

ISSN 0452-2982  
UDC 533.666

# 航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-671

## 空気封入式パラグライダー模型の風試結果について

奥山政広・岩崎昭人・藤田敏美  
藤枝郭俊・高橋 侔・玉置元昭  
宮下純一

1994年11月

航空宇宙技術研究所  
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

## 目 次

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 概 要 .....               | 1  |
| 主な記号 .....              | 2  |
| 1. はじめに .....           | 2  |
| 2. 供試体形状と支持方法 .....     | 2  |
| 3. 風試方法 .....           | 3  |
| 4. 風試結果と検討 .....        | 4  |
| 4.1 データ処理 .....         | 4  |
| 4.2 傘内圧の影響 .....        | 4  |
| 4.3 拘束と非拘束試験の特性比較 ..... | 4  |
| 4.4 非拘束傘の変位 .....       | 4  |
| 4.5 縦の空力特性 .....        | 7  |
| 4.6 横滑り角に対する特性 .....    | 8  |
| 4.7 操縦索による作用 .....      | 10 |
| 4.8 両操縦索による特性 .....     | 13 |
| 4.9 スタビライザーの影響 .....    | 14 |
| 5. ま と め .....          | 15 |
| 文 献 .....               | 15 |

# 空気封入式パラグライダー模型の風試結果について<sup>\*1</sup>

奥山 政 広<sup>\*2</sup>    岩 崎 昭 人<sup>\*2</sup>    藤 田 敏 美<sup>\*2</sup>  
藤 枝 郭 俊<sup>\*2</sup>    高 橋 倅<sup>\*2</sup>    玉 置 元 昭<sup>\*3</sup>  
宮 下 純 一<sup>\*4</sup>

## Wind Tunnel Investigation of Paraglider Models with a Closed Canopy

Masahiro OKUYAMA<sup>\*2</sup>, Akihito IWASAKI<sup>\*2</sup>, Toshimi FUJITA<sup>\*2</sup>  
Hirotoshi FUJIEDA<sup>\*2</sup>, Hitoshi TAKAHASHI<sup>\*2</sup>, Motoaki TAMAKI<sup>\*3</sup>  
and Junichi MIYASHITA<sup>\*4</sup>

### ABSTRACT

A Paraglider has been designed for a platform in the stratosphere. To obtain the basic aerodynamic characteristics of the designed paraglider, paraglider models with a real span of 1.2m were manufactured on a scale of about 8%. The Leading edge of the canopy of this model is closed and the closed canopy is filled with compressed air to maintain the shape of the aerofoil section.

The tests were conducted in the NAL 2m×2m Gust Wind Tunnel with closed test section at a wind speed of 10m/s. On the tests, the canopies were conditioned for a bound and unbound strut. Both the forms of the bound and unbound canopies were used to obtain the aerodynamic characteristics and the form of the unbound canopy was used to observe shift of the canopy. As a result, the basic aerodynamic characteristics of the models were obtained, and behavior of the model could be interpreted by the characteristics.

**Key Words :** Aerodynamic Characteristics, Paragliders, Closed Canopy, Wind Tunnel Investigation

### 概 要

成層圏プラットフォームを想定したパラグライダーが考案され、そのパラグライダーの基本空力特性を把握するために、縮尺が8%程度になる実長翼幅1.2mの模型が製作された。この模型は、傘前縁部の空気取り入れ口がなく、閉じた前縁になっていて、翼型を維持するために、傘内部に圧縮空気を封入している。

風洞試験は、2m×2mの固定壁測定部を持つ風洞において、風速を10m/sにして実施された。傘を拘束した状態及び非拘束にした状態で模型の空力特性を取得し、また傘の変位を測量した。その結果、模型の基本的な6分力特性が得られ、この特性から本パラグライダー模型の挙動を理解することができた。

\*1 平成6年9月29日受付 (received 29 September 1994)

\*2 新型航空機研究グループ (Advanced Aircraft Research Group)

\*3 川崎重工業株式会社 (Kawasaki Heavy Industries, Ltd.)

\*4 日本大学理工学部 (College of Science and Technology, Nihon University), 元川崎重工業株式会社

## 主 な 記 号

|                    |  |
|--------------------|--|
| A                  | : 傘の縦横比 (=b/c)                         |
| b                  | : 傘の実長翼幅                               |
| c                  | : 傘の翼弦長                                |
| $C_l$              | : 横揺れモーメント係数                           |
| $C_m$              | : 縦揺れモーメント係数                           |
| $C_n$              | : 偏揺れモーメント係数                           |
| $C_D$              | : 抗力係数                                 |
| $C_{Dtrim}$        | : 釣合い抗力係数                              |
| $C_L$              | : 揚力係数                                 |
| $C_{Ltrim}$        | : 釣合い揚力係数                              |
| $(C_L/C_D)_{max}$  | : 最大揚抗比                                |
| $C_Y$              | : 横力係数                                 |
| $q_\infty$         | : 一様流動圧                                |
| Re                 | : c 基準のレイノルズ数                          |
| S                  | : 傘の翼面積 (=bc)                          |
| $U_\infty$         | : 一様流速度                                |
| x, z               | : 風洞壁に固定した座標系                          |
| x', z'             | : 支持金具に固定した座標系                         |
| X, Y, Z            | : モーメント基準点原点の安定軸系                      |
| XS                 | : $X \cos \alpha_c + Z \sin \alpha_c$  |
| ZS                 | : $-X \sin \alpha_c + Z \cos \alpha_c$ |
| $\alpha_c$         | : 傘中央下面の迎角                             |
| $\alpha_M$         | : 支持金具の迎角                              |
| $\alpha_T$         | : 傘翼端下面線の迎角                            |
| $\alpha_{TU}$      | : 修正していない $\alpha_T$                   |
| $\beta$            | : 横滑り角                                 |
| $dl_{LEFT}$        | : 左操縦索を短くした長さ                          |
| $dl_{RIGHT, LEFT}$ | : 左右操縦索を短くした長さ                         |
| $dC_m$             | : $dl_{LEFT}=0$ の $C_m$ からの変化量         |
| $dC_D$             | : $dl_{LEFT}=0$ の $C_D$ からの変化量         |
| $dC_L$             | : $dl_{LEFT}=0$ の $C_L$ からの変化量         |
| $dC_Y$             | : $dl_{LEFT}=0$ の $C_Y$ からの変化量         |

## 1. は じ め に

宮下により構想されたパラグライダー型成層圏プラットフォーム（通信用として高度20kmの成層圏を巡航するパラグライダー型マイクロ波航空機）は、パラグライダーの持つ構造上の利点と、現代のスポーツ用パラグライダーを改良することによる揚抗比の改善等を特徴にしている。それは、パラグライダーの構造が、引っ張り部材のみにより構成されているため強度的に余裕があり、大型化しても寸法に対する翼面積と重量の二乗三乗法則がなかなか効いてこないと予想される。また、現在のスポーツ用パラグライダー<sup>1)</sup>を、前縁を閉じて密閉した翼型にすることにより、揚抗比と空力安定性の向上が期待できるとしている。実際、

本模型の様にパラグライダーの傘へ内圧をかけるのではなく、通常のラム圧力を使う範囲で、前縁を一部閉じる改善が Lingard の文献<sup>2)</sup>や現在のスポーツ用パラグライダー<sup>1)</sup>の一部に見られる。

この構想によるパラグライダーの基本空力特性を把握するために、今回縦横比1.5と2で縮尺8%程度の模型が製作され、風洞試験が実施された。構想が概念設計の段階なので、製作された模型は実機の厳密な縮尺模型ということではない。この模型は上述の様に、傘前縁部の空気取り入れ口がなく閉じた前縁になっていて、翼型を維持するために、傘内部に圧縮空気を封入している。そのため、この模型を空気封入式パラグライダー模型と呼ぶことにする。

ここでは、得られた風試結果及びそれによる模型の挙動の理解について報告するとともに、得られた空力特性の評価には言及していない。

## 2. 供試体形状と支持方法

本パラグライダー模型は、翼である傘及び傘と支持金具を結ぶ糸の索とから成り立ち、傘の前縁が閉じている事を除けばスポーツ用パラグライダーの構造と同じになっている。供試体は、傘の縦横比Aが1.5と2の2つの模型である。これらの傘は、下側にわん曲する矩形翼であり、わん曲も含める実長翼幅bが1.2mで、翼弦長cがそれぞれ0.8mと0.6mのClark Y-11.7%翼型をかたどる。ここでの縦横比は実長翼幅を使って  $A=b/c$  とし、翼面積Sは  $S=bc$  にしている。整理すると以下のとおりである。

| A   | b[m] | c[m] | S[m <sup>2</sup> ] |
|-----|------|------|--------------------|
| 1.5 | 1.2  | 0.8  | 0.96               |
| 2   | 1.2  | 0.6  | 0.72               |

傘の翼型は、空気を封入することにより維持される。ただ、傘生地からの漏れがあるので、傘内が一定の空気圧になるように圧縮空気を供給した。傘生地はナイロン格子織布にウレタンコートをしたものである。傘の内部は、通気孔を有するリブにより区切られた翼幅方向のセルの列で形づくられる。縦横比1.5の傘のセル数は23で、A=2では35である（図1参照）。

一つ一つのリブには、支持金具からの索が結びつけられている。翼後縁では、左右それぞれ翼端から約40%bのセルに渡って、熊手状に分岐した操縦索を設けている。索はどれも0.5mmφのテトロンひもである。

傘の左右両翼端の下方には、ペナント状のスタビライザー（高さはA=1.5が94mmでA=2が70mm）が取り付けられ、ばたつかないように索に結び付けてある。

支持金具は測定部の床面近くに設置され、メインストラットとピッチングストラットを介して天秤と結合している。傘からの索は、翼幅方向では2段階で左右一対に、翼弦方向では8%c, 30%c, 50%c, 75%cの位置で結び付けられた

索が、傘わん曲の中心点である仮想原点に集中するように絞られて、それぞれ支持金具のピンに索末端の輪で結び付いている。さらに、傘を拘束する場合は、傘中央下面の直線部分を支持金具に固定するため、T字型をした拘束金具を使用している。

空気の注入口は傘中央の下面に設けられており、ビーチボール注入口型をした主注入口と補助注入口 (1.6mmφ) がある。

傘のわん曲の様子も含めて、 $A=2$  の模型、支持金具及び拘束金具を風試中の概形として図1に示す。模型の基準面は、傘下面の直線部分であり、この直線下面を基準に迎角を決める。なお、Clark Y 翼型の翼弦線は直線下面から  $2^\circ$  の角度を持つ。傘と支持金具の間隔を決める索の長さは、傘の基準面と支持金具の索結合部分の直線が平行になるように、そして、傘中央基準面が支持金具の索結合部分から 1m の高さを持つように設定されている。

### 3. 風試方法

使用した風洞は航空宇宙技術研究所の突風風洞で、測定部には  $2\text{m} \times 2\text{m}$  の固定壁カートを用いて一般の低速風洞として利用している。風試での一様流速度  $U_\infty$  は

$$U_\infty = 10\text{m/s}$$

とした。そのときの一様流動圧  $q_\infty$  は約

$$q_\infty = 60\text{Pa}$$

であり、翼弦長基準のレイノルズ数  $Re$  は

$$Re = 5 \times 10^5 \quad (A=1.5)$$

$$Re = 4 \times 10^5 \quad (A=2)$$

の程度となる。

傘への空気は、適当に膨らむまで主注入口から注入し、風試時には補助注入口 (1.6mmφ) からビニールチューブを介して、内圧が一定になるように常時コンプレッサーから圧縮空気を注入した。傘の内圧は、下面の圧力取出口 (1.0mmφ) から圧力センサーに導いて表示した。

