

# 大型実験体による無重力実験

並木 道義・太田 茂雄・秋山 弘光  
山上 隆正・狛 豊・西村 純  
広沢 春任

(1984年6月12日受理)

## Microgravity System by using Stratospheric Balloons

By

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

**Abstract:** A system for microgravity experiments by using a stratospheric balloons has been developed since 1980. In the experiment performed in 1983, a microgravity chamber was released at a balloon altitude of 32 km. A scientific instrument for the microgravity experiment was equipped inside the chamber together with accelerometers, attitude sensors, two telemetry transmitters, a sequence timer and parachutes.

The experiment was to observe the behavior of fishes under microgravity environment by taking movies using two 8 mm cameras. Also, a brain wave of a fish was sent to the ground by a telemetry. The observations were successful.

The observed gravity inside the body was less than  $3 \times 10^{-3}$  G approximately for 10 sec. The body was decelerated by a reefed parachute system after the microgravity experiment of 20 seconds. The observed opening shocks of reefed and disreefed parachute were both about 3.5 G. This parachute system will be applied to the recovery of a rocket.

## 1. はじめに

高度 30 km の成層圏では空気密度が地上のおよそ 1/100 となり、この高度で自由落下する物体の空気抵抗も地上のおよそ 1/100 となる。そこで昭和 55 年に無重力状態を実現する目的で大気球を利用して成層圏で実験体を自由落下させ、無重力状態を得る実験が計画された[1]。

昭和 55 年には試作 1 号機を昭和 56 年には実用試験機による無重力実験を行いこの 2 度の観測結果から、1/1000 G 程度の無重力状態を約 20 秒間にわたって実現することが可能であることがわかった。また観測器の回収、パラシュートの開傘衝撃の緩和等を考慮し、減速用パラシュートには開傘衝撃荷重の小さいリング・スロット型のパラシュートを使用した。さらにこのパラシュートにはリーフィング技術を利用した減速緩降下システムを採用した[2]。

今回はより大型の実験体を試験するため、はじめて P.I 観測器を搭載することとした。実験としては微重力下における魚の挙動を観測することとし、観測は 2 台の 8 mm カメラによる撮影および 1.6 GHz、300 MHz のテレメーターによる脳波の同時測定を行った。

実験は昭和 58 年 9 月 6 日、B<sub>50</sub>-25 号機によって行われ、機器はすべて正常に動作し良好な観測結果が得られ、所期の目的を達することができた。

また海上で浮遊中の実験体は完全な形で無事に回収することができた。

## 2. 無重力実験体の概要

昭和 55 年の試作機から今回の大型実験体迄の比較を図 1 に示す。今回の実験体は昭和 55 年の試作機に比べて長さで 2.2 倍、重量で約 7 倍となっている。前回迄、実験体の空力中心は先端より 65 % 位置、重心は先端より 44 % 位置を採用していた[3]。しかし自由落下時（無重力状態時）のピッチング振動による加速度を減少させるためには振動周期を長くする必要がある。このため今回の実験体では翼面積を小さくすることにより空力中心を先

