

航空環境研究



The Journal of Aviation Environment Research

No. 22, 2018

巻頭言

航空環境研究センターの5年間を振り返って
..... 岩崎貞二 1

焦点

衛星航法システムの研究開発について
..... 福田 豊 3

研究報告

航空機騒音の短期測定に基づく長期間評価値の
信頼性向上検討
..... 篠原直明 9

航空機騒音の測定・評価に及ぼす季節で変化する要因の考察
～セミなどの自然音の実態と評価値への影響～
..... 篠原直明 18

騒音予測コンターの信頼性を確保する予測条件の設定方法
..... 菅原政之、中澤宗康、橋本弘樹 28

航空機地上騒音の3次元シミュレーション予測
..... 中澤宗康 32

騒音を考慮した離着陸料と航空会社の機材選択
..... 高橋 達 36

中低高度における連続降下運航
..... 高橋英昌 45

フランクフルト空港における航空機騒音対策の事例紹介
..... 後藤恭一 53

WHOガイドラインの改訂動向と航空機騒音
..... 金子哲也 62

解説

騒音と人々の健康に関わりを探る調査
～疫学調査の手法の解説～
..... 後藤恭一 68

騒音発生源対策と航空機の技術改良
..... 中澤宗康 80

海外事情

国際騒音制御工学会議 インターノイズ2017
..... 篠原直明、中澤宗康 87

活動報告

研究センターの動き（平成29年度） 管理部 91

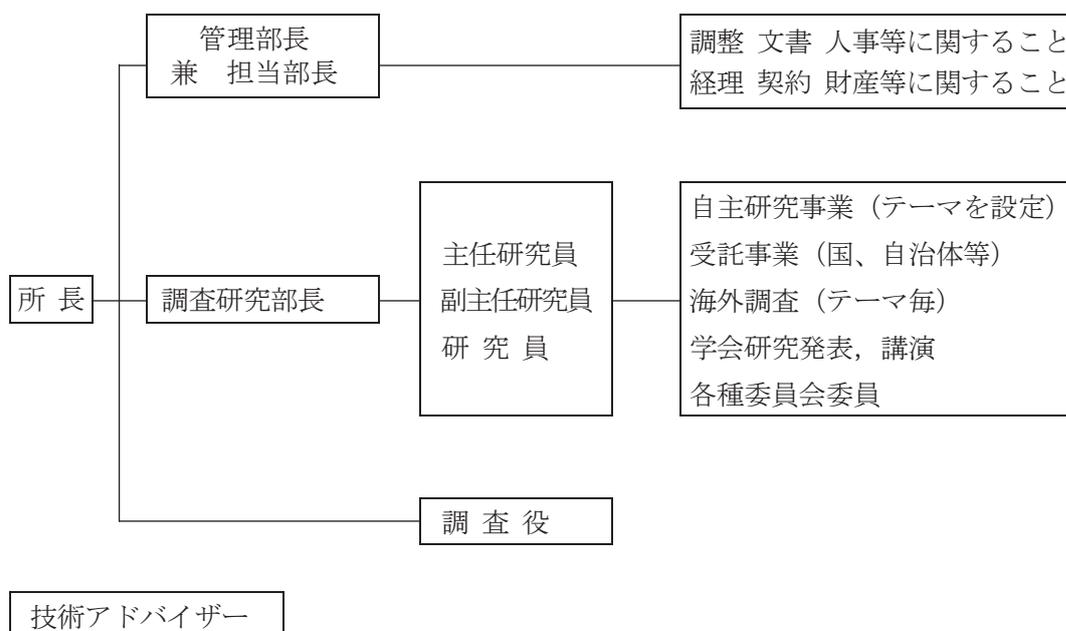
航空環境研究センターの沿革と組織及び業務内容

産業、経済、文化の発展に伴う航空需要の増大とジェット旅客機の大型化による運航は、空港周辺における環境阻害に深刻な問題を提起し、昭和43年8月、航空公害防止対策について国の施策を補完する目的で「(財)航空公害防止協会」が公益法人として設立されました。当協会は設立以来、東京、大阪両国際空港をはじめ、主要空港において、各種の航空公害の調査に取り組んでまいりましたが、調査事項が増加するなかで、専門的な航空公害を体系的に調査、研究し、これを防止、削減する対策並びに科学技術を研究開発する総合的な施設の設置が要望され、昭和47年12月、航空公害防止協会の附属機関として、当研究センターの前身である「航空公害調査研究センター」が東京国際空港内に設置されました。

その後、名称を昭和51年10月に「航空公害研究センター」に改め、平成5年4月、「航空公害防止協会」が「空港環境整備協会」に改称されたことにより、当研究センターも現在の「航空環境研究センター」に改称し、設立以来、航空機の騒音、振動、排ガス及び空港周辺の騒音、大気環境、健康影響など、多岐にわたる調査と研究に取り組んでいるところです。また、平成24年4月1日から一般財団法人に移行しました。

なお、本年6月27日に「空港環境整備協会」から「空港振興・環境整備支援機構」に改称される予定です。

組織及び業務内容は次のとおりです。



巻頭言

航空環境研究センターの5年間を振り返って*

岩崎 貞二**

これからのセンターについての協会会長としての取り組みを書く予定でした。しかし、この雑誌が発刊される頃には退任することになったので、協会会長として5年間を振り返りながら、筆を執ります。

センターに求めたことのその1は、たこつぼに入らないで社会と接点をもっと持つことでした。学術的な調査研究機関ではないのだから、社会が何をセンターに求めているかを意識して業務にあたることです。航空機騒音は昔に比べれば静かになった、航空機からの排ガスも大きな問題ではなくなった、航空需要は伸びている、もっと飛行機を飛ばしたい、などなどセンターの業務を取り巻く状況が変化しています。センターが行う調査研究はその変化に対応したものとし、その成果をわかりやすく公表し、伝えることが重要です。

この雑誌の編集方針を変えたのも、その一環です。専門的なことばかりでなく、センターの職員が自ら調査研究したことを書くことにしてきました。自ら書くことによって、その調査研究が社会にどう評価されているか、少しはわかります。2年ほどそれを続けたので、たこつぼから、少し顔がでてきました。顔が出てきたので、今後は職員だけではなく外部の人に皆さんが興味のあることを書いてもらうようにして、より、いい情報が伝わるようにしたいと思います。

また、センターで研究発表会をはじめ、それを毎年やるようにしてきました。これも

センターの職員が自ら調査研究したことを発表することにしました。職員自身がどういうテーマを社会が求めているか肌で感じてもらうためです。これも、定着してきたので、今後は職員以外の有識者に関連するテーマで話してもらうこともいいかなと考えています。

所長のアイデアで民営化した空港の運営主体の人たちとの勉強会も発足し、先日第1回の会合を持ちました。新しく空港運営にたずさわる方にも、センターから情報を提供しながら、ニーズが何かも教えてもらう・こうした輪を少しずつ今後も広げていければ。

その2は、センターは空港の環境問題に関する情報のプラットフォームになることです。諸外国も含め空港の環境問題に関することはこのセンターに聞けばわかる・を目指しました。特に、海外の空港の状況をしっかり調べて、それを、ずっと継続的にウォッチしていくこと。手前味噌で恐縮ですが、評価されているとまではいかないけれど、期待はされるようになったかなと思います。ヨーロッパの空港は、特にヒースローとフランクフルトは様々なことをやっているのがわかりました。飛び方を変える、着陸料に環境の要素を大胆に加える、対策をする評価基準も夜間騒音だけ取り出して評価する・などなど、いろいろなことをしています。意外とアメリカの空港はやっていないこともわかりました。ややもすると、日本で諸外国の調査をするというと、その時にそのテーマで調査し、後にな

* AERC Looking back over the past 5years

** 一般財団法人空港環境整備協会会長

かなか残らない嫌いがあります。センターはプラットフォームとして総合的に継続的に情報が蓄積していけばと願っています。(読者の皆さんにも情報の提供をお願いします。まだまだ、弱小のセンターですから。)

その3は、メインの業務であるコンターを正確により早く書くこと。羽田で東京上空を飛ばす、福岡で2本目の滑走路を整備するといったときに、コンターがどうなるかは空港運営をする人にとっては絶対に必要な情報です。特に、滑走路の使い方、時間帯、本数などを変えることを企画するときに、この情報が必須です。しかもすぐコンターをつくってもらわないと、意思決定が遅れます。(昔、自分が航空行政にたずさわって羽田の4本目の

滑走路の整備にかかわっていたときに、4本目の滑走路ができた後、どういう飛び方をすれば地元で迷惑をかけないかを考えるのに、コンターはまだか、まだかと随分催促した覚えがあります。)

コンターを書くプログラムを見直す、コンターの作成に必要な情報(どの方向に、どの飛行機が、どの時間に、どれぐらいと飛ぶかなど)の入力の仕方など、随分改善してくれました。

まだまだ、皆さんの期待に添えないところは多いと思います。努力が足りないところもあります。皆さんのご協力と叱咤激励をお願いします。

衛星航法システムの研究開発について*

福田 豊**

1. はじめに

GPSに代表される衛星航法システム(GNSS: Global Navigation Satellite System)は自動車のカーナビゲーションを始めとして様々な日常生活で利用されています。航空分野においても利用が進み、広域航法(RNAV: Area Navigation)の展開により、経路短縮、温室効果ガス排出量削減などの便益をもたらしています¹⁾。

航空分野で利用できるGNSSには、米国のGPSとロシア国のGLONASSがあります。但し、コア衛星システム単独では航空機の航法に要求される安全性などの航法性能を満足できないので、不足する性能を補う補強システムが併用されます。補強システムには、航空機が機上で得られる情報を用いるABAS(Aircraft-Based Augmentation System)、静止衛星から補強情報を配信するSBAS(Satellite-Based Augmentation System)、地上施設から補強情報を配信するGBAS(Ground-Based Augmentation System)があります。

電子航法研究所は、GBAS、SBASなどの補強システムの研究開発を実施し、国土交通省航空局の施策を支援しています。また、国際民間航空機関(ICAO: International Civil Aviation Organization)の国際基準策定活動にも参加しています。本稿では、これらのGNSS補強システムの研究開発の現状と将来展望について報告します。

2. 計器進入とGNSS

2.1 計器進入

航空機が安全に空港へ進入し着陸するための計器進入は、精密進入と非精密進入に区分されます。精密進入は水平方位と降下経路の指示を受けることができるもの、非精密進入は方位情報のみを受けることができるものです。精密進入には計器着陸システム(ILS: Instrument Landing System)が広く利用されています²⁾。ILSは水平方向のコースを提供するローライザー、垂直方向の進入コースを提供するグライドスロープなどから構成されます。

ILSは航空機の性能、パイロットの資格、灯火、航法システムの性能などによって、カテゴリーI~IIIabcに区分されます。カテゴリーI(CAT-I)は、滑走路視距離(RVR: Runway Visual Range)が550m以上の場合に決心高(DH: Decision Height)を200ft以上に設定して進入を行う運航です。DHはパイロットが進入復行するか否かを判断する滑走路進入端からの高さを示します。CAT-IIIaではRVRが175m以上の場合に、DHを設定しないまたは100ft未満として、自動操縦を基本モードとして進入および着陸を行う運航です。

非精密進入にはローライザー進入、VOR(VOR/DME: Very High Frequency Omnidirectional Radio range / Distance Measuring Equipment)進入、RNAV(GNSS)進入、RNP-

* Research and Development of Satellite Navigation System

** 国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 電子航法研究所 航法システム領域長

AR 進入などがあります³⁾。RNAV (GNSS) 進入は航法センサーとして GNSS を利用し、一般的にはレーダー空港においては航法精度を指定しない RNAV (GNSS) 進入、ノンレーダー空港においては航法精度が指定される RNP 進入が設定されています。将来は全面的に RNP 進入に移行される予定です。特別許可が必要な RNP-AR 進入は、円弧旋回 (RF レグ) を利用して柔軟な経路設計を可能とします。

2.2 GNSS のへの移行

ICAO は 1983 年に FANS (Future Air Navigation System) 委員会を設置して、1991 年に開催された第 10 回 AN-Conf (Air Navigation Conference) において、衛星技術の中核とする CNS/ATM (Communications, Navigation and Surveillance / Air Traffic Management) 構想を示しました。航法システムについては、地上の航行援助施設から GNSS へ移行の方針が立てられ、各国での研究開発と国際標準策定を経て運用が開始されています。

2.3 GNSS の測位と誤差要因

GNSS の測位では、各衛星から発信された信号の発信時刻と航空機での受信時刻の差を測定することにより、衛星と航空機間の擬似距離を求めます⁴⁾。そして、4 つの未知数である x 、 y 、 z の 3 次元座標と受信機の時計誤差の方程式を解くことで、同距離線の交点を求めます。受信機の時刻の校正のために、最低でも 4 機の衛星からの信号を受信する必要があります。

GNSS の測位誤差要因には、衛星軌道、衛星クロック、電離圏遅延、対流圏遅延、受信機内部の誤差、マルチパスがあります。電離圏とは、大気上層のうち、大気分子、原子が電離して生じた電子とイオンが多量に存在する領域です。電子密度と電波の周波数に依存して電波の進行速度が遅くなり、擬似距離の測定に誤差が生じます。電離圏遅延の誤差要因は低磁気緯度地域において大きな影響を与えます。

2.4 GNSS の性能要件

ICAO が定める GNSS の国際基準では、位置の正確性を示す「Accuracy (精度)」、情報の確実性を示す「Integrity (完全性)」、サービスの継続性を示す「Continuity (連続性)」、利用可能な稼働率を示す「Availability (有用性)」が規定されています。

完全性とは、航法システムの出力が異常となることによる危険を防止するために必要とされる要件であり、ユーザ位置における測位誤差の信頼限界を与えることで実装されています。この信頼限界は保護レベル (PL: Protection Level) と呼ばれます。ユーザ受信機は、計算して求めた保護レベルが航空機の航法モードによりあらかじめ上限値として決められている警報限界 (AL: Alert Limit) より大きければ、その航法モードを利用不可とします (図 1)。

それぞれの航法モードに応じて要求される警報限界を表 1 に示します。航空路から非精密進入の航法モードでは垂直方向の性能は規定されない一方、垂直誘導を伴う LPV (Localizer Performance with Vertical guidance) 進入モード (DH=250ft) 以上では高い要件が課されています。なお、LPV 進入のうち DH が 200ft まで許容されるモードを LPV200 と称します。

3. 衛星航法補強システムの概要

3.1 SBAS

SBAS は静止衛星から補強信号を放送する補強システムで、航空路からターミナル空域までの広い範囲を対象とします。SBAS は、GPS から送信される信号を監視する監視局、監視局で得られたデータを収集し、補強信号を生成する統制局、補強信号を静止衛星に送信するアップリンク局などで構成されます。衛星では、アップリンク信号の周波数変換と信号増幅処理を行い、航空機に対して放送します。

表1 GNSSの航法性能要件

航法モード	水平方向		垂直方向		完全性
	95%精度	警報限界	95%精度	警報限界	
航空路	740 m	3.7 km	—	—	1時間あたり $1-10^{-7}$
ターミナル空域	740 m	1.85 km	—	—	
非精密進入、出発	220 m	556 m	—	—	
LPV (垂直誘導付進入)	16 m	40 m	20 m	50 m	1着陸あたり $1-2 \times 10^{-7}$
CAT-I LPV200 (DH=200ft)	16 m	40 m	4~6 m	10~35 m	

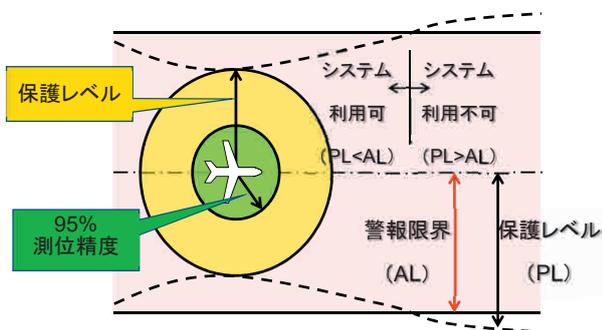


図1 保護レベルと警報限界

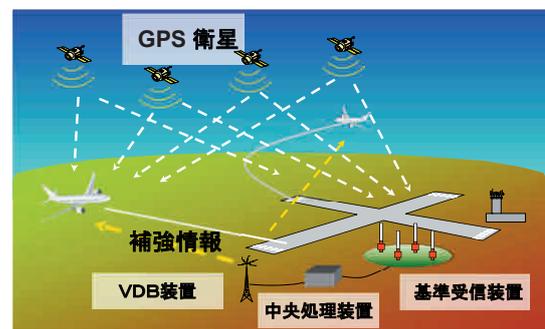


図2 GBASの構成

国土交通省航空局は、2007年9月にMSAS (MTSAT satellite-based augmentation system : 運輸多目的衛星用航法補強システム) の供用を開始しました。MSAS以外では、米国のWAAS (Wide Area Augmentation System)、欧州のEGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service)、インドのGAGAN (GPS Aided GEO Augmented Navigation) が実用化されており、ロシア、韓国、中国、豪州も整備を進めています。

3.2 GBAS

GBASは、空港に設置された地上施設から補強情報及び進入経路情報を送信します。図2にシステム構成を示します。4式のGPS信号を受信する基準受信装置、GPSの補強情報や進入経路情報を生成する中央処理装置、これらの情報を放送するVDB (VHF Data Broadcast) 装置から構成されます。GBASはILSと比較して、①装置1式で全ての滑

走路方向に対する進入方式が設定可能、②滑走路や誘導路における制限区域の設定が不要、③異なる進入角や接地点のオフセットなどが可能、④曲線精密進入などの柔軟な経路設定が可能な利点があります。

CAT-I GBASの国際標準は2001年に策定されました。2004年にはボーイング737、787にGBAS機上装置の搭載が発表されました。2016年11月にはCAT-III GBAS国際標準最終案が策定され、2018年11月に発効が予定されています。

我が国では「GPSを計器飛行方式に使用する運航の実施基準」が2017年6月に改正され、GBASの運航基準が追加されました。我が国におけるGBAS運用開始は羽田空港において2020年度の予定です。諸外国では、ドイツ国フランクフルト、豪州メルボルン空港、シドニー空港、米国ヒューストン空港などでCAT-I GBASが運用されています。

3.3 ABAS (RAIM) と GNSS 監視

ABAS は、航空機の搭載機器などから得られる情報をもとに、完全性を補うシステムです。受信機による完全性の自律的監視 (RAIM: Receiver Autonomous integrity Monitoring) と呼ばれる機能が広く用いられています。RAIM は GPS を常時 5 機以上受信することにより、その冗長性から GPS 自身の故障などを検知するものです。故障 GPS 衛星を特定して排除する FDE (Fault Detection and Exclusion) では 6 機以上の受信が必要です。

RAIM の性能は GPS の配置に大きく依存します。そのため、その時間と場所における GPS 衛星の数と配置を考慮したうえで、飛行しようとするサービス (RNAV/RNP の種類別の警報限界) を満足する必要があり、利用可能性 (RAIM 予測) の確認と呼ばれます。運航者は、飛行前計画の段階で ABAS (RAIM) の利用可能性を確認することが求められています。

SBAS の補強を受けない GPS は 2015 年までは補助的な航法装置に限られていましたが、2015 年の「GPS を計器飛行方式に使用する運航の実施基準」の改正により GPS を計器飛行方式における主航法装置としての使用が認められました。

一方、このような状況に伴い、飛行中に GPS が使用できなくなる事象 (GPS アウテージ) が世界的に多く報告されてきました。これを受け、ICAO は、GNSS を用いた RNAV/RNP 航法を提供する国やサービスプロバイダが GNSS を適切に監視することを求めた GNSS マニュアルを制定しました。

我が国においては国土交通省航空局が将来の航空交通システムに関する長期ビジョン CARATS の施策 EN-7 (全飛行フェーズでの衛星航法サービスの提供) において「GNSS 性能監視」を掲げ、安全な衛星航法の提供を目指す取り組みを行っています。

4. 研究開発の現状と将来展望

4.1 SBAS

現在 MSAS として運用中の 2006 年に打ち上げられた MTSAT 2 号機は 2020 年に退役する予定であり、内閣府が整備する準天頂衛星システムを利用した次期 MSAS の運用が 2020 年 4 月から開始される予定です⁵⁾。

次期 MSAS では、内閣府が整備する監視局が現行の 6 局から 13 局へ増えることにより性能が向上する見込みです。諸外国 SBAS のうち、我が国の MSAS 以外は LPV 進入モードを供用しています。MSAS が LPV 進入モードを供用しない原因は日本を含む低磁気緯度地域における活発な電離圏活動であり、これを実現するためには、監視局の追加のみならず電離圏補強アルゴリズムの改良が必要です。

準天頂衛星 7 機体制が構築される 2023 年～2024 年を目途に、LPV 進入が実現できるように、補強情報を作成する新しいアルゴリズムの開発を航空局と電子航法研究所が連携して進めています。LPV 進入を実現させるには、連続性確保の観点から 2 つの SBAS 信号を送信することが必要ですが、静止衛星の追加によりこれが可能となる環境が整います。有用性のシミュレーションでは、国内全空港をほぼカバーできる見込みです。

さらに将来に向けた次世代 GNSS に対応する SBAS の研究開発が進められています。現行の SBAS には、電離圏活動の影響を受けやすい点や、GPS 衛星が遮蔽された場合に衛星数の不足によって測位の有用性が低下しやすい点、また SBAS が補強情報を放送する衛星の仰角が中程度であるため障害物に遮蔽されやすい課題があります。

航空局と電子航法研究所では、欧米諸国と協力して次世代型 SBAS の国際規格の検討を進めています。現行 SBAS からの主な変更点は、マルチコンステレーション (MC) の 2 周波 (DF) 測位を補強する点と、静止軌道以外の軌道からも補強情報を配信可能になる点です。

MC とは GPS に加えて GLONASS や欧州の Galileo、中国の BeiDou という新しい GNSS を利用可能とすることです。これにより、衛星数の増加による有用性の向上が期待されています。また、DF とは現在の L1 帯測位信号 (1575.42MHz) に加えて、L5 帯測位信号 (1176.45MHz) を合わせて利用することです。これにより、電離圏の影響を高精度に除去することが可能なため、SBAS サービスの補強性能と有用性の向上が期待されています。

次世代 SBAS が想定する静止軌道以外の軌道として、我が国の準天頂衛星システムが利用する傾斜対地同期軌道が代表的です。この軌道により、ユーザに高い仰角から補強情報を配信することが可能であるため、都市や山間部における SBAS 利用可能範囲の拡大が期待されています。

電子航法研究所は 2017 年 8 月に次世代 SBAS プロトタイプを開発し、準天頂衛星システムの非静止軌道衛星から放送された世界初の次世代 SBAS 放送実験を開始しました。本実験における補強メッセージは、常陸太田市 (もしくは神戸市) に置かれた主管制局から準天頂衛星 2 号機 (QZS-2) にアップリンクされ、その後 L5S 信号に重畳されて放送されます。

2017 年 10 月からは豪州も静止軌道衛星から同様の次世代 SBAS 送信実験を実施しており、世界中で次世代 SBAS 規格策定のための活動が活発です。これらの実験は、我が国と共に規格策定に関わる欧米諸国からも関心を寄せられています。

4.2 GBAS

電子航法研究所では、GBAS に関する研究を 1996 年に開始しました。2002 年には仙台空港にテストベッドを設置して 2004 年まで飛行実験を行いました。2010 年には CAT-I GBAS プロトタイプを関西国際空港に設置し、航空会社の協力により、ボーイング 787 を用いた飛行実験を実施しました。本プロトタイ

プは、航空局管制技術課技術管理センターが新千歳空港に設置し、積雪環境下や周辺構造物などによる環境評価を実施しています。

その後、より高い精度と安全性の要求される高カテゴリー用 GBAS の研究開発を実施し、2014 年新石垣空港に CAT-II/III GBAS プロトタイプを設置し、飛行実験を実施しました。新石垣空港で実証実験を実施したのは、電離圏擾乱が欧米と異なる地域での実データを用いた検証が重要であるためです。プラズマバブルと呼ばれる電離圏擾乱が大きな電離圏遅延の空間勾配をもたらす現状が発生した条件下で飛行実験データを取得することにより、高い安全性を保証する CAT-III GBAS の有効性を実証することができました。これらの結果は、CAT-II/III GBAS の ICAO 国際標準作成に貢献しました。現在は、次世代 GNSS の MC および DF に対応した GBAS の研究課題にも取り組んでいます。

GBAS の運用面では、GBAS を用いた進入着陸 (GLS : GBAS Landing System) の高度運用の研究を実施しています。GBAS は進入経路情報をデジタル情報で送信するため、柔軟な進入経路設定が可能になります。GBAS による曲線進入は従来から TAP (Terminal Area Procedure) と呼ばれ、地上機器からウェイポイントなどのデータを放送することにより、最終進入する方法が ICAO などで議論されてきました。しかし、ボーイング 737 クラス以上の GBAS 対応機に TAP 機上装置を導入するには、現行機材に大きな設計変更が必要になります。そこで、欧米の機体製造会社は早期に実現可能な RNP の RF レグと GLS の最終進入を接続する RNP to GLS 進入方式の実現を目指しており、飛行方式基準の検討が進められています。

図 3 に進入方式の比較を示します。RNP to GLS は、ILS と比較して経路短縮と曲線区間の利点、RNP-AR と比較して精密進入の利点があります。電子航法研究所では気温の影響

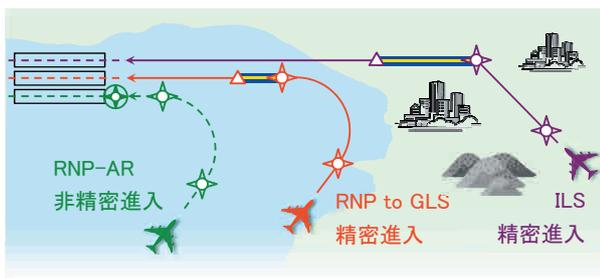


図3 RNP to GLS

を考慮した RNP から GLS への接続方式を考案し、フライトシミュレータによる検証実験により、妥当性を確認しました。

GBAS の運用では、設計・製造時に想定していた性能が、設置環境による劣化や想定外の不具合の発生なく保たれているかを把握しておくことや、GBAS の利用可能性情報を提供することが必要です。電子航法研究所では運用性能評価手法と運用性予測手法を確立し、これらの機能を有する GBAS 運用性能評価装置を開発しています。本装置は、① VDB 受信機、② 航空機搭載型 GPS 受信機、③ スペクトラムアナライザなどで構成され、機上サブシステムと同様の処理を行なうとともに VDB の受信信号強度を取得することが可能となっています。

4.3 GNSS 監視

電子航法研究所では GNSS 監視に関する研究を実施し、GNSS マニュアルで求められている GNSS の信号品質と性能監視に加え、運航者からの要望に対する解決に向けて検討してきました。諸外国の GNSS 監視システムの調査を踏まえて我が国の GNSS 監視の要件を設定し、GNSS の信号品質を監視するとともに、航空機からの情報を取り込む機能を考案しました。航空機の航法性能情報を取得することで飛行中の GPS アウテージを検出することができ、更には地上での推定値と比較することでアウテージの原因を特定する機能を持ちます。

航空機の航法性能情報を用いて監視する機能では、航空機から ADS-B (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast) により放送されるデータを有効に活用する日本独自の GNSS 監視となります。同時に、運航者からの要望である「GPS アウテージの原因特定」についても、即座に識別し運航者へ伝えることが可能となります。

5. まとめ

GNSS は ICAO の将来計画に基づいて研究開発が進められ、航空航法の重要なインフラとなっています。航空交通の安全性と効率性を向上させるために、現在も研究開発や国際標準の策定が進められています。新技術を活用するには、インフラ整備に加えて、航空機側の対応、規則の作成などが必要になります。最新の技術情報を運航者、空港、航空管制サービスプロバイダなどの関係者で共有することにより、研究開発成果が運用に円滑に繋がるように取り組んでまいりたいと考えています。

文献

- 1) 中西善信：RNAV の歴史と展望 一空港・空域の有効利用のために一、航空環境研究 No.21 (2017)、PP.3-9.
- 2) 高橋英昌：航空機の運航と航空管制、航空環境研究 No.19 (2015)、PP.37~44.
- 3) 山根厚志：次世代の航空機の運航に関する世界的動向、航空環境研究 No.20 (2016)、PP.18~23.
- 4) 坂井丈泰：GPS/GNSS の基礎知識、GPS/GNSS シンポジウム 2007 チュートリアルセッション (2007) .
- 5) 田代英明：準天頂衛星システムを利用した SBAS の性能向上について、航空無線第 95 号 (2018)、(一財) 航空保安無線システム協会、PP.22~28.

