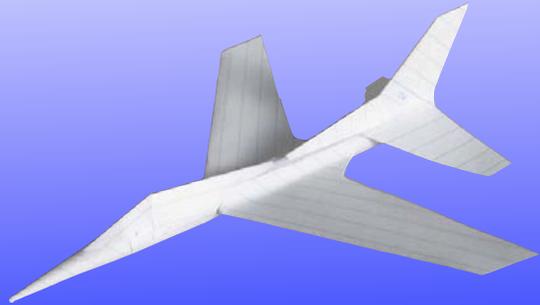


立体紙飛行機的设计製作演習



OBK 本間 大

【本資料は、早稲田大学理工学部の一学生のVisualThinking演習の資料をもとに、はじめて模型飛行機を作る人のためにまとめ直したものです。飛行ロボット製作の参考にしてください。内容についての質問は、homma@toki.co.jpまで。】

OA用紙2枚と接着剤で作る円筒や折り目のある平面薄板構造を組み合わせ、飛行可能で立体的な紙飛行機を作る演習。飛行機の基礎的な知識を学びながら、体験的に丈夫で良く飛ぶ、形のいい飛行機のグランドデザインを行なう演習である。製作が簡単でやり直しができる立体紙飛行機作りを通し、紙の折り方や丸め方など構造上の工夫で、薄い紙でも丈夫に利用できることや、軽く丈夫にバランス良い設計を行わないと、目的を達成できないことを感覚的に学ぶ。

いろいろな飛行機械



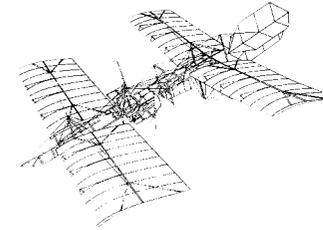
からす型模型飛行機 二宮忠八
(1892年)



シャヌート・ヘリングの
グライダー (1900年頃)



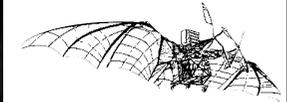
リリエントールのグライダー
グライダー (1889年頃)



ラングレーのエアロドローム号
(1900年)



ペノーの模型飛行機 (1871年)
(世界初の動力飛行)



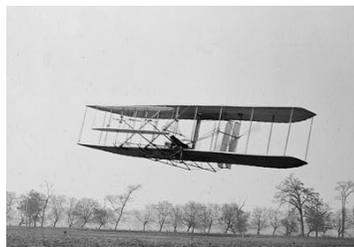
アデルのアピオン
(1897年)

ライト兄弟が子供の頃に、お土産にもらったペノーの模型飛行機は、彼らが空をめざすきっかけになったといわれている。現在の飛行機の形態に落ち着くまでにいろいろな飛行機械が試された。飛行機械が飛び始めた19世紀末、多くの実験機は、何とか浮かぶことに精一杯で、いったん浮いてしまっても墜落する例がほとんどであった。フランス人は、アデル（仏）のアピオン号がライト兄弟より先に空を飛んだと、固く信じており、フランス語では、今でも飛行機のことをアピオンという。ライト兄弟の飛行機ライトフライヤーが他の飛行機械と大きく区別される理由は、ただ空中に浮かぶだけでなく、エンジンによる自力飛行が可能であり、操縦ができたことである。

飛行機械から飛行機へ



14bis号 (1906年フランス)



ライト兄弟のグライダーと飛行機(1900-1903)



In September of 1906, Alberto Santos-Dumont, a Brazilian living in Paris,

3

ブラジルの富豪アルベルト・サントス＝デュモンにより製作された14bis号は、60メートルの飛行に成功したヨーロッパ初の動力付き飛行機である。ライト兄弟の成功が証明されるまでは、ながらく世界最初の飛行機と信じられていた。

ライト兄弟の飛行機の構造的な手本は、オクターブ・シャヌートのグライダーだった。ライト兄弟は、過去の飛行実験機の中から、ドイツのリリエントールのグライダーが長い間安定な飛行を繰り返すことができたことに着目し、設計概念や基本構造を大いに参考にしたようだ。リリエントールは、不完全であるが、重心移動によって機体の姿勢を操作することを行っていた。そこでライト兄弟は、飛行そのものより、操縦性に着目し、飛行中の鳥の羽の動きを手本にした、より効果的な捻り翼式の操舵機構を取り入れた。そしてこれが、飛行成功のカギとなった。この操舵原理は、さらに進化し、現在の飛行機のエルロン（補助翼）となった。これは一般的にいえることであるが、実験から実用化に移る場合、何が本質で重要であるかを見つけたせることが、成功のカギとなる。

飛行機（航空機）は総合技術



飛行機は、かつて最先端の総合技術であった。

航空工学（流体力学）
構造力学（機体構造）
材料工学（金属学）
熱力学（エンジン）
電気工学（通信航行）
加工生産技術
品質管理技術
経済学など

人工衛星や自動車、鉄道、大型船、ロボットなども総合技術である。

4

多くの基礎技術や要素技術を統合して総合技術が成り立つ。航空機は、かつて最先端の総合技術であった。航空技術を見れば、その国の工業技術の水準がわかるとまでいわれていた。現代の我が国の、機械工学の総合技術の代表的なものは、自動車やロボット、原子力発電所などである。

機械工学年鑑



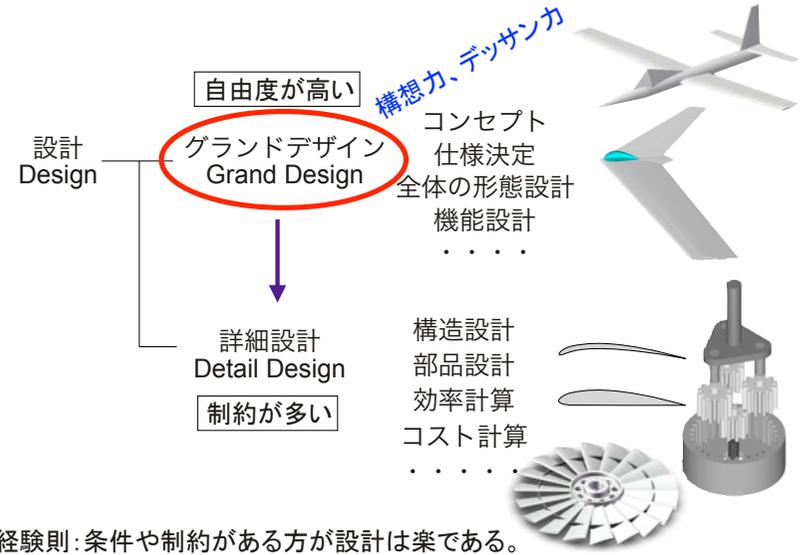
昭和17年(1942)版
機械工学年鑑



航空機に関する記載

大戦中の昭和17年の機械工学年鑑にも総合技術として自動車や船とともに、航空機について、かなりページがさかれている。時代が時代だけに、国産機の記述は、軍事機密のためかほとんど見当たらない。かわりに、例に挙げられている航空機は、ほとんど敵国(連合国)のものである。一方、当時の日本の航空業界は、日米開戦直前まで米国のマクダネルダグラス社やボート社などと親密な関係があり、米国や英国の航空事情について、最新の情報を持っていたようである。

設計の話



設計(Design)とは、目的を達成するためのシステムを具現化するために行なう知的作業のことである。製図(Drawing)は、設計の表現手段の一つでしかない。設計作業にはグランドデザインと詳細設計がある。機械におけるグランドデザインは、想定される使用目的や状況からその機械のコンセプトや仕様を割り出し、全体の形や大まかな構造を決める作業であり、完成形の方針を決める。グランドデザインをする者は、工学的なセンスだけでなく、芸術的な構想力やインスピレーションも必要である。詳細設計は、グランドデザインの結果に基づき、細部の具体的な構造や部品の設計などを行なう作業であり、コストや耐久性などの制約が多い。詳細設計者には、理論的で緻密な解析力や知識、注意力が必要である。いずれの設計段階も完成までは、修正や変更が何度も繰り返されるのが普通である。

立体紙飛行機の製作

OA用紙と接着剤、セロテープを使って自分で考えた飛行可能な立体的な構造の紙飛行機をつくり、実際に飛ばすまでの過程を体験することで以下のような勉強をする。

- 飛行機の初歩的な原理と知識の習得
- 薄板軽量化構造の視覚的感覚的理解
- 寸法効果とその感覚的理解と実践
- 思考（設計）と実際の隔たりの認識



7

飛行の原理（気体の重さ）

- 1 m³の空気の重さはどれくらいか？
- 地上で1 m²にどのくらいの重さがかかるか？

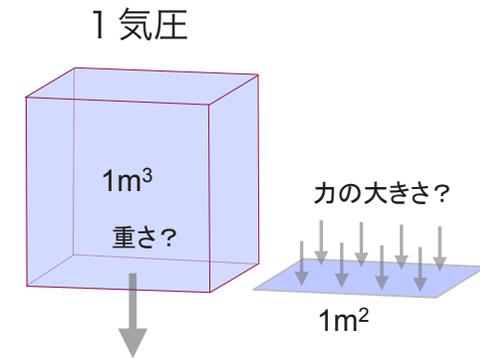
気体の密度

空気	: 約1.23Kg/m ³
水蒸気	: 約0.80Kg/m ³
水素	: 約0.09Kg/m ³
ヘリウム	: 約0.18Kg/m ³
CO ₂	: 約1.98Kg/m ³
	(常温、1気圧)

気圧による力

1気圧 = 約10000Kg/m²

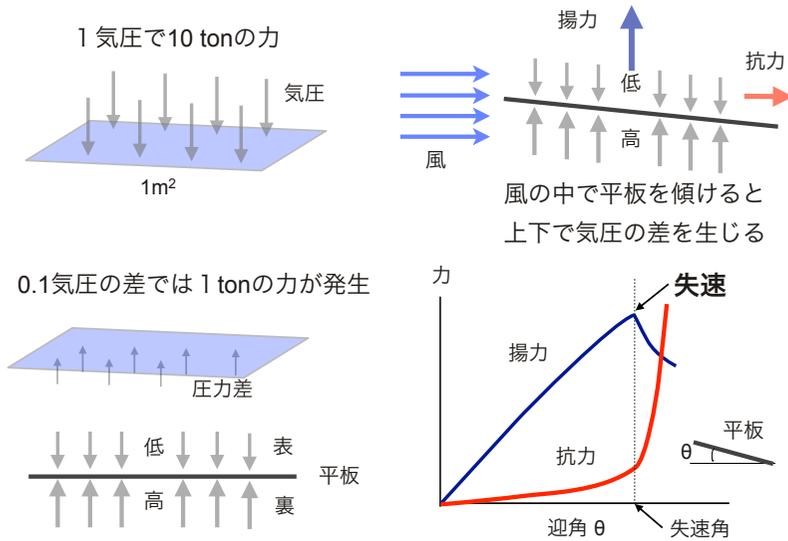
10 ton



8

空気は意外と重い。一立方メートルあたり1.23kgもある。また1気圧で空気が1平方メートルに及ぼす力は、約10tonもある。風速40m/sの台風の際は、この重さの空気が1秒間に40m/s（時速144Km/h）でぶつかってくることになるので、それを受ける人間は立ってられない。反対に水蒸気は、言葉のイメージから重い印象を持つ人も多いが、水すなわちH₂Oが気化したものであるから、より分子量の大きい酸素O₂と窒素N₂の混合物である空気より軽い。空気の密度が高いほど揚力が大きくなるので飛行機はよく飛ぶ。揚力とは、翼によって生じる、飛行機を重力に抗して持ち上げる力のことである。詳しくは次ページで説明する。したがって湿度の高い夏の暑い日より、乾燥した寒い冬の日の方が飛行機にとっては調子がよい。飛行船に使われる水素やヘリウムは、空気よりはるかに軽い。二酸化炭素は、空気よりずっと重い。このような知識を直感的に理解しておくことは、他の機械工学の分野においても大切である。

