

研究報告

航空機騒音の変遷と音質評価に関する考察*

下山 晃司(航空環境研究センター) 森長 誠(神奈川大学) 小林 知尋(小林理学研究所)

1. はじめに

環境基準の制定以降、航空機騒音の低減に関して行政、機体メーカー、空港管理者等の努力により単発騒音としては相当の低騒音化が進んだ。一方で、運航需要の増大により多頻度化するなど、空港周辺における騒音暴露の状況は激甚騒音と呼ばれた当時と比べると大きく変わっている。ここでの航空機の低騒音化とは、環境基準で用いられる騒音評価指標のような数値が低減していることを意図しているが、ヒトが感じるのは大きさ以外にもその音色に対して生じる印象などもある。筆者らは、現在の航空機騒音は激甚騒音と呼ばれた当時と比べて「マイルド」になっていると感じており、そのような印象を想起させる要因の定量化について検討を進めている。

そこで、本稿では航空機騒音の変遷を振り返り、過去と現代の航空機騒音の特徴を述べると共に音の大きさだけでは表せない航空機騒音の印象評価(音質評価)について考察する。

2. 本稿で用いる用語について

本稿では、音の物理的・主観的特徴を評価／定量化する用語を以下の様に取り扱う。

- ・ **物理指標**：音の物理特性のうち、最も基本的な量である大きさ(音の強さ)を表す。主な評価指標には周波数重み付けをしない音圧レベル(Z特性)があり、これに類する評価指標を本稿では物理指標と総称する。
- ・ **ラウドネス指標**：ヒトが感じる音の大きさを表現する指標のひとつ。1930年代にFletcherとMunsonは1 kHzの純音を基準とし、高い音／低い音の純音をそれぞれ被験者に聴かせて同じ大きさに聞こえる様に音量調整させる実験を行った。その結果、異なる周波数の純音では同じ音の大きさに聞こえる音圧レベルが周波

数によって異なることを示した(等ラウドネス曲線)。騒音計測で良く用いられる騒音レベル(A特性音圧レベル)は、等ラウドネス曲線の特性を考慮し、ヒトが感じる音の大きさを近似的に表したものである(なお、ヒトの聴覚を詳細にモデル化した理論を用いて、ヒトが感じる音の大きさを精緻に計算するLoudnessという指標がISO 532シリーズで規格化されているが、本稿では紹介だけに留めておく)。航空機騒音の測定・評価では、航空機1機当たりの単発騒音暴露レベル L_{AE} や、騒音の発生時間帯によるペナルティを加算した L_{AE} を累積して算出する L_{den} 等が用いられる。これに類する評価指標を本稿ではラウドネス指標と総称する。

- ・ **ノイジネス指標**：ヒトが感じる聴感的な不快感(やかましさ)を表現する指標のひとつ。その代表例として、Kryterらが激甚騒音の時代と呼ばれた1960年代の民間旅客機(従来機)の飛行音を被験者に聴かせてやかましさが同程度となるように音量調整させる実験を行った。その結果(等ノイジネス曲線)から周波数重み付け特性D(D特性)や感覚騒音レベル(PNL, Perceived Noise Level)が提唱された。さらに、純音補正等の複雑な処理を施した上でPNLを累積して算出する加重等価平均感覚騒音レベル(WECPNL)等は航空機騒音の評価に用いられてきた。本稿では上記の範囲に限定してノイジネス指標と総称する。
- ・ **音質評価指標**：音の変動感など音色に対する印象を構成する様々な要因を定量化する指標。同じ音の大きさであっても、音質により心理的影響は異なる。このような詳細な観点に着目するため、評価対象とする音の特性により様々な指標があるが、本稿では音の鋭さを定量化するSharpnessと、純音性成分の可聴度を定量化するTonal Audibilityについて言及する。

