

航空機形態デザインに関する動向

「航空機」は、特殊な用途を除き大きく固定翼機、回転翼機に分けられる。ここでは、固定翼機の形態デザインについてその動向を概説する。また、一般にわかりやすくするため定性的な説明となること、ご了承ください。

1. 航空機形態デザインの決定

一般に航空機の開発プロセスはおおよそ図1に示すようなフローになる。

構想設計は基本 requirements を満たすように、そのときの技術水準に照合し、エンジニアや設備また経費等のリソースが満足されさらに航空機設計の基礎となるデータベース等を勘案しながら実施される。構想設計の結果、基本 requirements を満足したと判断された場合に、具体的な機体形状、構造様式、エンジンおよび搭載品、その他のシステムが基本設計され製造するための詳細設計がなされる。

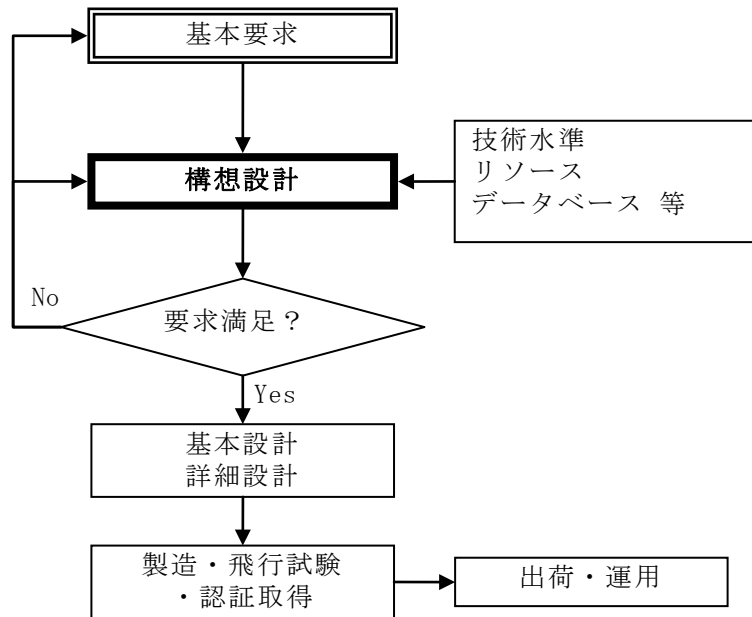


図1 航空機開発の概略フロー

すなわち、構想設計の段階において、形態デザインはほぼその方針が決められ、基本設計～詳細設計ではそれを具体化し統合していく作業となるのが通常である。通常は、基本要求から始まり認証をとるまでには5年～10年を要する。新規に配備された航空機があればその形態デザインは5年～10年前に決められていることが多い。さらに「次世代デザイン」ともなると、その機能・性能が想定したものと確認し認証を得るまでのプロセスが長くなることから、さらに時間がかかる傾向となる。例えば、米国の新世代戦闘機 F-22(図2)は、基本要求は1970年代末に出たとされており、配備までに25年以上がかかっている。



図2 F-22 Raptor
(Lockheed Martin 社 HP より)

2. 航空機形態デザインを決める要素

或る基本 requirements を実現する航空機形態デザインはほぼ無限といってよいほど存在する。基

本的に航空機の形態デザインには制限は無い。ただし、100 年以上の現代航空機の歴史において、形態デザインに関する設計法は淘汰され洗練されてきている。また、必要となるデータベースや新技術の適用は絶え間無く続けられ現在の形態デザインの機体に反映されている。

およそ、「通常航空機形態」とは、一般的に主翼は単葉、単胴および垂直・水平尾翼形態といえるだろう。ただし、「通常航空機形態」の中でも基本要求的の違いによりさまざまな形態デザインが存在する。ここでは形態デザインを決める要素について、まず「通常航空機形態」を念頭においてまとめてみる。

