

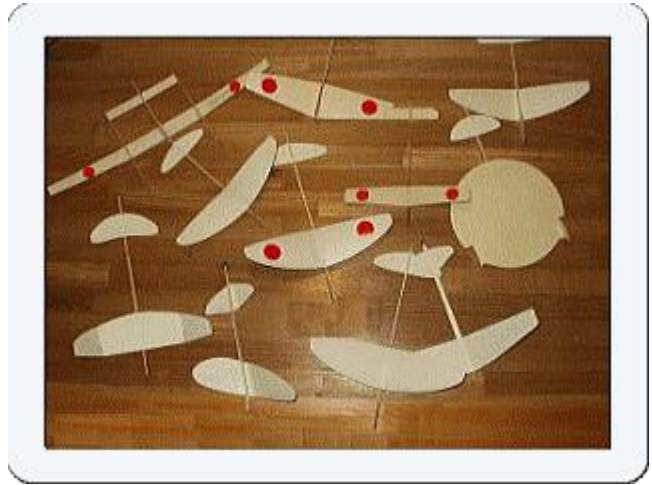
カナード紙飛行機の技術資料

斎藤武夫 著

はじめに

紙飛行機は「子供の科学」に毎月連載されているので子供の遊びと思われていたり、8才から88才の巾の広い年齢に合う趣味と言われていたりしているが、夢中なのはリタイアした高齢者が多い。

紙飛行機は簡単に作り飛ばすことができるが、楽しみながら続けるとその奥の深さに魅了され、仲間との情報交換や交流が面白くなってくる。紙飛行機を飛ばすには広いブランドが必要であり、雨天や風の強い時は飛ばすことができず性能は天気に左右され、自分が創意工夫して製作したオリジナル機が巾を利かすといった贅沢な趣味である。



実際の飛行機には多くの形状や種類があるが、その中で先尾翼機は前後を逆にして飛行する水平尾翼が前にある飛行機で、英語は「カナード」ドイツ語で「エンテ」と呼んでいる。カナード、エンテの言葉を直訳すると「鴨」となり、飛行の姿は鴨が飛んでいるようだからと、命名した西洋人の感性と表現の豊かさには感心させられる。

カナード紙飛行機の飛行の姿と独特な形状に魅せられ楽しんでいるが、この素晴らしさを多くの仲間と共有できればと思い、今までの経験の記録を「カナード紙飛行機の技術資料」としてまとめましたので、カナード紙飛行機を制作するときに参考にされると幸いです。


目次

1.	紙飛行機	
2.	先尾翼機の種類	
3.	カナード機の説明	
4.	重心位置	
5.	縦安定	
6.	滑空時の揚力と迎角	
7.	滞空時間	
8.	垂直上昇と落下	
9.	翼	
10.	調整方法	
11.	用具と用紙	
12.	衝突時の負荷	
13.	機体の小型化	
14.	3枚翼機	
	おわりに	

1. 紙飛行機

1) 紙の模型飛行機の分類

紙の飛行機は広告の紙を折って作り、部屋の中で飛ばした子供の時の折り紙の飛行機を思い出すだろうが、紙飛行機は動力を持たない紙製の滑空機(グライダー)であり、大きく次の3種類に分類できる。

	① 折り紙飛行機	A4 サイズ程度の紙をはさみで切らずに紙を折りながら作る飛行機である。主に室内にて手先で押し出すようにして飛ばす。
	② 切り折り(ホチキス)紙飛行機	比較的厚手の紙をカッターやはさみで切り、折込ながら整形しホチキスで保形する飛行機である。飛ばし方は細い棒先にゴムひもを付けゴムで飛ばすゴムカタパルトである。
	③ 切貼り紙飛行機(紙飛行機)	比較的厚いケント紙を切り折り、接着しながら整形し紙飛行機として仕上げる。飛ばし方はゴムカタパルトと全身を使い腕で投げるハンドランチの方法がある。 一般に ③を「紙飛行機」と呼んでおり、ここで述べる紙飛行機である。 この紙飛行機は「キリガミ模型飛行機」として戦前にも発行されていたが、ここでの紙飛行機は比較的新しく月刊誌の「子供の科学」に連載されてからである。(昭和42年から付録として掲載され続けている。)

(注) 愛好者によっては呼び方に違いがあるし、また分類の違いもある。

2) 紙飛行機の種類

紙飛行機の種類は、機体の全てが紙製のものと、翼は紙だが胴体をバルサや木の棒を利用して作る機体もある。

紙飛行機の特徴は、自分の好みで色々な形状や種類を比較的容易に作れることから、実際の飛行機に似せた機体やデフォルメの機体、さらに立体機や新しく自分で創作した機体等がある。紙飛行機は空中を飛行させるものを、紙を利用して自分なりの発想で作り楽しむものである。

またジャパンカップへの競技参加で、高度と滞空性能を向上させた競技用を探求する等、愛好者の目的に合わせて色々な機種を選び製作し楽しむことができる。

紙飛行機は「作る、飛ばす、競う」ことができることから多様化し、個人としても団体としても楽しめる趣味であり、大きな広がりをもって愛好者は増加している。

下図の紙飛行機は多くの種類の一部の機種を写したが、それでも色々な種類や形状があるのが分る。

- ①普通機 ②垂直上昇機 ③双胴機 ④モデル機
 ⑤無尾翼機
 ⑥デルタ翼機 ⑦カナード機 ⑧タンデム機 ⑨3枚翼機



3) 紙飛行機三楽

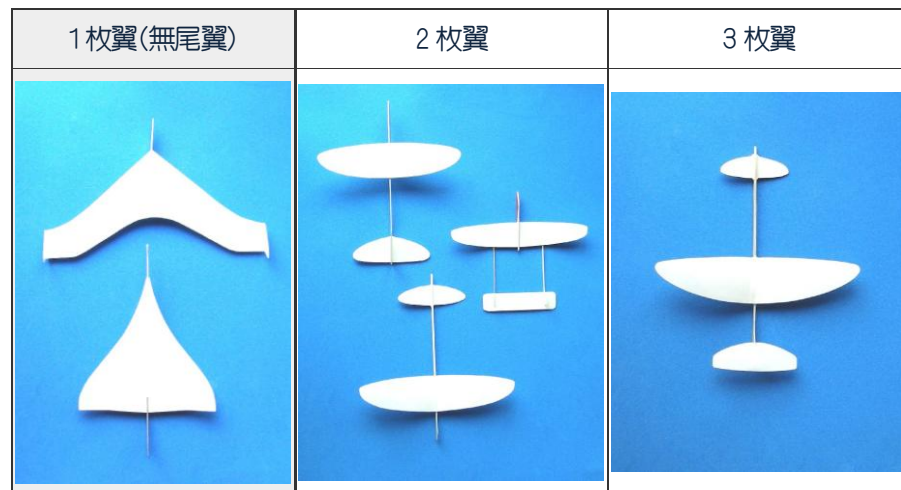
紙飛行機三楽として、①作る楽しみ、②飛ばす楽しみ、③競う楽しみであるが、どの段階で楽しんでよいのである。

①作る楽しみ

模型飛行機には色々な種類があるので、これを趣味としている人は大勢いる。その中で紙飛行機は比較的簡単である。用意しなければならない道具も少なく、材料は紙であり製作する部品の数も少ない。費用もかからず、キットを利用すれば初めてでも容易にできて良く飛ぶので気楽に始められる。

しかし、続けるに従い自分のレベルで独自に設計・製作し飛ばすのが面白くなり、紙飛行機の奥の深さを実感するようになる。

紙飛行機も実機と同様に翼の枚数で分けることができ、さらに多翼機や複葉機なども設計・製作して楽しまれている。



②飛ばす楽しみ

紙飛行機は飛ばすことで楽しみが倍加する。青空の下で紙飛行機を追って空を見て歩くのが健康作りになる。

最近では高齢者の中に熱中している愛好者も多く、各地にクラブができて多くの高齢者が中心メンバーとなって活躍をしている。



③競う楽しみ

競技はクラブ仲間の記録会からジャパンカップの予選会・本大会等がある。競技内容は滞空時間が主体であるがデザイン等の種目もある。自由に参加して自分のレベルを確認し、情報交換からノウハウの取得と仲間ができる。競うことはレベルアップになり楽しさを実感することになる。

2. 先尾翼機の種類（カナード機）

先尾翼機は尾翼が前になった一見では前後を逆にして飛ぶ飛行機で、ここでは先尾翼機、カナードまたはカナード機を含めて三通りで呼んでいる。また推進機がないので滑空機(グライダー)となるが総称的に飛行機と呼ぶことにする。



1) 先尾翼機の実機

20世紀の始めに世界初の有人動力飛行機を飛ばしたライト兄弟の「フライヤー号」は先尾翼機である。A型、B型と短期間に多くの改良を行い飛行時間と飛行距離が飛躍的に伸びて航空機の基礎を築いた。

「二宮康明の変形機10機選」の先尾翼カナード「N-965」の中に述べられているように、当初の飛行機には先尾翼機が多くあったが、その後の飛行機は前翼を主翼の後部に移して尾翼となり、プロペラは機首に配置して牽引式となって、現在の一般的に飛んでいる姿となった。しかし操縦方法は、当時の飛行機の方法を基本的に踏襲しているとの事である。



そして特別な目的を持った一部の飛行機のみが先尾翼機として開発生産されたので、少機種・少機数なのである。

先尾翼機の実機の機体は視界の良い空力的に抵抗の少ない航続性能の優れた飛行機になり得る特長があるとされているが、縦安定で前翼に揚力が必要となる。

飛行機は滑空性能が大事であり、着陸時は安全上から低速飛行が必須の条件となる。先尾翼機は前翼に揚力が必要のために着陸速度が速くなり、着陸時の高い操縦技術と長い滑走距離が要求される。

それで特殊な用途のみに開発され少ない機種と機数になっている。そして滑空性を重視するグライダーには見当たらず希少なのである。

戦時中やその後に製作した飛行機のうち、試作機を含めてカナード機を選別したので少数であるが参考に掲載する。

No	機名	製作国	推進方法
①	アンブロシニ(AMBROSINI) SS4	イタリア	プロペラ推進式
②	ペイアン(PAYAN)Pa22 (ドイツが接收した)	フランス	プロペラ索引式
③	カーチス(CURTISS)XP-55 アセンダー	アメリカ	プロペラ推進式
④	震電(J7W1)九州局地戦闘機(アメリカが接收)	日本	6枚プロペラ推進式
⑤	サーブ37ビゲン(SAAB37 VIGGEN)	スウェーデン	デルタ翼 ジェット式

2) 折り紙飛行機のカナード機

折り紙飛行機の「イカ折り紙飛行機」は前翼が付いているのでカナード機である。

これは昔から作られ飛ばしていた折り紙飛行機の代表的な機体の一つである。実際に折って作り飛ばしてみると実に良く飛ぶので、現在も伝承の折り紙飛行機として愛好されているのだと思う。