* A transition of aircraft noise and consideration on sound quality evaluation

ここで、Z特性およびA特性、D特性を図1に示す(Z特性およびA特性は騒音計に関するJIS規格：JIS C 1509-1:2017 [IEC 61672-1:2013]に規定されているが、D特性はかつて使用されていた周波数重み付け特性であり現在は規定されていない)。これより、ノイジネス指標のD特性はラウドネス指標のA特性と比較すると、従来機の特徴的な高周波数成分(2~4 kHz)を大きく評価する指標であることがわかる。

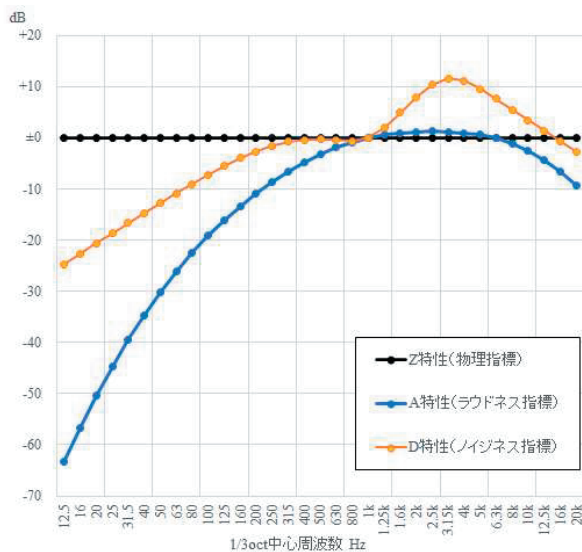


図1 周波数重み付けZ特性およびA特性、D特性

3. 航空機騒音の変遷と評価指標

3.1 航空機騒音の評価指標の変遷

我が国では1967年に公害対策基本法が制定され、1973年には航空機騒音に係る環境基準(以降、環境基準)が制定された。環境基準では生活環境を保全し、人の健康の保護に資するうえで維持することが望ましい基準として、地域類型別に基準値が示された。当時、国際

民間航空機関(ICAO)が国際民間航空条約の第16附属書第1巻(1971年)にて空港周辺の騒音対策に用いる評価指標としてWECPNLを提唱していたことや航空機の国際性を考慮してWECPNL(ノイジネス指標)が採用された。しかし、WECPNLを算出するには純音補正等の複雑な処理が必要となり騒音計によって簡単に測定することができないため、幾つかの仮定を基に、騒音計で測定したA特性音圧レベルから近似的にWECPNLを求める日本独自の方法が採られた(図2に測定結果から各評価指標を算出するまでの簡単なフロー図を示す)。つまり、ノイジネス指標であるWECPNLが採用されたものの、本質的にはラウドネス指標で評価が行われることとなった。

その後、2002年に成田空港のB滑走路が供用されたことが契機となりWECPNLの逆転現象(遠方の滑走路を離着陸する騒音を評価に加えると、近い滑走路だけの騒音より小さく評価される現象)が指摘された。これは日本独自の近似計算での仮定条件と騒音の実態に乖離が生じたためであり、環境省は様々な検討や測定技術の進歩等を踏まえ L_{den} を評価指標とすることを2007年に告示、2013年から施行された。これにより仮定条件が必要なくなったため、より実態に近い航空機騒音の評価が可能になると共に騒音測定から評価指標に至るまでラウドネス指標が用いられることとなった。