飛行の原理 (飛行と揚力)

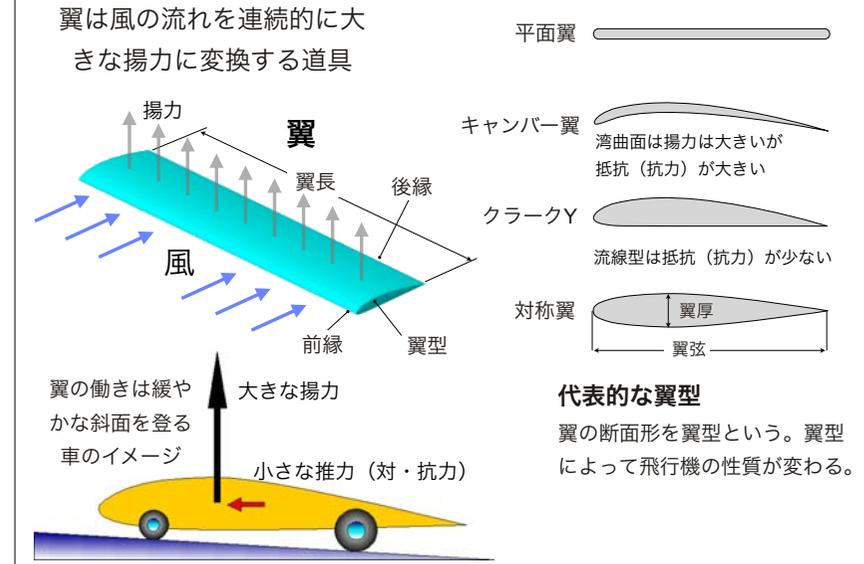


9

1 平方メートルの平板 (Plane)の表と裏で0.1気圧の圧力差を作ることができれば、1 tonの重さを持ち上げることができる。連続的にこの力を発生できれば、300 tonを超すジャンボジェットも300m²以上の翼面積があれば、空を飛べることになる。風の中で平板を傾けると上下で気圧差を生じる。この気圧差によって平面が上方に持ち上げられる力を揚力 (Lift)という。風が強いほど大きな揚力が発生する。揚力は風速の二乗に比例し、傾ける角度、迎角 (Attack Angle) がきついと大きくなる。しかし迎角がある角度を超えると急激に揚力がなくなり、抵抗 (抗力、Drag)が増える。この現象を失速 (stall)という。失速は平板の上面から空気がはがれるために起こる現象である。

失速を起こす角度は失速角といわれる。失速角は、翼の大きさや形によって異なる。水中のスクリューでも、このような現象が起こり泡が発生する。キャビテーションといわれる現象である。キャビテーションを起こしにくいスクリューは、性能が良い。

翼と翼型 (Wing & Airfoil)



10

翼(Wing)は、小さな推力(Thrust)を大きな揚力(Lift)に変換する装置と考えることができる。翼の断面形状を翼型(Air Foil, or Wing Profile)といい、翼型の違いで翼の性質は、左右される。翼の長さは翼長(Wing Span)といい、翼型の全長すなわち翼の縦幅を翼弦(Wing Chord)いう。翼型の厚みは翼厚(Profile Thickness)といって一般的に翼弦のパーセントで表される。翼の前側を前縁 (Leading Edge)、後ろ側を後縁 (Trailing Edge) という。平面翼を湾曲させると揚力が増す。このような翼をキャンバー翼 (Camber Wing)という。キャンバーは反りや湾曲という意味である。流線型 (Streamline Shape)の翼型は、空気抵抗 (抗力 Drag)が少なく、失速角(Stalling Angle)が深い。キャンバー翼や底面が平らなクラークY (Clark Y)などの非対称翼型は、迎角がマイナスでも揚力が発生できる。例えばクラークYが揚力を失う迎角 (ゼロ揚力角) は、 -4° である。

飛行機 (航空機)



小型単発レシプロ機

Sting 2000

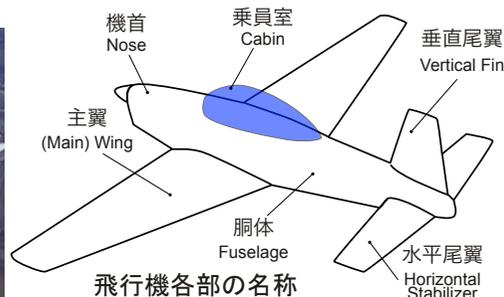


大型双発ジェット機

Boeing 777



滑空機(グライダー)



飛行機各部の名称

*通常の飛行機は固定翼機、ヘリコプターは回転翼機といわれる。

11

飛行機 (航空機) には、いろいろな大きさや形、様式がある。飛行中、主に固定された主翼で揚力を得る通常の航空機は、固定翼機といわれる。これに対し、主翼を持たず、回転する翼 (ローター) で揚力を得るヘリコプターやオートジャイロは、回転翼機といわれる。F-14などの可変翼も固定翼機の一つである。この他、空気の浮力を使う飛行船などの軽航空機や、推力だけで浮上する垂直上昇機やロケットなどもあるが、一般に飛行機というと固定翼機を示すことが多い。羽ばたき機 (ornithopter) は、自分で主翼を加速する点で原理的にヘリコプターなどの回転翼機に近い。固定翼機の基本的な形態や構成と各部の働きは、ほとんど共通である。また、それらの名称も同じである。主翼は、飛行のための揚力を発生し、尾翼は飛行機の安定性を確保する。胴体はこの二つの部品をつなげる構造体で飛行には直接関係ない。人の乗るキャビンやエンジンなどを格納するのが主な目的である。この実習では、動力なしで滑空飛行する固定翼のグライダーを作ることになる。

飛行機



高翼機 (パイパーカブ)



低翼機 (零戦)



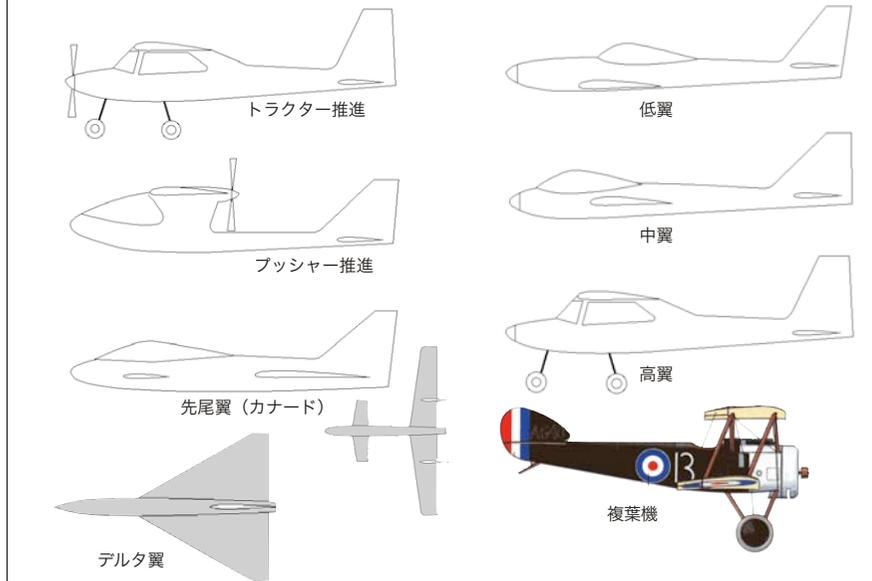
複葉機 (タイガース)



双発機 (YS-11)

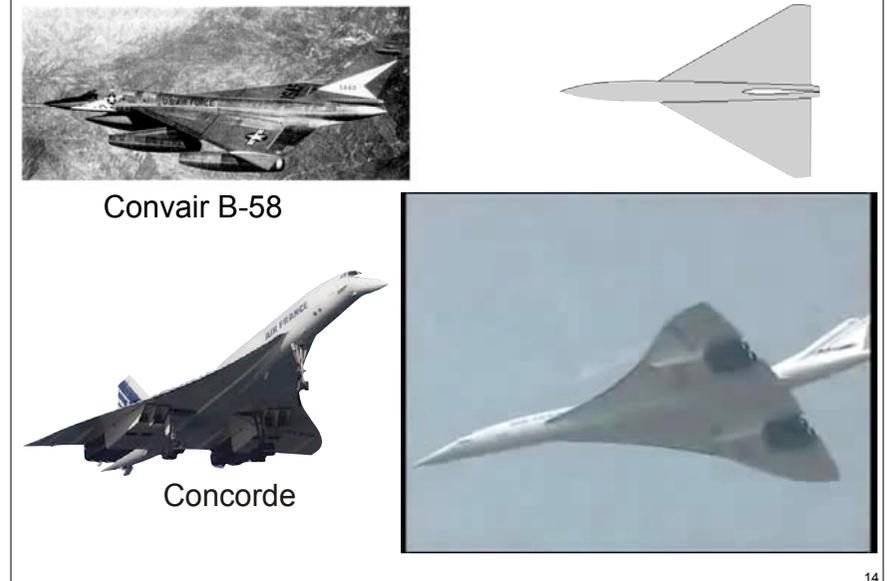
固定翼機も翼の位置や数、エンジンの数などによっていろいろな形式がある。

飛行機（固定翼機）の形態



翼の配置は、いくつかの形式がある。機体側面から見てセスナ172のような機体の客室上部に主翼を配置したものは、高翼機と呼ばれる。揚力の中心が重心のずっと上にくるので安定性が高いが、抵抗が大きく高速飛行には向かない。主翼が胴体の下に位置するものを低翼機、胴体の中程に位置するものを中翼機という。ジャンボジェットは低翼機である。古典機のように主翼が二枚あるものは複葉機と呼ばれる。空気抵抗は大きいですが、揚力が大きいのでエンジンが非力な時代に利用された。翼の形や配置には、通常の翼以外に先尾翼やデルタ翼、後退翼などがある。推進装置の数や位置による分類もある。エンジンが一つのを単発、二つを双発、四つを4発という。プロペラなどの推進装置が機体を引っ張るように前方に位置する機体は、トラクター型（牽引型）と呼ばれる。一部のプロペラ機やジェット機のほとんどは、機体を押し出す位置に推進装置があり、プッシャー型と呼ばれる。実習で製作する紙飛行機は、推進装置を持たない滑空機（グライダー）である。

デルタ翼の例



三角形の翼を持つ、デルタ翼機は、大戦中のドイツの航空学者アレクサンダー・マルティン・リピッシュ博士(Alexander Martin Lippisch)によって開発された飛行機の形態である。失速を起こしにくいなど優れた空力特性を多くもつが、低速巡航時の揚力が小さいため、高速で飛行するジェット機の時代になって実用化が進んだ。コンベアB-58や超音速旅客機コンコルドは、典型的なデルタ翼機である。コンコルドのように空気抵抗の低減など飛行特性の向上のために主翼前縁が曲線になっているものは、オージー翼と呼ばれることもある。スペースシャトルも大気中の降下飛行にデルタ翼を利用している。