研究報告

航空機騒音の短期測定に基づく長期間評価値の信頼性向上検討*

篠原直明

1. はじめに

「航空機騒音に係る環境基準」や「公共用飛行場周辺における航空機騒音による障害の防止等に関する法律」(騒防法)では、年間を通じ平均的な航空機騒音を評価の対象としている。このため、航空機騒音を測定・評価する場合、騒音常時監視装置による通年測定が多い。しかし、設置場所や費用の制約から空港周辺すべての地域を網羅できるわけではなく、短期測定による航空機騒音の評価も多くの場所で活用されている。環境省が定めた「航空機騒音測定・評価マニュアル¹⁾(以下「マニュアル」という。)」では、測定の時期は「当該地域において年間を通じて平均的な航空機騒音の暴露状況を呈する時期を選定する」としている。航空機の離着陸は風に相対する向きに行われるため、季節で運航方向が変化し、騒音状況も変化する。このため、マニュアルには、そうした季節変化がある場合は、例えば夏冬2回、春夏秋冬の4回測定を繰り返すことと記されている。測定期間も、原則連続7日間としているが、防衛施設などで運航の状況が大きく変化する場合は連続14日間と記されている。一方、運航回数が変わらず、飛行経路(向き)も変化しない場合は7日間より短くしてもよいとされる。測定の実施時期や回数および測定期間(日数)の設定には測定・評価する者の裁量の幅が大きい。測定計画が前提とする季節や運航方向にかかわらず、実際の測定時には意図した気象状況や運航方向と異なってしまふこともしばしば発生する。この帰結として短期測定の実施方法によって「年間を通じた平均的な航空機騒音の

状況」としての結果のばらつきが大きくなってしまふ。

これらのことから、航空機騒音評価値の信頼性を確保できる短期測定の実施時期と回数・期間長の設定方法についてこれまでより充実した解説をマニュアルに記載することが、環境省が検討を進めている航空機騒音の測定・評価手法の課題検討²⁾の一つとされた。

本稿は、環境省の航空機騒音測定・評価マニュアルの課題を検討する過程の中で、様々な空港の月別の運航状況を調べ、さらに全国の騒音常時監視結果をもとに、短期測定の実施時期と回数の違いによる評価値の信頼性への影響を調べた結果をもとに報告する。さらに、短期測定で得られた結果から年間平均 L_{den} 推計方法を利用した場合に、基準地点として活用できる通年測定点の有効な目安についても検討した結果を説明する。

2. 様々な空港の月別運航実績(滑走路使用方向)

各地の民間空港の管理者からデータの提供を得て、滑走路運用方向の月別推移を調べた。防衛施設との共用空港も含むが対象は民間航空機のみである。一般的に滑走路の向きは、それぞれの空港の地形条件や気象特性(季節で卓越する風の向き)を考慮して設定されていることが多い。ここでは南北方向に滑走路が設置されている空港と東西方向に設置されている空港に区分して整理した(図-1)。図-2に示す、滑走路が南北方向に位置する空港(12空港)では、①夏と冬の季節による顕著な変化がある(夏季は南風運用割合が高く、冬季

* Consideration for improvement of reliability of long-term evaluation of aircraft noise based on short-term measurement.

** 航空環境研究センター所長

は北風運用割合が高い) 空港 (赤実線で囲んだ5 空港)、②月にかかわらずどちらかの運用方向 (北風または南風運用) が高い空港 (青長破線で囲んだ4 空港)、③月にかかわらず運用割合が半分程度の空港 (緑点線で囲んだ3 空港) に区分できる。調査前に想定したのは、夏は南風が卓越し、冬は北風が卓越することから①のケースが多いと考えた。実際の運用実績を調べると、季節 (月) に依らないで運用方向が変化しないパターン②や③のほうが多く存在することも判明した。

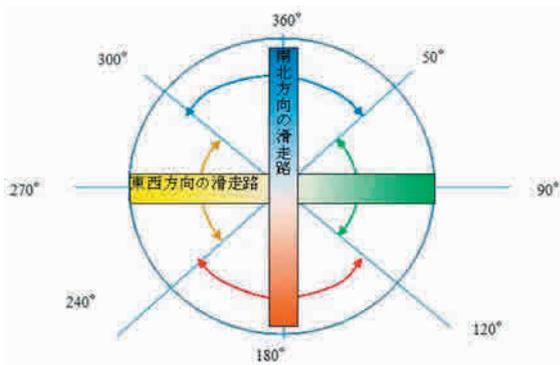


図-1 滑走路方向による区分のイメージ

図-3 の滑走路が東西方向に位置する空港 (12 空港) では、①夏と冬の季節による顕著

な変化がある (夏季は東風運用割合が高く、冬季は西風運用割合が高い) 空港 (赤実線で囲んだ2 空港)、②月にかかわらずどちらかの運用方向 (東風または西風運用) が高い空港 (青長破線で囲んだ2 空港)、③月による傾向がはっきりしない (黒点線で囲んだ8 空港) に分けられる。夏と冬で顕著な変化がある①は2 空港しかない。また、季節によって変化が少ない②も2 空港しかなく、多くの空港では季節的な関連性が明確でないものが多かった。

東西方向の滑走路を持つ空港のほうが、南北方向の空港に比べて、季節による変化が不明確であり、短期測定の実施時期にも配慮が必要である。一方で、南北方向に滑走路が配置される空港では、概して言えば、季節によって顕著な変化があるか、もしくは季節による変化がないものに分類されるため、短期測定の実施時期の選定が比較的容易かもしれない。

3. 常時監視結果に基づく測定期間長・回数と年間値との関係

短期測定の実施時期と回数の違いによる評

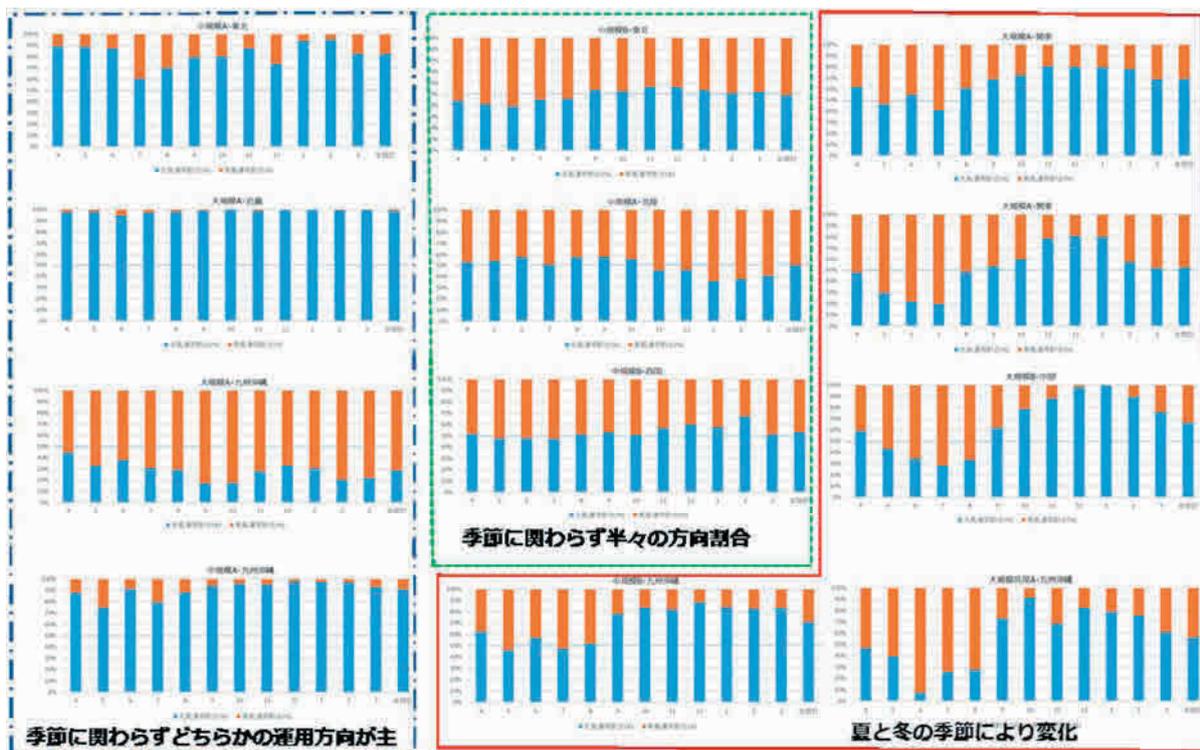


図-2 南北方向滑走路を持つ空港の月別運用方向比率推移 (赤：南風運用、青：北風運用)

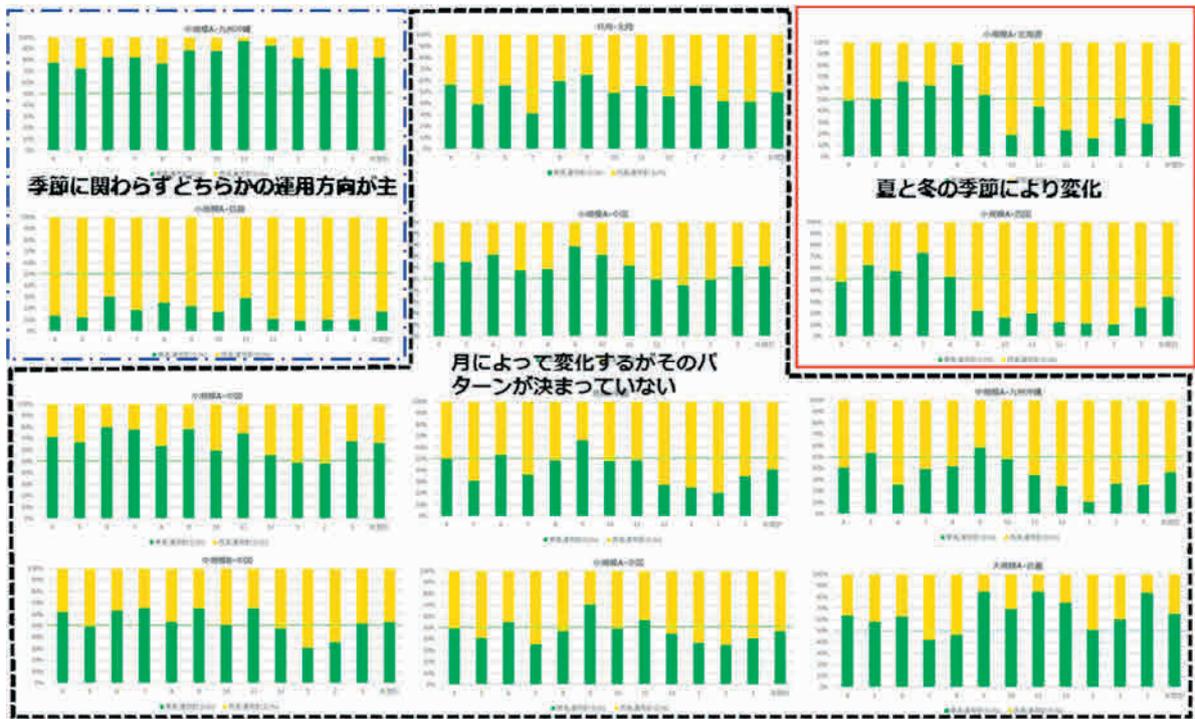


図-3 東西方向滑走路を持つ空港の月別運用方向比率推移 (緑：東風運用、黄：西風運用)

価値の信頼性への影響を調べるために、様々な種別の空港や飛行場の多くの地点における常時監視の実測データを用いて、航空機騒音の評価値との差(ばらつき)が測定期間長に応じてどのように変化するか調べた。検討には8つの民間空港(対象の常時監視局数186)と5つの防衛施設(同局数85)における2015年度もしくは年の結果を用いた。分析は、日ごとの L_{den} を元のデータとして平均化の期間長(すなわち想定短期測定期間)を3日間、1週間、2週間、4週間と変え、それぞれの L_{den} と実際の年間値との比較をし、その差の標準偏差を指標として示した。さらに、

1年間に2回もしくは4回の短期測定を繰り返す場合も想定した。

図-4は民間空港の分析結果である。左図は空港および監視局をすべて合算した結果を示す。航空機の運航状況や経路との関係などによってばらつきかたは様々だが、概して言えば評価期間を長くすれば年間値との差(の標準偏差)は小さくなる。また、季節ごとに2回または4回のそれぞれ1週間の期間をとれば、年間値との差は1dB程度に小さくなる。

図-4右は、空港の特徴により結果が異なっていた様子を示す。年間を通じて運航回数や飛行方向が変わらない空港では1週間の短期

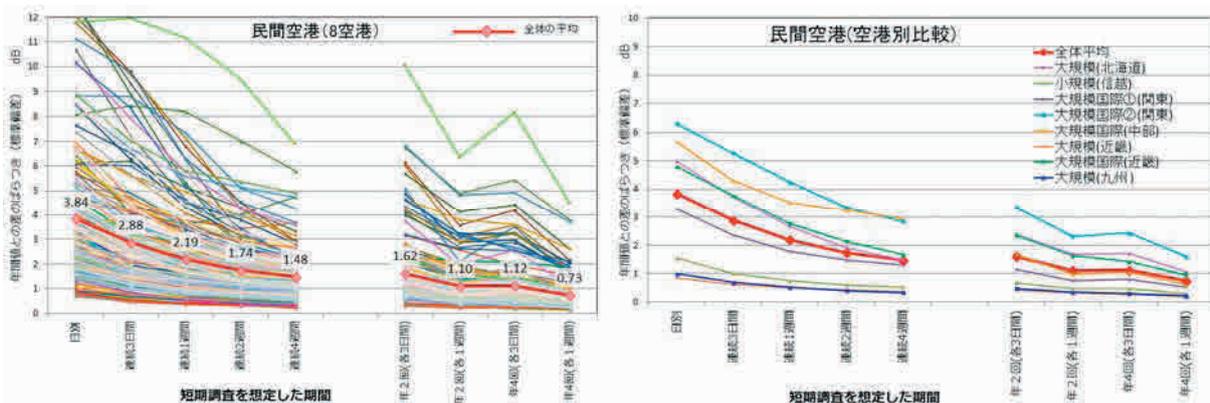


図-4 民間空港における短期測定期間と年間値との差の推計 (左：全空港、右：空港別)

測定結果を年間評価値としても実際の年間値との差は標準偏差で 1 dB 以内に収まる。季節によって滑走路の運航方向が変化する場合には、短期測定期間値と年間値との差のばらつきが大きくなり、1 週間の期間長では約 2dB、季節を変えて 2 回の場合は 1dB 程度となる。それは、すべての空港・監視局を平均したものに相当する。空港からの遠方の地域で季節によって飛行経路が大きく変化する場合、さらにばらつきは大きくなり、4 季の短期測定を繰り返したとしても 1.5 dB を超える差が残る。

これらを総括し、民間空港の運用の特徴と測定地点の位置関係および短期測定の期間と回数、評価値の信頼性について表-1 にまとめた。運航状況の変化が少ない空港や、空港に近くて騒音が大きい地域ならば 1 週間の短期測定を年 1 回実施でも評価値の信頼性が確保できる。季節的な変化が大きい空港なら年に 2 回の測定を繰り返したほうが信頼性は高まる。季節的な変化に加え飛行経路が多岐にわたり、空港から距離が遠い場所では、複数回の短期測定を繰り返しても信頼性を確保するには注意を要する。

防衛施設飛行場は図-5 左に示すように、民間空港に比べて一段と年間値との差が大きい。期間を 1 週間・2 週間と長くすれば差は小さくなっていくが 1 ヶ月にしても標準偏差で 3dB 程度の差がある。2 週間の測定を年 4 回繰り返せば 1.5 dB 以内に収まる。それでも、

表-1 民間空港の運用状況と測定点の位置関係による短期測定の期間と回数、その評価値の信頼性（概況）

空港の運用と測定地点			短期測定の期間と回数、評価値の信頼性			
運航状況	飛行経路	測定点の位置関係	3日間	1週間	1週を2回	1週を4回
年間を通してあまり変化がない	多岐にわたる	空港に近い (騒音が大きい)	△	○	◎	◎
		空港から遠い (騒音が小さい)	◆	◆	△	○
季節的な変化が大きい			◆	◆	◆	△

信頼性の目安 (年間値との差のばらつき) ◎ > 0.5以下 ○ > 1 △ > 1.5 ◆ > 2以上

防衛施設の方が民間空港よりも年間値との差のばらつきは大きい。

図-5 右には飛行場ごとに監視局の平均をプロットした。民間空港と同じように、飛行場の特徴によって短期測定期間値と年間値との差のばらつき方は異なっている。ばらつきが大きいのは、飛行場の周辺の広いエリアにわたって騒音暴露が幅広い場合である。短期測定を年 2 回以上繰り返した場合、1 回だけの場合よりも信頼度は大きく改善されることが分かる。前述の飛行場周辺に広いエリアの騒音範囲を持つ飛行場でも、2 回以上の短期測定を繰り返せば、他の飛行場と同等にまでばらつきは少なくなる。

なぜこのような空港や飛行場による違いが生ずるのかについて理解するために、図-6 に対象年における日ごとの L_{den} の頻度分布を、それぞれの代表例の監視局の場合について示した。

民間空港 1 は夏季と冬季で滑走路の運用方

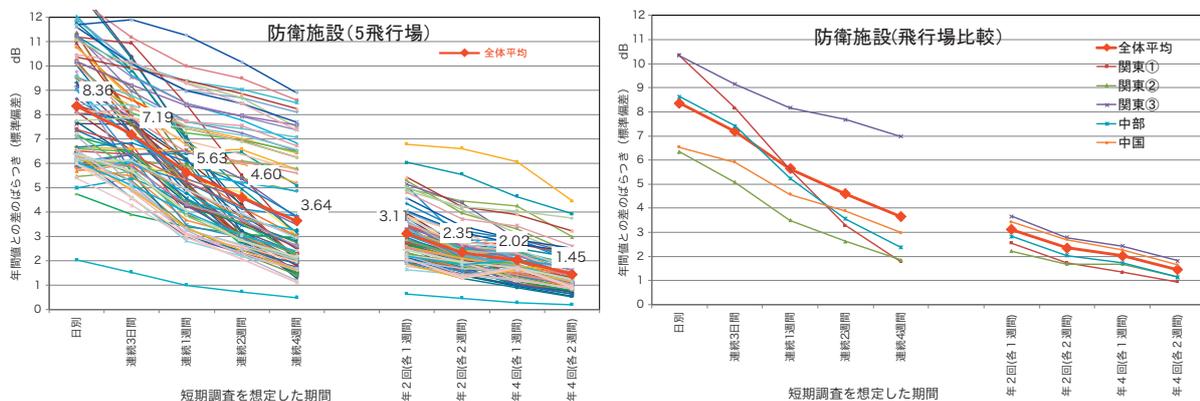


図-5 防衛施設における短期測定期間と年間値との差の推計 (左: 全飛行場、右: 飛行場別)

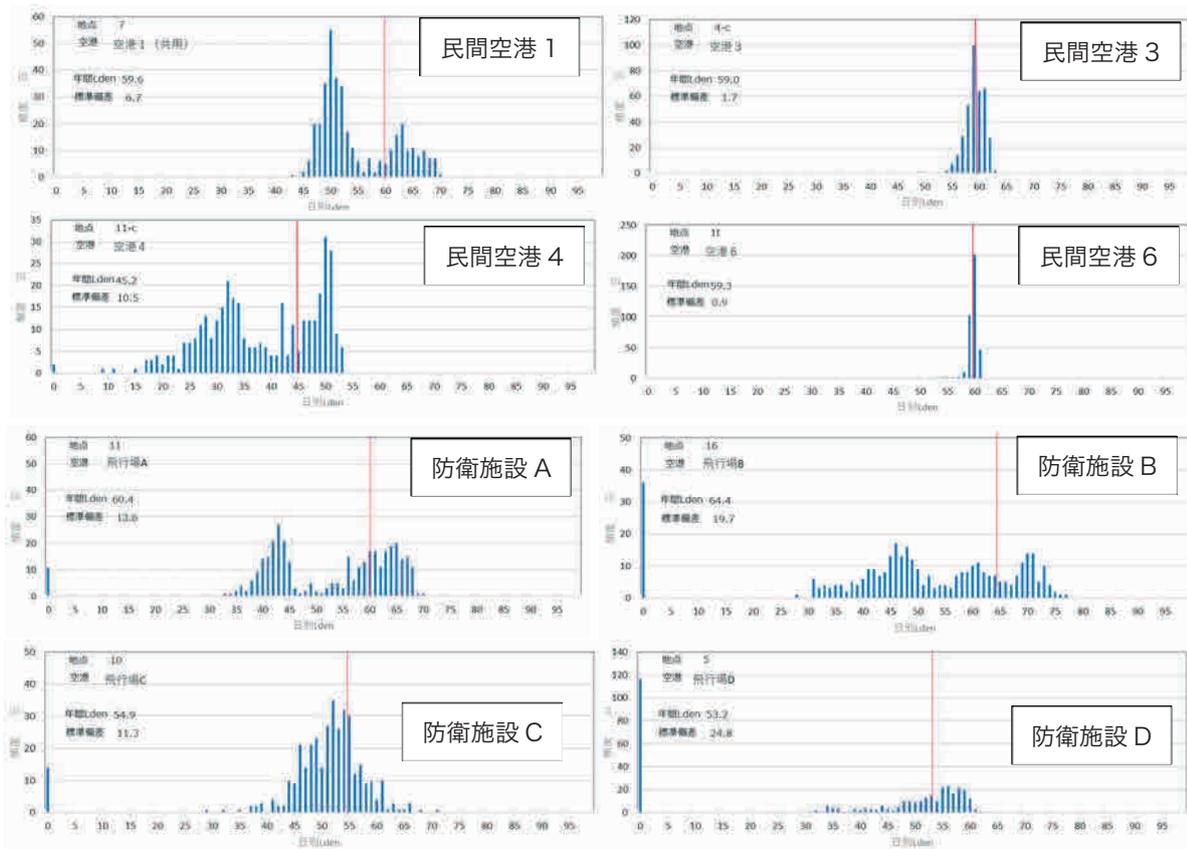


図-6 日別Ldenの頻度分布(年間)(民間空港及び防衛施設飛行場の代表例)

向が変化する空港で典型的な監視局の例で、着陸が主の日 L_{den} と離陸が主の日 L_{den} の2つに分布が分かれる。分布の中心は10dB程度の違いがある。民間空港3は季節で運用状況が変わるものの飛行経路下に位置するので離着陸による違いが少なく、結果として L_{den} 日較差は少ない。民間空港4は季節によって運航の状況が変わり、飛行経路も大きく変化する場合の例で、日 L_{den} は大きくばらつく。空港6は反対に滑走路運用方向がほぼ一定の空港で、日 L_{den} のばらつきは極めて少ない。

防衛施設の場合は民間空港と比べ、総じて日々の L_{den} の変動が極めて大きい。図-6の防衛施設AやBはその典型例である。騒音が発生しない日もあれば L_{den} が70dBを超える日もある。防衛施設Dでは騒音発生がない日も100日以上と多い。防衛施設Cは比較的 L_{den} の分布がまとまっている。それでも民間

空港の例に比べ分布の幅は広い。防衛施設飛行場の場合、滑走路運用方向の季節変化だけでなく、運航回数が日々大きく変化することが、日々の騒音暴露状況が民間空港に比べ幅広くなっていることに繋がる。

次に、適切な短期測定の実施時期を検討するために、同様の検討を季節別に分析した。それぞれの季節に限った期間で短期測定期間を想定した場合の年間値との差について季節間の違いがあるかどうかを見た。結果の表は省略するが、民間空港で短期測定の標準とする連続1週間を想定した場合、年間値との差のばらつきは冬季<秋季<春季<夏季の順に小さい。1週間で2季節繰り返した場合、夏季・冬季の組み合わせと春季・秋季の組み合わせの間に有意な差はなかった。防衛施設の場合も同様で、これらのことから、夏季・冬季にこだわる必要性は小さいと言える。

各地の常時監視局測定結果を用いて、短期測定の間隔長と回数による評価値の信頼性を検討した結果、短期測定の間隔長と回数について次のように考えられる。

- 民間空港の場合、滑走路の使用状況が年間を通じて大きな変化がない場合、年1回の1週間の短期測定でも信頼性を確保した評価値を得ることができる。この場合には秋季または冬季に測定を実施すると良い。
- 季節（または月）によって滑走路の使用状況が変化する場合は、1週間の短期測定を年2回繰り返したほうが評価値の信頼性は高まる。実施時期は例えば夏季と冬季、春季と秋季などとする。なお、特に十分な評価値の信頼性を望む場合には、季節ごとの年4回の短期測定が望ましい。
- 防衛施設では、航空機の運航状況が大きく変化し騒音暴露の状況も週ごと、季節ごとに大きく変化する。連続2週間の測定でも年間値との差のばらつきは民間空港の場合よりも大きい。2週間または4週間の測定を年2回繰り返せば差は2dB以下に小さくなる。できれば、2週間の測定を年4回繰り返せば評価値の信頼性が向上する。
- 民間空港・防衛施設ともに、短期測定結果を用いて年間推計 L_{den} を算出することが望ましい。
- 特に、季節によって滑走路の使用状況の変化があっても、短期測定を1回しか実施しない場合、短期測定結果を用いて年間推計 L_{den} を算出することが必要である。

4. 年間推計 L_{den} 算出で参照する通年測定点の目安

短期測定結果から年間平均 L_{den} 推計値を算出することが、さらに評価値の信頼性を向上させる有効な手段であり、マニュアルには推計方法を2とおり記載している。その一つは、短期測定点と相関の高い常時監視局を基準局として利用して年間値を推計する方式（以下、

