

シンプル低騒音化技術

Simple Low Noise Technology

大石 勉 航空宇宙事業本部技術開発センター要素技術部 課長
大庭 芳 則 航空宇宙事業本部技術開発センター要素技術部 主査
小河原 和 人 航空宇宙事業本部技術開発センター要素技術部
出田 武 臣 技術開発本部基盤技術研究所 熱・流体研究部

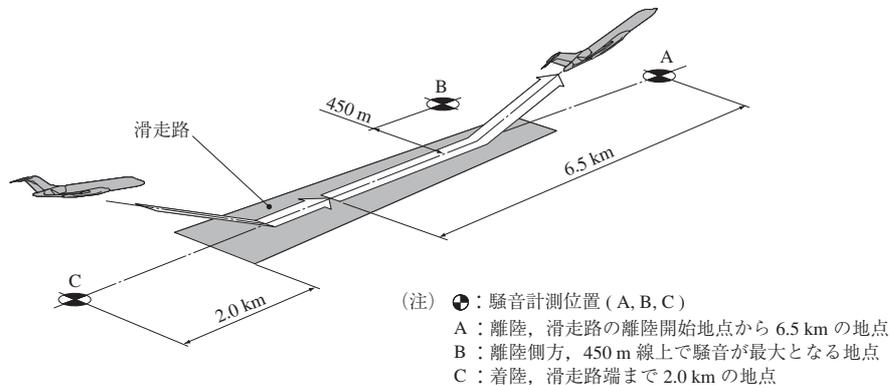
エンジンの主要な音源となるファン騒音と排気ジェット騒音の低減技術の研究開発を行った。ファン騒音の低減では、統合 OGV（出口案内静翼とフレーム・ストラットを統合した構造）の枚数、統合 OGV と動翼の軸間隔を適正化しつつ、それぞれの翼にスイープ設計も適用することによって、効率を低下させることなく低騒音化を図る技術に取り組んだ。ジェット騒音の低減では、ノッチノズルの適用による低騒音化技術に取り組んだ。CFD 解析やリグ試験を通じて、ファン騒音で 3.8 dB、ジェット騒音では 2.2 dB の低騒音化を図ることができた。

The objectives of the ECO engine project are improvement of engine system integration capability and establishment of advanced technologies required for the next-generation of small aircraft engines that are environmentally friendly and economically viable. Technologies for low noise engines in the ECO engine project are described. The aircraft noise reduction is targeted to achieve the new chapter 4 standard with 20 dB cumulative margin in ICAO Annex 16. Research and development of low noise technology was conducted for fan noise reduction and exhaust jet noise reduction, which are the major noise sources of jet engines. In the fan noise research targeting 3 dB reduction, a swept blade and integrated outlet guide vanes were investigated under weight limit and structural restrictions. In the jet noise research targeting 2 dB reduction, the notched nozzle as a new concept was investigated for simple nozzle design. 3.8 dB reduction for fan noise and 2.2 dB reduction for jet noise were demonstrated through several model rig tests.

1. 緒 言

現行の主要な民間航空機の騒音基準には、ICAO（International Civil Aviation Organization：国際民間航空機関）によって 1976 年に制定された ICAO Annex 16 Volume I Chapter 3（以下、Chapter 3 と呼ぶ）が適用されている。Chapter 3 には第 1 図に示す離陸（A）、離陸側方（B）、着陸（C）の 3 か所の評価点があり、各所において規制値が航空機の最大離陸重量の関数として与えられる。

2001 年に基準の強化が決定され Chapter 4 が制定されたため、2006 年 1 月以降に型式証明を申請の新型機には、本制定が適用されている。Chapter 4 では、第 1 図に示す 3 か所におけるそれぞれの規制値としては Chapter 3 が継承されており、これを満たすうえで、各所における騒音マージン（航空機の騒音値と Chapter 3 規制値との差）に関する評価が加わった。具体的には、① 3 か所の騒音マージンの累積が 10 EPNdB（Effective Perceived Noise in decibels：実効感覚騒音）以上であること② 少なくとも 2 か所のマージンの和が 2 EPNdB 以上になるこ



