

技術解説

航空機技術の動向と国産機開発

Trend of Aircraft Technology and New Japanese Commercial Jet Transport

西脇 英彦

Nishiwaki Hidehiko

日本の航空機産業は、近年民間機需要が増えてきた。これを契機に日本の中核産業になることが大いに期待されている。1974年に生産終了したYS-11以来、久しぶりに国産民間旅客機の開発が2008年3月に決定された。環境負荷の少ない将来民間航空機には、数々の新技術が盛り込まれ、中には日本が世界最先端を行くものもある。それらを以下に解説する。

Commercial products of Japanese aircraft industry are growing recently. It is expected the aircraft industry will become a key industry in Japan. The new Japanese commercial aircraft project was launched March 2008. It is a long time since it ceased production on the YS-11 turboprop in 1974. An environmentally friendly next generation aircraft consists of various kinds of new technologies, in one of which Japanese companies are world leaders.

キーワード：航空機技術、環境適合性、ジェットエンジン、燃料消費、抗力

1 今、開発中の日本の航空機

6～8人乗りHondaJetは2003年に試作機が初飛行、2006年には本格的にビジネス・ジェット機市場参入の決定がなされた。70～90席の三菱MRJは2008年3月、開発・事業化に乗り出した。防衛省の次期哨戒機（PX）及び次期輸送機（CX）は、川崎重工主契約のもとで2007年7月、2機種同時にロールアウトした。さらに、日本の航空機メーカーが、35%の生産分担比率で参画するボーイング787（以下B787）旅客機も初飛行を目前に控えている。

このように今、日本の航空機産業界は、開発中の航空機のために繁忙である。航空機はかつて高速化、大型化をどんどん進めてきた。しかし、今は経済性、環境適合性、安全性がその技術開発の重点課題となっている。本稿ではこれらに対し、日本で開発中の航空機にどのような技術が採用されているか解説する。

2 飛行機の経済性—燃費と抗力

2.1 飛行機の燃費

石油価格の高騰による飛行機の経済性向上の観点からも、環境上CO₂削減の観点からも燃費低減がますます重要になっている。以下では飛行機



写真1 三菱MRJ完成想像図（左、三菱航空機提供）と飛行中のHondaJet（右、本田技研工業提供）

の燃費を飛行距離あたり消費燃料質量で表す。巡航中の飛行機を速度を V 、推力を T 、搭載ジェットエンジンによる推力・時間あたりの消費燃料質量（燃料消費率）を SFC とすると、

$$\text{燃費} = \text{燃料流量} / \text{巡航速度} = SFC \cdot T / V \quad (1)$$

である。揚力 L 、抗力 D は、空気密度 ρ 、主翼面積 S 、揚力係数 C_L 、抗力係数 C_D とすると、

$$L = 0.5 \rho V^2 S C_L \quad D = 0.5 \rho V^2 S C_D \quad (2)$$

である。また、巡航飛行中は $D = T$ 、

機体全備重量 $W = L$ 、 V は(2)式から消去し、

$$\text{燃費} = \frac{SFC}{V} \frac{C_D}{C_L} W = \sqrt{\frac{\rho S W}{2 C_L}} SFC \cdot C_D \quad (3)$$

となる。(3)式から燃費低減には S 、 W や SFC 、 C_D の減少が重要なことが分かる。ただし S 、 W は他の性能が関係するので無条件には減らせない。

2.2 抗力の低減

(1) 揚力・抗力特性

抗力係数 C_D は次の2つの項からなる。

$$C_D = C_{D0} + C_L^2 / (\pi A e) \quad (4)$$

第1項目 C_{D0} は零揚力抗力係数、第2項目は誘導抗力係数といい、 C_L^2 に比例するのが特徴である。 A はアスペクト比 $= (\text{翼幅})^2 / \text{主翼面積}$ 、 e は飛行機効率といい、通常 $0.7 \sim 0.9$ である。 C_{D0} はさらに摩擦抗力、圧力抗力、造波抗力に分けられる。亜音速機では、摩擦抗力は全抗力の50%位、誘導抗力は全抗力の30～40%になる。