「通常航空機形態」の構想設計では、以下の 4 つの形態に注目して考える。

- エンジン形態と空気取り入れ口（インテーク）形態
- 主翼形態
- 水平・垂直尾翼形態
- 降着装置形態

2.1 エンジン形態と空気取り入れ口（インテーク）形態

エンジン形態については、まずプロペラかジェットか、単発か多発かが形態を決めるポイントになる。単発プロペラ機は前方に機首部分にエンジンを搭載しその前でプロペラを回すことになるのが一般的である。多発プロペラ機は主翼の上にエンジンを載せプロペラと地上での地面とプロペラのクリアランスを十分安全に取ることになる。したがってプロペラ機のエンジン形態はほぼエンジン数で決まる事が多い。

一方、ジェットの場合はエンジンをポッドに入れる場合と胴体内搭載の場合がありさらにポッド形式では主翼下に吊り下げるか後方胴体に取り付けることになる等、プロペラ機よりも形態デザインのバリエーションは広い。一般に、構造上の有利性や胴体内にエンジンを置くと騒音が厳しくなるため、大型旅客機では主翼下に吊り下げる形式（図 3）になる。小型旅客機やビジネス機では地上のクリアランス確保の問題から後方胴体に取り付ける（図 4）のが一般的である。ジェットエンジンの胴体内搭載は、戦闘機等軍用機に一般に見られる形態でありできるだけ機体をコンパクトにして抵抗を減らす形態を狙う。胴体内搭載の場合、空気取り入れ口（インテーク）の形態がエンジン搭載形態とセットで形態デザインを決める要素となる。

特にジェットエンジンを胴体内搭載した場合には、空気取り入れ口（インテーク）形態の設定は慎重に行われる。初期の空気取り入れ口は機首に



図 3 Boeing 777
〔主翼下ポッド配置の例〕
（Boeing 社 HP より）



図 4 Hawker 4000
〔後方胴体ポッド配置の例〕
（Hawker 社 HP より）

設けられた（ノーズインテーク）。これは主にディストーション（エンジンに流入する空気の圧力分布が一様でなくなることをきらったせいといわれているが、ダクト（インテークからエンジンまでの経路）形状が複雑になり総圧損失が大きくなる欠点があった。

次に登場するのがサイドインテーク方式（図 5）であり、現代の戦闘機の多くがこの方式を採用している。総圧損失は改善されるものの、ダクトが複雑になるのと、前胴で発達する乱れた流れを吸い込むこと等が発生原因となるディストーションを防ぐためのダイバータ（インテーク前方で発生した乱れた流れを排除するためのインテークの位置をもち上げる等の工夫）を設ける等の工夫が必要である。また、大きな横滑り飛行時の特性についてエンジンの特性に合わせた設計が必要になる。

下方インテーク（図 5）は F-16 で有名になった方式であるが、大迎角、大横滑り角飛行時の特性に優れている反面、地上滑走時の異物吸い込みの可能性が高い欠点がある。

例は少ないが胴上インテーク（図 6）がある。胴体下面を滑らかに保ちたい目的やエンジンを設計上高い位置に持つていく必要がある場合にこの方式が選ばれる。大迎角時や機体姿勢によるディストーションやバズ（主に超音速で乱れた流れがインテーク～ダクトに入ることにより空気の振動が起こる現象）抑制の設計配慮が必要になる形態である。



図 5 サイドインテーク（F-4）と
下方インテーク（F-2）の例
（航空自衛隊 HP より）



図 6 上方インテークの例 F-107A
（NASA HP より）

2.2 主翼形態

機体の初期サイジングにおいて、主翼形状（平面形、翼型分布 等）がほぼ設定される。たとえば、旅客機であれば比較的細長いアスペクト比（翼幅（スパン）の二乗を主翼面積で割った値）の大きい主翼が使われその翼型は比較的厚い翼厚比 13%前後の翼を通常用いる。戦闘機においては、平面形は三角（デルタ）翼型等アスペクト比が小さく、高速性のために前縁に大きな後退角の付いたものになる。翼型も数%と非常に薄いものが採用される。

