

# 減速機構試験装置によるパラシュートの研究

雛田 元紀・松尾 弘毅  
塚本 茂樹・川口 淳一郎

Some Experimental Study on Parachute Dynamics by Utilizing  
a Deceleration System Simulator.

By

Motoki HINADA, Hiroki MATSUO  
Shigeki TSUKAMOTO and Jun'ichiro KAWAGUCHI

**Abstract:** A deceleration system simulator has been developed in order to investigate aerodynamic characteristics of parachute in air-stream of the 2 m $\phi$  low speed wind tunnel of Institute of Space and Aeronautical Science, University of Tokyo, and also to simulate a controlled parachute system there in which the model parachute is controlled by extending and/or retracting 8 suspension lines independently, according to respective control signals.

The performance of the simulator has been examined preliminarily in the low speed wind tunnel by using small model parachutes of 30–60 cm in deployed cross-sectional diameter, and it has been found that the simulator functionates satisfactorily.

Some experiments of parachute deployment have been conducted and the results of opening load behavior have been compared with the numerical result obtained from the analysis. It has been shown that both results are in good agreement with each other.

Brief qualitative discussion has been made on the feasibility of practical application of the controlled parachute system to a recovery system of rocket pay-load.

## 1. はじめに

東京大学宇宙航空研究所では、ここ1～2年新規に開発された単段式観測ロケットS-520型の搭載機器（重量150 kg程度）の回収に使用しうる緩降下・海上浮遊・位置探索からなる回収システムの開発研究が進められている。緩降下システムにはパイロットシュートおよびメインシュートからなる2段階方式のパラシュートシステムが、海上浮遊システムには着水

後展開膨張式の CO<sub>2</sub> バックシステムが、そして海上浮遊の位置探索システムにはロランCを利用した新方式の位置標定システムがそれぞれ用いられている。

S-520 型の場合、搭載機器と回収システムを含め全体で 250 kg 程度のものを緩降下させることが必要となる。このように比較的重量の大きいものの回収の場合、構造設計上からはパラシュート放出開傘時の衝撃力（スナッチ力あるいは開傘と呼ばれているもの）が重要な要素となってくる。したがって、パラシュート放出開傘過程におけるパラシュート索にかかる張力履歴などの動的特性に関して定量的な評価が是非とも必要になってくる。

一方将来の緩降下システムを想定したとき、回収探索活動を容易にし、かつこれに要する

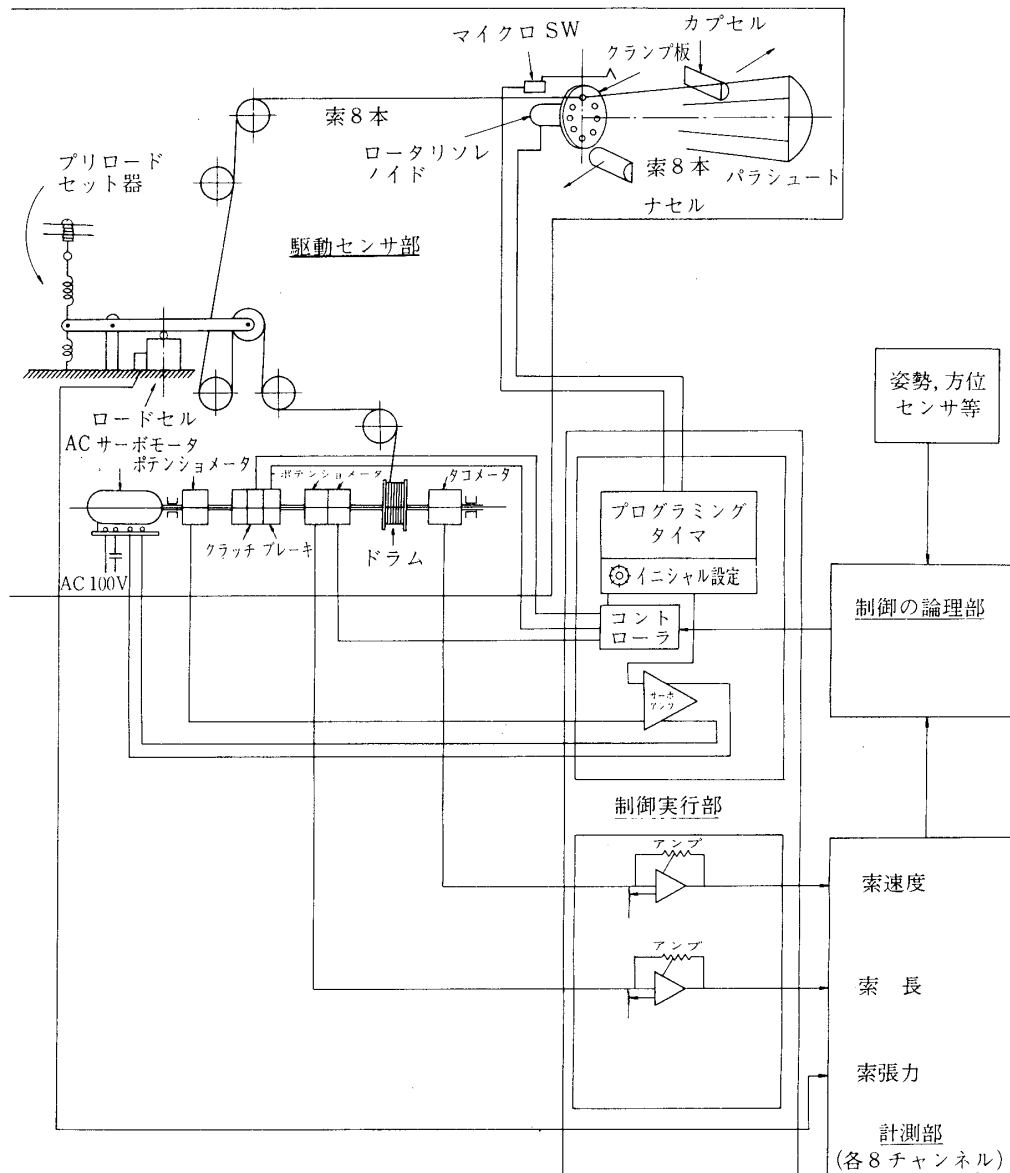


図1 減速機構試験装置の構成図

経費を節減する上からも予想降下点の分散を極力抑えることが重要である。したがって分散の主な要因であるロケット打上げ時の軌道分散や、緩降下時の風によるドリフト分程度は修正できる制御機能をもつシステムが、もしそのようなシステムが簡単でかつ廉価にできるならば非常に有用である。また揚力をもち、広範囲にわたり降下地点をより積極的に制御できるシステムの開発も将来必要となるであろう。簡単で廉価なものとして差し当り考えられる制御つき緩降下システムとしてはパラシュートと搭載機器の相対位置を変えることによって、すなわち重心移動によって降下経路を制御するシステムや、あるいはそれにさらにより大きな経路制御能力をもたせるため、パラシュートの天蓋を展開膨張式のマットにおきかえたもの（揚力抗力比で2程度までのもの）などがある。

