より送信機部、各種回路および電源部、観測部、8 mmカメラおよび発泡ボンベ収納部、パラシュート・コンテナ部から構成されている。

装置全重量90 kg、全長1800 mm、直径310 mmφである。観測部の有効使用容積は長さ420 mm、直径250 mmφの円筒内が使用可能である。

この装置の特長は、各段が分離され、各々独立に機器等を組み込み調整を行ない、最後に各段を結合する構造となっている。

## 2-3 機器部

機器部はタイマー、加速度計、方位および垂直軸地磁気、気圧計、各アンプ、7チャンネル副搬送波、電源等よりなっている。

主要計測項目は、加速度3チャンネル(±0.025 G, ±1.25 G, ±10 G)と方位地磁気、垂直地磁気の2つの姿勢角および気圧計と6項目の各部温度測定(±0.025 Gと自動切換)とタイマー応答である。

実用試験1号機の重量配分を表-1に示した。また空力中心65%に対して重心位置を先端より44%の位置とした。

搭載した無重力測定用の加速度計の仕様を表-2に示す。

表-1 実用試験 1 号機の重量配分

○ノーズコーン先端部, 送信機	2.26 kg
○回路, 電池室筐体	15.0 "
○カウンターウェイト	10.7 "
○電池, 回路部	8.98 "
○観測室筐体	8.9 "
○観測機器	3.35 "
○発泡ボンベ室筐体	7.6 "
○8 mm カメラ, 発泡ボンベ	5.78 "
○パラシュート室筐体	13.3 "
○メインパラシュート(収納袋付)	9.94 "
○パイロットシュート	0.68 "
○ライザー	1.0 "
○底部蓋, 離脱バンド, その他	2.51 "
全重量	90.0 "

表-2 無重力測定用加速度計の仕様

製造	日本航空電子工業 K.K
型式	L 136 型サーボ加速度計
測定範囲(F.S.)	$\pm 2 G$
感度	$2.0 V/G \pm 5 \%$
周波数応答	DC~100 Hz $\pm 0.5 dB$
直線性	$\pm 0.15 \% F.S.$
分解能(D.C)	$1 \times 10^{-4} G$ 以上

#### 2-4 パラシュート・コンテナ開蓋機構

図-3 (a)に昭和 55 年度, (b)に昭和 56 年度の開蓋機構を示した。55 年度の開蓋機構 (a)は実験体を吊り下げるナイロン・ロープをストッパー, カッター, パラシュート・コンテナ内のアルミパイプを通し, 本体基部に固定した。しかし, 55 年度実験では開蓋カッターが片方しか作動せず, パラシュートを放出しないまま海上へ自由落下した。このため, より確実性をますため, 56 年度は新方式の開蓋機構を考案した(b)。この方式は厚さ 1 mm, 幅 10 mm のバネ鋼 2 本と一体整形のステンレス駒を組み合わせ, バネ鋼の片側終端には長さ 20 cm 程度のナイロン・ベルトをカッターを通して取り付け, もう一方の終端にはクイック・ラッチと呼ばれるワンタッチで取り付け, 取りはずしの出来る締めつけ部を備えている。

この機構は地上試験, 本実験共に作動は良好であった。

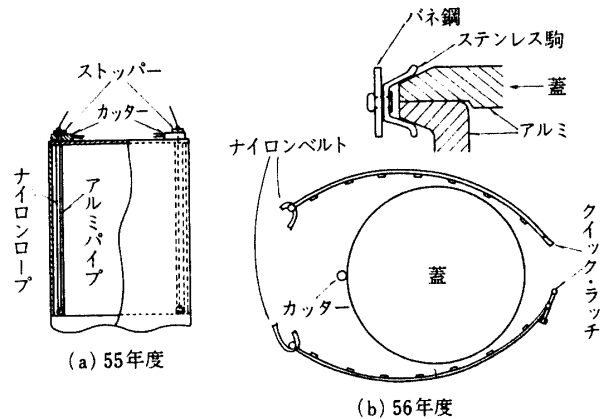


図-3 蓋開け機構

### 2-5 減速機構

パラシュートとして、パイロット・シュートは自動飛出しパネを持つ直径 1.05 mφ、有効面積 ( $C_D S$ ) は  $0.48 \text{ m}^2$  の MA-1 型を使用し、メイン・シュートは直径 6.12 mφ、有効面積 ( $C_D S$ ) は  $16 \text{ m}^2$  のリング・スロット型を使用した。

開傘衝撃を小さくするために、1 段リーフィング [2] 有効面積 ( $C_D S$ ) は  $4 \text{ m}^2$  を設定し、吊索 20 本のものを用いた。吊索は 1 ケ所にまとめ、着水後にシー・アンカーとならないように分離機構を取り付け、さらに 3 本のライザーに分け本体と接続している。メイン・シュートには開傘性能を良くするためにセンターコードを備え、スリーブ収納方式を採用した。メイン・シュート開傘時にはパイロット・シュートはスリーブ収納バッグごと切り離れていく。メイン・シュートとパイロット・シュートは 75 kg~80 kg の仮縛によって接続している。

### 2-6 浮遊およびブイ送信用フロート

パラシュート収納底部にはパラシュート切り離し用の海水電池、浮遊用バッグを搭載した。

このバッグの内容積は 60 l で内部に 1.6 GHz の送信アンテナを組み込んでいる。

一般に使用されている炭酸ガスフロートでは、バッグの気密、強度等が問題となる。そこで実験体がパラシュートで降下中に 2 液を混合させ、化学反応により固体となる硬質ウレタンフォームをフロートバッグ内で形成した。降下中にフロートを形成するため発泡剤レタンフォームをフロートバッグ内で形成した。降下中にフロートを形成するため発泡剤吹き出しから形成終了迄、反応硬化時間 5 分の発泡剤を選定した。フロートバッグには表面防水加工を施した布地を使用した。