これらの主翼を全機航空機形態に統合していく過程で、主翼形態は大きく高翼、低翼に類別されることになる。高翼は軍用輸送機（図 7）では一般的で荷の積み下ろし、大きなカーゴスペースの確保のためにこの形態が選ばれる傾向にある。空力的には、スパン方向の揚力分布を楕円型に近くすることが理論的に可能であるので、一般に誘導抵抗には有利なのと横静安定が強くなり安定であるが、安定すぎる傾向があり、運動性を改善するため

に主翼に下反角をつける場合もある。

低翼形態は主に大型の機体の運動性を改善するほか、主脚のトレッド幅（左右の主脚間距離）を広くとることができかつ主脚の長さを短くすることができるので、離着陸時の滑走安定性と重量に有利である。ほとんどの旅客機がこの形式を選ぶ理由である。



図 7 高翼の例 C-X
(防衛省 HP より)

2.3 水平・垂直尾翼形態

尾翼形態については、水平尾翼、垂直尾翼の形態、組み合わせで特徴が出る。およそ70%の機種で水平尾翼、垂直尾翼が独立した形態をとっている。

まず水平尾翼であるが、大きく通常水平尾翼（固定尾翼面＋エレベータ（昇降舵））およびオールフライング・テール（全可動式尾翼）がある。小型機では固定尾翼面は動かず縦のトリムはエレベータやエレベータのトリムタブ（縦の釣り合いを細かく調整する小補助翼）を用い、さらに縦操舵の余裕を残してエレベータの形状が設定される。大型機になると乗客、ペイロードや燃料の重量状態により広く重心位置に対応するため、固定尾翼面の取り付け角がある範囲で可動であるのが一般的である。

水平尾翼の取り付け位置は胴体に取り付ける通常の形態と垂直尾翼の上部につけるT尾翼形態（垂直尾翼の中ほどにつける十字尾翼形態も同様の形態である）がある。水平尾翼は主翼からの吹き降ろしやエンジン排気等により水平尾翼の特性・性能に影響を与えないように位置を調整される。

機体の形態により通常の形態にするのが難しい場合、T尾翼形態をとることになる。T尾翼形態を取る例としては、胴体後部に双発のジェットエンジンポッドを付けたリージョナルジェット旅客機やビジネスジェットがある、また高翼で胴体後部に大きな開口部を持つ軍用の輸送機はこの形式を取る場合が多い。垂直尾翼上端に水平尾翼を置くことにより、空力特性・性能的には水平尾翼による端板効果により垂直尾翼の効きが增強されるため、垂直尾翼面積を小さくできるメリットがあるが、一方で水平尾翼取り付けのための強度／剛性の確保のため構造重量が大きくなる欠点がある。

オールフライング・テールは、戦闘機等大きな縦運動を要求される機体に有効であるが、条件として人力では操縦が難しく油圧あるいは電動により大きな操舵力が確保される場合による。

垂直尾翼については、単垂直尾翼と複数垂直尾翼にわかれる。固定尾翼面と方向舵（ラダー）による形態がほとんどで、水平尾翼のようなオールフライング方式は垂直尾翼につ



図 8 複数垂直尾翼の例
Lockheed Constellation

いてはほとんど見られない。単垂直尾翼が基本となるが、重心からの距離が十分にとれず単垂直尾翼では面積が過大になる場合や、高迎角時等の効きを確保する目的、さらには格納庫の高さ制限で垂直尾翼を低く抑える必要がある場合等に複数垂直尾翼形式がとられる(図 8)。垂直尾翼の枚数が増えると後胴や水平尾翼との取り付け部等における干渉抵抗が増加する欠点がある。

水平尾翼および垂直尾翼を融合した尾翼形態として、V 字尾翼がある。この形態は尾翼の枚数が減るために干渉抵抗が小さくなる利点があるが、ラダーとエレベータのクロス制御が必要で操縦系統が複雑化する傾向になる。