これらのことを考慮して、東大宇宙研2m風洞内でパラシュートの動的特性を調べるとともに、制御つきパラシュートシステムのシミュレーション実験をも可能な装置として「減速機構試験装置」が計画された。そして昭和53年度から特別設備費「宇宙特殊環境工学」の一部として筆者らの担当でこの装置の試作が始められた。現在までに最終構想の約3/4ができており、パラシュートの開傘試験やパラシュートの索を伸縮させてパラシュートの姿勢を変える実験などが可能である。

以下、この装置の構成と性能および機能確認のため行なわれた予備実験について説明するとともに、併せて開傘過程に関する解析と風洞実験および制御つきパラシュートシステムの実用化の可能性について述べる。

## 2. 減速機構試験装置の構成と性能

この装置は風洞内でパラシュートシステムの機能試験を行なうことを目的としたもので、最終的には制御能力を有するパラシュートシステムのシミュレーション実験を行なうことを

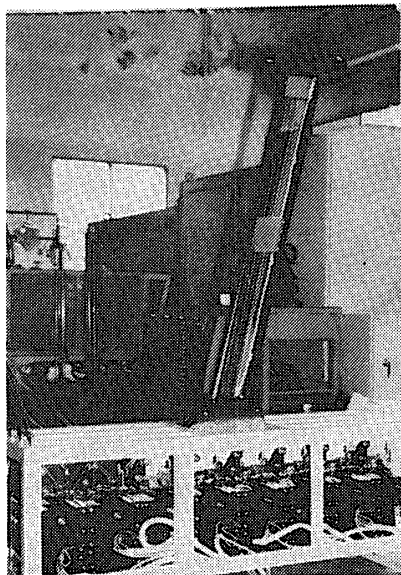


図2 駆動・センサ部

目指している。装置の構成は図1に示すようになっている。完成の段階では大まかに駆動・センサ部，制御実行部，計測部および制御論理部の四つの部分から構成されることになる予定である。現在までのところ制御論理部はまだ実体のない部分であるが，他の三つの部分はでき上っており，これだけでも一応パラシュートシステムの実験がある程度可能である。以下これらの部分について順次説明しよう。

### 2.1 駆動・センサ部

この部分は風洞内に置かれる(図2)。風洞気流外に8本の索の引出しあるいは引込み機構を駆動する部分が置かれ，これより上方に，垂直より後流側に $15^\circ$ 傾けて，巾126 mm，厚さ50 mmの翼型断面をもつ長さ約1 mの腕が出され，その先端には半球の頭部をもつ直径76 mm，長さ347 mmの鈍頭円柱形状をしたナセル部が取付けられている。そしてナセル部が風洞の中央に来るようにセットされる。8本の索は腕，ナセル部を通り，ナセル底部(この部分は直径76 mmの円形状をしている)より索穴を通して外部に出されたのち，パラシュートの索に連結される。パラシュートの索を除き，内部から索穴までの索は $0.5\text{ mm}\phi$ のスチールワイヤである。ナセル底部の索穴は直径40 mmの円周上に8個，周を等分するようにあけられている。2 m風洞で使用されるパラシュートは測定気流の大きさを考慮して開傘時の最大断面直径で $30\text{ cm}\phi$ 程度までのものであるが，パラシュートの開傘特性などを調べる実験もできるようにするため，ナセル底部にはパラシュートを収納するカプセルが取付けられるようになっている。このカプセルは必要に応じて2分割でき，中のパラシュートを気流中に放り出すことが可能である。各索はそれぞれ独立にモータで駆動され，索長および索速度はそれぞれポテンショメータおよびタコメータで検出される。各索とも索長の変動範囲は1.2 mまでで，また索速度は最大 $38\text{ cm/sec}$ まで可能である。ただし索速度は予め設定された値に固定されてしまうため，索長の直接的な制御量はモータを駆動する時間間隔

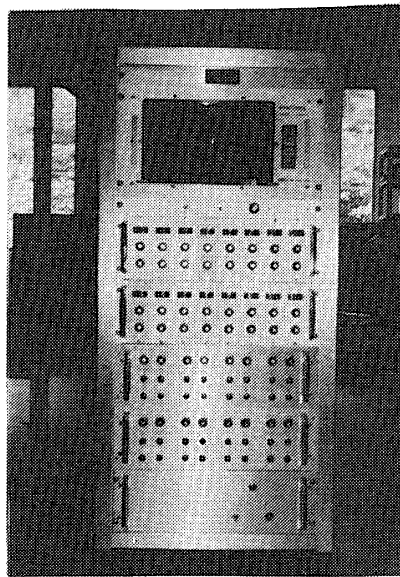


図3 制御実行部

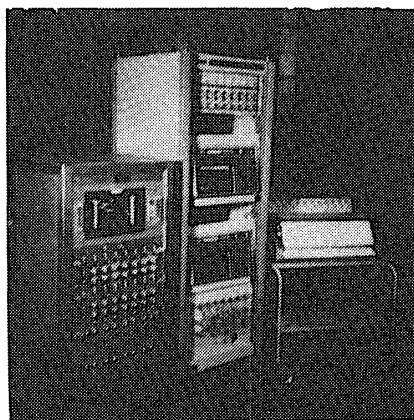


図4 計測部

ということになる。各索にかかる張力もそれぞれ独立のロードセルにより検出される。ロードセルの測定範囲は最高2 kg までであり、したがってパラシュート全体にかかる力としては約16 kg までが測定可能である。この力は概略最大断面直径30 cm $\phi$  パラシュートが風速50 m/s の気流中におかれた場合に相当する。

## 2.2 制御実行部

8本の索に対する索長、索速度の制御はこの部分から出される信号によって実行される。実験時の索速度は先に述べたように、予め設定されたレベルに固定されたままになるため、索長の制御はモータ駆動信号の時間間隔制御でなされる。この制御操作は手動あるいはピンボードプログラムタイマによるシーケンスで実行でき、さらに外部制御入力による操作も可能である。制御実行部の外観を図3に示す。

## 2.3 計測部

この部分にはロードセルからの信号を動歪計アンプを通して、ビジグラフおよびペンオットシログラフに記録する装置が組込まれており、各索に対する索長、索速度および張力の総計24チャンネルの計測が行なえるようになっている。計測部の外観を図4に示す。

## 2.4 制御論理部

この部分は将来追加する予定のものである。この部分が加わることによって外部センサの情報量とパラシュートの計測量を組入れた制御ループが構成できるため、より実際的な形態で制御を伴うパラシュートシステムのシミュレーション実験が可能である。外部センサの情報量としては、パラシュートの索と気流方向のなす角のような量も必要であるが、このため索の横方向の移動を光学的に測定するデジタル変位計が今年度(昭和55年度)追加される予定である。これは約1 m離れた所から直径0.1 mm $\phi$ 程度あるいはそれ以上の索の索に直角な横方向の1次元的な移動量を、範囲50 mm、精度0.5 mmで測定できるものである。