基準局方式という）であり、他は対象飛行場の年間を通じた運航情報を利用して、短期測定で得られた離着陸・機種・経路別の平均騒音値から年間値を推計する方式（運航実績方式という）である。

このうち基準局方式について、マニュアルの説明を引用する。

当該測定地点の近傍に通年測定の測定地点（以下、「基準地点」という。）があり、観測される航空機の飛行状況が類似していれば、騒音暴露状況も類似していると仮定して、測定地点の短期測定で得られた結果から年間平均時間帯補正等価騒音レベルを推計することができる。基準地点 r における年間平均時間帯補正等価騒音レベル $L_{den,year,r}$ と基準地点 r における測定地点 m の短期測定と同一期間の時間帯補正等価騒音レベル $L_{den,short,r}$ との騒音レベルの差から、測定地点 m における年間平均時間帯補正等価騒音レベル $L_{den,year,m}$ を次式により推計することができる。

$$L_{den,year,m} = L_{den,short,m} + (L_{den,year,r} - L_{den,short,r})$$

ここに、 $L_{den,year,m}$ は測定地点 m における年間平均の L_{den} 、 $L_{den,short,m}$ は測定地点 m における短期測定の結果から得た L_{den} 、 $L_{den,year,r}$ は基準地点 r における年間平均の L_{den} 、 $L_{den,short,r}$ は基準地点 r における短期測定と同一期間の L_{den} である。

注記1 飛行状況と騒音暴露状況の類似性については、短期測定の測定期間内で日ごとの L_{den} の変化のパターンの類似を眺めたり相関係数を調べたりして判断できる。

注記2 この推計の信頼性は、当該測定地点と基準地点の騒音暴露の観測状況の類似性に依存するため、適切な基準地点を選ばなければならない。

この基準局方式による年間推計の場合、注記2に記載の基準局の適用基準は、現行マニ

アルに定性的なガイドラインしか示されていない。あらためて、適切な基準地点の選び方についてマニュアルを基に整理すると以下のとおりである。

①空港との位置関係

基準点と測定点は空港からの位置関係が同一方向（地域）であること。例えば、空港東側、空港西側、滑走路側方の地域などで区分する。

②主たる騒音影響を及ぼす飛行経路が同一であること

③飛行経路との位置関係

- 経路下の地点、経路側方、滑走路側方の地点で区別する。経路下とは航空機への上げ仰角が概ね 60° 以上の場合をいう。
- 経路側方地点の場合、飛行経路から同じ側の側方エリアに属するもの。
- 滑走路側方地点の場合、滑走路との位置関係が同じ方向であるもの。
- 同一の位置関係同士ならば両地点の関係性は高い。
- 経路との位置関係が異なるグループである場合は、両地点に強い関係性があること前提とする。

このように、定性的なガイドラインとしての基準局の適用基準に加え、その適用が妥当か否かについて定量的なガイドラインが必要であることが、課題として挙げられたわけである。このため、基準となりうる常時監視局の選定方法について数値的（相関係数）な目安を以下に依り検討した。

- (1) 全国各地の航空機騒音常時監視結果の提供を受けた。測定結果は常時監視局の位置関係とともに、日々の L_{den} を取得した。
- (2) 複数の常時監視局がある代表的な空港・飛行場（4つの民間空港と2つの防衛施設飛行場）において、ある常時監視局を短期測定点に見立て、周辺の別の常時監視局を基準局に見立てる。両者の相関係数を得た。
- (3) 基準局方式で目安とする相関係数の算出

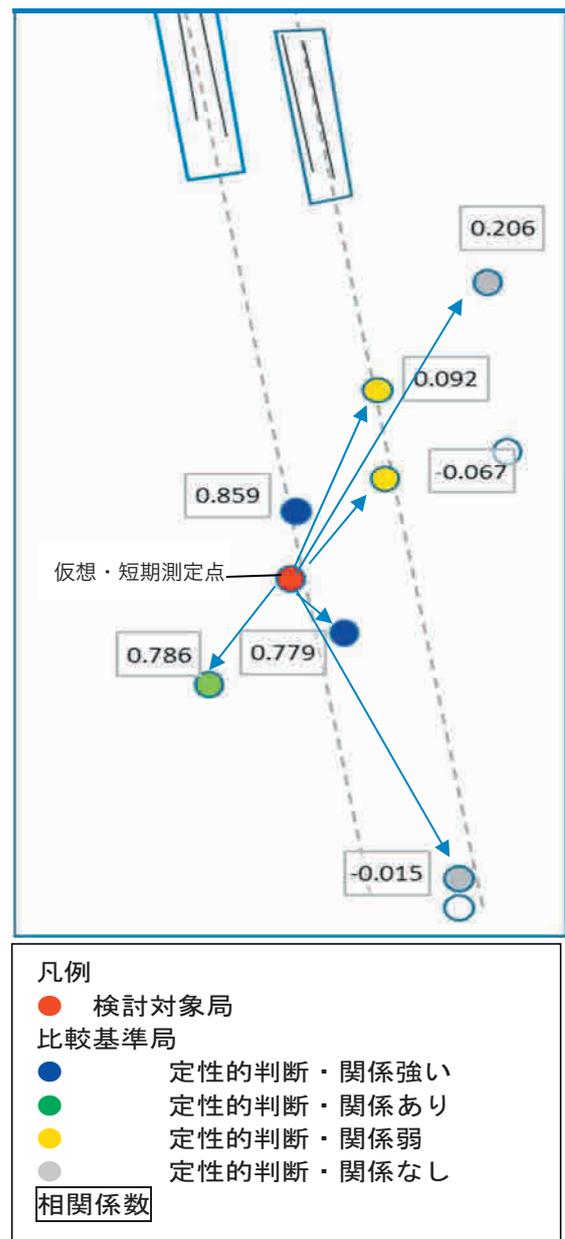


図-7 基準局方式による年間推計の、適正な基準局目安を検討するための相関係数算出の例

に当たっては、測定点の位置関係を吟味し、これまでの定性的な観点から基準局に合う場合と不適の場合を区別して解析した。

図-7はその算出例である。●は仮想・短期測定点と見立てる検討対象の常時監視局、●は定性的判断のガイドラインに基づき関係性が強いと判断したもの、●は関係ありとしたもので、これらは基準局として参照することが可能と考えるものである。さらに定性的判断では関係が弱い●もしくは関係なし●とし

た局も含め比較対象局を選定し、民間空港は1週間、防衛施設は2週間の日々のLdenをもとに相関係数を算出する。算定開始期間を1日ずつずらして検討するため、年間で359または352の相関係数が得られる。図の四角囲み数値はその平均値を示している。

このようにして、測定点の位置関係を吟味し、マニュアルが示唆する定性的な観点から基準局に適用の場合と不適の場合を区別して解析した結果を表-2に示す。定性的区分で基準局として適正と判断した場合(表の◎)の相関係数は平均0.862だった。民間空港のほうが防衛施設より少し高い。また、経路との地域関係(直下・側方)を越えて基準局としての適正さを担保できる範囲(表中の○)としては相関係数0.734だった。また、民間空港では関係が弱いまたは関係なしと定性的に判断した場合の相関係数はそれぞれ0.386と0.163であり、関係性ありと判断した場合に比べ格段に小さい。しかし、防衛施設のそれでは0.594と0.647であり、関係性ありと判断した0.717に比べ明確な差はない。防衛施設の場合は、日ごとに運航回数が大きく異なるため、この変化が飛行場周辺全体での騒音暴露の変化と相関を持つためと推察される。

このような検討の結果から、基準局と考える測定局との定性的な関係を踏まえたうえで、民間空港の場合、両者の相関関係はできれば0.85以上、少なくとも0.7以上がその判断目安とすることができる。また、防衛施設の場合、相関係数0.8以上が望ましいものの、相

関係数で0.6以上としても評価値の信頼性向上に資することが分かった。

5. まとめ

短期測定の実施時期と回数の違いによる航空機騒音評価値の信頼性への影響を調べた。

全国の空港の滑走路運用方向が季節によってどの程度変化しているかを調べた結果、滑走路が南北方向に位置する空港では、月別の運用方向変化がいくつかのパターンに分類できるのに対し、東西方向に位置する空港では、傾向がはっきりしなかった。南北方向に位置する空港のほうが、滑走路運用方向の変化が短期測定の実施時期による違いに影響を及ぼす程度が小さいことが示唆された。

様々な種別の飛行場における常時監視の実測データを用いて、航空機騒音の評価値との差(ばらつき)が測定期間長に応じてどのように変化するか調べた。その結果、民間空港では1週間の測定を2回または4回繰り返すこと、防衛施設では2週間の測定を4回繰り返すことが短期測定による評価値の信頼性を高くする。ただし、空港・飛行場ごとに様子が異なっていた。また、季節により測定を繰り返す場合、夏季・冬季の組合せが他の季節の組合せよりも優位に信頼性が高いわけではないことも分かった。さらに、短期測定の結果から年間平均Lden推計を行う場合に基準地点として活用できる通年測定点の有効な目安についても検討した。対象測定点と基準局と考える測定局との定性的な関係を踏まえた

表-2 基準局となりうる測定局選定のための相関係数分析(総括)

	定性的区分(マニュアルが示す定性的ガイドラインによる基準局としての適否)							
	関係強い◎ (基準局として適正)		関係あり○ (基準局として適正)		関係弱い△ (基準局として不可)		関係なし× (基準局として不可)	
	n	相関係数	n	相関係数	n	相関係数	n	相関係数
すべて	41	0.862	57	0.734	69	0.458	99	0.305
民間空港	28	0.882	31	0.748	45	0.386	70	0.163
防衛施設	13	0.819	26	0.717	24	0.594	29	0.647

うえで、民間空港の場合少なくとも相関係数が0.7以上、防衛施設の場合0.6以上の測定局を対象にできることが分かった。

あとがきと謝辞

本報告は、公益社団法人日本騒音制御工学会が実施した平成28年度の環境省請負業務「航空機騒音測定・評価方法に関する検討調査業務」の検討結果をもとに行ったものであ

る。また、本検討のために空港の運航実績や航空機騒音常時監視結果をご提供いただいた自治体及び空港管理者の方々に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 航空機騒音測定・評価マニュアル、環境省、平成27年10月
- 2) (公社)日本騒音制御工学会、環境省請負業務「平成28年度航空機騒音測定・評価方法に関する検討調査業務」報告書、平成29年3月

研究報告

航空機騒音の測定・評価に及ぼす季節で変化する要因の考察* ～セミなどの自然音の実態と評価値への影響～

篠原直明

1. はじめに

平成19年12月、環境省は「航空機騒音に係る環境基準」の一部改正を告示し、平成25年4月から施行した。これに伴い、航空機騒音の評価指標がWECPNLから L_{den} へと変更になり、その算出の基本である単発騒音の指標は最大騒音レベル(L_{ASmax})から単発騒音暴露レベル(L_{AE})に変わった。これにより、従前よりもさらに暗騒音や他の重畳する騒音との関係に注意しなければならなくなった。このため、標準的・統一的な方法の記述によって評価値の信頼性を確保するために、環境省は「航空機騒音測定・評価マニュアル¹⁾(以下「マニュアル」という。)」を発行した。平成25年度より航空機騒音に係る環境基準の達成状況を把握するための測定は、測定マニュアルに基づく新しい測定・評価方法で実施されているが、測定マニュアルでは記述の不足により判断に迷う事例や対応が難しい事例があること、当初想定されなかった課題なども明らかになり、環境省はそれらへの対応方針の検討を進めている²⁾ところである。

航空機騒音の発生源対策が進んだ結果、単発の航空機騒音はこの30～40年で10dB程度低下した。しかしそれは、測定評価の際に暗騒音との差が十分でない航空機騒音が多くなっていることでもある。特に、夏のセミや秋の虫などの自然音によって暗騒音が上昇し、航空機騒音が区別できないことが多く発生している。そこで、セミなどの自然音の実態と評価値への影響について、全国各地の航空機騒音常時監視結果をもとに季節によって変化

する暗騒音の実態を調べ、航空機騒音の評価値への影響を検討した。本稿は、それらを取りまとめた結果に加え、季節間で航空機騒音観測結果の変動する要因について考察を加えた。

2. 各地の空港の季節別暗騒音の状況

環境省が進めている航空機騒音測定・評価の課題を検討²⁾する中で、全国各地の、空港周辺の自治体や空港管理者が設置する航空機騒音常時監視の測定データの提供を受けた。この中で24時間にわたって瞬時騒音データの提供を受けた測定結果を対象に、季節の違いによる暗騒音の変化の状況を把握することを試みた。セミの鳴き声などの自然音は定常的な騒音レベル変動を示すことが多いので、環境騒音のうち残留騒音レベルにその影響が現れると想定される。このため、データ処理は原則として常時監視局ごとの24時間にわたる1秒ごとの騒音瞬時データに基づき、 $L_{90,10min}$ を連続的に算出した。対象とした空港と常時監視局の情報は表-1に示す。四季の代表として、春季は5月、夏季は8月、秋季は10月、冬季は2月のそれぞれ月上旬のうち、降雨がなく強風が吹いていない日を空港ごとに1日ずつ選定した。

図-1左は北海道地方の大規模空港周辺のある監視局の例である。特に季節によって暗騒音が変わる様子はない。他の監視局でも顕著な季節変化はなかった。右図は信越地方の中規模空港周辺の例を示す。夏季や春季に短時間の暗騒音変動があるが、季節によって特徴的な変化ではない。

* Consideration of seasonal factors on measurement and evaluation of aircraft noise
- Influence of seasonally background noise for evaluation value of aircraft noise -

** 航空環境研究センター所長

表 -1 分析対象の空港一覧

空港	規模・区分	瞬時データ	対象測定局数 (分析数)
北海道	共用・大規模	$L_{AS,1s}$	18
信越	小規模	$L_{AS,1s}$	2
関東①	大規模 (郊外)	$L_{AS,1s}$	102 (15)
関東②	大規模	$L_{AS,1s}$	17 (15)
近畿	大規模	×(航空機騒音測定結果に 付随する暗騒音を分析)	11
中国	共用 (防衛が主)	$L_{AS,1s}$	20
九州	大規模	$L_{AS,1s}$	2

図-2は関東地方の郊外に位置する大規模空港である。季節変化のある極端な事例として、田園地帯に位置する監視局2局の様子を示した。夏季の日中には日の出とともにセミが鳴き始め、暗騒音は60dB程度に上昇する。関東地方の盛夏には、日中はアブラゼミやミンミンゼミが、夕暮れ以降はヒグラシがなく。春先に田植えのために水田に水が張られるとカエルが活発に鳴き始める。雨が降っていない日は、日が暮れるとカエルの合唱が始まる。日没後1時間程度が最も活発で、その後少しずつ治まっていくが朝まで鳴きやむことはない。秋の夜にはコオロギや鈴虫などの鳴き声が観測される。これらの古来種に加えアオマツムシなど樹木で鳴く虫もあり暗騒音は大きく上昇することがある。その時間変化はカエルと似かよっており、日没後1時間程度の時期を最高に徐々に治まる。なお、この内陸部に位置する空港の周辺には102の騒音監視局があり、そのうち15の局をサンプルとして選んだ。図例とした2つは最も影響が大きい例だが、夏季のセミの鳴き声が顕著に観測されるのは7局、同様に春のカエルは7局、とおおよそ半数の監視局で観測されている。郊外の自然豊かな地域では、季節により大きく音環境が変化している。

図-3は別の関東地方の大規模空港②周辺のある監視局の例である。左図は比較的郊外の住宅地にある監視局の残留騒音季節変化を表

す。夏季にはセミの鳴き声で日中の暗騒音が50～55dBに上昇している。秋季の日の入り後にも一時的に虫の音によって暗騒音は上昇するが長くは続いておらず、空港①ほど顕著ではない。右図は都市域の市街地にある監視局のものを示す。季節による違いはほとんど見られない。この都市部にあるこの空港の15の監視局を対象に分析したが、夏季にセミの鳴き声による暗騒音の変化が見られたのは7局だったが、いずれも郊外に近い地域で、その騒音レベルは空港①よりは小さかった。

図-4は中国地方にある共用飛行場周辺の季節変化の例である。図例とした2局とも同様の季節変化を示す。夏季には関東とは異なる顕著な騒音変化が見える。日の出とともにクマゼミが鳴き始め、11時ころに治まる。一部は夕方まで継続的に鳴くがその個体数は減少するようだ。秋の虫の音も観測されるが騒音レベルはさほど大きくない。なお、クマゼミの鳴き声が顕著に観測されたのは全20地点のうち12か所と半数以上を占める。秋の虫は7か所と半数以下だった。

図-5左は九州地方の大規模空港の常時監視測定例で、日の出と同時にクマゼミの大合唱が起こり、日暮れまで続く。しかし、猛暑になる午前11時ころには少し治まる。他の季節には顕著な自然音はなかった。右図は近畿地方の大規模空港の一例である。やはり午前中にはクマゼミによって暗騒音が上昇している。

このように、航空機騒音の常時監視局の測定データを利用して、国内各地の自然音の事例を調べた。東北・中部・沖縄など今回の事例にない地域もあるが、総じていえば、関東地方より以西(以南)では、四季によって自然音による暗騒音の変化があることが分かった。夏季のセミが代表例で、種別が変わるものの各地でその鳴き声は観測されている。郊外の地域では、秋の虫の音や春先の田んぼのカエルなども観測された。

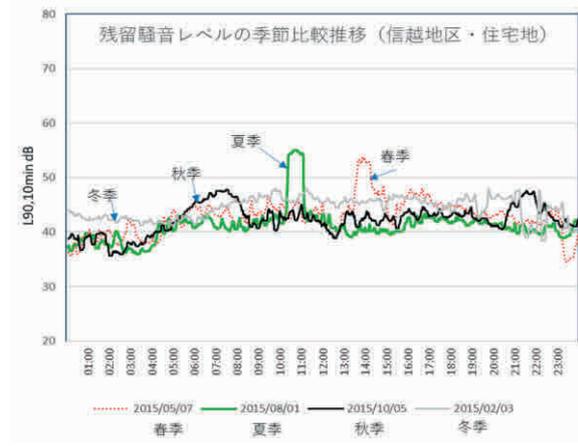
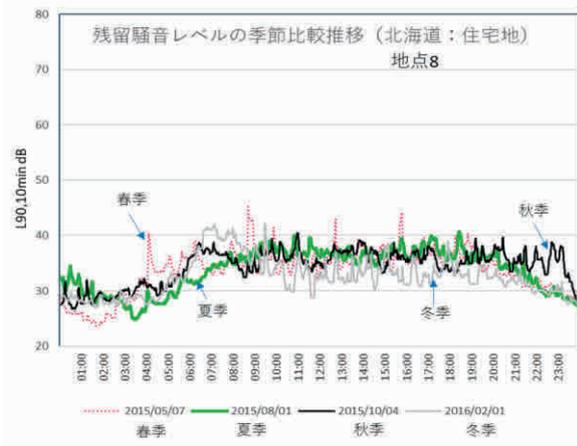


図-1 空港周辺の季節別の暗騒音（残留騒音）比較 左：北海道地区、右：信越地区の例

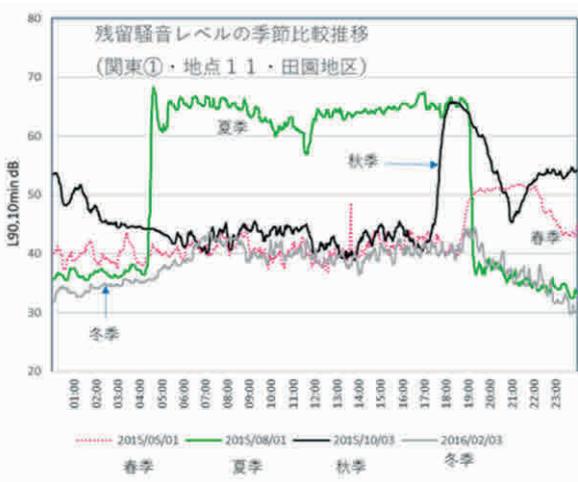
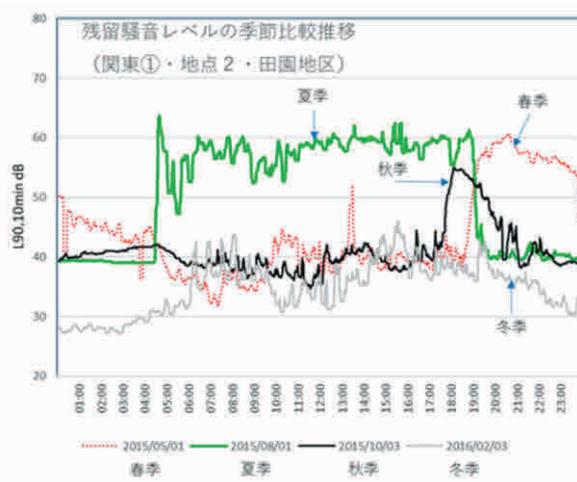


図-2 空港周辺の季節別の暗騒音（残留騒音）比較 関東地区・空港①の例



図-3 空港周辺の季節別の暗騒音（残留騒音）比較 関東地区・空港②の例

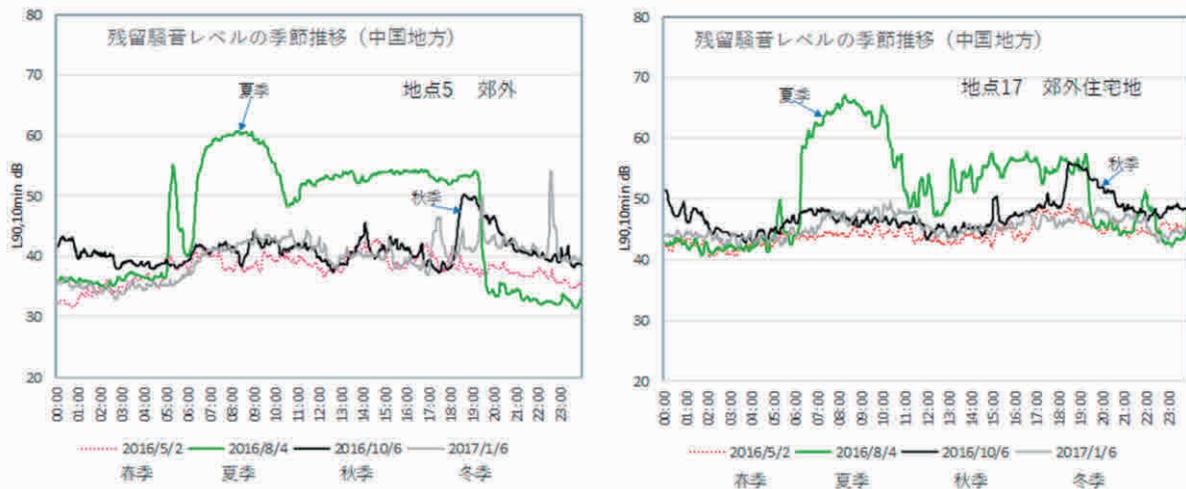
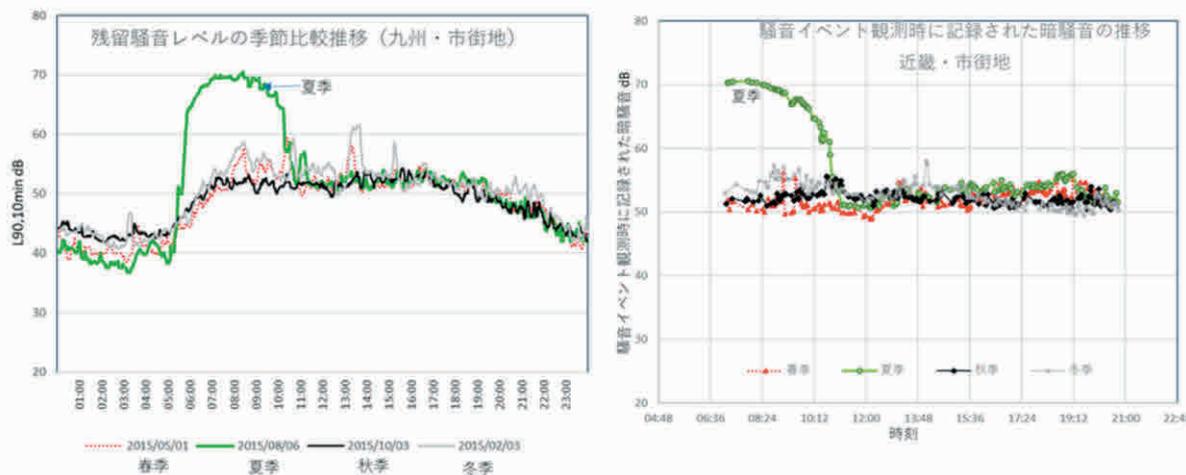


図-4 空港周辺の季節別の暗騒音（残留騒音）比較 中国地方の例

図-5 空港周辺の季節別の暗騒音（残留騒音）比較 左：九州地方の例
右：近畿地方の例（騒音観測イベントに記録された暗騒音の推移）

3. 周波数特性から見た自然音の特徴

常時監視とは別に筆者らが関東地方郊外で測定した結果から、季節による自然音の周波数特性を分析した。セミや虫などの自然音は、特徴的な周波数帯域で卓越する。図-6はその例である。上図は夏季に鳴くセミの例だが、限られた種にとどまることはご容赦いただきたい。ニイニイゼミやアブラゼミは5k～8kHzに、夕暮れ以降に鳴くヒグラシは2k～5kHzに卓越した成分を持つ。

中図は秋の虫の音である。4kHz付近のコオロギ系と、10k～16kHzと高周波帯域に主

成分を持つキリギリス系に分類されるようだが、筆者は詳しく承知していないので、種の特特定まではできない。初夏から地中でなくオケラの類は8k～10kHzが卓越する。余談だが、騒音計で対象周波数範囲が異なる精密級と普通級では暗騒音レベルに違いがあるかもしれない。

下図は、春先のカエルの例だが、種別はわからない。関東地方郊外に一般的に存在するアマガエルかアカガエルの類だと思われる。卓越する周波数は、セミや虫より帯域が低く1k～5kHzの範囲である。