風洞試験では拘束試験と非拘束試験を実施している。拘束試験では、拘束金具により傘の中央を拘束し、傘の中央下面基準の迎角  $\alpha_c$  を変化させ 6 分力を測定した。それに対して非拘束試験では、拘束金具を使わず支持金具により迎角を変化させ、6 分力を測定 (ウェイトテアは、拘束金具のモーメント中心付近に傘と索を束ねて行った) している。この際、傘の迎角が定まらないので、傘の翼端下面線につけた 2 点の印を遠方からトランシットにより測量し、傘の翼端迎角  $\alpha_T$  を求めた。風試時の拘束模型の様子を図2に示す。

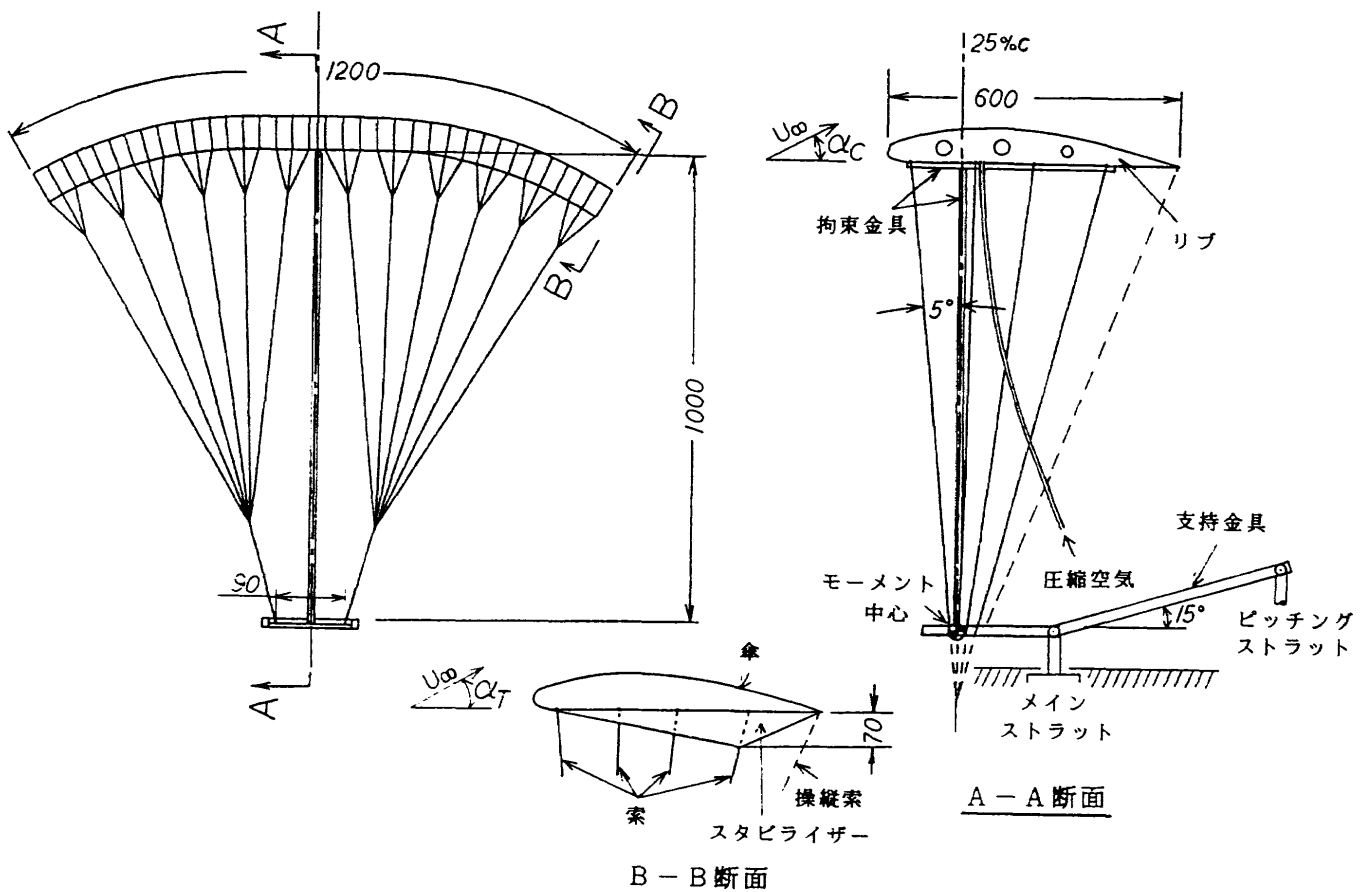


図1 模型 ( $A=2$ )、支持金具、拘束金具の概形

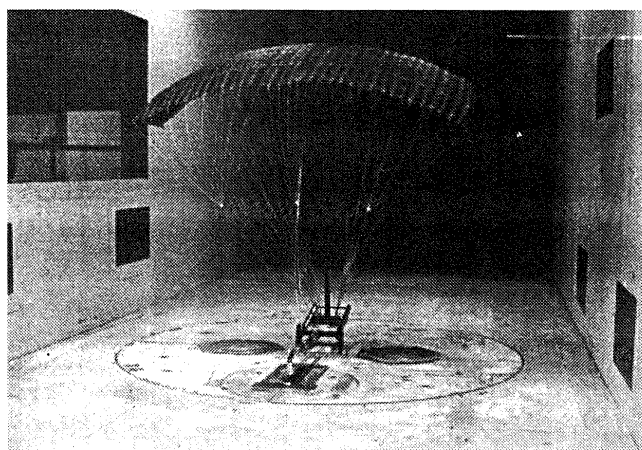


図2 風試時の模型の様子 (A=2, 拘束), 後から見る

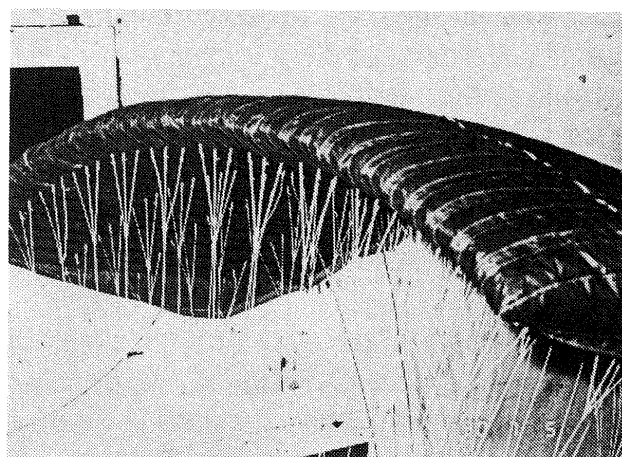


図3 傘前縁の様子 (A=2, 非拘束)

## 4. 風試結果と検討

### 4.1 データ処理

6分力は安定軸系で処理し、係数化には2.で述べた翼面積 $S$ , 翼弦長 $c$ , 実長翼幅 $b$ を使っている。また、データは支持金具と拘束金具の影響を取り除き(模型との相互干渉は取り除いていない), 傘を通常の翼と見なして、吹きおろしによる風洞境界壁修正を施している。モーメント基準点は図1の様に, 傘の1/4翼弦点を支持金具上におろした点である。

天秤と計測系を含めた測定精度の程度は,

揚力係数:  $C_L = \pm 0.01$

抗力係数:  $C_D = \pm 0.006$

縦揺れモーメント係数:  $C_m = \pm 0.005$

横力係数:  $C_Y = \pm 0.006$

横揺れモーメント係数:  $C_l = \pm 0.002$

偏揺れモーメント係数:  $C_n = \pm 0.002$

となる。

### 4.2 傘内圧の影響

A=2の模型を使い, 傘を拘束しない状態で支持金具の迎角を変化させ, 特性に関わる傘内圧の影響を調べた。その結果, 傘の封入空気圧を一樣流動圧の1倍, 1.4倍, 2.6倍, 3.9倍と変化させても, 6分力特性にはほとんど影響がなかった。ただ, 傘の内圧が高いほうが傘の安定(座り)が良いので, 風試中の傘の内圧は一樣流動圧 $q_\infty$ の約3倍とした。

風試中の傘内圧:  $3q_\infty$

A=2における非拘束風試時で, この内圧がかかっている傘前縁の様子が図3である。参考までに, A=1.5模型での傘内圧に対する傘生地からの漏れは, およそ100Paで5.5l/min, 200Paで9l/min, 300Paで11l/minになっている。

### 4.3 拘束と非拘束試験の特性比較

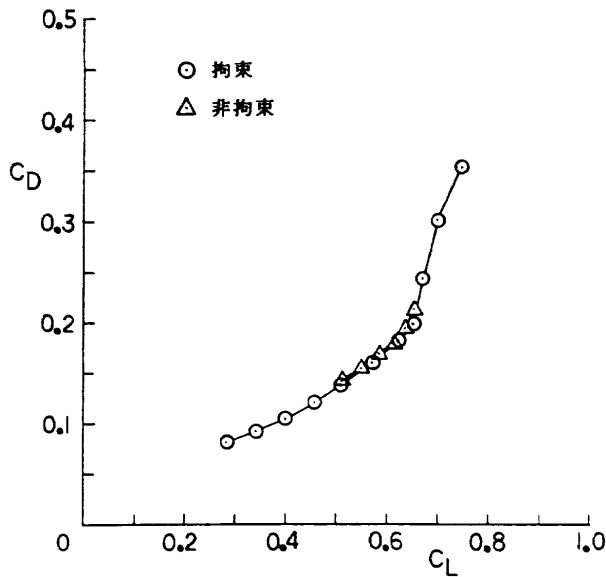
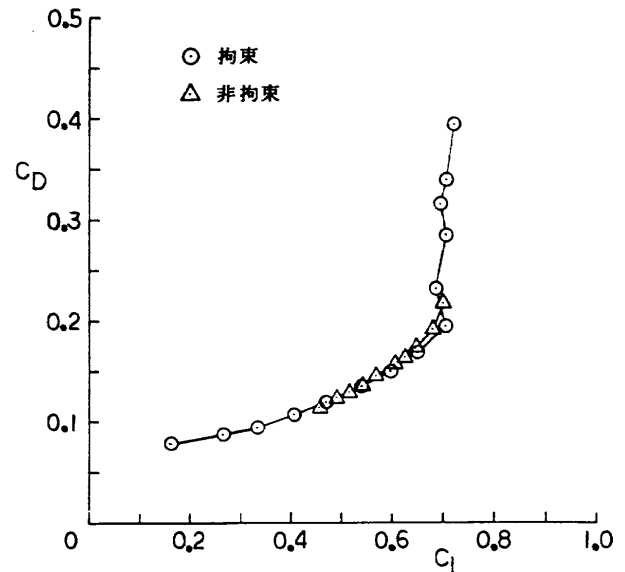
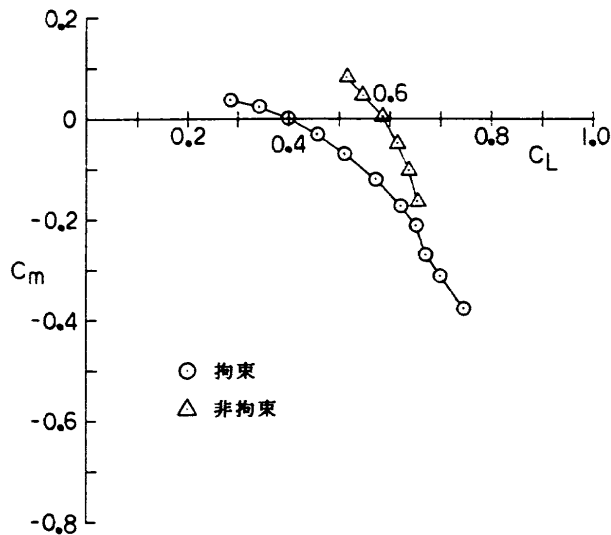
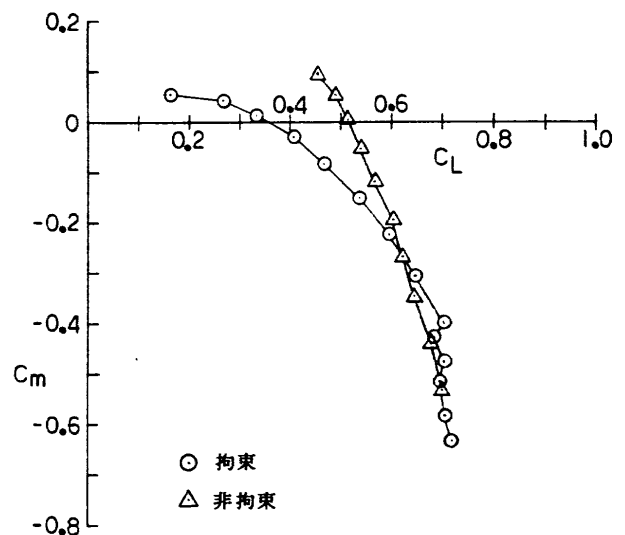
図4及び5では, それぞれ縦横比Aが1.5と2の模型における拘束と非拘束ピッチランの結果を, 揚力係数 $C_L$ による抗力係数 $C_D$ と縦揺れモーメント係数 $C_m$ の特性で比較している。なお, 拘束とは, 傘中央の翼型下面だけをT字型の拘束金具により支持金具に拘束している状態である。両縦横比共に,  $C_D \sim C_L$ 曲線では拘束と非拘束の結果がほぼ一致しているのに対して,  $C_m \sim C_L$ 曲線では釣合い( $C_m = 0$ )揚力係数 $C_{Ltrim}$ が異なり非拘束の結果の方が大きく, 曲線の勾配も急である。