実験では 4 本のエアゾール缶のうち 1 本が不作動となり、フロートバッグの完全形成は行なえなかった。

### 3. 実験方法

図-4 に実験装置を組み込んだゴンドラの構造を示す。基本構造をL型のアルミアングルで組み、実験装置は、頭部を下にナイロン・ザイル (9 mm $\phi$ ) で取り付けられている。放球時の振れ止め防止には、頭部をナイロン・ロープ (8 mm $\phi$ ) によってゴンドラに固定した。

計画した実験は次の通りである。

実験装置を搭載した気球は高度 29 km まで上昇し、水平浮遊に入ったのち、まず地上からの指令電波により実験装置の電源を投入し、電波の送信を開始する。ついで指令電波により頭部固定ロープを切り離す。垂直軸地磁気より実験装置の振動が止ったのを確認し、指令電波により図-5 に示すように以後予定される各項目を実行するためにタイマーを起動させ、タイマー信号によりカッターを作動させて実験装置を投下する。

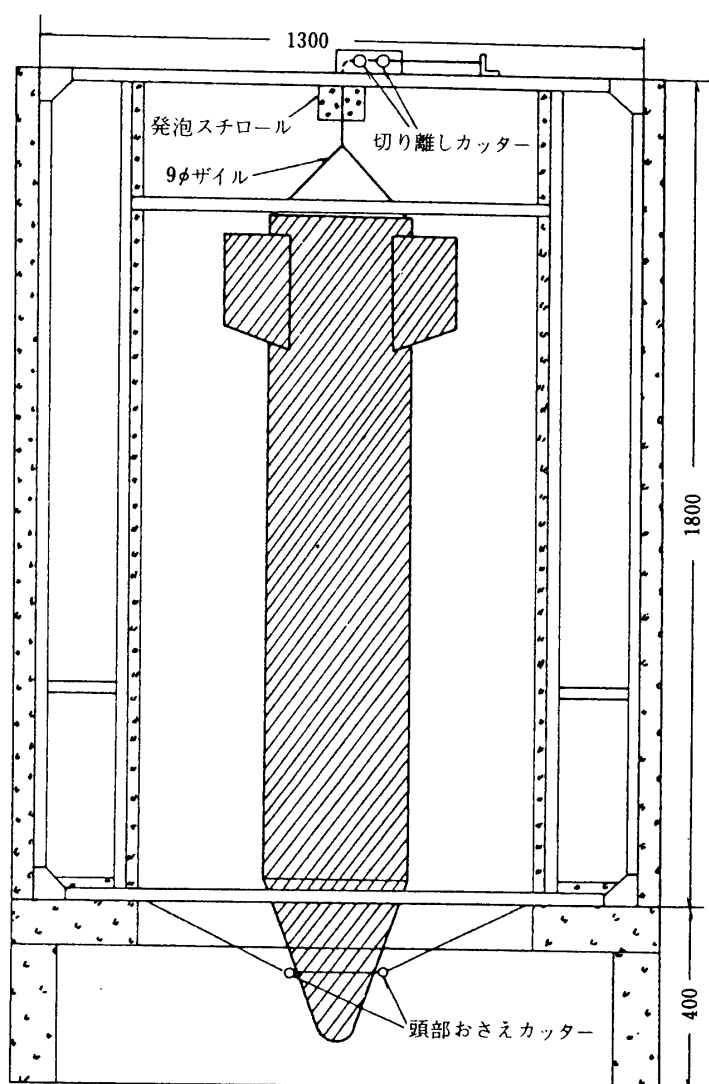


図-4 ゴンドラに取り付けた実験体

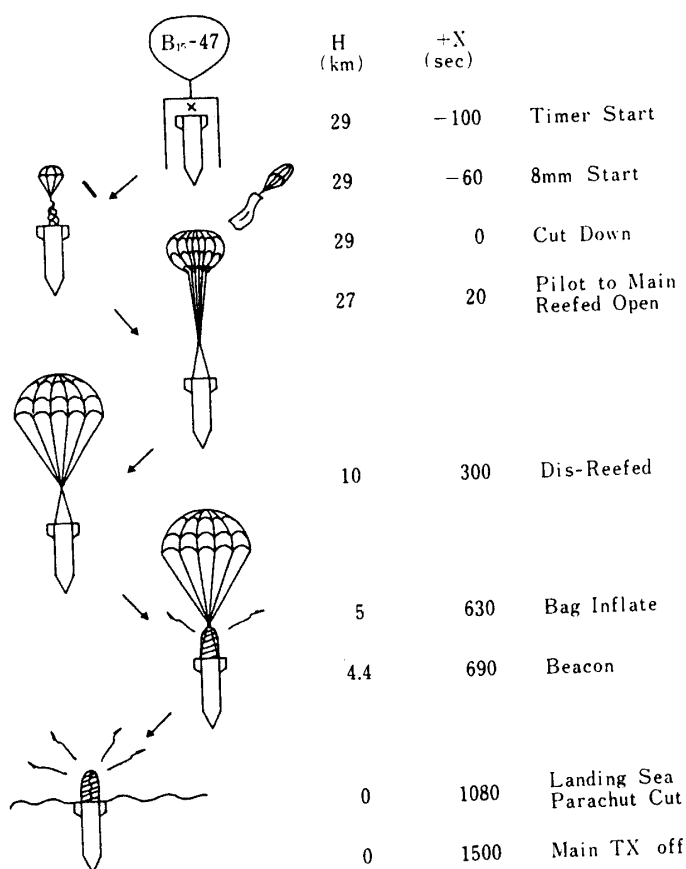


図-5 実験体の実験概念図

タイマー起動 40 秒後に観測室内の照明を点灯，8 mm カメラの撮影を開始する．タイマー起動 100 秒後に吊り下げロープのカッターが作動し，実験装置を垂直状態で投下する．

