2306 旅客機の環境適合性・安全性向上技術と JAXAにおける研究プロジェクト

JAXA's Aeronautical Research Project for Enhancing Environment-Friendliness and Safety of Civil Transport

正 中村俊哉 (APG/JAXA)

Toshiya NAKAMURA, Japan Aerospace Exploration Agency, 6-13-1 Osawa, Mitaka, Tokyo

The Aviation Program Group of Japan Aerospace Exploration Agency (APG/JAXA) is conducting research of advanced and fundamental aeronautical technologies based on social and industrial needs derived from diversifying technological requirements and increasing air transport in the future. The background includes the ongoing development of the first passenger jet aircraft produced in Japan after almost 50 years. The primary goal is to develop the cutting-edge technologies which can be applied to the development of competitive aircraft in the world market. To achieve this, JAXA launched a research project in 2003 which covers wide variety of aeronautical science and technologies. This article describes the outline of the project.

Key Words: Aeronautical Research, Environmental Friendliness, Noise, Fuel Consumption, Safety

1 緒言

現在、世界では民間旅客機として約 15,900 機のジェット機と約 3,700 機のターボプロップ機が運航されている (2008 年) が、今後、年平均 4.7% の輸送量の成長が見込まれ、20 年後にはそれぞれ約 33,500 機、約 2,400 機になると予測されている⁽¹⁾。このような民間航空交通量の大幅な増加に対し、航空機の環境適合性向上、とりわけ、騒音の低減と燃料消費量の低減が大きな課題となっている。

大都市近郊の空港では航空機の離着陸による騒音は以前から問題となっていたが、国際民間航空機関 (ICAO) では 2001 年、それ以前の騒音基準 Chapter 3 を強化した Chapter 4 が制定された。具体的には、2006 年 1 月以降に型式証明を申請した機体に対しては、新しい騒音基準 Chapter 4 を適用し、Chapter 3 の基準よりも 10EPNdB¹ 以上の騒音低減が求められている。

一方、航空機における燃費は 1960～2000 年にかけて 70% も改善されてきた⁽³⁾、また、国連 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) の 1999 年の報告によると、世界中で化石燃料の消費により排出される二酸化炭素のうち民間航空輸送による量は約 2.4% である。しかしながら、今後の航空輸送量の増加に伴う温室ガス排出量の増加、さらには化石燃料の枯渇問題や運航コストの低減要求を考慮すると、燃料消費量を更に低減する技術の研究開発は引き続き重要課題である。

欧米においては、こうした航空機の環境適合性向上を目的とする研究プロジェクトやプログラムが進められている^(4, 5)。わが国においては YS-11 以来半世紀近い空白ののち、2007 年度末に国産ジェット旅客機 MRJ (Mitsubishi Regional Jet, 70～90 席規模) の事業化が決定され、2012 年の初飛行、2014 年の市場投入を目指して開発が進められている。MRJ は同サイズの従来機に比べて約 5EPNdB の騒音低減、20% 以上もの燃費向上を実現するハイテク機である。このように環境適合性向上はわが国においても重要課題であり、2003 年度から経済産業省新エネルギー・産業技術総合開発機構によって「環境適応型高性能小型航空機研究開発」プロジェクトが実施さ

れた⁽⁶⁾。このプロジェクトは低燃費、低騒音、操縦容易性を実現する航空機関連技術の研究開発を行うものである。

安全性については、その継続的な向上の重要性は自明であるが、1960 年代から減少してきた事故率は 1980 年代に入ってから約 100 万フライトに 1～2 回程度で横ばいである⁽⁷⁾。この傾向が続いた場合、今後の輸送量の増大に伴って事故数は増加することになる。したがって、更に安全性を向上する技術の研究開発は急務である。

以上を背景として、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) では 2003 年、「国産旅客機高性能化技術研究開発事業」を立ち上げた。本プロジェクトでは海外を含む大学、航空機メーカーやエアラインとの共同研究を通じて、騒音低減、燃費向上、安全性向上に関するニーズの高い先端技術の実践的研究に取り組んでいる。すなわち、これまで培われてきた基礎的研究成果を実際の旅客機開発に適用できるレベルにまで高めることにより、わが国で開発する旅客機の国際競争力を高め、航空機産業の発展に寄与することを目的としている。本稿ではこの JAXA における旅客機技術研究プロジェクトについて概説する。

