

S-2 日本で生まれ育った「高性能紙飛行機」 —スカイスポーツの原点—

二宮康明

High Performance Paper Gliders

Yasuaki Ninomiya

Key Words : paper glider

Abstract

The paper gliders I introduce here are not "origami" ones made by folding a piece of paper, but the ones made by cutting parts out of a thick quality paper with much bend-resistance and gluing these parts together. In this way, there is much more freedom aerodynamically and structurally in designing these gliders than the "origami" one.

There are some key points in designing paper gliders. They are as follows;

- 1) Since the paper gliders fly in a region of Reynolds' number 10^4 , a thin airfoil with the maximum camber of 3 to 6% must be used. This was arrived at as a result of wind tunnel test.
- 2) When a plane is launched with a rubber band catapult, the initial speed would easily be a several times more than its glide speed. In order for the plane to fly stably at these very different speeds without trimming the elevators in air, the center of gravity should be placed at 80-90% from the leading edge of the main wing. And the plane is furnished with a large horizontal tail volume.

Paper gliders designed like this can obtain an altitude of more than 30 meter and glide aloft for more than 30 seconds.

Also, the development of paper gliders with high performance in a variety of designs are described.

はじめに

ほとんどだれでもが、子供の頃ノートや広告紙で折った紙飛行機を飛ばして遊んだ思い出を持っているであろう。人類は、大昔から「大空を鳥のように自由に飛びたい」という願いを抱き続けてきた。それが今日では多くの人々にとって飛行機を利用しての旅行は日常的事にさえなりつつある。しかし、このような空の旅も翼の生えたバスに乗るのと大差はなく、個々の人々が自由に飛びたいという気持ちを十分に満たし得るものではないような気がする。いささか我田引水になるかもしれないがむしろ紙飛行機を飛ばして、その何ものにもとらわれないで空を自由に飛ぶ姿を眺

める方が、人々の自由に飛びたい気持ちをささやかではあるが満たしてくれるのではなからうか。少し大げさに言えば紙飛行機は自由さの象徴であり、スカイスポーツの原点ではないかと考えられる。

普通、紙飛行機というと、多くの方々はとっては紙を折って作る折り紙飛行機がまず思い浮かぶであろう。確かに折り紙飛行機は形や折り方が多数あって、子供にも手軽に作ることができ比較的よく飛ぶものもある。しかし、1枚の紙を「折るだけ」で作るという制約があるために、空気力学的により洗練された設計をしにくいという状況にあった。これに対して厚手の画用紙とか製図用のケント紙など曲げ強度の強い紙を使い、部品を所要の形に鋏で切って張り合わせる方法を取り入れれば、設計の自由度を大幅に増すことができる。

1. 高性能紙飛行機の特徴

ここで説明する紙飛行機も模型飛行機の1つであり、それらと基本的には大差はない。しかし、紙飛行機の飛ぶレイノルズ数の領域、広い速度範囲、機体構成などに起因する特殊性がある。つぎにそれらについて説明しよう。

主翼

後述のように空力的理由から主翼を薄翼構造としてあるために、特に発進の際の高速時のねじれ強度の関係から、紙による大形の主翼は無理があり、まず主翼の寸法は、経験上、翼幅は2.5cm程度、翼弦長は4～5cm程度以下にせざる得ない。また紙飛行機の滑空速度は3～5m/sec程度であるので、レイノルズ数 10^4 附近の領域で飛行する。岡本正人氏による風洞実験の結果、翼断面は薄翼でキャンバー3～6%が揚抗比最良であることが確かめられている⁽¹⁾(図1)⁽²⁾。薄翼の構造としては主翼中央附近を補強のためケント紙2枚程度をはり合わせて曲げとねじれに対する補強を行っている。

重心位置

紙飛行機を少～壮年の人が飛ばす場合には手投げも可能であるが、幼～高齢の人までを対象にすると、ゴムカタパルト発進が主流である。発進時の飛行機は速度は定常滑空時の数～10倍以上にも達するので、この広い速度範囲に対して、機体の飛行中、水平尾翼を調整することなしに滑らかに上昇させ、頂上で定常滑空に入れる必要がある。