投下後 20 秒間自由落下させ，無重力状態における各項目を計測し，パイロット・シュートを放出する．パイロット・シュートによって 1 段リーフィングを設定したメイン・シュートを引き出し，20 m/sec（地上換算）の速度で降下させる．この時パイロット・シュートはメイン・シュートを包んでいたスリーブを引き抜き離脱する．

投下後 5 分，予想高度 10 km に達した時にリーフィング・ラインを解除し，予定降下速度 10 m/sec（地上換算）の緩降下に入り，予想高度 5 km では発泡ボンベ作動，浮遊バックを展開させ，11 分 30 秒後予想高度 4.4 km で 1.6 GHz のビーコンを発振，18 分後に海上へ着水する．

着水時には海水電池によりパラシュートを切り離し，投下後 25 分でメイン送信機を停止，ビーコンのみ送信され回収待ちの状態となる．

以上が組み込まれたタイマーによるシーケンスである．



## 4. 実験経過

実験は55年度には気球 B 5-103 号機を用いて高度 25.5 km より行ない、昭和 56 年度には気球 B 15-47 号機を用いて高度 29 km より行なった。

B 15-47 は昭和 56 年 6 月 10 日 6 時 58 分 9 秒に放球し、放球約 2 時間後高度 29 km で水平浮遊に入った。その後 10 時 46 分に指令電波により実験体の頭部固定ロープカッターを作動させた。11 時 14 分 28 秒、気球が SBC の北北東 10 km に達した時指令電波を送信、実験体内のタイマー作動を開始した。タイマー作動 100 秒後にタイマー信号により吊り下げていたロープのカッターが作動し、実験体を投下した。以後表-2 に示すタイム・シーケンスで各項目が予定通り実行された。

表-3 タイム・シーケンス

設定秒時	高 度	項 目	備 考
-100 sec	29 km	タイマー・スタート	地上からコマンドによりスタート
- 60	29	8 mm カメラ・スタート	観測室作動、照明点灯
0	29	カッター作動	実験装置投下
20	27	パラシュート放出	パイロット、メイン(リーフィング)共放出
300	10	リーフィング・ライン解除	
630	5	発泡剤注入	約 100 秒で充满
690	4.4	ビーコン発振	
1080	0	着水	海水電池によりパラシュート切断
1500	0	メイン送信機停止	

実験体投下後の観測データを図-6 に示した。 $\pm 0.025 G$  の加速度計では自由落下中に加速度が増加している様子が見られ、 $\pm 10 G$  の加速度計では投下 20 秒後のパラシュート開傘衝撃が観測された。

一方、姿勢計では Z 軸地磁気に取り離し後のピッチング振動が観測され、X 軸地磁気では方位のずれはほとんど観測されず、自由落下中に軸中心の回転は起こさなかったことを示している。

図-7 に昭和 55 年度に行なった試作機の観測データを示した。

実験体各部の温度変化を図-8 に示す。実験体切り離し後は詳細を調べるため時間軸を広げてある。電池室の温度は実験体投下時に異常を起こし測定不能となった。切り離し 10 分 30 秒後に発泡剤の吹き出しによってノズル部の温度が下がり、2 液発泡剤の混合で化学反応による温度上昇が起きていることがわかる。この温度変化より発泡剤の吹き出し時間は約 1 分 30 秒、吹き出しから硬化迄はおよそ 4 分 30 秒であり、これは地上試験とほぼ一致している。

図-9 は実験体が落下中の加速度の時間変化を示したものである。

自由落下による無重力状態の加速度は

	55年度	56年度
10秒迄は	$4 \times 10^{-3}$ G 以下	$2 \times 10^{-3}$ G 以下
20秒迄は	$3 \times 10^{-2}$ G 以下	$1.5 \times 10^{-2}$ G 以下