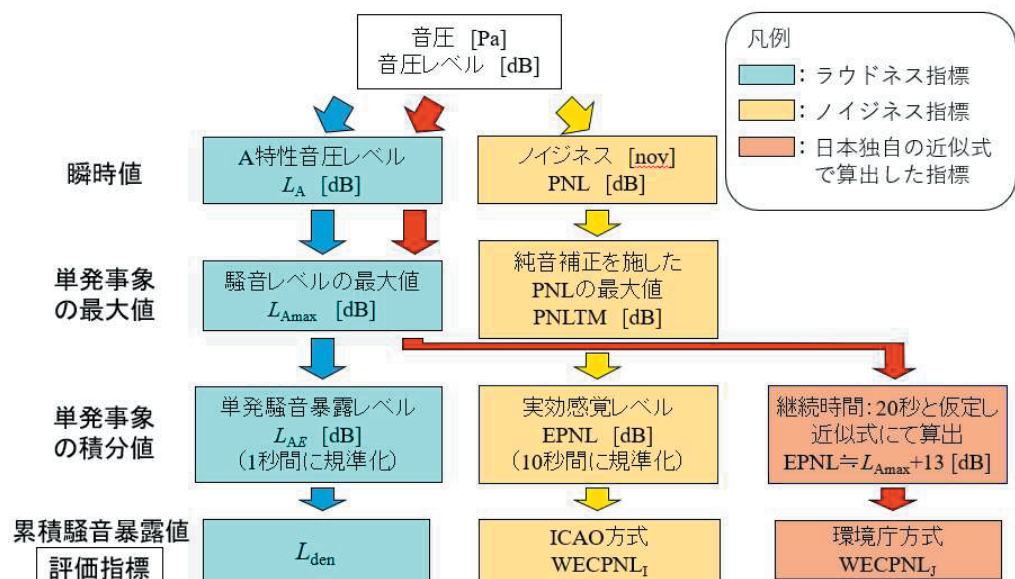


図2 航空機騒音評価指標の簡易算出フロー図

3.2 航空機の低騒音化と周波数特性の変遷

航空機騒音を取り巻く環境は環境基準制定時から大きく変化しており、当機関誌では既報^{1), 2)}でこれらについて解説を行っている。そこで本稿では、騒音発生源対策つまり航空機の技術改良の成果としてどれだけ低騒音化が達成されたか、その周波数特性について簡単に振り返る。

航空機のエンジンは、従来機に使用されていたターボジェットエンジンとその後改善が施されたターボファンエンジンに大別される(図3)。ターボジェットエンジンはシンプルな構造で軽量だが、民間旅客機の飛行速度を考慮するとコア噴流の流速が早すぎるため無駄が多く、推力も余分に必要とするため、結果として騒音も大きくなる。騒音は空気の流れの8乗に比例する。(例えば速度が1/2倍になった場合、騒音のエネルギーは1/256倍になりデシベルに換算すると24dBも小さくなる。)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。前方から取り込んだ空気を燃料と混合して点火した後方より吹き出すことで推力を得る原理は同じであるが、前方の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、そのまま後ろへ押し流して推進力にするバイパス噴流に用いる点が大きく異なる。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。コア噴流とバイパス噴流の空気量の比率をバイパス比(BP比、BP比=バイパス噴流÷コア噴流)という。

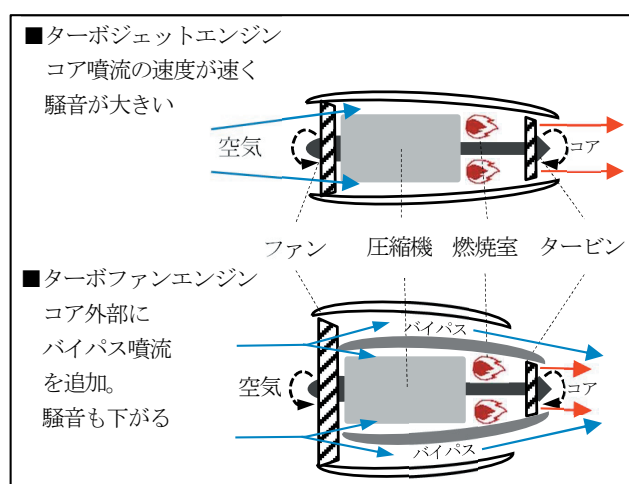


図3 エンジンの簡略断面図

民間旅客機の騒音に対する国際的な統一基準としてICAOの騒音証明制度がある。騒音証明制度では、着陸直下、離陸直下及び側方の3地点での騒音測定結果を基に騒音証明値としてノイズ指標のEPNLが算出される。離陸直下の騒音証明値の変遷を図4に示す。これより1960年代と現在で比較すると、約50年で高バイパス化(高BP化)が進むとともにEPNLで20 dB以上の低騒音化が達成されていることがわかる。しかし、その変化は鈍化している傾向も見られる。これは、高バイパス化したエンジンは構造が複雑化して重量が増加するデメリットや、エンジン口径が大きくなり、機体に取り付けると地面を擦るリスクがある等、高BP化には限界があるためである。