第 1 図 ICAO Annex16 Volume I Chapter 3 規制での騒音計測位置（3 か所）

Fig. 1 Noise measurement locations (3 points) for ICAO Annex16 Volume I Chapter 3 regulation

と、の要求である。例えば、Chapter 3 規制値に対する各所のマージンが、離陸直下で 5 EPNdB、離陸側方で 4 EPNdB、着陸で 3 EPNdB であれば、3 か所の累積マージンは 12 EPNdB となり、Chapter 4 を満たすという評価となる。なお EPNdB とは、人間の耳への音の聞こえ方の補正と、航空機が頭上を通過する際に不快な音が聞こえている時間の補正をした航空機騒音証明で用いられる音の単位のことである。

民間航空機騒音に関する環境適応性要求は厳しくなる方向で、将来の航空機には Chapter 4 に対し十分なマージンをもつよう、低騒音化技術を組み込んで開発していく必要がある。

2. 研究開発の目標

環境適応型小型航空機用エンジン（以下、小型エコエンジンと呼ぶ）研究開発のプロジェクト目標は、小型エコエンジンを搭載した航空機の騒音が、Chapter 4 に対し 3 か所の累積で 20 EPNdB のマージンをもつことである。

第 2 図に ICAO 規制値に対するエコエンジンプロジェクトの目標値と民間航空機の累積騒音レベルを Chapter 4 規制値とともに示す。横軸は航空機の最大離陸重量、縦軸は Chapter 3 規制の 3 か所における騒音レベルの累積値として表している。同クラスの離陸重量の航空機（CRJ-200, ERJ145, ERJ135）は、第 2 図から分かるように現在は、Chapter 4 に対し 12 ~ 18 EPNdB 程度のマージンで就航している。そのなかで最も静かな航空機は CRJ-200 で

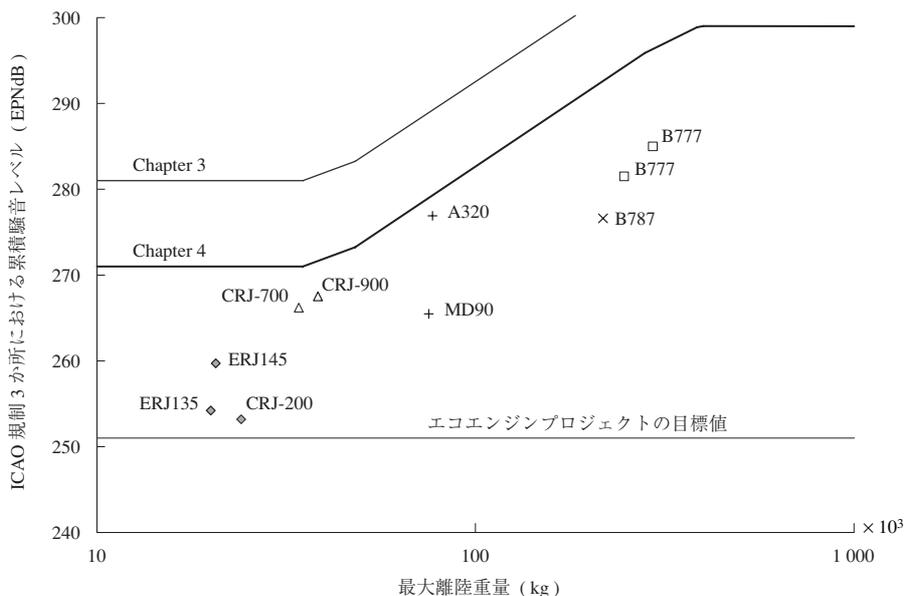
Chapter 4 に対し 17.8 EPNdB のマージンをもつ。この CRJ-200 のエンジンには CF34-3B1（ゼネラル・エレクトリック社製：アメリカ）が搭載されている。