一般に重心を翼弦長の2.5%において、最小沈下または、最良滑空比附近の飛行速度に水平尾翼に取付角を調整した上で、これよりも速度を増加させた場合には機首上げの傾向となり、速度が10倍になれば多くの場合には宙返りとなる。また高速で宙返りしないよう最初から水平尾翼を機首下げに調整しておくことと最小沈下あるいは最良滑空比の滑空は実現できず機首下げで、つつみ込むようになる。これに対し図2のように重心位置を主翼翼弦長の80～90%にうしろに下げると、ゴムカタパルトによる高速発進の際にも宙返りすることなく上昇し、頂点までに次第に速度が低下し、なめらかに所定の最小沈下あるいは最良滑空比の近傍の速度の定常滑空に入れることができる。この場合、重心を主翼翼弦のうしろの位置に置くための縦の釣り合いと安定対策としては水平尾翼容積比を1.0～1.2程度に大きくとる必要がある。これらの効果は金田弥奈氏・加藤寛一郎氏によるコンピューター・シミュレーションによっても確かめられている⁽³⁾。このように図2の配置をとれば上昇と滑空に良い条件を両立させることができる。

胴体

紙飛行機は飛ばすたびに地面や壁などに激突することも少なくないので、胴体は紙をいく枚も張り合わせ、特に強度のいる機首部分の張り合わせ枚数を多くし（これは重心を所定の位置に合わせるための錘りを兼ねている）、逆に後部に行くほど枚数を減らす構成をとる。この胴体の構造はモノコック構造にくらべて作りやすく、衝突などの外力に強く、またこわれても修理しやすい。また、断面積が小さいから空気抵抗が小さいという利点もある。

胴体を扁平に幾枚も紙をはり合わせて構成する構造の胴体では、多くの場合、上下方向の曲げ強度十分ではあるが、横方向は張り合わせ枚数が不足すると曲がりやすく、飛行機が飛ばない原因となる。胴体の横方向の曲げははり合わせ枚数、換言すれば厚さの3乗に比例する(図3)。後部胴体における必要強度は飛ばし方にもよるので一概には言えないが、紙の厚さ0.27mmのケント紙を使用した場合、ゴムカタパルト射出では、はり合わせ必要枚数は5~6枚。また発進の際、後部胴体に横方向の力がはたらきやすい手投げ発進では、6~8枚である。

以上のような理由をもとに実際の機体の構成の1例は図4のごとくなる。これらの各部品を流通あるいは取扱いに便利のように1枚のケント紙に印刷した例を図5に示す。

2. 具体的な作品例

こうした構造で具体的にどんな紙飛行機ができるかということ、プラスチックモデルのように実物の精密縮尺モデルを目指すのは得意ではなく、むしろ紙の特質を生かして飛行性能と紙の美しさを兼備した機体を構成するのが紙飛行機の真の分野ではなかろうかと思う。今までに述べてきたケント紙を切って張り合わせる形式の紙飛行機は大まかに次のように分類できる。

■競技用機

一般に模型飛行機の性能の良さは、高く上昇してどれほど長く空中を飛んでいられるかという滞空性能によって代表できる。このため主翼や胴体を丈夫に作る一方で、できるだけ重さを減らし、かつ余分な空気抵抗が増さないように設計する。競技用機(写真1)は広い場所で飛ばし、うまく上昇気流にのれば後述のように時には数分間以上もソアリング(滑翔)を続ける性能がある。

また黒田保氏の開発になる垂直上昇型の競技用機も良い記録を出している。この機体は図6のように水平尾翼の左右両端を上折る形で2枚の垂直尾翼が立てられている。この機体をゴムカタパルトで発進させると、高速上昇時の垂直尾翼に働く風圧力によって、これにつながる水平尾翼の後縁がわずかに下り、宙返りすることなく頂点まで垂直上昇を続ける。頂点の速度が落ちたところで、紙の弾性によって水平尾翼はもとの取付角にもどり、機体は定常滑空に移行する。垂直上昇をさせるために、翼を含めて機体に働く風圧力の作動点はできるだけ機体の推力軸に近づけておいた方が調整しやすいので、上反角の大きい直線的な主翼ではなく、上半角が小さくてすむ後退翼の主翼と組み合わせた構成とされている。

■プロフィールモデル

胴体が扁平な構造なので実物をモデルにする場合には、そのプロフィール(横顔)をまねることになる。実物の特徴をとらえながらできるだけシンプルにまとめるのが、よく飛ぶプロフィール機を設計するコツである(写真2)。