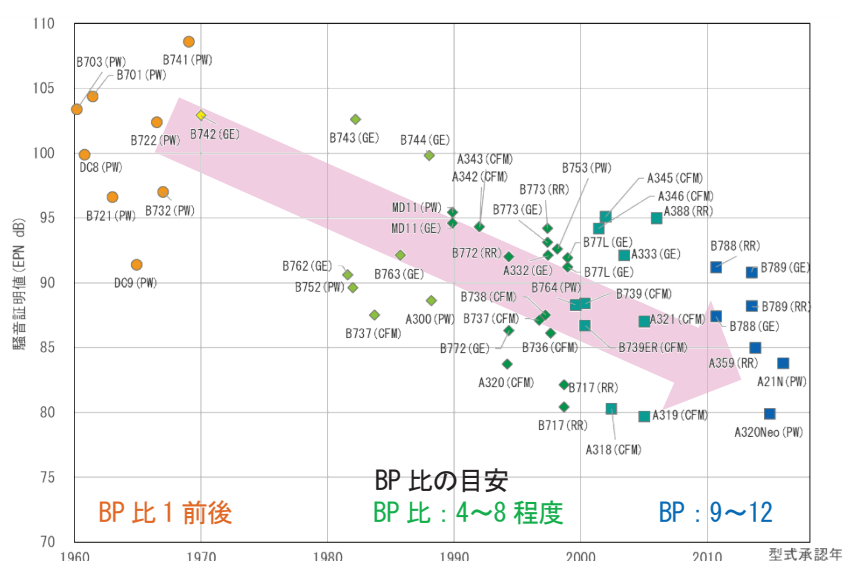


図4 騒音証明値(離陸直下)の変遷

図5に空港から2~2.5km程度離れた測定点における離陸騒音の測定結果から算出した最大騒音レベル(L_{Amax})と、周波数別の最大音圧レベルを示す。離陸機1機の騒音データから得た結果ではあるが、従来機(DC8、B747-200、L1011)と図5の中で最も新しい機種(A359)を比較すると、 L_{Amax} は図4のEPNLと同程度に低騒音化されていることが伺える。また、周波数別の音圧レベルに着目すると、その差は一様ではなく、主に500 Hz帯域以下と2 kHz以上で大きく低減されている。後者はノイジネス指標で大きく評価される、従来機に特徴的な周波数成分とちょうど一致する。

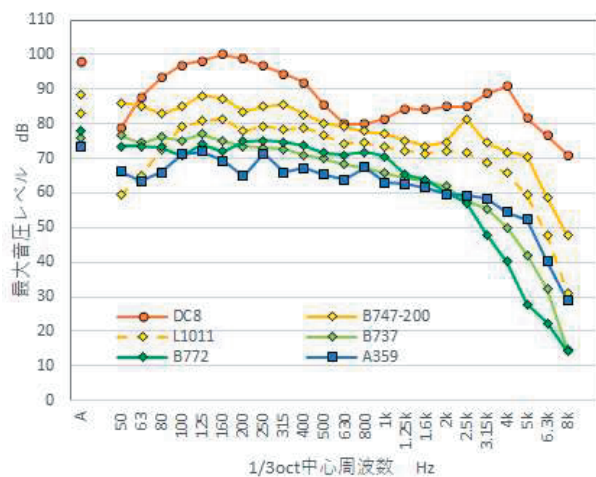


図5 航空機騒音の周波数特性の変遷

4. 航空機騒音の音質評価に関する考察

前章で従来機と比べるとエンジンの高BP化等により低騒音化が実現されたといわれているが、詳細にみると、高周波数成分についても大きく低減されていることが確認できた。このような違いを筆者らは、「マイルド」になったと感じているのではないかと考えられる。そこで本章では、この違いがノイジネス指標やラウドネス指標には表れない航空機の音の印象改善に関与していると言えるか、音質評価指標を用いて定量化でもないか検討・考察する。