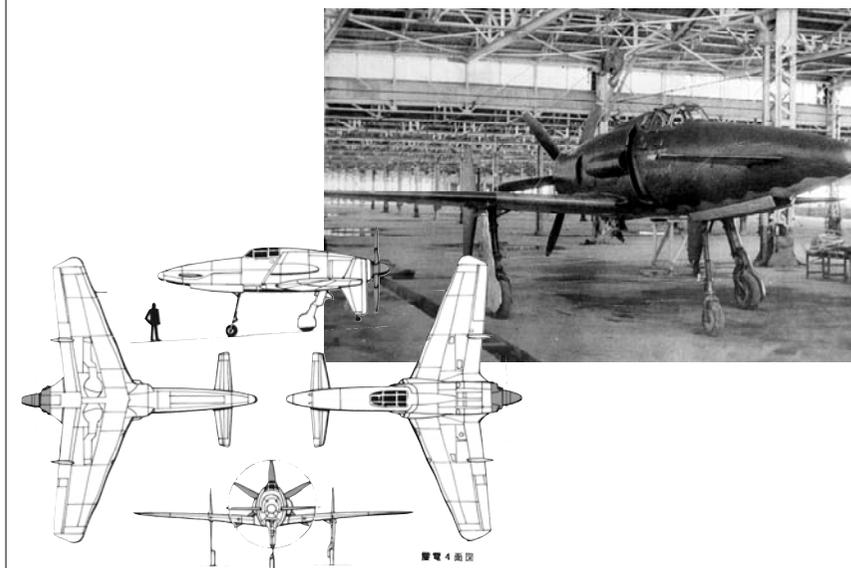
カナード（先尾翼機） アニメの話



15

“散香”は、アニメ映画にもなった森博嗣のSF小説『スカイ・クロラ』に登場するレシプロエンジン駆動の二重反転プロペラを持つ先尾翼機。旧日本海軍の試製機“震電”をモデルにした機体である。先尾翼機は、カナード、エンテ、先尾翼機ともいわれる。カナードは、フランス語、エンテはドイツ語でそれぞれ、鴨や雁の意味。ライト兄弟の飛行機も形態としては、この先尾翼機である。先尾翼機は、荷重を支える主翼より先に先尾翼から失速が始まるので、急な失速による墜落になりにくい。レシプロエンジン (Reciprocating engine)とは、自動車などに使われている往復運動機関、ピストンエンジンのこと。最近のプロペラ機は、ジェットエンジンと基本的には同じガスタービンエンジンの回転軸の運動を利用したターボプロップエンジンが主流のため区別して呼ばれる。一般にプロペラ機は、プロペラの反動を受けて、その回転と逆方向に偏るクセがでるが、二重反転プロペラは、ピッチが逆の二つのプロペラが反転して同じ方向の推力を得るため、互いのプロペラの反力が打ち消され、飛行時の左右の特性に片寄りがない。一方、構造が複雑になる欠点がある。

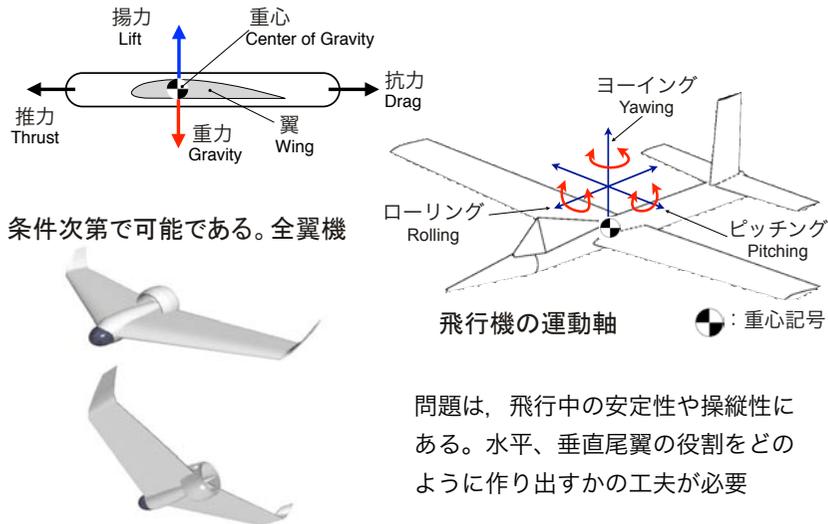
震電（しんでん） 九州飛行機



16

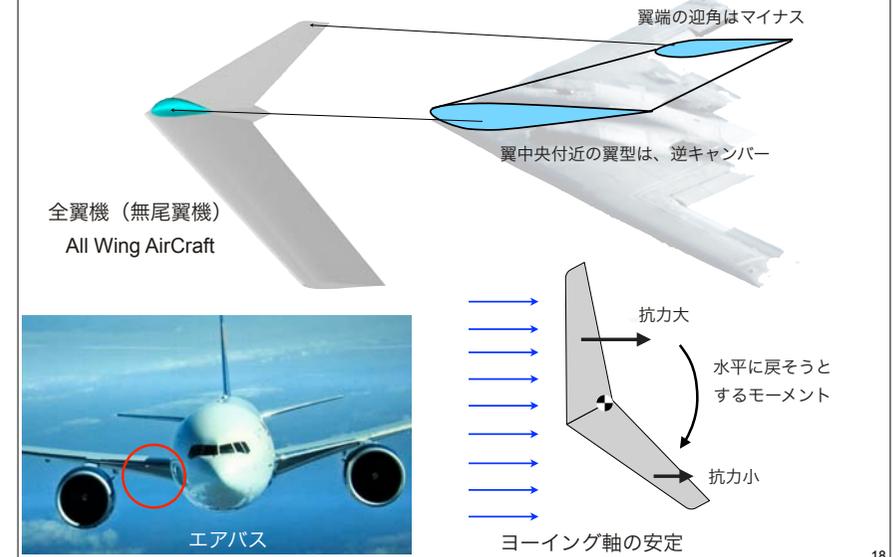
震電（しんでん）は、第二次世界大戦末期、日本海軍が開発していた単発単座の先尾翼の試作局地戦闘機である。機体後部にプロペラ、機首付近に小翼を配した独特の機体形状を持ち、重心の設定が比較的自由で、大出力エンジンや重武装が可能のため、B-29迎撃の切り札として期待されていた。1945年（昭和20年）6月に試作機が完成、同年8月に数度の試験飛行を行ったところで終戦となり、実戦には使われなかった。占領軍は日本到着後、この試作機を真っ先に探しまわったといわれている。現在の小型軽量のジェット戦闘機は先尾翼式のものもあり、震電の機体設計思想は、航空機の形態を半世紀以上先取りしたものであった。

飛行機は主翼だけで飛べる？



17

全翼機（無尾翼機）



18

飛行機は、力学的には主翼だけで飛ぶことができる。問題は、飛行中の安定性や操縦性にある。これにはモーメントの安定が関わる。特にピッチング方向とヨーイング方向の安定性と操縦性が問題になる。このために通常は、水平尾翼と垂直尾翼が必要になる。全翼機は、無駄な重量や空気抵抗を発生する胴体を持たない理想的な飛行機として昔から多くの人々が研究を行ってきた。これまで飛行可能な全翼機は前後方向に距離のある後退翼と主翼中央付近の翼型などで、なんとかこの問題を解決している。しかし通常の飛行機と比較し、直接人間が操縦する際の特性に難点があり、実験機は多く作られたが、真の実用機は存在しなかった。複雑な翼面操作や操縦安定にコンピュータの助けを借りられるようになった最近になって、B-2爆撃機などで実用化されている。一般的には、簡単に自立安定飛行が容易な前方に主翼、後方に尾翼を持つ一般的な飛行機の形に落ち着いている。

全翼機の翼の中心付近の翼型は、下部のふくらみの大きい逆のキャンバーである。また翼端は、翼中央付近の翼断面に対し負の迎角を持たせる。これらは水平尾翼を持たない機体でピッチング軸の安定を保つための工夫である。全翼機は後退角を持つものが多いが、これは、見かけ上の進行方向の長さを大きくしてピッチング軸のモーメントの腕を大きくする工夫である。また後退角は、上反角の効果をもつのでローリング軸の安定性を保つ効果がある。さらに後退翼は、風に対して傾くと傾いた方向と反対側の効力が増すため、垂直尾翼のようにヨーイング軸の安定も保つ効果がある。後退翼を持つジャンボジェットやエアバスなどは、主翼中央部を逆キャンバーの無尾翼機と同様な形状にして、揚力を多少犠牲にしても、十分なピッチング軸周りの安定を保つ工夫がされている。写真の赤丸部を参照。安全第一の旅客機であるから、無尾翼でも安定して飛べる形態にさらに安定と操縦性を増すために通常の尾翼をつけていると考えるとわかりやすい。演習の紙飛行機でも無尾翼の機体に挑戦してみるのも面白い。うまく作れば、無駄な胴体や尾翼がないので滑空性が非常に良い。

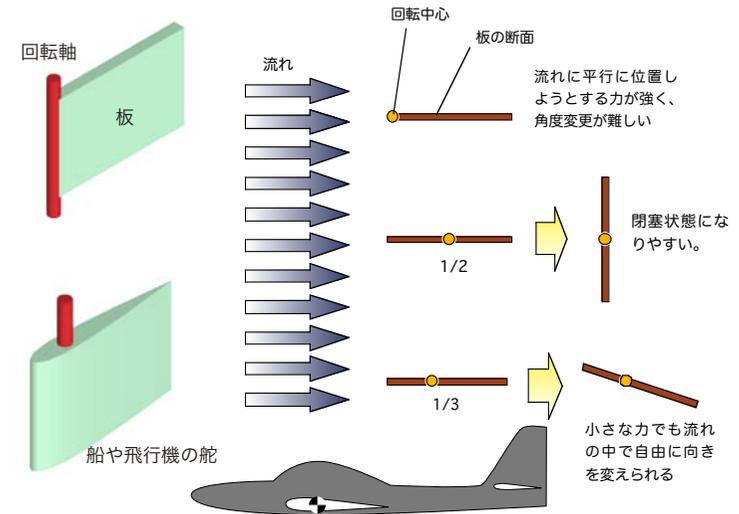
無尾翼機の映像



19

無尾翼機の実験機は、戦前から多くのものが作られた。動画は、ノースロップ社の一人乗りの双発レシプロの実験機である。

風圧中心と重心



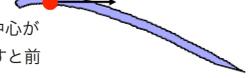
流れの中に先端に回転軸のある板を置くと、流れと同じ方向に位置して安定するが、回転軸を回して角度を変えようとするには、大きな力が必要である。板の真ん中に回転軸を設けると、抵抗が対称なため板は、流れに対して垂直な位置になるうとして不安定な運動を行う。板の先端と真ん中の中間位置に回転軸を持ってくると、回転軸を回して板の角度を変えても、どの角度でも板が安定する。この回転軸の位置では、板の角度を変えるのに力は必要ない。このような回転軸の位置を風圧中心という。本物の飛行機の重心位置は、この風圧中心付近に選ばれることが多い。同様な原理で大型の船の舵や潜水艦の潜航舵は、回転軸が風圧中心にある。一般的な飛行機は、主翼で飛ぶものであり、尾翼はあくまで姿勢制御や安定を行う部分で飛行のための揚力とは考えない。一方、先尾翼機や揚力尾翼機は、尾翼の揚力も考慮して重心位置を決定する。

翼型と風圧中心

揚力は大きいがあおられやすい

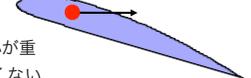
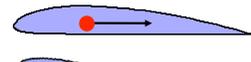


キャンパー翼は、風圧の中心が後方にあるが迎え角が増すと前方に移動しやすい



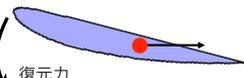
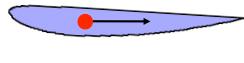
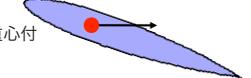
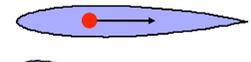
中間的特性