本研究では、この CF34-3B1 エンジンの技術レベルを基準として、軽量化と低コスト化を考慮しつつ、2.2 EPNdB 以上の低騒音化を図り Chapter 4 に対し 20 EPNdB のマージンを達成する技術を取得することを目的とした。小型エコエンジンの主要な騒音源はファン騒音とジェット騒音であるため、これらの騒音の低減化が小型エコエンジン全体の低騒音化につながる。

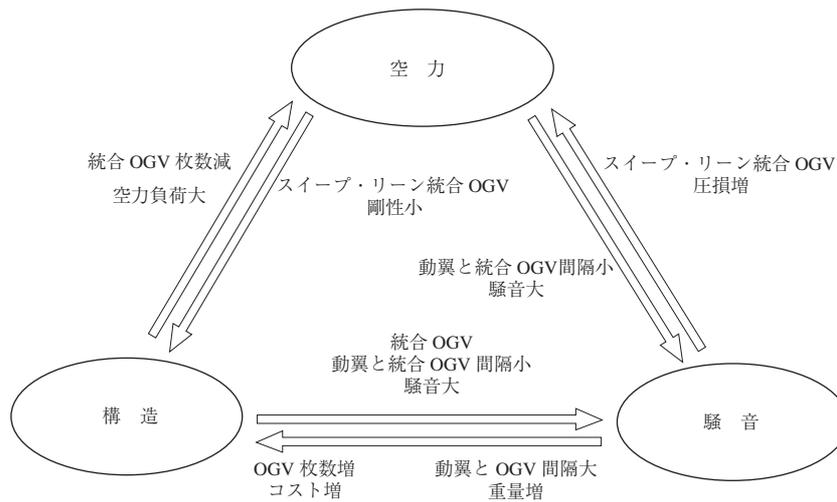
そこで、本研究ではファン騒音とジェット騒音の低減技術の開発を行った。小型エコエンジンで 2.2 EPNdB 以上の低減化を図るうえで必要十分な各要素の騒音低減量として、ファン騒音で 3 EPNdB、ジェット騒音で 2 EPNdB の目標値を設定した。

3. ファン騒音低減技術

第 3 図にファン部の構造（低コスト化と軽量化）と低騒音化の両立を図るうえでの要求と技術課題を示す。一般に、エンジンのファン部は動翼、出口案内静翼およびフレーム・ストラットから構成されている。これに対し、小型エコエンジンでは出口案内静翼とフレーム・ストラットを統合した構造（以下、統合 OGV と呼ぶ）を採用し、部品点数を削減するとともに動翼と統合 OGV の軸間隔を短縮することが望まれる。また、空力性能上からも軸間隔を短縮することが望まれる。



第 2 図 ICAO 規制値に対するエコエンジンプロジェクトの目標値と民間航空機の累積騒音レベル
 Fig. 2 Target of research and development and cumulative noise level under ICAO Annex16 Volume I Chapter 3 regulation



第3図 構造（低コスト化と軽量化）と低騒音化の両立を図るうえでの要求と技術課題
 Fig. 3 Requirements and technical issues to achieve low noise maintaining low cost and low weight

一方、低騒音化には、統合 OGV の枚数は極力多く、軸間隔は極力長い方が良いので、構造・空力面からの要求を優先すると騒音レベルを増大させてしまう。そのため、ファン動翼や統合 OGV そのものの低騒音化設計も重要となる。統合 OGV の場合は、半径方向（スweep）と周方向（リーン）に傾斜させるスweep・リーン設計の適用がある。しかし、これは強度部材としての剛性を維持できなくなる可能性があり、性能上の損失増加を伴う可能性がある。これら構造要求と低騒音化要求をトレード・オフしながら、ファン低騒音化目標を達成するインテグレーション技術の開発を行った。