なお、折り紙飛行機の最適な本を参考に載せておく。

—超本格!— 「おりがみ飛行機ベスト30」 中村榮志 著 東京書店 発行



3) 色々な形のカナード紙飛行機

カナード機は色々な機体の形状があり、普通機以上の種類が作り出されていて、「二宮康明の変形機10機選」にもカナード機が数機掲載されている。

紙飛行機はグライダーであり、カナード機は滑空の滞空時間では不利となる。滞空競技で飛ばすことは少なく、変形機として色々な形が製作し定着して楽しまれている。

愛好者はカナード機の滑空姿やユニークな形状から一度は製作し飛ばした経験があると思うが、ここにあげた写真のカナード機はその内の一部の機種であり、上方を機首の飛行方向にして並べてある。

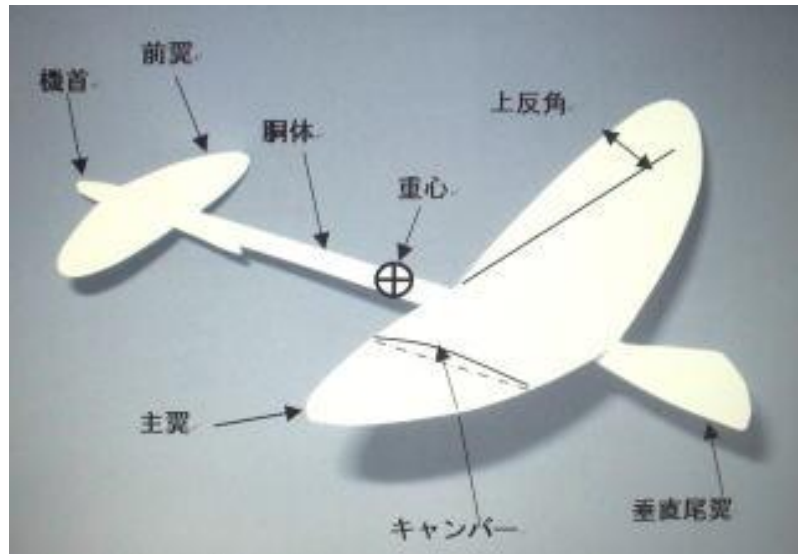


3. カナード機の説明

1) 機体各部の名称

カナード機は前後逆にして飛ぶことを除けば、実物のグライダーと飛行の基本は同じである。

しかし、グライダーの翼にある舵面が紙飛行機には無いので構造はシンプルである。



2) カナードのモデル機

カナードのモデル機の図面を添付する。添付の写真がその完成した機体であり適正に作り調整すれば上昇、滑空とも満足が得られると思う。

紙飛行機の製作は生産技術だ。道具と材料と工夫だと教わり自分に適した道具や紙を選びカナード機を製作して楽しんでいる。

ここでのカナード機は本機をモデルに説明を進めていく。本機は図面で分るように、全長175mm、全巾172mmで、20番手の糸ゴム50cmのゴムカタパルトを使い、滞空時間競技にも結果が出せるように縮小・軽量化と造形美を求めた機体である。



3) 定常滑空姿勢

カナード機も普通機と同じく定常に滑空飛行している時は、釣合いの状態にある。すなわち、揚力と機重は釣合いバランスして適正な速度と迎角で滑空飛行している。

W (機重) = 5.5g (モデル機)

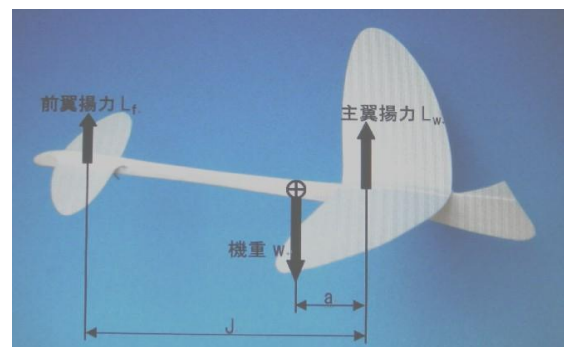
$$L_f = W \times a / J$$

$$L_f \text{ (前翼揚力)} = 5.5 \times 0.23 = 1.265\text{g}$$

$$L_w = W - L_f$$

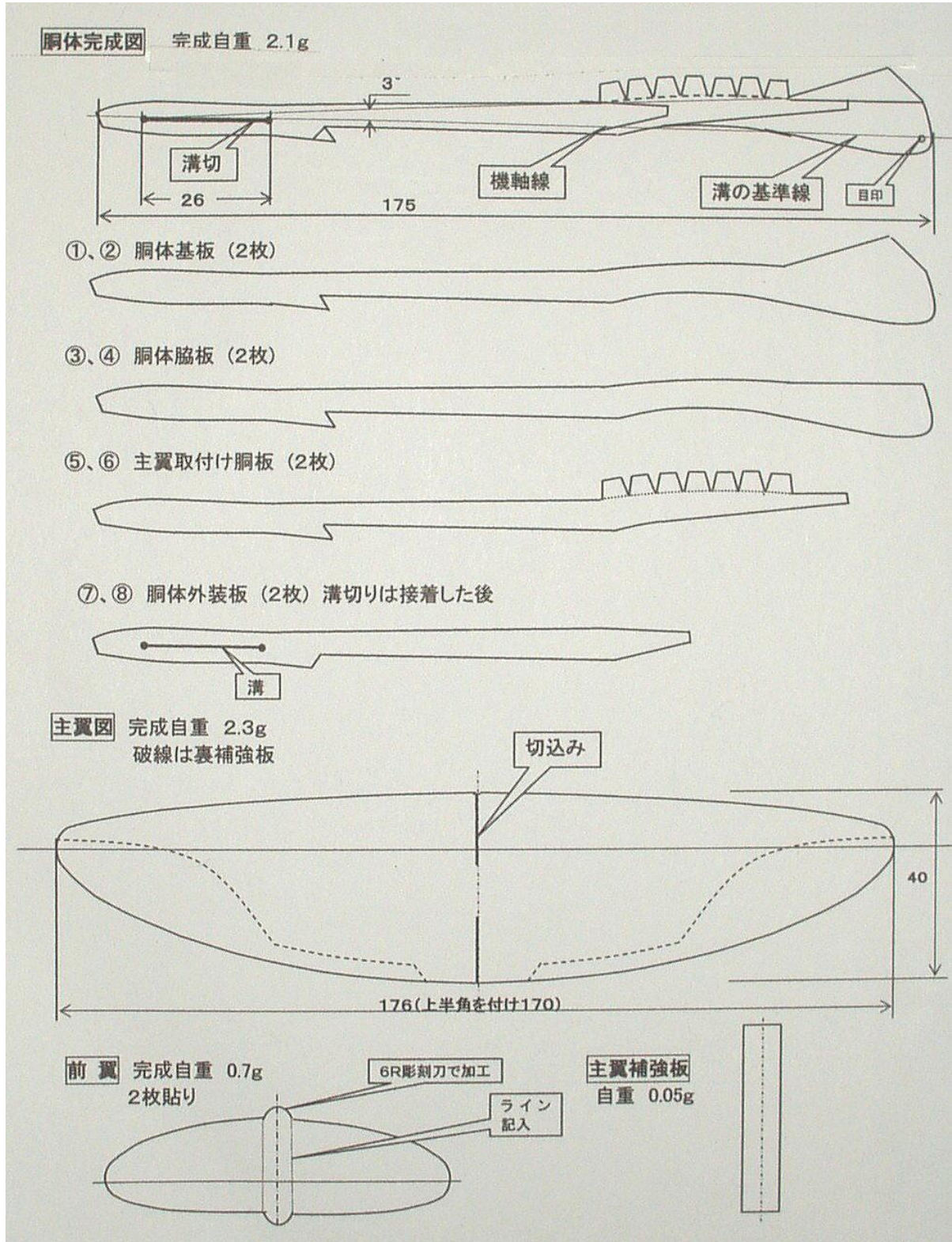
$$L_w \text{ (主翼揚力)} = 5.5 - 1.265 = 4.235\text{g}$$

定常滑空時のモデル機の前翼と主翼の揚力は上記の配分であり、機重 W 、空力中心距離 J 、 a は後述の「滑空時の揚力と迎角」の数値を利用した。



4) カナード機の図面

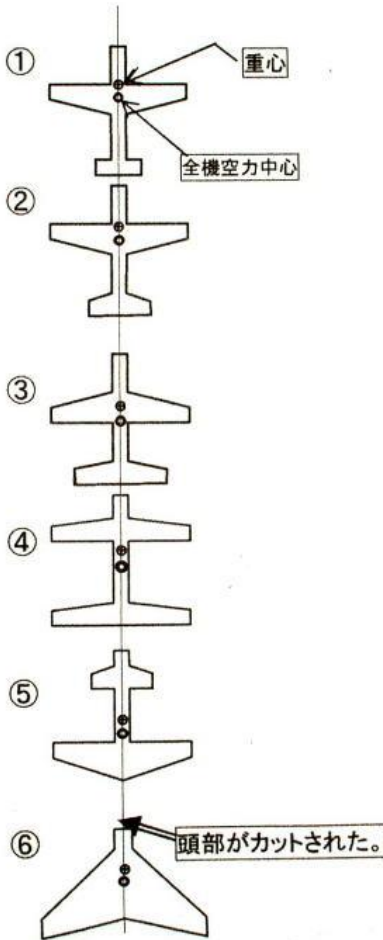
先尾翼機の機体図面を「カナード図面」として添付しました。全長などの寸法で尺度を合わせて利用下さい。
完成機の質量は5.2g±0.3であり、用紙は PHO 180（漂白前の紙）を使用しています。



4.重心位置

全機空力中心位置は翼の形状や配置により変動する。安定して滑空するには、全機空力中心の前方になるように機体の重心を設定しなければならない。

1)翼の配置と重心位置



飛行機の各タイプでの重心と全機空力中心の位置を略図する。

① 一般の飛行機は尾翼が小さく主翼のみで機体を浮かせるので、全機空力中心位置は主翼前方にある。

② 紙飛行機の普通機は尾翼が大きく機体を浮かせる働きもするので、全機空力中心位置は後退する。

③ 紙飛行機の垂直上昇機となると、更に尾翼も大きくなり全機空力中心位置は主翼の後縁付近となる。

④ 主翼と尾翼が同じ大きさのタンデム機(串型機)になると全機空力中心位置は両翼の間になる。

⑤ 前の主翼は縮小し前翼となり、尾翼が機体を浮かせる主翼として役割が交代して、カナード機となり全機空力中心位置は後ろの主翼の前方になる。

⑥ 前翼が更に縮小してついには無くなり、無尾翼機となり併せて前部胴体の頭部をカットする。全機空力中心位置は主翼の前方に移る。

この無尾翼機に尾翼ができると①の形状に戻りまた繰り返すのであるが、安定した滑空をするために重心位置は空力中心位置の前方にある必要がある。

2) 重心位置のグレーゾーン

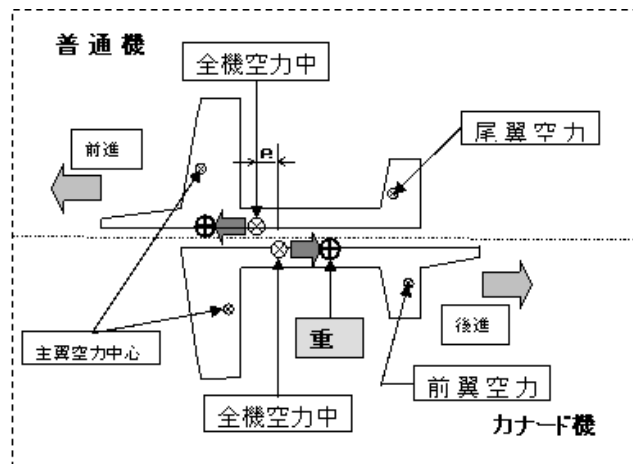
下図は普通機とカナード機に上下に分割して片半分で図面化した。普通機は左方向に進み「前進」とし、カナード機は右方向に進み「後進」とした。