同じ揚力係数で, 拘束と非拘束の縦揺れモーメント係数が異なる理由は, 拘束傘の拘束されない翼端側に歪みが生じて傘が変形することにより, 風圧中心が非拘束傘と違ってくるためと考えられる。その変形も,  $C_D \sim C_L$ 曲線がほぼ一致するので, 局所的に失速が起こらない程度になっていると思う。ここで傘の変形とは, 傘の中央部分を基準にした傘の部分的な歪みのことを意味している。

### 4.4 非拘束傘の変位

非拘束試験では, 傘が拘束されないので傘の変位が生じる。ここでの傘の変位とは, 支持金具で設定した迎角や横滑り角から外れて, 傘全体が移動することを意味する。それに対して, 拘束試験では傘を拘束しているので, 支持金具の迎角と傘の迎角が一致し, 傘の変位はない。ただし, 4.3で述べたとおり傘は幾らか変形をする。

迎角によるこの傘の変位を調べるために, 縦横比2で非拘束風試を実施した。それは, 傘の左翼端下面線上に印した2か所(翼弦の約8%と50%位置)の点軌跡を直線で結び, 支持金具の変化によるピッチランの結果として図6に記した。図中の座標 $x-z$ 系は, 支持金具の迎角 $\alpha_M$ が $0^\circ$ のときに, モーメント基準点を原点に流れ方向を $x$ , 高さ方向を $z$ に取った, 風洞測定部に固定した座標系である。また,  $x'-z'$ 系は $\alpha_M = 0^\circ$ 時の $x-z$ 系を支持金具に固定した,


 図4 拘束と非拘束の特性比較,  $A=1.5$ 

 図5 拘束と非拘束の特性比較,  $A=2$ 


支持金具と共に動く座標系である。

$x-z$  系で得られた各 2 点の座標から算出した迎角を、翼端迎角  $\alpha_{TU}$  として表す。これは、近似式で  $\alpha_{TU}=0.32\alpha_M+6.99$  ( $\alpha_M=-8^\circ\sim 20^\circ$ ) の関係になっている。 $x'-z'$  系で、各 2 点を直線で結んだ軌跡を見ると、この直線が  $x'$  軸と平行になるとき  $\alpha_M$  と  $\alpha_{TU}$  が同じ値を取る。それゆえに、 $\alpha_{TU}=9.6^\circ$  以下では、翼端は下流に押しやられ頭上げの形状になり、 $\alpha_{TU}$  が小さいほどこれが顕著に現われる。また、 $\alpha_{TU}=10.8^\circ$  以上では、翼端は上流に引っ張られ頭下げの形状になって、 $\alpha_{TU}$  が大きいほどこれが顕著に現われている。

非拘束の傘においては、部分的な拘束がないので変形がなく、傘全体が上記の翼端と同じ様な傾向の変位をしていると思われる。ただ、翼端での変位測定だけなので一概には言えない。このような変位は、縦揺れモーメントが原因になって、傘と索の結合部の柔らかさ及び索と支持金具の自

由結合により引き起こされると考えられ、次の様に理解できる。図 7 の説明図において、索の両端結合部分が柔らかいので、頭上げモーメントが傘に作用していると、傘は頭上げになり、索と支持金具の結合部を中心に、傘の揚力による張力で張り詰めている索を半径として、傘と索の結合部は円弧を描き、傘は頭を上げ後方に変位した状態になる。頭下げモーメントが作用している場合はこの逆で、傘は頭を下げかつ前方に変位した状態になる。

そこで縦揺れモーメント特性を見るために、縦横比 2 の  $C_m\sim\alpha_{TU}$  曲線を図 8 に示した。ここでの  $C_m$  と  $\alpha_{TU}$  は、別々に測定した結果であり、 $\alpha_M$  を介して結び付けてある。この曲線は、図 6 の変化点の境となる  $\alpha_{TU}\approx 10^\circ$  付近にある  $\alpha_{TU}=8.9^\circ$  で、 $C_m=0$  になっている。それより小さい  $\alpha_{TU}$  では頭上げモーメントになり、 $\alpha_{TU}$  が小さいほどそのモーメントは大きい。また、 $\alpha_{TU}=8.9^\circ$  より大きい  $\alpha_{TU}$  では、

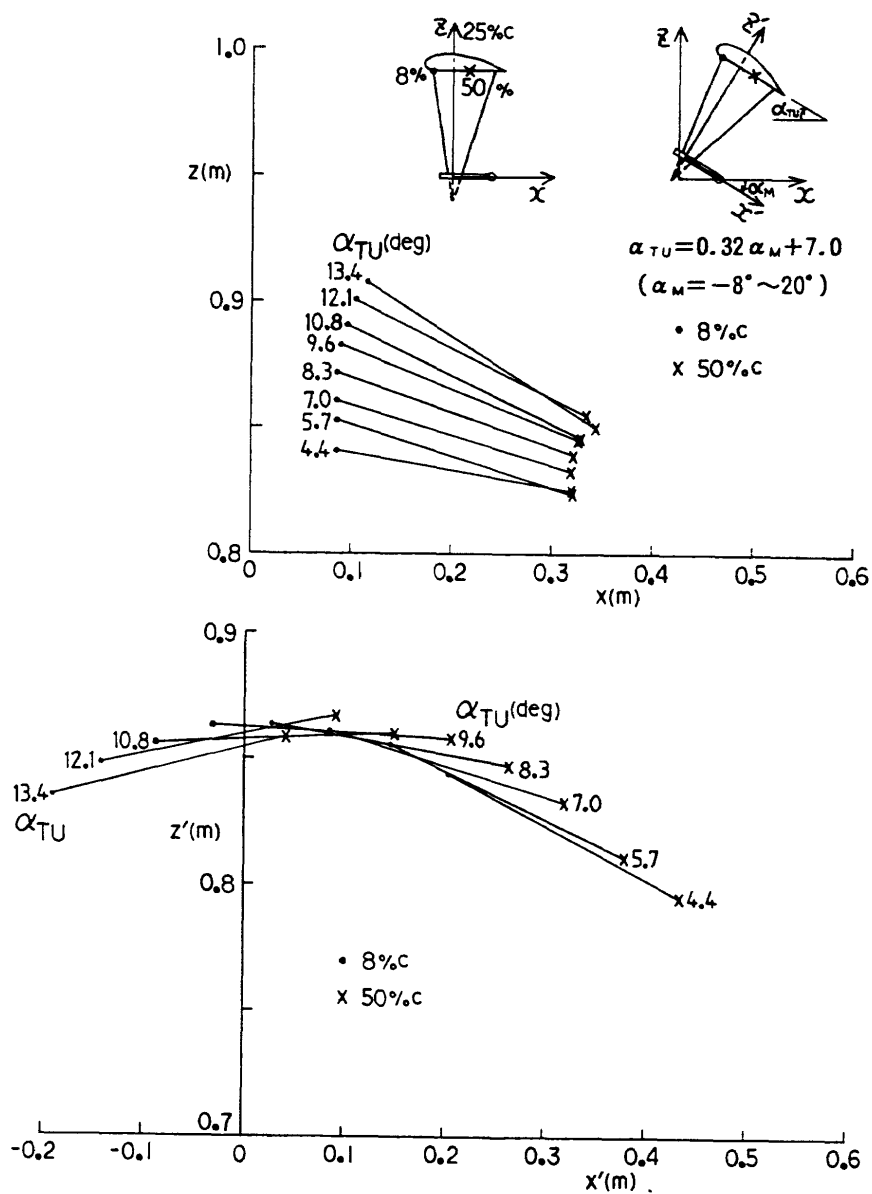


図6 非拘束傘の左翼端面線上の2点(・: 8%c, ×: 50%c)による変位,  $A=2$

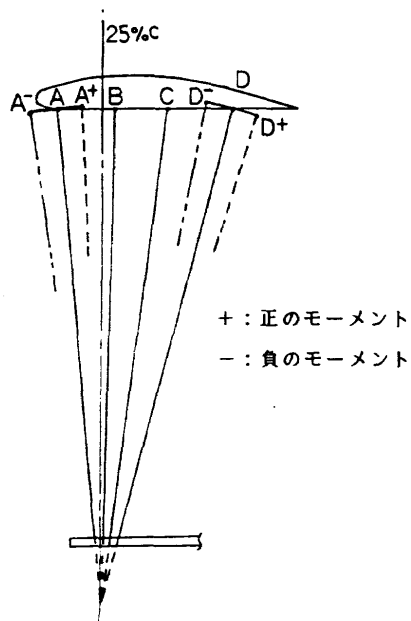


図7 変位と縦揺れモーメントの関係説明図

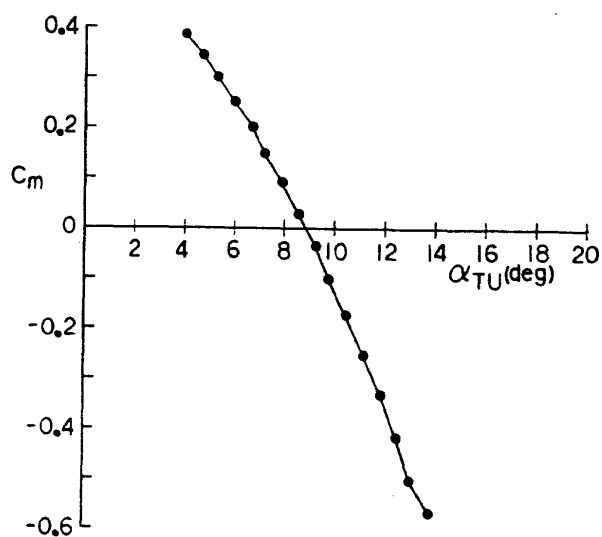


図8 非拘束での翼端迎角に対する縦揺れモーメント係数,  $A=2$



頭下げモーメントになり、 $\alpha_{TU}$  が大きいほどそのモーメントは大きい。これに先の理解を適用すると、傘の変位の現象が説明できる。

非拘束試験では、上述の変位が傘に生じており、実機でも同様な変位が生ずると思われる。それに対して、拘束試験で傘の変位を拘束する目的は、ある操作を傘に作用させた場合、その操作により傘が変位する前の模型に働く力を測定するためである。非拘束試験では、操作によって傘が変位した後の模型に働く力を測定することになる。また、使用した翼型による傘の特性を調べる場合でも、非拘束傘が自立できない領域も拘束傘では調べることができる。ただし、どちらも拘束傘が幾らか変形することを考慮に入れる必要がある。