第4図にファン騒音試験機（ファン入口側ダクトを取り外した状態）を示す。本試験機で、① ファン動翼の形状② 統合 OGV 枚数③ ファン動翼と統合 OGV の軸間隔④ スweep・リーン統合 OGV, などの違いによる騒音低減効果を確認する縮小モデルによる試験を、当社瑞穂工場の無響騒音試験場で実施した。

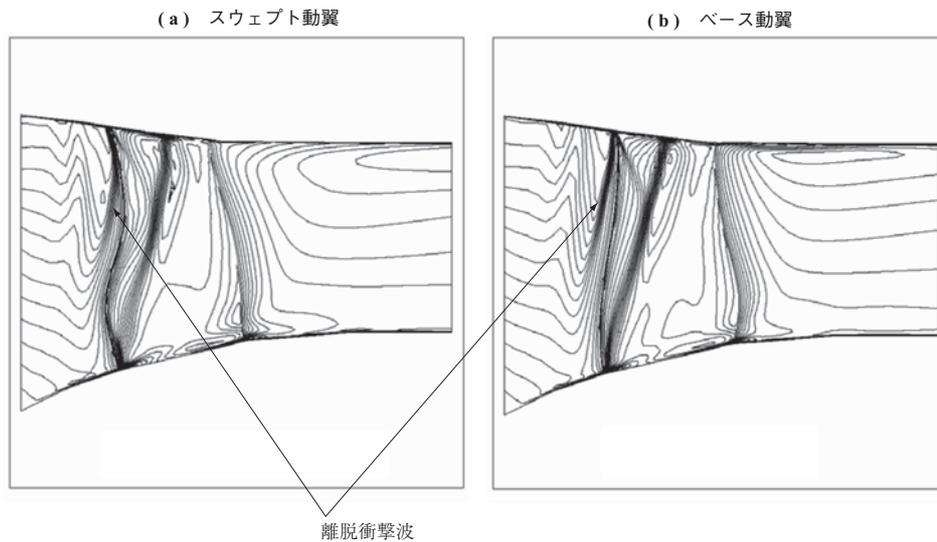
はじめに、ファン動翼の低騒音化について主に述べる。第4図のファン動翼は、高い空力性能と低騒音化を併せもつよう CFD（Computational Fluid Dynamics：計算流体力学）を活用して設計したもので、ここではスweepト動翼と呼ぶ。比較の対象としてベース動翼（基準とした CF34-3B1 などに採用されている形状）も設計した。第5図にスweepト動翼とベース動翼の前縁付近での離脱衝撃波の比較（マッハ数分布）を示す。スweepト動翼（第5図-(a)）は低騒音化のためベース動翼（-(b)）より翼先端側を前方に傾斜させた形状としている。これに



第4図 ファン騒音試験機
 Fig. 4 Fan noise test rig

よって、第5図-(a)に示すように動翼前縁に生じる離脱衝撃波を弱めることができ、高回転域でのファン騒音の低減が期待できた。

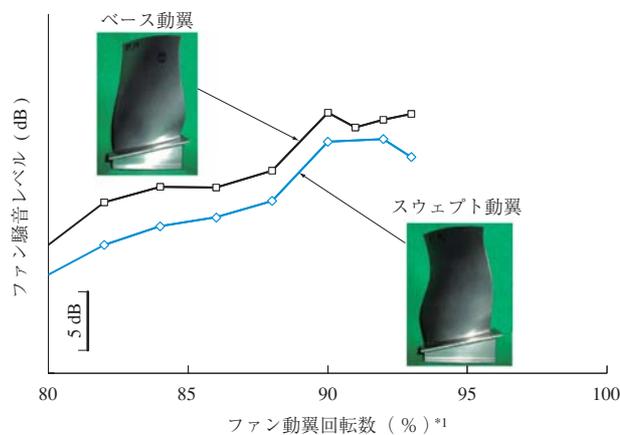
高回転域（第1図の離陸側方の箇所(B)）でのファン作動域）でのファン騒音は、バズソー音と呼ばれる成分が支配的で、これは動翼前縁に生じる離脱衝撃波に起因し