各翼の配置は同じにした。主翼、尾翼、前翼の空力中心は平均翼弦長の前縁から25%の位置にあるとし、全機空力中心位置はその各翼の空力中心位置に翼面積を加えて求めたものである。

そのため、形状が同じでも前進、後進で全機空力中心は位置が違い、重心は静的な縦安定を得るために、全機空力中心位置より前方になければならないが、それを矢印と重心マークで重心のあるべき位置を示した。

飛行機は形状が同じでも前進、後進で全機空力中心位置が違ってくる。それを e で表したが、この e の範囲の重心位置はグレーゾーンとなり、前後どちらにも飛ぶことができずただ降下するのみである。

また、全機空力中心位置に重心位置が接近していると静的な縦安定は弱く不安定な飛行となり易いのでどのくらい前方にあるべきかを、カナード機の縦安定として具体的に検討する。



5. 縦安定

1) 縦安定の必要性

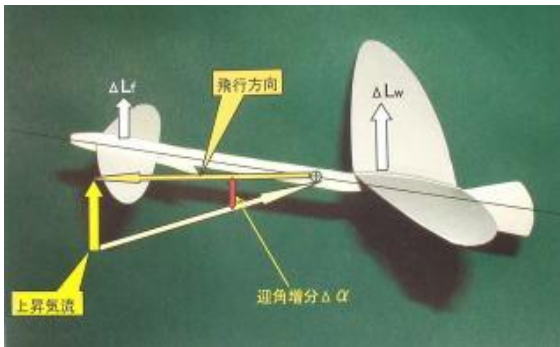
安定は航空機が飛行する上で大事な要件で、縦の安定(ピッチング)・横の安定(ローリング)・方向の安定(ヨーイング)と三つの安定があり紙飛行機も同じである。横の安定は主翼の上反角や後退角、方向の安定は垂直尾翼が受け持つので調整は比較的容易であるが、紙飛行機は飛行中にコントロールができないので縦の安定の調整が重要となってくる。

この縦安定(静的縦安定)は正常に飛行している紙飛行機が突然に上下の気流の中に入っても、機体自身で姿勢を修正して飛行を継続するに必要な要件であり、これはバランスが崩れても正常な飛行に姿勢を戻す復元力を持っていることを示すことにもなる。

例えば、飛行中に突然上昇気流の中に入ると、機首を下向きにして揚力のバランスを元に戻して飛行を続けていくことで、この復元力は適正な重心位置の設定で決まるので具体的に考えていく。

2) 重心の位置設定

揚力は $L=1/2 \rho v^2 S C_L$ で翼の空力中心に働くとして、上昇気流に入った時の揚力の増加分と縦の安定の関係を考える。(ρ :空気密度、 v :機速、 S :翼面積、 C_L :揚力係数)



$$\begin{aligned} \text{主翼の揚力増加分は: } & \Delta L_w = 1/2 \rho v^2 S_w \Delta C_{L\alpha} \\ \text{前翼の揚力増加分は: } & \Delta L_f = 1/2 \rho v^2 S_f \Delta C_{L\alpha} \end{aligned}$$

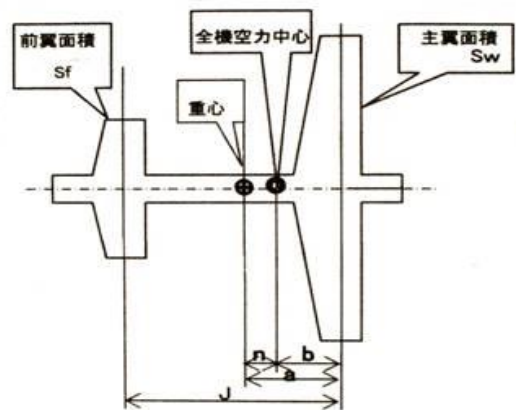
上の2式の $1/2 \rho v^2 \Delta C_{L\alpha}$ は共通なので、主翼と前翼の揚力増加分は結果的に翼面積に比例する。

この両翼の揚力増加分のバランスで全機空力中心 b の位置を求める。

$$\begin{aligned} \Delta L_w \times b &= \Delta L_f \times (J - b) \Rightarrow S_w \times b = S_f \times (J - b) \text{ となり} \\ S_w \times b + S_f \times b &= S_f \times J \text{ である。} \end{aligned}$$

b で整理すると $b = J \times S_f / (S_w + S_f)$ この b の寸法が全機空力中心の位置である。なを、 J は前翼と主翼の空力中心位置の距離である。

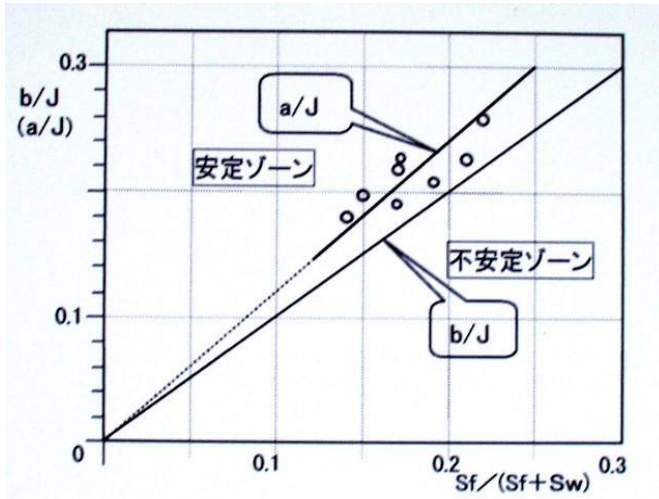
機体が上昇気流に入ると主翼と前翼の迎角は増えるので揚力が増加する。この増加分 ΔL は上昇気流による迎角の増加分 $\Delta \alpha$ によって揚力係数が増加し、この揚力係数の増加分 $\Delta C_{L\alpha}$ により揚力が増加するのであるが、主翼・前翼とも同様である。



縦安定のためには、重心位置は全機空力中心 b より前方になければならず、その寸法は a である。

その差の寸法は

$n=a-b$ で n の長い方が復元はあって縦安定を増すのである。図はそれを図表化したものであり、縦軸は J で割り無次元化し、丸印は製作したカナード機紙飛行機をプロットした。そのプロットに合わせて 0 点を基点にして a/J ラインを引いた。



縦安定の余裕率は両線の差分 $n/J = a/J - b/J$ であり前翼面積が主翼面積の 25% ($S_f = 0.25 \times S_w$) とすると

$S_f / (S_w + S_f) = 0.2$ となり、それは図より

$n/J = 0.24 - 0.20 = 0.04$ で 4% の余裕率となる。なお、安定が得られる範囲で b/J ラインに近い方が滞空性能は良くなる。

また図表の各ラインは $b/J = S_f / (S_w + S_f)$

$a/J = 1.2 \times S_f / (S_w + S_f)$ で表され

$n/J = a/J - b/J = 1.2 \times S_f / (S_w + S_f) - S_f / (S_w + S_f)$ となり

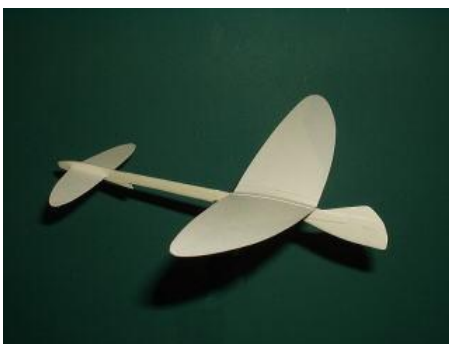
$= 1.2 \times 0.2 - 0.2 = 0.04$ で 4% の余裕率は同じである。

図中の a/J は既存のカナード機のプロットに合わせてのラインである。

発射時に宙返りがしない範囲で、重心位置は b/J ラインの近くに選定する方が滞空時間を長くとれる。

重心位置の設定は a/J ラインより b/J ラインの近くで製作し、その実機を飛ばしながら調整をして確定し図面化をするのが良い。

3) b/J ラインに重心位置があった機体の場合



数度だが、真上に上昇した機体が飛行姿勢のまま真下に降下するのを見た。なぎの無風に近い時、打ち上げた機体が前進せずホバリング姿勢だが早い降下速度で姿勢を変えず目の前を降りてくるのは、奇異な状況で印象的でさえあった。

なを、前記の4.重心位置の2)重心位置のグレーゾーンに述べたカナード機の全機空力中心は、この b/J ライン上に重心がある場合に相当する。

6. 滑空時の揚力と迎角

1) 滑空時の揚力係数

掲載の図面の事例から、下記諸元での機体の滑空時における全機の揚力係数 C_L を計算する。

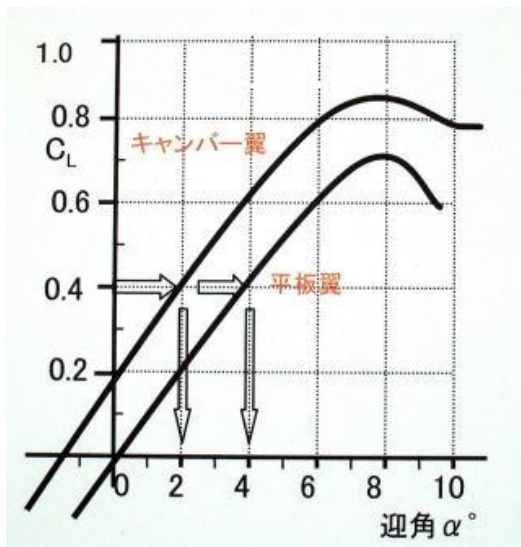
主翼面積	$S_w = 52\text{cm}^2 = 52 \times 10^{-4}\text{m}^2$
前翼面積	$S_f = 13\text{cm}^2 = 13 \times 10^{-4}\text{m}^2$
機体質量	$m = 5.5\text{g} = 5.5 \times 10^{-3}\text{kg}$
滑空速度	$v = 6\text{m/s}$
重力加速度	$g = 9.8\text{ m/s}^2$
空気密度	$\rho = 1.225\text{ kg/m}^3$ (15°C)

滑空時は揚力 L が機体重量 W に釣り合っているため、 $W=L$ として揚力係数 C_L を計算する。

$$W = mg = L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 (S_w + S_f) C_L \quad \Rightarrow \quad C_L = mg / \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 (S_w + S_f)$$

$$C_L = 5.5 \times 10^{-3} \times 9.8 / (0.5 \times 1.225 \times 6 \times 6 \times (52 + 13) \times 10^{-4}) = 53.9 / 1433.25 \times 10^{-1} = 0.38 \approx 0.4$$