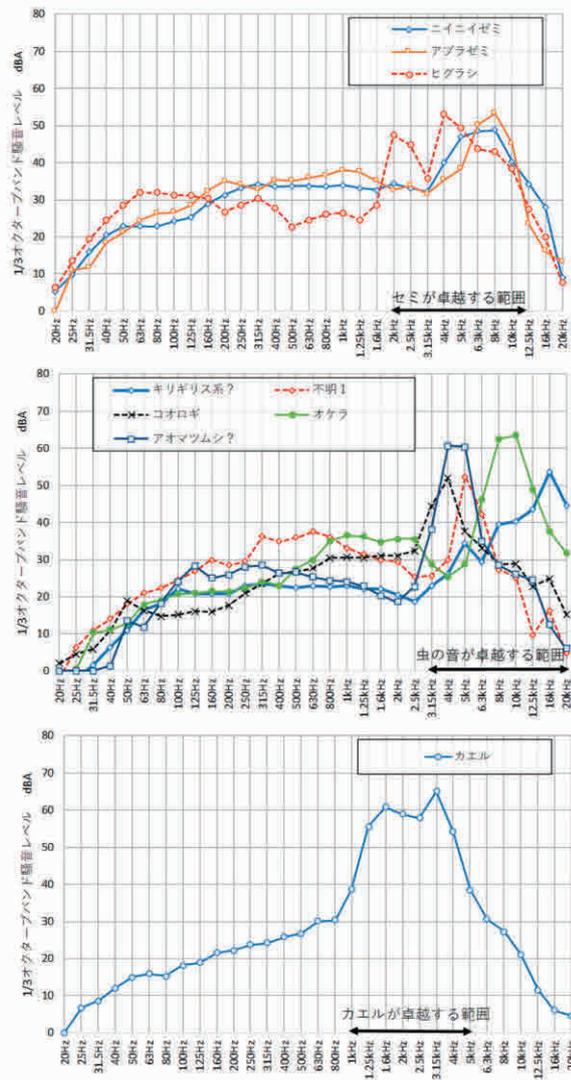


図-6 関東地方郊外の自然音の周波数特性
(上：夏のセミ、中：秋の虫、下：春のカエル)

4. 航空機騒音の周波数特性との比較

図-7には航空機騒音と自然音の周波数特性の比較をした。航空機騒音は代表例として、ジェット旅客機の離陸と着陸が空港に比較的近い場所と比較的遠い場所の経路下で観測した結果を示す。自然音は夏季のセミ（アブラゼミ）、秋季の虫の音（アオマツムシ）、春季のカエルを代表例として図示した。航空機騒音はA特性音圧で眺めると500～2kHzを中心とした広帯域雑音である。セミや虫の音で卓越する2kHz以上の高帯域成分では、航空機騒音の成分は相対的に小さく、およそ両者は別の領域と区別できるだろう。しかし、

特に着陸時の空港近傍地点では、4kHz付近には航空機騒音の L_{ASmax} を左右する成分が残っている。また、カエルの鳴き声は1.25kHz付近から卓越成分を持つので、航空機騒音の主成分と周波数帯域が一部で重なっている。

このため、航空機騒音と自然音との分離の可否は自然音の種類と航空機騒音の測定位置（航空機との距離が遠くなるほど高周波成分が相対的に減衰する）に依存することが判明した。

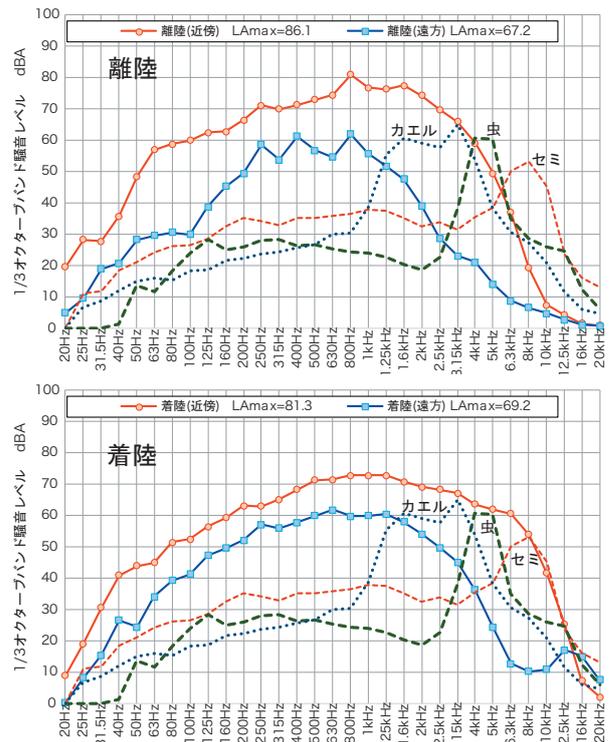


図-7 航空機騒音と自然音の周波数特性の比較
(上：離陸騒音、下：着陸騒音、代表例)

5. 自然音による暗騒音上昇が航空機騒音評価値へ及ぼす影響の推定

夏季のクマゼミは早朝から午前11時頃までにかけて最も活発に鳴いている。一方、関東地方のセミの鳴き声は日の出から日没後まで長い時間にわたって暗騒音が上昇することが多い。また、この地方では秋の虫の音や春のカエルも活発だった。このことから、関東地方の自然音が航空機騒音の評価値に与える影響が大きい可能性があり、本節ではそれらがどの程度 L_{den} に影響をきたすのかについて

試算するとともに、セミや秋の虫の音が主の高周波帯域を除外した場合の航空機騒音測定の有効性についても調べた。

図-8の例はセミの鳴き声が混入した際の L_{ASmax} の周波数特性(上図)、および下図には L_{AS} 、500Hz(航空機騒音の成分が強い)、8kHz(セミの音の主成分)を時刻変動図として示した。併せてセミの影響が極めて強くなる4kHz以上の高周波帯域を除外して計算した L_{AS} も記した。下図から、騒音計が観測した L_{AS} では暗騒音と L_{ASmax} の間に10dBの差がなく、環境基準の評価に従えば航空機騒音の評価対象とはならない。一方で、セミの影響を排除した4kHz以上を除外した L_{AS} では暗騒音との間に10dB以上の差ができ、また合成した L_{ASmax} の値も観測した L_{ASmax} のほとんど差がない。

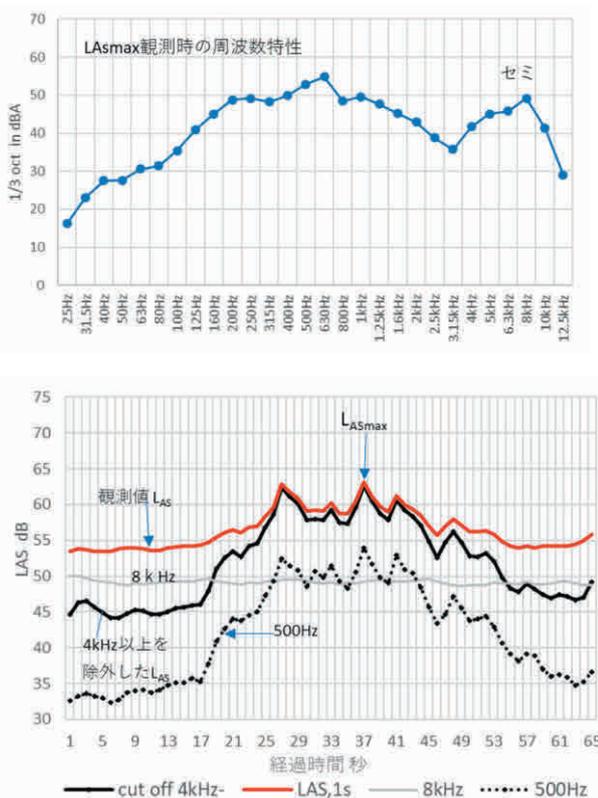


図-8(上) セミの音が混入した航空機騒音 L_{ASmax} の例、(下) 騒音レベルと500Hz, 8kHzの時間変化

このように、セミによって暗騒音が上昇したとしても、高周波帯域を除外してA特性レ

ベルを得ればその影響を排除できるかもしれない。本検討では関東地方大規模空港①の3か所の短期測定点を選び、それぞれの地点について、測定された騒音レベルと4 kHz以上の高周波帯域を除外して合成した騒音レベルの結果を比較した。それぞれの地点の特徴は以下の通り。

- 地点1: 飛行経路下で航空機騒音は80dB程度と大きい。日中のセミは60dB程度で活発だが、S/Nは確保できる。
- 地点2: 飛行経路側方で航空機騒音は50～70dB程度。セミの音は55dB程度、このため航空機騒音が暗騒音+10dB未満となって評価対象外になってしまうものも多い。
- 地点3: 飛行経路側方でセミなどの影響要因はなくS/Nは十分確保できる。航空機騒音は55～75dB、暗騒音は40dB程度。

検討結果を表-2に示す。セミの影響を最も強く受けるのは暗騒音との差が最も少なくなってしまう地点2である。4 kHz以上を除外することによって、対象回数は大きく増加した。ただしその多くは50～60 dBで、この地点では相対的に小さい騒音であるため、 L_{den} は+0.3 dB増にとどまる。セミの影響があっても航空機騒音が大きい地点である地点1では、発生回数の変化はないが、単発騒音と L_{den} は-0.3 dB下がった。この要因として、航空機が頭上を通過するこの地点では、4 kHz以上の帯域にも航空機騒音が寄与する成分が残っているため、4 kHzを除外対象とする境界設定が適切でないことによる。一方、飛行経路の側方で航空機の通過位置から距離のある地点3では、4 kHzを境界としてそれ以上を除外しても測定したA特性騒音と除外後合成したA特性騒音は変わらない、測定回数・ L_{den} ・ L_{Amax} などに差はなかった。

次に、夕方から夜間にかけての虫の音の影響を受ける地点(関東地方大規模空港①の滑走路側方の短期測定点5地点)について、先のケースと同様に高周波帯域を除外してA特

表-2 日中のセミによる航空機騒音評価値への影響試算例（関東地方大規模空港①）

8月中旬の1日		評価指標		騒音レベル		発生回数				
		Lden	WECPNL	LAmaz	LAE	計	N1	N2	N3	N4
地点1	測定結果	64.8	77.7	79.1	88.1	218	14	197	6	1
	4kHz除外	64.5	77.4	78.8	87.9	218	14	197	6	1
	比較	-0.3	-0.3	-0.3	-0.2	0	0	0	0	0
地点2	測定結果	51.1	62.0	64.9	76.6	143		97	42	4
	4kHz除外	51.4	63.0	63.1	74.5	257	10	196	42	6
	比較	+0.3	+1.0	-1.8	-2.1	+114	+10	+99	0	+2
地点3	測定結果	55.3	66.2	66.0	77.3	341	14	307	16	4
	4kHz除外	55.3	66.2	66.0	77.3	341	14	307	16	4
	比較	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	0

表-3 夕方以降の虫の音による航空機騒音評価値への影響試算例（関東地方大規模空港①）

8月下旬の2日間		評価指標		騒音レベル		発生回数				
		Lden	WECPNL	LAmaz	LAE	計	N1	N2	N3	N4
地点A	測定結果	56.6	69.9	70.4	80.3	533	17	454	51	11
	4kHz除外	56.7	70.2	70.0	79.9	589	17	466	95	11
	比較	+0.1	+0.3	-0.4	-0.4	+56	0	+12	+44	0
地点B	測定結果	53.7	67.1	70.8	80.4	307	3	279	19	6
	4kHz除外	54.4	67.7	70.5	80.2	344	3	285	50	6
	比較	+0.7	+0.6	-0.3	-0.2	+37	0	+6	+31	0
地点C	測定結果	51.6	65.5	68.7	77.9	315	4	274	28	9
	4kHz除外	52.0	66.0	68.4	77.5	356	4	282	61	9
	比較	+0.4	+0.5	-0.3	-0.4	+41	0	+8	+33	0
地点D	測定結果	49.6	62.5	64.2	73.5	410	5	355	31	19
	4kHz除外	49.8	62.9	63.7	73.0	467	5	367	76	19
	比較	+0.2	+0.4	-0.5	-0.5	+57	0	+12	+45	0
地点E	測定結果	53.8	67.0	67.6	76.4	474	8	387	57	22
	4kHz除外	54.0	67.3	67.2	75.9	533	8	395	99	22
	比較	+0.2	+0.3	-0.4	-0.5	+59	0	+8	+42	0

性音圧を合成した結果と比較した。種類にもよるが虫の音は4k～10kHzに卓越周波数を持つ場合が多く、対象地点で観測される航空機騒音は500Hz前後が主成分であることから、周波数帯域での分離が可能な状況だった。

秋の虫による暗騒音の上昇が航空機騒音の評価値に及ぼす影響を試算の結果を表-3に示す4kHz以上の高周波帯域を除外することによって、対象回数は各地点で40～60回程度増加した。ただしその多くは対象地点では相対的に小さい騒音であるため、平均騒音値は0.3～0.5dB程度小さくなった。反面、日

暮れ以降に活発化する秋の虫は、「夕方」の時間帯（N3帯19:00～21:59、単発騒音に+5dBの重みづけをする）の航空機騒音の観測に影響するものが多いため、 L_{den} は+0.2～0.7dB増加した。地点Bを除けば他の地点は0.5dB以下の影響にとどまっている。

6. 自然音の取り扱いに関する考察

ここでは、航空機騒音を測定・評価するうえで、セミや虫などによる定常的なレベル上昇を伴う自然音の取り扱いについて考え方を整理しておきたい。

通年測定を実施している航空機騒音の常時監視の場合、測定できなかったものを妨害要素として取り扱うことは難しいだろう。例えば50dBの道路騒音なのか50dBの自然音なのかを判別できない。そもそも50dBを影響のある暗騒音レベルとすることができるか？したがって、自然音は暗騒音として取り扱うことしかできない。

ここまでの検討では、自然音の影響が最も大きい地域でも、セミや虫の音による影響を考慮したとしても大多数はLdenに対して0.5dB以下の影響であることが示唆されている。

セミなどの自然音の特徴として4kHz以上の高周波帯域に主成分を持つものが多い。一方、航空機騒音の主成分は500～2kHzあたりであることが多い。このため、自然音の影響を排除するために高周波帯域を除外して合成した騒音レベルを用いることは、多数の場合有効に働くだらう。しかし、高周波帯域を除外する境界周波数を決めるのは簡単ではない（カエルなど2kHz付近に主要因がある自然音も存在する）。短期測定などでどうしても自然音の影響を排除したい場合もあるかもしれない。これらの処置は、そうした場合に限って特例的に有効なものとする。

以上の考察から、自然音は暗騒音であり、妨害音とは考えないとして考えざるを得ない。しかし、あまりにも影響が大きく評価値の信頼性を低下させることは好ましくない。したがって、第一には、できるだけ自然音が近接して発生するような測定環境を避けること心がけるべきであろう。特に常時監視の場合には四季を通じた環境騒音の状況を想定して場所を決めることが重要である。

7. 季節による観測騒音の違いの考察

本節では、季節によって観測される航空機騒音の大きさは変化するかについて検討するため、関東①大規模空港の測定結果を調べた。図-9は飛行経路下付近に位置する常時監視局

のうち6つを選択しその月別変動をグラフ化したものである。局ごとに年平均値を基準に月別で相対化したもので、2004～2014年の年ごとの結果を更に平均した。滑走路・離着陸別の平均騒音値（最大騒音レベルの平均）をみると、年間平均値を基準に±0.5dB程度の範囲だが変化があることがわかる。年間平均に比べて、夏と冬が少し小さく、春と秋が少し大きい傾向がうかがわれる。なぜ、季節的な変化が生まれるのだろうか？ここでは伝搬過程の空気吸収量に着目し検討した。

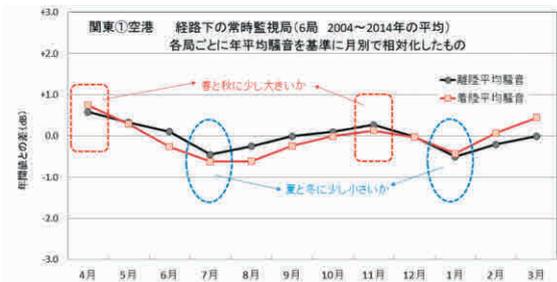


図-9 離着陸別航空機騒音の月別平均推移

滑走路端の経路下で別途測定した機種別の周波数特性をもとに作成した1m換算音源データにより、距離減衰と季節（月）に応じた平均気温・湿度に基づく空気吸収量を加味した。図-10はその結果で運航機数が多く騒音影響の面でも主となるB777型を対象に、通過高度は1200mと仮定した。空気吸収量は月別の平均温度・平均湿度をもとにJIS Z 8738により計算した。受音点での周波数特性を推定した結果から、夏季の高温時は、2kHz以上の高周波帯域の減衰が少ない反面、A特性に寄与する500～1kHzの減衰が多い。冬季は2kHz以上の高周波帯域における減衰が他の季節に比べて格段に大きい。図-11は推定した平均騒音値の月別変動グラフだが、この結果による月別の推移傾向は、図-9に示した常時監視局の観測結果に基づく月別平均騒音値の変化傾向とおおよそ一致する。

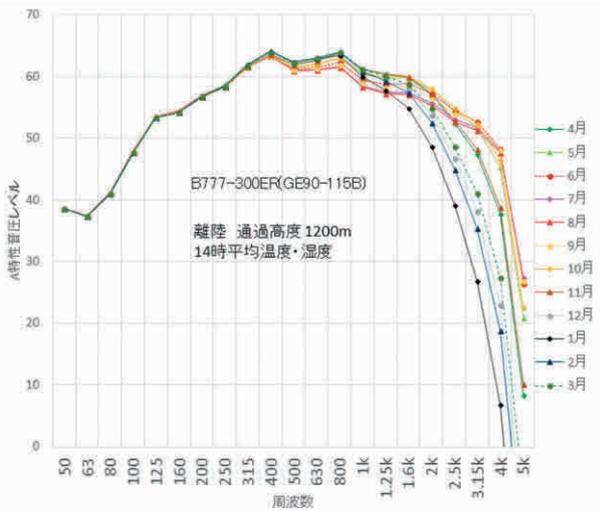


図-10 平均温度・湿度を考慮した機種別周波数特性の推定 (音源特性から推定した結果)

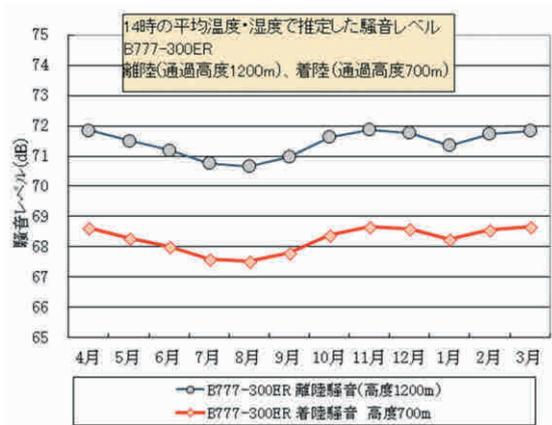


図-11 平均温度・湿度を考慮した推定した月別平均騒音の推移 (関東① B777-300ER)

図-12は同じように各地の月別の平均温度と湿度を用いてB777の騒音レベルを推定計算したものである。札幌の例では図-11の関東①の例と変動が近い。それ以外は、夏には、少し騒音レベルが小さくなる傾向もあるが、明確ではない。

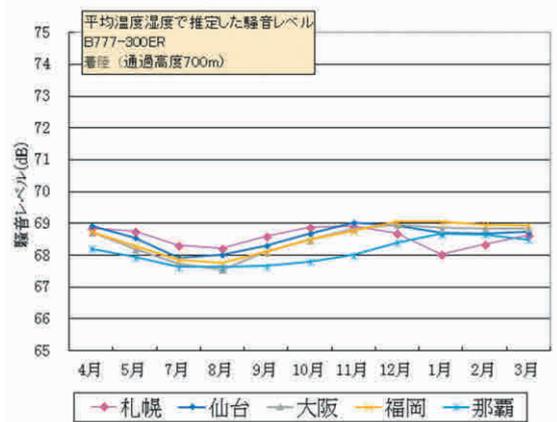


図-12 各地の平均温度・湿度を考慮した推定した月別平均騒音の推移 (着陸、B777)

図-13には、他の空港で実際に常時監視局で観測した結果の月別推移を示す。上図は関東②空港の着陸経路下の例で、下図は近畿の空港の離陸経路下の例である。どちらの空港も年平均値を基準として±0.5dB程度の月別変化が見られる。しかし、図-9 関東①の実測観測例や図-11の計算例ほど季節や月で明確な変化は確認できなかった。

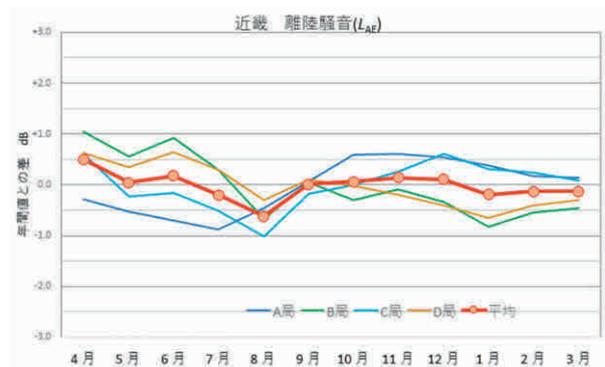
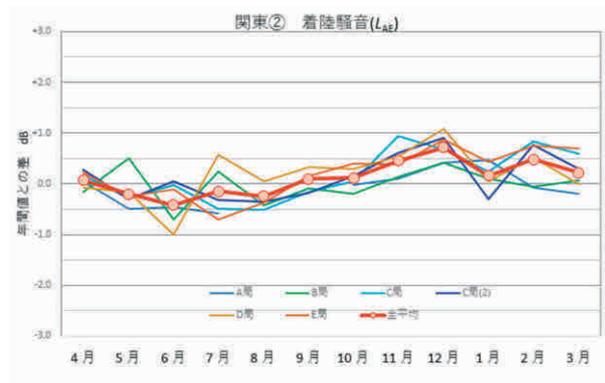


図-13 他空港での航空機騒音の月別平均推移
上図：関東②空港、下図：近畿

8. まとめ

自然音による暗騒音の季節変化と航空機騒音測定・評価への影響を把握するため、さまざまな空港周辺での観測事例などを利用して検討を行った。

まず、セミや虫などの季節で変化する自然音の実態を各地の事例で調べた。北海道地方や信越地方では季節で変化する自然音による航空機騒音測定への影響はほとんどなかった。関東地方では夏季のセミの影響が大きくなる。早朝から日没後まで航空機騒音の識別に影響を及ぼすことが多い。また郊外では、春先に水田で鳴くカエルや秋の虫の音が日没以降の時間帯で影響を及ぼしている。それらは、市街化されている地域では、郊外より影響は少ないこともわかった。関東地方には少ないクマゼミが近畿以西（以南）では頻繁に観測される。中国地方や九州の観測例から、早朝から午前11時くらいまでが最も活発でその後は落ち着くため、航空機騒音測定への影響は相対的に関東地方より大きくない。

自然音の影響が最も大きい関東地方の郊外での測定結果をもとに、セミや虫の音による評価値への影響を検討した。その結果、多くは L_{den} に対して0.5 dB以下の影響であることがわかった。セミや虫の音は高周波帯域に卓越した周波数を持ち定常的に継続する。種類にもよるが4 kHz以上に主成分を持つ場合が多い。一方、航空機騒音の主成分は500～2 kHzあたりであることが多い。このため自然音の影響を排除するために高周波帯域を除外して合成した騒音レベルを用いる手法も、多くの場合有効に働くことも分かったが、こうした処置は簡単ではなく課題も多いため、短期測定などでどうしても自然音の影響を排

除したい場合に限って特例的に有効なものと考えられる。

季節別に観測される騒音がどの程度変化しているかについても検討した。常時監視測定結果を利用した、関東地方の空港①の例では、変化の幅は±0.5dB程度とわずかだが、夏季と冬季に平均騒音値が少し低く、春季と秋季にはそれが少し高い傾向が見られた。航空機騒音の周波数特性をもとに検討すると、それらの変化の要因は温度と湿度の変化による空気吸収量の違いが季節間の違いになって表れているものと想定された。しかし、関東①以外の空港の常時監視結果では、月別に平均騒音はやはり±0.5dB程度の変動があるものの、季節や月による明確な変化までは確認できなかった。

あとがきと謝辞

本報告は、公益社団法人日本騒音制御工学会が実施した平成28年度および29年度の環境省請負業務「航空機騒音測定・評価方法に関する検討調査業務」の検討結果をもとに行った。なお、一部については本稿のために追加分析作業を実施している。

また、本検討のために空港の運航実績や航空機騒音常時監視結果をご提供いただいた自治体及び空港管理者の方々に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 航空機騒音測定・評価マニュアル、環境省、平成27年10月
- 2) (公社)日本騒音制御工学会、環境省請負業務「平成28年度航空機騒音測定・評価方法に関する検討調査業務」報告書、平成29年3月

研究報告

騒音予測コンターの信頼性を確保する予測条件の設定方法*

菅原 政之 中澤 宗康 橋本 弘樹**

1. はじめに

当協会は L_{den} コンタープログラム AERC¹⁾、²⁾、³⁾を開発し、予測コンター作成作業も担っている。航空機騒音予測コンターには、運航回数や飛行経路、機種構成等を含む多岐にわたる計算条件が結果に影響するため、適切な予測条件の設定が重要となる。本稿では各種の予測条件を整理して、データとしての良し悪しや、どの程度結果の予測コンターに影響するのかを試算検討した結果を報告する。

2. 予測条件の種類

航空機騒音予測コンターは基本的に空港周辺の年平均の騒音暴露状況を計算図示したもので、年間を通じて平均的な空港運用を前提条件として、空港周辺の騒音暴露影響を計算し、評価量 (L_{den}) のレベル別等高線を描く。目的から大別すれば、①現況予測コンター、②将来予測コンターの二種類があり、前者は騒音対策区域の設定や見直しのための騒音暴露評価、後者は滑走路増設や増便に先立つ騒音影響の事前評価のため作成される。

航空機騒音の評価の対象となる音源について、大別すれば離陸、着陸、駐機、エンジン試運転、ヘリのホバリング等の5つがある。一口で離陸騒音と言っても、エプロンからプッシュバック、誘導路の地上走行、最大推力による離陸滑走開始、浮上した後の上昇、加速といった段階があり、各段階で大きさや性質も異なる騒音が発生する。同様に着陸にも各段階があり、ほかにも駐機中のAPU（補助動力）の稼働や、エンジン試運転があり、またヘリコプターの騒音も同様に一様でなく、さらに機種による違いがある。

以上を踏まえて、予測条件を発生源別に整理した(図1)。離陸、着陸の飛行音を予測評価するためには図上段の運航回数、飛行経路、経路分散の三種類が必要となるが、地上音⁴⁾としては下段のように駐機時に係る騒音と、エンジン試運転、ヘリのホバリング等があり、TAXI経路、スポット座標およびスポット利用率、エンジン試運転、出力、稼働時間、稼働回数等が含まれる。

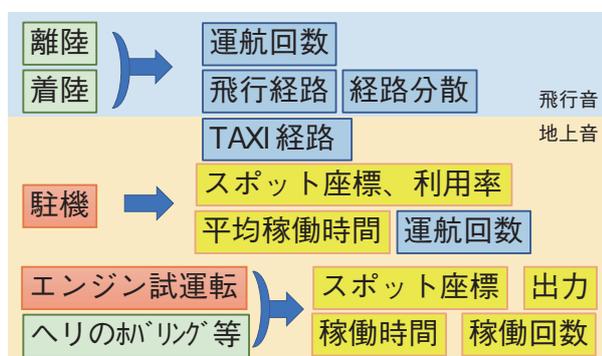


図1 発生源別の予測条件

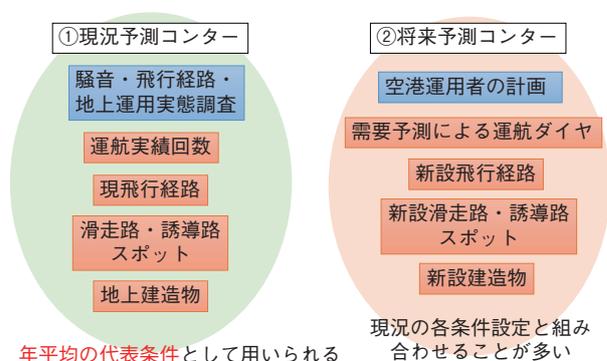


図2 目的別の主な予測条件の設定の流れ

* The treatment of input data to consider the accuracy of prediction on an aircraft noise prediction model