2 機体騒音低減技術

航空機の騒音はおおよそ、エンジンから発生する騒音 (ファン騒音とジェット騒音)、および、機体のまわりの空気の流れにより発生する機体騒音に分類される。特に、着陸形態では展開された高揚力装置 (フラップ、スラット) と降着装置が主要な騒音源であることが知られている。エンジン騒音については、近年バイパス比が大きくなり低騒音化が進んでおり、加えて着陸進入時にはエンジン出力を絞るために、着陸フェーズにおける機体騒音への対策は重要な課題になっている。

本プロジェクトでは着陸形態での機体騒音発生機構の解明や騒音を抑制する方法、騒音源探査技術の研究を進めている。着陸時では高揚力性能と安全性を損なうことなく騒音を低減する必要があるため、空力設計との関連が強い研究課題である。

実際、騒音発生メカニズムを理解するために LES (Large Eddy Simulation) による数値流体力学解析 (CFD, Computational Fluid Dynamics) を実施し、乱流構造と騒音発生との関連について詳細な分析を行っている。Fig.1 に CFD を用い

¹Equivalent Perceived Noise Level. 等価知覚騒音レベルと呼ばれる。航空機が 1 機通過していくときのやかましさを指標で音のスペクトル、強度、持続時間などが考慮される⁽²⁾。

Fig. 1: PSD Analysis by CFD

Fig. 2: Experimental Investigation of Airframe Noise

てスラットからの騒音スペクトルを再現した例を示すが、シミュレーション結果は実測データとよく一致している。また、これらの成果に基づき、高揚力装置の騒音を低減するデバイスの開発も進めている。

風洞試験においてマイクロフォンアレイを用いた音源探査を実施した例を Fig.2 に示す。この図から、前縁スラット部、翼およびフラップ端から強い騒音が発生していることが分かる。Fig.3 は実際にビジネスジェット機を用いて模擬着陸飛行における騒音を測定した結果であるが、降着装置 (Landing Gear) によって騒音が増加していることが分かる。今後はより詳細な騒音源探査技術を構築し、旅客機の飛行試験、型式認証等へ適用していく計画である。

Fig. 3: Noise from Jet Aircraft in Flight

Fig. 4: Analysis of Stall

Fig. 5: Application of PSP to Wind Tunnel Test

3 燃料消費量の削減

3.1 空力技術

この分野における研究の目的は、従来適用が困難であった複雑な実機形態に対して大規模な数値流体力学解析技術や先進的な光学計測技術を適用することを通じて、空力設計技術の高度化、風洞試験の効率化を進めることである。

本研究では特に高揚力装置の空力特性と解析技術の研究のためにエンジンマウント主翼半裁模型を製作して JAXA の 6.5m × 5.5m 低速風洞で試験を実施し、高揚力装置の空力特性のレイノルズ数依存性の解明、CFD 解析を活用した高揚力装置空力性能向上等に関する研究を行っている。高揚力装置 (フラップ) 展開時での失速の様子を CFD で解析した例を Fig.4 に示す。わが国では風洞設備の制約により実機のレイノルズ数での風洞試験は不可能であるので、風洞試験によって CFD 解析精度を確認し、実機の性能を正確に予測することが重要な課題となっている。

風洞試験における先進的な光学計測技術としては、粒子画像流速測定法 (PIV ; Particle Image Velocimetry)、感圧塗料 (PSP ; Pressure Sensitive Paint) に着目している。実機開発風洞試験へ適用することにより、現象の理解を深めるとともにデータ取得の効率を向上することが目的である。例えば、エンジンナセルと主翼の空力干渉を調べる風洞試験において PIV により速度場を可視化し、CFD 解析を併用することにより渦干渉の状態を把握することができた。そして、失速特性の改善などが可能であることを明らかにした。