という結果が得られた。

55年度の実験結果に10秒迄は予定値より小さい値を示しているが、加速度計の出力が小さいため読み取り誤差が含まれているものと思われる。

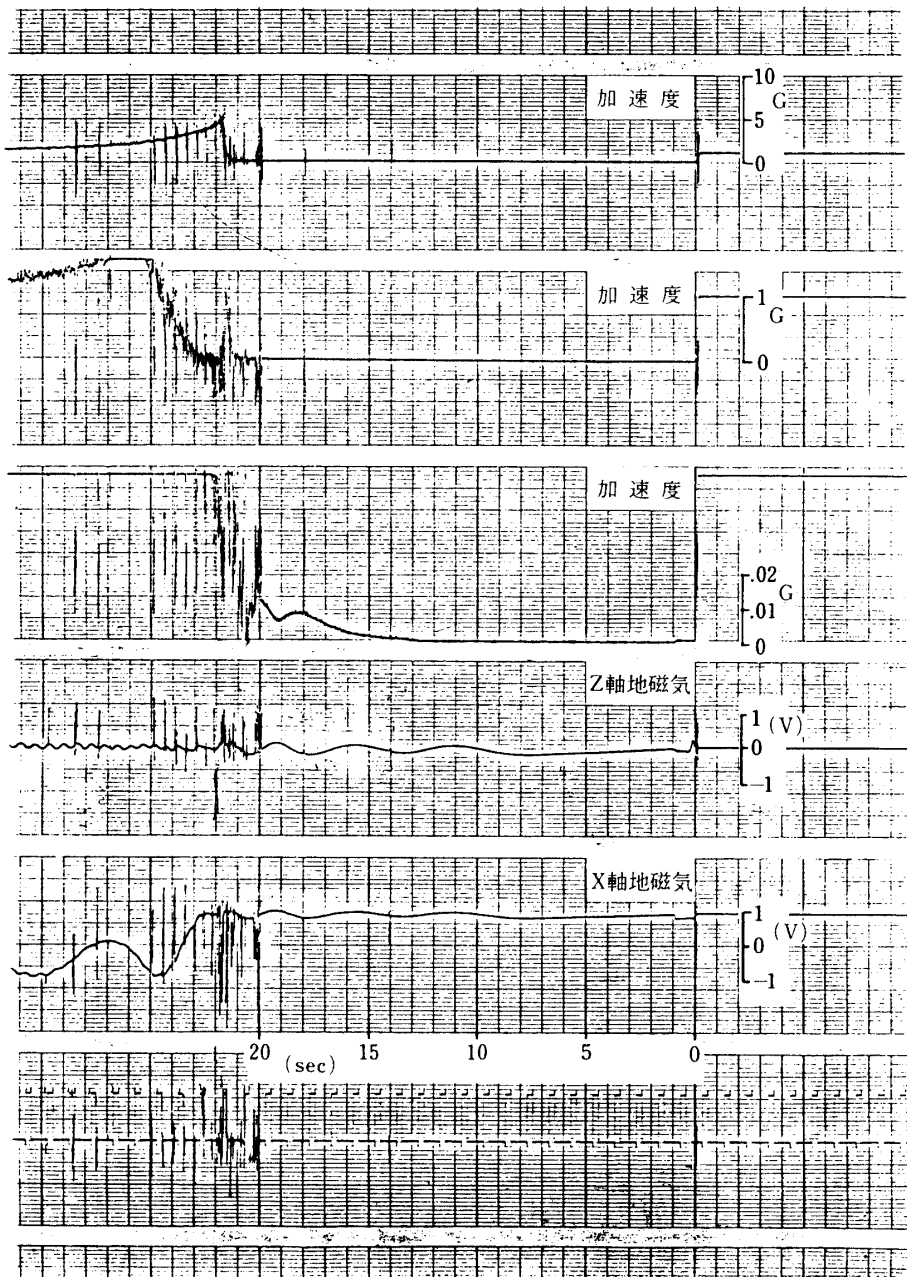


図-6 自由落下中の観測データ

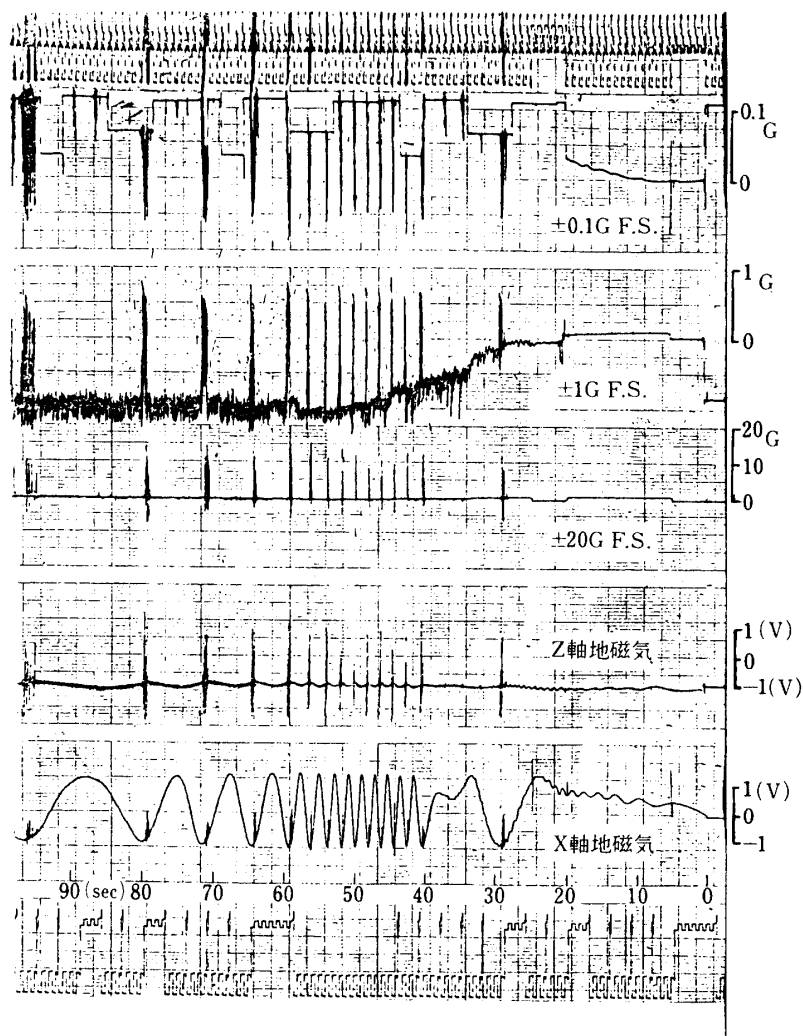


図-7 昭和55年の観測データ

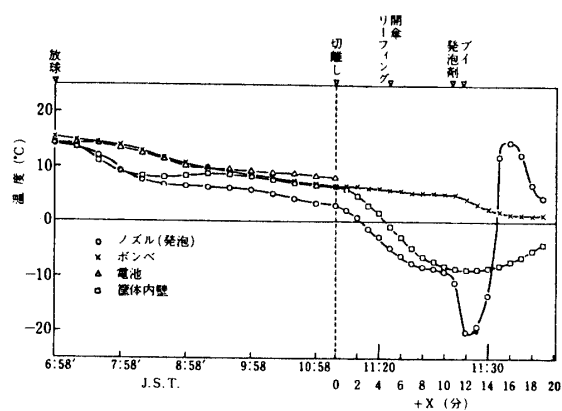


図-8 実用試験1号機の温度変化

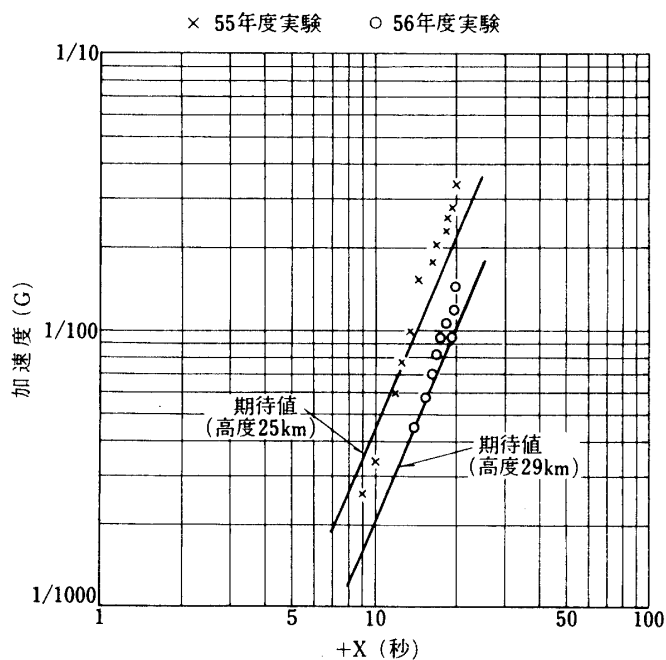


図-9 自由落下（無重力状態）による加速度の変化

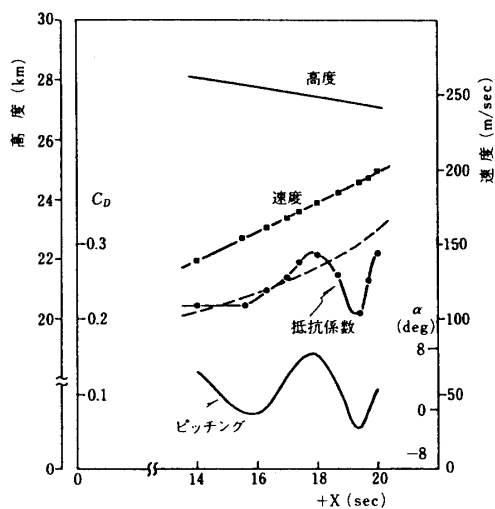


図-10 高度、速度、抵抗係数、ピッチングの時間変化

また、55年度、56年度共後半に見られる期待値からのずれは、実験体がピッチングを起こしたものと関連があるものと思われる。

図-10に高度、速度、抵抗係数、ピッチングの時間変化を示す。点線部は55年度実験の抵抗係数を示す。

抵抗係数の変動は実験体がピッチングを起したためによるものと思われ、ピッチング角と抵抗係数の関係は、いずれも風洞実験値を使用した推定値とほぼ一致している。

55年度実験で、切り離し時にカッターの衝撃によって実験体が傾き、大きなピッチング