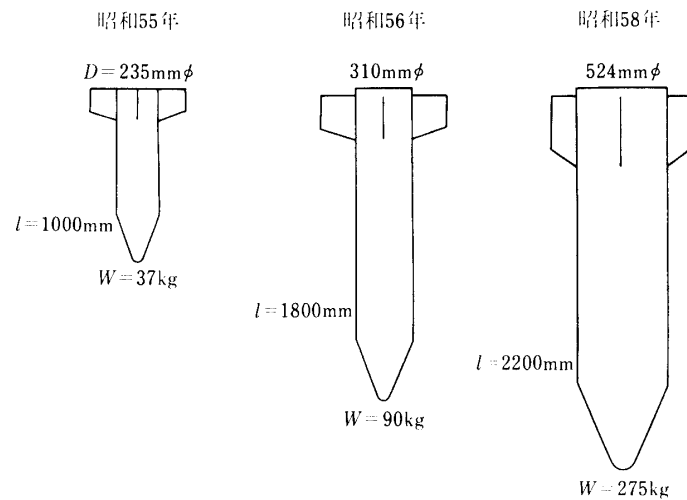


図1 実験体の比較

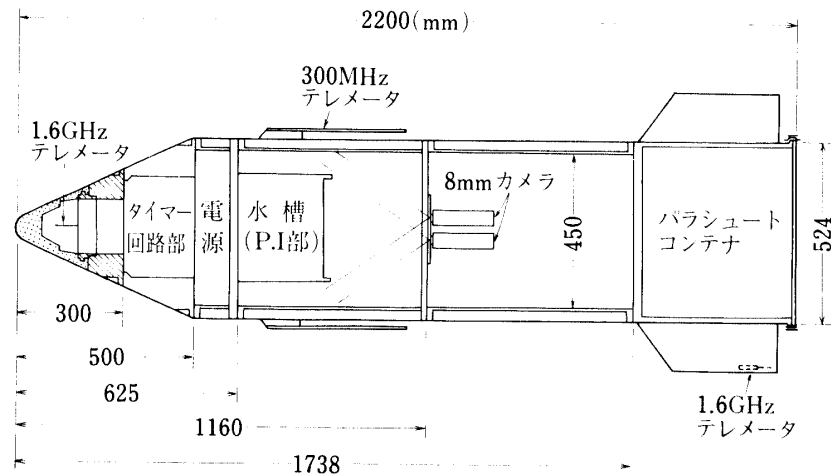


図2 実験体の構造および機器の配置

端より50%位置とし、重心は先端より42%位置とした。

図2に実験体の構造と機器の配置を示す。

### 2-1 構造および構成

実験体のノーズコーンの先端部は最も薄い部分で厚さ16 mmのFRPを使用し、1.6 GHzの送信機を組み込んである。ノーズコーン中央部は重心位置を先端側にするため、比重の高い黄銅を使用した。ノーズコーンの基部は耐蝕アルミで製作し、厚みは最も薄い所で約30 mm、最も厚い所で115 mmである。

胴体は5 mm厚の耐蝕アルミで製作し、さらに外側には1.5 mm厚のアルミ製カバーを取り付けることとした。観測部のカバーには300 MHzのアンテナを4本取り付けてある。

パラシュート収納部の基部は25 mm厚、蓋は12 mm厚の耐蝕アルミで製作されているが、パラシュート収納部の胴体、翼はそれぞれ7 mm厚、6 mm厚のFRP製である。これは回収を容易にするため翼端に、1.6 GHzの送信アンテナを埋め込んだためである。

また海上に着水後は、実験体が直立して送信機の電波がうまく放射されるためにパラシュートを切り離す必要があり、パラシュート分離機構を開発し使用した。この分離機構は4 tonの引張り試験で異状が認められなかった。分離機構は写1に示す通りで(a)は分離状態、(b)は接続状態を表わしている。大きさは、全長120 mm、最大幅60 mm、分離部直径25 mmφであり、分離部には直径35 mmφ、厚さ5 mmの縦2分割にした円筒を取り付けてある。その外側を水溶性ナイロンテープ(引張り強度:20 kg)12本によって固定されている。

実験体の構成としては、先端より1.6 GHz送信機部、タイマーおよび各種回路部、電源部、観測部、8 mmカメラおよび300 MHz送信機部、パラシュート収納部から構成されている。

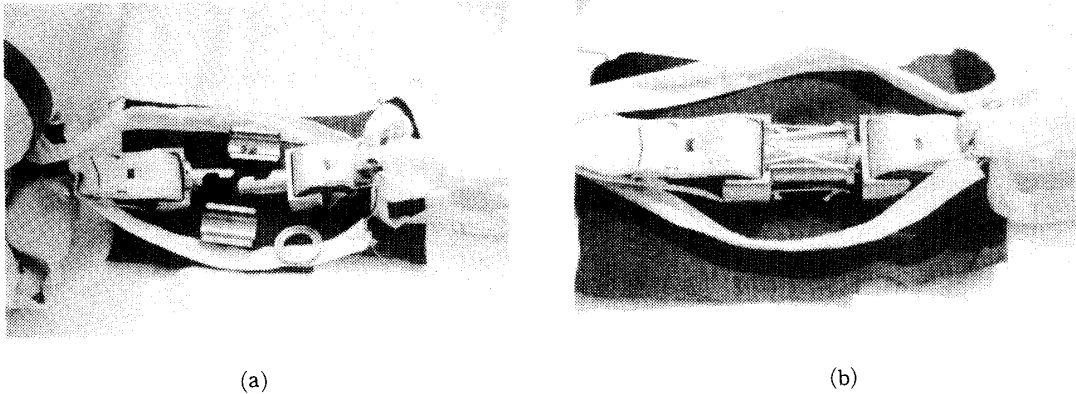
実験体は先端部50 R、半頂角25度の円錐体と直径524 mmφ、長さ1,700 mmの円柱体を組み合わせたロケットの形状である。全重量は275 kg、直径524 mmφ、全長2200 mm