■変形機

紙飛行機の大きな特徴は、どんな変わった形の飛行機でも手軽に作れる点にもある。無尾翼機、先尾翼機、円形翼機、非対称機⁽⁴⁾などもある(写真3)。

■自由形機

紙飛行機の本当の楽しさは、実物やプラスチックモデルにない紙飛行機、例えば自分で設計して飛ばしてみたいと思う飛行機が自由に簡単に作れる点にある。しかもうまく設計すれば、それらが私たちの夢をのせて実際に空中を飛ぶのである(写真4)。

おそらく模型飛行機の材料には桧、竹ひご、バルサなど、最近はカーボンファイバーその他も加わって多くの優れたものがあるのに、なぜ紙だけにこだわるのかという疑問をもたれる方がいるかも知れない。紙は模型飛行機というものが出現した昔から、木や竹で組んだ骨組みに薄い紙を張るということが行われてきている。特に薄く破れにくい雁皮紙に代表される和紙は貴重な材料であった(ただし木や竹を骨格にした飛行機は紙飛行機とは呼ばない)。ここで紹介している紙飛行機の場合にも紙は次のような特長もっていて、なかなか優れた材料なのである。

すなわち紙は①私たちの日常において最も手近なもので価格も安価である。②鉄一丁でどのような曲線でも形成でき、のり付けだけで簡単に組み立てられる。また仕上げのためのサンドペーパーなどをかけなくても、紙の面は平滑であって空気力学的にも好都合である。③紙の持つ生地の美しさがある。④紙飛行機の構成部品のすべてをB4判程度のケント紙などの1枚の紙に印刷できるので流通や普及に便利であるなど多くの利点がある。

3. 高性能紙飛行機の生い立ち

さてここで私事にわたって恐縮であるが、紙飛行機にかかわりをもつので少しばかり紹介させていただく。私は小学校5年から大学卒業まで仙台で過ごした。仙台一中（現在の仙台一高）に入ってから私の飛行機好きは本格的になったように思う。同校には昭和13年に「一中航空研究会」という会ができ、私も友人誘われて二年生の始めから入会した。ここでは放課後、天気がよければ本物のグライダー訓練、雨の日は屋内体操場で紙飛行機を飛ばしたり、教室で「飛行の原理」の輪講をするなど楽しい会であった。そのころ作った紙飛行機は九六戦とかハリケーンなど当時の花形機のプロフィルモデルが中心であったが、このころに現在の私の紙飛行機の、ケント紙を切って、いく枚も張り合わせて作る基本ができつつあったように思う。仙台にあった600~700メートル四方の平坦な草地の宮城野原練兵場は、模型飛行機を飛ばす場所としても大変に好都合だった。

昭和41年末の朝日新聞の「青鉛筆」欄に、翌年1月に世界ではじめての国際紙飛行機コンテストが米国で予定されており、参加機を募集しているという記事を妻が発見した。締め切りまで20日間ほどあったので、中学のころの紙飛行機を思い出して競技用機を作り、テストしながら改良を重ねて1月中旬に紙飛行機8機を段ボール箱にいていねいに入れて米国に発送した。これらの機体はサンフランシスコ大会に出場し、幸いに滞空時間と飛行距離の2種目に1位となり、グランプリを受賞した。

その後、少年向けの科学雑誌に紙飛行機の型紙の掲載を依頼されて、最初は1年間も続くかとあやぶんだが、号を重ねて現在まで約29年間続いている。この間、型紙をまとめて単行本の形で出版するなどしてきた。キットとしてはほかの社から市場に出しこれも16年間続いている。外国に類似のものは無いので輸出も多い。

4. 性能と評価

実物のソアラーなどの高性能滑空機では滑空比が約50、沈下率は最小0.5m/s程度が実現されている。これに対して紙飛行機はレイノルズ数が実物よりも2桁以上小さいので、空気の粘性が影響する領域に入っていて、有害抵抗が大きいいため滑空比はせいぜい6~8程度しか期待できない。また有害抵抗が支配的なので、実物ソアラーのように縦横比の大きい細長い主翼を採用して誘導抵抗を減らしても、滑空比はあまり改善されない。しかし沈下率については紙飛行機は機体を軽く丈夫に作ることに努力すれば0.5~1m/s程度と、ほぼ実物高性能機に匹敵する性能が得られる。

紙飛行機を飛ばして楽しむ場合、私の経験では距離を遠くまで飛ばすよりも、近くで長く滞空させる方が、より楽しめるし、飛行姿を眺めて翼飛んだなあという満足感が得られる。

