

解 説

騒音発生源対策と航空機の技術改良 *

中 澤 宗 康 **

1. はじめに

現在の日本では多数の旅客機が飛び交い、その数は1日数千機にもなるが、航空機は速さと移動自由度といった利便性の反面、空港周辺には騒音や大気といった環境面の問題を引き起こしてきた。特に1960年代にジェット旅客機が登場すると、騒音による公害が社会問題化し、これに対応すべく、行政や航空会社といった航空業界全体が改善に取り組んできた。この取り組みは現在も続いており、着実に空港周辺の騒音は低減し続けている。今回は、そういった騒音低減の取り組みの根幹となる騒音発生源対策に焦点をあてて、歴史的な経緯について紐解いていく。

2. 発生源対策とバランスドアプローチ

空港周辺における航空機騒音の問題は日本だけの問題ではなく、海外でも問題となっており、各国でそれぞれ対処を行っている。しかし航空機分野の特徴として、一国内だけでは対処できない場合、つまり航空機が他国に乗り入れる国際線の存在を考える必要があり、規制をするにしても国家間の垣根を超える必要性が出る場合もある。このため、民間航空全般に対する国際的な政策を決定する機関として、国際民間航空機関 (International Civil Aviation Organization: ICAO) がある。国際連合の専門機関の一つで、1944年の国際民間航空条約 (通称、シカゴ条約) に基づき設立され、日本も加盟している。

このICAOでは航空機騒音対策を行うため

の全体の指針として、バランスドアプローチという考え方を2001年に提唱し、4つの騒音対策の手法を整理している。

その手法とは

1. 騒音発生源対策
2. 土地利用計画と管理
3. 騒音軽減運航方式
4. 運航規制

であり、これらを組み合わせて、空港周辺の騒音対策を検討することを提案している。騒音発生源対策とはメーカーによる航空機自体の改良のこと、土地利用計画と管理は行政の都市計画や建築規制等のこと、運航方式は空港周辺の飛行経路や高度指定等のこと、運航規制は航空会社に課される夜間規制等のことである。言い換えると、航空機メーカー、行政、空港管理者、航空会社の4者がそれぞれ負担を分け合って騒音対策を行っていくという指針というわけである。

これらのうち3つは本稿のテーマとしないが、騒音発生源対策に関しては手間も時間もかけながらではあるが、着実に効果をあげてきており、現在の航空機騒音の低減に大きく寄与している。大手の航空機メーカーやエンジンメーカーは飛行性能向上に関する技術開発は当然行ってきたが、最近は特に環境性能向上についても焦点を当てて技術開発を進めている。環境性能の実際は、排出物削減のための燃費向上で航空会社の利益をもたらし、騒音削減で乗客への機内環境の快適性をもたらし、というのが直接的な関係ではあるが、

* Brief review of aviation technology development and reduction at noise source

** 航空環境研究センター 副主任研究員

いずれにせよ空港周辺の騒音対策の面からも現在の開発は好ましい傾向であるといえる。

3. 航空機の騒音発生源と構造

次に、基本的な航空機の騒音の発生源とその構造について説明する。

航空機騒音をその状態により分類すると、空を飛んでいたり、地上に滞在していたりといった機体の状態に応じて、飛行騒音、地上走行騒音、駐機騒音といったように区分できる。この中でもっと騒音が大きいのが飛行騒音であるが、その最も大きな発生源はエンジン騒音である。このエンジン騒音をいかに抑えるかということが、発生源対策の主な検討事項となっている。エンジン以外で騒音に寄与するものとしては、地上駐機中に電力等を得るための補助動力 (APU: Auxiliary Power Unit) というジェットエンジンと似た構造の小型のガスタービンエンジンがあげられるが、これはエンジンに比べると騒音も小さい。