第 5 図 スウェプト動翼とベース動翼の前縁付近での離脱衝撃波の比較 (マッハ数分布)
 Fig. 5 Comparison of bow shock at rotor leading edge between swept rotor blade and base rotor blade (Mach contour)

で発生するものである。すなわち、この衝撃波を弱めることでバズソー音の低減を図ることが可能である。スウェプト動翼による低騒音化効果を確認するため、スウェプト動翼およびベース動翼をファン騒音試験機に組み込み、モデル試験を実施した。スウェプト動翼とベース動翼によるファン騒音の比較を第 6 図に示す。横軸はファン動翼回転数、縦軸は騒音レベルを示す。これらの結果に基づく評価から、スウェプト動翼では発生音で 1.3 EPNdB の低騒音化が図られていることを確認できた。

第 7 図に統合 OGV による低騒音化効果も踏まえた、ファン騒音の低減目標値に対する累積騒音評価結果を示す。横軸は動翼後縁と統合 OGV 前縁の軸間隔と動翼軸コード長の比、縦軸は騒音低減効果の累積値と内訳を



(注) *1: 設計回転数に対する割合

第 6 図 スウェプト動翼とベース動翼によるファン騒音の比較
 Fig. 6 Comparison of fan noise between swept rotor blade and base rotor blade

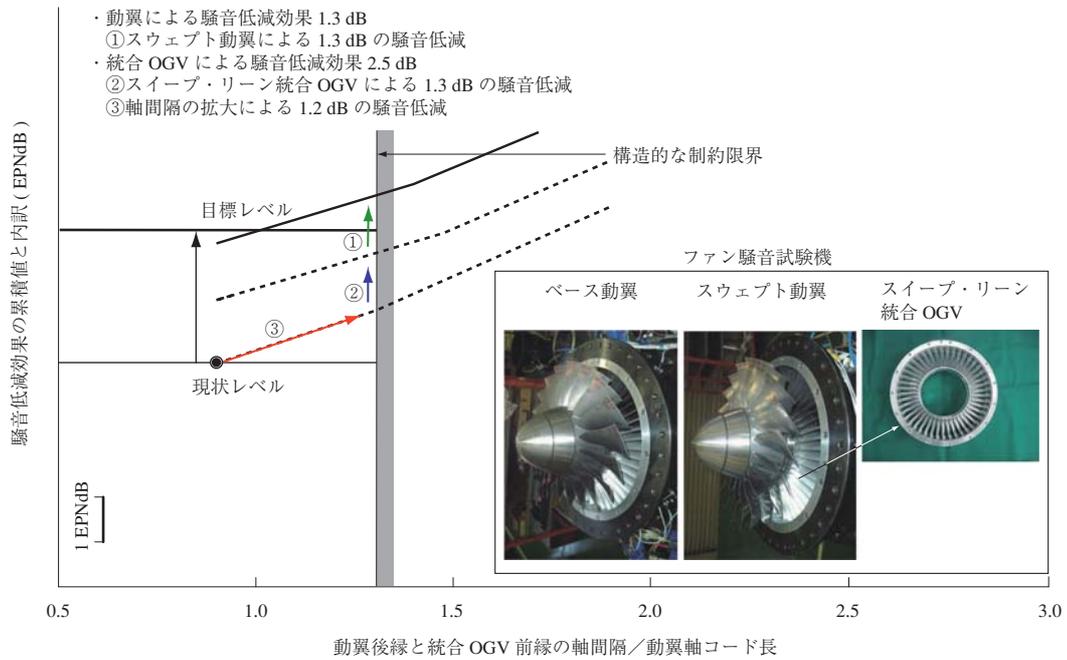
EPNdB で示す。スウェプト動翼による騒音低減は第 1 図の離陸側方での効果であるのに対し、統合 OGV による騒音低減 2.5 EPNdB は第 1 図の着陸と離陸直下での効果の和である。2.5 EPNdB の内訳として 1.3 EPNdB がスweep・リーク統合 OGV によるもの、1.2 EPNdB が動翼と静翼の軸間隔の適正化によるものである。3 か所の累積では 3.8 EPNdB のファン低騒音化が構造要求としての制約内で達成された。