Fig.5 は PSP によってスポイラーによる圧力分布の変化の様子を可視化した例である。図から分かる通り、この技術により、従来の圧力センサによる「点」での圧力計測から「面」

での圧力計測が可能になる。詳細かつ高精度な空力荷重分布データを効率的に得ることができるので、風洞試験データの生産性の向上、風洞試験の効率化、さらには開発費の軽減につながる技術として期待される。

3.2 低コスト複合材技術

航空機において軽量化は決定的に重要であるので、従来比強度の優れた高強度アルミニウム合金が主たる構造材料として用いられてきた。近年では複合材料、中でも比強度に特に優れた CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic) の航空機構造への適用が進められている。航空機への複合材料の適用は軍用機が先行していたが、最近では民間旅客機への利用も着実に進み、構造重量に占める複合材の割合は、超大型機 A380 では 30% 程度、B787 では 60% に近い。

複合材料の適用による軽量化は燃費向上に大きく貢献するが、さらに、複合材料は金属材料に比べて腐食もなく耐久性が高いため、整備性に優れている。すなわち、運用コストも含めたライフサイクルコストの低減にも有効である。

航空機への複合材料適用に対する大きな障害の一つは高いコストである。そのため、近年、VaRTM (Vacuum assisted Resin Transfer Molding) という低コスト複合材構造製造技術の開発が進められている。VaRTM 法はドライプリフォームと呼ばれる繊維を型にはめ、真空圧で樹脂を含浸させて成型する方法であり、従来製法でコスト高の要因となっていたブリプレグやオートクレーブを必要としない。

VaRTM 法は既に風車やボートなどへの適用実績があるが、世界的にも本格的に旅客機に適用した例は無く、型式証明発行の実績がないため、その安全性の実証方法 (適合性証明) を確立する必要がある。また、その基盤となる破壊のメカニズムや評価方法などに関する基礎的な研究が必要である。

航空機への適用が可能となる強度を実現するためには高い繊維含有率が必要であるが、樹脂含浸のムラが生じやすいなどの問題が付随するため、高い品質を安定的に実現するのは容易ではない。そのため、樹脂含浸過程などプロセスに関する研究、形状に起因する強度のばらつきを含めた強度評価法の研究等に総合的に取り組んでいる。すなわち、クーボンサイズから実大構造模型へと段階的に、実際に供試体を設計・製造し、試験で確認しながら進めている。Fig.6 に 6m 長の実大主翼構造模型を示す。この主翼模型の成型品質は高く、航空機への適用が可能な水準が達成されていると考えている。静的強度確認試験 (100%制限荷重負荷) は終了し、現在は疲労試験が進行中である。

最近では従来のブリプレグ成型と VaRTM を組み合わせた成型技術の研究を開始した。Fig. 7 は試作した胴体模型であるが、スキンはブリプレグ、フレームやストリングは VaRTM 法で成型している。今後は、より複雑な実機模擬モデルを作成し、複合材をより効果的に利用するために必要な損傷許容設計技術の研究に取り組む計画である。

一方、複合材構造を実機に用いた場合に必要となる整備技術の研究にも取り組んでおり、非破壊検査技術や修理技術の研究も進めている。こうした運用上の課題については、ニーズに適切に応えるため、運航会社との共同研究として実施している。

4 安全性向上技術

4.1 空力弾性

フラッタは特に遷音速領域でクリティカルになる。多くのジェット旅客機の巡航速度はマッハ 0.8 前後であるので、遷音速領域のフラッタ解析は重要である。遷音速領域でのフラッ

Fig. 6: Wing Box Demonstrator made with VaRTM

Fig. 7: Fuselage Demonstrator made with Hybrid Process

タはローカルな衝撃波の発生などによって複雑であり、従来の線形理論では解析不可能なため、安全上相応のマージンを見込んだ構造設計を行わざるを得ず、余分な構造重量を投入していた。JAXA のフラッタ解析技術は世界的にも高い水準にあり、遷音速領域でも精度良くフラッタ速度を推算することができるが、エンジンをマウントした翼のような複雑な 3 次元構造への適用は困難であった。本研究ではこうした高度な空力弾性解析技術を複雑な実機形態を扱う設計に適用するための研究を行っている。