この飛行騒音を分解して、騒音がどこから発生するかという構成を、図に示す。図1は離陸時と図2は着陸時において、航空機のどのコンポーネントがどの程度騒音を生じるかということを概算したものである。離陸時の騒音では、離陸上昇でメインエンジンの出力が大きいいため、ほとんどエンジンからの騒音である。これを更に分解すると、ジェットミキシング音、ファン音の騒音が大きいことがわかる。ジェットミキシング音は後方の噴流の騒音、ファン音は前面の空気取り込みファンの騒音で、前後開口部の音が非常に寄与しており、実際に飛行機の前後方向で騒音を測ると大きい。一方の着陸時の騒音では、降下時のエンジンの出力が下がるため、相対的に機体の空気抵抗による騒音・風切り音が大きくなり、エンジン騒音とともに寄与する。機体の騒音を分解すると、着陸脚の影響が大きいことがわかる。

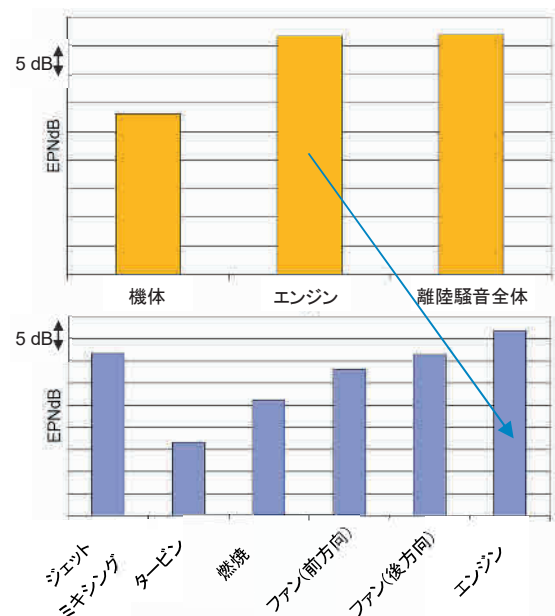


図1 離陸時の機体直下の部位別騒音 1)
(上段: エンジン騒音 - 機体騒音、下段: エンジン騒音の内訳)

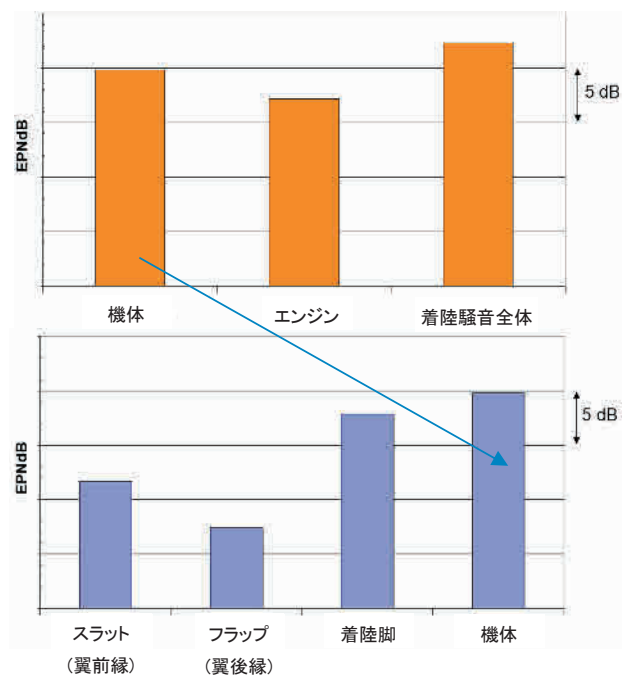


図2 着陸時の機体直下の部位別騒音 1)
(上段: エンジン騒音 - 機体騒音、下段: 機体騒音の内訳)

ジェットエンジンの構造

では、騒音の大きな発生源としてのジェットエンジンの構造と、その技術改良について見てみよう。

ジェットエンジンでは基本的に、前方から取り込んだ空気を、燃料と混合した上で点火し、後方より吹き出して前進する推力を生み出す。航空機用のエンジンは前方のファンと圧縮機で空気を取り込み圧縮し、燃焼後に吹き出すエネルギーの一部で後方タービンを回して再び前方のファンと圧縮機を回す駆動力に使う。このようなループにより、燃焼を続ける限り連続的に稼働するようになっている。