(2) 摩擦抗力低減

飛行機に遭遇した機体表面近傍の流れは当初、摩擦抗力の小さい層流であるが、やがて機体表面の僅かな凹凸や圧力変化の影響を受けて、乱流となる。乱流の摩擦抗力は大きいので、層流の範囲をできるだけ広げて抗力を減らす。翼の流れを極力層流に保つ層流翼断面は第二次大戦中の飛行機に使われ始めた。しかし、当時の層流翼は工作精度の悪さのため、また表面に僅かな凹凸（虫の付着、錆も含む）があると十分な性能を発揮しなかった。これに対し HondaJet ではより実用的な層流翼断面を設計した。さらに胴体も広範囲に層流に保つ機首形状を、計算解析と風洞試験を駆使して求めるとともに表面は極力平滑化し、胴体の摩擦抗力を乱流の場合に比べ10%減らしている¹⁾。

(3) エンジン搭載と造波抗力

HondaJet はエンジンを主翼上面内側後方に取付けた。主翼上面の気流は飛行速度より速いので、一般にこの位置では抗力が増える。しかし、前後位置、翼幅位置を種々工夫すれば、抗力が減ることを HondaJet は示した¹⁾。その設計解析に CFD (Computational Fluid Dynamics)、風洞試験技術を駆使している。CFD は計算機上で機体まわりの気流状態を解析するので、風洞試験を行う前に多くの形状について解析できる。しかし、CFD は万能ではないので、風洞試験でも確かめている。

(4) ウィングレット (写真2)

(4) 式から A の大きい翼は誘導抗力が小さい。 A が大きいと細長い翼になるので補強が必要

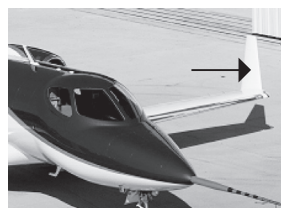


写真2 HondaJetのウィングレット(矢印)と機首(本田技研工業提供)

になる。ウィングレットを取付けると元の翼の強度のまま、 A を大きくしたものと同じ効果を発揮する。

3 ジェットエンジンの燃料消費率

3.1 ジェットエンジンの熱効率・推進効率

SFC は熱効率と推進効率 (図1) に反比例するので、(3) 式から燃費低減には、これらを向上させる。熱効率向上には、①圧力比の向上 (現在の最高約40) ②タービン入口温度の向上 (現在の最高約1,600℃) ③エンジン各要素効率の向上、が必要である²⁾。

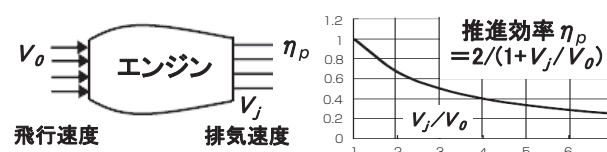


図1 推進効率の説明図

3.2 ジェットエンジンの形式と推進効率

(1) 純ジェットとターボ・プロップ

推進効率はジェットエンジンの形式に大きく依存する。初期の純ジェットは、排気速度が飛行速度の割に速すぎて推進効率が悪い。ターボ・プロップは、プロペラの大量空気流量と遅い噴流速度のため、推進効率は良いが、高速飛行には適さない。これら両極端の形式に対し、次に示す形式はこれらの中間である。(図2)

(2) 現用の高バイパス・ファン・エンジン

バイパス・エンジンは圧縮機の空気全部を燃焼室に送らず、途中から一部を直接排気 (バイパス) し、排気速度を減らして推進効率を向上させる。バイパス空気流量と燃焼室流入空気流量の比をバイパス比という。この形式はエンジン構造が複雑になるので、リスクを避けて初期のバイパス比は0.3と僅かであった。その後、バイパス比をどんどん大きくして現用の高バイパス・ファン・エンジンでは5～6となった。

(3) GTF (Geared Turbo Fan)