4.2 非常着陸・着水および異物衝突

旅客機は安全な乗り物で、乗客の生命に係わる重大な事故の発生率は概ね 100 万フライトに 1~2 回である。その内の大半が離着陸時に起こっており、胴体着陸というような緊急の事態もある。さらに、日本のような海に囲まれた国では洋上飛行は不可避であるが、このような場合、旅客機に対する安全基準として、制御された状態で着水 (ディッチング) した場合に乗客が全員機外に避難する間機体が海に沈んでしまうことがないように設計することが義務づけられている。2009 年 1 月 15 日に発生した米国ハドソン川への不時着水は記憶に新しい。このため、胴体構造の設計には衝撃について精度の高い解析技術が求められる。Fig.8 に横浜国立大学大型海洋波浪水槽で実施した着水試験の様子と解析モデルを示す。解析は流体と構造が連成する複雑で大規模なものであるが、機体構造にかかる圧力、加速度などの時間履歴において高い推算精度が実現しており、胴体構造設計への適用が期待される。

一方、Fig.9 に鳥やタイヤ破片などの異物が機体構造に衝突したときの解析と試験の様子を示す。リベット接合された航空機特有の構造に対して高い解析精度が得られるモデル化手法の研究を行っている。

Fig. 8: Ditching Test and Analysis Model

Fig. 9: FE Analysis and Test of Fragment Strike

4.3 構造ヘルスマニタリング

構造物にセンサーを配置してリアルタイムに荷重や損傷をモニタリングする技術は、整備性と構造安全性を向上する技術として期待されている。本プロジェクトでは大量のひずみや温度データを容易に取得可能な光ファイバセンサに着目し、有限要素法を用いた逆解析技術と組み合わせることによって、連続分布荷重（空力荷重）にも対応可能な荷重同定技術、応力および温度分布再構成技術の開発を行っている。

Fig.10 は光ファイバひずみセンサを翼模型に装着した例であり、実際の風洞試験において模型の変形を計測することが可能であること、また、計測結果は別途3次元 CCD カメラを用いた計測値とよく一致することを示した。

5 結言

わが国では YS-11 以来約半世紀ぶりに国産旅客機の開発が進められている。開発の成功と今後の航空技術、航空機産業の発展において、環境適合性を高める技術は中心的な役割を果たすものと考えられる。本稿で紹介した JAXA の航空技術研究開発は諸言で述べたように、旅客機の環境適合性と安全性の向上にフォーカスし、これまで培われてきた基礎研究成果を実機設計開発へ適用可能なレベルに高めることを目標とする実践的な研究プロジェクトであることを特徴としている。本プロジェクトがわが国の航空機産業の発展に少しでも貢献

Fig. 10: Wind Tunnel Test using Fiber Optical Sensor

できれば幸いである。

なお、本プロジェクトではヒューマンファクターを考慮した操縦システムなどの飛行安全性を高める技術、また、革新的な将来旅客機概念に関する研究も行っているが、紙面の都合上割愛した。

参考文献

- (1) 平成 20 年度民間輸送機に関する調査研究, 財団法人日本航空機開発協会, (2009) .
- (2) A.D. Dgac, "EPNdB Metric", Noise Certification Workshop, Nov., (2006)
- (3) P.M. Peeters, J. Middel, A. Hoolhorst, "Fuel Efficiency of Commercial Aircraft, An Overview of Historical and Future Trends" NLR-CR-2005-669, (2005).
- (4) "Subsonic Fixed Wing Project", NASA Fundamental Aeronautics Program 3rd Annual Technical Conference, Sept, (2009)
- (5) "Aeronautics and Air Transport Research", 7th Framework Programme 2007-2013 Project Synopses Vol.1, European Commission, (2010).
- (6) "未来へ広がる産業技術とエネルギー 成果レポート最前線 2008", 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構, (2008) 7-8.
- (7) "Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents (1959-2009)", Boeing Commercial Airplanes, July, (2010).