4. ジェット騒音低減技術

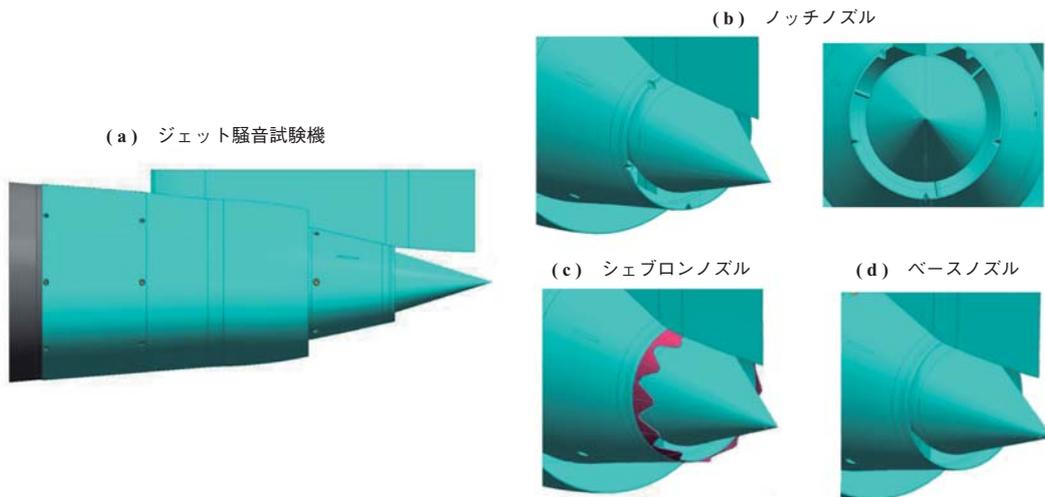
ジェット騒音の低減には、エンジン排気ノズル内部上流に混合促進デバイスを装着し、タービンからの高温高压ガスとファンからの圧縮空気を排気ノズル内で混合させ、排気ジェットの最大速度を抑える方法が有効とされている。しかし、構造が複雑になるため低コスト化と軽量化の両立が難しい。

近年、排気ノズルの出口形状をギザギザにしてジェットの混合を促進させるシェブロンノズルが商業運航されるようになったが、巡航時の推力低下がまだ課題として残されている。本研究では、シェブロンノズルに対し、さらに排気ノズル出口形状のシンプル化を図り、推力を低下させることなくジェット騒音を低減する技術を開発した。

第 8 図 - (a) にジェット騒音試験機、第 8 図 (b) ~ (d) に独自に低騒音化設計したノッチノズル、比較の対象とするシェブロンノズルおよびベースノズルの形状を示す。ノッチノズルは、周方向 5 か所に三角形の小型ミキサを配置している。シェブロンノズルは周方向 12 か所に



第 7 図 ファン騒音の低減目標値に対する累積騒音評価
 Fig. 7 Evaluation toward to the fan noise reduction target



第 8 図 ジェット騒音試験機とノッチノズル、シェブロンノズル、ベースノズル
 Fig. 8 Jet noise test rig with notched nozzle, chevron nozzle and base nozzle