** 航空環境研究センター 副主任研究員

ここでコンターの目的別に予測条件の設定の流れを整理すると(図2)、①現況予測コンターについては、騒音、飛行経路および地上運用の実態調査によって、主に飛行経路や、運航回数に係る方法、滑走路・誘導路、スポット、地上構造物についての情報を得る。②将来予測コンターについては、空港運用計画による需要予測の運航ダイヤや、ケースによっては新設飛行経路、新設滑走路・誘導路、スポット、新設格納庫などが加わる。

以上の予測条件は、どれも入力情報として欠かせないが、特に結果に影響しやすく扱いに注意が必要な予測条件としては、①現況予測コンターについては飛行経路、エンジン試運転の記録、検証用の L_{den} 実測値であり、一方②将来予測コンターにとっては、需要予測や設備の増設等による運航回数や機材構成を含んだダイヤの設定が重要となる。以下に幾つかの予測条件を扱った事例と、結果への影響を調べたことについて述べる。

3. 飛行経路

飛行経路の観測データは時系列における一連の座標データからなる。それが複数集まった飛行経路データから、平均飛行経路を求める。扱う際の注意点として、航跡観測の方法にもよるが、低高度の部分等一部が欠けているものが交じると、平均経路の計算が適切に行われないので、データの精査が欠かせない。

また、飛行経路調査期間の滑走路使用が偏っていると、得られない経路データがある。その場合、年平均としてコンターを作ることが困難となるので調査期間を長くしたり、季節別の調査を行う。

飛行経路は予測結果への影響が大きく、実態経路の把握はできるだけ直近のものが望ましい。測定年によって飛行経路が変化する例と予測への影響を試算した例を図3に示す。

図左は測定年によって飛行経路が変化した一例で、中央では変化前と後のコンターを比較した。図右ではそれを横切るように断面をとって、グラフによってレベルの差異をみると、経路直下では差異が小さく、側方では差異が広がり差が大きい部分は3dB程度になっている。

4. エンジン試運転

地上運用における駐機時の騒音にはAPUと、エンジン試運転の2種類があるが、予測条件の内容としては共通の部分が多く機種別にスポット利用回数、稼働時間、稼働回数、出力となる。スポットアサイン記録や、メンテナンス記録が、年間の予測条件の基となるが、有人観測による調査で、短期であっても詳細な情報を得ることができれば後述する出力の変動等について予測条件を補完することができる。

エンジン試運転については、実施時の出力

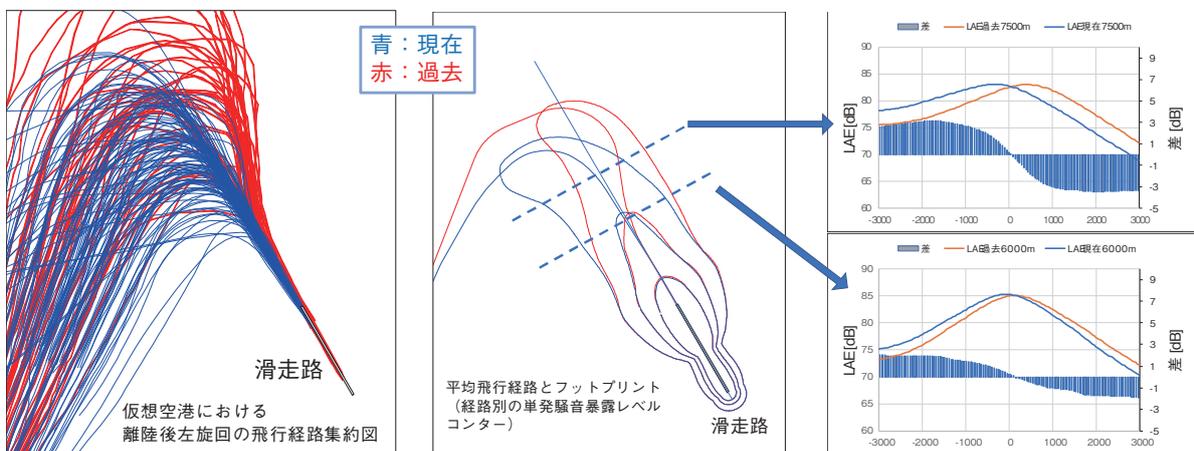


図3 測定年による飛行経路の変化と予測への影響

の変動頻度が高く、また変動幅も大きい。そのため音源パワーも変化が大きい。そのような理由から予測計算においても2～3段階の出力設定を用意し、出力別に稼働時間を設定することで、考慮するようになっている。

しかし、運用実態の把握には特有の難しさがあり、予測条件を準備する資料として、メンテナンススケジュールだけでは、騒音影響の大きい高出力の実施時間がわからない。

図4のグラフはエンジン試運転時に有人観測を行った一例だが、4時間半程度のスポットアサイン記録があったとしても、実際にエンジンを可動しているのは40分程度で、騒音が大きい高出力の時間は、さらにその半分程度となることがあることを示している。

またエンジン試運転は日々の実施回数の変動が大きい。図5左は、一年を通して一週間ずつの回数の分布を調べた一例で、平均が19回程度だが、ゼロ回の週もあれば35回の週もあることを示す。左の橙が平均から差がある週の回数を予測条件に採用した場合に生じる平均状態との差異で、第二軸のデシベル

で示している。もし一週間程度の短期調査だけから通年の予測条件を得ようとする、たまたま少ない時や、多い時に回数を得た場合、数デシベル～10dB程度、過大や過小の評価となる可能性がある。右は、さらに細分化して、高出力と低出力の回数を調べたもので、両者で分布の傾向が違っているなど傾向が単純でないことを示している。

5. その他の予測条件

リバース（着陸時の逆噴射）について、通常の手順の予測計算では、全ての着陸において常に一定の位置で実施されるものとして考慮する。これは安全側の予測となる考え方が実際の実施率とは差異が少なくないことがある。

図6は、実験的に仮想空港で、通常のリバース計算のコンターと、リバース（R/V）の実施率が50%として計算したものを比較したものを示す。左図上が全体で、左下が拡大図を示すが、黒い横線が滑走路で、緑線の膨らんでいる部分が、左からの着陸の予測において



図4 エンジン試運転の運用調査データの例

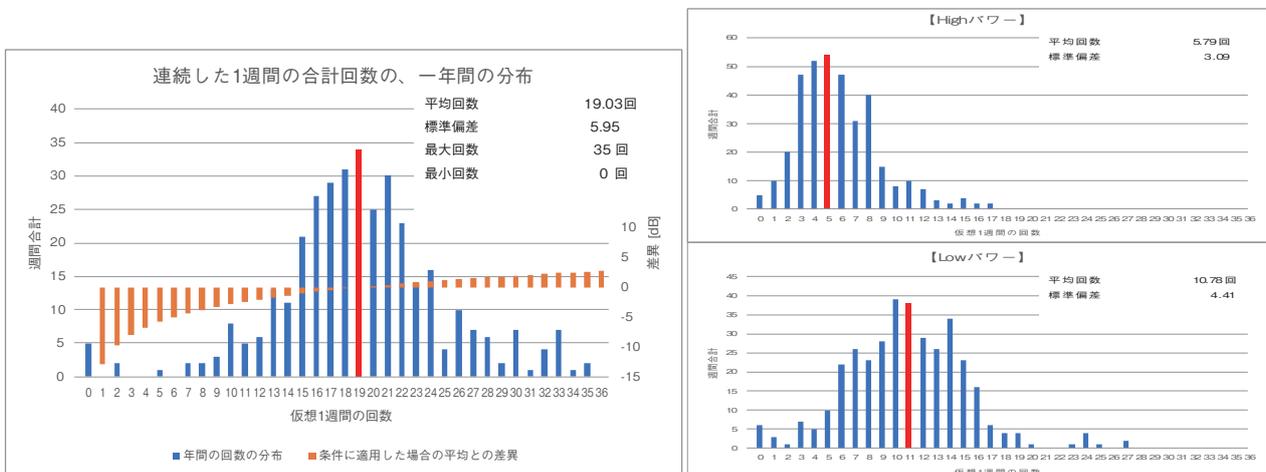


図5 エンジン試運転の実施回数のばらつき

リバースが実施される区間となる。青線と赤線の離着陸を含む L_{den} では差異は僅かに留まるが、右からの着陸だけで計算して比較したものが、緑と桃色であり差異が生じていることが分かる。ここでリバース発生区間を縦に断面をとって比較したものが右のグラフで、右下の着陸音だけの比較では2dB程度の差異があることがわかる。

運航便数については、現況コンターでは、運航実績を提供してもらい整理集計することが基本となるが、短期の調査で補足する際には、前述の飛行経路と同様に、風向きが影響するような滑走路使用割合などについて、年間平均として代表させることが適切かどうか注意を払う。将来予測では航空機の機種が現在と変化することや、ダイヤの変化に伴って行先が変われば飛行経路も変わってくることを考慮する必要がある。

予測条件ではないが、測定期間の条件で計算し実測値と比較することで予測の妥当性を検証する工程があることが望ましい。そのための測定は適切に対象の音を捉えた測定になっていて、十分な数の実測値があり、また適切な欠測補正処理をしている必要がある。

6. まとめ

予測コンターには運航回数や飛行経路、機種構成等の条件設定が結果に影響するので、適切な予測条件の設定が重要となる。現況予測コンターには飛行経路やエンジン試運転の条件設定が結果への影響が大きい。それらの実態を把握し予測条件を得るには特有の難しさが有る。適切でないデータを用いて予測条件を構築した場合に生じる影響の大きさは、試算した仮想空港のコンターにおいて最も影響が大きい場合、飛行経路では3dB程度、リバースでは2dB程度、エンジン試運転では10dB程度の差異が生じた。

文献

- 1) 吉岡序、山田一郎、エネルギーベースの航空機騒音予測モデルの妥当性に関する検討」日本騒音制御工学会講演論文集、2005.11
- 2) 岩崎潔、吉岡序、山田一郎、等価騒音レベルに基づく航空機騒音予測の考え方 -パイロットプログラム-の作成、日本騒音制御工学会技術発表会講演論文集、2003.
- 3) L_{den} を評価指標とする航空機騒音予測モデルの開発 菅原政之、中澤宗康、吉岡序、山田一郎 航空環境研究 No.19 2015.
- 4) 航空機騒音予測における地上音の取り扱い 菅原政之、中澤宗康 航空環境研究 No.21 2017.

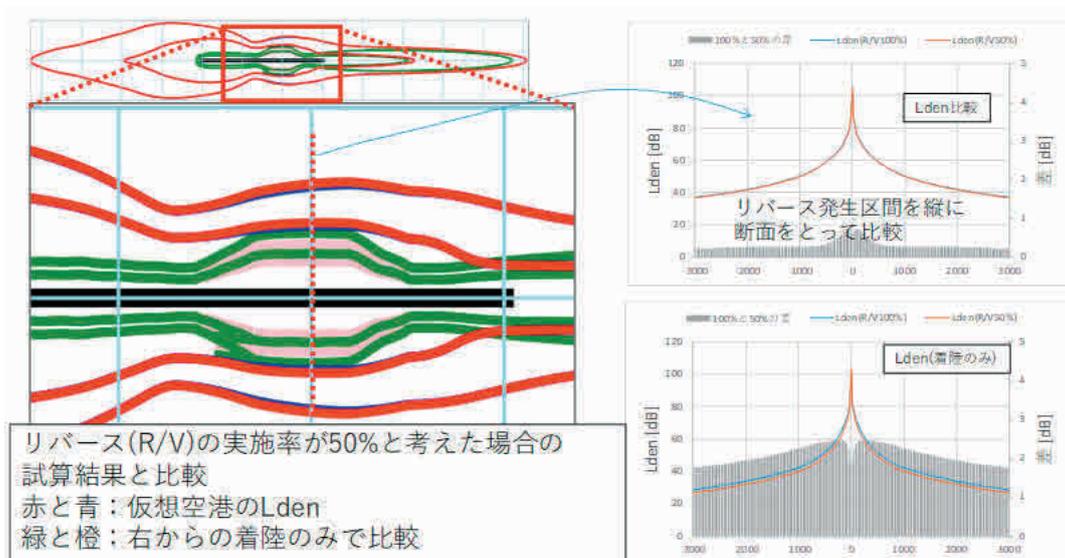


図6 リバースの実施率の影響

研究報告

航空機地上騒音の3次元シミュレーション予測*

中澤宗康**

1. モデル開発の背景

当センターでは空港騒音対策を目的とした騒音予測コンターを作成しているが、航空機の地上騒音の予測精度を改善することを目的として、シミュレーション技術開発に取り組んでいる。

航空機の地上騒音とは、主に航空機が地上滞在時に発する騒音のことで、主な例としては、APU稼働の騒音、整備時などのエンジン試運転を実施する際のエンジン騒音、誘導路を走行する際のエンジン騒音などが挙げられる。

地上騒音の特徴として、伝搬の際に騒音源から受音点に至るまでの伝搬経路周辺にある地形の影響、建物の影響を強く受ける。

例えば、地面による吸音や反射、建物による回折や反射が発生し、さらにこれらは相互に影響し合うため、その予測も複雑となる。

そのため、予測の1手段としてシミュレーションモデルを開発しており、多様な状況の検証を行えるように改良している。

しかしながらシミュレーションモデルにも一長一短あり、必ずしも万能とはいえない。メリットは既に述べたとおりで、地形や建物のような複雑な状況の予測に対応可能である点があるが、逆にデメリットもあり、シミュレーション予測時には詳細なデータを用意した上で長時間の計算時間に加えて長時間の結果解析が必要であり、広い範囲の予測といった用途には向いていない。

このため、空港周辺の騒音対策を目的とした騒音予測コンターの作成には従来どおりセ

グメントモデルを使用する方が良く、このセグメントモデルの予測精度を補う点でシミュレーションモデルを用いている。

特に航空機の地上騒音は、APU騒音などのように小さい音が長時間続くといった場合は実測が難しく、さらに地形や建物の影響の有無による騒音への影響を検討するにも、建物や地形を実際に変えるわけにも行かない。このように実測によるモデル構築が容易ではないため、こういったモデル計算による方法は有用であるといえる。

今回はそれら一環として、都市部空港と沿海の空港という極端に違う2空港で、シミュレーションモデルによる予測を行い、その伝播について考察した事例を紹介する。

2. シミュレーション事例

シミュレーションによって、地表面+建物の影響による伝搬の違いを見たいと考えた。そのため、状況の違う空港(都市部、海岸沿い)での航空機の地上騒音を、シミュレーションモデルで予測し、伝搬を比較することとした。

基本的な状況としてエプロンに航空機が駐機している状況を想定し、駐機位置から発音した波形データ、ならびにそこから離れた受音点の波形データを確認し、計算により、音圧レベルを推定することとした。予測範囲はなるべく距離をとることとし、高さと幅を制限しつつ、長さ1.5km程度離れた場所までを予測して、空港の周辺状況によって伝搬がどう変わるかを確認することとした。

以下、概略を説明する

* Study aircraft ground operation noise prediction using three-dimensional acoustic simulation

** 航空環境研究センター 副主任研究員

使用したモデル

音響シミュレーションの手法は様々な方法があるが、ここでは3次元FDTD (Finite Difference Time Domain) 法によるモデルを使用した。FDTD法の細かい原理は省くが、波動方程式を差分式に簡略化し逐次的に計算することで、時々刻々の音の伝搬状況を予測することが可能となっている。モデル自体は継続して開発しているところで、3次元空間内の音の伝搬を予測でき、地形や建物による回折や反射を考慮することが可能である。

さらに、シミュレーションモデルの予測精度を上げるべく機能を改良しており、建物や地表面の反射/吸音を設定できるようになっており、伝搬距離が長い時の精度を改善している。

使用したデータ

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構(以下JAXA)の提供する、全球数値地表モデルALOS World 3D 30m (AW3D30)を土台として、解像度が必要な部分にいくつかのデータを合成したデータを使用した。

AW3D30は、陸域観測衛星「だいち」による電磁波測量による数値による地表データであり、全世界の地表データが無料で取得できる反面、30m相当の低い解像度である。このため、地形のような緩やかな形状についてはさほど問題はないが、住宅のような物体、特に30m以下の物体については形に異常が出る。このため、解像度の低い部分は、国土地理院の数値標高地図(DEM)、OpenStreetMapデータ中の建物データの2種類のデータを合成して、シミュレーション計算に使用した。

対象とした空港

今回、予測の対象とした空港は羽田空港と福岡空港とした。羽田空港については沿岸部の空港、福岡空港については内陸の空港であり、どちらも都市近郊に存在することが特徴

である。

計算範囲については、どちらの空港も同一サイズとし、高さ50m、幅100m、長さ1500mの直方体を設定し、その内部を0.34m刻みの立方格子で区切って計算している。この計算領域全体に波が到達する時間(5秒弱)を予測し、音源地点、340m地点、1360m地点での波形を記録している。



図1：羽田空港の計算範囲

羽田空港については、国際線ターミナルのエプロン上の駐機スポットから音を発生させ、西方向に川を渡って工場群に至る状況を予測した(図1)。

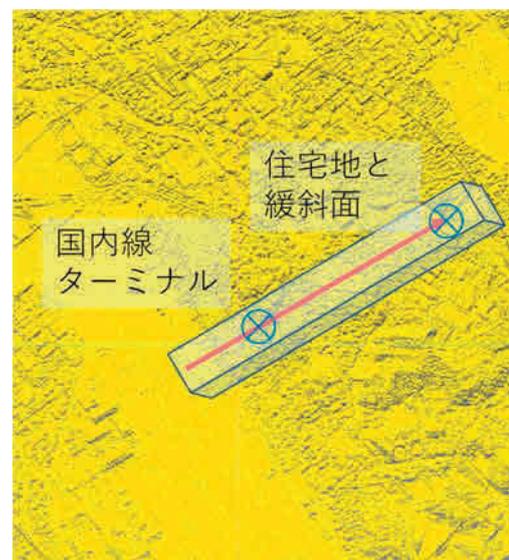


図2：福岡空港の計算範囲

福岡空港については、国内線ターミナルのエプロン上の駐機スポットから音を発生させ、東方向の住宅群に至る状況を予測した(図2)。なお今回使用した福岡の建物データは2015年時点のものであり、執筆時点では国内線ターミナルビルと形状が変わっているが、今回は実態予測する目的ではないので無視している。

音源と伝搬に係る条件

音源については、エンジン出力を想定した音源位置を設定したが、比較的単純な音しか発音できないため、ガウシアンパルス(周波数フラット)を発音し、あとから周波数構成をB777-300のエンジン音に補正することで、航空機騒音の伝搬とみなすこととした。

ただし発音した周波数全域の結果が使えるではなく、演算器のメモリの制約に伴う1ステップあたりの時間間隔および立方格子のサイズに制約があるため、計算原理上、有効な周波数は100Hz以下あたりである。実際の騒音を考えると物足りないところではあるが、改善については今後の課題である。

吸音に関わる条件については、空港敷地内では舗装や建築物はコンクリートやアスファルトが多いため、一律全反射と仮定した。空港敷地外は、水面や舗装面の多い場所は全反射、土の多い場所は普通地面の反射率と仮定した。また空気吸収は考慮していない。

3. 結果解析

前述のデータをシミュレーションモデルに投入し、計算を行った。

今回の目的は、空港エプロンから騒音がどのように空港外に伝わっているかを確認することであるため、いくつか離れた地点(音源地点、340m地点、1360m地点)の音圧波形を記録した。

結果解析については、受音点波形をフーリエ変換により周波数毎のレベル値へと変換し

た。その後、周波数毎のレベルから1/3オクターブバンドレベルを算出(25Hz-100Hz)し、最後に実際に測定された航空機(B777-300)のエンジン騒音の1/3オクターブバンドと同スペクトルになるようレベル補正し、合算して実際の航空機相当のオーバーオール音圧とした。

ただし、実際の航空機騒音であれば、ここからさらにA特性補正をかけて評価するところであるが、今回は適用可能な周波数が低いため、A特性等の補正はしなかった。結果を表1に示す。

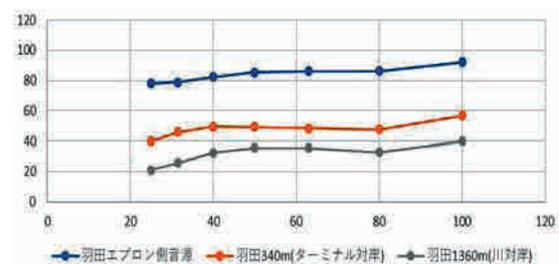


図3: 羽田での1/3オクターブバンドレベル (B777-300相当)

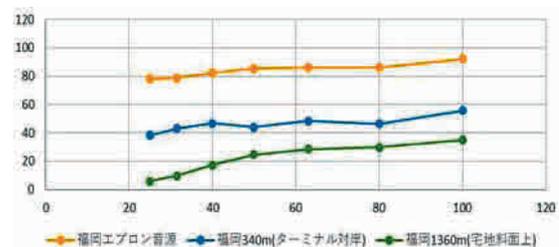


図4: 福岡での1/3オクターブバンドレベル (B777-300相当)

表1は羽田と福岡の音源から同距離の地点で騒音レベル比較したものである。この結果を見ると羽田と福岡での伝搬の違いが見え、羽田の方は遠くまで音が伝わり、福岡の方はそうでないことがわかる。これは地形と建物の影響と考えられる。ただし、ターミナルビルの形状の違い等により音源から340m地点の段階で1.5dBの違いが出ており、この影響を取り除いて考えると、340m地点から1360m地点の地形と建物の影響は4.7dBと推測することができる。

表 1：各地点での騒音値 L_{Zeq,1s} (B777-300 相当)

	音源	ターミナル 反対側 (音源から 340m)	空港敷地外 (音源から 1360m)
羽田	94.9dB	59.1dB	43.3dB
福岡	94.9dB	57.6dB	37.1dB
差分	-	1.5dB	6.2dB

4. まとめ

今回は、周辺状況の違う2つの空港で、航空機の地上騒音を3次元FDTD法を用いてシミュレーション予測した。予測の結果として、地表面、建物の影響と思われる伝搬の違いが出た。

おそらく今回のような低周波数に比べると、実音はもっと周波数が高く回折等もしにくく吸音量も大きいため、この違いは拡大するのではないかと想像される。

この結果に対して、現在のコンター用の騒音予測モデルでは地表面の状態、建物の状態についてはターミナルビルなどの明らかに影響のあるものは考慮しているものの、それ以外の要素はあまり考慮していないため、影響を適切に反映する手段を開発する必要がある。

このため、本稿で示したシミュレーション予測の他、空港周辺での騒音実測による地表面過剰減衰の研究を実施しており、騒音予測精度改善に取り組んでいるところである。

ただし、実用段階にはいくつかの課題を解決する必要がある。

今後の課題として残る点として、いくつか不足している点がある。

まず、一番大きなものは実用的に使うためには周波数が低いという問題が挙げられるだろう。今回の例のように100Hzでは航空機騒音としては低い。シミュレーション法の原理的には一定のメモリ容量に対して、予測範囲と周波数がトレードオフとなる関係にあり、予測範囲を広げれば周波数を下げざるを得ず、周波数を2倍にすると予測範囲は1/8となってしまう。

2次元なら1000m x 300m程度まで可能か。

建物が格子状に並ぶ状況に限った予測なら問題ない

その他、細々した箇所の精度の改善も必要で、音源の精度、地形データの解像度等を高めるとともに、実測結果等と比較しての予測精度確認が必要であり、今後はこれらの改善をしつつ騒音予測コンター等の精度改善につなげていきたいと考えている。

文献

- 1) 山田一郎, 航空機騒音の予測における地上騒音の取り扱い, 航空環境研究 No.18 (2014) .
- 2) T.Nakazawa,M.Sugawara, H.Yoshioka, I.Yamada,"Study on the validity of an airport noise model considering aircraft ground operation noise," INTER-NOISE 2015 (2015) .