この機体の滑空時の揚力係数は $C_L \approx 0.4$ で、それに見合う迎角で飛行していることになる。



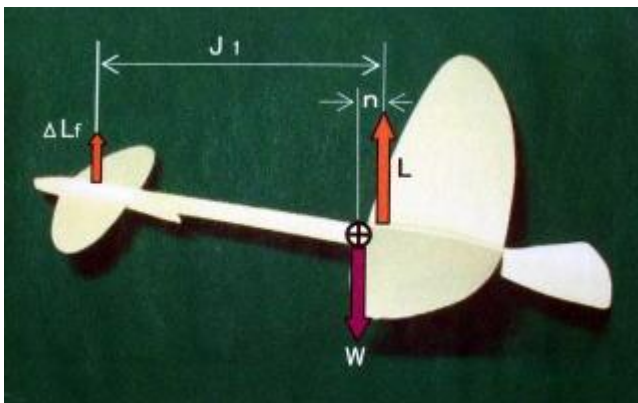
2) 機体の迎角

機体の迎角は揚力曲線より知ることができる。揚力曲線は風洞実験等により翼型、レイノルズ数で計測されデータ化されているが、このような小さなレイノルズ数は初期のNACAに残されている程度なので、今までの紙飛行機等の書籍を参考にして左図のように推測した。

この揚力曲線は平板翼と3%キャンバー翼を示し、両翼とも失速角は 8° である。

本機は主翼が3%キャンバー翼、前翼は平板翼である。そのため左図により主翼は 2° の迎角、前翼は 4° の迎角となり前翼は主翼に比べ 2° 余計に必要なため、あらかじめ取付角として 2° を付けなければならない。

3) 前翼へ揚力の付加



前項は全機空力中心の揚力 L に重心があるとして揚力係数、迎角を計算したが、実際は縦安定で重心は n だけ前方にある。そのため飛行時の姿勢を保つために、前翼は n の分だけ揚力が余分に必要となる。

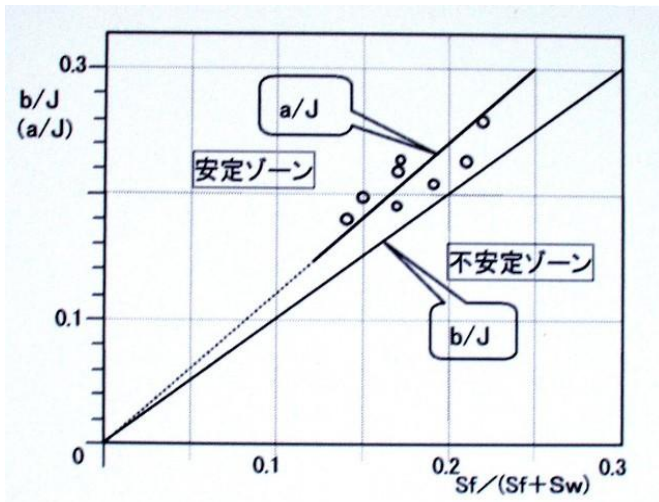
つまり、前翼が追加に必要な揚力 ΔL_f は重心の前寸法 n で決まり、釣り合い式から次のようになる。

$$L \times n = \Delta L_f \times (J_1 - n)$$

ここでの ΔL_f は上昇気流による揚力の増加分ではなく、前翼に必要な揚力の増加分である。

機体の質量と揚力は同等として、L を W に置換えて

$W \times n = \Delta L_f \times (J - n)$ となり、移項して $\Delta L_f = W \times n / (J - n)$ となる。



そして、 $J - n = J - b$ なので、
 $\Delta L_f = W \times n / (J - b - n) = W \times n / (J - a)$ となり、分母、分子とも J で割ると

$\Delta L_f = W \times n / J \div (1 - a/J)$ となる。

前翼面積が主翼面積の25%だと

$S_f / (S_w + S_f) = 0.2$ であり、

表により $b/J = 0.20$ 、 $a/J = 0.24$

24

$n/J = 0.24 - 0.20 = 0.04$

$\Delta L_f = W \times n / J \div (1 - a/J)$

$= W \times 0.04 \div (1 - 0.24) = W \times 0.05$

即ち、前翼に必要な揚力の追加分は機体質量 W の5%となる。これは前翼が大きくなるに従い増えてくる。

4) 前翼の取付角

本機は主翼がキャンバー翼、前翼が平板翼なので前記②で前翼は2°の取付角が必要だったが、滑空時の縦安定から重心位置が全機空力中心より前方にあるため、前項のように機体質量の4%の揚力が必要となってくる。機体質量の4%の揚力の確保は、前翼の取付角の増加で得るのでその角度を算出する。

前翼の揚力の式	$\Delta L_f = W \times 0.05$
前翼の面積	$S_f = 13 \text{cm}^2 = 13 \times 10^{-4} \text{m}^2$
機体質量	$m = 5.5 \text{g} = 5.5 \times 10^{-3} \text{kg}$
滑空速度	$v = 6 \text{m/s}$

$$\Delta L_f = \frac{1}{2} \rho v^2 S_f \Delta C_{L_f} = W \times 0.05 = m \times g \times 0.05$$

$$\Delta C_{L_f} = m \times g \times 0.05 \div \frac{1}{2} \rho v^2 S_f$$

$$\Delta C_{L_f} = 5.5 \times 10^{-3} \times 9.8 \times 0.05 \div (0.5 \times 1.225 \times 6 \times 6 \times 13 \times 10^{-4}) = 2.156 / 28.665 = 0.094$$

$$\therefore \Delta C_{L_f} = 0.094$$

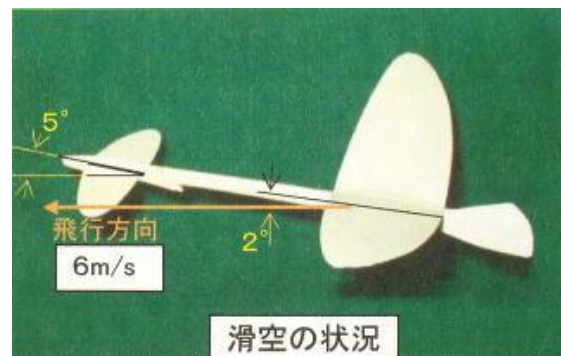
これは、揚力曲線より 0.94° となり、約1°に相当する。すなわち、このカナード機では前翼の取付角は主翼に対して、 $2 + 1 = 3^\circ$ 弱が必要となる。

カナード機は縦安定のために重心を前方に移動させている分、前翼は揚力を確保しなければならない。ここでは取付角を増やすことで対処しているが前翼にキャンバーを付けたり、後端部をフラップのように曲げることで対応することもできる。

5) 定常滑空での飛行状態

計算等の結果から本機の滑空の飛行状態をまとめると、

飛行速度が6m/s とすると主翼は迎角2°で滑空している。そして前翼は取付角3°弱あるので迎角は5°弱となっている。



この飛行状態から見ると、主翼には余裕があるが前翼は失速角の手前2~3° のギリギリの状態である。例えば前翼の失速までの迎角の余裕が3° であるとすれば、上昇気流は0.3m/sが限度となる。

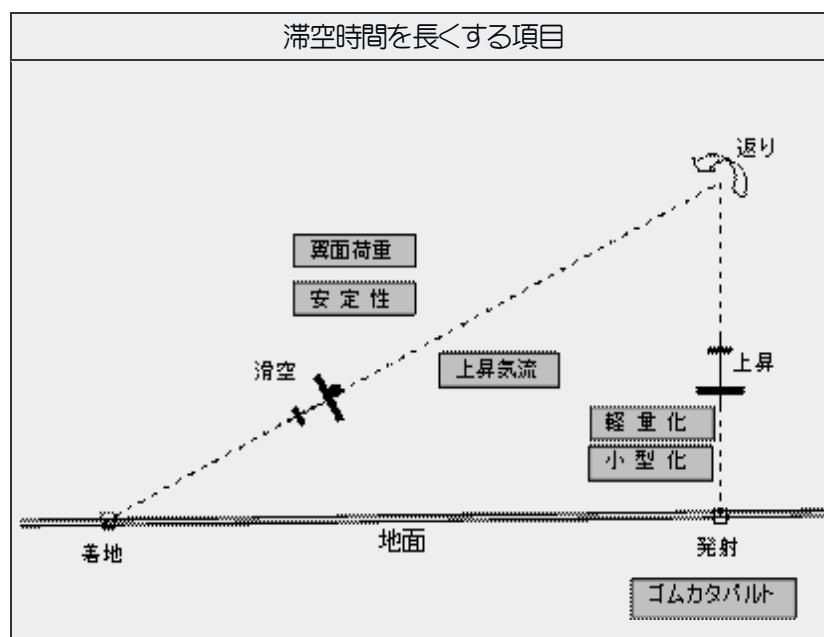
$$\tan 3^\circ \times 6\text{m/s} = 0.052 \times 6\text{m/s} = 0.31\text{m/s} \Rightarrow 0.3\text{m/s}$$

紙飛行機競技で滞空時間を長くすることは上昇気流に上手く乗せることであるが、カナードの場合は前翼の失速で上昇気流の強さが制限されて不利となることがある。一般の垂直上昇機は強い上昇気流を利用できると共に、尾翼を大きくすることで発射時の高度を高く確保でき、尾翼の揚力も利用できるので長い滞空時間の滑空を楽しむには有利で垂直上昇機のほうが適した機体といえる。

7. 滞空時間

機の競技は主に滞空時間で競うことだが、飛ばして楽しむ場合も滞空時間が長いのが楽しい。滑空しながら機体が青空の中に吸い込まれていくことを「視界没」と言うが、仲間と一緒にの見送りは機体の紛失を超えて晴れがましい気分になる。

これは滞空時間を長くするための項目を列挙した。紙飛行機は接着のはがれ等がなく、それなりに仕上がりが調整されているとする。



① ゴムカタパルト

規制のゴムを使用するが新品のゴムは伸びが揃わず、また使い古したゴムは劣化して弱くなる。紙飛行機に適正な加速秒数と起動力と与えるには、ある程度なじませたゴムを十分に張って発射させることである。

② 軽量化

機体を軽く作ることは大事である。発射はゴムの力で起動されるので軽い方が加速され、より高度に到達させることができる。使用するゴムが決まっているので、強度を十分に取ながら軽量化を試みるべきである。

③ 小型化

機体の小型化は上昇時の空気抵抗を少なくするのに大事である。発射された機体は上昇中に空気抵抗と引力で減速し、到達高度から滑空に入る。発射時は空気抵抗が大きく、機体の小型化と仕上げで決まる。

④ 翼面荷重

翼面荷重は翼面積当りの機体質量であり、翼面荷重を小さくして滑空時の沈下率を落とせば滞空時間は延びる。翼は下降飛行で揚力を発生し機体を浮かせるので、強度を確保し減量化と翼の拡大をしなければならない。また揚力の発生しやすい翼形状を選ぶのも大事である。

⑤ 安定性

滑空時の機体の揺れは、滑空効率を落とすので少ないほうが良い。縦揺れが激しくなりながらの墜落や、旋回が急になり機首を落としての墜落は滞空時間を激減し機体の破損となる。事前の調整が大事である。

⑥ 上昇気流

滞空時間の長短は気流で決まると言っても過言ではない。上昇気流に乗った機体は滑空時間を延ばすだけでなく、上昇して大空に消え去ることもある。天候や時間で気流を読み判断しなければならない。

満足な滞空時間を得るには、作りが30%、調整が30%で、残り40%は運であると言われている。素晴らしい滑空を頭に描きながら製作しても、発射した瞬間から裏切られ、飛ばしてみないと分らないのが紙飛行機の面白さである。また一寸の調整で飛び方が変化し空気の微妙さを体感させるのも紙飛行機である。