三角形の切り欠きがある。これらノズルによる排気ジェットの混合促進効果を CFD 解析した結果、ノッチノズルは非常にシンプルで小型であるにもかかわらず、シェブロンノズルとほぼ同等の混合促進が得られることが分かった。また、シェブロンノズルはベース形態に対し推力低下がみられたが、ノッチノズルでは推力低下はみられなかった。なお、上述の CFD 解析は JAXA（独立行政法人宇宙航空研究開発機構）と当社（エコエンジンプロジェクト）との共同研究として実施されたもので、詳細は参考文献(1)による。

次に、第 9 図に示すイギリスの無響風洞騒音試験場（Noise Test Facility of QinetiQ：NTF⁽²⁾）でモデル試験を実施した。ジェット騒音は飛行による影響を受けるので、離陸および着陸時の飛行速度を模擬できる風洞において騒音試験を実施する必要がある。NTF では、直径 1.8 m の風洞に小型エコエンジンのコアノズル部およびバイパスノズル部を模擬した約 1/5 のスケールのジェット騒音試験機を組み込み、70～80 m/s の飛行速度を模擬することができる。また小型エコエンジンの排気ノズル上流温度や圧力も模擬することができる。ノッチノズルを取り付けた

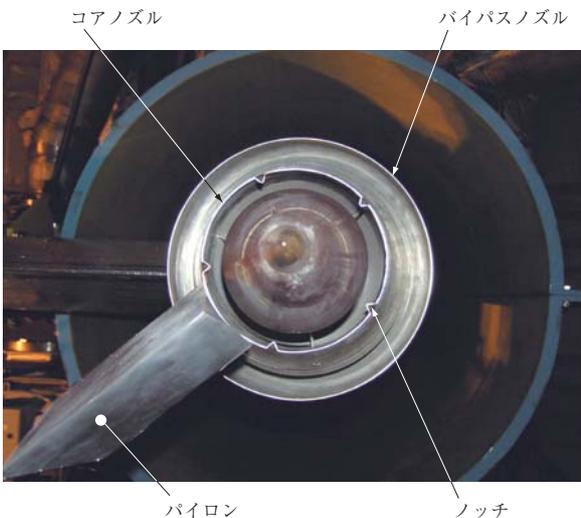


第 9 図 QinetiQ の無響風洞騒音試験場
Fig. 9 Noise test facility of QinetiQ as anechoic wind tunnel

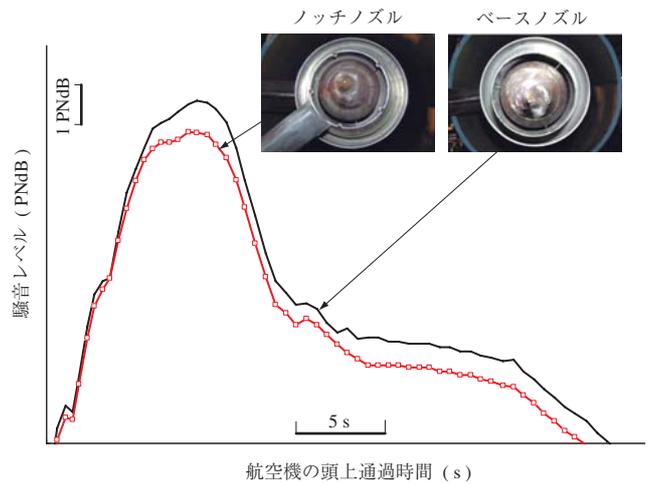
ジェット騒音試験機をノズル後方側から撮影した写真を第 10 図に示す。

ジェット騒音は、ノズルを中心とする半径 12 m の円周上に配置されたマイクロホンによって計測した。計測したジェット騒音について ICAO 規定に従い Chapter 4 騒音規制に対する評価を行った。第 11 図に離陸側方におけるノッチノズルとベースノズルの騒音特性の比較例を示す。横軸は航空機が頭上を通過する時間 (s)、縦軸は騒音レベル (PNdB: Perceive Noise in decibels) である。第 11 図を基に EPNdB でノッチノズルとシェブロンノズルによる騒音低減効果を評価した結果を第 12 図に示す。