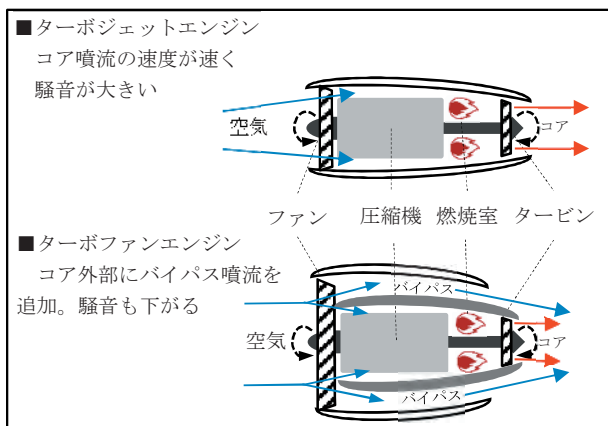


図3 ターボジェットエンジン（上）とターボファンエンジン（下）の簡略断面図

ジェットエンジンの黎明期に使用されていたのは、ターボジェットエンジンという種類のエンジンである。シンプルな構造で軽量化もできるが、民間旅客機の飛行速度を考えた場合、コア噴流の流速が早すぎて無駄が多く、推力も余分に必要で、結果として騒音も大きくなる。騒音は空気の流速の8乗に比例して大きくなるため（例えば速度が2倍になった場合、騒音のエネルギーは256倍、24dBも大きい）、現在の民間旅客機ではここを改善したターボファンエンジンが使用されている。

ターボファンエンジンの特徴は、前面ファンから取り込んだ空気を、燃焼用に取り込むコア噴流と、プロペラのようにそのまま後ろ

へ押し流して推進力にするバイパス噴流の2つに分割する点である。ケースのついたプロペラエンジンのような構造ではあるが、速度域などの違いによりブレードの枚数や形状などが全く違う。この方式はコア噴流の推進力の一部をバイパス噴流の駆動力に分けたのち、後部で混合することで全体の流速を落としつつ、バイパス噴流に多くの空気を流して推力として使用することができる。単純にいうと、エンジンの推進力＝空気量×噴流速度なのであるが、騒音に影響する噴流速度を抑えても、騒音に影響しにくい空気量を増やせば十分な推進力を得ることができるので、結果として騒音は劇的に減り、なおかつ推進効率も高めることができる。



図4 ターボファンエンジン PW4090 の内部。
バイパス比が高く、前面ファンが大きい

とはいえ、機構が複雑になって重くなったり、エンジン口径が大きくなって地面を擦るリスクが出たりするデメリットはある。しかしそれを上回るメリットにより、現在の民間旅客機はバイパス噴流をできるだけ大きくするように改善を続けている。指標としてコア噴流の空気量に対してバイパス噴流の空気量がどれくらい多いかを表すバイパス比（＝バイパス噴流÷コア噴流）というものがあり、今の所はバイパス比が高いほど騒音が低くなっている。これまではバイパス比を10近くまで改良してきたが、それも限度に近づいたため、新世代機ではギヤードターボファンエンジンなどの追加機構を設けてさらにバイパス比の改善を続けている。

4. ICAO 騒音証明制度

国際機関 ICAO では、発生源対策として民間旅客機の騒音に対して国際的な統一基準を設けている。1971 年に ICAO 総会でシカゴ条約 第 16 付属書 (ICAO Annex 16) が採択され、その第 1 巻第 2 章 (Volume1, Chapter2) に民間用の亜音速ジェット機の騒音証明制度を規定した。この中ではいわゆる民間用の旅客ジェット機が下回るべき騒音の基準値を定義しており、騒音の大きい機種に対する事実上の制約をかけている。亜音速というのは音速よりやや低い速度 (マッハ 0.8 程度) を指し、現在のほとんどの旅客ジェット機が含まれる。これまで、Chapter-2(1971 年採択)、Chapter-3(1977 年採択)、Chapter-4(2001 年採択)、Chapter-14(2013 年採択) と 4 段階の規制基準が採択され、段階的に騒音量が小さくなるよう、つまりメーカーおよび航空会社に厳しい基準になるよう変更がなされてきている。なお名称の由来は基準を記載してある Annex16 の章番号である。他にも Annex 16 には、ヘリコプター、プロペラ機、超音速ジェット機等の似たような基準もあるが、ここでは詳細な説明は割愛する。さらに言うと、民間航空機のみが対象で、軍用航空機は対象外である。