である。

観測部の有効使用領域は、直径 450 mm $\phi$ 、長さ約 500 mm の円筒内が使用可能である。

## 2-2 電源および機器、計測系

電源系としては集中電源方式と独立電源方式が考えられるが、集中電源方式は電源に異常を起こした場合にはすべて動作停止となる。また独立電源方式は各々が電源を持つため



写1 パラシュート分離機構

表1 テレメータ計測項目

テレメータ

I) P. C. M.		
1)	加速度	0.025G. F. S
2)	〃	1.0 G. F. S
3)	〃	20.0 G. F. S
4)	GA	X 軸 } 2 軸用
5)	〃	Y 軸 }
6)	〃	Z 軸 (ション・ステッド)
7)	照度計	(太陽センサー)
8)	Timer 応答	
9)	内圧計	
10)	P. I 信号	(脳波)
11)	温度	(P. I 容器)
12)	〃	(落下体内壁)
13)	〃	(電池室内)
14)	〃	(送信機 1.6GHz)
II) FM-FM		
1)	22.0KHz	(P. I 脳波)
2)	14.5KHz	(20G 加速度)
3)	3.0KHz	(P. C. M)

系統が複雑になる。今回は両方の良い所を利用しやや独立電源に近い方式を採用することにした。

機器、計測系はタイマー、加速度計、三軸地磁気姿勢計、1.6 GHz 送信機、300 MHz 送信機等を搭載している。テレメーターは FM-FM のアナログ 2 チャンネルと PCM 1 チャンネルを使用して観測データを送信する。

表 1 にテレメーター計測項目を示す。

### 2-3 減速機構

緩降下減速機構にはメインパラシュートを引き出す役目のパイロットシュートとして自動飛出しバネ (約 20 kg) を持つ有効面積 ( $C_D S$ )  $0.48 \text{ m}^2$ 、直径  $1.05 \text{ m}$  の MA-1 (ベイン) 型を使用した。メインパラシュートは直径  $8.64 \text{ m}$  のリングスロット型であるため、平面傘に比べて抵抗係数が約  $\frac{1}{3}$  であり [4]、有効面積 ( $C_D S$ ) は  $32 \text{ m}^2$  である。

実験体を自由落下させると約 20 秒後にはおよそ  $200 \text{ m/s}$  の速度となる。この速度でメインパラシュートを完全開傘させると計算によれば開傘衝撃は約 7 G 程度となる。そこで開傘衝撃を軽減させるためメインパラシュートには有効面積 ( $C_D S$ )  $8 \text{ m}^2$  の 1 段リーフィングを設定した。また開傘性能を向上させるためセンターコードを備え、収納はスリーブ収納方式を採用した。

## 3. 実験方法

実験体の全電源は放球前に投入し、すべての観測信号および応答系はテレメーターにより送信する。実験体は  $B_{50}$  型 (約  $50,000 \text{ m}^3$ ) のプラスチック気球に搭載する。実験の予定は次の様になっている。高度およそ  $15 \text{ km}$  で気圧スイッチにより頭固定のナイロンロープを切断し、さらに上昇を行い予想高度  $32 \text{ km}$  で水平浮遊状態に入る。その後実験体の静止安定および観測被験体である鯉脳波の安定を確認したのち地上から指令電波を送信し実験体内のタイマーを起動させる。図 3 に示すように予定される各項目を内部タイマーにより実行する。タイマー起動時 (切り離し 90 秒前) に観測室内の頭部照明が点灯し、 $8 \text{ mm}$  カメラの撮影が開始する。観測室内の照明はその後 20 秒間隔で頭部、側部の切り換えが行われる。タイマー起動後 90 秒でタイマー信号によって吊り下げロープのカッターが作動し、実験体を投下する。投下後 20 秒間自由落下させ、その間の無重力状態を利用して各観測項目を計測、記録を行いパイロットシュートを放出する。パイロットシュートはただちにメインシュートを引き出し 1 段リーフィング設定状態でメインシュートを開傘させる。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るスリーブを引き抜き切り離れて行く。投下後 300 秒、予想高度  $10 \text{ km}$  に到達した時リーフィングラインを解除し、予定降下速度 (地上換算速度)  $11 \text{ m/sec}$  の緩降下に入る。投下後 640 秒、予想高度  $4.6 \text{ km}$  では翼端に取り付けた  $1.6 \text{ GHz}$  の送信機が発信し、投下後 1042 秒で海上に着水する。着水時には新型のパラシュート分離機構が作動し、パラシュートを切り離す。投下後 1500 秒では主電源を翼端送信機のみで切り換え、回収待ちの状態となる。この最終状態でおおよそ 3 日間電波の送信が可能である。