#### 4.5 縦の特性

縦横比 1.5 と 2 の非拘束における模型の縦の空力特性を、

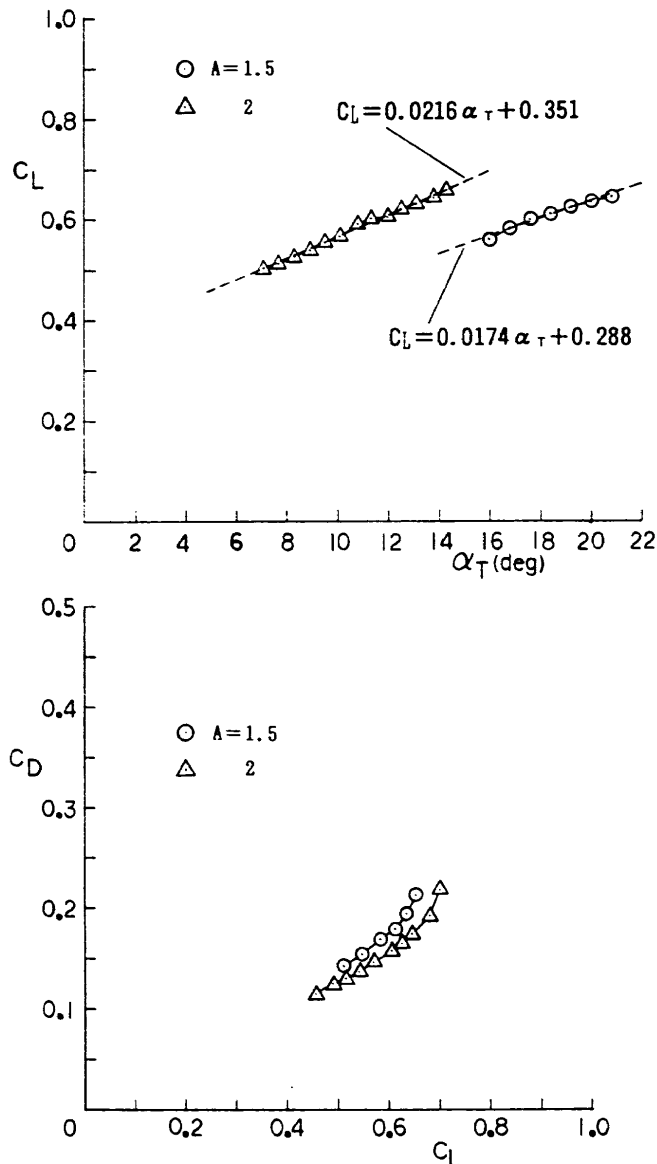


図9 縦横比 1.5 と 2 の揚力及び抗力特性 (非拘束)

図9と10に示す。図9の  $C_L \sim \alpha_T$  特性では、近似式が

$$C_L = 0.0174\alpha_T + 0.288 \quad (A=1.5)$$

$$C_L = 0.0216\alpha_T + 0.351 \quad (A=2)$$

により与えられる。なお、迎角は [deg.] 表示であり、以後出てくる迎角も同様である。参考までに、境界壁修正を施していない翼端迎角  $\alpha_{TU}$  及び支持金具の迎角  $\alpha_M$  の関係は

$$\alpha_{TU} = 0.38\alpha_M + 15.93 \quad (A=1.5)$$

$$\alpha_{TU} = 0.29\alpha_M + 7.28 \quad (A=2)$$

の近似式で得られる。これらの近似式は、索の調整しただけで幾らか変化する。 $C_L \sim \alpha_T$  特性において、縦横比 1.5 の  $C_L$  は  $\alpha_T$  の大きい方に存在している。また、近似式からもわかるように、両縦横比の揚力傾斜の違いが表されている。さらに、 $C_D \sim C_L$  特性でも、縦横比 2 の方は同一揚力係数に対する抗力係数が小さくなっていて、両縦横比による違いが現われている。

図10は、揚抗比  $C_L/C_D$  及び  $C_m$  の特性を示している。最

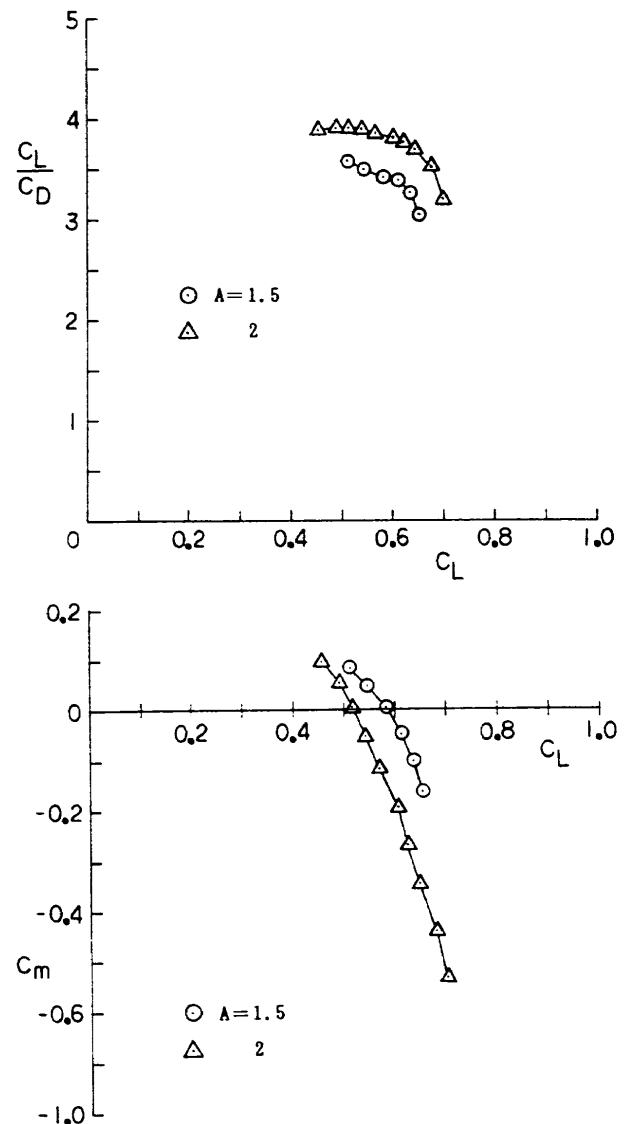


図10 縦横比 1.5 と 2 の揚抗比及び縦揺れモーメント係数 (非拘束)

大揚抗比  $(C_L/C_D)_{\max}$  は縦横比 2 で

$$(C_L/C_D)_{\max} = 3.91 \text{ at } C_L = 0.52 \text{ (} A = 2 \text{)}$$

と極値を持つ。しかし、縦横比 1.5 では極値を表わせない。縦揺れモーメント特性における釣合い揚力係数  $C_{Ltrim}$  と、そのときの抗力係数  $C_{Dtrim}$  (図 9 より) は

$$A = 1.5 : C_{Ltrim} = 0.58 \text{ (} C_{Dtrim} = 0.171 \text{)}$$

$$A = 2 : C_{Ltrim} = 0.52 \text{ (} C_{Dtrim} = 0.132 \text{)}$$

である。縦横比 2 では、釣合い揚力係数で、最大揚抗比を得ている。また、縦の静安定は両縦横比の模型共に安定であり  $C_m = 0$  近傍にて、

$$\partial C_m / \partial C_L = -1.28 \text{ (} A = 1.5 \text{)}$$

$$\partial C_m / \partial C_L = -2.83 \text{ (} A = 2 \text{)}$$

となる。さらに、先に述べた図 4 と 5 の  $C_D \sim C_L$  特性における拘束と非拘束の結果がほぼ一致しているので、揚力係

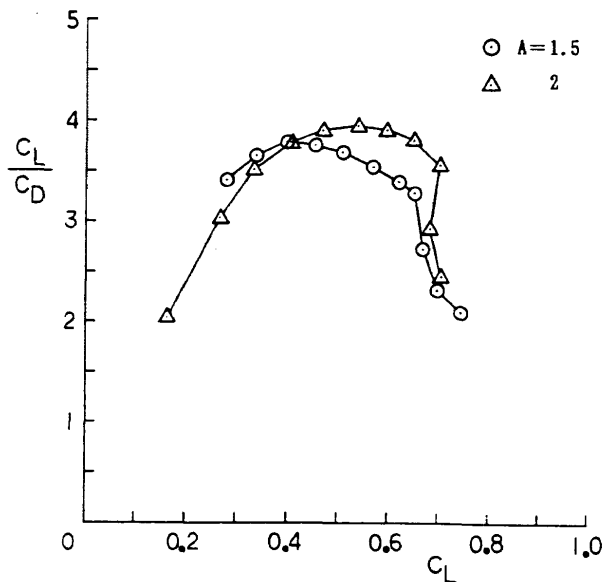


図11 拘束での縦横比 1.5 と 2 の揚抗比

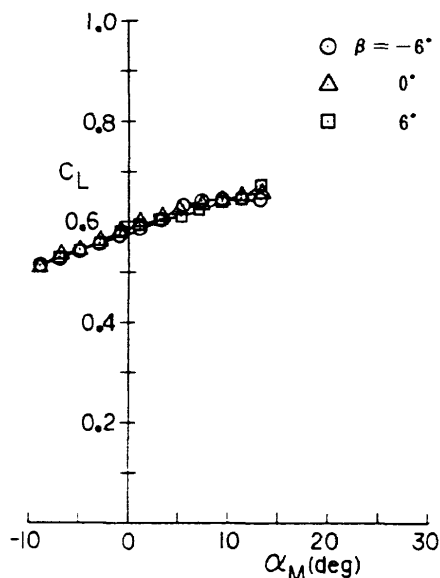


図12 横滑り角による揚力特性 (A=1.5, 非拘束)

数による揚抗比特性も、拘束と非拘束の結果がほぼ一致すると推測できる。そこで、非拘束のときより小さい揚力係数の揚抗比を見るために、拘束による揚抗比の特性を示したのが図11である。縦横比 1.5 の最大揚抗比は、 $C_L = 0.40$  のときに  $(C_L/C_D)_{\max} = 3.78$  となっている。

相当零揚力係数は、 $C_L^2 \sim C_D$  のグラフにより当てはめられた直線回帰式で  $C_L = 0$  を取る  $C_D$  の値とする。非拘束の場合から得られた相当零揚力係数は、縦横比 1.5 及び 2 では、それぞれ 0.054 及び 0.072 になる。それゆえ、釣合い揚力係数における相当零抗力係数以外の抗力係数は、それぞれ全抗力係数の約 68% 及び 45% を占めると見積もられる。

#### 4.6 横滑り角に対する特性

傘の横方向も含めた変位を測定していないので、横滑り角  $\beta$  は天秤の表示 (支持金具の横滑り角) を用いている。まず、縦横比 1.5 と 2 の非拘束における  $\beta$  を媒介にした縦の