を誘発する原因となった。そのため56年度実験では衝撃を少なくするためカッターを固定し、吊り方を改良した結果ピッチング角は55年度実験が $\pm 14$ 度に対し、56年度実験では $\pm 5$ 度程度に減少した。

図-11に実験体のZ軸地磁気とX軸地磁気出力の時間変化を示す。X軸地磁気の変動はZ軸地磁気と同周期である。この同周期の周期変動は各々の地磁気較正值を使うとピッチング振動のみによる影響で、このピッチング振動による変動を取り除くと、自由落下中に

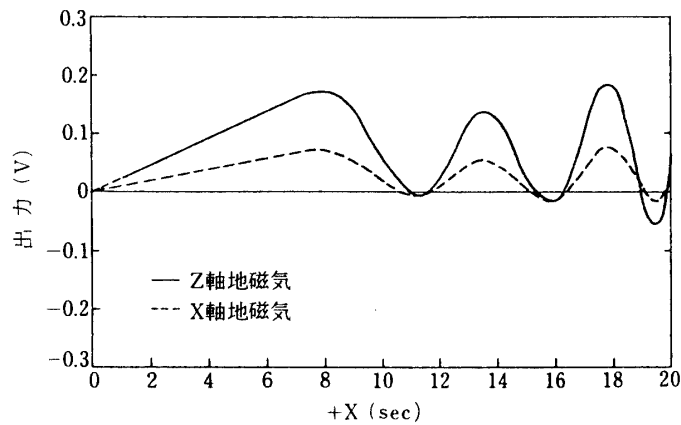


図-11 X軸, Z軸地磁気による姿勢変化  
(X軸:  $0.1V \div 20^\circ$ , Z軸:  $0.1V \div 4^\circ$ )

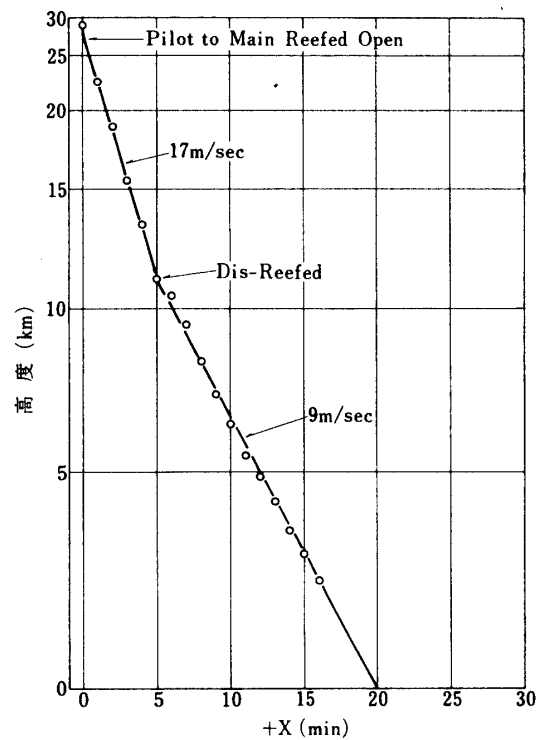


図-12 実用試験1号機の降下速度

方位角方向は振動成分はなく、投下20秒後におよそ10度ずれたことを示している。

また、X軸地磁気、Z軸地磁気出力共片側にのみ振動している。これは地磁気自体が伏角を持っており、方位角によっては片側のみの振動が起こるものと思われる。

出力と角度の変換はZ軸地磁気が0.1(V)でおよそ4度、X軸地磁気は0.1(V)でおよそ20度であり、ピッチング角度は最大 $\pm 5$ 度程度となる。このピッチングによる角度は抵抗係数の変化量を風洞実験値を使って推定すると、 $\pm 4.8$ 度となりピッチング角と一致している。