以上述べた四つの部分のうち、すでにでき上っている三つの部分だけでも、パラシュートの開傘時の張力などの測定とか、プログラムタイマによる索長の制御とこれに対応したパラシュートの姿勢応答の計測が可能である。

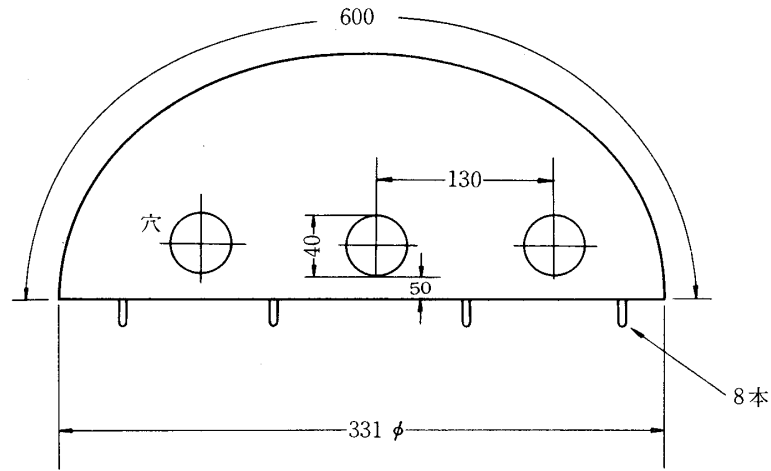


図5 風洞模型パラシュート

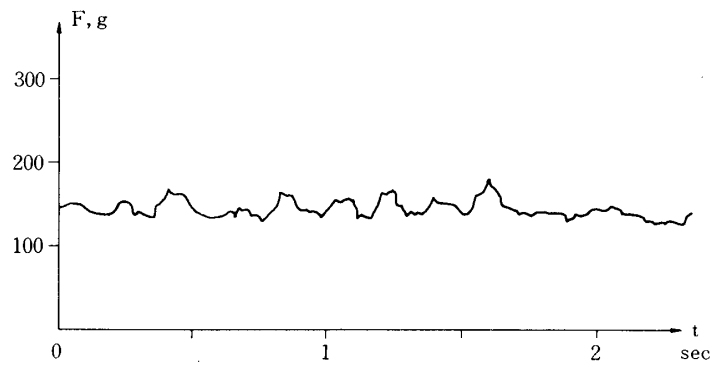


図6 迎角零（平行位置）まわりの横揺運動（風速9.1 m/sec, 索長50 cm）

### 3. 予備実験

試作された装置の機能チェックもかねてまず予備実験が行なわれた。このためのパラシュートとしては平面傘（開傘時の横から見た形状は楕円型）とリブレスガイドサーフェス傘のちょうど中間の図5に示されるような、縁に等間隔の8個の穴をもつものが試作され使用された。このパラシュートの天蓋（傘体布）のみの重量は9gである。このパラシュートの迎角零での安定性はリブレスガイドサーフェス傘ほどに強い安定ではないが、一応弱い安定で、平面傘のような不安定なものとは異なった特性をしていると予想される（5節参照）。以下にこのパラシュートを用いた実験結果の一部を示す。なお、この場合のパラシュート索としてはナセル底部の索穴から出ている0.5 mmφのスチールワイヤがそのまま使われた。また索長としては索穴からパラシュート傘体の縁までの長さとして定義されている。

図6は風速9.1 m/sec, パラシュート索長50 cmのときの迎角零の、すなわち気流に平行な

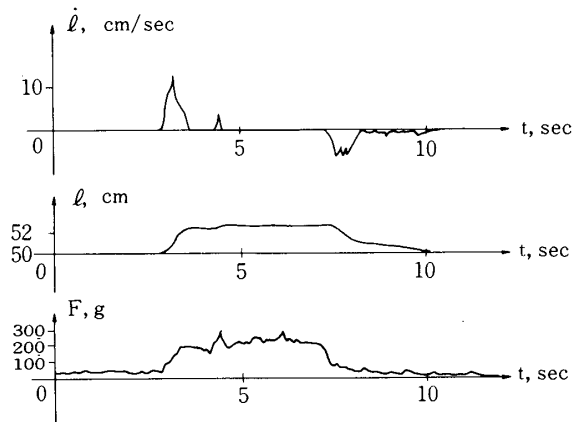


図7 手動による疑似ステップ応答（風速 9.1 m/sec, 初期索長 50 cm）

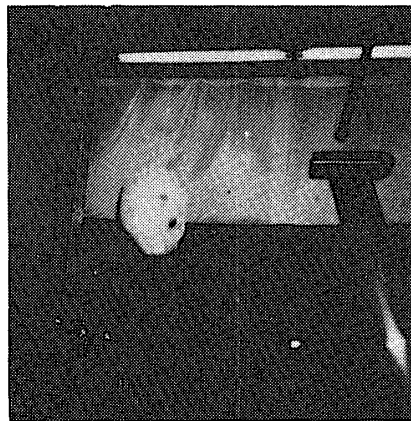


図8 風洞中のパラシュート（索長変化後の状態）

位置まわりの横揺（ピッチングおよびヨーイング）運動を観測したもので、30 Hz のローパスフィルタを介して計測した1本の索の張力 $F$ の記録である。この図から分るように、大略5 Hz 程度の振動が認められるが、この振動は発散的でない。

図7は手動操作により索長 $l$ を変化させたときの疑似ステップ応答である。条件は、やはり風速 9.1 m/sec, 初期索長 50 cm のときのデータである。図中索速度は $\dot{l}$ で示されている。張力 $F$ には振動がみとめられるが、これは図6と同様横揺運動である。この図にみられるように、わずかな索長の変化（索長の変化は 2 cm）すなわち迎角の変化に対し、張力は数倍にも変化していることがわかる。この理由の一つは、パラシュートの8本の索にかかる張力は必ずしも均一的でなく大小があり、これがパラシュートの運動ないし振動によって変動するためと考えられる。なお、このステップ応答時のパラシュートの状態は図8に示す通りであり、気流に対してある角度でほとんど安定に姿勢が保持される。このようにわずかな索長の変化で、パラシュートの迎角したがって姿勢にかなりの変化が誘起され、そしてその変化後の状態に安定に留まるという事実はこれまでの研究でも認められていることである。迎角零

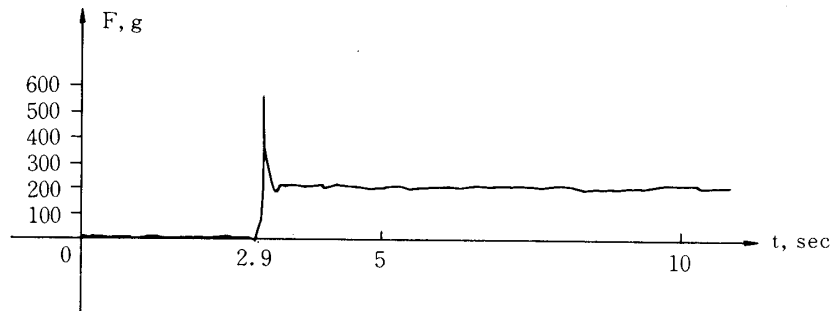


図9 開傘実験 (風速 13.9 m/sec, 衝撃時の索長 66 cm)