2.4 降着装置形態

降着装置形態については、基本的形態としては重心の少し後方にある主脚と機首にある前脚による三輪形態である。機体が大きくなるにつれ、主脚のタイヤの数が増加する方向になる。脚は機体の中で強度をもっとも求められる部品であり、鉄系の材料が多用される。そのため、通常全備質量の 5%前後の重量を占めることになる。十分な強度を実現し重量をできるだけ抑えるために、主翼位置は低翼として脚の長さを抑えるか、高翼機では胴体から斜め下方に脚を展開する形態をとる。機体がさらに大きくなると、タイヤの数だけでなく主脚の数が増えていく。例えばボーイング 747 型機では 1 つの脚に 4 つのタイヤを設け、これを 4 脚で主脚を構成している(図 9)。



図 9 B747 は 4 脚で主脚を構成

他の形態としては、胴体の前方と後方の 2 箇所に主脚を供える自転車形態がある。これは、爆撃機のように重心周辺に大きな開口ベ이를必要とする機体に採用される傾向にある。この形態は原則として機体姿勢をほぼ水平に保ち離着陸する。また、横風の場合はクラブ飛行(横風方向・速度と自機の飛行方向・速度で合成される方向向いて蟹の横ばいのように飛行すること)のまま着陸する必要があり、前後の主脚はおおのステアリング機能を備えていることが多い。地上での取り回しが難しく、その際に主翼端を地面と接触させぬようにアウトリガを設けることになる。

その他、単発プロペラ機では、前方に主脚、後方に尾輪を設ける尾輪形態がある。比較的大径のプロペラの地上とのクリアランスを確保するためこの形態がとられる。ただしこの形態は、三輪形態に比べ滑走時の直進安定性が少なく着陸滑走時のテクニックを要する。

2.5 通常航空機形態以外の形態について

「通常航空機形態」の形態デザインを設定するポイントを上記に述べたが、「特殊航空機形態」(通常航空機形態に属さない形態)の航空機がこのほかに存在する。それらは、「通常航空機形態」では基本要求を満たせない場合に選択・設計されることになる。例えば、主翼については複数設ける多葉機、可変後退翼機、全翼機 等がある(図 10)。胴体や尾翼のバリエーションとしては、多胴機、カナード機 等、さらに主翼と尾翼を結合させた結合

翼機 等がある。特性的な特殊性としては、短距離/垂直離着陸機、ステルス機、水陸両用機（Amphibian）等の例がある。



Red Baron（三葉機）



F-14（可変後退翼）



XB-49（全翼機）

図 10 特殊航空機の例

3. これからの動向

10 年後、20 年後の航空機の形態デザイン動向を予測するのは、なかなか想像力の要る事である。航空機は特に安全性・信頼性を保証しないといけない設計開発となるため、特殊な基本要件でない限り、「通常航空機」形態はこれからも主流となり洗練されていくであろう。ただし、設計技術の進歩、地球環境や使用目的の多様化があり、基本要件はさらに多種多様となることが予測され、それに伴い機体の形状デザインも従来に無いものが登場することが考えられる。

以下に、近年発表されている形態の一部を紹介する。

3.1 BWB (Blended Wing Body)

1970 年代に登場したボーイング 747 から、およそ 35 年以上を経て 2007 年ロールアウトした Boeing 787 は同じ「通常航空機形態」の大型旅客機ではあるが、エンジン取り付け形態、主翼・尾翼形態について空力形状的洗練がされた形状に進化している。ほぼ、「通常航空機形態」の旅客機形態における完成形とも言うべき形状であろう。



図 11 BWB

この完成形からさらに、環境への配慮も含めた更なる効率化を検討した結果として、NASA では BWB (Blended Wing Body) の研究が行われている。これは、全翼機 (YB-40、B-2 等に例がある) の進化形であり、分厚い胴体部と主翼が一体化しブレンドされた滑らかな形状、胴体後方上部に 3 基設けられた高効率エンジンにより高亜音速を巡航、およそ 7,000NM を飛行可能というコンセプトである。利点は高効率飛行性能であり、従来よりも約 20% 燃費効率が向上するとしている。

(<http://www.nasa.gov/centers/langley/news/factsheets/FS-2003-11-81-LaRC.html>)