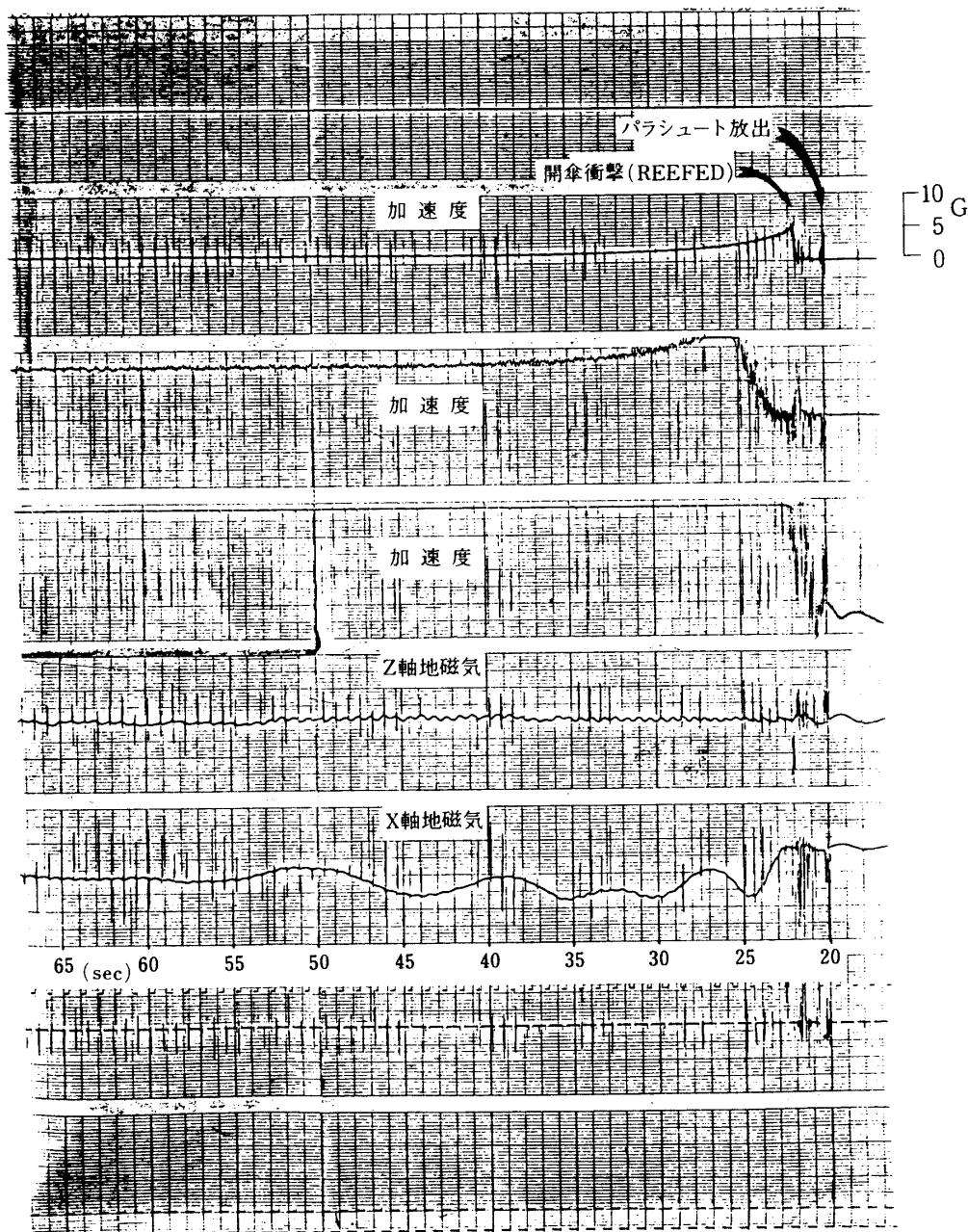


図-13 投下20秒後からの観測データ

図-12 に実験体の降下速度を示す。高度 27 km, 速度 220 m/sec で 1 段リーフィングを設定したパラシュートが開傘し, 110 m/sec (17 m/sec 地上換算) の速度で降下, 高度 11 km, 投下後約 20 分でディスリーフが行なわれ, 16.5 m/sec (9 m/sec 地上換算) の速度で投下後約 20 分で海上に降下したことを示している。

パラシュートの完全開傘による降下速度の推定値は 9.2 m/sec であり, 観測結果と一致している。

図-13 に実験体投下 20 秒後からの観測データを示す。パラシュート放出から 1 段リーフィングを設定した開傘迄 1.7 sec, 開傘衝撃は予想値とほぼ等しく 5 G が観測された。Z 軸の地磁気の振動データより, 開傘後のリーフィング時における実験体の振動は 1.5 Hz,  $\pm 1 \sim 2$  度程度のピッチング角となっている。