の気流に平行な位置よりも斜めの位置における姿勢の方が安定であることは、索長制御によるパラシュートのグライデングの実用化が簡便でかつ有用なことを示唆している。

図9はナセル後部のカプセル内にパラシュートを収納した状態から開傘実験を行なったときのある索の張力の結果である。当然予想される通り張力に開傘による衝撃荷重が計測されており、定常状態の2.5倍程の荷重になっている。この時の風速は13.9 m/secであり、衝撃荷重を受感したときの索長は66 cmであった。

以上のように機能確認を目的とした予備実験によって減速機構試験装置の有用性が確認された。

#### 4. パラシュートの開傘運動の解析と実験

はじめに文献(1)にならってパラシュートの開傘運動の一般的な解析方法と結果を示し、ついで実験結果との比較を示す。

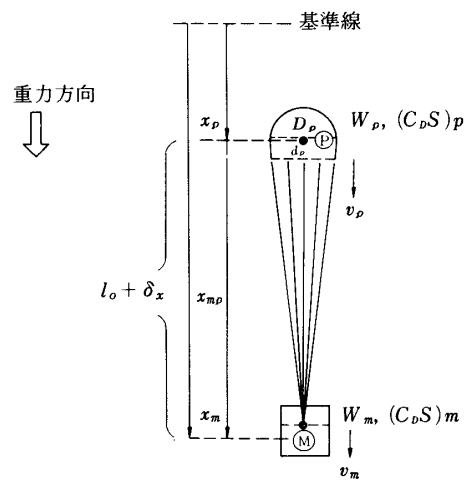


図10 パラシュート放出開傘の様子



#### 4.1 開傘過程の運動方程式

まず、一般的な場合を想定して、降下中の物体（本体）からパラシュートを後方に放出したときの開傘過程を考える（図10）。そして質点モデルとして取扱う。

本体の運動方程式は

$$\frac{W_m}{g} \frac{dv_m}{dt} = W_m - F - \frac{1}{2} \rho (C_D S)_m v_m^2 \quad (1)$$

$$\frac{dx_m}{dt} = v_m \quad (2)$$

パラシュートの運動方程式は

$$\frac{d}{dt} \left\{ \left[ \frac{W_p}{g} + \rho V_{ap} \right] v_p \right\} = W_p + F - \frac{1}{2} \rho (C_D S)_p v_p^2 \quad (3)$$

$$\frac{dx_p}{dt} = v_p \quad (4)$$

ここで  $t$  は時間、 $x$  は基準線から物体の重心までの距離、 $v$  は速度、 $W$  は重量、 $C_D S$  は抵抗の有効面積、 $\rho$  は空気密度、 $g$  は重力加速度、 $V_{ap}$  はパラシュートの見掛の質量  $M_{ap} = \rho V_{ap}$  に対応する見掛の体積である。添字  $m, p$  はそれぞれ本体およびパラシュートを表わす。また  $F$  はパラシュート索全部をまとめてみたときの張力で、ここでは索全体の平均的バネ定数を  $k$  とし、

$$F = \begin{cases} k \delta x & \delta x \geq 0 \\ 0 & \delta x < 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$\delta x = x_m - x_p - l_0, \quad l_0: \text{索の自然長} \quad (6)$$

で与えられると仮定する。実際の  $F$  は  $\delta x$  の大きくなるところで  $\delta x$  に関する線形性からずれてくるとともに  $\delta x$  の時間微分や  $\delta x$  の履歴にも依存することが指摘されており、より正確な解析にはこのような効果をも取り入れるべきである。しかし現時点ではそれらの効果を取り入れるためには実験に依らざるを得ない。

(3)式において、 $\rho V_{ap} = M_{ap}$  は見掛の質量で、パラシュートが開傘するにつれて増加する。文献(1)にならい、パラシュートを傘体公称直径  $D_0$  の平面傘とし、これが図11のように形状変化するとすれば、 $V_{ap}$  は

$$V_{ap} = V_{ap(in)} + V_{ap(out)} = V_{max} \bar{V}_{ap} \quad (7a)$$

$$V_{ap(in)} = V_{max} \left[ \bar{D}_p^3 + \frac{\pi}{4} (1 - \bar{D}_p) (\bar{D}_p^2 + \bar{D}_p \bar{d}_p + \bar{d}_p^2) \left( 1 - \frac{4}{\pi^2} \frac{\bar{d}_p^2}{\bar{L}_s^2} \right)^{1/2} \right] \quad (7b)$$

$$V_{ap(out)} = V_{max} [k_{ap} \bar{D}_p^3] \quad (7c)$$

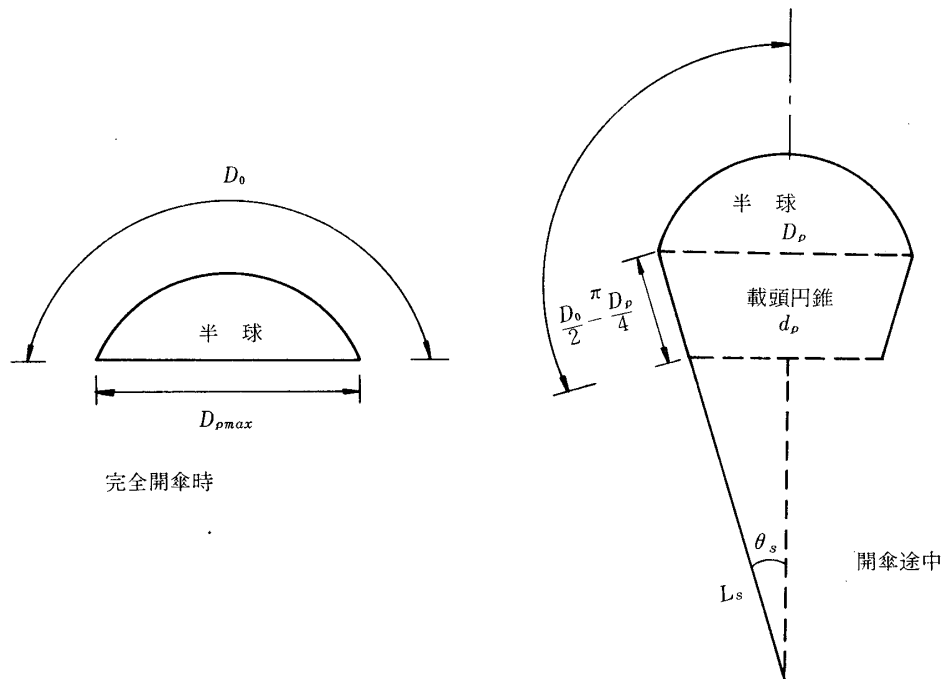


図 11 開傘時のパラシュートの形状モデル (平面傘)

で与えられる. ここで  $\bar{d}_p = \bar{L}_s \bar{D}_p / (\bar{L}_s + 1 - \bar{D}_p)$ ,  $\bar{D}_p = D_p / D_{pmax}$ ,  $\bar{d}_p = d_p / D_{pmax}$ ,  $\bar{L}_s = 2L_s / D_0$ ,  $D_{pmax} = 2 / \pi D_0$ ,  $V_{max} = \pi / 12 D_{pmax}^3$  である. そして  $k_{ap}$  は  $k_{ap} \cong 3/8$  である.