ただ、客室は横に広い設計になるため、与圧時の強度確保による重量増の懸念や、左右の重量バランスの変化が大きいこと、さらに客室の窓が現在の機体に比べ圧倒的に少ないことから来る、飛行中の乗客の心理的圧迫感、飛行場におけるケータリング等物資の搬入、搬出の利便性等がこの形状デザインに関する問題点として懸念されている。技術的な実証確認として低速のスケール機（X-48B）による飛行試験が NASA で行われる予定である。
(http://www.nasa.gov/centers/dryden/news/X-Press/stories/2006/073106_BWB.html)

3.2 静粛超音速機

超音速旅客機コンコルドが 2003 年に運航を終了して以降、次世代の超音速旅客機の計画は具体的には確定したものは無い。高亜音速までの飛行では、依然として長時間の国際間移動を要するため、時間価値の高い人々にとっては超音速旅客機の出現が待たれるところである。コンコルドのエンジン騒音や強いソニックブームの教訓から、次世代超音速機では特に静粛性確保が技術的達成項目の最重要項目として挙げられる。これを実現するべく、各国でソニックブーム強度低減形状の研究が実施されている。

特に機首下方形状の工夫によりソニックブーム強度が低減されることが知られており、NASA では F-5 の機首形状を変更した SSBD (Shaped Sonic Boom Demonstrator)により飛行実証を実施した (図 12)。

(<http://mynasa.nasa.gov/vision/earth/improvingflight/ssbd.html>)

日本においても、JAXA が S3D 静粛超音速機技術の研究開発を開始しており、無人機による飛行実証を実施する計画である (図 13)。

(<http://www.apg.jaxa.jp/res/stt/a01.html>)



図 12 SSBD



図 13 S3D 静粛超音速機
(JAXA HP より)

3.3 Tail Fan

航空機の数として最も多いのは、単発ピストンエンジンのプロペラ機、ジェネラルアビエーションの一番基本となる小型個人機である。米国では 20 万機以上現在でも飛んでいる。いわゆるセスナ機に代表されるこれらの機体は、ベトナム戦争以降に年



図 14 EQuIPT Civetta

数万機の新型機出荷の大きな需要があった後、永い間不調な時期が続いた。その結果、現

在の平均的な機齢は約 40 年となっており、次世代小型個人機の検討を NASA が中心となって実施している。その一つの代表的形状が、EQuIPT Civetta と呼称される胴体後方にダクテッドファンを持つ形態デザイン（図 14）である。

(http://cafefoundation.org/v2/pdf_pav_tech/PAV.NASA.Aeronautics/NextGenGA.pdf)

この形態デザインの特徴は、主翼から大きく離れたダクテッドファンにより効率良い推進を得られ高速な機体を実現できること、ダクテッドファンによりプロペラ騒音の小さい機体とできること、簡易な主翼・胴体構造、水平、垂直尾翼は形状同一であり低コストが実現されること。エンジンは自動車で使用されているものを用いる等、コストパフォーマンスの大きい機体を実現しているというものである。

3.4 極超音速機

最後に紹介するのは、極超音速に関する要求である。特に、防衛航空機に関する要求である。米軍は FALCON (Force Application and Launch from CONUS、CONUS は米国本土(Continent United States)の意) すなわち紛争発生時に将来は紛争地に軍を展開することなく、米国本土より対処可能となるように、全世界のあらゆる地域に対して米国本土から数時間以内に進出し対処できる航空機を開発している。

(<http://www.globalsecurity.org/space/systems/hcv.htm>)

2004 年に飛行試験に成功した X-43A

(<http://www.globalsecurity.org/space/systems/x-43.htm>) はマッハ 10 で

の飛行を可能にするスクラムジェット

の飛行実証に成功したものである。極超音速飛行のための機体空力特性・性能とスクラムジェットの推進システムを統合した形状およびの黒色の耐熱合金による塗装・構造が形態デザインの特徴である。



図 15 FALCON

以上、例を挙げたものすべてが実現するということではないが、このうちの数アイテムは約 20 年後になんらかの形で実現され運用されていることであろう。

➤ 解説概要一覧に戻る

この解説概要に対するアンケートにご協力ください。

▶ アンケート開始