図-14 は実験体投下 300 秒後からの観測データを示している。ディスリーフ時の開傘時

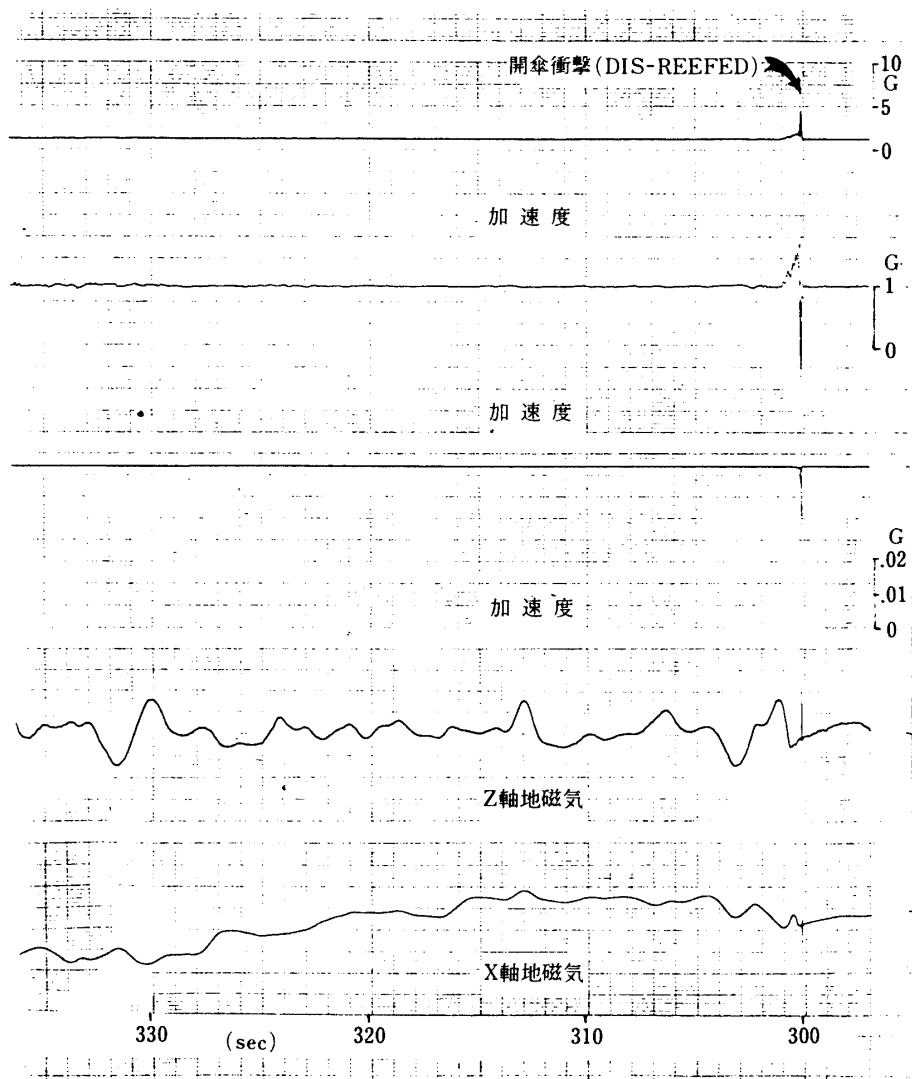


図-14 投下 300 秒からの観測データ

間は0.28秒、開傘衝撃は予想値に等しく4.5 Gが観測された。開傘後の振動は0.2 Hz および0.5 Hz、振動角は最大 $\pm 15$ 度、平均振動角は $\pm 4.5$ 度となっている。

リング・スロット傘の平均振動角[5]は、0度 $\sim \pm 5$ 度であると推定されており、観測結果よりリーフィング時、ディスリーフ時共推定値内に入っており、良い結果を示している。

平面傘の平均振動角[5]は、 $\pm 10$ 度 $\sim \pm 40$ 度と推定されており、本実験に使用したリング・スロット傘は平面傘に比べ、安定した降下を示していることがわかる。

### 5. 実験結果と考察

実験高度25 km, 29 kmより投下を行なった結果、加速度については、

	55年度(25 km)	56年度(29 km)
10秒後	$4 \times 10^{-3}$ G 以下	$2 \times 10^{-3}$ G 以下
20秒後	$3 \times 10^{-2}$ G 以下	$1.5 \times 10^{-2}$ G 以下

が観測された。減速用パラシュート(リング・スロット)の開傘衝撃については

	55年度	56年度
リーフィング設定時	—	5 G
ディスリーフィング時	—	4.5 G

が観測された。

55年度は開蓋カッター2本のうち1本が不作動のためパラシュート放出が予定通り行なえなかった。

開傘衝撃が5 G程度でおさまっているのはリーフィング方式を採用したこと、およびリング・スロット傘を用いたためである。もし一段の平面傘を用いた場合には50 G程度が予想され、以上の方式が極めて有効であることが確認された。

実験の結果今後の問題点としては、次の様な点をあげることができる。

1) 55年度の実験では切り離し時にカッターの衝撃によって実験体にかんりのピッチング運動を誘発した。昭和56年度にはこのピッチング振動を減少させるため、切り離し方法、吊り方式等の改善を行なったが結果はまだ不十分であった。

2) 発泡剤による浮遊ブイの形成が確実に行なえなかった。現在の発泡剤は特に容器の取り扱いにむずかしい点があるので、取り扱いの簡易な容器等の設計を行なう必要がある。

3) 海上での浮遊状態は、直立させるため重心位置の変更等を行なう必要がある。

2度行なった無重力実験では、当初予定していた無重力状態についてはほぼ期待通りの結果を得ることができた。目的によっては、この方法で、無重力実験が可能な段階になったものと考えられる。

しかし上記のように若干の問題点を残しており、今後さらに改良を加え無重力実験を可能にしたいと考えている。



## 附 録

## 1. ピッチング運動による加速度

## 1) ピッチング振動による加速度を

$$\theta = \theta_0 \sin \omega t$$

と近似的に書くと

$$\ddot{\theta} = \theta_0 \omega^2 \sin \omega t$$

となる。角速度の最大値  $\dot{\theta}_{\max}$  は

$$\dot{\theta}_{\max} = \theta_0 \omega$$

となる。この時の振動周期を  $T$  とすると

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

であるので

$$\begin{aligned} \text{加速度 } r\ddot{\theta} &= r\theta_0\omega^2/g \\ &= r\theta_0\omega^2 \times 10^{-3} \end{aligned}$$