今回の検討では、従来機に特徴的な高周波数成分の違いを評価することができる、Sharpnessという音質評価指標を選定した。Sharpnessは主観的な音の鋭さを評価する音質評価指標であり、単

位はacumである。数値が大きくなるほど主観的に音の鋭さが強いことを示す。

従来機と現在も運航されている機種の経路直下の離陸騒音測定データを収集し、算出した機種別ラウドネス指標 L_{AE} と、Sharpnessの対応関係を図6に示す。これより、従来機(DC8、B747-200、L1011)はSharpnessが大きい範囲に分布しており、比較的新しい機種(目安としてBP比4以上の機種。以降、現代機と呼ぶ)は L_{AE} で90 dB以下、かつSharpnessは1 acum以下の範囲にその殆どが納まっている傾向が見られる。L1011とB772に着目すると、ラウドネス指標 L_{AE} では殆ど同じ90 dB前後に分布しているが、L1011の方がSharpnessは大きい。図5の周波数特性と合わせて考えれば、Sharpnessを用いれば激甚騒音時代の民間旅客機に特徴的な音質を定量化できる可能性があると考えられる。

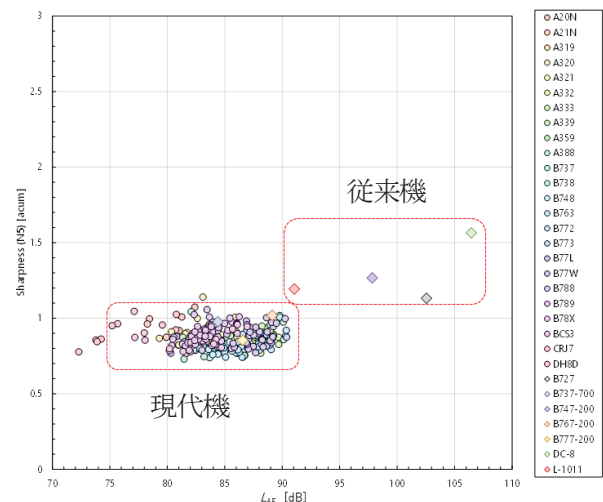


図6 音質評価指標とラウドネス指標の対応関係例
(離陸音の L_{AE} とSharpnessの対応関係)

5. 航空機騒音の特異事例と音質評価

4章では、激甚騒音と呼ばれた時代から現在までの航空機騒音の低騒音化について、エンジンの高BP化などの発生源対策によって、ラウドネス指標やノイジネス指標に表れない音質の改善効果を定量化できないか検討・考察を行った。一方で、エンジンの高BP化による低騒音化の限界が近いため、今後のより好い航空環境の発展の一助として音質評価の観点からアプローチできないか検

討を行った。本章では着陸時に特徴的な飛行音が発生する事例に着目し、音質評価指標を用いて定量化できないか検討した結果について報告する。

空港周辺の着陸経路下において、通常の着陸騒音とは異なる純音成分が卓越した音（以降、卓越純音成分と呼ぶ）が聞こえる事例が報告されている。この事例は、1990年頃に導入が進んだ機種（B777-200、B767-300等）や2010年以降に導入が進んだ機種（B787-8、B787-9、A321-200neo等）で報告されているが、その発生率は非常に低く（発生率が高い測定地点でも全体の数%程度）、場所によっては全く観測されない。