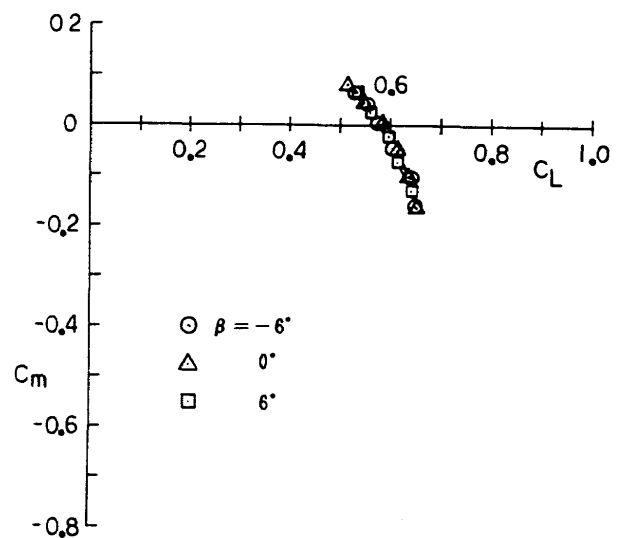
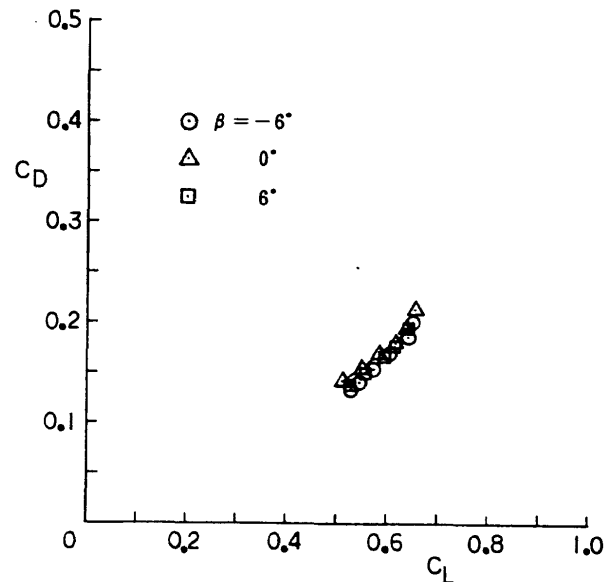


図13 横滑り角による抗力及び縦揺れモーメント特性 (A=1.5, 非拘束)

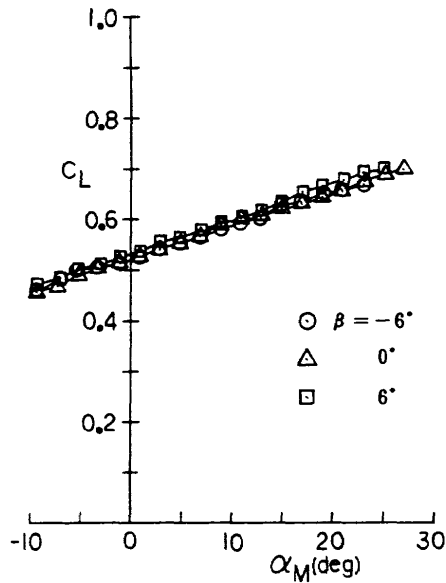


図14 横滑り角による揚力特性 (A=2, 非拘束)

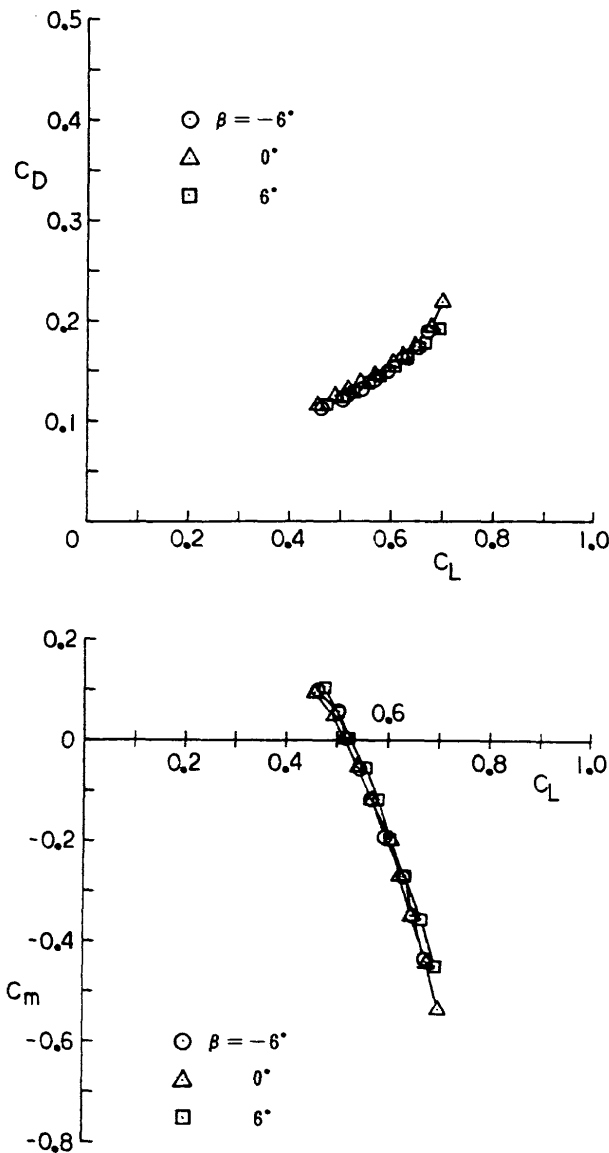


図15 横滑り角による抗力及び縦揺れモーメント特性 (A=2, 非拘束)

特性を示す。縦横比1.5の結果は図12と13であり、縦横比2の結果は図14と15である。それぞれの図には  $\beta = -6^\circ, 0^\circ, 6^\circ$  について示してある。縦横比1.5と2共に、 $C_L \sim \alpha_M, C_D \sim C_L$  及び  $C_m \sim C_L$  特性で、 $\beta$  による変化は小さい。

次に、 $\beta = -6^\circ, 0^\circ, 6^\circ$  を媒介にした、非拘束での横の特性を縦横比1.5は図16に、縦横比2は図17に表す。横力係数  $C_Y \sim C_L$  では、 $\beta$  に対する  $C_Y$  は縦横比1.5の方が大きい。横揺れモーメント係数  $C_l$  では、両縦横比共に、 $C_L$  及び  $\beta$  に対する変化はない。偏揺れモーメント係数  $C_n$  では両縦横比共に、 $\beta$  を持つと  $C_L$  に対して変化する。しかし、それぞれの  $C_{Ltrim}$  近傍で、 $C_n = 0$  となっている。

傘非拘束の風試結果は、 $\beta$  を与えた場合  $\beta$  による影響を受けて、模型が変位した結果の形状から得られる特性となる。 $\beta$  による模型の変位前の特性を調べるために、傘拘束

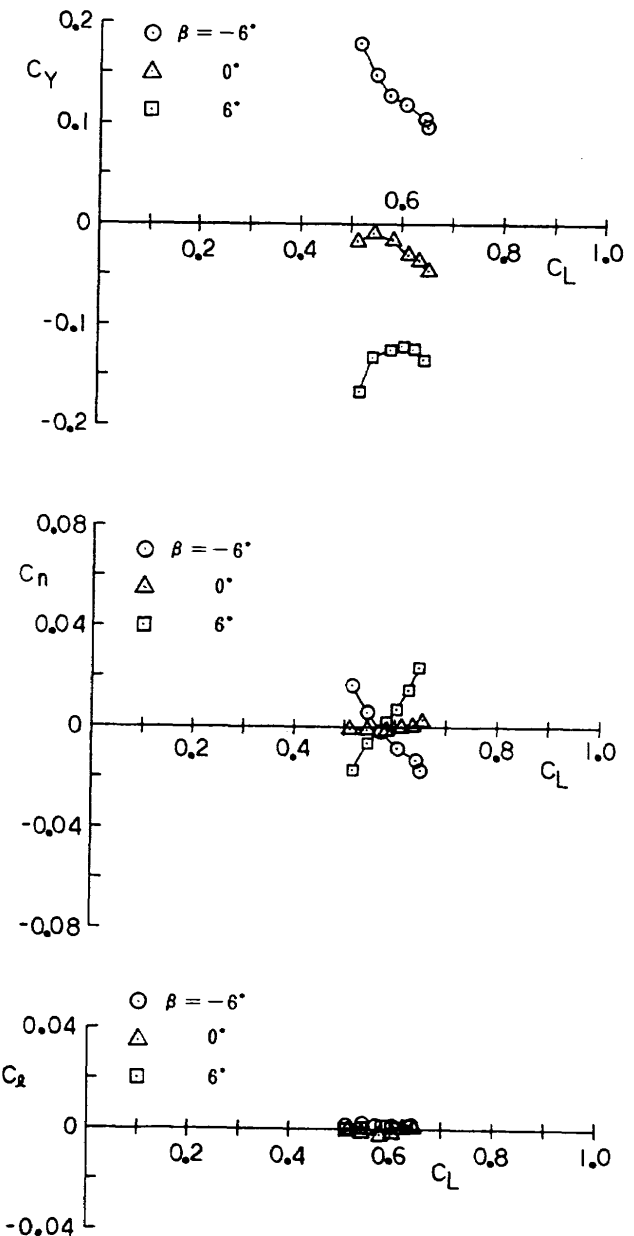


図16 横特性 (A=1.5, 非拘束)

から得られる特性を使うことにする。しかし、傘拘束でも、傘の中央しか拘束されていないので、翼端方向に変形が進むものと思われる。だが、傘自身が拘束されているために、その変形の影響は傘自身が変位する影響より小さいと考える。それゆえ、傘拘束の結果を、 $\beta$ を媒介にした横の特性として、図18(縦横比1.5)と図19(縦横比2)に示した。両縦横比において、 $C_Y$ は非拘束時よりも同じ $\beta$ に対して小さく、 $C_L$ に対する変化もあまり生じていない。さらに、傘は非拘束時と同様に、右前方から風が来ると、負の $C_Y$ を取るの左方向に横力を発生している。また、 $C_L$ は $\beta$ に対しては影響を受け、横揺れの安定性 $\partial C_L / \partial \beta$ は負で安定となる。 $C_n$ では、 $C_L$ に対する勾配が非拘束時と比べ小さくなり、方向安定性 $\partial C_n / \partial \beta$ は、 $C_L$ の値に関係なく正となり安定である。

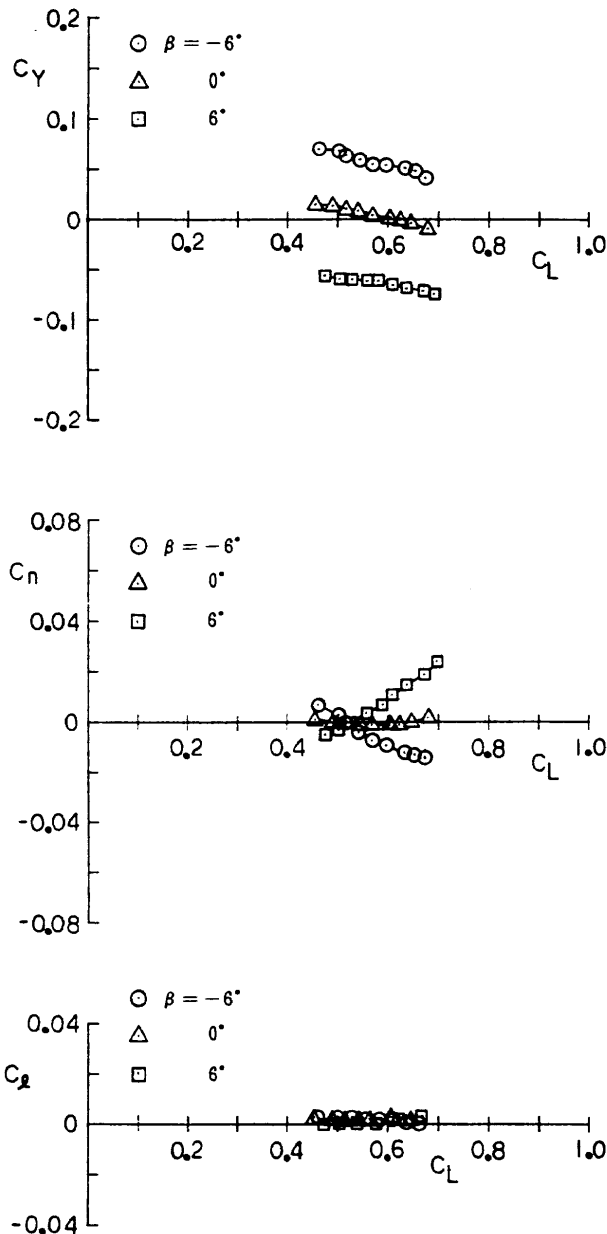


図17 横特性 (A=2, 非拘束)