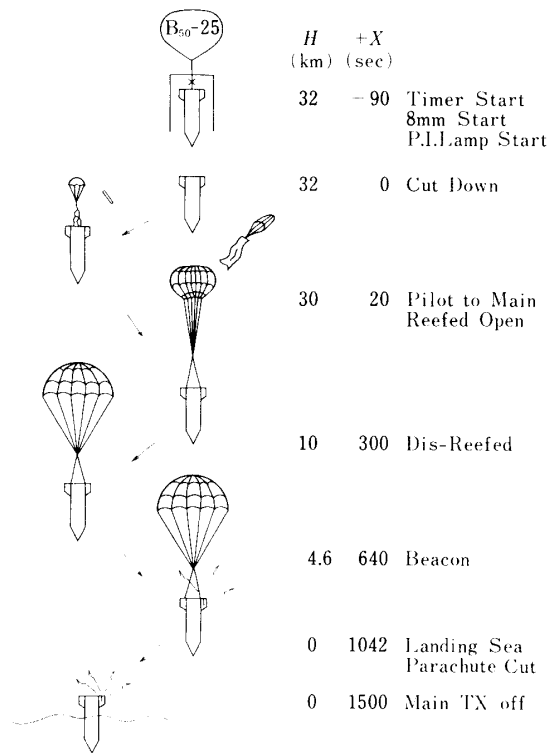


図3 実験体の実験概念図

#### 4. 実験経過

今回の大型実験体は2-1項に示すように重量が275 kgであり、実験体の組上げ、投下ゴンドラへの取り付けに時間がかかることが予想された。このため放球2日前に観測被験体である鯉等を水槽へ積み込む予定であったが作業行程調整によって1.5日前に積み込むことが可能になった。また気象状態を検討した結果、昭和58年9月6日を放球日と決定し準備作業に入った。

放球2日前の9月4日に実験体の組立てが開始され、同日午後4時には鯉を水槽へさらに実験体へ積み込みが行われた。9月5日、鯉の脳波および機器の正常動作確認後、投下ゴンドラへ取り付け作業を行った。午後5時には実験体内を1.2気圧に加圧した。翌9月6日一連の動作確認後、実験体内圧は1.194気圧であり気密が保たれていることを確認した。

昭和58年9月6日午前7時23分、B<sub>50</sub>-25号機によって放球し、放球後約51分、高度15 kmに設定した気圧スイッチによりカッターを作動させ、実験体の頭部固定ロープを切断した。気球は放球後1時間49分後の9時12分に予定高度である高度32 kmで水平浮遊に入り、投下待機状態となった。その後実験体の静止安定および鯉の脳波の安定状態の確認後10時20分に気球がSBCの南東34 km地点に達した時、地上から指令電波を送信、実験体内のタイマーを起動した。タイマー起動後90秒にタイマー信号によって吊り下げロープ

表2 タイム・シーケンス

作動秒時		高 度		項 目
設定秒時	実測値	予想高度	実測値	
-90sec	-88.65	32km	32.0km	タイマー・スタート, 8mm カメラ撮影開始
0	0	32	32.0	カッター作動, 実験体投下
20	20.3	30	30.0	パラシュート放出 (リーフィング)
300	304.5	10	11.2	リーフィングライン解除
640	649.6	4.6	4.9	翼端送信機発信
1042	1057.6	0	0	着水
1500	1522.5	0	0	全電源停止 (翼端送信機を除く)

のカッターを作動し、実験体を投下した。以後表2に示すタイムシーケンスに従って予定通り各項目が実行された。

## 5. 結果と考察

観測された実験体内の各部の温度変化を図4に示した。この図によると9時30分頃、電池および送信機の温度は急激に下がっている。この温度降下は実験体の全電源を一時停止させたことによるもので、水槽壁、実験体内壁には温度変化が見られていない。

P.I 観測器である水槽は観測被験体として鯉および金魚を搭載しており、水槽内の水温変化は魚の生存条件として $5^{\circ}\text{C}/\text{hr}$ .以内に保つ必要がある。そこで実験体内に水槽を取り付ける際に両者の間に断熱材を使用した。その結果、気球放球時から実験体の切り離し迄の平均温度変化は $0.7^{\circ}\text{C}/\text{hr}$ .と非常に安定していた。実験体切り離しから海上に着水する迄は、実験体の急速落下によって温度が降下し、時間平均としては $7.5^{\circ}\text{C}/\text{hr}$ .とやや大きくなっている。しかし、温度センサーは水槽外壁に取り付けていることから水槽容器(10mm厚アクリル製)の熱伝導率を考慮すると水温の降下としてはこれよりかなり少ないことが予想される。また実験体切り離しから海上に着水迄の時間が短いことで、観測された温度変化としては $2^{\circ}\text{C}$ の降下にとどまった。