また少しばかり前述の繰り返しになるが技術的観点からも、遠くに飛ばすための滑空比の改善には原理的に限度があるし、機体重量の軽減という要素も入ってこない。他方、滞空性能を向上させるための必要条件は空力的改良のほかに、高く上昇させ、かつ沈下率を小さくするために、機体を軽くて丈夫に作るという構造上の工夫も必要とされる。このように紙飛行機の性能を飛行距離で評価するよりは、滞空時間で判断する方が、より総合的に紙飛行機の「良さ」を評価することになるばかりではなく、材料や構造の改良によって今後の性能向上も期待できる。以上の理由から紙飛行機の性能は滞空性能に重点をおくのが適切であると私は考えている。野外の広い広場で紙飛行機を飛ばす際には熱上昇気流を利用して滞空時間を延ばすことができる。一番良いのは、風の弱い晴天の日の午前10時~12時の間の時間帯である。図7は紙飛行機を実際に飛ばして、1分間以上

の滞空記録を約2年間にわたって集めたものである。↑印は遠くに飛んで視界から去った機体の見えなくなるまでの記録である。図では最高7分10秒の記録がある。このデータは私がイラン滞在中の2年間にとったものであるが大体の傾向は日本でも大きな相違はない。ちなみに日本における最近までの野外での滞空記録は15分間以上が計測されている。

熱上昇気流は地上から気泡になって上昇して行くと言われている。したがって紙飛行機をうまく上昇気流のせるには、機体を高く上昇させて、旋回するように調整しておく。このようにすれば紙飛行機が上昇気流の気泡の中に入って、その中で旋回を続けながら気泡と共に上昇していくチャンスがふえるというわけである。

これまでの説明から紙飛行機の滑空性能向上のキーポイントは次のような項目であると考えられる。すなわち、

- (i) 手投げあるいはゴムカタバルトによる上昇高度
- (ii) 沈下率
- (iii) 上昇から滑空に移行する機体姿勢変化の際に、極端に高度を失わないこと
- (iv) 旋回半径(上昇気泡の中に留まるには、沈下率が増加しない範囲内で旋回半径は小さい方がよい)。
- (v) 翼にフラッタが発生しにくいこと。これによって機体を高速度で発進させる際の許容速度の上限がきまる。

5. 紙飛行機の飛行場の一例

紙飛行機を楽しむためのシステムは、飛行場がなければ完結しない。おとなが紙飛行機を飛ばして楽しむために、あるいは1分間以上滞空しても場外に飛び出さないためには、紙飛行機の飛行場としては少なくとも300m四方くらいの広場が望ましい。国土の狭い我が国でこれだけの広場を都市内あるいは近郊の便利な場所で見出すことはむずかしい。ニューヨークのセントラルパークやロンドンのハイドパークのように敷地が広大であれば、その中に林や池と広場の共存も可能であるが、日本の大部分の公園ように敷地が狭ければ箱庭になってしまう。そこで私の提案⁽⁵⁾であるが、都市内に複数の公園が計画されている場合には、林の公園、池の公園、原っぱの公園などと機能別に性格づけすれば、それぞれが十分な広さがとれるのではなからうかと思う。その実例を紹介しよう。

今から20年前、東京都武蔵野市近傍には林の小金井公園、池の井の頭公園、花の深大植物公園がすでにあり、そこに同市内の旧中島飛行機多摩工場跡地に新しく都立公園が計画された。私たち模型飛行機仲間はずいぶん原っぱを主体とした公園にしてもらいたいと考え、紙飛行機だけではなく、広く原っぱを要望する市民の方々と行政側に積極的に働きかけた。7～8年にわたる市民運動の末、ついに行政側、議会側の同意を得て約300m四方の原っぱを中心とした武蔵野中央公園が実現できた(写真5)。開園8年後の今日では紙飛行機を含む模型飛行機のメッカと言われるまでに至っている。今後このような公園が増えることを期待したい。

6. 競技会

国際では、1985年にボーイング社の本拠、米国シアトルで18年ぶりに第2回の国際紙飛行機コンテストが開かれた。前回の第1回コンテストは、そのころ国家的プロジェクトとして進められていた超音速輸送機(SST)の開発にちなんで、折り紙飛行機の形がSSTの形に似ているところからサンエンティフィック・アメリカン社が企画し1967年に開催したものであった。第2回のコンテストはサイエンス85社、スミソニアン航空宇宙博物館、ミュージアム・オブ・フライトなどの主宰で開かれた。