研究報告

騒音を考慮した離着陸料と航空会社の機材選択 *

高橋 達**

1. はじめに

国内外の主要空港においては、低騒音機の誘導や空港周辺環境対策の財源確保を目的として、騒音を考慮した離着陸料を導入している。

一方で離着陸料における騒音の評価の仕方や課金形態は空港ごとで異なっており、各空港の離着陸料において騒音がどの程度評価されているのか、各空港においては着陸料と整合する航空機が使用されているのかなどは明らかでない。本論は航空機の性能データと空港の運航実績を利用して、上記の二つの問題を検討する。

2. 騒音証明基準と累積マージン

騒音基準適合証明とは、国際民間航空に関する国際条約であるシカゴ条約第16付帯条項(ICA0 Annex16)の中に定められた騒音基準を航空機が満たしていることを証明する制度である。

最初の騒音基準は1971年に開催されたICA0航空機騒音委員会(ICA0 Committee on Aircraft Noise)において定められ、1973年に実効化された。この基準はICA0 Annex16, vol.1, Chapter2にあることから、Capter2基準と呼ばれている。1977年にはChapter 3基準が定められ、これが現在の証明基準のベースとされている。その後も騒音基準は強化されており、2001年には、2006年1月以降の新型機への基準強化(Chapter 4基準)、2014年には、2018年1月以降の新型機への基準強化(Chapter 14基準)などがなされている。証明検査は国際的な認証機関

(EASA, FAA など)が実施し、証明書を発行する。

具体的な基準値は、着陸直下、離陸側方、離陸直下の三地点において航空機の最大離陸重量(Maximum Take-off Weight; MTOW)に応じて定められており、各地点で測定された騒音値(単位:EPNdB)が証明値である。図1は航空機の最大離陸重量と基準値の関係であり、横軸は最大離陸重量(MTOW)、縦軸は三地点の騒音値の合計である。ここで、機材の最大離陸重量が重いほど基準値が高い。これは、大型の航空機の方が小型の航空機よりも騒音値が大きい一方で、容量も大きいことを考慮しているためである。また、各測定点における証明値とChapter 3基準値との差の総和のことを累積マージン(Cumulative margin)といい、Chapter 3以降の基準は、各測定点における証明値とChapter 3基準値の差と累積マージンを用いて定められている。

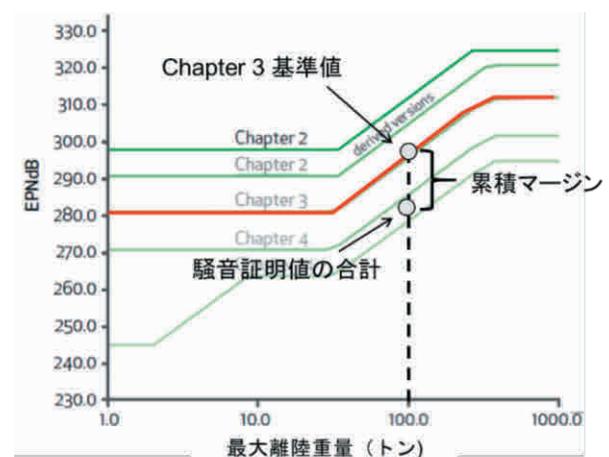


図1: 騒音証明基準と累積マージン
出典:ICA0 ホームページを筆者が一部修正

* Noise related airport charges and airlines aircraft choice

** 航空環境研究センター 副主任研究員

表 1: 欧州の主要空港における離着陸料の形態と騒音の評価方法

空港		ヒースロー空港	スキポール空港	シャルル・ド・ゴール空港	フランクフルト空港	フィウミチーノ空港
		LHR	AMS	CDG	FRA	FCO
課金対象		着陸	離陸と着陸	着陸	離陸と着陸	離陸と着陸
着陸料	基本料金	機材の重量に依存しない固定料金	最大離陸重量に比例	固定料金+最大離陸重量に比例	搭乗旅客数、貨物数に比例	最大離陸重量に比例
	排出物チャージ	離着陸におけるNOx排出量に比例	なし	なし	離着陸におけるNOx排出量に比例	なし
騒音に関するチャージの形態		基本料金を騒音性能により調整	基本料金を騒音性能により調整	基本料金を騒音性能により調整	基本料金+騒音チャージ	基本料金+騒音チャージ
騒音の評価方法		累積マージン	累積マージン	累積マージン	騒音の大きさ 累積マージン	累積マージン (Noise Chapter)

出典: 空港公表資料より筆者作成

累積マージンは航空機の最大離陸重量に応じて定められていることから、航空機の騒音性能を表す指標である。

3. 騒音の評価方法と課金形態

離着陸料における騒音の評価方法や課金形態は国や空港により異なるが、騒音の評価方法と課金の形態に着目して整理できる。

騒音の評価方法には、累積マージンと騒音

の絶対的な大きさがある。ここで、騒音の絶対的な大きさは、騒音証明値や空港周辺の測定局における騒音値などが用いられている。

課金の形態は累積マージンを用いて基本料金を調整する形態と基本料金に加えて騒音課金を課す形態がある。前者は航空機の最大離陸重量や搭乗数に応じて決定する基本料金を、騒音性能が高い機材は割引する一方で、高騒音の機材は割高にするような料金形態である。

表 2: 日本と韓国の主要空港における離着陸料の形態と騒音の評価方法

空港	東京国際空港		成田国際空港		関西国際空港		仁川空港
	HND		NRT		KIX		ICN
	国内線	国際線	国内線	国際線	国内線	国際線	
課金対象	着陸		着陸		着陸		着陸
基本料金	最大離陸重量に比例 (ステップ型)	最大離陸重量に比例	最大離陸重量に比例 (ステップ型)	最大離陸重量に比例	最大離陸重量に比例	最大離陸重量に比例	最大離陸重量に比例
騒音に関するチャージの形態	基本料金+騒音課金	なし	基本料金+騒音課金	基本料金を騒音性能により調整	なし	なし	なし
騒音の評価方法	騒音証明値	なし	騒音証明値	累積マージン	なし	なし	なし

出典: 空港公表資料より筆者作成

後者は基本料金に加えて、騒音の大きさに応じて決まる料金を賦課する形態であり、騒音が大きい航空機ほど高い料金を支払うことになる。

表1は欧州の代表的な空港における離着陸料の形態と騒音の評価方法である。ヒースロー空港、スキポール空港、シャルル・ド・ゴール空港は基本料金を累積マージンで調整する形態を採用している。特に、ヒースロー空港の着陸料は騒音と排出物（NOx）のみで決定し、航空機の最大離陸重量に依存しない。表3はヒースロー空港の2017年の騒音料金表である。4列目はChapter 4 Baseを100とした場合の各クラスの指数を表している。騒音部分は機材の累積マージンに応じて6つのカテゴリが設けられている。指数をみると、最も低い（高騒音である）クラスが388.89である一方で、最も高い（低騒音である）クラスが33.33と累積マージンにより料金を大きく変化させている。

表3：ヒースロー空港の着陸料金

クラス	累積マージン	料金	
		ポンド	指数
Chapter 3	10dB未満	8274	388.89
Chapter 4 High	10dB以上15dB未満	2364	111.11
Chapter 4 Base	15dB以上17dB未満	2127.6	100.00
Chapter 14 High	17dB以上20dB未満	1654.8	77.78
Chapter 14 Base	20dB以上23dB未満	1182	55.56
Chapter 14 Low	23dB以上	709.2	33.33

出典：空港公表資料より筆者作成

フランクフルト空港とフィウミチーノ空港は基本料金に加えて騒音課金を賦課する形態を採用している。フランクフルト空港の騒音料金は、空港周辺の騒音測定局における機種ごとの最大騒音レベルと累積マージンにより決定する。騒音カテゴリは騒音レベルに応じてカテゴリが設けられている（以下では、このカテゴリをFRA騒音カテゴリと表現する）。FRA騒音カテゴリは、測定局における機種ごとの最大騒音レベルの過去3年

間の平均値に基づいて離陸と着陸ごとに16に分類されており、離着陸の際にカテゴリごとの固定料金が課される。また、騒音に係る料金は累積マージンによる割引があり、同一機種内で騒音性能の高い機材への考慮もなされている。

表2は日本と韓国の主要空港における離着陸料の形態と騒音の評価方法である。東京国際空港（羽田空港）と成田国際空港（成田空港）の国内線においては、基本料金に加えて騒音課金を賦課する形態である。騒音の評価方法は騒音証明値を用いている。具体的には、離陸の証明値と着陸の証明値の平均値から83を引いた値（以下では、国内線騒音値と表現する）に3400円を乗じた額が課金される。また、成田空港の国際線では基本料金を累積マージンで調整する形態をとっている。

4. 離着陸料における騒音の影響度の比較

4.1 離着陸料の比較

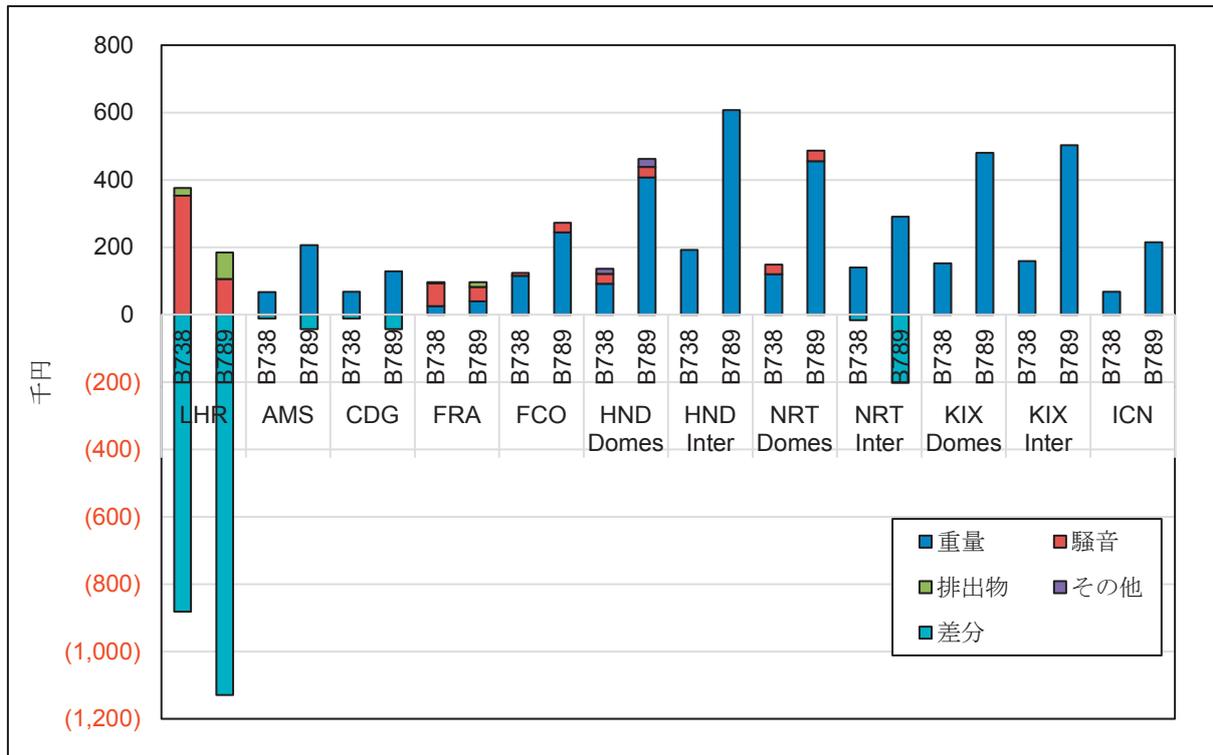
各空港の離着陸料を比較する。具体的にはB738とB789の離着陸料を計算する。表4は両機種の代表的な性能である。B738の最大離陸重量は80トンであり、累積マージンは13.1dBである。一方でB789の最大離陸重量は253トンであり、累積マージンは27.8dBである。つまり、B738はB789と比べて、重量は小さい一方で、騒音性能は低い。

表4：B738とB789の代表的な性能

機種	最大離陸重量 (トン)	座席数	累積マージン	騒音チャプター	成田インデックス	国内線騒音指標	FRA騒音カテゴリ		NOx (kg)
							着陸	離陸	
B738	80	180	13.1	4	C	8.45	3	6	10.0
B789	253	284	27.8	14	A	9.15	5	3	34.4

表5は日本円に換算した主要空港における離着陸料である。ヒースロー空港（LHR）、フランクフルト空港（FRA）を除いた空港において、重量の大きいB789の離着陸料は

表 5: 主要空港における離着陸料の比較



注 1) LHR: ヒースロー空港、AMS: スキポール空港、FRA: フランクフルト空港、FCO: フィウミチーノ空港、
 HND: 東京国際空港、NRT: 成田国際空港、KIX: 関西国際空港、ICN: 仁川空港
 注 2) 1ポンド=149.25円、1ユーロ=131.81円、1ウォン=0.10円
 注 3) 差分は最も料金の高いカテゴリーの離着陸料との差を表す。

B738 よりも高い。

ヒースロー空港の着陸料の基本部分は騒音性能のみで決定するため、B789の着陸料はB738よりも低い。

フランクフルト空港ではB738が96,810円、B789が96,520円であり、ほぼ等しい。つまり、フランクフルト空港の離着陸料は、FRAカテゴリー値の違いによる料金差が基本料金の差を相殺する程度に設定されている。

4.2 騒音の影響度の比較

B738とB789の離着陸料の比較は、ヒースロー空港とフランクフルト空港以外の空港では、離着陸料における騒音部分の比重が小さいように見える。しかし、空港により騒音の評価の仕方や料金形態が異なる。また運航す

る航空機も複数の機種があるので、単純には比較できない。そこで、各空港で運航が確認された航空機の離着陸料を最大離陸重量と騒音指標により回帰分析し、騒音指標の推計パラメーターを用いて、離着陸料における騒音の影響度を比較する。ここで、騒音指標としては累積マージン、FRAカテゴリー、国内線騒音値を用いる。

具体的には以下の(1)式モデルを騒音指標ごとに推計する。

$$LC_i^j = a^j + b^j NI_i + c^j MTOW_i, \quad (1)$$

ここで、 LC_i^j は空港jにおける航空機iの離着陸料、 NI_i は機種iの騒音指標、 $MTOW_i$ は機種iの最大離陸重量である。

表 6:騒音指標の係数パラメーター

		LHR	AMS	CDG	FRA	FCO	HND		NRT		KIX		ICN
							Domes	Inter	Domes	Inter	Domes	Inter	
累積マージン		33,425	3,239	1,605	4,109	1,306	1,020	0	1,501	5,439	0	0	0
FRA騒音カテゴリー	離陸	72,694	13,212	4,837	11,230	5,696	2,748	0	4,383	11,867	0	0	0
	着陸	28,286	2,643	2,052	14,281	876	1,105	0	1,783	8,612	0	0	0
	計	100,980	15,854	6,890	25,511	6,572	3,852	0	6,166	20,479	0	0	0
国内線騒音指標		79,953	9,166	4,166	10,603	4,027	3,111	0	3,806	14,510	0	0	0

注 1) LHR:ヒースロー空港、AMS:スキポール空港、FRA:フランクフルト空港、FCO:フィウミチーノ空港、HND:東京国際空港、NRT:成田国際空港、KIX:関西国際空港、ICN:仁川空港

注 2) 1ポンド=149.25円、1ユーロ=131.81円、1ウォン=0.10円

分析の対象は表5にある空港とする。各空港の離着陸料は、運航が確認された機種(ICAOTypeコード)ごとに代表的な性能データを高橋・中村・橋本・篠原(2017)と同様の方法で対応付け、空港が公表する料金表に従い計算した(日本の空港は国内線と国際線を区別する)。(1)式は空港(12空港)ごと、騒音指標(3指標)ごとに計36モデルを推計している。

なお、 b_j は空港jにおいて騒音指標1単位増える(騒音が大きくなる)ことによる離着陸料の変化額、 c_j は空港jにおいて最大離陸重量が1トン増えることによる離着陸料の変

化額を示している。

表6は各空港における騒音指標の係数パラメーター(b_j)である。累積マージン、FRAカテゴリー、国内線騒音指標のどの指標で評価しても、ヒースロー空港(LHR)において騒音指標が1単位増えることによる離着陸料の増加額が最も大きい¹。その他の空港をみると、累積マージンと国内線騒音指標での評価は、成田空港国際線(NRT Inter)、フランクフルト空港(FRA)の順で大きい。また、FRA騒音カテゴリー(離着陸計)での評価はフランクフルト空港、成田空港国際線の順で大きい。

表 7:離着陸料における各要素の比重

	LHR	AMS	CDG	FRA	FCO	HND		NRT		KIX		ICN
						Domes	Inter	Domes	Inter	Domes	Inter	
累積マージン												
騒音部分	30.2%	23.2%	17.4%	21.5%	11.5%	7.6%	0.0%	10.2%	23.3%	0.0%	0.0%	0.0%
重量部分	0.9%	40.5%	28.7%	22.2%	44.5%	84.1%	100.0%	81.4%	37.2%	100.0%	100.0%	100.0%
固定部分	68.9%	36.4%	53.8%	56.3%	44.0%	8.2%	0.0%	8.5%	39.4%	0.0%	0.0%	0.0%
FRA騒音カテゴリー												
騒音部分	63.4%	54.9%	42.2%	74.5%	29.6%	11.4%	0.0%	15.6%	48.5%	0.0%	0.0%	0.0%
離陸	53.1%	49.9%	34.8%	45.5%	27.4%	9.5%	0.0%	13.0%	35.6%	0.0%	0.0%	0.0%
着陸	10.3%	5.0%	7.4%	28.9%	2.1%	1.9%	0.0%	2.6%	12.9%	0.0%	0.0%	0.0%
重量部分	14.1%	33.1%	30.0%	10.4%	45.9%	82.0%	100.0%	73.4%	42.4%	100.0%	100.0%	100.0%
固定部分	22.5%	12.0%	27.8%	15.1%	24.5%	6.6%	0.0%	11.0%	9.1%	0.0%	0.0%	0.0%
国内線騒音指標												
騒音部分	79.0%	47.0%	45.8%	64.7%	29.8%	14.3%	0.0%	15.3%	49.3%	0.0%	0.0%	0.0%
MTOW	19.2%	32.3%	32.9%	22.9%	49.7%	75.9%	100.0%	71.0%	32.4%	100.0%	100.0%	100.0%
固定部分	1.8%	20.7%	21.3%	12.4%	20.5%	9.8%	0.0%	13.7%	18.3%	0.0%	0.0%	0.0%

¹ 累積マージンは1dB減少することの効果

表7は推計パラメーターを用いて計算したB738の着陸料における騒音部分、重量部分、固定部分の割合である。騒音指標に累積マージンを用いて推計したパラメーターの下での計算した結果をみる(表7上段)。累積マージンを用いて評価すると、騒音部分の割合は、ヒースロー空港(LHR)が30.2%、成田空港国際(NRT)が23.3%、スキポール空港(AMS)が23.2%の順で高い。また、フランクフルト空港は騒音のベースの騒音課金を採用しているが、着陸料を累積マージンで評価しても、騒音部分は21.5%であり、シャルルド・ゴール空港(CDG)、フィウミチーノ空港(FCO)よりも高い割合を占めている。

騒音指標にFRA騒音カテゴリーを用いて推計したパラメーターの下での計算結果(表7中段)をみる。FRA騒音カテゴリーを用いて評価すると、騒音部分の割合はフランクフルト空港が74.5%であり最も高い。続いて、ヒースロー空港が63.4%、スキポール空港が54.9%、成田空港国際線が48.5%と続いている。

国内線騒音値を用いて推計したパラメーターの下での結果をみる(表7下段)。着陸料に占める騒音部分の割合は、ヒースロー空港が79.0%、フランクフルト空港が64.7%、成田空港国際線が49.3%、スキポール空港が47.0%の順である。ここで、羽田空港国内線と成田空港国内線の着陸料は、国内線騒音指標に基づいた課金をしているが、それぞれ14.3%、15.3%であり、上記の空港よりも低い。

以上をまとめると、騒音指標に関わらず、ヒースロー空港の着陸料は騒音部分の割合が高い。また、フランクフルト空港、スキポール空港、成田空港国際線などが高い割合である。

5. 運航機材の騒音に関する性能の比較

以上のように、騒音を考慮した着陸料にお

ける騒音指標、料金ストラクチャー、料金水準は空港ごとで異なっているが、各空港において、離着陸料と整合する機材は使用されているのかを確認する。

5.1 データ

分析対象とした空港の正確な運航実績は入手が困難である。そこで、航空機が発信する情報を用いて空港を離発着する航空機の位置情報などを提供しているウェブサイトであるFlightrader 24などに掲載された各空港の離発着機の情報を利用することとした。

1日分の運航データは2017年2月23日(木)収集した。各空港同一の日を対象としている²。取得できる情報は空港離着陸時間、便名、機種などであるが、必ずしもすべてのデータが正しく入手できているとは限らない。別の情報源から得た取得データをもとに、今回入手したデータの運航回数を比較したところ、おおよそ5~10%程度の差にとどまっていることを確認している。

このようにして取得した運航情報をもとに機種(ICAOタイプコード)ごとに環境負荷量を算定した。ここで、同じ機種でも装着するエンジン種別が複数存在し、同じエンジンの定格推力も航空機ごとで異なる場合がある。

本論では、高橋・中村・橋本・篠原(2017)と同様、機種ごとに代表する騒音情報と排出物情報を設定する。

騒音情報は機種を代表するエンジン種別を選定し、ICAO Noise Certification Databaseから、おおむねその最大離陸重量における騒音証明値を対応づけた。

5.2 累積マージンの比較

最初に各空港における運航機材の累積マージンの平均値を比較する。図6は、各空港における1便あたりの累積マージンとヒースロー空港の着陸料クラスにおけるCh. 14Lクラスの航空機の運航割合である。

2 成田国際空港のみ3月2日(木)のみである。

羽田空港国際線 (HND Inter) が 17.8 EPNdB と最も高く、次いで、成田空港国際線 (NRT Inter) が 17.6 EPNdB、ヒースロー空港 (LHR) が 16.6 EPNdB である。

表 8 はヒースロー空港 (LHR) の着陸料の 카테고리別の機材の運航割合である。ヒースロー空港は Ch. 3 クラスの航空機が運航していない。近隣の欧州の空港においては、同クラスの航空機は運航していることから、これは着陸料の影響と思われる。その他に、羽田空港国際線 (HND Inter)、成田空港国際線 (NRT Inter)、関西空港国内線 (KIX Domes) においても、同クラスの航空機は運航していない。

Ch. 14L クラスの航空機の運航割合をみると、羽田空港国際線 (22.2%)、成田空港国際線 (22.1%)、ヒースロー空港 (12.1%) の順で高い。これが、これらの空港における累積マージンの平均値をあげる要因となっている。

欧州に限定すると、ヒースロー空港においては累積マージンの平均値が最も高く、Ch. 3 の航空機は運航していないことから、着陸料の効果が示唆される。しかし、アジアを含めて比較すると、騒音を考慮した着陸料を導入していない羽田空港が最も高い。成田空港においては累積マージンにより着陸料を差別化しているものの、羽田空港と累積マージンの平均値が同じくらいであることを考慮すると、着陸料以外の要因の影響が大きいと思われる。

したがって、累積マージンの比較では、着陸料の効果は見た目上明らかではない。

5.3 フランクフルト空港騒音カテゴリの比較

各空港における FRA 騒音カテゴリ値の平均値を比較する。図 7 は各空港における 1 便当たりの FRA 騒音カテゴリ値と最大離陸重量 100 トン以下の航空機の運航割合 (小

図 6: 累積マージンの平均値と Ch. 14Low の運航割合

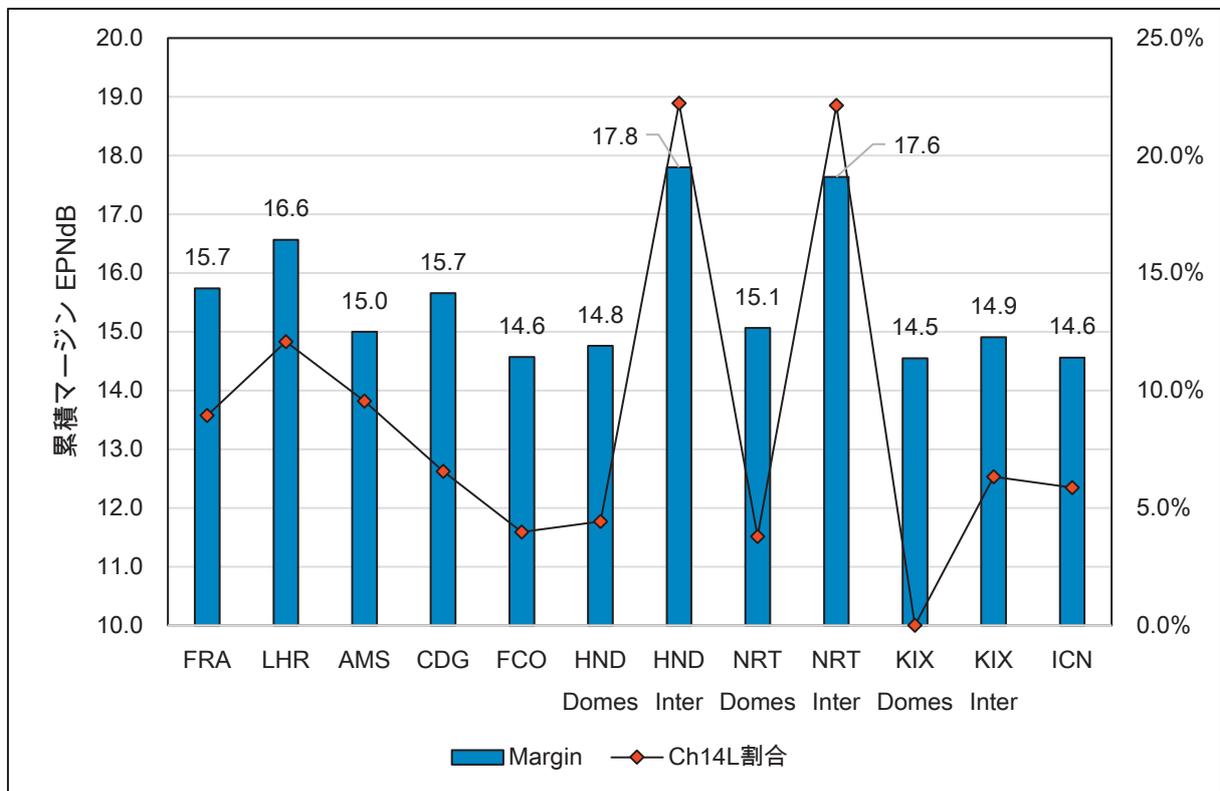


表 8: ヒースロー空港の着陸料カテゴリー別の運航割合

	累積マージン EPndB	FRA	LHR	AMS	CDG	FCO	HND		NRT		KIX		ICN
							Domes	Inter	Domes	Inter	Domes	Inter	
Ch3	10未満	1.0%	0.0%	5.6%	7.0%	6.8%	1.3%	0.0%	0.0%	0.2%	0.0%	1.5%	0.4%
Ch4H	10以上15未満	37.2%	25.6%	57.0%	25.2%	36.8%	68.1%	49.0%	30.3%	49.3%	28.4%	57.0%	70.8%
Ch4B	15以上17未満	48.4%	60.3%	24.1%	48.6%	52.1%	26.1%	27.8%	65.9%	24.4%	71.6%	33.4%	20.8%
Ch14H	17以上20未満	2.9%	1.2%	3.6%	10.9%	0.0%	0.0%	0.3%	0.0%	3.2%	0.0%	1.8%	1.8%
Ch14B	20以上23未満	1.6%	0.9%	0.1%	1.7%	0.3%	0.0%	0.7%	0.0%	0.8%	0.0%	0.0%	0.4%
Ch14L	23以上	8.9%	12.1%	9.5%	6.6%	4.0%	4.4%	22.2%	3.8%	22.1%	0.0%	6.3%	5.9%

型機割合) である。

FRA 騒音カテゴリーは機種ごとの絶対的な騒音の大きさに基づく評価なので、航空機の大きさとの正の相関が強いと思われる。そこで、フランクフルト空港における着陸料の効果をみるために、同空港と同じ程度の小型機割合である空港と比較する。フランクフルト空港 (FRA) の小型機割合は、約 75% である。スキポール空港 (AMS) は 78%、シャルル・ド・ゴール空港 (CDG) は 76% であり、同じ程度の割合である。フランクフルト空港のカテゴリ