#### 4.7 操縦索による作用

傘後縁の左右には熊手状の操縦索がついていて、左右の操縦索の長さを支持金具側で短くすると、それぞれの後縁部分が下に折れ曲がるようになる。折れ曲がる部分は左右それぞれに対応して、およそ翼端から40% bの幅を持ち、80% 翼弦付近から折れ曲がる。さらに索を短くする長さを大きくすると、折れ曲がる角度が大きくなる。操縦索の短くする長さを $\Delta l$  [cm]とし、右と左の短くする長さは添字としてそれぞれRIGHT, LEFTをつける。操縦索を短くするということは、実際に飛行している場合に操縦索を引くことに相当する。ここでも、操縦索を短くすることによる傘変位前の模型に働く力を調べるために、拘束風試でのデータを検討する。模型は縦横比2を取り上げ、片側の操縦索を短くするときは常に左の操縦索としている。

左操縦索の短くした長さ $\Delta l_{\text{LEFT}}$ を0, 4, 8cmとしたときの縦の特性が、図20と図21に示されている。 $\alpha_c$ は拘束での傘中央下面基準の迎角である。図20からわかるように $\Delta l_{\text{LEFT}}$ を増すと、揚力係数と抗力係数共に増加する。これ

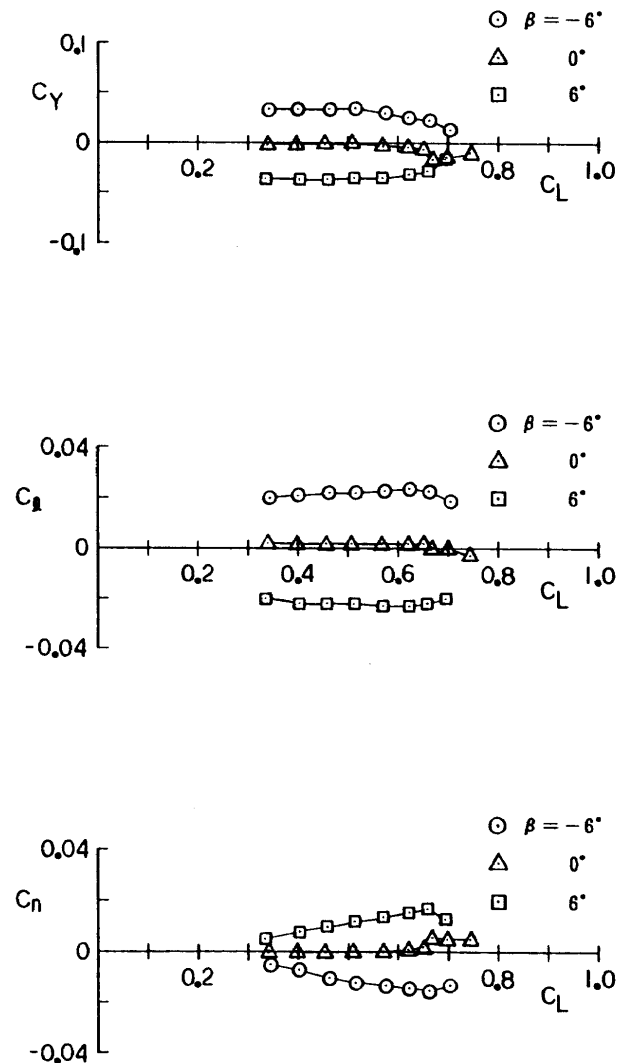


図18 揚力係数に対する横の影響 (A=1.5, 拘束)

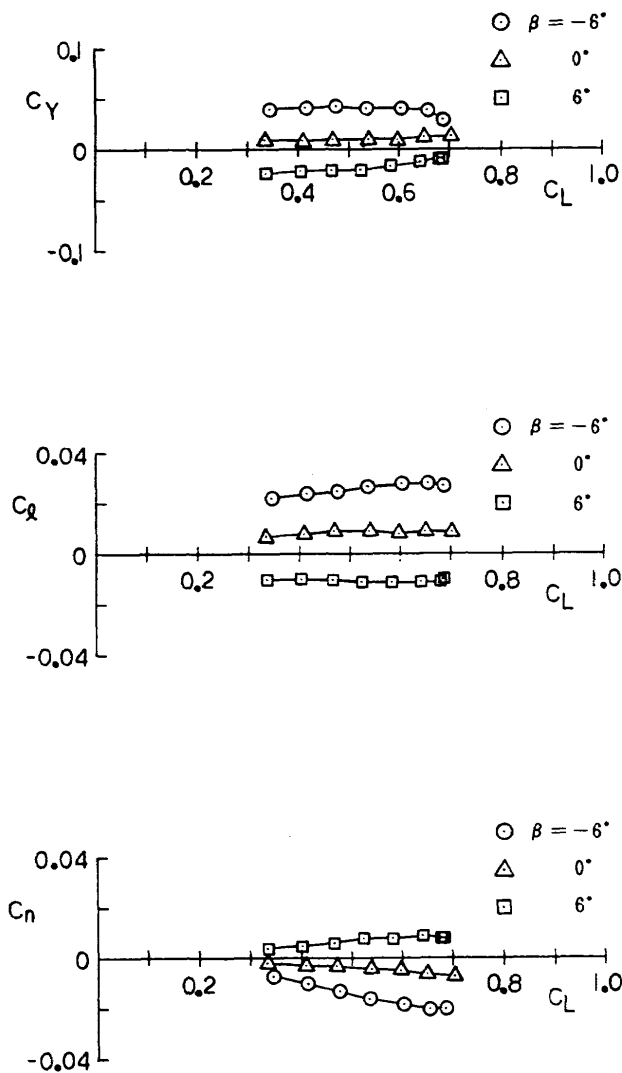


図19 揚力係数に対する横の影響 (A=2, 拘束)

は、傘の左側後縁が下がるので、傘左翼部分の局所揚力係数及び局所抗力係数が増大するためであろう。図21には、 $\Delta l_{\text{LEFT}}$ による $C_D$ と $C_m$ の変化の様子を $C_L$ に対して表してある。 $\Delta l_{\text{LEFT}}=8\text{cm}$ では、 $4\text{cm}$ に比べ $\Delta l_{\text{LEFT}}=0$ での特性からの変化が大きくなっている。

さらに、図22には横の特性を示した。 $C_Y$ 、 $C_l$ 及び $C_n$ は、 $C_L$ の変化に対してほぼ一定である。 $\Delta l_{\text{LEFT}}$ に対する横の特性として、 $\alpha_c=10^\circ$ におけるデータを図23に示した。 $\Delta l_{\text{LEFT}}$ の増加に従って、 $C_Y$ が大きく影響されている。一方、 $C_l$ と $C_n$ の変化は小さい。

$C_Y \sim \Delta l_{\text{LEFT}}$ 特性によれば、左操縦索を短くすると左向きの横力が発生する。これにより傘を非拘束にした場合、図24の様に左操縦索を短くすると、傘は左側に傾く。この原因を調べるために、 $\Delta l_{\text{LEFT}}=0$ における $C_L$ 、 $C_D$ 、 $C_m$ 及び $C_Y$ からの変化量をそれぞれ $\Delta C_L$ 、 $\Delta C_D$ 、 $\Delta C_m$ 及び $\Delta C_Y$ とし、これらを $\alpha_c=10^\circ$ について図25に示した( $C_Y$ は、 $\Delta l_{\text{LEFT}}=0$ でも $C_Y$ が幾分あるので、この値からの差を $\Delta C_Y$ として扱った)。そこで、モーメント基準点原点の機体軸

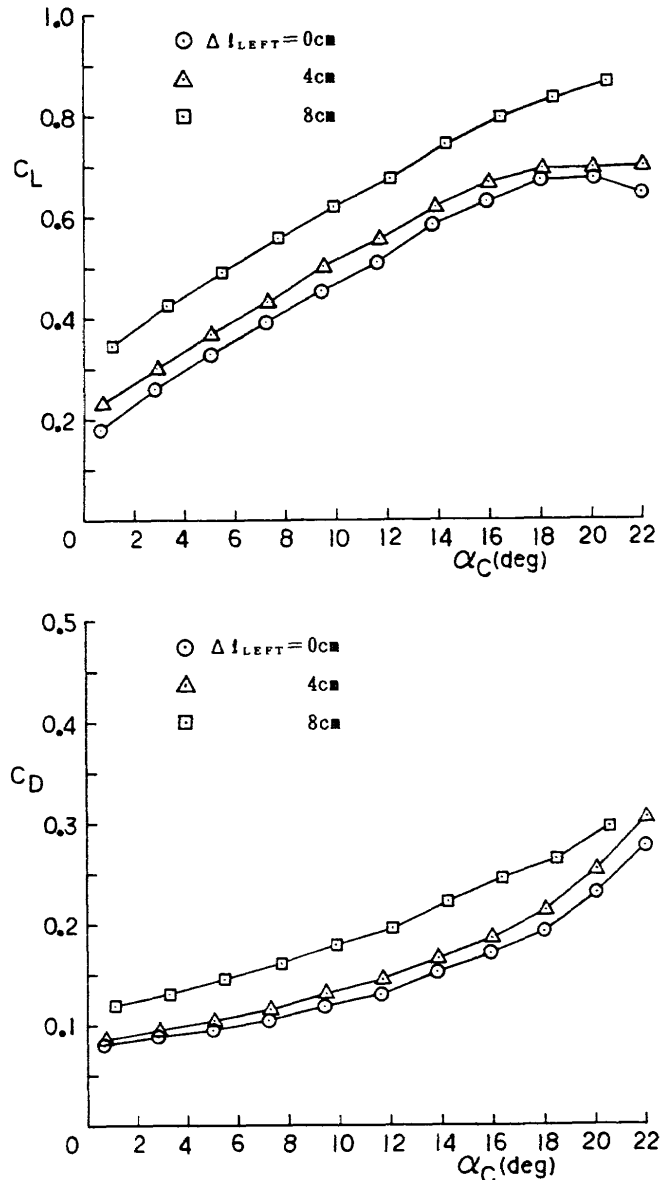


図20 左操縦索の短くした長さによる揚力及び抗力特性 (A=2, 拘束)

系を記号X, Y, Zとして、 $\Delta l_{\text{LEFT}}$ により付加された空気力( $\Delta C_L$ ,  $\Delta C_D$ ,  $\Delta C_Y$ )の作用点を仮定する。X軸方向では、フラップ付き対称翼型での薄翼理論により<sup>3)</sup>、フラップによる付加モーメント係数と付加揚力係数から付加作用点が求められる。それによると、フラップが $0.8c$ で折れ曲がる時に、作用点位置は $0.25c$ から後縁に向かって $0.185c$ の値を得る。この値をここに適用すれば、付加作用点をおよそ $0.45c$ として、 $X/c=-0.2$ の位置を仮定できる。Y軸方向では折れ曲がり幅の中央に付加作用すると仮定すれば、左端から20%実長翼幅の位置になるため、 $Y/b=-0.3$ である。また、Z軸方向では、下面に作用するとしてYの値の位置により、図1の図面から $Z/b=-0.8$ の作用点位置が仮定できる。さらに図1から、作用点位置での平均下反角を $20^\circ$ に想定できる。