競技は滞空時間、飛行距離、曲技、デザインの4つのカテゴリーで、参加資格はプロ(航空関係の技術者など)、ノンプロ、ジュニアに分かれており、これらを組み合わせて合計10種目の競

技が行われ、最終的には日本からの参加機が8種目の優勝をさらう結果となった。日本からの参加機の大部分は高性能を狙った、言ってみればまじめ一方の作品だったのに対して、外国の機体は折り紙飛行機から宇宙ステーション、はてはコウモリ男まで大変にバラエティーに富んだ独創的で楽しい飛行機が多かった。

日本国内の競技会については、次第に本格的なものが定着しつつある。すなわち木村秀政先生がカップを提供され、日大航空研究会が主催する木村杯紙飛行機競技会が昭和57年から開始され毎年春秋2回ずつ継続されている。昨年の秋の第27回競技会では、1分間以上の滞空が60数回も記録された。その後も同研究会の努力により続けられている。また日本紙飛行機協会と毎日新聞社主催の全日本紙飛行機選手権大会（略称ジャパンカップ）が平成5年から始められ、今年の第4回大会は全国27カ所で合計50回以上の予選ののち11月に東京都立武蔵野中央公園で決勝大会が行われた。これらのほか国内何カ所かで大会が開かれており年を追って増加する方向である。

むすび

上に述べたように高い性能をもった紙飛行機は、人々が空への関心を持つきっかけとして、また子供からおとなまで一生楽しめるスカイスポーツの原点として定着しつつある。私としては、これが単なる遊びではなく、スカイスポーツ全般がそうであるように、科学的なしっかりした根拠をもったものになってほしいと思っている。

参考文献

- (1) 岡本 正人 “模型飛行機のための翼型特性” 第1回スカイスポーツシンポジウム、
1995年12月2・3日、日本航空宇宙学会
- (2) 岡本 正人氏の測定による（1996年10月16日同氏より提供を受く）
- (3) 金田 弥奈・加藤 寛一郎 “模型滑空機の長時間滞空について”
日本航空宇宙学会誌Vol.39、No.453（91.10）
- (4) 二宮 康明 “実験用機材としての紙飛行機～その実例「非対称機」”
第2回スカイスポーツシンポジウム、1996年12月7・8日、
日本航空宇宙学会
- (5) 二宮 康明 “原っぱ公園の提案” グリーン・エージ、昭和59年5月、通巻125号、
（財）日本緑化センター

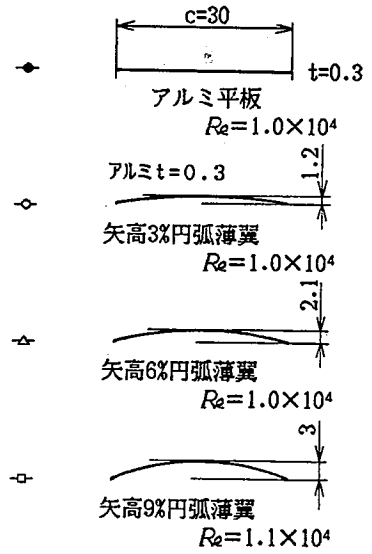
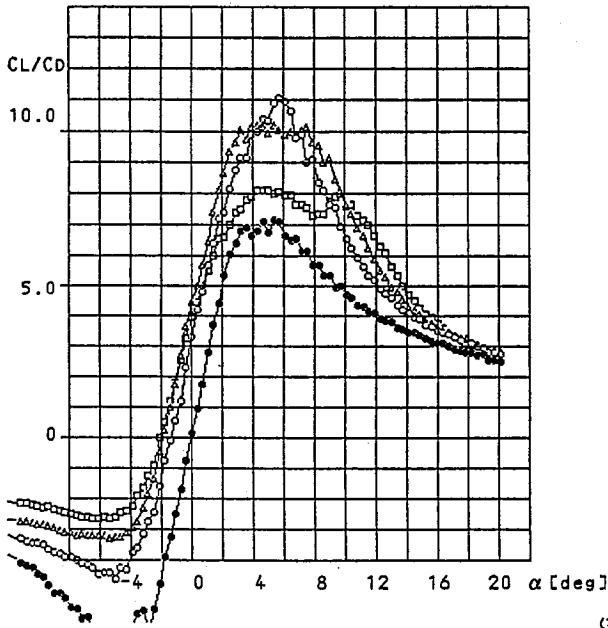