P&W社は、自社将来エンジンにGTF (図2) 形

* 1：これが最初のGTFではなく、同形式のビジネス機用エンジンTFE731は1972年に型式証明を得ている。ただし、バイパス比は約3と小さい。

式¹を選び、2008年飛行試験を開始した³。このGTFは推進効率向上のため、バイパス比を8～12とする。低回転大直径ファンとファン・タービンが効率良い回転になるよう両回転軸の間に3：1の減速歯車を設ける。これらと熱効率向上と併せて、同クラス現用エンジンより12～15%のSFC低減が見込まれ³、三菱MRJはこれを採用する⁴。

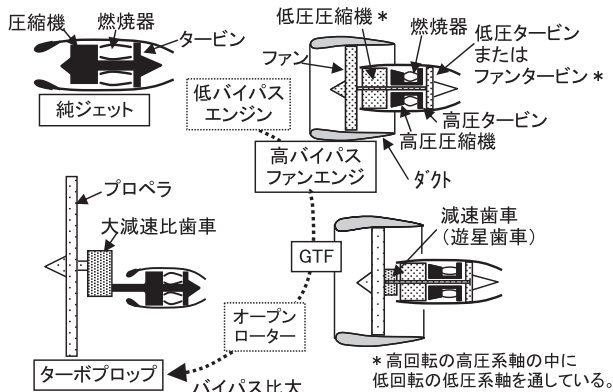


図2 ジェットエンジンの形式

(4) オープンローター

GE社は、NASAと共同でオープンローターの研究を、2008年開始した。これは、図2のGTFのダクトを除き、ファンを大きくしバイパス比をさらに大きくした形式に近い。1973年からの石油危機を契機にNASA等は、UDF (Unducted Fan) などの呼称で研究し飛行試験まで行った。しかし、石油価格が少し安くなるとこの形式への興味は失われ、1990年代に研究は中断された。ところが、最近の石油価格高騰の影響で、20年前のUDF試験設備を再開し、名称も新たにオープンローターとした。騒音、音響疲労、信頼性に課題があり実用化にはまだ時間を要するがGTFよりSFCが10～15%低減し、より革新的である³。

4 重量軽減と燃費

4.1 炭素繊維複合材料 (CFRP) の適用

従来からアルミ合金が機体の主構造材料であるが、同じ強度に対し重量が20～25%軽い炭素繊維複合材料 (Carbon Fiber Reinforced Plastics以下CFRP) の使用割合が近年増えている。最近まで部分的に使われていた複合材料は、B787では旅客機として初めて本格的に、主翼や胴体構造にも適用される。これは機体主構

造重量の50%になり、構造重量削減は4.5t、飛行距離あたり燃費は座席数で除した値で3%低減されるとのことである⁵。

4.2 CFRPの安価な成形法

B787で行うCFRP成形法には次のような問題がある。高温で硬化させるため大型オートクレーブ設備が必要、成形前の材料 (プリプレグ) は冷却保存が必要などのために、製造コストが高くなる。これに対し日本では、他分野の産業部品に採用されているバータム法 (Vacuum-assisted Resin Transfer Molding, VaRTM) と呼ぶ成形技術の航空機への適用を開発した。これは、「真空圧と大気圧の差圧を利用して織物や繊維で形成した基材に樹脂を含浸して複合材を成形する技術」である。成形圧力・温度も低いので安価な方法である。さらに、この方法をより高品質化したAバータム法が三菱MRJの尾翼に適用される⁶。

4.3 複合材で先端を行く日本

B787用CFRP材料の供給は日本の東レが独占的に行う契約を締結した。それを使い主翼や胴体を設計生産分担するのは三菱、川崎、富士という日本の機体メーカーである。日米共同開発したF-2戦闘機では三菱重工が複合材製主翼を担当した。これが現在のB787のCFRP主翼製作につながっている⁴。

5 環境適合性

環境適合性の観点から、前述の低燃費以外で代表的な課題、騒音低減と窒素酸化物NOx削減について述べる。

5.1 騒音低減

騒音基準は国際民間航空機構 (International Civil Aviation Organization,以下ICAO) が定め、各国の法律もほぼこれに準拠している。Chapter2, 3, 4と順次厳しくなり、最新のChapter4は2006年1月1日以降の新型式機に適用される。排気騒音は排気速度の8乗に比例する。初期のジェット機は排気速度が速いので、排気騒音はま