パラシュートの開傘時間  $t_f$  はパラシュートの中に空気が流入し, これが完全に膨むまでの時間として定義されているが, この時間はパラシュート内での質量保存式より求められる. その近似的な結果は

$$t_f = D_0 k_f / v_{p0} \quad (8)$$

と表わされる. ここで  $v_{p0}$  は開傘開始時のパラシュートの速度である. 実際上は, 何らかの方法で一度  $k_f$  を決定しておけばよい. 図 11 のような形状変化モデルの時  $k_f$  の考えられる最も小さい見積りは  $k_f = 2/3 \pi \cong 0.2$  であり, よく用いられる実用的な式としては  $k_f = 65c$  ( $c$  は Effective Porosity) がある. 文献(1)では設計時に  $k_f \cong 6$  を用いることを勧めているが, 開傘の仕方によってはこれより小さくなることも予想される.

(3) 式の  $(C_D S)_p$  も開傘とともに増加するが, 今これが

$$(C_D S)_p = (C_D S)_{p0} + [(C_D S)_{pmax} - (C_D S)_{p0}] (t/t_f)^n \quad (9a)$$

と表わされると仮定する. ただし開傘開始時を  $t=0$  とする. ここで  $(C_D S)_{p0}$  および  $(C_D S)_{pmax}$  はパラシュートの開傘開始時および終了時におけるパラシュートの有効面積である. さらに,  $\overline{(C_D S)}_p = (C_D S)_p / (C_D S)_{pmax} = \bar{D}_p^2$ ,  $\overline{(C_D S)}_{p0} = (C_D S)_{p0} / (C_D S)_{pmax} = D_{p0}^2$  とおくことができるとすれば

$$\overline{(C_D S)}_p = \bar{D}_p^2 = \bar{D}_{p0}^2 + (1 - \bar{D}_{p0}^2)(t/t_f)^n \quad (9b)$$

と表わされる。

開傘過程の運動は(1)～(9)より求めることができる。しかし解の見通しをよくし、かつパラメタの影響を調べるためには、これらの式を無次元化して取扱う方がより適切である。

$T = t/t_f$ ,  $\bar{x}_m = x_m/v_0 t_f$ ,  $\bar{x}_p = x_p/v_0 t_f$ ,  $\bar{v}_m = v_m/v_0$ ,  $\bar{v}_p = v_p/v_0$ ,  $\delta\bar{x} = \delta x/v_0 t_f$ ,  $\bar{v}_{m0} = v_{m0}/v_0 = 1$ ,  $\bar{v}_{p0} = v_{p0}/v_0$ ,  $k_D = (C_D S)_{pmax}/D_0^3$ ,  $k_v = V_{max}/D_0^3$ ,  $\overline{(C_D S)}_m = (C_D S)_m/(C_D S)_{pmax}$ ,  $\alpha_1 = gD_0/v_0^2$ ,  $\alpha_2 = kD_0^2 g/(W_p v_0^2)$ ,  $\alpha_3 = \rho g D_0^3/W_p$ ,  $W_{pm} = W_p/W_m$  とおくと(1)～(9)より,

$$\frac{d\bar{v}_m}{dT} = \alpha_1 k_f / \bar{v}_{p0} - (\alpha_2 W_{pm} k_f^2 / \bar{v}_{p0}^2) \delta\bar{x} - (\alpha_3 W_{pm} \overline{(C_D S)}_m k_D k_f / 2\bar{v}_{p0}) \bar{v}_m^2, \quad (10a)$$

$$\frac{d\bar{x}_m}{dT} = \bar{v}_m \quad (10b)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dT} \{ [1 + \alpha_3 k_v \bar{V}_{ap}] \bar{v}_p \} \\ = \alpha_1 k_f / \bar{v}_{p0} + (\alpha_2 k_f^2 / \bar{v}_{p0}^2) \delta\bar{x} - (\alpha_3 k_D k_f / 2\bar{v}_{p0}) \bar{v}_p^2 \bar{D}_p^2, \end{aligned} \quad (10c)$$

$$\frac{d\bar{x}_p}{dT} = \bar{v}_p \quad (10d)$$

$$\delta\bar{x} = \bar{x}_m - \bar{x}_p - l_0/v_0 t_f \quad (10e)$$

$$\bar{D}_p^2 = \begin{cases} \bar{D}_{p0}^2 + (1 - \bar{D}_{p0}^2) T^n, & 0 \leq T \leq 1 \\ 1, & T > 1 \end{cases} \quad (10f)$$

初期条件は  $\delta\bar{x} = 0$  を開傘開始時 ( $T = 0$ ) にとり、そのときの本体の速度  $v_{m0}$  を  $v_0$  にとって,

$$\bar{v}_{m0} = 1, \bar{v}_{p0} = v_{p0}/v_0, \bar{x}_p = 0, \bar{x}_m = l_0/v_0 t_f, \bar{D}_{p0} = \bar{v}_{p0} \text{ に対応した値}, \quad (11)$$

この条件で(10)を解くと  $\delta\bar{x}$  が求まるが、その極大値を  $\delta\bar{x}_{max}$  とし、これに対応する張力を  $F_0 = k v_0 t_f \delta\bar{x}_{max}$ , さらに  $F_0$  に対応する荷重係数を  $X_0 = F_0 / (1/2 \rho v_0^2 (C_D S)_{pmax})$  とすると  $X_0 = (2\alpha_2/\alpha_3)(k_f/k_D)(\delta\bar{x}_{max}/\bar{v}_{p0})$  と表わされる。

#### 4.2 一般的な計算結果

平面傘のとき  $k_D = 0.6$ ,  $k_v = 0.0675$  である。その他の数値として  $\bar{L}_s = 2$ ,  $\overline{(C_D S)}_m = 0.0833$ ,  $\overline{(C_D S)}_{p0} = \bar{D}_{p0}^2 = 0.01$ ,  $\bar{v}_{m0} = 1.0$ ,  $\bar{v}_{p0} = 0.75$ ,  $W_{pm} = 0.05$ ,  $W_p = 5 \text{ kg}$ ,  $v_0 = 52 \text{ m/sec}$ ,  $D_0 = 5 \text{ m}$ ,  $k = 4000 \text{ kg/m}$ ,  $\rho/\rho_{SL} = 0.45$  ( $\rho_{SL}$  は海面大気密度) とした場合の例