クラークYは、風圧の中心が重心付近にあり、移動がすくない



揚力は少ないが安定している

対称翼は、風圧の中心が重心付近にあり、移動がない



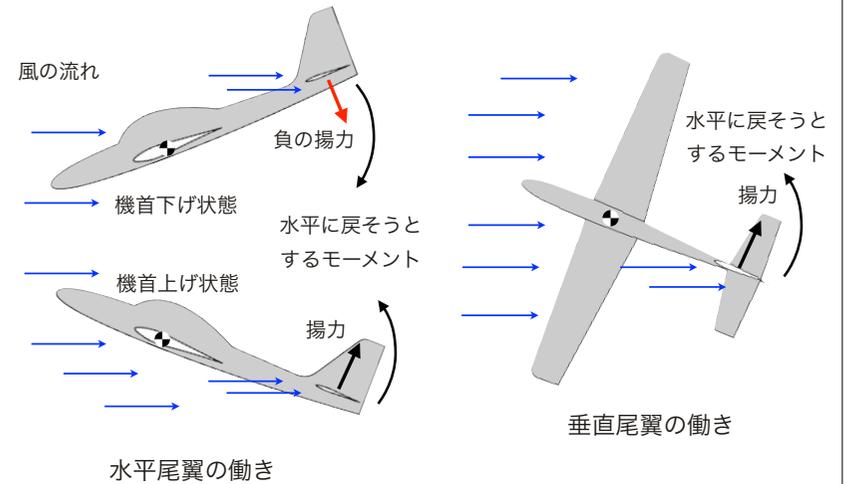
復元力

逆キャンパーの効果

下方にキャンパーがあると揚力は小さくなるが、迎え角の増加にともない風圧中心は、後方に移動し、水平に戻ろうとする復元力が働く。無尾翼機の翼中央付近の翼型が、逆キャンパーになっている理由である。

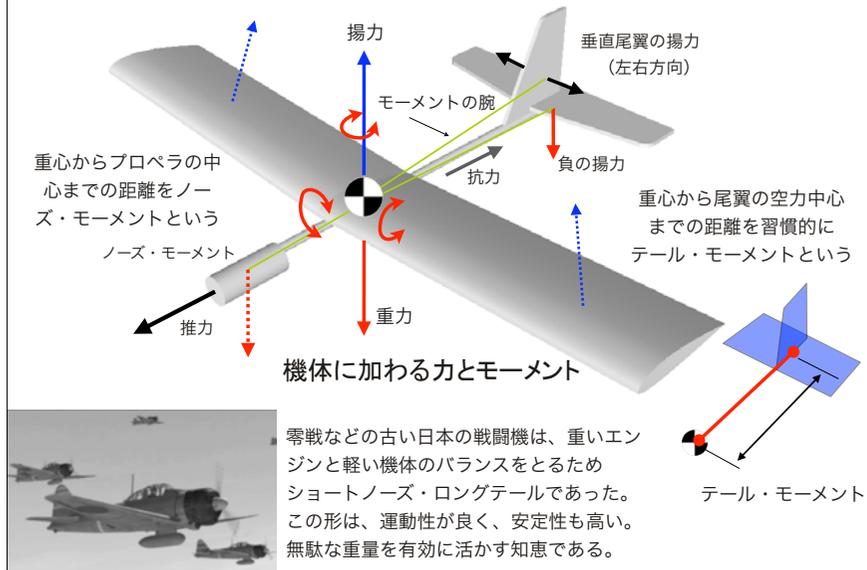
平板は、迎え角の変化で風圧中心の位置がほとんど変わらないが、飛行機の翼型によっては風圧中心の位置が大きく変わる。上下非対称の翼はこの風圧中心の移動がある。風圧中心の移動の大きな翼型は、風に弱くあおられやすい傾向がある。風圧中心の移動は翼型形状の対称性と関係がある。翼が弓形に上を向ったキャンパー翼は、風圧中心が最も変化する。キャンパー翼は、迎え角が大きいと、風圧中心が前方に大きく移動するため風にあおられやすく、風に弱い。対称翼は、平板と同じく風圧中心の位置は、ほとんど変化しないので風に強い。翼底面が平らなクラークYは、この両者の中間的性質をもち、迎角が増えると風圧中心は、少し前へ出るが、その程度は少なく、比較的風に強い。話は前にもどるが、キャンパー翼やクラークY翼を上下反対にしてキャンパーを逆にすると、揚力は小さくなるが、迎え角を増やした場合でも、風圧中心が後ろに下がりやすくなり、水平に戻ろうとして安定する。これが無尾翼機の翼中央の翼型を逆キャンパーにする理由である。ちょうど波に向かう船のようなイメージになる。

尾翼の役割（どうして尾翼が必要か？）



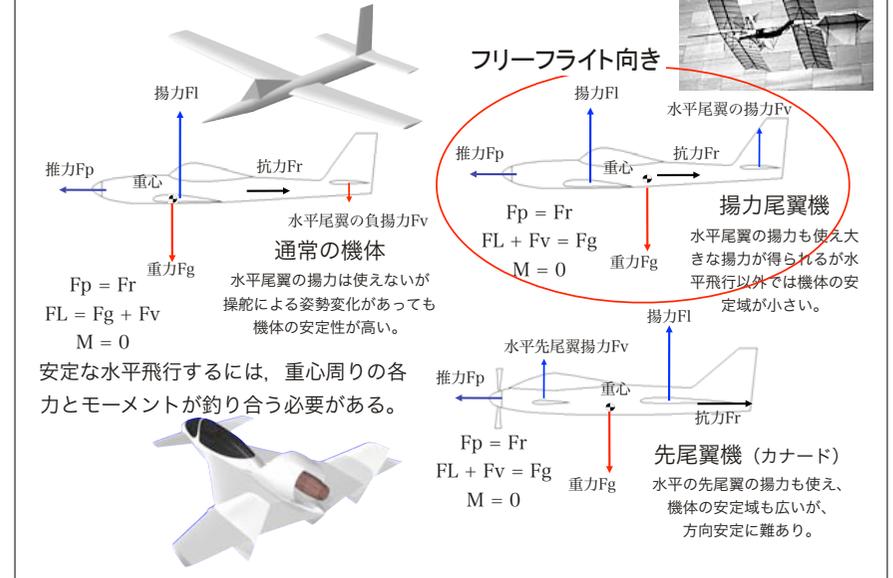
飛行機は、基本的に主翼のみでも飛行が可能であるが、安定性と操縦性のために尾翼が必要である。水平尾翼は、飛行中に機体が機首を下げるように前に傾いたとき、迎角がマイナスになるので負の揚力を生じる。その結果、機首を上げるような重心周りのモーメントが自動的に発生して機体を水平に戻そうとする。反対に機首を上げる状態のときには、正の揚力が発生し、機首を下げ水平に戻すようなモーメントが生じる。いずれの場合も機体が水平に戻れば、尾翼の揚力は消えるので、ピッチング軸周りの安定が保たれる。垂直尾翼は、ヨーイング軸で水平尾翼のピッチング軸周りの働きと同様な空力学的効果を持つ。重さや抵抗で限度はあるが、重心から尾翼までの距離が長いほど、尾翼の面積が大きいほどピッチング軸とヨーイング軸周りの安定は良い。風見鶏と同じ効果である。

ノーズ、テール・モーメントと縦安定、方向安定



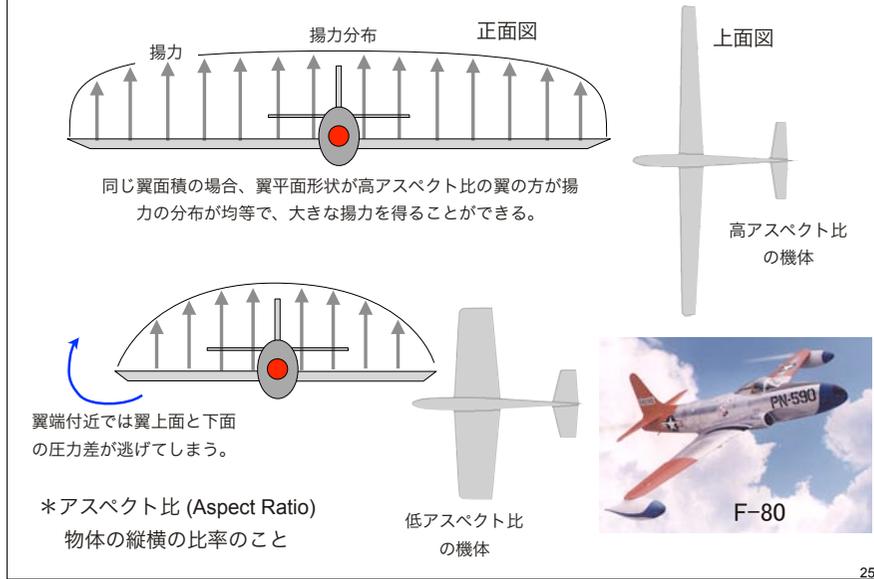
飛行機の種類が同じならエンジンの重さや尾翼の面積は、大きな差がないため、慣例的に重心からプロペラの中心までの距離をノーズ・モーメント、尾翼の揚力の中心までの距離をテールモーメントということが多く。ノーズ・モーメントが長く、テール・モーメントの短い機体は縦方向（ピッチング軸）の操縦性や安定性がわるい。特に旋回の際に頭を下げる傾向が強い。また大きな尾翼面積よりもテールモーメントのアーム長が長い方が安定性も操縦性も良い。演習の機体は、プロペラがないので、機体の重心から重りを載せた先端部の重心までの距離をノーズモーメントと考える。

機体の形態と飛行中の力学



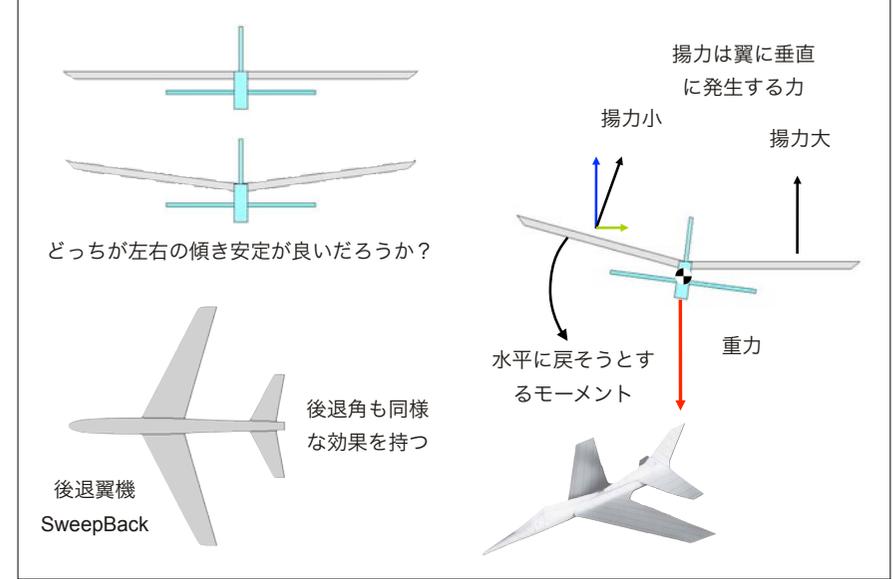
機体に作用する揚力と重力、推進力と抗力、および重心の角軸周りの各力のモーメントが釣り合えば、安定な水平飛行が可能である。それだけの条件からは、いくつかの形態が考えられる。実際に飛行機は、機体に働く力やモーメントのバランスを崩すことによって姿勢を変えて操縦を行なう。このためバランスが崩れた状態の特性（操縦安定性）も考慮して設計する必要があり、より多くの制約がある。しかし演習の手投げ紙飛行機は、この操縦安定性などは考えなくても良いので、いろいろなオリジナルの形をデザインして試してみよう。比較的安定して遠くに飛ばすには、図中のまるで困んだ揚力尾翼式が有利である。