8. 垂直上昇と落下

垂直上昇機は垂直上昇と上昇限度での返りと滑空の3項目が上手く行って性能を発揮するので、機体は主翼と尾翼とそれに胴体がバランス良く出来ていなければならない。主翼は垂直発射時にかかる空気力に耐え空気抵抗が少ない方が良いので、多くの垂直上昇機はここで説明しているカナード機と異なりキャンバーなしの平板翼を採用している。胴体は紙を何層にも接着貼合わせて作るが、バルサや桧等の木材を利用することもある。しかしジャパンカップの競技種目は全て紙と規定されている。

1) 垂直上昇

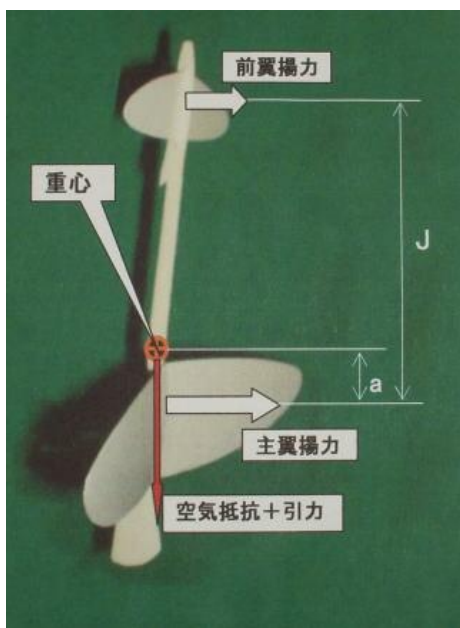
カナード機も垂直上昇機と同様に垂直上昇をさせることができる。機体はカタパルトから離れた瞬間から空気抵抗が一番小さい姿勢を取りながら上昇すると考えられ、ゴムから与えられた発射速度は機体に掛かる引力と空気抵抗で速度を減少させながら上昇限度まで到達する。上昇限度での姿勢は発射の仕方や機速・風の影響および重心や翼のバランス等の機体の出来あがりにも大きく影響を受け変化する。

抵抗が一番小さい姿勢を取った時の、前翼と主翼で発生する揚力と重心からの距離のモーメントによりその後の上昇姿勢が決まる。すなわち、モーメントがバランスを保てれば真直ぐ上昇するが不釣り合いだとそれに見合った円弧を描くが、大きな速度変化の中でバランスをとる調整が難しく経験が必要となる。

$$L_f \times (J - a) = L_w \times a$$

L_f : 前翼揚力

L_w : 主翼揚力



垂直上昇中は速度が変化しても前翼と主翼の揚力モーメントがバランスをしていなければならない。

前翼のモーメントが大きければ宙返り、また反対に主翼のモーメントが大きくと逆返りとなり砲弾のように円弧を描き地面に当る。多くの機体は宙返りで半回か1回転した後、減速でバランスが合い上昇に向うこともある。

発射時での修正は翼の調整で行うしかないが、重心位置は機体の適正な位置にあることが最も大事で、その位置はピンポイントと考えられる。

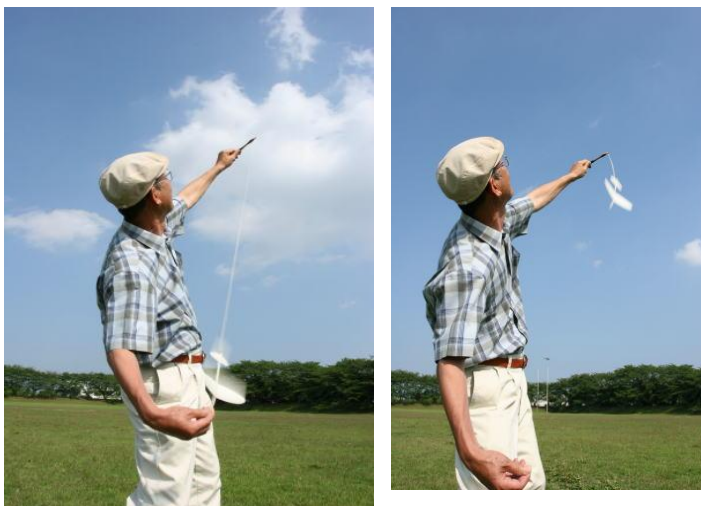
重心位置と主翼の空力中心の寸法 a はもともと小さいので、重心位置を主翼に近づけると影響が大きくなって宙返りの矯正は難しくなる。そのため縦安定で重心位置は空力中心より前方にあるが、その寸法 a は前翼の揚力が確保できる範囲で長く取った方がよい。

本機は重心位置が主翼の胴体取付け前端より8mm程度であれば垂直上昇するが、6mmだと室内での滑空は良いけれど垂直発射での宙返りが強く翼のみの修正では困難であった。垂直尾翼の後部の切断で重心位置を7mmまでに修正し、併せて翼を強く調整して垂直上昇がやっとできた。重心位置と主翼の空力中心の寸法 a はもともと小さいので、重心位置を主翼に近づけると影響が大きくなって宙返りの矯正は難しくなる。そのため縦安定で重心位置は空力中心より前方にあるが、その寸法 a は前翼の揚力が確保できる範囲で長く取った方がよい。

もともと、 a の寸法は小さいので、2~3 mmの違いで垂直上昇に大きな影響が生じる。 a の寸法を長めにした方が上昇は高くなり滑空時の降下率に影響が出て記録的に有利になることもある。

なお、上昇限度での垂直上昇姿勢からの失速返りは、滑空姿勢への建て直しまでに機体が乱れで高度低下がかなりあり、滞空時間を減じることが多いのが実情であるように思う。

この写真は機体から手を離れた瞬間と、飛出しの状況である。機体の動きを捕らえての撮影には時間を要したが発射の瞬間がよく写し出されている。



2) 手投げの難しさ

紙飛行機を飛ばすにはゴムカタパルトと手投げがあるが、カナード機の手投げは見当たらない。カナード機は機体の後方に重心位置と主翼があるので、機体が完成し室内でそっと滑空させるにも上手くいかないことがある。そのため、機首がふらつき一杯の手投げは不安定になりやすく、不安定が拡大されるので上手な発射は不可能に近いと思う。

3) 垂直落下

先日、久しぶりの晴れ間の上昇気流で視界没に近づき、斜め上空でキラリと光る機体を見ていたら、突然機体が真下に急落下して遥か遠方の林の中に消えた。

カナード機は落着いて滑空していても、地上5m近くまで降下すると突然機首を真下に落とし墜落することがある。よく見ていると地上付近の出来立ての上昇気流により前翼が急に失速しているようだ。

発生したばかりの乱れた上昇気流の強さで前翼の境界層が剥離して突然揚力を失い、主翼は上昇気流で揚力が急に大きくなって極端にバランスを崩して起こると考えられる。

しかし上昇気流に上手く乗り、はるか上空まで飛んでいる状態での垂直の落下を見たのは初めてであった。

カナード機の前翼の迎角は縦安定から失速角近くにあり、翼形も小さいので瞬間的に剥離が起こる。前翼にキャンバーを設け余裕を取るのもよいが、機体の軽量を進めながら垂直上昇する範囲で主翼の翼端を捻り下げにして前翼の揚力を減らしながらもバランスを図り調整している。若干の捻り下げは垂直上昇時の影響が少ないようで、滑空時の揚力減少は機速で補いバランスが合うのだと思うがその調整は微妙である

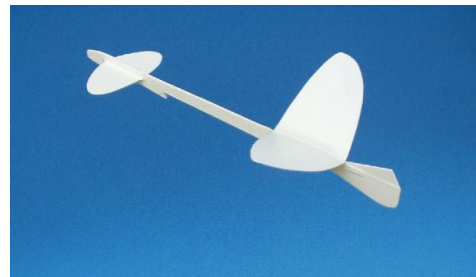
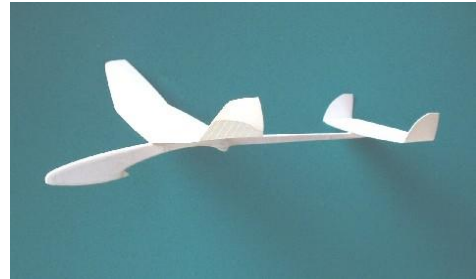


9. 翼

飛行機は推進機からの推力による速度で揚力を得て飛行しているが、紙飛行機はグライダーと同じく位置のエネルギーの高度を利用しての滑空速度で翼が揚力を得て飛行する。

紙飛行機の翼は主翼、水平尾翼、垂直尾翼に分れるが、垂直上昇機などは水平尾翼の両端を立て垂直尾翼と一体化している。

カナード機は水平尾翼が機首に移り前翼となり、垂直尾翼は後部に残り両翼は前後に離れている。



1) 主翼の働き

主翼はキャンバーがあって機体を効率的に浮かせる働きをするので、キャンバーのない翼は翼でないという愛好家がいるが、その方々に共鳴をしている。

空気の流れを粒子の流れと見ると、粒子は翼の曲面に沿って湾曲を描きながら流される。粒子の湾曲流で遠心力が働き、粒子の遠心力による離れを翼面上の粘性負圧で抑えている。その負圧が翼面に働き結果的に翼を浮かすことになると考えるのが感覚的に分りやすい。そのため迎角が大きくなり湾曲流がきつくなると、翼面の空気の粒子は抑えられず離脱し揚力が減少し失速状態になる。それにしても翼を少し触っただけでも飛び方は変わるので、空気の微妙さを改めて実感している。



翼の平面形はそれなりの形をしていても、翼型は板紙であるのでせめて曲面を付けて翼の働きを発揮させたいと考え、カナード機の主翼はキャンバーを持たせ翼端まで2枚張りで補強している。なを、カナード機は前進翼が多いがモデル機の平面形は楕円翼形状であり、飛行姿や造形を良くするために若干の変化を加えている。上昇の仕方は機体の出来上がり具合、調整、飛ばし方により一般的な螺旋の上昇や垂直上昇に同じ機体でも変化する。

カナード機は端的に言えば主翼、前翼と胴体の3つの組み合わせから成り立っている。主翼は機体を浮かすため、前翼は安定性の保持、胴体はそれらを頑丈に一体化するためである。紙飛行機の楽しみは自分の好みや独創力で翼と胴体を作り飛行性能の向上を工夫することだが、デフォルメさせた立体胴の紙飛行機や本物の飛行機に似せて作るのもあり、更に創造的なペーパークラフトとして楽しむことができる。いずれにしても紙飛行機であるためには、紙で作って空中を飛行させることが必須で、製作の工夫と上手く滑空させる技術が紙飛行機を新しく創造させ、造形的美しさを生み出し、楽しみを倍加させるのだと思う。

なお、後述で「調整方法」があるが、紙飛行機は満足に飛ぶには作り方が30%、調整が30%で、後の40%は運であると言われている。発射した時に上昇気流があるか等の偶然が大きい、それだからこそ天候の変化や気流を読むことの技術取得は必要だと思っている。