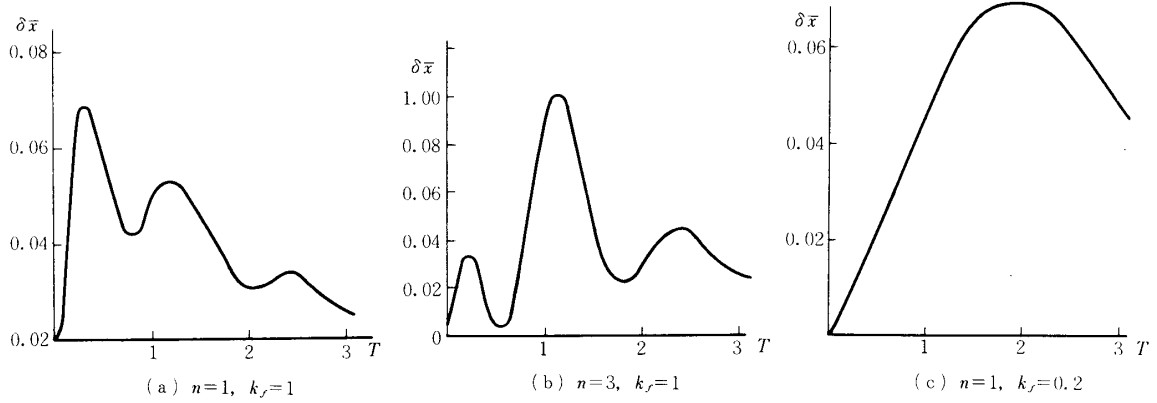


図12  $\delta \bar{x}$  の計算例

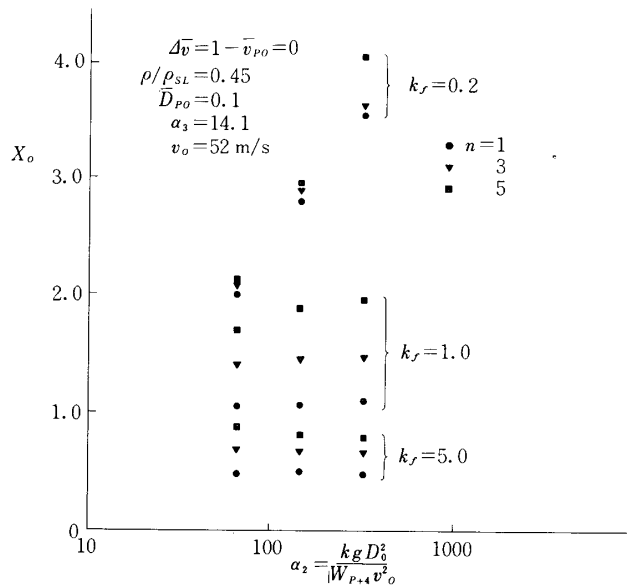


図13(a)  $X_0$  の計算例 ( $n, k_f$  の効果)

を 図 12 に 示 す . 図 12 ( a ) は  $n = 1, k_f = 1$  の 場 合 で 初 め の 二 つ の 極 大 値 に 対 応 す る 荷 重 係 数 は  $X_{0(I)} = 1.7, X_{0(II)} = 1.3$  で 有 る . ( b ) は  $n = 3, k_f = 1$  の 場 合 で , こ の 場 合 は  $X_{0(I)} = 0.8, X_{0(II)} = 2.4$  で 有 る . ( c ) は  $n = 1, k_f = 0.2$  の 場 合 で , こ の 場 合 は 極 大 値 は 一 つ し か な く  $X_0 = 3.4$  で 有 る . ( a ) , ( b ) に お け る  $X_{0(I)}$  は 主 と し て  $\Delta \bar{v} = \bar{v}_{m0} - \bar{v}_{p0} \neq 0$  に 起 因 す る ス ナ ッ チ 力 に 対 応 し た も の で 有 り ,  $X_{0(II)}$  は 主 と し て 傘 体 が 開 傘 し て 行 く こ と に 起 因 す る 開 傘 力 に 対 応 し た も の で 有 る . ( c ) の 場 合 は  $k_f$  が 非 常 に 小 さ く て 開 傘 時 間 が 短 く ス ナ ッ

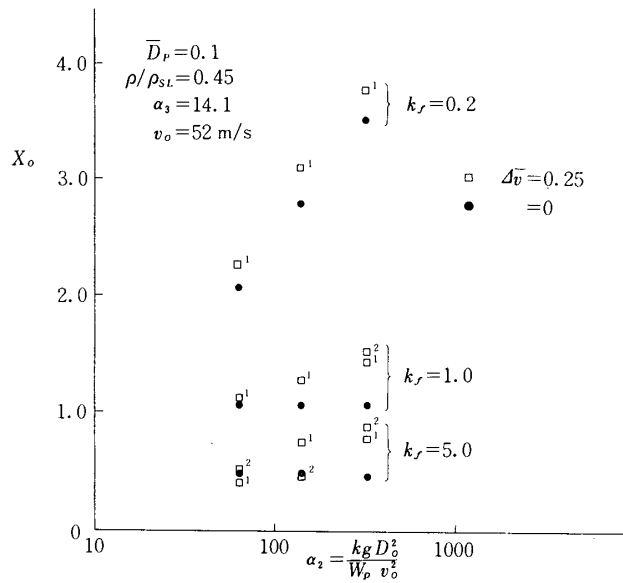


図 13 (b)  $X_0$  の計算例 ( $\Delta v$ ,  $k_f$  の効果)

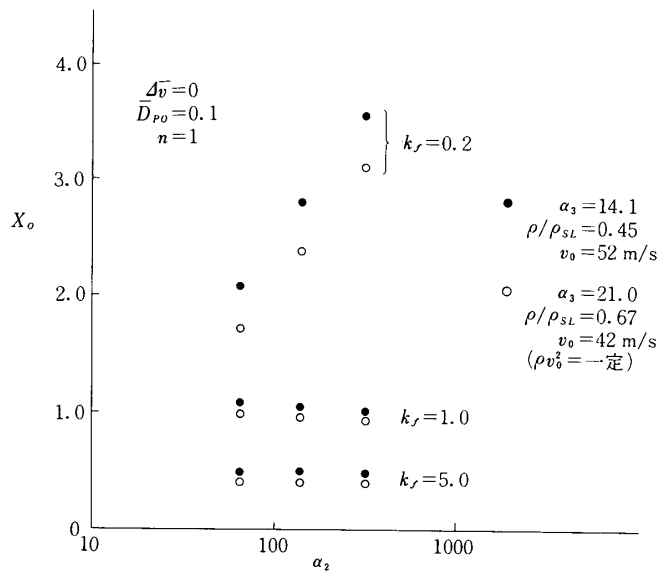


図 13 (c)  $X_0$  の計算例 ( $\rho/\rho_{SL}$ ,  $k_f$  の効果)

チ力は消えてしまい、開傘力に対応した  $X_0$  だけとなっている。ここでの結果から  $X_0$  は  $n$ ,  $k_f$  に強く依存することがわかる。