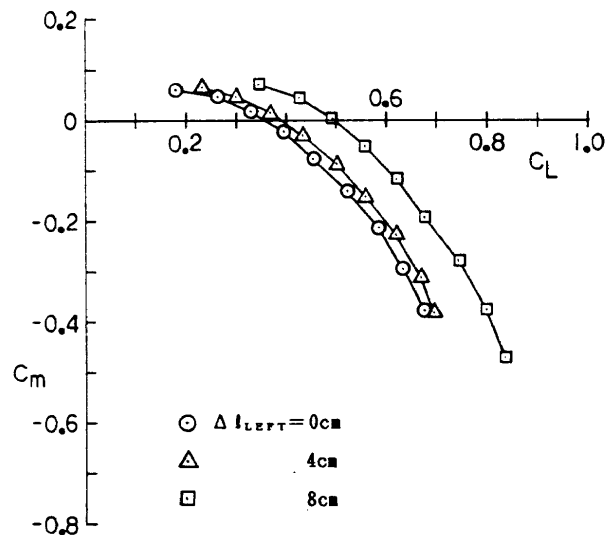
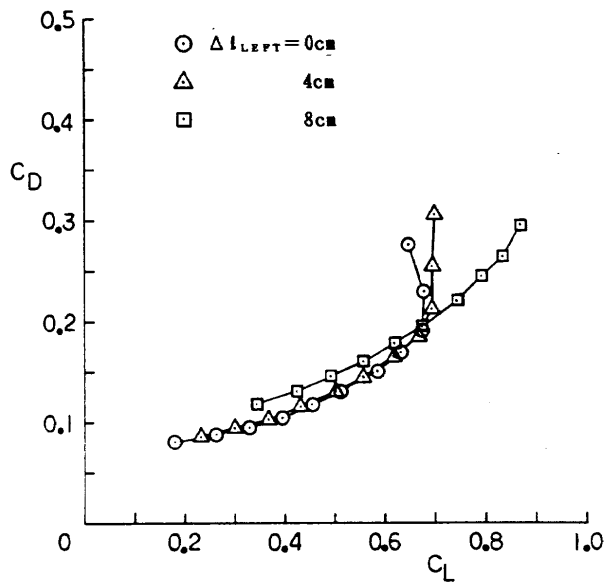


図21 左操縦索の短くした長さによる抗力及び縦揺れモーメント特性 ( $A=2$ , 拘束)

傘左翼の付加空気力の作用点に下反角があると、付加合力のY-Z面には、この合力が下反角を持つ左翼面に垂直に働くので、 $\Delta C_L$ 成分及び $-\Delta C_Y$ 成分が生じることになる。この考えに基づく横力係数の成分が、ここでは $-\Delta C_L \tan 20^\circ$ になる。図25の $\Delta C_Y \sim \Delta l_{LEFT}$ 特性には、測定値の $\Delta C_Y$ を実線で、推算値の $-\Delta C_L \tan 20^\circ$ を破線で描いた。これらのグラフは、ほぼ値及び傾向が一致している。さらに $XS = X \cos \alpha_c + Z \sin \alpha_c$ ,  $ZS = -X \sin \alpha_c + Z \cos \alpha_c$ とおき、図26の説明図を参照して付加力によるモーメントを検討する。 $\Delta C_m$ では、推算式 $'(XS/c) \Delta C_L - (ZS/c) \Delta C_D'$ から、第1項と第2項が同じ程度になるので打ち消し合って値は小さくなり、測定値の $\Delta C_m \sim \Delta l_{LEFT}$ 特性を裏づける。同様に $C_l$ と $C_n$ の変化も、それぞれ $'-(Y/b) \Delta C_L - (ZS/b) (-\Delta C_Y)'$ と $'(Y/b) \Delta C_D + (XS/b) (-\Delta C_Y)'$ で推算され、両式共に式

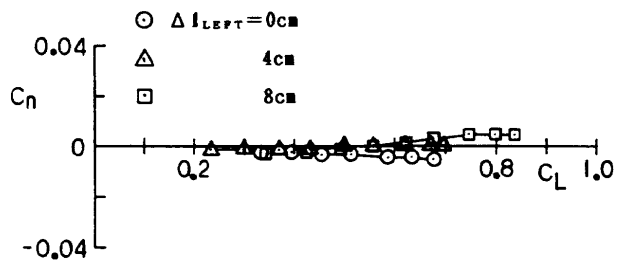
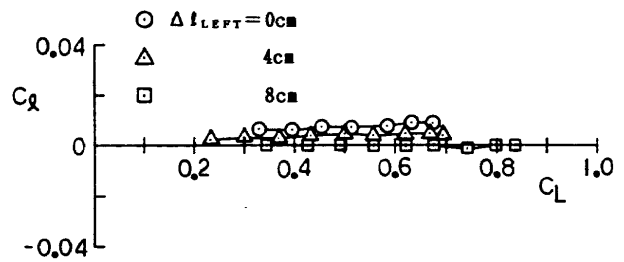
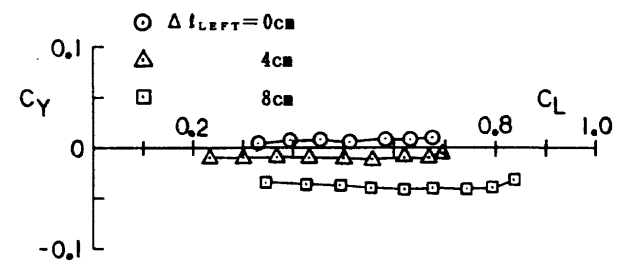


図22 左操縦索を短くした長さによる揚力係数に対する横の影響 ( $A=2$ , 拘束)

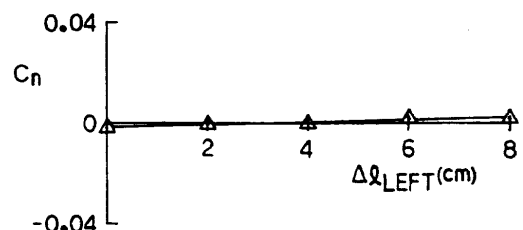
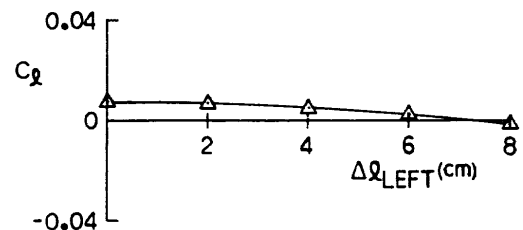
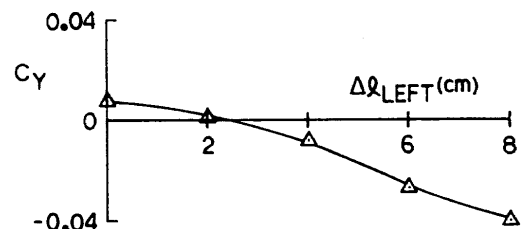


図23 左操縦索の影響 ( $A=2$ , 拘束,  $\alpha_c = 10^\circ$ )

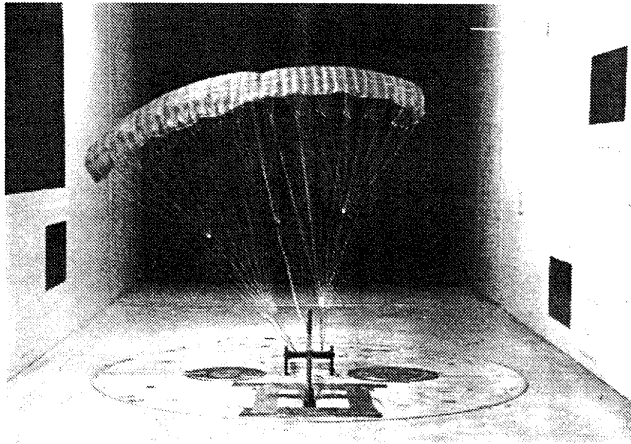


図24 左操縦索を短くした時の傘の様子 (A=2, 非拘束), 後から見る

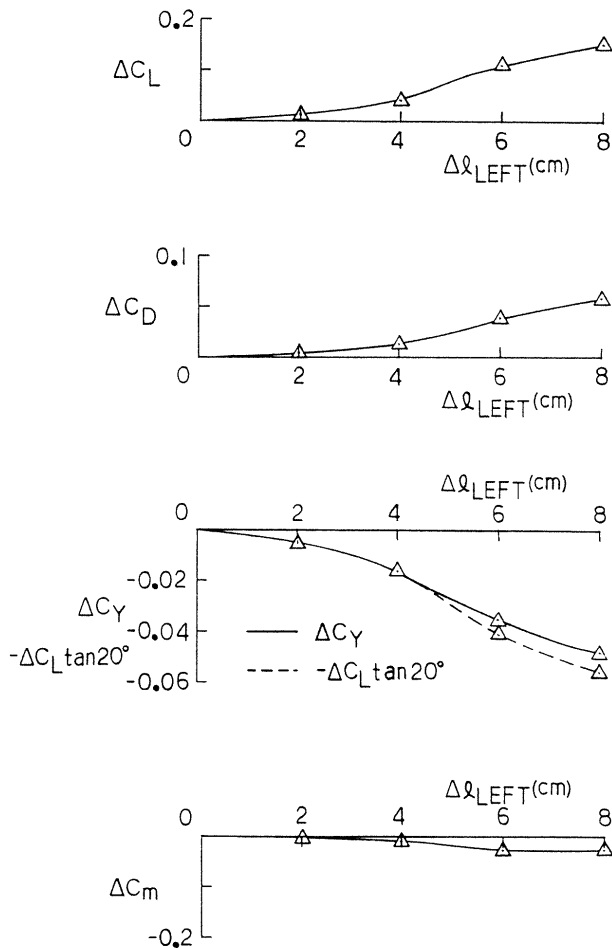


図25 左操縦索を短くしない状態からの変化量 (A=2, 拘束,  $\alpha_c=10^\circ$ )

の第1項と第2項が同じ程度になるので打ち消し合って値は小さくなり、正負は別として図23の  $C_l$  と  $C_n$  の値を説明できる。

したがって、傘を拘束していないとき、左操縦索を短くすると傘が左側に傾く理由は、以下の様に理解できる。左操縦索を短くすると傘の左側後縁部分が下に折れ曲がり、

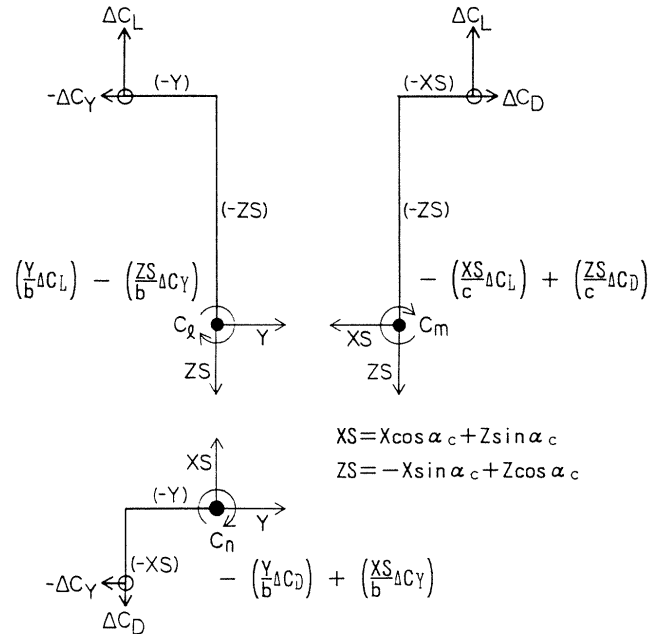


図26 付加力によるモーメントの説明図

(○: 付加力の作用点, ●: モーメント中心)