となる。昭和 56 年度の実験を例にとり重心から観測室の距離を  $r=10$  cm とおき観測データより  $\theta_0 \leq 5^\circ$  とおく。

実験によれば 10 秒付近で  $T$  の観測値は 6 sec 程度で  $r\dot{\theta} = 9.6 \times 10^{-4}$  G

20 秒付近では  $T=3$  sec で  $r\dot{\theta} = 3.8 \times 10^{-3}$  G

となる。ピッチング振動による加速度は縦方向の加速度に比較して 1 桁小さく、問題のないことがわかる。

## 2. リーフイングライン長の算出

リーフイング・パラシュートのリーフイングの度合いと抵抗係数の関係は不明な点が多いが、この実験では次の様な簡単なモデルを用いて推定を行なった。

パラシュートの製作直径を  $D_0$  とし、開傘した時の直径を  $D$  (図-a) とすれば近似的に

$$D = \frac{2}{\pi} D_0$$

となる。つぎにリーフイングをかけた時の有効半径を  $R$  とする。リーフイングの結果、速度を  $n$  倍にするために  $C_D$  を同じにとると有効面積比は  $n^2$  となる。

$$\frac{\pi \left( \frac{D}{2} \right)^2}{\pi R^2} = n^2$$

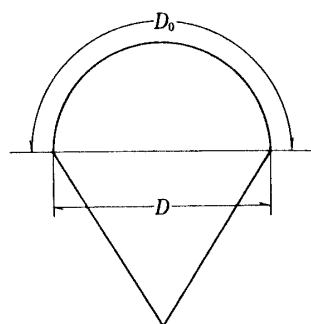


図-a パラシュート側面

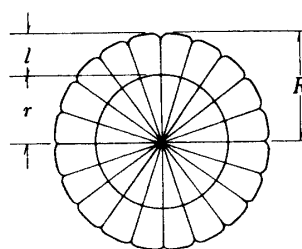


図-b 下から見たリーフィング状態のパラシュート

$$\therefore R = \frac{D}{2n} = \frac{1}{n} \cdot \frac{D_0}{\pi} \dots\dots\dots (1)$$

リーフィングラインの半径を  $r$ ，索間の傘体のふくらみを  $l$  (図-b) とし，索数を  $N$  とすると索間の長さは

$$\frac{\pi D_0}{N}$$

であるから

$$2l + \frac{2\pi}{N}R = \frac{\pi}{N}D_0$$

という関係が得られる。したがって

$$l = \frac{1}{2} \frac{\pi D_0}{N} - \frac{\pi}{N}R \dots\dots\dots (2)$$

(2)式に(1)式を代入して

$$l = \frac{1}{2} \frac{\pi}{N} D_0 \left(1 - \frac{2}{n\pi}\right) \dots\dots\dots (3)$$

を得る。  $r + l = R$  より，リーフィングラインの半径  $r$  は

$$r = R - l = D_0 \left( \frac{1}{n\pi} - \frac{\pi}{2N} + \frac{1}{nN} \right) \dots\dots\dots (4)$$

となる。

$2r = D_r$ ，  $\xi = \frac{1}{n^2} = \frac{C_D S_1}{C_D S_2}$  とおき，(4)式を使って  $\xi$  と  $\tau = \frac{D_r}{D_0}$  の関係を計算した結果を

図-c に示した。

昭和 56 年度実験の場合、高度 27 km 付近で秒速 220m/sec (地上換算速度 34 m/sec) 程度で第 1 段が開傘し、ディスリーフ後は地上換算で 9 m/sec となる。したがって 2 回の開傘衝撃を均等にするためには、リーフイング状態での降下速度は

$$v = (34 \times 9)^{1/2} = 17.5 \text{ m/sec}$$

にとればよい。この場合

$$\xi = \frac{1}{n^2} = 0.26$$

となる。図-c から  $N=24$  として

$$\tau = \frac{D_r}{D_0} = 0.23$$

を得る。 $D_0=6.12 \text{ m}$  であるので、 $D_r$  としては

$$D_r = 1.40 \text{ m}$$

を採用した。

実際の観測データでは図-c に示した様に若干期待値からずれが見られるが一致はよい。

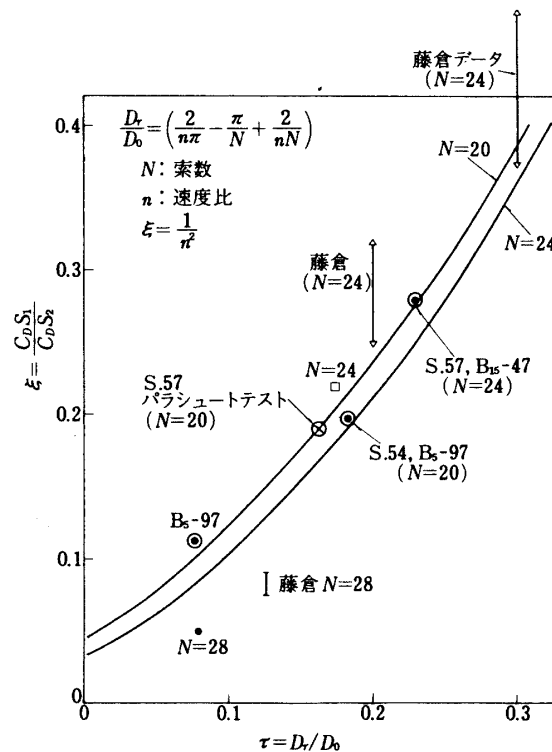


図-c パラシュートの有効面積比とリーフング率の関係

## 参 考 文 献

- [1] 西村 純：気球搭載機器についての2,3の考察，大気球シンポジウム報告57，(1979)
- [2] 西村 他：リーフィングパラシュート方式における回収システムについて，大気球シンポジウム報告9，(1979)
- [3] Recovery Systems Design Guide E. G. Ewing Irvin Industries, Calif. Dec. 1978 p. 76