以上から観測における温度変化を基準値以下に保てたことになる。

実験体切り離しからの無重力状態における観測データを図5に示す。加速度計では実験体の切離し後23秒付近にパラシュートの開傘衝撃をはっきりとらえている。また3軸地磁気姿勢計では実験体の姿勢変化が観測されている。この3軸地磁気姿勢計の観測値から地上での較正值を使用して実験体の姿勢の推定を行うことができた。

図6に無重力状態における実験体のピッチングおよび方位角の時間変化による推定結果を示す。

方位角の推定結果では、切り離しから10秒後迄はほとんど変化が見られず10秒後から20秒後迄の間におよそ10度ずれていることがわかる。これは実験体が自由落下中に機軸を中心として、約10度回転方向に動いたことを示しており、実験体は方位角方向には余り

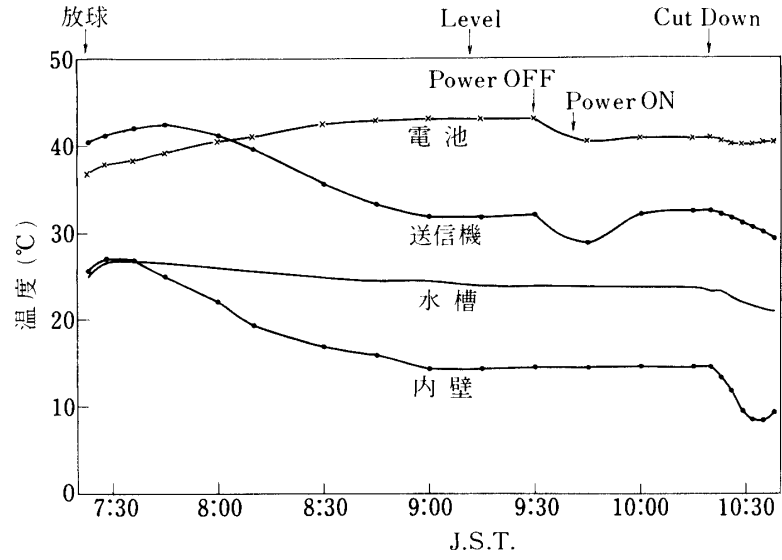


図4 各部の温度変化

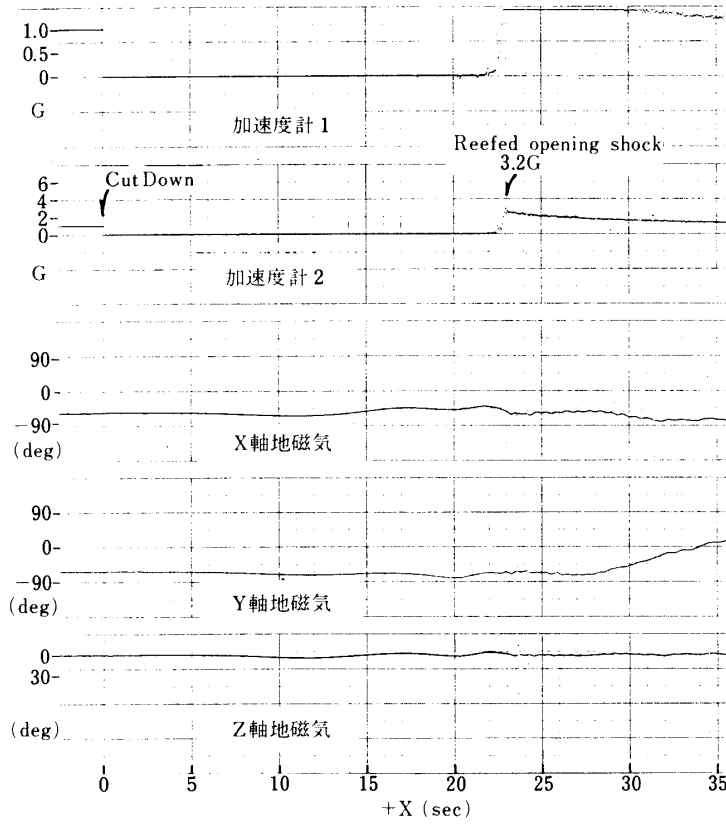