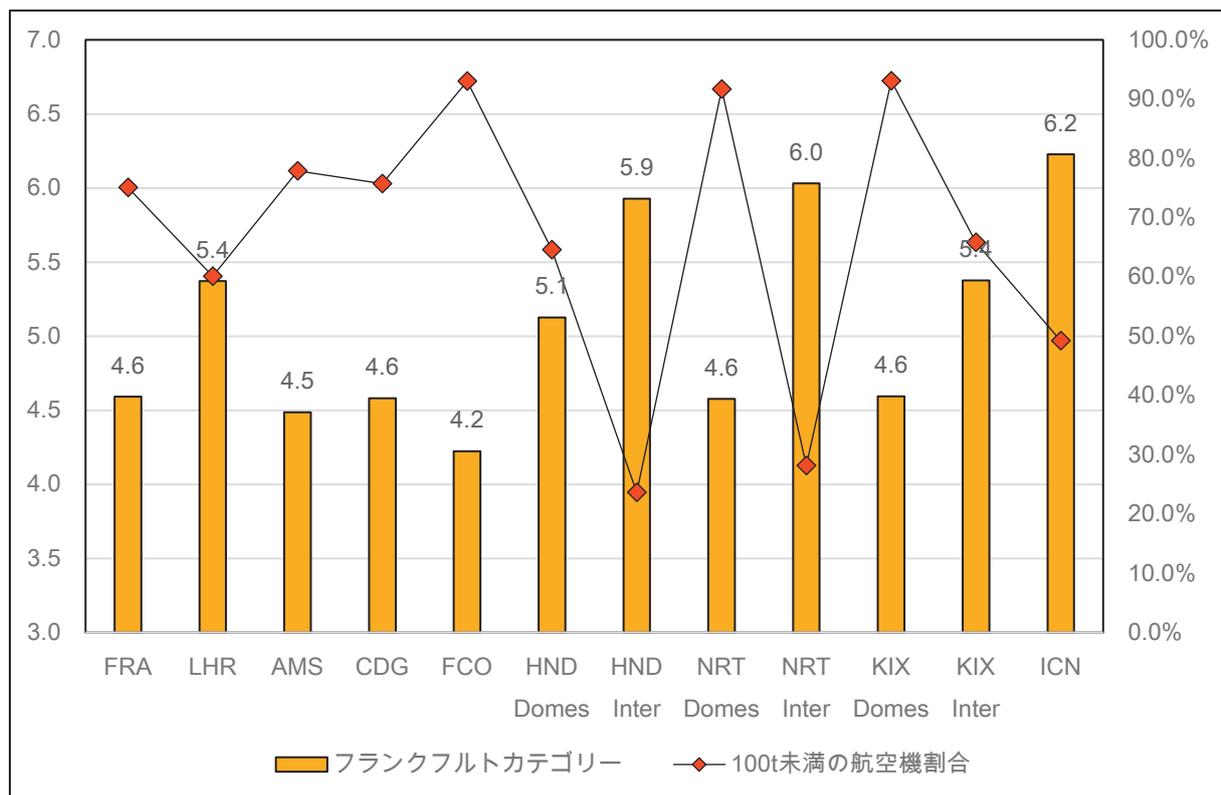
ー値の平均は 4.6 であり、スキポール空港の 4.5、シャルル・ド・ゴール空港の 4.6 と比較しても、大きな差は確認できない。

5.4 国内線騒音指標での比較

各空港における国内線騒音指標の平均値を比較する。図 8 は国内線騒音指標の平均値と小型機割合である。

国内線騒音指標も騒音の絶対的な大きさによる評価なので、航空機の大きさとの正の相関が強いと思われる。

図 7: FAR 騒音カテゴリーの平均値と小型機割合



この傾向は小型機割合が高い空港（約 60% 程度まで）において顕著であり、同じ程度の小型機割合の空港の間で、騒音指標の平均値に大きな差はない。

ここで、仁川空港（ICN）は小型機割合が約 50%であり、羽田空港国際線の 23.6%、成田空港国際線の 28.1%と比べて高い。それにも関わらず、これら三空港における騒音指標の平均値はほぼ同じ値である。

6. まとめと結論

本論では、最初に、欧州とアジアの主要空港における騒音を考慮した離着陸料の形態と騒音の評価方法を整理した。そして、騒音に関係する様々な指標を用いて各空港の着陸料における騒音部分の比重を比較し、各空港における運航機材の騒音に関する性能を比較した。

主な結果をまとめる。騒音指標が1単位増えること（騒音が大きくなること）による着陸料の上昇は、累積マージン、FRA 騒音カテゴリ、国内線騒音指標のどれで評価しても、ヒースロー空港が最も高い。また、着陸料に

おける騒音部分の比重を比較すると、ヒースロー空港、フランクフルト空港、成田空港（国際線）などで騒音部分の比重が高いことが明らかになった。

各空港における運航機材を比較すると、欧州の主要空港の比較では、ヒースロー空港が累積マージンの平均値が最も高いものの、羽田空港、成田空港の国際線と比較すると、小さく、累積マージンによる着陸料の差別化の効果は見た目上、明らかでない。

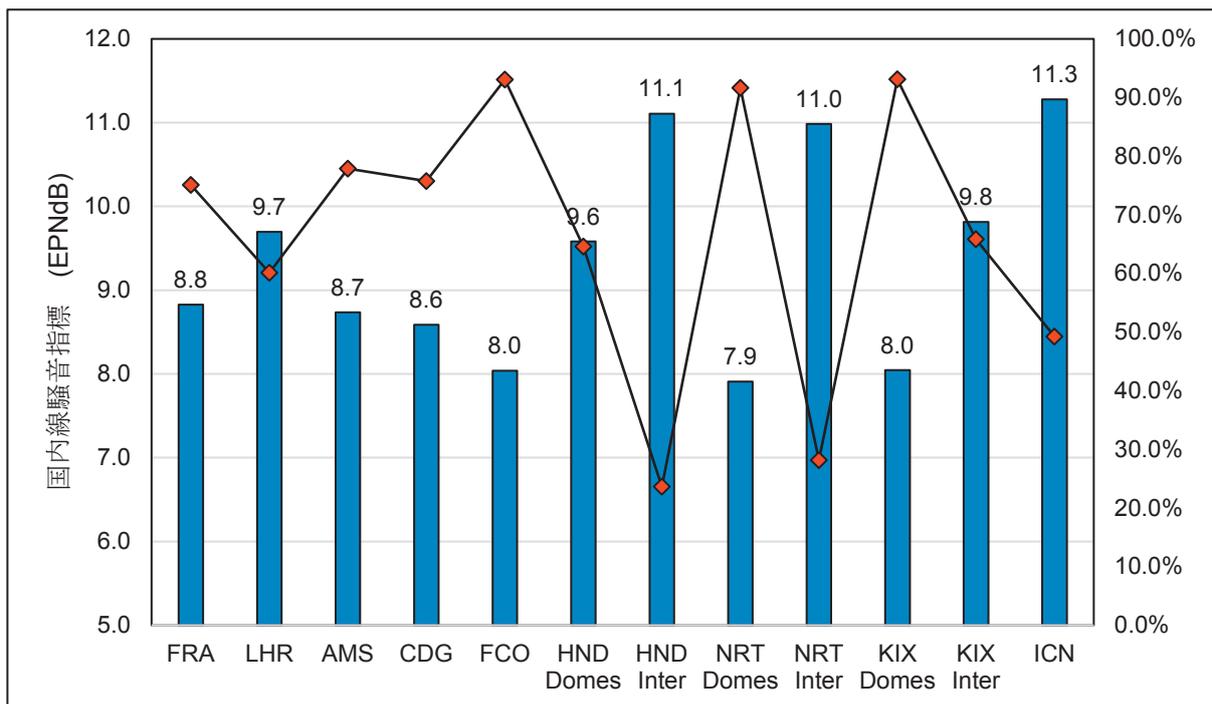
また、フランクフルト騒音カテゴリでみると、小型機の使用割合が同程度の空港と比較しても、フランクフルト空港が明らかな低騒音化を確認できない。

ただし、ヒースロー空港、フランクフルト空港、成田空港（国際線）は騒音を考慮していない仁川空港と比較すると、どの指標でも低騒音化している。

参考文献

高橋達・中村千都世・橋本弘樹・篠原直明（2017）『主要空港における環境負荷の比較』，航空環境研究，No.21, pp.107-114.

図 7: FAR 騒音カテゴリの平均値と小型機割合



研究報告

中低高度における連続降下運航*

高橋 英 昌**

1. はじめに

国際民間航空機関 (ICAO) の連続降下運航に関する文書 (ICAO Doc 9931) では、冒頭で以下の様に説明している。

“最適な CDO (連続降下運航) は、巡航高度からの降下開始直後から水平飛行の区間を少なくした降下を行うことにより、パイロットや管制官の降下予測を容易にすると共に騒音、燃料消費、排出ガス、パイロットと管制官の通信負荷を軽減する”。

このように、巡航高度からの連続降下は、エンジンの回転数をアイドルに近い状態に維持することが可能であり、燃料消費において大きなメリットとなるが、騒音の観点からはより低い高度で影響が顕著である。また、パイロットにとっては煩雑な機体操作の頻度が減りワークロードの軽減になる。しかし、エンジンをアイドルに保ったまま連続降下を行うには空港までの飛行距離をできる限り正確に知ることが必要になる。

一方、進入開始後は着陸に必要な速度まで減速するためにフラップを展開し、格納していた車輪を引き出す操作をしなければならない。そのため、抵抗の増加とそれに伴うエンジン出力の増加が避けられない。進入中の騒音源としてはエンジン、車輪、フラップなどからの騒音があげられるので、航空機は進入開始前後にどのタイミングでどのような操作が行われるのかが重要となる。

そこで、今回の発表は、騒音影響が懸念される高さでの連続降下運航に焦点をあてることとし、中高度とは高度 3,000m (10,000ft)

から進入開始高度まで、低高度とは進入開始高度から着陸に至る迄と、定義して航空機の運航の概容を紹介する。

2. 進入開始点に至る迄の経路と降下断面

(1) 経路

多くの旅客機が飛び交う空港では、安全を保ちつつ空港の処理能力を最大限に引き出すために着陸間隔を一定に保つ必要がある。そのため、進入開始地点迄飛行する経路 (距離) が旅客機毎に変わるが、降下率を計算する為にできる限り正確に飛行距離を知ることが重要となる。

ICAO では、以下の 2 つの経路設定の方式を紹介している。

① クローズド・パス方式

標準到着経路 (STAR) を指定して飛行する。連続降下が可能のように各地点の通過高度を指定したものを特に CDO 方式と呼ぶことがあるが、到着機が輻輳する時間帯では到着の順序付け及び先行機や後続機との間隔設定を行う必要があることから実施が困難である。

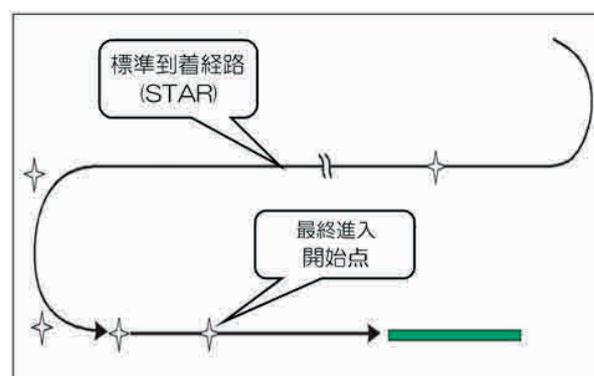


図 2-1 (クローズド・パス方式)

* Continuous descent operation under 10,000ft

** 航空環境研究センター 調査役

日本でもクローズド・パス方式は、関西国際空港、那覇空港で夜間の航空交通の少ない時間帯に実施されている。(図 2-1)

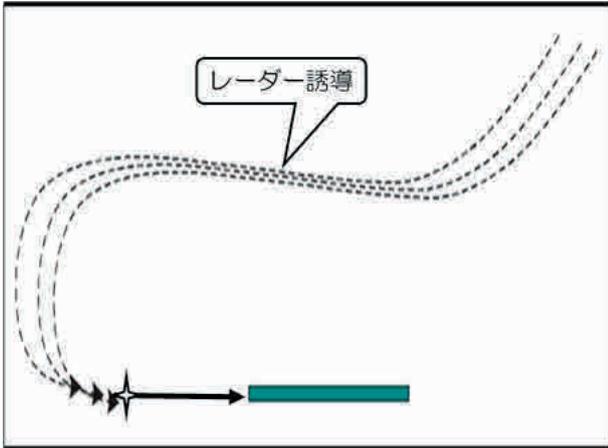


図 2-2(オープン CDO 方式)

② オープン CDO 方式

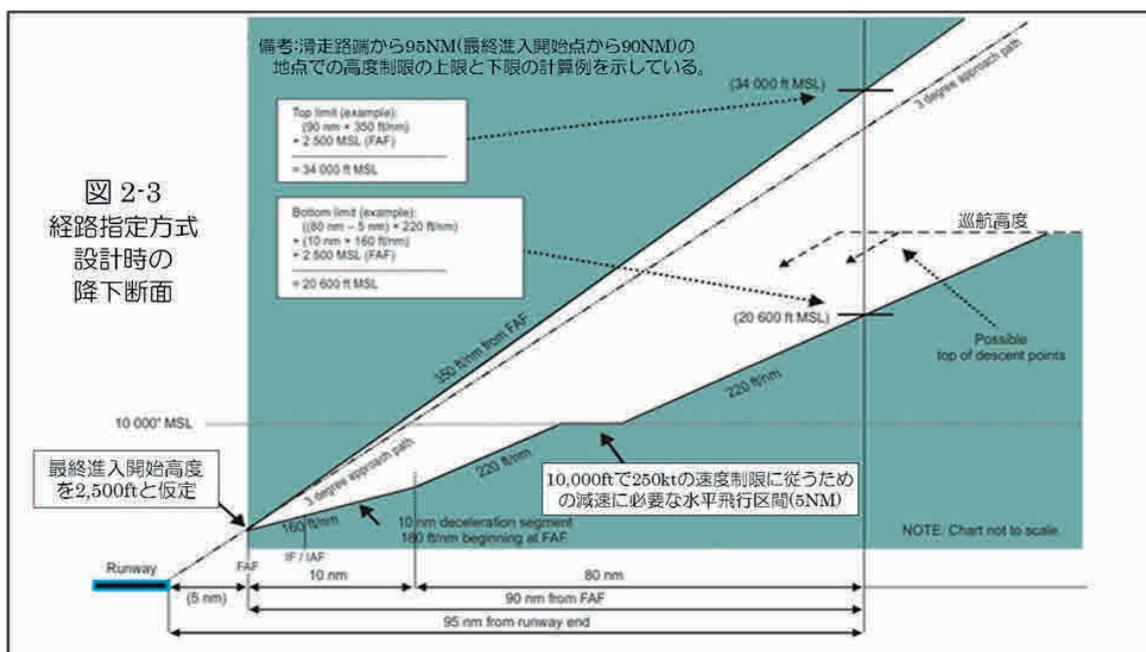
経路の一部若しくは全部がレーダー誘導により実施される。(図 2-2) 管制官によるレーダー誘導が行われる場合であっても、およその飛行経路は決まっているので、適宜管制官からパイロットに滑走路端迄の飛行距離が通報される場合がある。(ロンドンのヒースロー空港等)

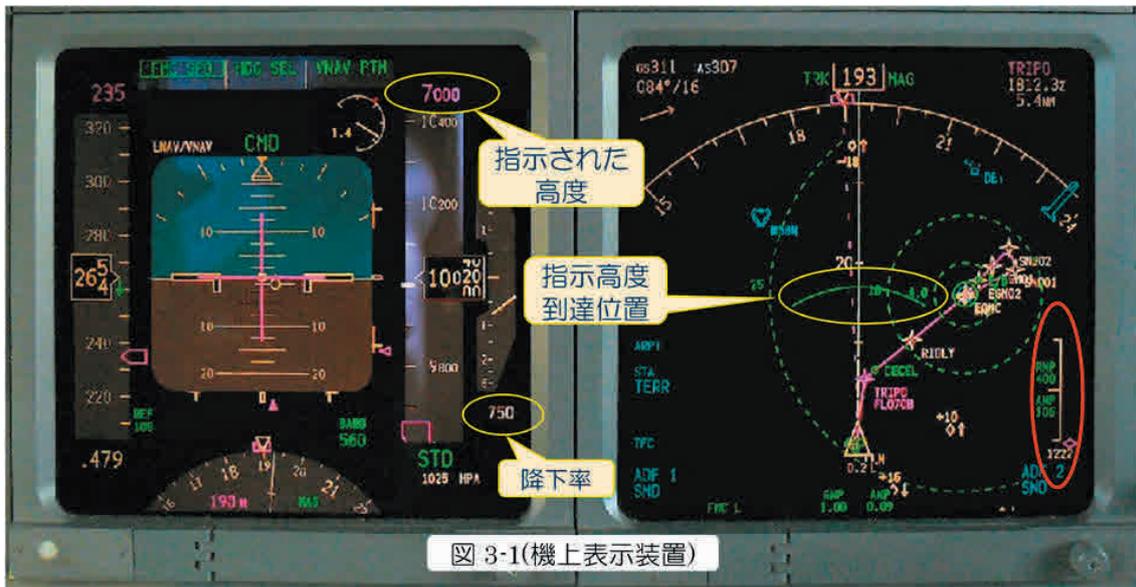
羽田空港では飛行距離ではなく、進入順位が通報されることがある。全ての旅客機が衝

突防止装置を搭載しており、表示器上で他機と自機の位置関係は把握できるので、およその進入順位はパイロット自身でも把握できる。そして、着陸間隔は約 2 分なので、進入順位が分かれば必要な降下率を計算できる。

(現在高度 - 進入高度) ÷ (2 × 順位) = 降下率
(2) 降下断面

現在の旅客機は空力特性が良いため降下角を 2 ~ 3.3° の範囲で降下できるようにすれば、エンジンの回転数をほぼアイドルに近い状態に維持しながら降下することが可能である。ただし、降下を続けながら減速するのは難しい。管制官が指示した高度の途中で水平飛行することは一般に認められていないが、10,000ft (3,000m) において航空法で規定する速度制限の 250kt に減速する場合には水平飛行が許容されている。また、進入開始点の直前では進入速度への減速と ILS (計器着陸装置) の特質から通常の降下角の 3° のパスより下側からグライドパス (進入角度を示す電波が造る軌跡) に会合する必要がある。図 2-3 は経路指定方式の通過高度の設計例であるが、通常の巡航高度からの降下飛行を行う場合にも応用することができる。





3. 連続降下運航の実際

(1) 旅客機の連続降下能力

図 3-1 は旅客機の操縦席に設置されている表示器を示している。左側を主飛行表示器 (PFD: Primary Flight Display)、右側を航法用表示器 (Navigation Display) と呼んでおり、機長席と副操縦士席にそれぞれ一対ずつ配置されている。

左側の PFD は機体が 265Kt(左中段の小窓) から 235Kt (左上段の小窓) に減速中で、高度は 10,200ft (右中段) から 7,000ft (右上段) に降下中であることを示している。

右側の ND の真ん中の横に長い楕円の枠内にある円弧は 7,000ft に達する範囲が示されているが、殆どの旅客機で表示することが可能となっている。そのため、ある地点の通過高度が明示されていればパイロットは連続降下を行うことができる。実際には、通過高度が明示されていなくともパイロットは経験から 3° の降下角度で通過できる高度を把握していることが多い。

そして、就航して数年しか経っていない新しい機体では右下の縦長の楕円に示される表示が有り、滑走路端からの経路長に対する理

想的な高度に対して、1722ft 高くなっていることが分かる。

(2) 東京国際空港における運用

今回は東京国際空港における運用の実際を紹介する。この空港では北風用に滑走路が運用される比率が 60% で、この場合に到着用に使用される滑走路のうち一番使用頻度の高いのは、A 滑走路 (RWY34L) である。図 3-2 に北風時に使用される進入経路を示したが、天気が良い (視程 25km 以上) 場合は東京湾上を飛行して千葉県富津岬を通る経路 (左の折れ線) となる。それ以下の天候では木更津上空を飛行して真っ直ぐ到着する経路 (破線で示した直線経路) となるが、A 滑走路を着陸に使用する場合の 60% 近くが適用されるため、最も使用頻度の高い進入経路である。

直線区間の長い進入経路を使用する場合について降下経路とその断面から連続降下が行われているかどうかを検証した。図 3-3 は比較的短い経路で進入経路に会合した航空機の航跡であるが、高度 3,000m と進入開始直前の高度 (1,500m) を除いてほぼ一定の角度で降下しているのが分かる。

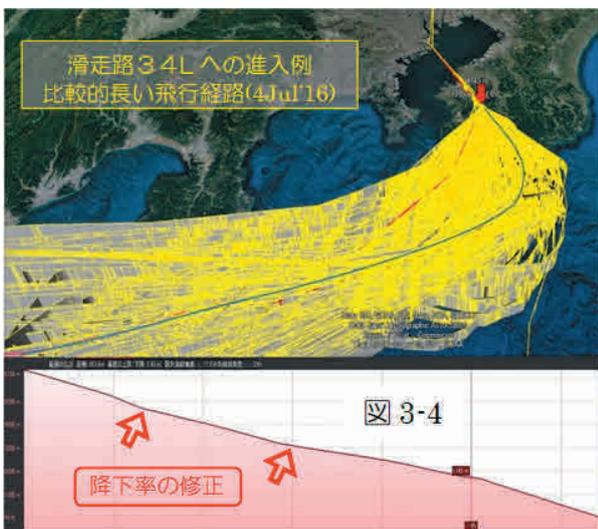
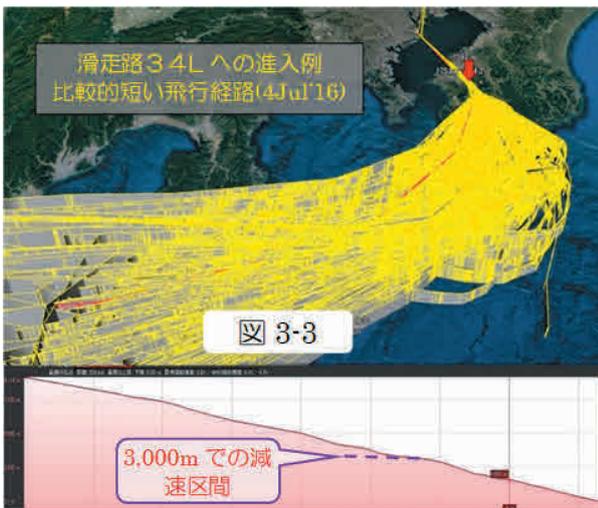
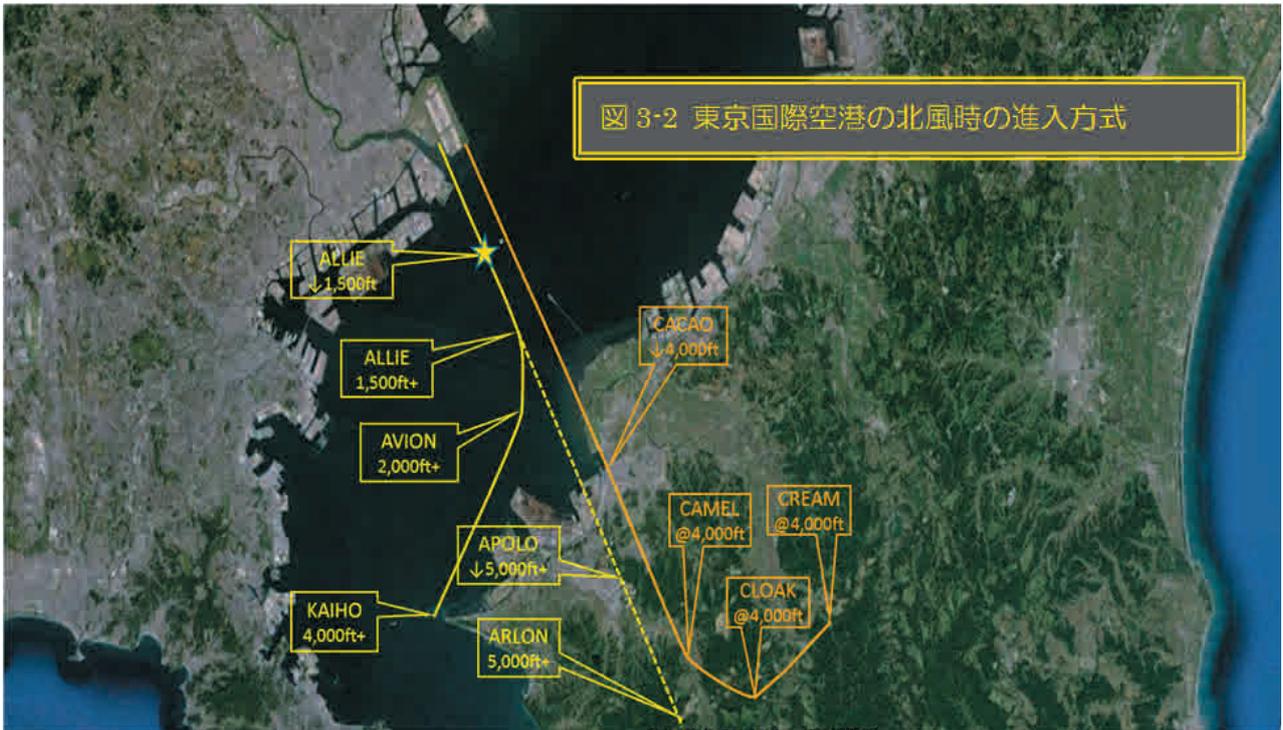
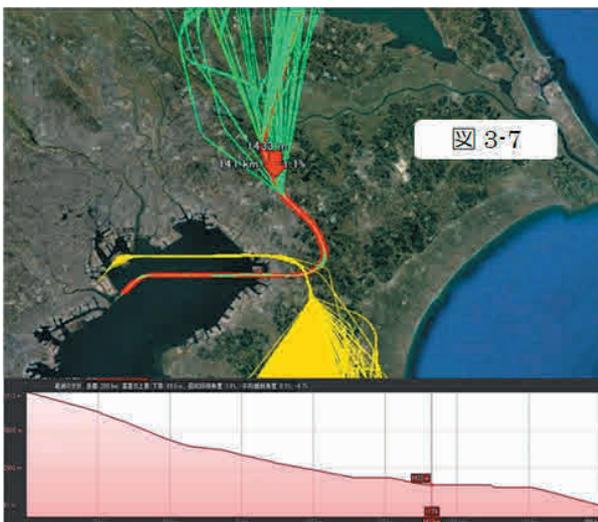
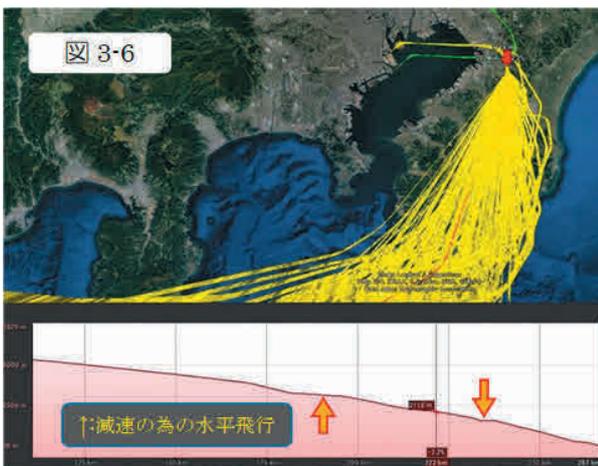
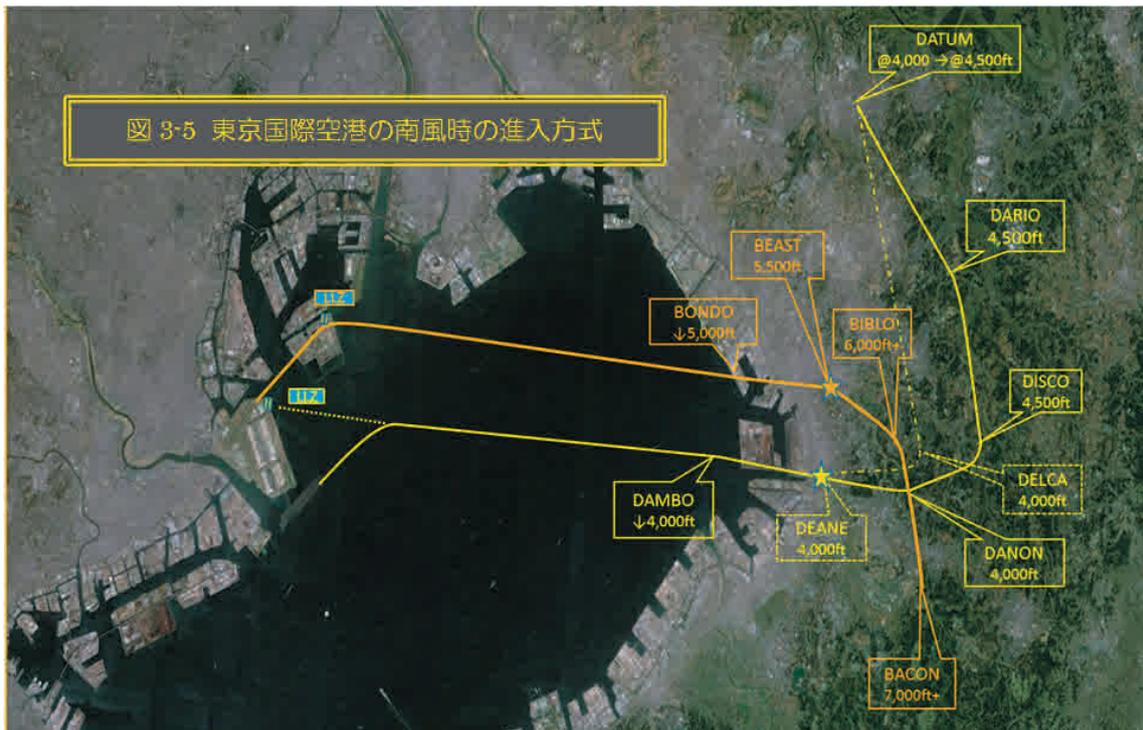