これらの騒音証明基準は全世界で強制的に適用されるものではなく、採用するかどうかは各国政府に委ねられている。多くの国もそうだが、日本の場合は基準をそのまま採用している。具体的には、Chapter2 に関しては、Chapter2 以前しか対応しない機種、つまり Chapter3 基準騒音より大きい音を出す機体の運航を 2002 年 4 月以降に禁止している。なお一律の運航禁止がなされるのは Chapter2 までで、空港特有の規制を別にすれば、Chapter3 基準以降の機体は運航できる。Chapter3 基準については、1978 年 1 月以降に型式証明を受ける機体は適合しなければならない。同様に Chapter4 基準については、

2006 年 1 月以降に型式証明を受ける機体は適合しなければならない。同様に Chapter14 基準については、2017 年 1 月以降に型式証明を受ける機体は適合しなければならない。このように現在の規制は、型式証明を受ける機体、ほとんどの場合新規製造機に対して適用され、経年劣化等による機材更新で徐々に騒音が低減していく仕組みとなっている。

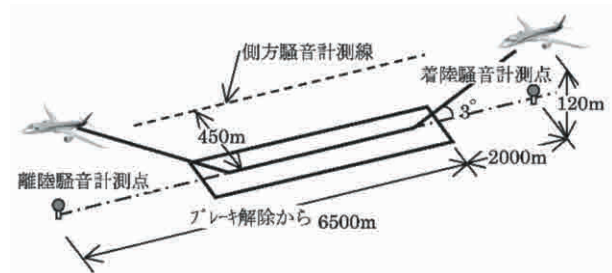


図5 騒音証明制度の飛行方法と測定地点2)

騒音が基準以下であることを確認するためには実際に航空機を飛行させて地上で騒音を測定する必要があるが、その飛行方法と騒音測定位置についても騒音証明制度では定めている。飛行方法は原則的に直線進入直線上昇である。測定地点は3地点で測定をせねばならず、側方測定点における離陸騒音、進入測定点における着陸騒音、離陸直下における離陸騒音、の3つの指定された位置で測定する。その結果から、EPNL(Effective Perceived Noise Level) という騒音指数を算出して、3地点それぞれ、さらに複数地点合計の騒音値で、基準騒音値を下回ることが求められる。主要な旅客用機種について、過去から現在までの騒音値の経年推移をみていくと、図6のようになる。これを見る限り騒音は着実に低減していることがわかる。1960年代と現在とを比較すると、EPNL値で20dBも低減しており、航空機の運航数に換算すると1/100相当に減ったのと同等の成果をあげている。今後も騒音証明制度がなくならない限りは、1機あたりの航空機騒音が着実に減っていくことが期待される。