図5 自由落下中の観測データ



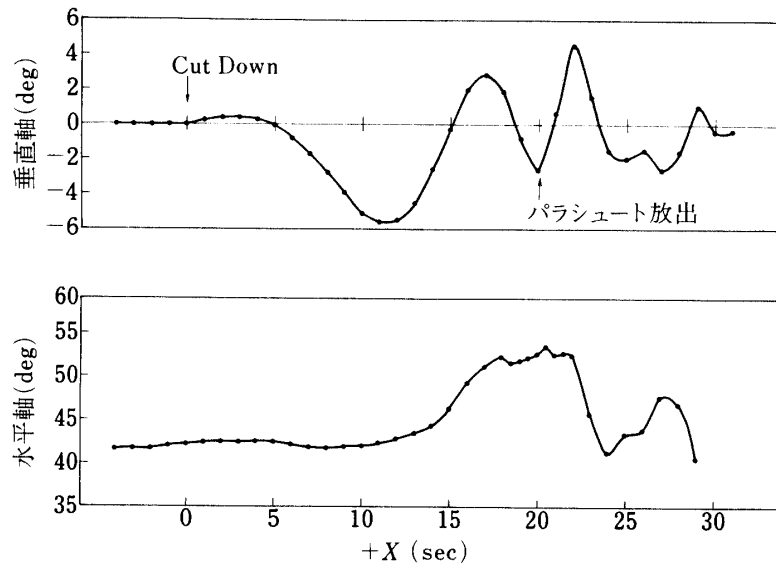


図6 自由落下中の実験体のピッチングおよび方位角の時間変化

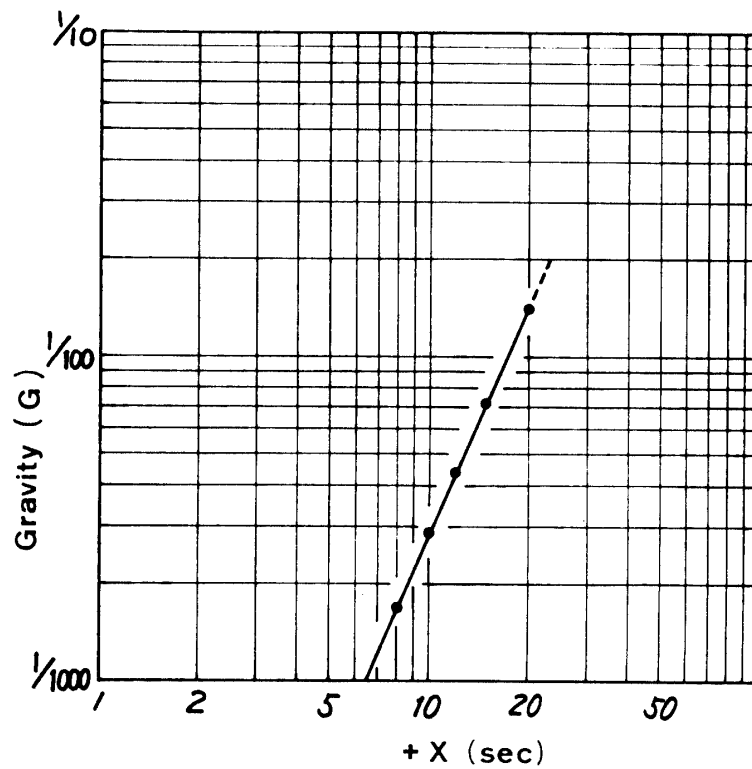


図7 自由落下時（無重力状態）の加速度の変化

回転を起こしていないことがわかる。ピッチングについては、前回実験を行った実験体のピッチング角の最大値は約±5度で20秒間に3間期の振動であった。これに対して今回のピッチング角の最大は+2.7度、-5.7度で20秒間に1.5周期の振動である。現在のこの推定結果では1度程度の誤差を含んでいるものと推定されている。

これは翼面積を小さくして空力中心、重心位置の変更を行った結果、前回に比べて振動周期が2倍となったため、これにともなう加速度は約1/4となったことを示している。ピッチングにともなう加速度は約 $10^{-4}G$ であり、かなり結果が良好であることがわかる。