2) キャンバーと上反角

主翼のキャンバーは揚力の発生、上反角は横安定に必要であるが、主翼を胴体に取付ける時、キャンバーと上反角を付ける方法は4種類ある。

1. 左右2分割の方法

左右に主翼を分割しキャンバー上反角をつけて補強材で張り合わせる方法で二宮さんのキットで採用されている。翼は自然で出来上がりは良いが切り離すので接著作業で左右の狂いが生じやすい。



2. 主翼の中心線上の前縁、後縁部分を少し残しキャンバー・上反角に合わせて切り抜きする方法

翼の左右は両縁で分離されないの対称に作れるが、切り抜きの形状が微妙で細かい技術を要する。



3. 主翼の中心線で対称のエックス状のスジを入れ、そのスジでキャンバーと上反角を同時に整形する方法。

エックスの形状はキャンバーと上反角の度合いで決まるが事前にテンプレートを作り主翼両面からスジを入れると整形しやすく取付けは低翼タイプの機体に適している。なを、翼の取付け面は平面にならないため胴体への取付けと補強方法に工夫が必要である。



4. 主翼の中心線の中央部を10ミリ程度残し前縁と後縁から切込みを入れキャンバーと上反角を同時に整形する方法。

キャンバーと上反角を付けて胴体に主翼を接着すると、主翼の前後の隙間が広がるので上面に補強材を接着している。キャンバーと上反角は適正に成型でき、狂いも少なく製作時間が短縮できるので、主翼はこの方法を主体に製作している。

3) 前翼

① 前翼の働き

前翼は着地での変形や損傷を防ぐため2重張りになっているが、同時に湿気による変形も防止ができる。前翼の面積は揚力負担割合から決まるが、本機は主翼面積の25%の面積を選んでいるが、別に若干面積の違う前翼を作り、飛行状態を見ながら前翼を選定することも効果的である。



また中央の前後は半円で膨らませ翼端を丸めているが、衝突時に前翼が動きやすくさせると、衝撃は減少するので大事である。半円膨らませは6mm丸の彫刻刀を使っている。なを、前翼は着地の度に動くので位置合せや調整に便利のように両側に目印線を書いておくとよい。

② 前翼の取付け

カナード機は地面等に衝突着地した場合は、胴体後部に重い主翼があるため慣性力で長い胴体に強い負荷が掛かり胴体の折損が起こりやすい。

対策としては ①胴体を太く丈夫にする、②主翼を軽く作る、③主翼を重心の許容範囲内で前方にする等がある。しかし紙を使い、カナード機の条件でカタパルト発射の飛行性能を向上するにはこれらの対応も限度がある。

衝撃だと最低でも自重の2倍の荷重がかかる。衝撃荷重を減じるのは機体自重を軽くすると共に、衝突のショックを和らげることである。そして着地は前翼への当たりが多く起こり、それが胴体の曲げ折損につながるので衝突時に前翼が動くショックを和らげ折損防止と安全の対策になる。これらのことは「衝突時の負荷」で詳細に述べる。



可動する前翼の取付け方法は、胴体に前翼より若干長い溝を切込んで前翼を挟み込み固持する方法であり、切込みの中が適正であれば発射時には前翼は固持され、衝突時には動いて衝撃荷重を和らげられる。

主翼に対しての前翼の位置は非常に微妙であり、少しの狂いが飛行に大きく影響を及ぼすので溝の切込み加工は慎重を要する。(機体後部に目印を付けそれで角度を合わせるとやりやすい。)

溝加工は溝を切る両側にカルクで目印の穴を付け、2枚刃カッターで丁寧に切り込みを入れると2枚刃の巾で溝が彫れる。カッターは垂直に入れ、刃の間に挟まった紙は常に取り除き両面からカッターを入れると上手く加工ができ、切り込み後の溝両面に残ったバリはそのままにすると翼の固持に効果的である。

③ ゴムの掛ける位置

カタパルトのゴムの掛ける位置は、右図のように前翼の後方にあることが大事である。前方へ設けると発射時にゴムで機体を叩くことが起こりやすいので避けたほうが無難である。



④ 垂直尾翼

垂直尾翼は機形の特徴を表わし、胴体と主翼を同じに作っても垂直尾翼を変えるとイメージが大きく変化する。カナード機では主翼の直ぐ後ろに垂直尾翼を配設するので気流の影響を受けやすく、胴体の上部か下部かで形状も大きさも変わってくる。下部に配設した方が重心を下げ機形の特徴を強く表現するとともに飛行の安定に効果的である。

右図の胴体は垂直尾翼の3種類の形状を示したものであり、上がモデル機の図面の尾翼である。

垂直尾翼は方向の安定が得られる範囲で小さい方がスパイラル・ダイブ(旋回急降下)を防げると共に、重心位置にも関係するので重量配分を考慮した設定が大事である。

垂直尾翼の面積は重心前後の面積から得られる凶心の面積モーメントで尾翼側が大きくなる様に面積を決めなければならない。

10. 調整の方法

紙飛行機は飛行中に操作できる舵面が無いので、発射前に調整をしなければならず、カナード機の調整は垂直尾翼を除き基本的に一般機の調整と逆になる。

その調整は垂直上昇の調整と滑空の調整とに分かれるが、機体が正確に出来ていれば比較的簡単にできる。なを、前翼は差込取付けなのでスムーズに着地しても位置が狂いやすく、発射時には前翼位置の確認と微調整は必要である。本機の欠点でもあるが飛ばすたびに上昇、滑空に違いがあり楽しみでもある。

調整の仕方を順に追ってみると

① 全形の出来栄確認

主翼の裏補強の剥離、胴体の曲がり、主翼のねじり、前翼と主翼のバランスを確認する。

② 重心位置の確認

機体を裏返しにして重心バランスを取り、本機の重心位置は主翼前縁から 8 mm程度前方。

③ カタパルトでの発射

試しに風に向かいカタパルトで水平発射して機体の飛行姿勢を見る。

水平発射は宙返りが多いのでそれを例にすると、

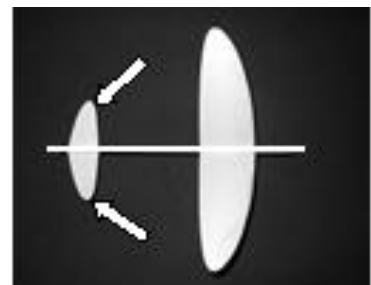
④ 主翼での調整

キャンバーを増す(後縁を下げる)。主翼のキャンバーを増すだけだと、滑空時に急降下をすることがあるが、その時は主翼の両端の後縁を上げてキャンバーをなくすようにすると防げることがある。

垂直発射でも宙返りが多いのでそれを例にすると、

⑤ 前翼での調整

前翼の両端の後端部をつまみ上げる。後端部をつまみ上げることにより発射時の高速では揚力の減少が大きく宙返りが矯正されるが、速度低下と共にその影響は減少し滑空状態に入ると支障なく滑空飛行する。



前翼の後端部が効果的

また上昇と共に滑空姿勢に入りながら、上昇限度では滑空姿勢となっているのが高度の損失も少なく最適である。これは気流状況にもよるが両翼端のつまみ上げをアンバランスに行うとよい。(前翼右端のつまみ上げのみで良いことも多い)

⑥ 滑空状態で左旋回させる場合

主翼に対して前翼を左下に傾ければよい。なを、垂直尾翼でも調整できるが、そこは発射時に機体を持つ場所なので、調整が無意味にならないよう気を付けなければならない。

⑦ 滑空状態でピッチングが起きるとき

滑空状態でピッチングが起き機首上げで失速落下するときは、主翼中央の後縁を下げてキャンバーを増し併せて主翼両端の後縁を上げると上昇と滑空をも含め調整できるがその調整量が肝要である。

また滑空開始で比較的速度がある時のみに起こる周期の大きなピッチングは機体の性格であるが同じ調整を行うと効果が出ることもある。

いずれにしても垂直上昇の調整は前翼の後端部が効果的で容易であるが、前翼は可動取付けなので毎回発射前に確認して、前翼を溝の前端に寄せた正規の位置にすることが大事である。

11. 用紙と道具

紙飛行機を作るのも生産技術であり、道具の選択、紙の選定が良い紙飛行機を均一に早く楽に作る事ができる。そして道具や紙は製作者の考えや個性に合った物を使用するのが大事であるが、一般的な物は揃えてあるとして利便性のある用紙と道具等を紹介します。

① 用紙

用紙 ; PH0180(漂白前) WW より厚さは薄いが高色で腰の強い紙です。

大きさ 395×272 10枚 500円 (PH0 特ケントとは違います。)

取扱先: 329-1104 宇都宮市下岡本町 2417-1 ホビーファン 028-671-8230

② 道具

	石の文鎮	両面が平滑で握りやすい 重みのある石	翼・胴体の貼合せの密着に利用 フリマーケットで入手
	カーブ鋏	刃先がカーブした鋏 約500円	内曲がり部分の切取りに利用
	かるこ	墨ツボ糸引きの糸止め具 3個で200円	目印、カッター切込みの両端部

	小骨抜き	大型強化ピンセット(直、斜め) 魚市場で約400円	翼と胴体の接着の押さえに 利用
	2枚刃カッター	12mm 巾のクロス用カッターの先 端の刃押へをこじって広げ刃を 2枚挿入する。	前翼保持の溝切りに利用
	圧縮盤	折りたたみ式の碁盤のように作 り、シャコマンで押さえつける。	翼・胴体を挟み圧縮乾燥させ る。 重しの代わりに、歪なくできる。

③ 計量器

紙飛行機を作りその質量を計測しておくことは、飛行性能を推測する上で大事である。又グランドで必要に応じて計量するためにもハンデーなものが必要となってくる。道具の一つとして是非揃えておきたい物であるので紹介しますが、自分に合った物として利便性を求めて改良をお願いいたします。

左は「POST SCALL」として売られていた物を利用して、スケールの左端の錘をはずして5円銅貨を接着したものです。

1円アルミ貨は1gなので一枚ごとに吊るして目盛りを記入した。目盛りは製品の20gが4gになり、30が6g、40が8gと上手く合っているので、計量は0.1gまで判読でき紙飛行機に必要な質量読み取りは十分である。

なを、端部にはクリップが付いているので紙飛行機の吊り下げは容易で使いやすい。出来上がった紙飛行機を計量している写真で、分りづらいがリングの下の黒の金具には突起物がありそれが読み取る位置で拡大では5.2gと判読できる。



12. 衝突時の負荷—— 胴体の損傷(紙飛行機が衝突した時の力)

紙飛行機は飛行中のコントロールがなされないので、建物の壁や硬い地面に衝突することがあり、これが機体の破損のほとんどの原因となっている。

紙飛行機の中で先尾翼紙飛行機は飛行姿に優美さがあり、鴨のイメージに似ていることからカナード(英語)、エンテ(ドイツ語)と呼ばれている。そのカナードは機体重量の大きな部分の主翼などが後部に配設されているので、衝突などで胴体の折損が比較的起こりやすく、その対応のためにも衝突時の負荷を調べてみた。

1. 機体の破損

右の紙飛行機はカナードの破損機体であり、最近は少ないがそれでも初飛行で破損することがあり、蔵出し一発でオシャカとなって飛ばす楽しみを一瞬にして奪われてしまうことになる。