さに雷鳴であった。高バイパス・ファン・エンジンは、排気速度が遅く静かになったが、ファン騒音が問題になりだした。ファン騒音源の1つは、回転するファン・ブレードと固定ガイドベーンとの干渉である。そのため両者の軸方向間隔を長くしたりガイドベーンを軸方向に傾けたりしている。発生した音を減衰させる方法として、空気取入口及び排気ノズルの内壁気流通路を音響吸収材料で覆う⁷⁾。こうして、現在では初期のジェット機に比べて約20dB減少している²⁾。

5.2 有害排気

有害排気はICAOのCAEP6(航空環境保全委員会)が2008年に発効、従来のCAEP4よりさらにNOx 12%削減、と厳しくなった。新開発機はこれを満足させている。燃焼器は高い燃焼効率を達成した上で、信頼性や耐久性を満たし、有害排気の低減が要求される。NOxの削減には、燃焼器内での希薄燃焼により燃焼温度を下げることを基本に様々な研究が行われ⁷⁾、今後さらに厳しくなる規制に対応しつつある。

6 安全性

6.1 安全性全般

ボーイング社の統計によると、この10年間(1998～2007年)の世界の民間旅客機は1億8550万回出発し、死亡事故件数は90件、100万回出発あたり0.5件である。90件のうち機材に起因するとされたのは10件である⁸⁾。事故率は漸減しているが、今後も航空輸送量は増大するので絶対数は増える恐れがあり、更なる安全性向上が必要である。原因の大部分ではないにせよ、機材に関する要因は皆無にするのが設計者、技術者の責務である。次の事故例に伴う米国の対応は、航空安全への決意の表れと考える。

6.2 燃料タンクの防爆

1996年7月TWA800便B747は離陸後間もなく燃料タンク爆発により墜落した。原因は、タンク内が気化燃料で充満したこと、発火源は特定できなかったが電気配線間の擦れ、といわれて

いる。この事故調査は、各種の再現模擬実験を行うなど、空前の規模で行われ12年が経ち、FAA(米連邦航空局)は最終結論として2008年7月に新規則を発効した。要点は「燃料タンク内の難燃化または発火防止手段を講じること」である⁹⁾。現用航空機にも高額の費用が伴う改修を行う。三菱MRJは燃料タンク内空間部を不活性ガス窒素で満たす装置を装備する⁴⁾。これは民間旅客機として、B787に次いで2番目である。

7 おわりに

日本はCFRP技術で世界の先端を進んでいる。これを突破口にして、航空機産業が日本の将来の中核産業になることが期待されている。今、始まった国産機開発が是非とも成功することを願っている。本稿作成にあたりホンダエアクラフト社の藤野社長に貴重な助言をいただいた。ここに感謝申し上げます。

<参考文献>

- 1) M. Fujino : Design and Development of the HondaJet, Journal of Aircraft, Vol.42, No.3, pp.755-764, May-June, 2005
- 2) 経済産業調査会：飛翔 航空機産業公式ガイドブック、発行：著者と同じ、pp.60-62, 2008.7.10
- 3) G. Norris : Open Season, Aviation Week & Space Technology, pp.138-140, July 14, 2008
- 4) M.Mecham and J.Anselmo: Big Ambitions, Aviation Week & Space Technology, pp.68-73, March 17, 2008
- 5) Boeing Company : 787Dreamliner, Aviation Week & Space Technology, page s6, March 14, 2005
- 6) 京野：炭素繊維複合材料の航空機部材への展開、日本航空宇宙学会誌, Vol.54, No.635, pp.14-18, 2006.12
- 7) 鈴木：ジェットエンジンの構造と主要要素技術・環境適応技術, ENGINE TECHNOLOGY, 山海堂, pp.28-33, 2004.10
- 8) Boeing : Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents, <http://www.boeing.com/>, July, 2008
- 9) F. Fiorino : Closing the Book, Aviation Week & Space Technology, p.47, July 21, 2008

西脇 英彦 (にしわき ひでひこ)

技術士(航空・宇宙部門)

合同会社ITエアシステム 代表
立命館大学客員教授
e-mail : nishiwakihdhk@nifty.com