翼のアスペクト比と揚力分布



主翼の翼端付近では翼上面と下面のしきりがないため圧力差が逃げてしまうため、翼弦に対して翼長の短い、低アスペクト比の翼は、揚力の分布に無駄が多く、大きな揚力を得ることができない。反対に高アスペクト比の細長い翼は、翼端で無効になる揚力の影響が少なく、大きな揚力を得ることができ、滑空性能を表す揚抗比（抗力に対する揚力の割合）が高い。また翼の全長にわたって揚力が均一に分布するので、空気が横方向に逃げにくく、翼型の性能をより完全に引き出すことができる。さらに高アスペクト比の翼は、ローリング軸周りのモーメントが大きくなるので、時定数が大きく安定性も良い。しかし反対に俊敏な運動性は劣る。揚抗比より運動性を重視する曲技機や戦闘機などは、低アスペクト比の翼を持つ機体が多い。低アスペクト比の翼端に空気の流れを遮る、しきりになる垂直翼や燃料タンクを取り付け、特性を向上させることもある。

左右の傾き安定を保つ上反角

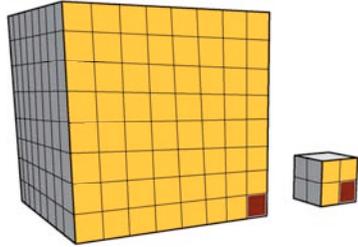


ローリング軸周り（左右の傾き方向）の安定性を保つために主翼に上反角を付けることが多い。風などの外因で機体が右に傾いた場合、上反角が付いていると、右の主翼は水平に近くなるため、重力に対向する揚力の成分が大きくなるが、左の翼の傾きが大きくなるので、揚力の重力方向の成分は小さくなり、傾きの反対方向に戻そうとするモーメントが働く。水平に戻ると左右の揚力は、釣り合い安定する。後退翼の後退角も上反角と同様な効果があるが、頭下げや翼端失速の傾向が強くなる。

機械を小さくしたときに現れる性質

寸法効果

同じ構造の機械を小さくした場合
長さ寸法は、縮尺に比例
面積は、縮尺の二乗に比例
体積は縮尺の三乗に比例する。



速度や揚力はどうなるだろう？
飛行機を小さくした場合はどうなるだろう？

大きなメカも小さなメカも構成される分子や原子の大きさは同じ

[大きさの変化で現れる性質や効果]
= **[寸法効果的な要素]** ・ **[量子的原子的物化学現象]**

本物と模型の飛び方の違い



本物の飛行機 (セスナ172)



模型飛行機

飛び方の違いはどんなところか？

機械の寸法を小さくすると、それまでの大きさでは、ほとんど問題にならないことが大変重要になったり、大きな機械では重要なことがあまり問題にならないことがよくある。これらの現象は、主に幾何学的寸法効果と、原子や分子の大きさや物性の普遍性によって説明できる。応力や圧力、表面積などの量は、大きさ、すなわち寸法の2乗に比例して働き、重量や体積、磁力、熱容量などの量は、寸法の3乗に比例して作用する。寸法に対する次数（乗数）が高ければ、機械を拡大することにより影響は大きくなり、縮小することにより小さくなる。メカニズムは、加工技術さえあれば、同じ形のまま大きく作ったり小さく作ることができるが、それを構成する原子や分子の大きさを変えることはできない。したがって分子や原子の間に働く物理的性質も基本的には変えることができない。このような考え方は、当然、材料にも成り立つ。材料の構造的な機能に注目すれば、小さなメカニズムほど大きさの割に丈夫であるということが出来る。おもちゃの自動車を机の上から落としてもなかなか壊れることはないが、本物の自動車は、おもちゃにとってマッチ棒程度の電柱に、軽くぶついただけでも大きくへこんで壊れてしまう。仮りにおもちゃの自動車を本物の自動車の大きさに拡大して、机の高さに相当するビルの上から落としたら、めっちゃめっちゃに壊れてしまうであろう。これは、自動車の大きさを変化させると、それに対応して重量や慣性、速度などは大きくなるが、構造を支える分子や原子の大きさや、これらに相互に作用する結合力などは拡大されることがないからである。そのため材料が同じなら小さなものの方が、ずっと丈夫に見えることになる。

本物の飛行機（実機）と模型飛行機の飛び方の違いはどこか観察しよう。

ゆっくり飛ぶジャンボ機



29

模型飛行機を本物の飛行機のように、見かけ上ゆったりした速度で飛ばすには、速度も同じ割合で縮小すればよい。それにはどんな方法があるだろうか。

失速速度

飛行可能な最小速度（失速速度）

揚力は、翼面荷重の平方根に比例する。機体重量が2倍なら水平飛行速度は1.41倍になる。反対に速度を2倍にすれば、同じ翼面積で4倍の重量を支えることができる。

迎え角で変化

$$L = C_L \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \cdot S \quad \dots (1)$$

L ：揚力、 C_L ：揚力係数、 v ：速度、 ρ ：空気密度、 S ：翼面積

*翼面荷重(Wing Load)：

機体重量を有効翼面積で割った値。飛行機の飛びやすさを示す代表的な設計指標。

飛行速度

翼面荷重

$$v = \sqrt{\frac{2L}{\rho \cdot C_L \cdot S}} \quad \dots (2)$$

表 飛行機の最大速度と失速速度

機種名	最大速度 km/h	失速速度 km/h	最大/失速速度比
ロッキードF-104	2,330	232	10.0
ボーイング737-200	965	184	5.2
ブレゲー941	450	83	5.4
セスナ172	246	85	2.9

飛行速度を遅くするには、推力を落とし、翼の迎え角を大きくとり、揚力係数を上げればよい。しかし、飛行と揚力のところで示したように、迎え角をある大きさまで上げると、飛行機は失速状態になり、揚力係数は最大に達した後、急激に低下する。それ以降、いくら迎え角を大きくしても、揚力係数は大きくならず、飛行機は、揚力とコントロールを失墜して墜落する。この最大揚力係数を式(2)に入れると、飛行機が揚力で自重を支えることができる最小速度を得られる。これを失速速度という。飛行機以外の乗物はどんなに遅くても走ることができるが、飛行機にはこれより速度を落とすと、もやは空中を進むことができないという最少速度がある。本物の飛行機では、離着陸は、できるだけ速度を落としたほうが安全で滑走路も短くてすむが、失速することはできないので失速速度の1.2~1.3倍の速度で離着陸する。

実機の緒元 (ジャンボ機)

項目\機種	747-100 (初期型)	747-400ER	747-8 (最新型)
全長	70.6 m	70.6 m	76.4 m
全幅 (翼端)	59.6 m	64.4 m	68.5 m
全高	19.3 m	19.4 m	19.5 m
胴体幅	縦 7.85 m, 横 6.49 m		
内部キャビン幅	6.1 m		
翼面積	511 m ²	541 m ²	
空虚重量	162.4 t	180.8 t	
最大離陸重量	333.4 t	412.8 t	440t
巡航速度	Mach (マッハ) 0.84	Mach (マッハ) 0.855 (913 km/h)	旅客 Mach (マッハ) 0.855 貨物 Mach (マッハ) 0.845
航続距離	9,800 km	14,205 km (ニューヨーク〜香港)	旅客 14,815 km 貨物 8,275 km
貨物容量	170.6 m ³ (5パレット + 14 LD1コンテナ)	158.6 m ³ または 137 m ³	旅客 161.5 m ³ 貨物 854.3 m ³
エンジン	P&W社 JT9D型 推力 209 kN × 4基	P&W社 PW4062型 推力 281.57 kN = 63,300 lb GE社 CF6-80C2B5F型 推力 276.23 kN = 62,100 lb	GE社 GEnx-2B67型 推力 66,500 lb
乗員	3名	2名	2名
乗客 (基本)	3クラス 366名, 2クラス 452名	3クラス 416名, 2クラス 524名	3クラス 467名

実物の飛行機は、ゆっくり飛んでいるように見えても絶対速度は大きい。

31

ジャンボ機を1/100に縮尺すると全長76cm、重さ440gになる。ジャンボ機が離着陸で低速で水平飛行出来る速度は、およそ180km/hである。これを1/100に縮尺すると1.8km/h、秒速52cmになる。この速度で飛行できれば、本物のようにゆっくり飛んでいるように見えるはずである。この縮尺模型を本物のジャンボ機のようにゆっくり飛ばすことができるだろうか。

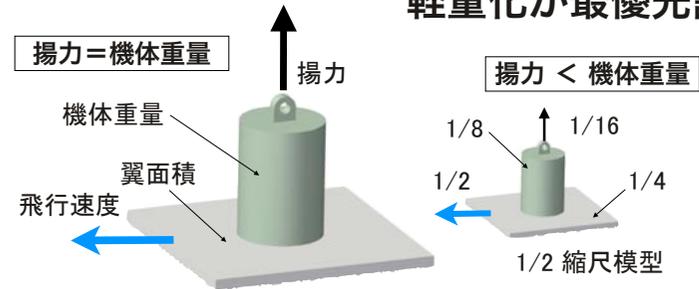
模型飛行機の飛行速度

$$\text{揚力 } L = C_L \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \cdot S \dots (1)$$

C_L : 揚力係数、 ρ : 空気密度、 v : 速度、 S : 翼面積

- 縮尺した速度は寸法に比例する。縮尺の二乗で変化
- 重量は寸法の三乗に比例する。
- 揚力は寸法の四乗に比例する。

軽量化が最優先課題



32

縮尺した速度は寸法に比例し、重量は寸法の三乗に比例する。面積と速度の二乗に比例する揚力は速度の四乗に比例する。したがって大きさに対する速度を同じにして、本物で見られるゆっくり飛ぶような状態 (スケールスピード) で重量と揚力を釣り合わせるには、機体自体の密度も縮尺する必要がある。本物と同じ材料を使って、それをそのまま厚さも含め、精密に縮小しても同じような飛行は出来ない。構成材料の密度も縮小する必要がある。小さな飛行機では、これ以外にも空気の粘性抵抗 (粘っこさ) の影響が大きく出てくるので飛行性能はますます悪くなる。小さな飛行機では、とにかく軽量化が最重要課題となる。

立体紙飛行機的设计要点

1. 揚力が大きいこと
2. 軽いこと
3. 飛行安定性がよいこと
4. 空気抵抗が少ないこと
5. 機体に必要な強度があること
6. 美しいこと
7. 作れること

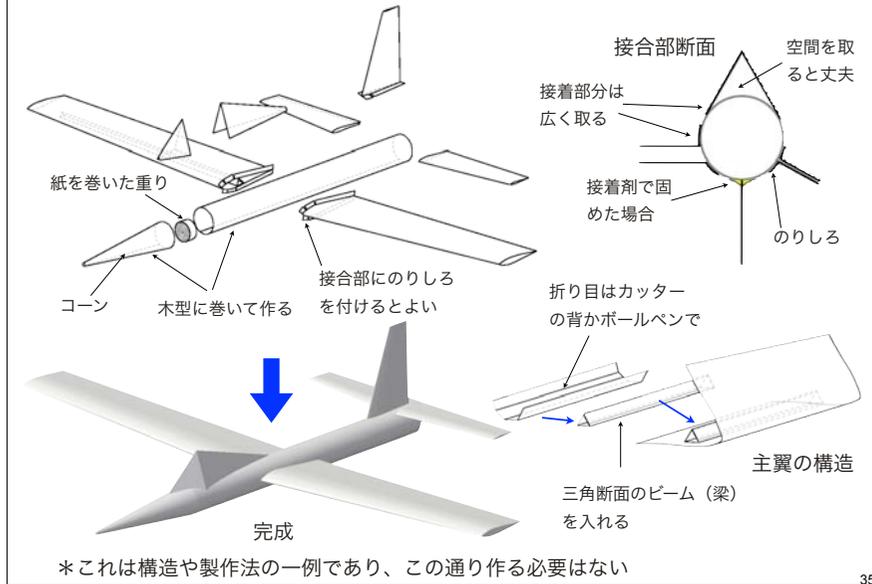
よく飛ぶ飛行機を作るには、軽くて丈夫であることが、第一の条件である。この場合の丈夫とは、機体が空気の抵抗や離着陸時の衝撃に対し、飛行に必要な形態を保てる最低限の強度を有することを意味する。必要以上の強度のことではない。抵抗は少なく揚力が大きいものがよい。空気の粘性に打ち勝つ適度な慣性も必要である。安定に飛ぶための条件は、重心位置が合っていることと主翼や尾翼にねじれがなく、取り付け角が正しいことなどがチェックポイントになる。多少の狂いは、製作後に動翼でも修正できる。左右の自立安定性を保つには、上反角が必要である。また適度なねじり下げも有効である。バランスが良く性能の高い機体は均整がとれていて美しい。