写真ではよく分らないが、ほとんどが胴体の損傷であり前翼と主翼の間の胴体の折れや曲がりである。



2. 胴体損傷の内容

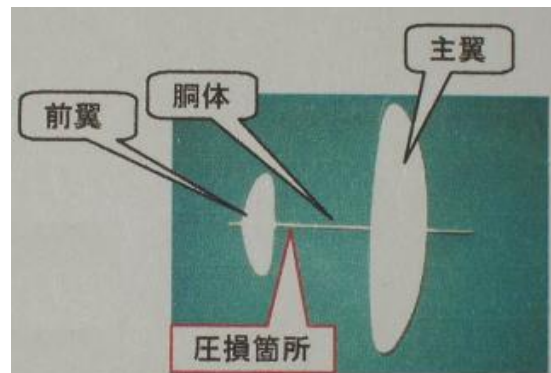
胴体の損傷としては、損傷の具合と損傷の位置に分けて内容を調べた。

直下降での衝突着地は垂直の場合と斜めの場合があるが、斜め着地が多く衝突時に衝撃音がして瞬間的に損傷している。

① 損傷の具合

1) 圧損

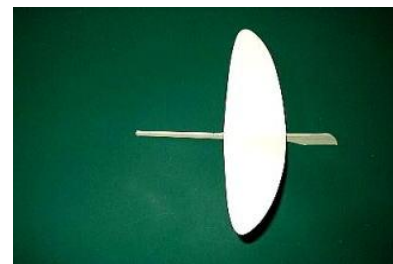
胴体が衝突時の衝撃圧縮により損傷を起こしている。写真では分りにくいですが前翼の後部で損傷し胴体より紙が膨らんで側面にクラックが入っている。



2) 切断

胴体が折れて切断された前翼部分が分離飛散している。衝突時、胴体の弾性が少なくもろくて弱い箇所にも曲げせん断が作用し衝撃で切れたと思う。

内側の紙は広がりながらも、きれいに切れている。



3) 折損

機体の斜落下の衝突で、胴体に曲げが働き折れている。

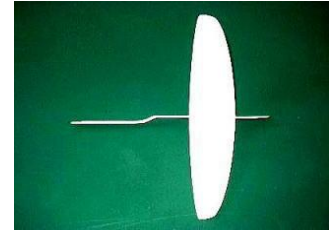
折損は横折れと縦折れがあり、衝突時の機体の姿勢によると思う。



4) 曲 損

胴体が衝突時に衝撃の圧縮で曲損を起こしている。前翼の後部で座屈によりクランク状に胴体が曲がっている。衝突時に荷重が若干偏芯して曲がったと思う。

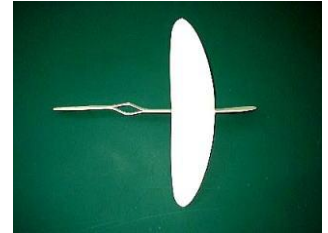
(前翼をはずしてある)



5) 裂 損

胴体の接着加工が不十分であったのか、2枚に裂けて広がり折れ曲がっている。

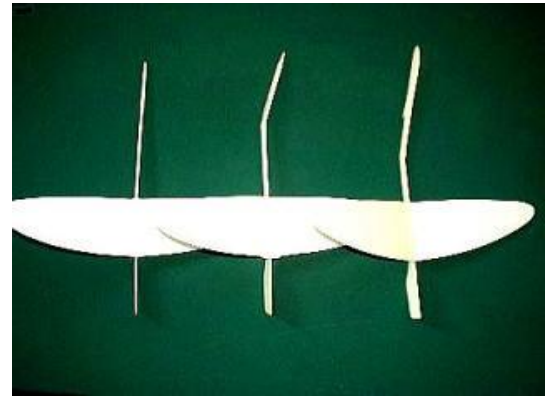
(前翼をはずしてある)



② 損傷の位置

折れ曲がりの位置は胴体の中間(写真右端)が多いが、その他に胴体のウィークポイントにも起きている。それは加工時の接着不良や紙の折れスジ、カッターでの傷や鋏の切り込み段差等が加重時の応力集中で損傷につながったと考える。

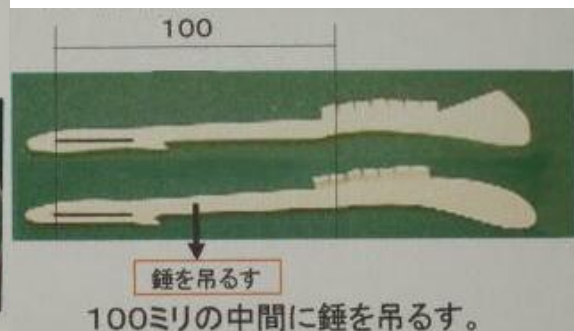
(前翼をはずしてある)



3. 機体の強度と衝突時の荷重試算

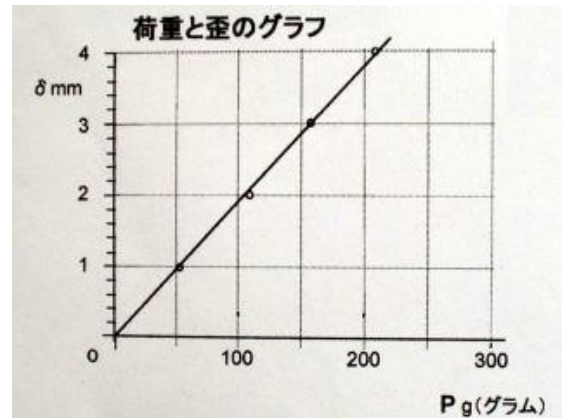
機体は前翼先端から主翼先端までの100ミリを梁や柱と仮定して強度、荷重を試算した。

① 胴体の曲げ歪量の寸法計測



② 計測結果

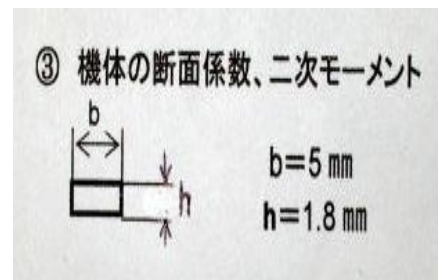
100ミリのスパンの中間に各歪の量に対応した錘を吊るしグラフ化した。なお胴体は③のように横にした。



③ 機体の断面係数と二次モーメント

$$Z = bh^2/6 = 5 \times 1.8 \times 1.8 \div 6 = 2.7 \text{ mm}^3$$

$$I = bh^3/12 = 5 \times 1.8 \times 1.8 \times 1.8 \div 12 = 2.43 \text{ mm}^4$$



④ 縦弾性係数(ヤング率):E の算出

胴体の曲げの歪の計測値は「両端支持梁」と見なされるので

$$\delta = PL^3/48EI$$

$$\therefore E = PL^3/48\delta I$$

グラフより歪 $\delta = 4 \text{ mm}$ の時 荷重 $P = 210 \text{ g} = 0.21 \text{ kg}$
 なを、 $L = 100 \text{ mm}$, 断面二次モーメント $I = 2.43 \text{ mm}^4$

$$E = 0.21 \times 100 \times 100 \times 100 / 48 \times 4 \times 2.43 = 450 \text{ kg/mm}^2$$

ちなみに、曲げ応力は

$$\sigma = M/Z = PL/Z = 0.21 \times 100 / 2.7 = 1.9 \text{ kg/mm}^2$$

⑤ 衝突時の荷重計算

胴体を柱としてオイラーの座屈計算より胴体強度の限界荷重として考え、衝突時に掛かる荷重を推算する。

$$P_{cr} = n \times \pi^2 E I / L^2$$

柱の両端条件での n は $n=1$ とする。

機首は地面に刺さるが回転ができ、他端は主翼である。

$$P_{cr} = 1 \times 3.14 \times 3.14 \times 450 \times 2.43 / 100 \times 100 = 1.08 \text{ kg}$$

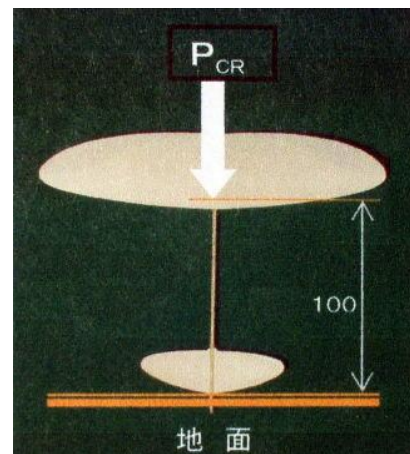
すなわち、胴体強度の限界荷重は約 1kg であり、これ以上では胴体は損傷してしまうことになる。

これは、カナードの機体で主翼と後部の質量を 5g とすると

$$\text{荷重倍数 } n_{cr} = 1 \text{ kg} / 5 \text{ g} = 1000 / 5 = 200 \text{ となる。}$$

実際には胴体が衝突で損傷しているので、荷重倍数は 200 倍以上にもなったと考えられる。これは衝突でぶつかった相手にも同じ衝撃を与えるのである。

なを、机上で 950g の文鎮を垂直に乗せると機体は保持されるが、若干機体を傾けると胴体の曲がりが増進し保持が困難となるので計算の妥当性は得ていると考える。



4. 機体破損と安全の考え方

紙飛行機は飛行中のコントロールが出来ないので前の飛行状態を見て発射前に修正するのであるが、修正すぎて急落下を起こし衝撃で機体を破損してしまうことがある。

カナードは主翼が機体の後部にあり衝突時の胴体への負荷が大きく、また胴体は長く折損が起りやすいため、前翼を動くように保持して衝突時のショックを低減させている。それは機体の保護とともに衝突を受けた物や人にもショックは少なくなるのである。

機首のスポンジゴムの取付けは衝撃を和らげ安全向上を図っているが、さらに胴体の損傷は相手への衝撃を少なくさせることにもなり、機体破損が安全対策になると考えられる。胴体を桧材で丈夫に作った垂直上昇機もあるが、機体を強化しながらも安全性に熟慮したバランスある紙飛行機が大事だと思う。



13. 機体の小型化

カナード型の紙飛行機は飛行姿の優美さと共に機体には独特な造形の美しさがあり大きな魅力をもっている。カナード機は手投げでは難しく、発射はゴムカタパルトで規定のゴムを張りその張力で機体を打上げる。長い滞空時間を得るにはより高い高度が必要で上昇能力の向上のため軽量化と空気抵抗の少ない機体を作ることが他の紙飛行機と同様に急所となる。

カナード機の特質

カナード機は機体重量の大きな部分の主翼が機体の後部に配設されているため、長い胴体が着地での衝撃負荷で折損を起こしやすく、胴体をそのまま細くすることは難しくなる。

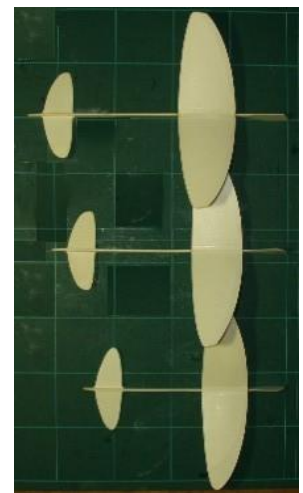
木材等だと胴体の強度は上がるがジャパンカップ競技の自由機種は紙に限定され、翼巾は165mm以上と規定されているので、それらの基準に合わせた機体の製作が必要となる。