図7に卓越純音成分が観測された時の騒音レベルの時間変動を示す。この図を見ると、本来は最大騒音時から徐々に騒音レベルが小さくなるはずが、1回目のピークの後で再度騒音レベルが上昇し2回目のピークが観測されていることがわかる。そこで、1回目及び2回目の最大騒音時の周波数分析を行った結果を図8に示す。

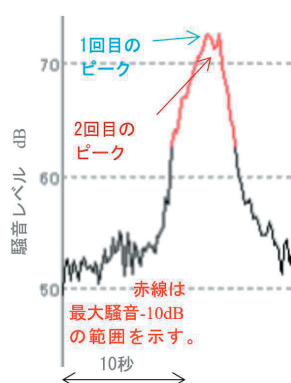


図7 特異音発生時の騒音レベル変動図

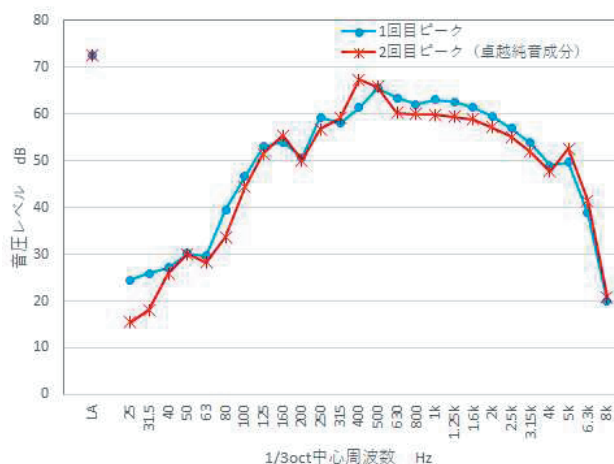


図8 ピーク時（1回目、2回目）の周波数特性

これより、2回目は1回目と比べて400 Hz帯域の音が卓越していることがわかる。今回は、卓越純音成分によってピークが2回観測される事例を紹介した。1回目のピークと2回目のピークの大小関係により航空機騒音の評価対象である継続時間の算定範囲 ($L_{Amax} - 10$ dB、図7赤線の範囲) が短くなることもあるため、卓越純音成分が発生しても L_{AE} は必ずしも増加しない。さらに、発生率が低いこともあり、卓越純音成分を評価した場合と評価しない場合で評価指標 L_{den} への影響は殆どない（影響しても0.1 dB以下）。

実際に音を聞いてみると、卓越純音成分が騒音レベルの時間変化に表れない場合でも聞き取れるケースもある。このような音について、音質評価指標を用いれば、音色の印象を定量化できる可能性はある。純音性成分の可聴度を定量化する音質評価指標として Tonal Audibility (TA) が挙げられるが、航空機騒音は通常の着陸音でもエンジンのファン回転数に応じた純音性成分を含むため、TAで適切に評価できるかはする今後慎重に検討を進めて行きたい。

6. まとめ

本稿では、激甚騒音と呼ばれた時代から現在までの航空機騒音に関する評価指標とその変遷について確認した。さらに、航空機の低騒音化（高BP化）などの発生源対策により、ラウドネス指標やノイネス指標に表れない音質の改善効果を定量化できないか検討を行った。その一例として、従来機と比較として、音質評価指標である Sharpness を用いた検討・考察を行った。また、航空機騒音の卓越純音成分が発生する事例を紹介すると共に音質評価指標TAを用いた検討の可能性を述べた。

音質評価指標を用いて航空機の音を評価するには、音質評価指標での定量化だけでなく、定量化した結果とヒトの感じ方を対応付けることが重要なため、今回検討した結果等を用いて今年度、被験者実験を行う予定である。

文献

- 1) 航空環境研究(2018)：中澤、騒音発生源対策と航空機の技術改良
- 2) 航空環境研究(2019)：篠原、航空機騒音の特徴と伝搬特性