製作の順序例

1. 自分が作る紙飛行機は、どのような機能や性能が必要か考える
2. どのような形態が適切かイメージを図に描いて方向を見つける。
3. イメージに近い形状を紙と接着剤で作る構造と方法を考える。
4. 製作のための簡単な設計図を描く。具体的な緒元を決める。
5. 材料を切り出し部品を作る。
6. 接着剤やセロテープを使って全体を組み立てる。
7. 思い通りにできたか、重さや長さ、ねじれや曲がり調べる。
8. 試験飛行する。
9. くせを修正する。
10. 完成

製作する紙飛行機では、安定性や直進性が良く、速度も遅く、滞空時間が長い飛行機が理想である。緒元とは、寸法や翼面積などの飛行機の仕様である。立体的なイメージがわからない時は、いきなり作り始めるのも良い。それを土台にして再び上記の過程をとり、より完成度の高い機体を作ること一つの方法であり、グランドデザインの学習や訓練として有効である。試行錯誤の中から技術者としての感を養うことは大事である。失敗は無駄にならない。

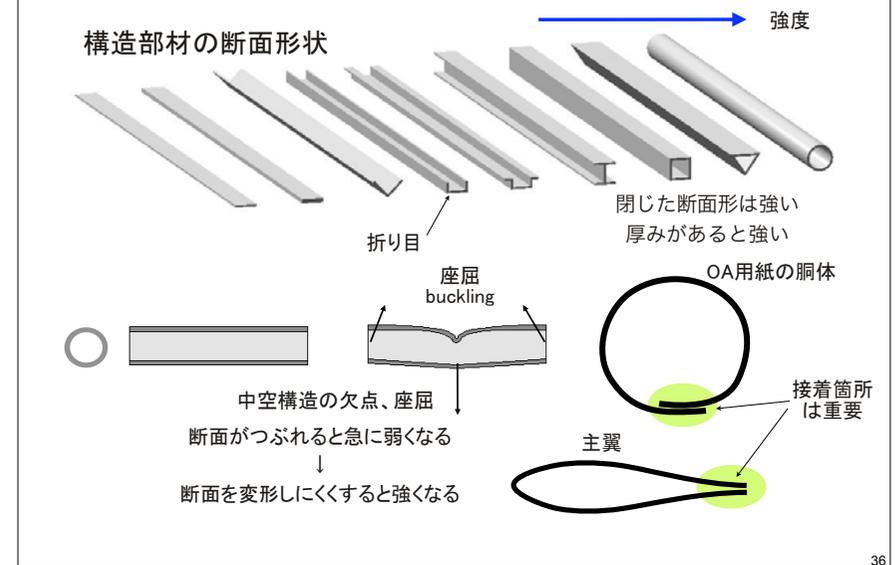
製作例 (参考)



35

立体紙飛行機は、紙と接着剤とセロテープで作る。接着剤は、少なめに薄く均一に伸ばして使う。付けすぎると紙がゆがんだり、重量が増加する。接着が足りないと、立体構造を保てないので非常に弱くなる。軽く丈夫に作るのがコツ。胴体は、鉛筆や木型に紙を巻き付けるようにして円筒やコーン（円錐）の先端部を作る。衝撃を受けるのでコーンは少し多めに紙を使うと良い。コーンの先端は、尖っているのを少し切った方が安全である。紙飛行機は、先端部が軽くなりやすいので、必要に応じ、余った紙を巻いて作った重りをあとから入れる。主翼は、一枚の紙の両端だけを接着し、ふくらみを持たせた形にすると断面が流線型になり、丈夫で空力特性が良い。主翼は長いので強度を持たせるため断面の厚さを持たせる。三角断面の梁などを別で作って入れると断面がつぶれにくく丈夫になる。水平尾翼はあまり大きな力がかからないので一枚の紙から作ってもよい。

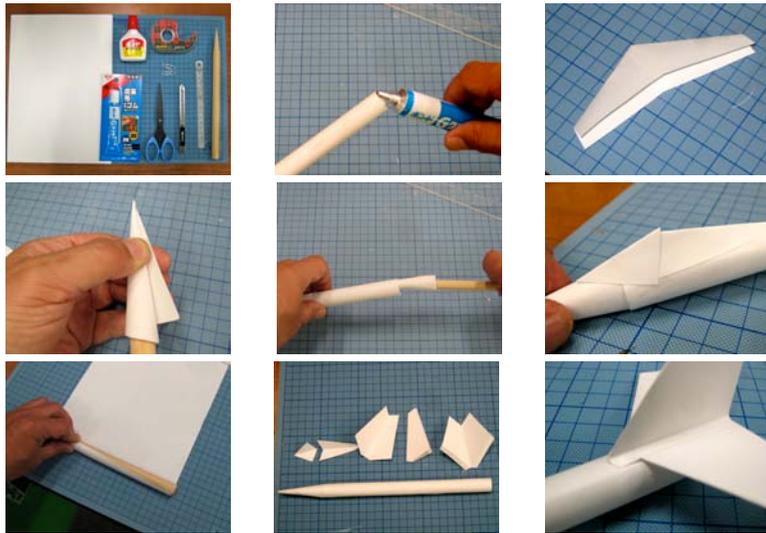
薄に肉構造の断面形状と強度



36

ペラペラのOA用紙も折り目を入れれば強くなる。さらに断面が閉じるように縁を接着をすると桁違いに丈夫になる。演習の紙飛行機でも構造を考えると時には、このような閉断面を考えると丈夫になる。組み立てのときも接着剤の使い方でも強度が大きく変わる。点付けより面付けが効果がある。断面形状が壊れるときに座屈が起こる。座屈は断面の形状を維持できなくなった所から始まる。そこにリブ（中骨）を入れたり、ふたを付けて断面形状を保持すると丈夫な構造を作ることができる。構造材の断面形状が保たれるような作り方を工夫すれば、丈夫で軽い紙飛行機を作ることができる。ただし不要な箇所を丈夫にすると、重くなったり、他の部分が犠牲になって壊れることもあるので、構造は十分考えよう。

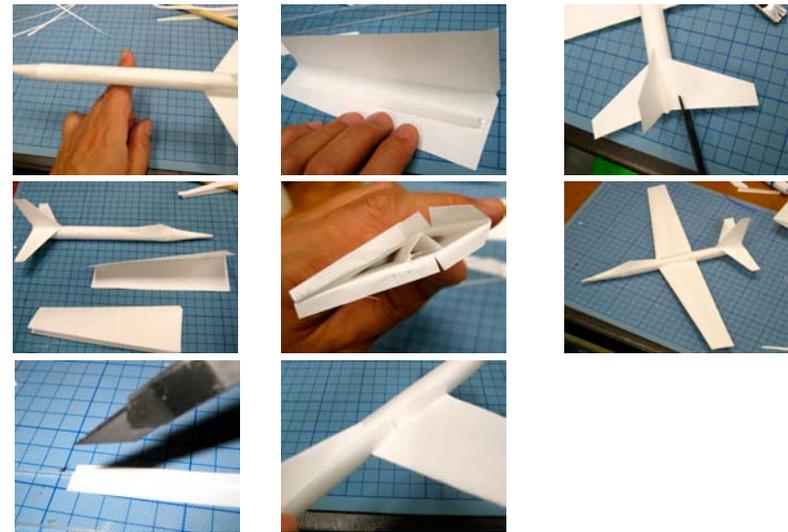
製作例 (写真) 1



37

水性の接着剤を塗りすぎると、OA用紙がたわむことがあるので要注意。油性の接着剤の方が作業がしやすい。たわんでは困る場所は、セロテープや油性のボンドを使うと良い。いきなり接着せず、仮に合わせてみると失敗が少ない。

製作例 (写真) 2

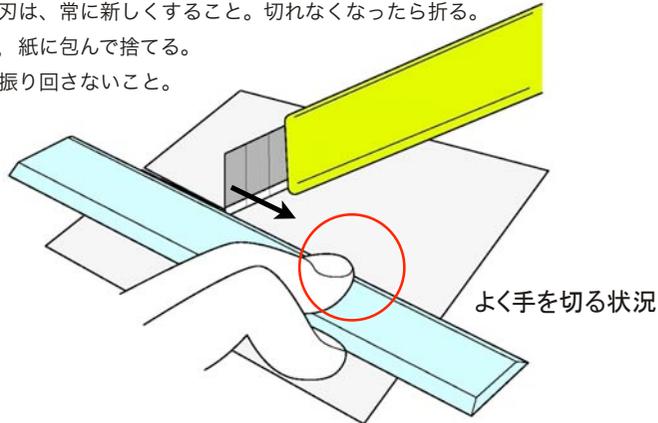


38

しっかりした折り目を付けるには、ボールペンで紙を強くなぞるか、カッターの刃と反対側でこすって筋を付けると、その部分は折り目を付けやすくなる。どのような材料でも周辺より弱い部分を作ってやると、そこから曲げたり、折ったりしやすくなる。尾翼を付けた胴体を先に完成させ、あらかじめ重心を見つけて印を付けておき、主翼の前から縦幅の30%位の位置をここに合わせて接着すると重心を合わせやすい。後退角がついている時は、30%の位置より、後ろ気味に取り付ける。機体が完成してから主翼と尾翼に小さな縦の切れ目を入れて、飛行姿勢調整用の動翼を作る。

カッター使用時の注意

- カッターの刃の進行方向に指を置かないこと。夢中になっていると指先を切ることがある。
- 必要以上に力を入れない。切れない時は、二度に分けて切る。
- カッターを使わない時は、刃を収めておく。
- カッターの刃は、常に新しくすること。切れなくなったら折る。
- 折った刃は、紙に包んで捨てる。
- カッターを振り回さないこと。



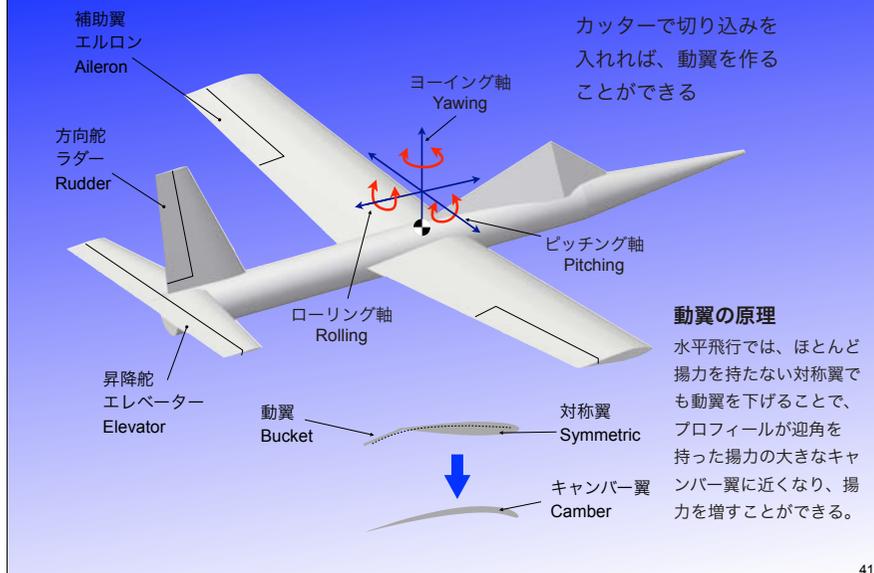
39

機体の形や特性に関する値

- 全長 (Span) : 機体の全長(mm)
- 全幅 (Wing Span) : 翼端から翼端までの主翼の長さ
- 全備重量 (Weight) : 機体全体の重さ (g)
- 翼面積 (Wing Area) : 主翼の面積 (dm²)
- 翼面荷重(Wing Load) : 全備重量を主翼面積で割った値
- 主翼アスペクト比 (Aspect Ratio) : 主翼の長さと同翼弦の比
- ノーズモーメント(Nose Moment) : 重心から先端部までの長さ
- テールモーメント (Tail Moment) : 重心から尾翼空力中心までの長さ
- 上反角 (Dihedral Angle) : 主翼の上反り角度