図7に無重力状態における加速度の時間変化を示した。  
今回の実験では

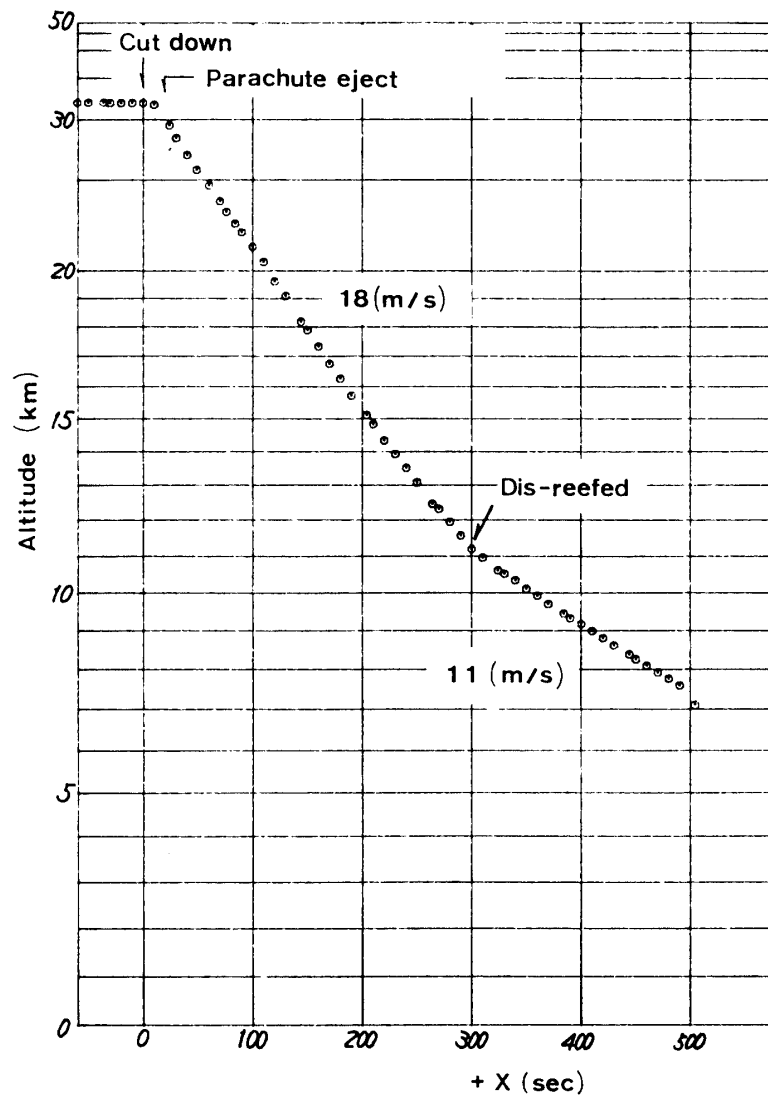


図8 実験体のパラシュートによる降下速度

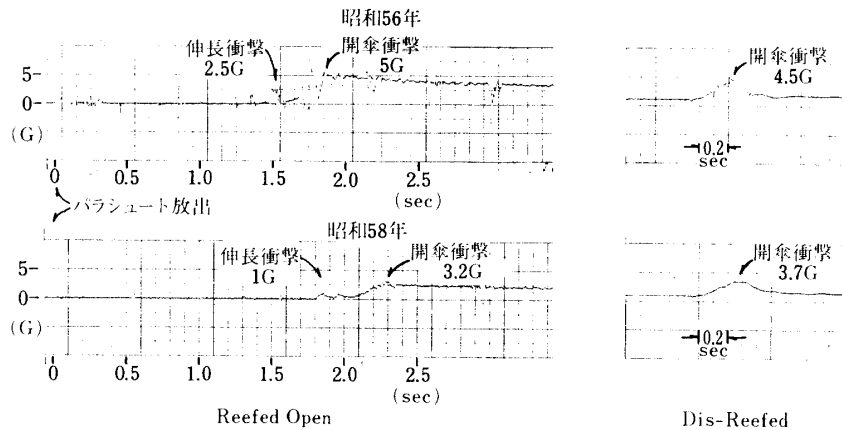


図9 開傘衝撃荷重曲線の比較

切り離し 10 秒後  $2.9 \times 10^{-3} \text{ G}$  以下  
 20 秒後  $1.4 \times 10^{-2} \text{ G}$  以下

の加速度が観測された。

図8に緩降下減速機構としてのパラシュートシステムによる実験体の降下速度を示した。実験体は高度32 kmから自由落下をはじめ、高度30 kmで1段リーフィングを設定したパラシュートが開傘し、地上換算速度18 m/secで降下した。さらに高度11.2 kmでディスリーフ(完全開傘)が行われ、地上換算速度11 m/secで海上に降下したことを示している。メインパラシュートの完全開傘による最終降下速度の推定値は11.5 m/secであり、予想値とよく一致している。

図9に昭和56年と今回とのパラシュートの開傘衝撃荷重曲線による比較を示した。今回の開傘衝撃荷重は、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2.3秒であり、伸長衝撃は約1 G、開傘衝撃は3.2 Gが観測された。切り離し後300秒でディスリーフが行われ、リーフィングライン解除から完全開傘迄0.28秒、開傘衝撃は3.7 Gが観測された。今回の開傘衝撃は前回に比べて全体に小さくなっている。これは前回の実験体総重量は90 kgでメインパラシュートは50 kg物量傘相当を使用(総重量/パラシュートの比率=0.56)しているのに対して今回は総重量275 kgでメインパラシュートは100 kg物量傘相当を使用(比率=0.36)したためである。また前回はパラシュート放出から開傘迄の時間が1.8秒に対して、今回は2.3秒であり、0.5秒時間が長くかかっている。その上、伸長衝撃から開傘衝撃迄の時間(パラシュートの開傘時間)としては、前回は0.33秒に対して、今回は0.45秒とこれも0.12秒程のパラシュートの開傘時間が長いことが観測された。その原因はパラシュートの大きさの差に基因するものと考えられる。