競技でのゴムの規則変更

競技でのゴムカタパルトのゴムは当初は自由であったが、その後 ①#20 乳白色の糸ゴム 100cm で二重折りと規制され、更に ②#20 乳白色の糸ゴム 全長 50cm で一重 ③#20 あめ色の糸ゴム 全長 50cm で一重と安全性の確保から弱いゴムへと変更された。

自作カナード機の変化

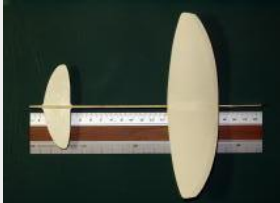
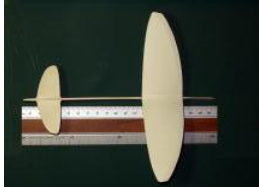
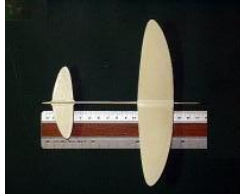
カナード機の大きさもカタパルトのゴムの規制に伴い機体を縮小させてきた。それをまとめて比較すると下図のL, M, Sのように変化し、現在は③のゴムに伴いSタイプのように機体は縮小した。これにより機体の製作精度も厳しくなり重心位置の設定や調整が微妙となった。



- ① #20 乳白色の 100cm ゴムを二重折り **Lタイプ**
全 長：225mm
- ② #20 乳白色の 50cm ゴムを一重 **Mタイプ**
全 長：205mm
- ③ #20 あめ色の 50cm ゴムを一重 **Sタイプ**
全 長：175mm

各タイプの概略諸元

各タイプの概略の諸元を示すと下記ようになる。(前翼面積は主翼の約 25%である。)

L タイプカナード	M タイプカナード	S タイプカナード
		
全 長：225mm	全 長：205mm	全 長：175mm
全 巾:172mm	全 巾:172mm	全 巾:172mm
主翼面積：60cm ²	主翼面積：57cm ²	主翼面積：52cm ²
アスペクト比λ =4.93	アスペクト比λ =5.19	アスペクト比λ =5.68
前翼面積：15cm ²	前翼面積：14cm ²	前翼面積：13cm ²
全翼面積： 60+15=75cm ²	全翼面積： 57+14=71cm ²	全翼面積： 52+13=65 cm ²
自 重：7±0.3g	自 重：6±0.3g	自 重：5.2±0.3g
翼面荷重： 7÷75=0.093 kg/cm ²	翼面荷重： 6÷71=0.085 kg /cm ²	翼面荷重： 5.2÷65=0.080 kg /cm ²
製作用紙：WW用紙	製作用紙： PHO 177 (漂白前)用 紙	製作用紙： PHO 177 (漂白前)用 紙

S タイプ カナードの最近の滞空記録

最近の記録会のデータを参考とします。

2004/12/12 北関東紙飛行機競技会

場所： 邑楽タワー広場

天気： 寒い曇天 微風

記録：

- (1) 29.9秒 (2) 31.3秒 (3) 34.3秒
- (4) 26.8秒 (5) 31.4秒 平均 30秒

考察： 上昇気流は少なく、機体の性能として
30秒で ありと考えられる。(L,Mも同程度)



14. 三枚翼機（カナード機の変形機）



紙飛行機のうち三枚翼機は3枚の翼を持った紙飛行機で、数は少ないが図面化されて見ることができる。英語では Three-Surface Type として紹介されているが普通機に前翼を加えたタイプではなく、先尾翼機 (Canard) に尾翼を加えたタイプとして理解した方が分かりやすいし調整等もやり易い。

三枚翼機の魅力は飛んでいる姿が独特で、小さいながらも他の飛行機とは違う存在感を示していることだと思う。一本ゴムのカタパルトに合わせて機体は小さくなっているが、目立ちながらも違った雰囲気を持っていることがある。

1. 三枚翼機の種類

三枚翼機の製作した種類を示します。

一見だけでは分かりづらいが、機体の大きさと翼の形状、胴体の形状、首の長さ等に違いがあり、飛行の姿勢にはそれぞれ独自の雰囲気が感じられます。



2. 機体の形状と重量

三枚翼機の形状は図面ではありませんが、機体平面図、胴体側面を載せましたので参照下さい。三枚翼機は前翼、主翼と水平尾翼で構成されるが、機体を浮かせるのは主翼であり、前翼と水平尾翼は縦安定のバランスに利用している。垂直に打ち上げ、滑空をさせるには各翼をバランスよく調整する必要がある。

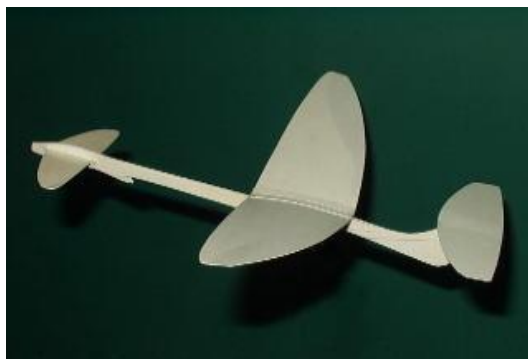


各翼の取付けは主翼の前縁と後縁を基準として前翼の取付角は 3° 、水平尾翼の取付角はマイナス 0.5° としている。そして水平尾翼の位置は主翼の気流の影響を受けないように垂直尾翼の上に配設している。主翼も水平尾翼も胴体からフランジを出し接着取付けをしているが、前翼は差込取付けである。

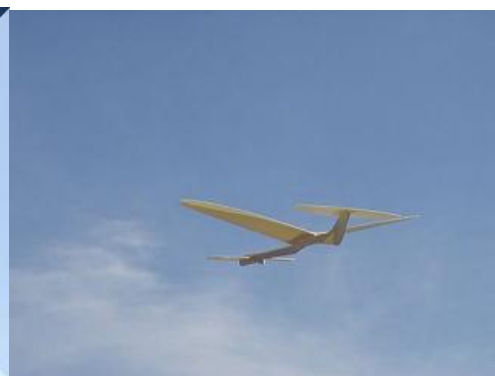
重心は主翼前縁から4~5mm後方の位置にあり、機重は5.3gと先尾翼機と変わらない。それは全長が190mm、主翼は先尾翼機とほとんど同じ翼を利用しているからである。胴体は主翼中間より前方が8枚合わせとして形状が変わっても使用材料が大きく変わらず、また前翼は2枚合わせで先尾翼機より小さいが貼り合わせ加工は同じである。そして、水平尾翼は1枚なので全体としては重量の増加とならずほとんど同じになっている。なを、本機の初期の型(カタパルトは全長100mmのゴムを二重にした)の図面が「武蔵野PPニュース No. 49」に掲載されています。

3. 機形

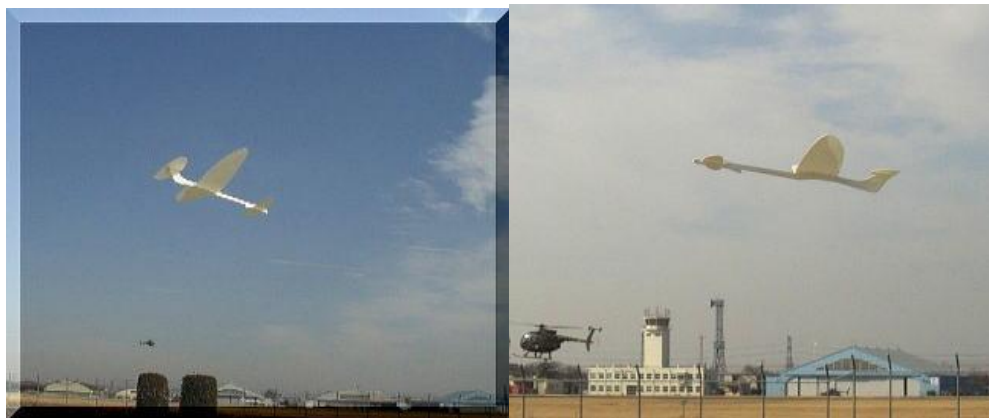
本機の機体の形状が分るように写真を載せます。



4. 飛行風景

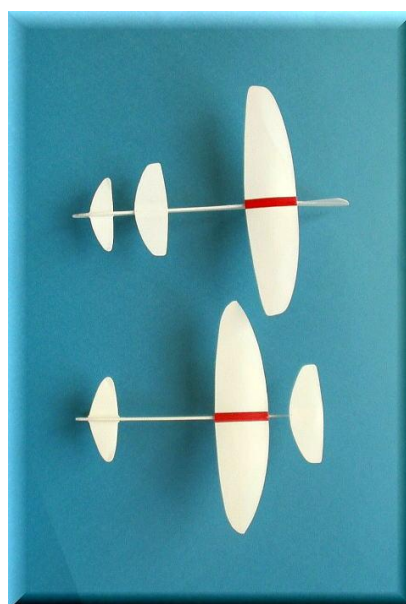


旋回の調整は主翼、尾翼、垂直尾翼で出来るが過度になり易く、前翼のみにして前翼を左傾きにすると左旋回となるので試してみるとよい。



5. 変形型機

本機体は前翼を二枚にした変形機である。飛行性能は期待した以上で十分に楽しめた。両機の違いを明確に分かるように載せた。



15. おわりに

紙飛行機は「子供の科学」に長く掲載されて子供の遊びと思われており、また8～88歳の巾の広い年齢に合う趣味と言われて広がっている。しかし紙飛行機に夢中なのは高齢者に多い。紙飛行機は簡単に作って飛ばすことができると共に、楽しみながら続けるとその奥の深さに魅了されてしまい、情報交換を行いながら仲間との交わりが楽しみになってくる。

紙飛行機は作る楽しみ、飛ばす楽しみ、競う楽しみがある。相手が紙なので好きに創造して設計し作れるので、晴耕雨読のように青空のもと広場で飛ばして歩き、雨天は机上で製作をする費用のかからない健康な遊びである。なお広いグラウンドが必要で、ゴルフのように雨天や風の強い時でも行うとは違い天候を選び、また自分が創意工夫して製作したオリジナルが巾を利かすといった贅沢な趣味である。

先尾翼機を作り飛ばしてきましたが、時間的に余裕のできたことを理由に体験を記録しておこうと「ひとりよがり」で書きました。拙い文章で自分勝手な記述が多いが、皆様の体験や経験からのご意見をいただければ幸いと考えております。

カナードが13機入ったキャリアボックス



紙飛行機を趣味として

紙飛行機を仲間と楽しんでいる。多くはリタイアをした年齢の人であるが、80才で元気に熱中している方に接すると、ますます紙飛行機が好きになる。

紙飛行機は簡単に作って飛ばすことができるので、自分の好みの種類や形状にこだわりながら続けるとその奥の深さに魅了され、情報交換や仲間との交わりが楽しみになってくる。

紙飛行機は材料が紙なので、費用を掛けずに好きに設計して作ることができる。雨天には紙飛行機を作り、晴れた日には青空のもと広場で飛ばして仲間と過ごす、現代版の晴耕雨読を長く続けていきたい。



紙飛行機の中で先尾翼機(カナード機)に興味を持ちこだわっているが、設計や製作での疑問が仲間の一言で解決のヒントになり三人揃えば文殊の知恵を実感しているのがこの頃である。

最後にこのような素晴らしい趣味とチャンスを与えて下さった紙飛行機愛好家の皆さんに感謝致します。