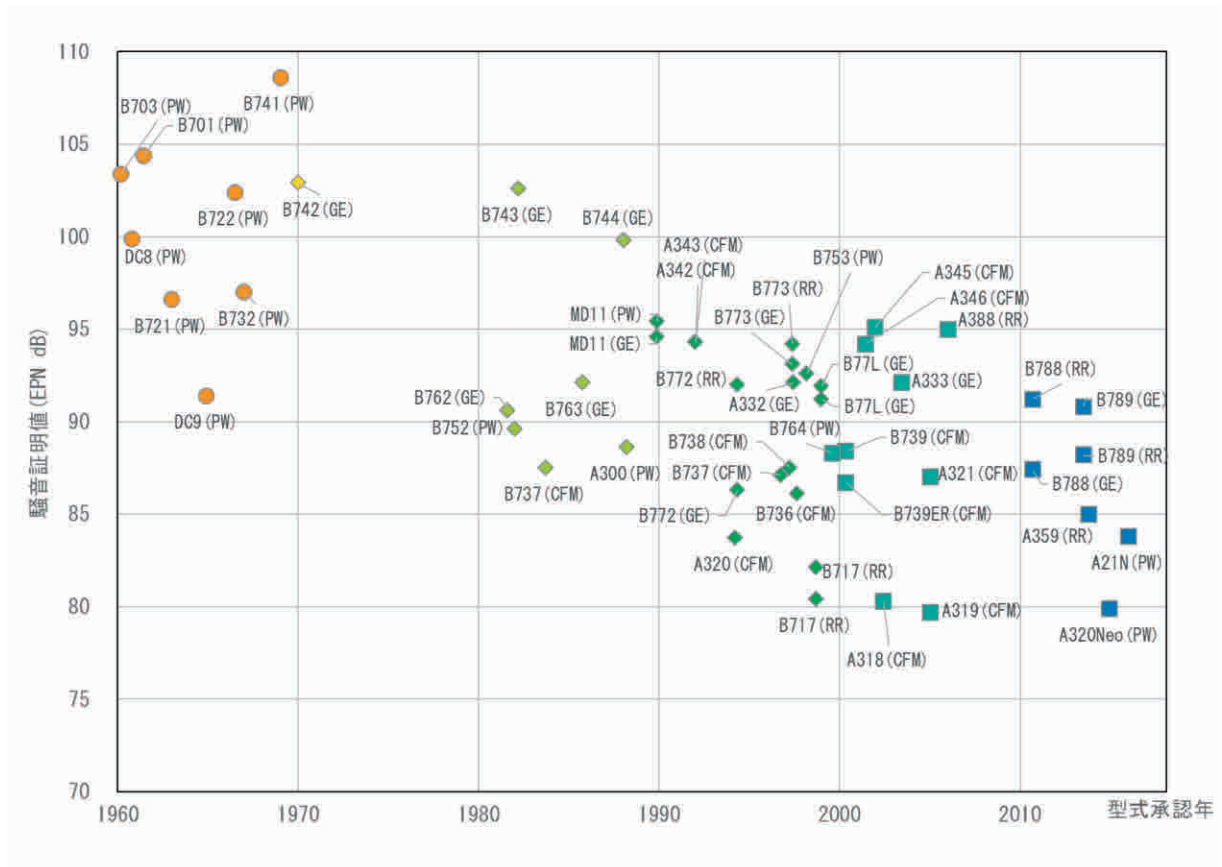


図6 騒音証明値 (離陸時の直下の騒音) の変遷

5. 開発世代による騒音低減

図6に年代による騒音低減を示したが、世代別に航空機にどのように変遷してきたのかを見ていくこととしよう。

1950-70年代 (Chapter2 とそれ以前の世代)

ターボジェットエンジンが民間旅客機に使われ始めたのは1950年代、ターボファンエンジンは1960年代から使われ始めている。

騒音証明制度、ならびに Chapter2 が始まった1970年代に飛行していた旅客ジェット機のターボファンエンジンのバイパス比は1程度、つまり燃烧コアの空気とバイパスされた空気がほぼ同等の量というもので、それだけが原因ではないが、かなり騒音が大きかった。運航数の増加もあって、この世代の航空機が騒音公害を社会問題化させたとも言える。

表1. Chapter2 以前の世代の機種例

型式承認年	機種	エンジン	バイパス比
1961	ダグラス DC-8	JT3D	1.4
1962	ボーイング 707	JT3D	1.4
1963	ボーイング 727	JT8D	1.0
1967	ボーイング 737Classic	JT8D	1.0



図7. ボーイング 707 の原型となった 367-80
バイパス比が低いためエンジンは細長い

1980-90年代 (Chapter3)

1980年代に入ると、エンジンのバイパス比がやや改善し、バイパス比 4-8 程度となった。

現在でも就航している機種であるが、日本の主要航空会社では退役が始まっている。

また、フライ・バイ・ワイヤ等の新技術が採用され、コンピューター制御による必要最小限の推力制御などの運用面からも騒音が減るようになった。

表 2. Chapter3 世代の機種例

型式 承認 年	機種	エン ジン	バイ パス 比
1982	ボーイング 767	CF6	5.0
1989	ボーイング 747-400	CF6	5.0
1995	ボーイング 777	GE90	8.2
1998	ボーイング 737NG	CFM56	5.6
1998	エアバス A330	CF6	5.0

2000-10 年代 (Chapter4)