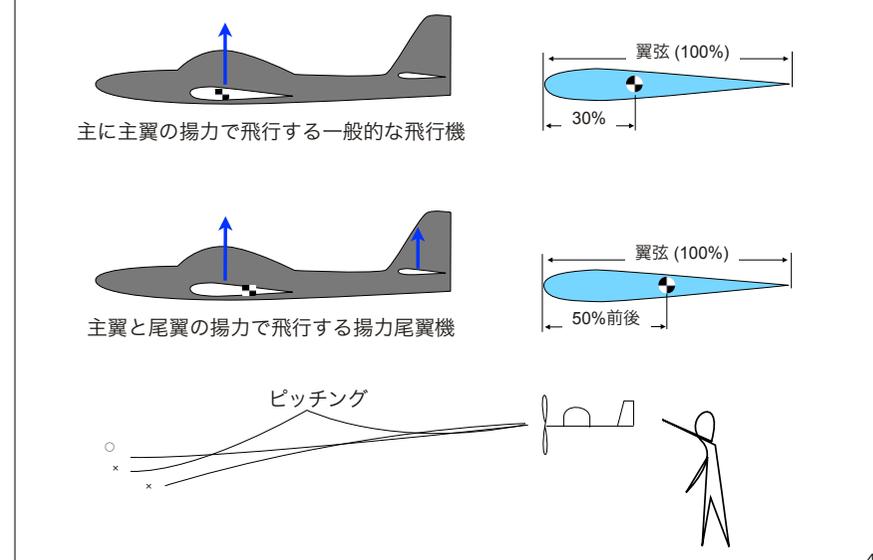
完成した自分の機体の仕様をある程度おさえておくと、次の機体設計の参考になる。また課題では、一部の設計仕様を提出してもらう予定である。飛行特性に大きく影響する値に翼面荷重がある。尾翼は安定のために利用されるため、通常、翼面荷重の計算には含めないが、揚力尾翼機では、主翼面積に加算する。翼面荷重の大きな機体は、速度が遅いと飛行できない。反対に翼面荷重が小さな機体は、低速で飛行することができる。高アスペクト比の細長い翼は、翼端で無効になる揚力の影響が少なく、大きな揚力を得ることができ、揚力が均一に分布するので、翼型の性能をより完全に引き出すことができる。さらに高アスペクト比の翼は、ローリング軸周りのモーメントが大きくなるので、時定数が大きく安定性も良い。しかし軽く丈夫に作る事が難しい。左右の安定性を良くするには、上反角を付ける。

動翼



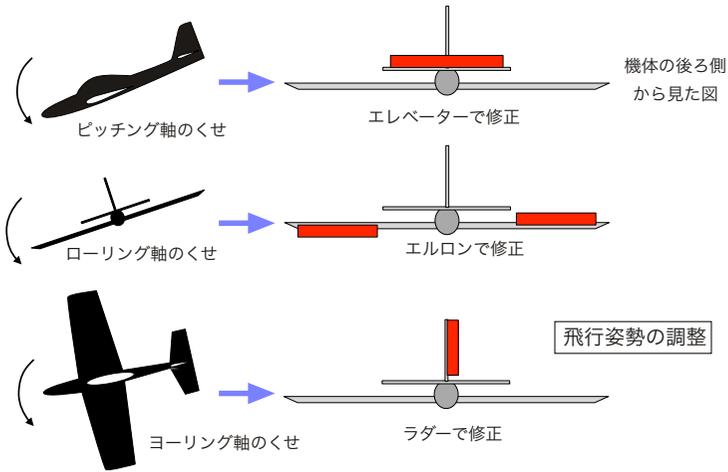
動翼は飛行機を操縦するため、主翼や尾翼の一部あるいは全部を動かして揚力のバランスを変えることで必要な運動を得る装置である。ライト兄弟は、翼を直接ねじることで操縦を行っていた。操縦用の動翼には、ヨーイング方向の運動を生じる方向舵（ラダー、Rudder）、ローリング軸の運動を得る補助翼（エルロン、Aileron）とピッチング方向の運動を作る昇降舵（エレベーター、Elevator）がある。演習の紙飛行機では、各動翼の位置に切り込みを入れて曲げられるようにし、機体のくせ取り用に利用する。

飛行機の調整 1（重心位置の調整）



出来上がった紙飛行機は、まず外見上の翼のねじれを調べる。ねじれている場合は修正する。ひどい場合は作り直す。翼がねじれていると飛行時にくせが出やすく、重心が合っても紙飛行機がうまく飛ばない。次に重心を調べる。標準的な形態の機体では、平均翼弦の前縁から1/3程度に重心を持ってくる。揚力尾翼機では、尾翼の揚力も加算されるので、これより後ろぎみの50%前後の位置がよい。前が軽い場合は、前に重りを増やす。主翼が移動できる場合は、主翼を後ろにずらす方が重量を増やさなくてすむ。後ろが重い場合は、反対の調整をする。飛行時にピッチング（波打ち運動）を起こす時は、重心が後ろ過ぎる。突っ込み癖が出る場合は、重心が前過ぎる。

飛行機の調整 2

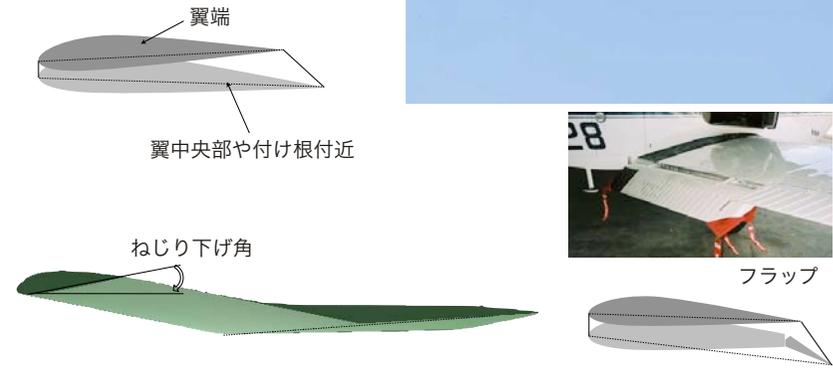


43

重心やねじれの調整の後、それでも癖がでる場合は、各軸方向のくせをそれぞれの動翼で調整する。重心が合っても頭を下げて降下する傾向がある時は、エレベーターを上を上げて尾翼にマイナスの揚力を発生させ、機首上げのモーメントを作る。ローリング癖が出る時は、翼がねじれていることが多い。このときは、エルロンで修正する。お尻を左右に振るような動作の時は、ラダーで修正する。設計上では、テールモーメントアームが短すぎたり、垂直尾翼の面積が小さすぎるとお尻を振りやすい傾向がでる。

主翼のねじり下げ

翼端の方が翼の付け根より迎え角がわずかに小さくなるように翼をねじると安定して飛行するようになる

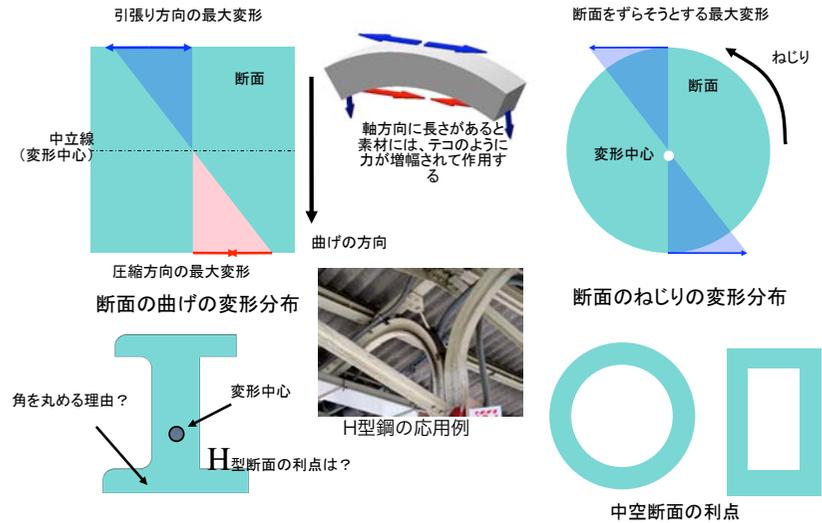


ゆっくり水平飛行をしている飛行機が突然墜落することがある。原因の多くは、翼端失速である。着陸の時などは、低速で揚力を得るため迎え角を増していくと失速を起こす。翼端は、周囲に空気が逃げやすく、翼中央に比べ失速しやすい条件がそろっているため、普通は翼端から失速が起きる。これを翼端失速という。このとき左右同時に失速が起これば、機体の姿勢は乱れないが、通常、失速は片側から始まるため急激に姿勢が乱れて墜落に至る。これを防ぐために実機では、翼端の迎角を翼の付け根より浅く取るように翼端側をねじり下げる。ねじり下げを付けると翼中央に比し翼端部の迎え角は小さくなるので、失速は、翼中央付近からゆるやかに始まり、迎え角を増しても失速によって翼中央部の揚力が減るだけで、失速していない両端の翼の揚力によって支えられ、大きな姿勢の乱れが起きにくい。写真のゆっくり降下する鳥の翼もこのような形をしている。一般的な飛行機のねじり下げは、1~2°程度である。実機の翼の付け根付近にあって離着陸時に下げる動翼をフラップという。フラップを下げると翼型が下方に曲がるように変形し、フラップがある翼の付け根に近い部分は、迎え角を増すことと同様な効果を持ち、揚力が増す。一方、フラップを下げた翼の中心線から見ると翼端は、迎え角が浅く、ねじり下げがついた状態と同じになる。結果として機体の姿勢を維持したまま揚力が増し、ねじり下げが生じて安定性が向上する。もちろん演習の紙飛行機にもねじり下げは有効である。紙飛行機で、どうしたらこのように、きれいにねじれた翼を作れるか工夫してみよう。

参考資料

45

最大変形は表面近傍に現れる



最も大きな変形は、どこに発生するだろうか。幾何学的に考えれば、最も大きな変形は、変形の中心から最も遠い所、すなわち変形を受けている部材の表面で発生することになる。変形の中心からの距離に比例して変形は大きくなる。このことから、断面積の広い部材ほど、曲げ剛性が高いことを想像できる。また、ねじれ変形の場合も同様な考察が成り立つ。見方を変えれば、変形の大きな所が大きな力を受けているから、表面付近だけ丈夫なら部材や構造体は、かなり丈夫になるということもできる。この場合、変形の少ない変形の中心に近い部分の材料がないので、力を均等に分配したてき材料の強度を有効に使える。H型やI型断面の構造材やパイプ状の構造材は、このような考えで作られている。当然、強度の割に軽い特長もある。