それにより空力的付加合力が生じる。この付加合力は揚力と抗力成分を増加させ、かつ、傘の下反角のために左向きの横力成分を発生させる。また、付加合力の作用点とモーメント中心点間のモーメントアームの成分比率及び付加合力の成分比率から、それぞれの付加モーメントによる成分での打ち消しが起こり、付加モーメントの発生がほぼなくなる(付加抗力によるプロバース・ヨーは、横力による偏揺れモーメントで打ち消される)。それゆえ、傘を非拘束にすると、付加モーメントの発生がないので、これによる傘の変位はない。しかしながら、傘と索の結合及び索と支持金具の結合も横方向に対して柔らかいので、左向きに発生した付加横力により、索の長さに拘束されて傘は左側に傾く。横方向では付加横力だけが傘に作用するので、この力と傘の揚力による索の張力との釣り合いから、傘の傾きは決まってくる。

#### 4.8 両操縦索による特性

縦横比2において、拘束で左右両方の操縦索を短くした場合の揚抗力特性を図27に示す。操縦索の長さは、左右共に同じ量  $\Delta l_{RIGHT, LEFT}$  [cm] だけ短くしている。図に見られるとおり、 $\Delta l_{RIGHT, LEFT}$  の増加に伴い、 $C_L$  及び  $C_D$  は共に滑らかに増大し、最大揚力係数  $C_{Lmax}$  は増加している。ただし、 $\Delta l_{RIGHT, LEFT}$  が大きくなると、特性曲線が  $C_D$  の増える方向に移動するのは、傘後縁の折れ曲がり部分からの剥離による圧力抗力の増加のためと思われる。 $\Delta l_{RIGHT, LEFT}$  が、0, 2, 4, 6 及び 8 cm のとき、 $C_{Lmax}$  は 0.67, 0.70, 0.79, 0.90 及び 1.02 を取る。

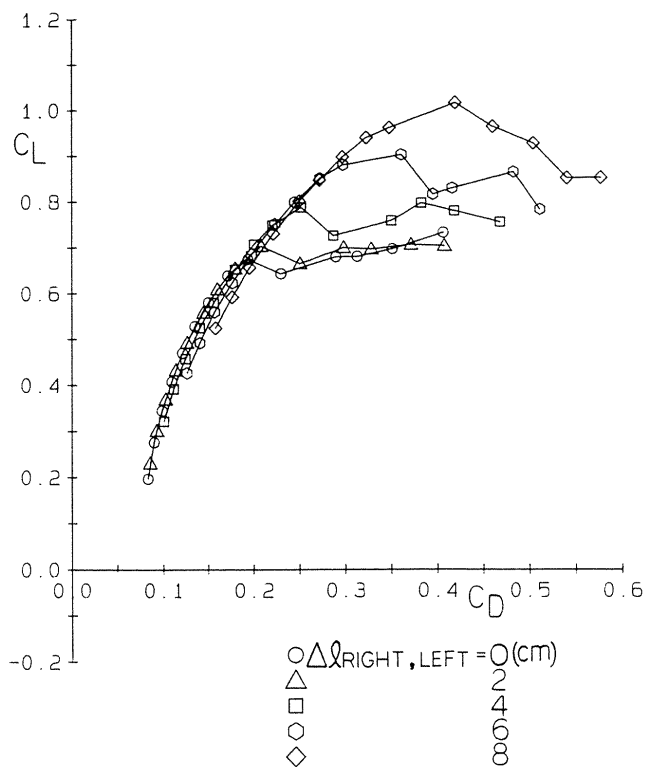


図27 左右操縦索を短くした時の揚抗力特性  
( $A=2$ , 拘束)

縦横比2の非拘束で、左右両方の操縦索を短くしたときの傘の様子を図28に示す。

#### 4.9 スタビライザーの影響

方向安定板であるスタビライザーあり、なしの形態として、縦横比1.5と2で拘束試験の $\alpha_c=10^\circ$ における、 $\beta$ に対する横3分力を図29に表す。スタビライザーがない場合

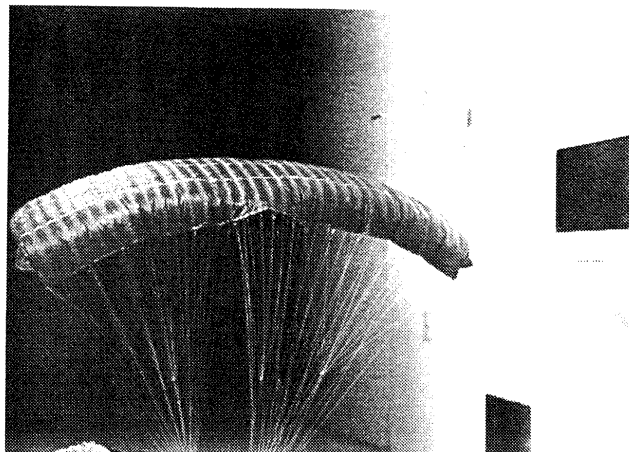


図28 左右操縦索を短くした時の傘の様子  
( $A=2$ , 非拘束), 後から見る

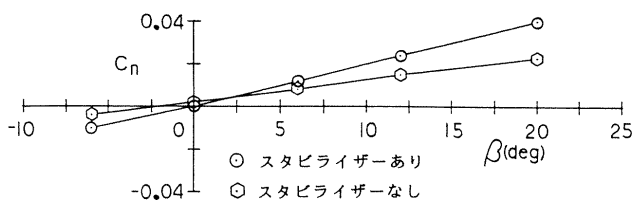
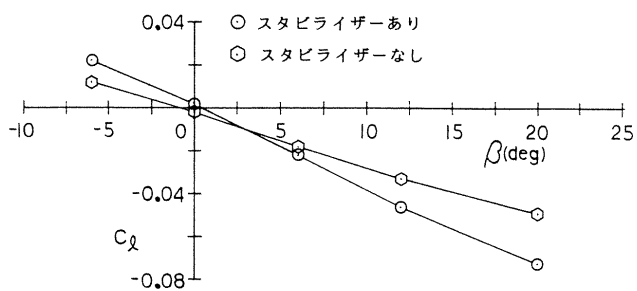
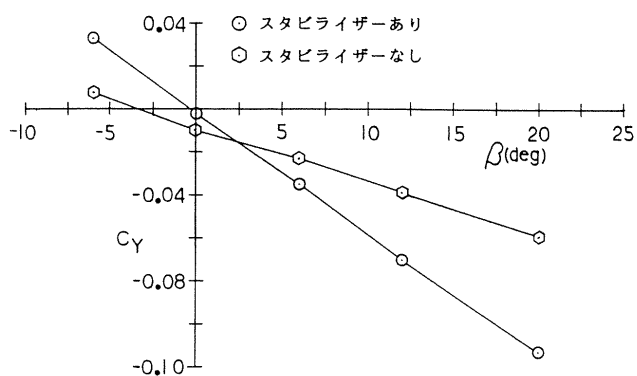


図29(a) スタビライザーの影響 ( $A=1.5$ , 拘束,  $\alpha_c=10^\circ$ )

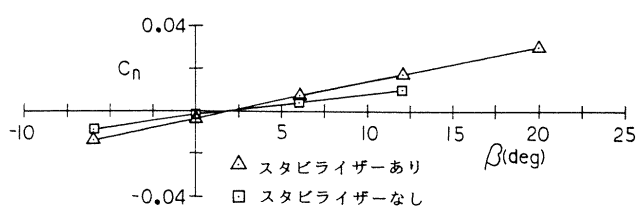
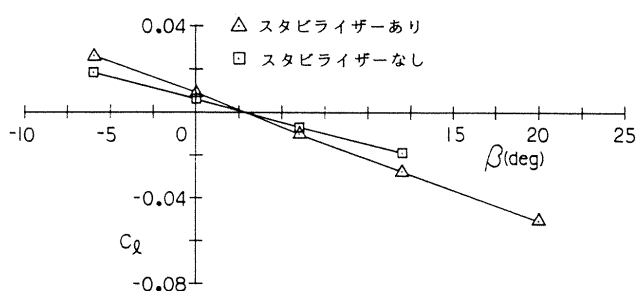
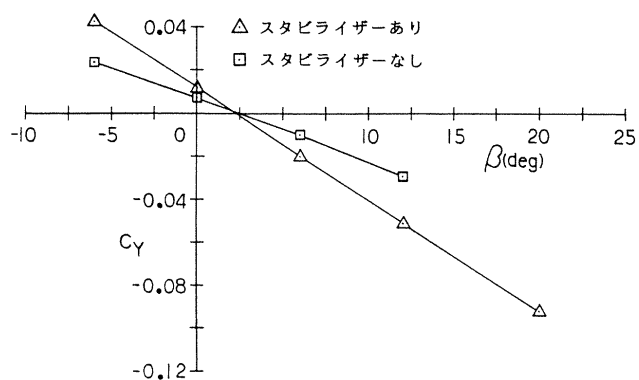


図29(b) スタビライザーの影響 ( $A=2$ , 拘束,  $\alpha_c=10^\circ$ )



でも傘は横力を発生している。下側にわん曲した傘は、下反角を持ち、翼面積の縦方向(X-Z面)成分により横力を発生すると考えられる。それゆえ両縦横比とも、下反角による負の上反角効果以上に、長いモーメントアームとこの横力による  $C_l$  で、これが安定側に発生し、またこの横力から来る  $C_n$  が、安定側に発生すると思われる。さらに、スタビライザーがあると、両縦横比とも、より安定性を増している。

## 5. ま と め

傘を拘束した状態及び非拘束にした状態で風洞試験を行うことにより、変位する模型の迎角変化、横滑り角変化、操縦索の作用を調べ、また傘の変位を測量した。その結果、(1)模型の基本的な6分力特性が得られ、(2)この得られた特性により本パラグライダー模型の挙動を理解することができた。挙動の理解では、①索の結合部の柔らかさから来る縦揺れモーメントによる非拘束傘の変位、及び②操縦索による作用で左操縦索を短くしたときの傘が左に傾く理由を、

付加空気力の作用点を仮定することにより言及した。

風試結果において、縦横比2で揚抗比5.5程度を期待したけれども実際には約4となり、構想した実機で予想した特性は得られていない。これは、模型が小さいことに原因があると思う。風試結果を構想された実機の基礎データとするには、さらに風試による実物相当の空力特性の推定の検討や、大きな模型での風試が必要である。

なお、風試当時に著者は、新型航空機研究グループの高澤金吾室長(現企画室長)から、本模型の空力特性に関して有益な助言をいただいた。

## 文 献

- 1) 岡 良樹, 平田 実: パラグライダー, 成美堂出版, 1990.
- 2) Lingard, J. S. : The Aerodynamics of Gliding Parachutes, A88-11201.
- 3) Kuethe, A. M., Chow, C.-Y. : Foundations of Aerodynamics, John Wiley & Sons, 1986.

---

## 航空宇宙技術研究所資料 671 号

平成 6 年 11 月 発行

発行所 航空宇宙技術研究所  
東京都調布市深大寺東町 7 丁目 44 番地 1  
電話三鷹 (0422) 47-5911 (大代表) 〒182  
印刷所 株式会社三興印刷  
東京都新宿区西早稲田 2-1-18

---