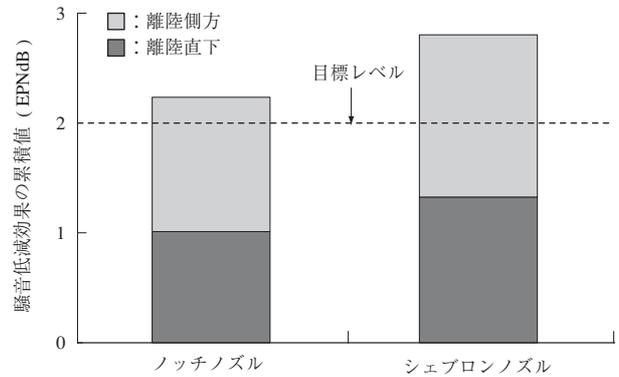
ノッチノズルは、離陸側方で 1.2 EPNdB、離陸直下で 1 EPNdB の低減効果が得られ、離陸時の累積では 2.2 EPNdB の結果となった。すなわち 2 EPNdB 低減目標



第 10 図 ジェット騒音試験機に搭載のノッチノズル
Fig. 10 Notched nozzle installed to the jet noise test rig



第 11 図 離陸側方におけるノッチノズルとベースノズルの騒音特性の比較例
Fig. 11 Comparison of sideline noise during take-off between notched nozzle and base nozzle



第 12 図 ノッチノズルとシェブロンノズルによる騒音低減効果
Fig. 12 Noise reduction of notched nozzle and chevron nozzle

の達成を確認できた。なお、着陸時のジェット騒音低減効果はエンジン全体騒音に影響しないため加算していない。第 12 図から分かるようにシェブロンノズルによる騒音低減効果は離陸時の累積で 2.8 EPNdB で、ノッチノズルのシェブロンノズルに対する騒音低減効果は若干劣る結果となった。しかし、推力性能の面では優位であることを CFD 解析によって予測できており、本研究によるノッチノズルの有効性が確かめられた。

5. 結 言

環境適応型小型航空機用エンジンの低騒音化技術の開発に取り組んだ。ファン騒音の低減として、統合 OGV を採用し翼枚数を極力削減して部品点数を削減するとともに、動翼と統合 OGV の軸間隔を極力短縮することで、低コスト化と軽量化を図り、同時にスウェプト動翼と統合 OGV

の干渉を考慮して効率を低下させることなくファン騒音の低減を図る技術を開発した。ジェット騒音の低減として、シェブロンノズルに対しシンプル化を図ったうえで、推力を低下させることなく騒音を低減できるノッチノズルを開発した。

試験結果から、それぞれの騒音低減目標値を達成でき、小型エコエンジンがプロジェクト目標の Chapter 4 から -20 EPNdB を満足するめどを得ることができた。

— 謝 辞 —

本研究は、経済産業省の民間航空機基盤技術プログラムによる「環境適応型小型航空機用エンジン研究開発」の一環として、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) から助成を受けて実施したものである。本研究の実施に当たり、ご指導とご協力をいただいた

NEDO および関係各位のご厚誼に対し、深く感謝の意を表します。

また、本研究の実施に当たり技術開発本部総合開発センター船舶海洋機器開発部、基盤技術研究所応用理学研究部および航空宇宙事業本部技術開発センターの関係各位には多大な協力を得ました。ここに記し、深く感謝します。

参 考 文 献

- (1) Y. Oba et al. : Low Noise Research and Development In Japanese Environmentally Compatible Engine for Small Aircraft Project ISABE2007-1123 (2007.9)
- (2) R. A. Pinker : The Enhancement of the QinetiQ Noise Test Facility for Larger-scale Exhaust Systems AIAA2004-3019 (2004.5)