機械の構造の進化

木製モノコック機
デュッセルデュッサン



ラダー構造 (Ladder Structure)
重さの割に強度が低い



フレーム構造 (Tube Frame)
(鋼管フレーム構造)



モノコック構造 (Monocoque)



セミモノコック構造 (Semi-monocoque)
ストリンガー、胴枠、リブ + 外皮

高高度を飛行する飛行機の内部は、加圧されており、機体は空気膜のような役割を果たす。

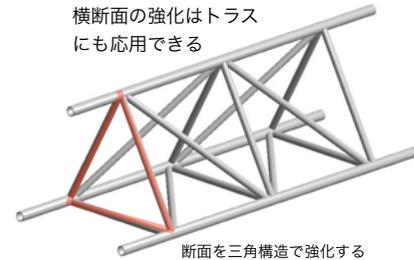
機械の進化とともに構造も進化してきた。初期の列車や自動車は、ラダー（梯子）構造であった。もっとも、水圧を受ける船は、古くからモノコック構造であったが。ラダー構造は、立体的に進化し、パイプフレーム構造になった。今でもオートバイなどは、パイプフレーム構造が多い。パイプフレーム構造は、応力外皮構造や大圏構造（フラーのドーム、geodesic structure）を経てモノコック構造となった。航空機では、モノコックを更にストリンガーやリブで補強し、軽量化したセミモノコック構造が使われている。ストリンガーは、高高度で機内が加圧状態になった際に胴枠で支えられた外皮が、糸を巻いたハムのような状態になるのを防ぐ、長手方向の補強材である。参考：空気膜構造。

トラス構造

(Truss Construction)

三角形を基本に配置された各部材が主に引張り・圧縮方向の荷重を受け持ち、接合部は支点としてのみ働く形式の軽量構造

横断面の強化はトラスにも応用できる

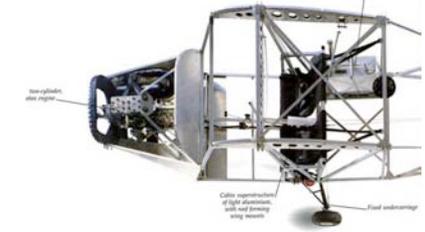


断面を三角構造で強化する

トラスの応用
応力外皮構造

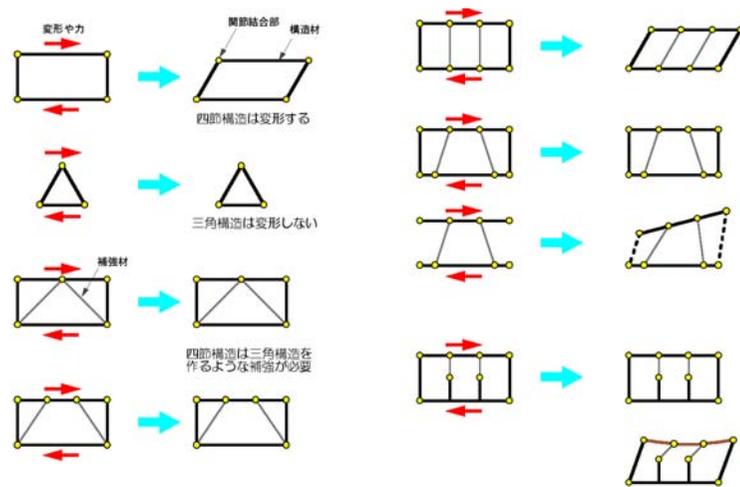


軽飛行機のトラス構造の骨組み



トラス構造では、各部材に引張りか圧縮力しか働かないので、接合部は、回転が自由なジョイントでもトラス構造が成り立つ。トラス構造の表面に薄膜を貼ると薄膜が張力を受け持つので、特に空気圧などの分布荷重を受ける航空機などでは、更に丈夫な構造体になる。このような構造は、応力外皮構造とよばれ、航空機などでよく使われる。提灯や張り子、障子戸も一種の応力皮膜構造である。丈夫なトラスをテコにして外皮の張力で、さらに丈夫な構造を支える構造と考えるとわかりやすい。構造強化の共通した思想は、局所的な荷重は分散し、できるだけ外力を平均化して構造全体で受けることである。

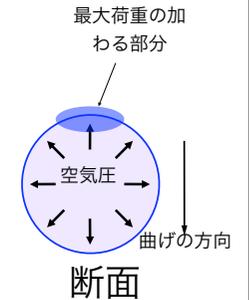
少し変わったトラス構造



三角構造だけが変形しにくい構造ではない。変位の大きな4節リンク構造などの大きな変位部を拘束しても、変形しにくい剛体構造を作ることができる。リンクによって大きな変位が発生する部分を作り、その変位を抑える箇所に補強部材をおけば、丈夫な構造が出来る。

断面の厚みの機能と丈夫な構造

空気膜構造の例

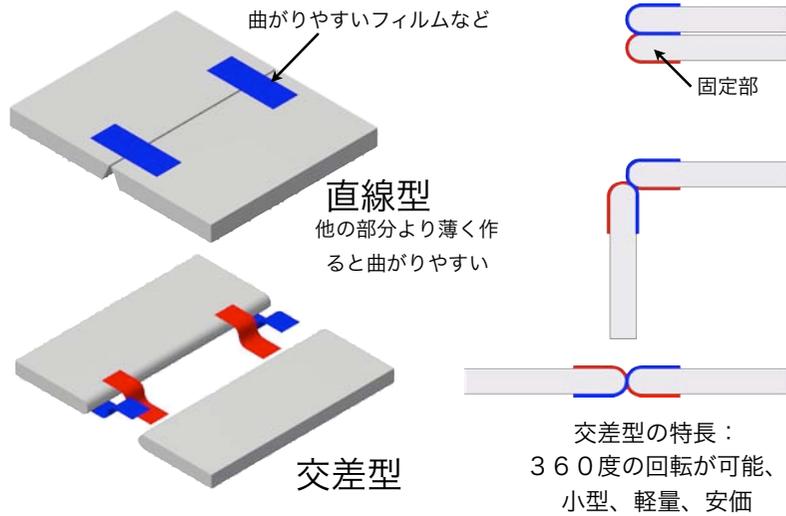


- 張力と圧縮力がどこに加わるかをよく観察して読みとる。
- 変形の大きなところを抑えると構造は強くなる。
- 曲げでは、断面形状の形や厚みを維持すると効果的
- 同様な強化法の考えはトラスや箱構造にも応用できる

空気圧によって断面の形状と厚みが維持されるので曲げの荷重は、膜の張力に変換される。したがって膜が張力に耐えれば強度を持つ。膜は圧縮方向に耐える強さは必要ない。空気圧が圧縮力を受け持つ。

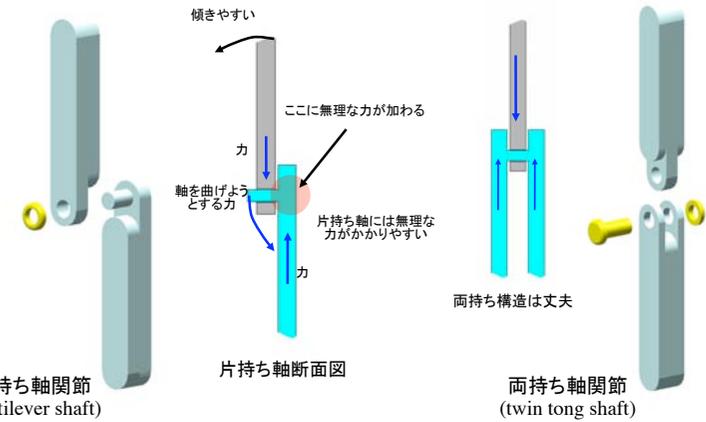
空気膜構造は、空気圧によって断面の形状と厚みが維持されるので曲げの荷重は、膜の張力に変換される。したがって膜が張力に耐えれば強度を持つ。膜は空気圧による張力に耐えるだけでなく、圧縮方向に耐える強さは必要ない。空気圧が圧縮力を受け持つので、丈夫な薄いフィルムでもよい。空気膜構造で安定な形は、球形か円筒形に近い形状である。浮き袋やゴムボート、気球などは空気膜構造体である。機内が加圧された航空機が成層圏のような気圧が低い所を飛ばす時は、胴体がこの空気膜構造に近くなる。そのためジェット旅客機の胴体は円筒形をしている。

帯状ヒンジ

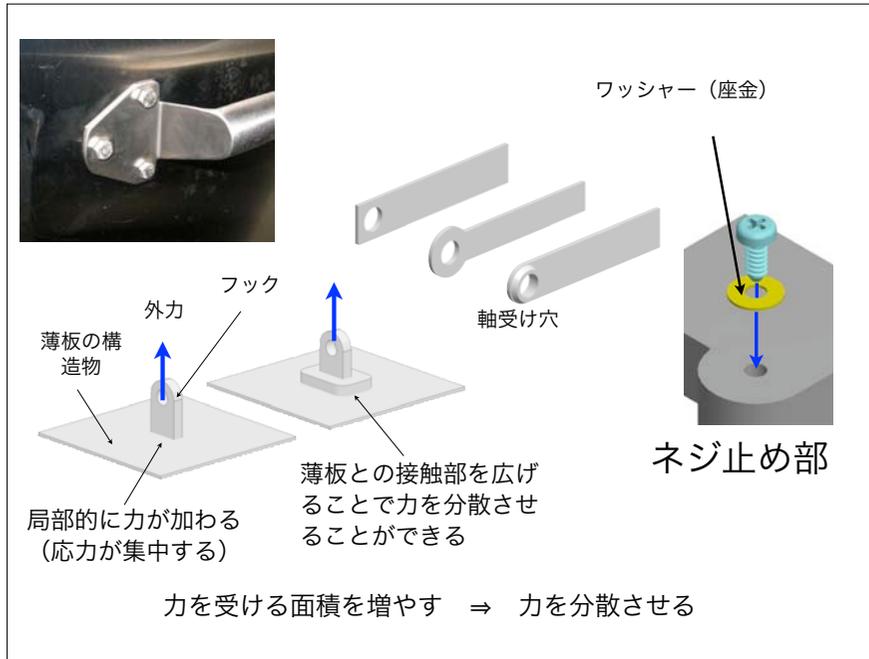


回転軸を持たなくても、曲がりやすい布やプラスチックのフィルムなどを屈曲部に配置することで、ヒンジ機構は実現できる。射出成形で一体で成形されるものも多い。直線型帯ヒンジでは、局所的なフィルムの屈曲寿命が問題になる。交差型帯ヒンジは、360度の開閉ができるヒンジ機構である。2枚の曲がりやすいフィルムを交差させた可動部をもつ。屈曲部のフィルムは、全体的に変形されるので、特に局所的な屈曲特性がよくなくとも寿命が長い。同様な機構は、ひもを8の字に交差させても作ることができる。

片持ち軸と両持ち軸の関節の強度



関節(joint)は、いろいろなところに使われるヒンジと似た機械の要素である。関節には、片持ち式と両持ち式があるが、片持ち式は、普通に作ると二つの部材が回転軸に対してオフセットするので、回転軸の長手方向に偶力が生じ、傾きやすいため、構造的にあまり大きな荷重を支えることはできない。反対に両持ち式は、回転軸が両端で支えられるので、関節を曲げようとする力は発生せず、大きな荷重を支えることができる。これらの関節は目的によって使い分けられる。



力が分散するような工夫は、薄板構造で力を点で受ける箇所や軸を受ける部材、ネジ止め部分などによく見られる。ある程度の耐久性が必要な場合は、軸が接触する面積を増やし、力が緩やかに伝わるような工夫がされていることが多い。ネジ止めのときに使うワッシャー（座金）も締め付け力をできるだけ分散し、部材をいためないようにする働きがある。