さらに、今すこし数値を変えた場合の  $X_0$  の最大値を図 13 に示す。ただし、 $W_{pm}$ ,  $D_0$  は前例と同じである。この程度のおときは  $X_0$  への影響は無視できることが確かめられる。図

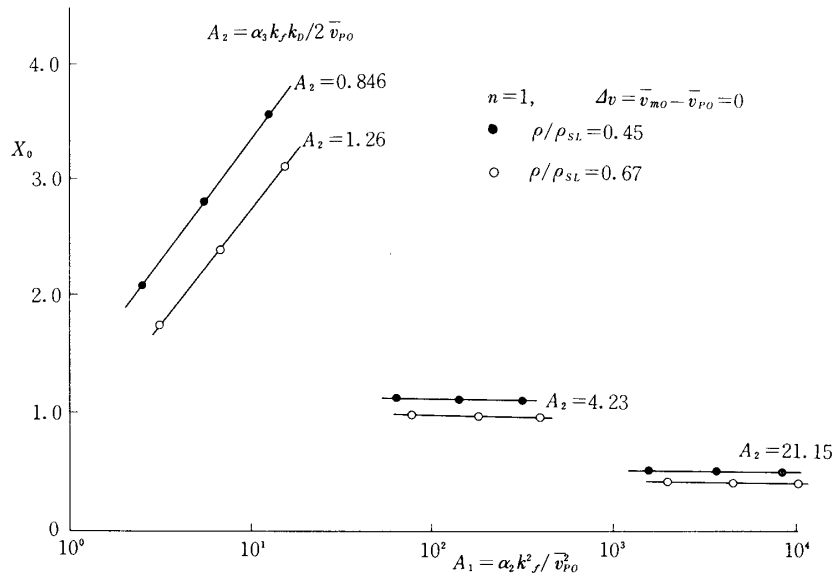


図13(d)  $X_0$  の計算例 ( $A_1, A_2$  の依存性)

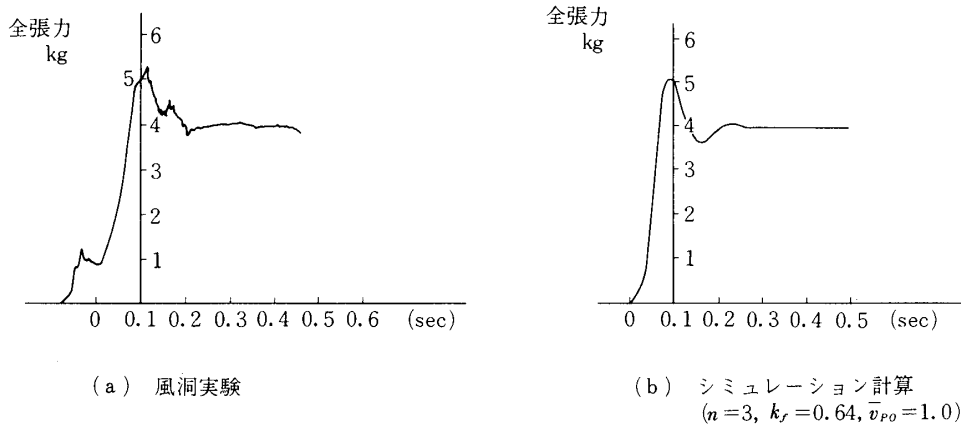


図14 開傘過程の風洞実験とシミュレーション計算

( $k=50 \text{ kg/m}, W_p=0.3 \times 10^{-1} \text{ kg}, (C_D S)_{pmax}=0.624 \text{ m}^2,$   
 $D_0=1.13 \text{ m } \phi, v_0=10 \text{ m/sec}$ )

13(d) より  $X_0$  は  $A_1 = \alpha_2 k_f^2 / \bar{v}_{p0}^2$  および  $A_2 = \alpha_3 k_f k_D / 2 \bar{v}_{p0}$  に強く依存することが分かる。

### 4.3 風洞実験とシミュレーション計算の比較

開傘過程を細かく調べるため、8本のナイロン索をもつ  $D_0=1.13 \text{ m } \phi$  ( $D_{pmax}=0.72 \text{ m } \phi$ ) の平面傘を用いて風洞実験が行なわれた。8本のナイロン索は  $l_0 \cong 0.7 \text{ m}$  の所で一つに束ねられ、さらにこれが減速機構試験装置のスチールワイヤ索の一つに繋がられ、風速  $10 \text{ m/}$

sec の気流中における開傘過程の張力の履歴が測定された。その結果を図14(a)に示す。この例では  $X_0 = 1.3$  である。

この実験のシミュレーション計算が4.1にならって行なわれた。ただし、実験における開傘運動の方向は重力の向きと直交しており、また運動するのはパラシュートの部分だけで、いわゆる本体は風洞に固定されているので、シミュレーション計算では  $\alpha_1 = W_{pm} = 0, v_m = 1.0$  として(10)が解かれた。パラシュートの数値としては実測に基づいて  $k = 50 \text{ kg/m}, W_p = 0.33 \times 10^{-1} \text{ kg}, (C_D S)_{pmax} = 0.624 \text{ m}^2, D_0 = 1.13 \text{ m}\phi$  (この場合  $k_D = 0.49$ ),  $\bar{L}_s = 1.2, V_{max} = 0.98 \times 10^{-1} \text{ m}^3$  とおき、さらに気流条件として  $v_0 = 10 \text{ m/sec}, \rho = 0.125 \text{ kg sec}^2/\text{m}^4$ , 初期条件として  $\bar{v}_{p0} = 1.0, \bar{D}_{p0} = 0, \delta \bar{x} = 0$  とおき、 $n$  および  $k_f$  をいろいろ変えて数値計算が行なわれ、実験結果をよく表わすような  $n, k_f$  が探された。図14(b)は  $n = 3, k_f = 0.64$  のときの計算結果で比較的良好に実験結果の張力履歴を表わしている。

### 5. 制御つきパラシュートシステムの開発計画

まず、代表的なパラシュートのモーメント係数  $C_m$  を図15に示す [1]。観測機器の重心がパラシュートの対称軸上にある場合、A型(Solid Flat), B型(Slotted High Porosity), C型(Ribbon), D型(Guide Surface) の各パラシュートに対し、 $C_m = 0$  に対応した迎角