バイパス比は 9-10 に増え、かなり騒音が低減した。更に機体の環境性能も重視されてきた世代でもある。

例えばボーイング 787 のように、エンジンケースにシェブロンというギザギザの後縁ノズルを付加してジェットミキシング騒音を低減させている機種もある。



図 7. シェブロンノズル

上: ボーイング 787 の GENx エンジン 4)、
下: エンブラエル 190 の CF34 エンジン (GE homepage より)

また、機体構造にカーボン複合材を多用するようになり (ボーイング 787, エアバス A350 は機体の 50% 程度)、軽量化による推力低減と騒音軽減がなされている。

さらにエンジン内部の表面に張ってある吸音ライナーというファン音を低減する素材の面積も増量している。吸音ライナー自体は Chapter2 世代のエンジンでも装備されていたが、吸音能力を増加させた上に、ファン前の吸気口側もファン後のエンジンケース内も敷き詰めた上に、ケース表面に出ていた継ぎ目部分も吸音ライナー化できるようにするなど、全体の表面積を増やして、エンジン騒音を低減させた。



図 8. ボーイング 787 の吸音ライナー 4)

さらに従前から使用されていた GPS を用いた航法 (RNAV) 装置を標準装備する機体もあり、航路の逸脱による航路以外の地域への騒音は減少している。

表 1. Chapter4 世代の機種例

型式 承認 年	機種	エン ジン	バイ パス 比
2006	エアバス A380	Trent900	9.1
2011	ボーイング 787	GENx-1B Trent1000	9.5 10.5
2014	エアバス A350	TrentXWB	9.1

2015 年以降の世代 (Chapter14)

これまでの手法によるバイパス比の向上が限界に近づいたため、減速ギヤを追加したギヤードターボファン方式のエンジンが採用され始めた。これによりバイパス比は 10 以上に増え、さらに騒音が低減している。現在は比較的小型の機体からギヤードターボファンエンジンが導入されているが、今後は大型機にも拡大するものと思われる。

表 1. Chapter14 世代の機種例

型式 承認 年	機種	エン ジン	バイ パス 比
2015	エアバス A320neo	LEAP-1A PW1100G	11.0 12.0
2018	ボンバルディア CS100	PW1500G	12
2018	エンブラエル E2	PW1700G PW1900G	9 12
-	三菱 MRJ	PW1200G	9

6. 今後の展望

現在の騒音証明制度が続くことから、当面は発生源対策により 1 機あたりの航空機騒音は低減し、後戻りすることは無いと言って良いだろうと思われる。

エンジンの低騒音化の技術としては、ギヤードターボファンエンジンが現在のところ実用段階にあり、現在は 200 席以下の旅客機に導入されているものが、それより大型機 (ボーイング 777X が開発中) に採用されていくと思われる。より静かな航空機としては電気モーターをエンジンとする電動航空機があるが、現在は多人数を載せられるほどの出力がなく、登場するのは 2050 年代との予想である 5)。このように常に新しい技術が開発されており、発生源対策は着実に進むだろうと思われる。

しかしながら、1 機あたりの騒音は減少する反面、旅客需要の伸びや管制処理能力の向上により、航空機の運航機数が増えているのも事実である。ICAO CAEP(航空環境保全委員会)の予測だと 2050 年には現在の 2 倍以上の運航量となる見通しで 6)、段階的に騒音基準は厳しくせざるを得ないだろうと予想される。やはり発生源対策のみで 2 倍以上の運航量に対応することは難しいと考えられることから、バランスドアプローチの他の手法、土地利用計画と管理、騒音軽減運航方式、運航規制を適度に組み合わせて、空港周辺の騒音対策を行う必要があるだろう。

文献

- 1) Aircraft Noise - Technologies and Operations, Airbus, 2015
- 2) ICAO: Annex16 Volume 1, Seventh Edition, July 2014, International Civil Aviation Organization
- 3) 川上光男, ICAO での航空機騒音に対する取り組み, 騒音制御 vol.31, 2007, p.87-94
- 4) 新居一巳, 新型航空機の低騒音化技術, 航空環境研究, 2009, p.52-55
- 5) JAXA 航空本部, 航空機用電動推進システム技術の飛行実証, 2014, JAXA 航空シンポジウム 2014
- 6) Fleming and Ziegler, Environmental Trends in Aviation to 2050, ICAO Environmental Report, 2013, p.22-27