## 6. まとめ

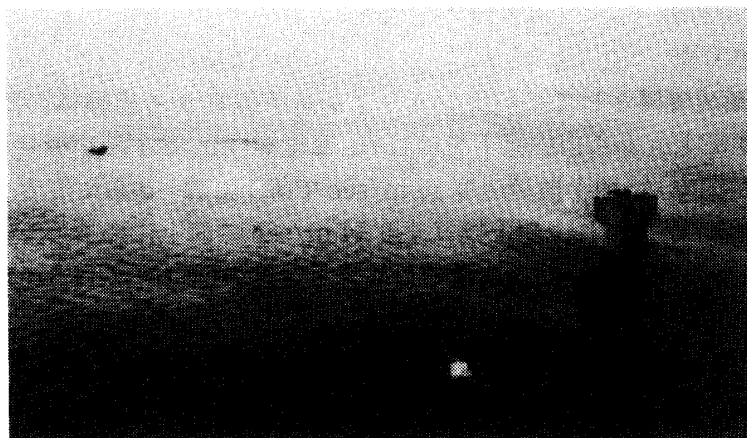
前回の実験との主な比較を表3に示す。

大型実験体の自由落下による無重力状態の加速度については

表3 昭和56年との主な比較

	56年度実験	58年度実験
重量	90kg	275kg
投下高度	29km	32km
加速度 10秒後	$2 \times 10^{-3}G$	$2.9 \times 10^{-3}G$
20秒後	$1.5 \times 10^{-2}G$	$1.4 \times 10^{-2}G$
開傘衝撃 [Reefed]	5G (27km)*	3.2G (30km)*
[Dis-reefed]	4.5G (11km)*	3.7G (11.2km)*
パラシュート		
パイロットシュート [C <sub>D</sub> S <sub>P</sub> ]	0.48m <sup>2</sup>	0.48m <sup>2</sup>
メインシュート [C <sub>D</sub> S <sub>M</sub> ]	16m <sup>2</sup>	32m <sup>2</sup>
リーフィング [C <sub>D</sub> S <sub>R</sub> ]	4m <sup>2</sup>	8m <sup>2</sup>

( )\* は開傘高度



写2 海上で浮遊中の実験体

10秒後  $2.9 \times 10^{-3}G$  以下20秒後  $1.4 \times 10^{-2}G$  以下

の微重力が観測され、期待通りの結果を得ることができた。

この結果別稿に示されるように微重力下における魚の行動の観測が、予定通りテレメータによる脳波の観測および8mmカメラの撮影を行うことができた。

緩降下減速機構としてのパラシュートの開傘衝撃については

リーフィング時 3.2G

ディスリーフ時 3.7G

の値が観測され、ほぼ推定値と一致している。

これによって緩降下減速機構として採用したリングスロット傘に1段リーフィングを設定したパラシュートの有効性が発揮されたと考えている。

また翼面積を小さくすることにより空力中心を先端から50%位置に変更した結果、ピッチング振動周期は前回の2倍となり、ピッチング振動にともなう加速度を約 $\frac{1}{4}$ に減少させることができた。

写2では海上で浮遊中の実験体を示している。

実験体は翼端に搭載した1.6 GHzの送信電波をたよりに回収班により着水からおおよそ7分後に海上で浮遊中の実験体を発見し、完全な形で回収された。なお回収時間が非常に早かったため分離されたパラシュートも完全な形で回収された。

回収された装置はほとんど再使用可能であった。

## 7. 謝 辞

今回の実験で300 MHzのアンテナに関して市川満氏に助言をいただいた。300 MHzのアンテナの調整には鎌田幸男氏に、実験体投下用ゴンドラの製作については工作工場の佐藤進司氏に、パラシュート切り離し機構の開発、テストに関しては藤倉航装の技術部の方々に御協力をいただきました。また回収には岩手県の漁業取締船である第2はやちね丸にも御協力をいただいた。以上の方々に心から謝意を表したい。

## 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 純他：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, (1980)
- [3] 並木道義他：大気球による無重力実験, 宇宙科学研究所報告, 27, (1982)
- [4] Recovery Systems Design Guide E.G.Ewing Irvin Industries, Calif. Dec. p.76 (1978)