図1 紙飛行機用翼断面特性⁽²⁾

AR=6 矩形翼

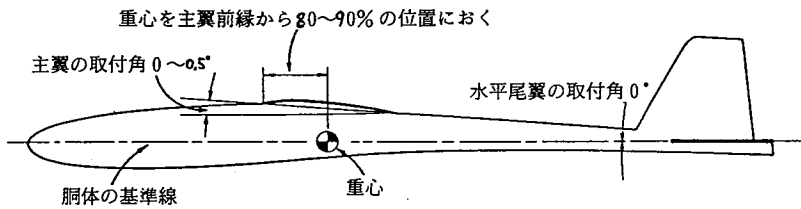


図2 滞空用機の翼の取付角と重心のおき方

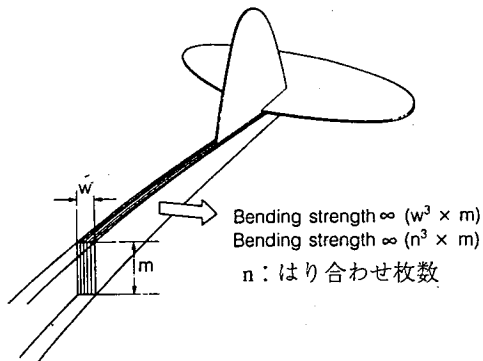


図3 Dimensions of the fuselage and bending strength

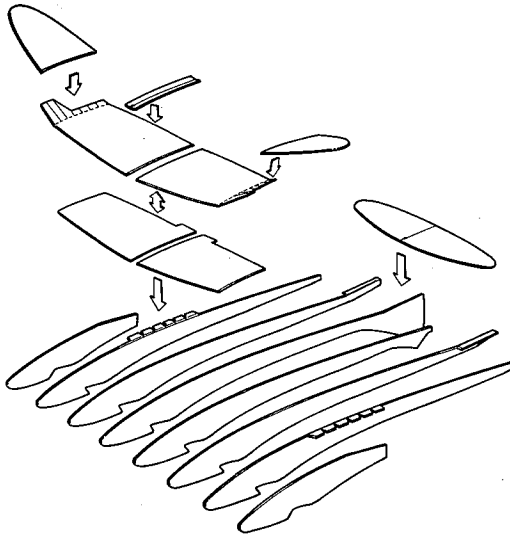


図4 機体の構成の例

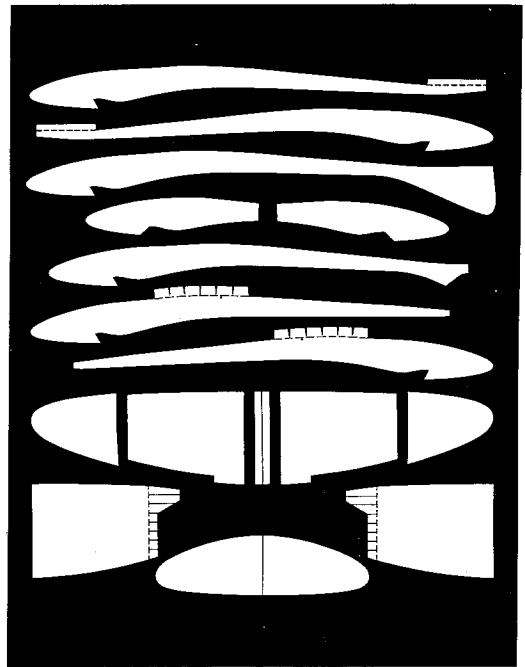


図5 部品図の例

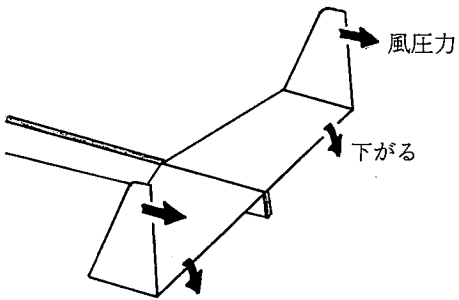


図6 垂直上昇機の尾翼



写真5 武蔵野中央公園