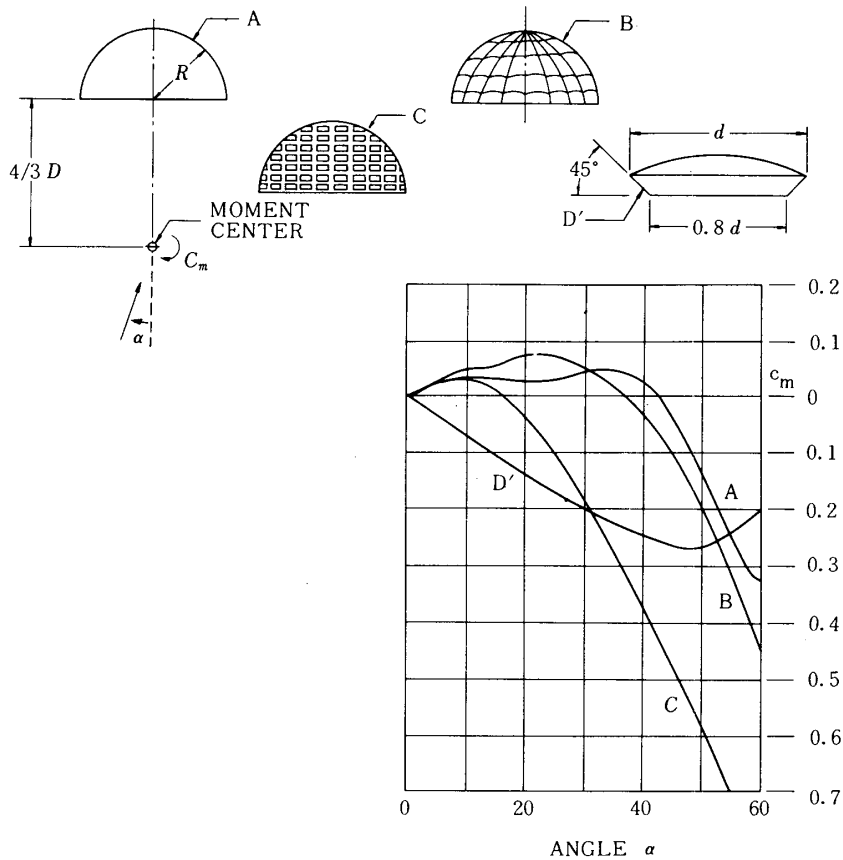


図15 種々のパラシュートのピッチングモーメント係数  $C_m^{(1)}$

$\alpha$  に着目してグライディング角（ただし垂直下方と降下径路のなす角）を求めると、A、B型では約  $40^\circ$ 、C型では約  $15^\circ$  であることが分かる。更にパラシュートと観測機器の相対位置を変えることによって、グライディング角はよりフレキシブルな量となる。とにかくこれらのことからパラシュートによってもグライディング角が  $40^\circ$  程度の径路なら現実しうるものと考えられる。

一方図16は内の浦における代表的なロケット打上げ日よりの風データを使って、軌道係数  $6.5 \text{ kg/m}^2$  のパラシュートシステムを高度  $20 \text{ km}$  から緩降下させた場合の結果である。この程度のドリフト修正は約  $45^\circ$  までのグライディング角があればよいことになる。したがってパラシュートのグライディングで風のドリフト分を修正することは十分可能と推測される。

このようなシステムを今後開発して行くにあたっては

- 1) パラシュートの動的特性の同定
- 2) 索長を制御量とした時の動的特性の同定
- 3) 制御量及び到達可能目標の限界値の決定
- 4) 地上設備及び誘導方法の決定
- 5) システム方程式の単純化
- 6) 制御則の決定
- 7) システム全体の数値シミュレーション及び風洞試験
- 8) 実機試験

の順に段階を追って開発研究を進めて行くことが必要である。最終的な実機用の全体システムは図17のような構成となるであろう。このようなシステムは Goodrick [2] によっても研究されてきているが、ガイダンスをどのような方式にするか、あるいは地上（海上船舶）

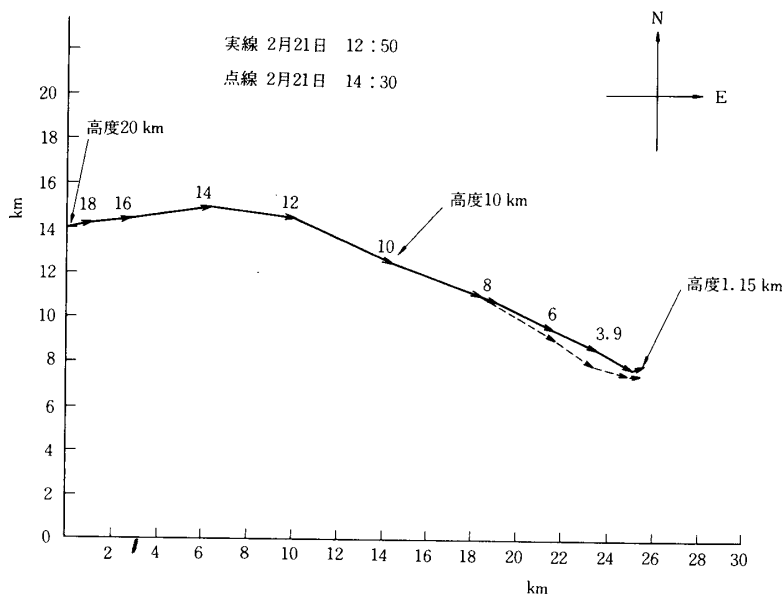


図16 パラシュートの風によるドリフト（水平面投影軌跡）



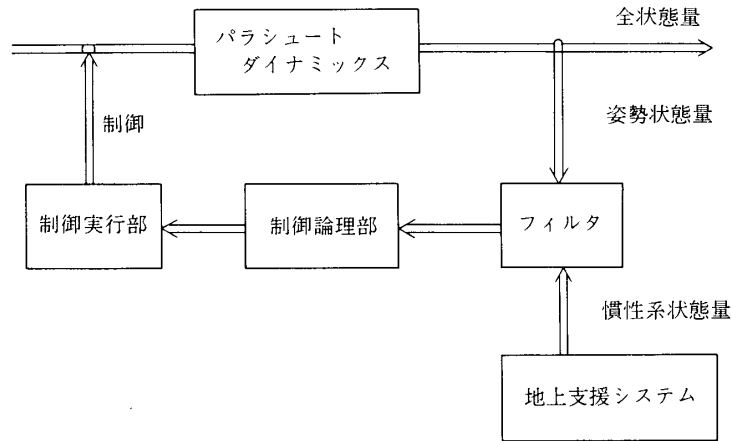


図17 パラシュートによる誘導制御システム

設備にどの程度依存するかによって種々の方法が考えられる。

## 6. おわりに

以上、減速機構試験装置およびこれを用いた予備的な実験を中心に述べた。今後は同装置を用いて揚力をもつパラシュートの動的特性を解明するとともに、制御論理部を早急に仕上げ、制御つきパラシュートシステムのシミュレーション実験を行なう所存である。

最後に2m風洞における実験に際しご便宜を計って下さった本研究所航空力学部小口伯郎教授に深く感謝する。  
1980年11月 新設部(工学)

## 参考文献

- [1] "Performance of and Design Criteria for Deployable Aerodynamic Decelerators" (The Parachute Handbook). Tech. Rep. ASD. TR. 61. 579, 1963
- [2] Goodrick, T.F.: Simulation Studies of the Flight Dynamic of Gliding Parachute Systems, Proc. AIAA 6th Aerodynamic Decelerator and Balloon Technology Conference, Houston (1979), pp.11 ~ 16.