図 3-4 は遠回りの経路を飛行した航跡とその降下断面を示しているが、途中2回降下率の調整を行っているものの進入開始直前を除いて連続降下が実施されている。

なお、この例の場合は管制官により速度調整が適宜行われたことにより高度 3,000m (10,000ft) の時点では既に 250kt となっており、この高度での水平飛行は行われていない。

夏季においては南風が多く吹くことから、空港の東に進入経路を設けて B 滑走路（空港の北側）及び D 滑走路（南側）に進入する経路を設定している。（図 3-5）

B 滑走路には主に房総半島沖から北上してくる航空機を着陸させているが、騒音軽減進入方式として航空路誌に記載されている。この方式は東京湾を東西に飛行する直線経路の部分でローライザーと呼ばれる水平方向の経路を示す電波に乗って飛行するが、各地点の通過高度は 3° の降下角度が維持できるように指定されている。この到着経路と降下断面を図 3-6 に示すが、高度 3,000m と進入開始高度の 2,100m を除いて巡航高度から連続的に降下をしていることが分かる。



しかし、北から到着する航空機は南からの到着機の経路の下を潜って D 滑走路に着陸するために高度 1,350m (4,500ft) での飛行区間が長くなっている。(図 3-7)

千葉市の上空で北と南からの到着機が交差しているが、これは D 滑走路に到着する航空機が着陸復航した場合、A と C 滑走路から木更津方面に離陸する出発機の経路と交差することになるのでタイミングを取る必要がある。一方、北からの到着機は南に比べて半分程度の交通量となっている。北からの到着機を D 滑走路に下ろせば、タイミングを取る回数を減らすことができる。したがって、連続降下を可能とするためには経路が交差しないように空域を設計する必要があるが、安全や効率も勘案する必要がある。

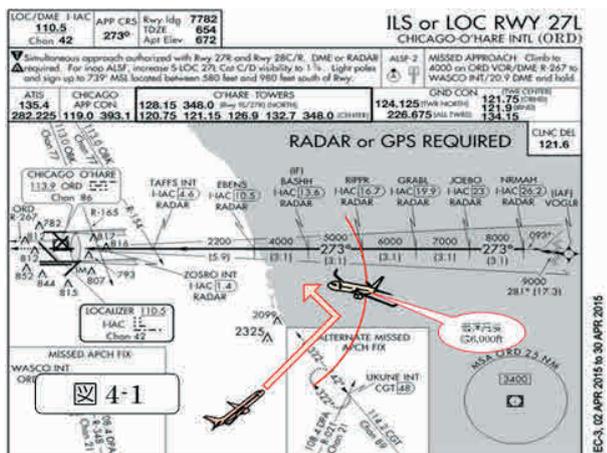
4. 諸外国における CDO/CDA の実施例

CDO は前述した ICAO の記述のとおり、主に巡航高度からの連続降下運航を想定している。実際には空域、航空交通流等による制約があることから大規模空港が比較的至近距離に配置されている地域では困難な場合がある。

その為、比較的低い高度（5,000ft～7,000ft）に限って連続降下が可能なように考慮されている空港は多い。そのような事例はCDA（Continuous Descent Arrival or Continuous Descent Approach）と呼ばれる。

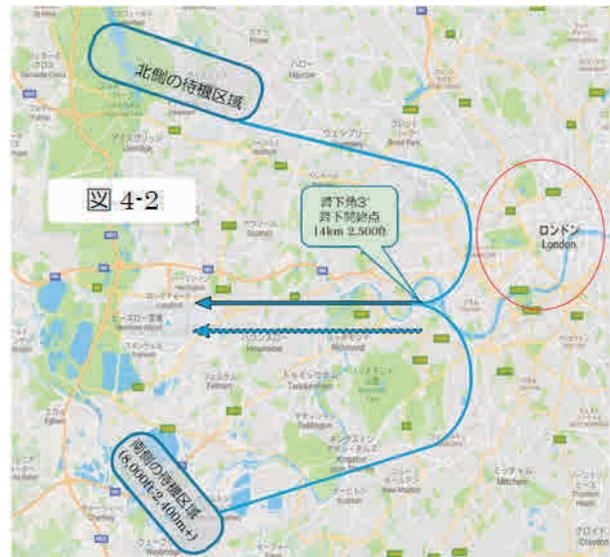
(1) 米国の進入方式の設定例

図4-1はシカゴ・オヘア空港の計器進入方式図である。この図は滑走路27Lに向かってILS進入方式が設定された例であるが、3.1nm（約6km）毎に区間高度が明示されている。到着機は滑走路の距離と区間高度を参照しながら降下すると3°の角度で降下を続けることができる。レーダーによる誘導では必ずしも滑走路に平行な経路を指定されるとは限らないが、その場合でも進入経路に会合すると予想される場所の高度を参照したうえで図3-1に示した機内の表示器を活用して連続降下を実施することができる。図4-1の下方に図示する航空機の場合には会合する地点で高度が6,000ftになるように降下率を調整することで連続降下が達成できる。このような進入方式はアトランタやサンフランシスコ空港でも設定されているが、米国ではCDA方式とは謳っていない。



(2) ロンドン・ヒースロー空港

ヒースロー空港の東20kmにはロンドン市街が広がっており、レーダー誘導により市街地を避けた飛行を行っている。しかし、混雑



時には着陸間隔を設定する為に空港の南北に待機地点を設けて対応しているが、待機高度は8,000ft（2,400m）以上としている。

当空港の航空路誌（AIP）AD22 飛行方式の項には次の記述がある。

(i) 待機区域を出る際の磁針路と飛行高度は管制機関により提供される。レーダー誘導が行われ、着地点からのおよその距離が明示される。追加の距離情報は降下開始点とILS/MLSの最終進入コースに会合する迄の間に提供される。

(ii) 降下の概容：降下指示を受けたパイロットは、最適な連続降下を行うための適切な降下率で降下を行うこと。その目的は水平飛行を行うこと無く、適切な高度でグライドパスに会合することにある。

しかし、3項（連続降下運航の実際）で述べたように、多くの機体は連続降下を行う能力を備えている。また、空港当局は待機区域の飛行高度は8,000ft以上であることから、対策を取る必要が無い区域であるとの認識を示している。しかし、複数の航空機が同一地点を周回しており、且つ水平飛行では降下中に比べてエンジンの出力を高める必要がある。また、単位時間当たりの燃料消費量は連続降下を行っている場合に比べて3～5倍に上る。

東京国際空港ではロンドン・ヒースロー空

ロンドンと東京周辺の地理的關係



港のように空港近傍での空中待機は殆ど行われていない。これは交通流管理が機能していること、及び巡航高度から降下開始を行う空域（紀伊半島から伊豆半島にかけての洋上）において順序付けと大まかな着陸間隔の設定が可能となっているためである。図 4-3 は本州から九州にかけての日本地図と東京国際空港に到着する航空機が順序付けの為に誘導が行われる区域を示している。その上にロンドンを中心としてヨーロッパの主要空港が存在するフランスのパリ、ベルギーのブリュッセル、オランダのアムステルダムの位置関係を示したものである。パリのオルリー空港とヒースロー空港は 340km の距離を 1 時間 15 分で結んでいる。駐機場を離れてから離陸するまでの時間に差違はあるものの、日本の大阪伊丹空港と東京国際空港は 420km の距離

を 1 時間 10 分で結んでいる。また、ヨーロッパではユーロコントロールと呼ばれる管制機関が高高度においては一括で交通流を管理することを目指しているが未だ達成されていない。したがって、日本のように出発時間を制御して空港周辺の航空機の数調整する機能が充分とは言えない。

5. 進入開始及び進入中の機体操作

図 5-2 は概ね高度 2,500m (8,000ft) 以下におけるフラップ操作のタイミングとその速度及び降着操作（車輪を下ろす）の時期などについて示したものである。

ILS（計器着陸装置）により着陸する場合には降下角の情報を示すグライドパスに降下パスの下から会合する必要がある。これは、原理上疑似電波が発生するからである。

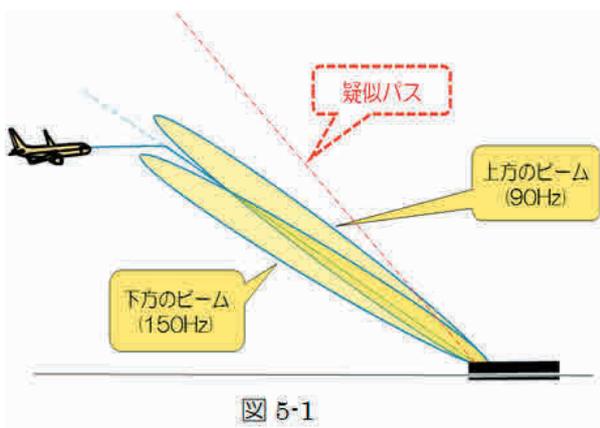


図 5-1

また、進入速度は降下中の速度よりも小さいため、減速幅が大きい場合には水平飛行を行う必要がある。

また、安全上の観点から、高度 300m (1,000ft) では着陸態勢を確立していることが必要とされている。この地点は滑走路端から約 6km で着陸までの時間は 1 分 20 ~ 30 秒である。着陸するには車輪を下ろさなければならないが、最終進入速度に落とすためにはフラップを展開して揚力を増す必要がある。車輪やフラップの展開は抵抗が増えるためにエンジンの出力を増加させる必要もある。車

輪を下ろしてから一連の操作が完了して機体が安定し、パイロットがチェックリストを完了する迄には 1 分程度必要とされている。

一般に降着操作（車輪を下ろす）を実施する高度は 600m 以上といわれており、滑走路端からの距離は約 12km (6.5NM) である。

ロンドン市街の北 50km に位置するルートン空港では空港の東 9km にスティーブニッジという町があることから、2017 年の 5 月から市街地を通過後に降着操作を実施する試みを行っている。記事によれば市街地上空の航空機騒音が一機当たり 2.7 ~ 3.4dB の改善が見られたとしているが、この試みは安全上の理由から天候が良好の場合に限られている。さらに、この空港を離発着する旅客機の大半は旅客機としては比較的小型の A320 や A319 等の機体である。これらの機体は、大型機に比べて各種機構のストロークが短く動作時間が短い。その上進入速度も遅いことから天候が良好な場合には、より空港に近い地点での降着操作を可能にしている。

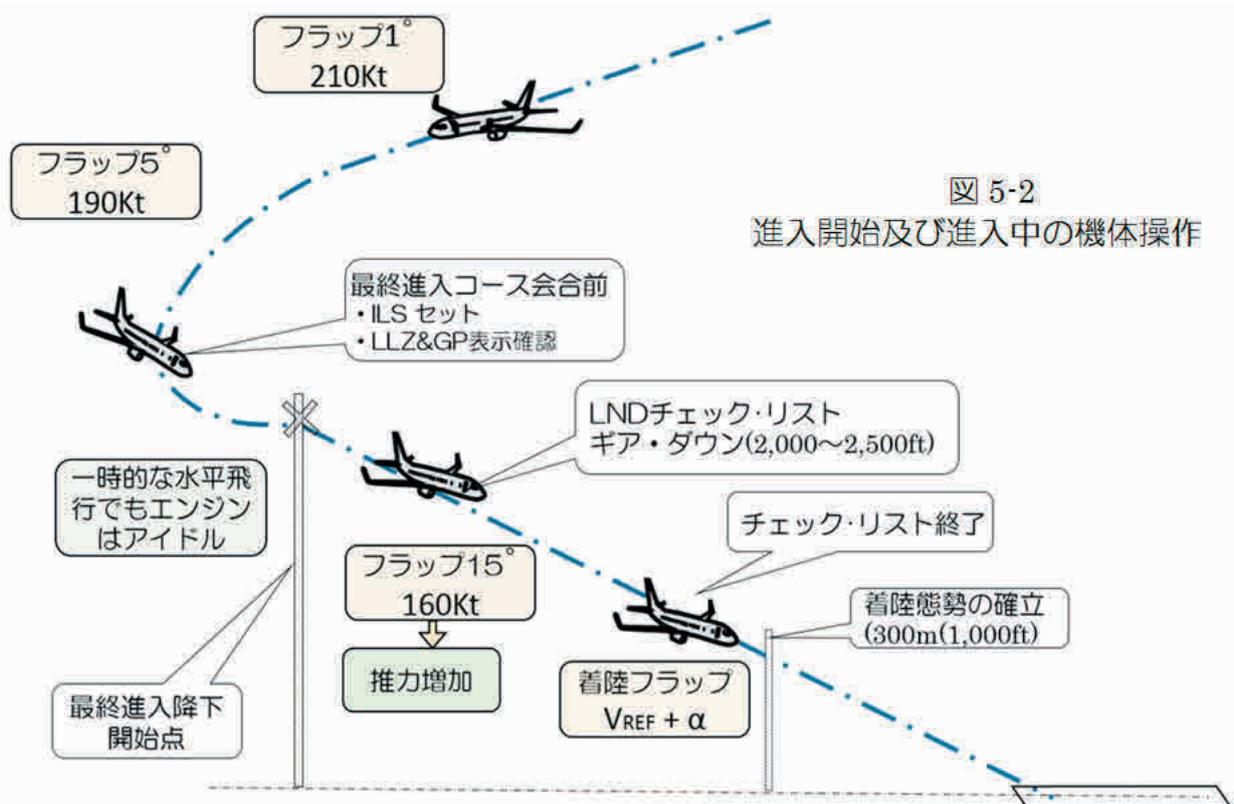


図 5-2

進入開始及び進入中の機体操作

研究報告

フランクフルト空港における航空機騒音対策の事例紹介 - 第4滑走路計画における夜間飛行禁止判決以降の 空港と住民との合意形成に関する考察 -*

後藤 恭一**

1. はじめに

ドイツでは「怒れる市民 (Wutbürger)」なる言葉が広く認知されるようになって既に暫く経つ¹⁾。この用語は2010年に新聞に登場したメディアスローガンの用語であり、特定の政治決定に対する憤慨を露わにして、激しく抗議する一般市民を表した言葉である。その怒りの矛先は多くの場合、巨額の費用が投じられる大規模なインフラ事業に向けられる²⁾。しかし、フランクフルト空港ではそれよりも早く、1973年の第3滑走路建築計画発表や、続く第4滑走路の建築中から、周辺住民、自治体による大規模なデモンストレーションや、建築禁止、夜間差止め請求の提訴など一般市民による激しい抗議が生じた。現在実施されている空港周辺対策はそうした歴史的経緯を踏まえているものと考えられる。そこで、同事案を手掛かりとしつつ、訴訟の経緯とその後の騒音対策の実施内容を整理する。いわば空港と周辺住民の妥協点合意の形成の過程と対策のねらいがどこにあるかに焦点を当て、航空機騒音対策の課題を検討したい。

2. 空港の概要

フランクフルト空港は2001年に民営化され、Fraport AG (フラポート社) が空港運営を行っている。

フランクフルト空港は、ドイツ国内において最も離発着便数が多い空港である。2016年の発着回数を見るとパリ・シャルル・ド・ゴール空港(475,776回)、ロンドン・ヒースロー空港(474,102回)に次ぐ欧州第3位の空港である(468,153回)³⁾。フランクフルト空港は、4つの滑走路を有してお

り、そのうち3本は東西方向に延びた平行滑走路となっている。北側の第4滑走路は航空機着陸専用だが、中央と南側の滑走路は離陸と着陸の両方に使用されている。

南北方向に延びる第3滑走路は南向きの離陸専用滑走路となっている。2011年以降23時～5時の6時間、空港は閉鎖されている。

3. 夜間運航禁止の経緯

フランクフルト空港における夜間運航禁止の経緯を整理すると、第4滑走路建築においては、(a) 第3滑走路の経緯から地元との対話のもと進められた。(b) プロジェクトチームによる第4滑走路の容認に際して滑走路建築許可のための条件が付けられ、23時～5時の全ての滑走路の夜間禁止が含まれていた。(c) フランクフルト空港を管轄するヘッセン州は空港拡張計画を承認した際、夜間飛行禁止を解除した。(d) 周辺自治体等は夜間飛行取消訴訟を提起し、2012年に23時～5時の全ての滑走路において飛行禁止が確定した。という流れがある。以下に詳細を述べる。

1) 航空機騒音問題

フランクフルト空港周辺で航空機騒音問題が浮上したのは1973年、離陸専用の第3滑走路の計画の際である。第3滑走路建設により騒音が増加することや、森林が伐採されることが見込まれることから、住民や環境保護者は大規模な抗議行動を起こした。1980年10月21日にヘッセン行政裁判所は新滑走路建設を決定し、司法紛争は終了した。しかし抗議行動は続き、

* Case study on countermeasures against aircraft noise at Frankfurt Airport

** (前) 航空環境研究センター 調査研究部 部長代理 (現) いわき明星大学 看護学部 講師



図-1 フランクフルト国際空港（左上の滑走路が第4滑走路、南北に延びる滑走路が第3滑走路）

1981年11月14日には滑走路計画反対のための12万人以上が参加するデモ行進が行われた。

第3滑走路が供用された1984年4月12日以降も大規模な抗議行動は続いたが、1987年に警官2人が殺害され、7人が負傷する事件が生じ、これを機に組織的抗議は終わりとなった。

2) 円卓会議による話し合いと滑走路建築許可の条件

1998年に空港再拡張計画において第4滑走路計画を発表後、第3滑走路建設時の大規模な抗議行動があったことにより、合意形成の道筋を探ることになった。政府、住民、フランクフルト空港会社（2001年以降は民間会社であるFraport AGが担う）、航空会社、航空交通管制会社（DFS）など企業といった関係機関が参加する協議の場が結成され、議論が重ねられた。1998年から2000年には「フランクフルト空港調停プロセス」（英語名:Mediation Process Frankfurt Airport）が設置され、そのプロジェクトチームは新滑走路を許可する結論が出された。ただし以下の条件が付けられた。

- 1) 地域対話フォーラム（英語名:RDF Regional Dialogue Forum）の設立
調停で始まった対話を継続し、強化するためのフォーラムである。この機関がこれ以降

のフランクフルト空港における空港と住民の合意形成を担ってゆく。

- 2) 小型機の着陸専用とする。
- 3) 騒音対策の改善
- 4) 午後11時から朝5時までの間の全滑走路の夜間飛行の完全な禁止とする。

地域対話フォーラムが設立され、2001年から2008年にかけては第4滑走路建設案を評価し、空港北西部に滑走路を建築することを決定した。

3) ヘッセン州による夜間制限の解除

ドイツでは夜間の離着陸規制や、発着回数等の施設の利用・運用に関する事項を決定する権限は、ヘッセン州経済省エネルギー・交通・地域開発省にある。ヘッセン州政府は2007年12月18日に第4滑走路建築を認可した。その際にフランクフルト空港は特に夜間帯の国際貨物輸送が必要であるとして、建築条件として挙げられた夜間飛行禁止要求が解除され、午後11時から午前5時に主に貨物便17便の離発着を許可した。

2009年に第4滑走路の建設工事が始まった。既存の平行滑走路間の距離は約1400m（4260ft.）であり、同時ILS運用の条件を満たさないが、第4滑走路が運用すれば北滑走路

との同時着陸が可能となる。1時間あたりの離着陸容量が83回から126回に増加することが可能となる。

4) 州政府による空港運用許可有効性を巡る訴訟
ヘッセン州による午後11時から午前5時の17回の夜間離発着の許可に対して、オッフエンバッハ・アム・マイン市(Offenbach)等のフランクフルト空港周辺の自治体や企業、自然保護団体、個人等がヘッセン州カッセル下級裁判所に取消を提訴した。下級裁判所は2009年8月21日、午後11時から午前5時の17便を承認した。これにより午後10時から午前5時の間に年平均150便の定期便運航が可能となる。承認した理由は、フランクフルト中心部の確保と強化、経済効果が得られることから、その公共利益を優先したものである。さらに8月29日にはルフトハンザ貨物は、夜間飛行の禁止や夜間便が大幅に減少した場合にはフランクフルト空港から撤退することを表明した。それらを不服としてフランクフルト空港周辺自治体はヘッセン州地方高等裁判所に控訴した。

5) 夜間飛行禁止の決定

ヘッセン州地方高等裁判所は、第4滑走路供用後の2011年10月30日以降、フランクフルト国際空港における午後11時から午後5時までのフライトの全面禁止(ban)に加えて、午後10時から11時、午前5時から6時までの時間に許可される定期便数を150便から133便に削減するとの判決を下した。但し、航空会社の責任以外の事由により出発が遅れている「チャプター4」適合機材の離陸は、監督官庁であるヘッセン州経済・交通・土地開発省の許可を得られれば、午前0時まで離発着が可能である。安全上の理由、緊急事態、救援活動等については、午前0時以降も許可されるものとした。

この高等裁判所の判決を2012年4月4日にはライプチヒ連邦行政裁判所は支持し、それにより午後11時から午前5時の間の全滑走路の

離発着の禁止が確定した。

4. 深夜早朝帯の運航状況

原則すべての滑走路において夜間禁止が実施されたことにより、早朝の時間帯において離陸、着陸が集中することが予測される。また、原則夜間禁止であるが例外的措置もある。午前5時台の運航状況や午後23時以降の遅延便数の状況次第では睡眠妨害等が生じるため、何らかの対策を取る必要も生じる。そこで、午前5時台の早朝における運航状況と、午後11時から0時の遅延便数について調べ分析した。

1) 一日当たりの5時台の5分毎の離着陸回数

フランクフルト空港が所在するヘッセン州は、フランクフルト空港における運航に関する年間レポートを公表している。そこで最も運航数が多い2016年の年報をもとに、早朝5時台の5分毎の一日当たりの離着陸回数を算出した(図-2)。

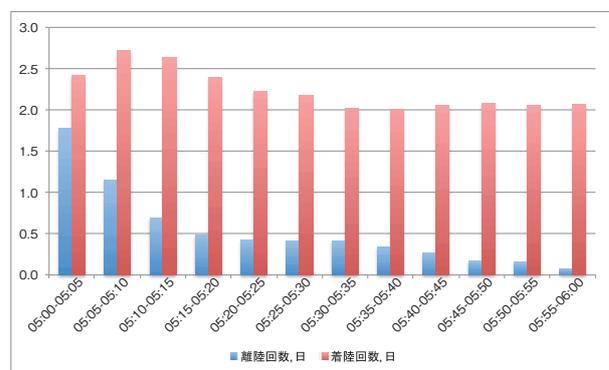


図-2 一日当たりの5時台の5分毎の離着陸回数(2016年)
ヘッセン州の資料をもとに筆者作成

離陸、着陸ともに飛行禁止が解除される5時台前半の離着陸回数が多いことがわかる。特に離陸は最初の5分間に集中し、一日平均約1.8回の離陸がある。着陸回数は05:30までの前半に多く、一日あたり2回以上着陸していることがわかる。

2) 月別1日当たりの23時~0時の離着陸回数

2012年から2017年の年報をもとに、月別の1日当たりの23時~0時の離着陸回数(2012~2017年平均値)を算出した(図-3)。

遅延便は季節的特徴が見られ初夏に多く、7月における1日当たりの遅延便の着陸回数は2.6回であった。これら遅延理由は濃霧の発生、暴風雨等の気象によるものであった。冬期は降雪によるものも多かった。

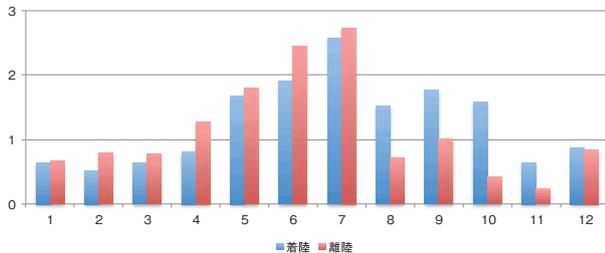


図-3 月別の1日当たりの23時～0時の離着陸回数
ヘッセン州の資料をもとに筆者作成

早朝5時台の1日当たりの5分毎の離着陸回数や、1日当たりの遅延便数を調べてみると、少なからずの運用があることが明らかになった。従って、フランクフルト空港においては、特に夜間禁止時間の前後帯の航空機騒音対策が重要であることが推測された。

5. 騒音対策

フランクフルト空港では2011年以降毎年様々な積極的騒音保護措置 (aktiver Lärmschutz Active Noise Abatement Measures) を実施している。

4.の検討において、フランクフルト空港周辺における実効的な騒音対策としては、特に深夜早朝帯における騒音対策が重要であることが推測された。

実際に2011年以降に実施された騒音対策を調べてみると、深夜早朝帯における騒音対策が当初からトライアルされて、現在、標準運用として採用されている。なお、フランクフルト空港周辺での騒音軽減のための運用は後述するが、計画→トライアル→効果検討→標準運用として採用される。その際には住民代表も参加して協議が行われる。また、トライアルの際には様々な運用が検討されるが、ここで紹介する運用方法は現時点におけるものである。

5.1 静穏時間の確保

空港周辺において、夜間禁止されている6時間に加えて静穏時間を1時間延長するための運用方法がある。風向き、時間帯、曜日によって滑走路運用を変えるため、この運用はDedicated Runway Operations (専用滑走路オペレーション) の頭文字を取ってDROpsと呼ばれている。

現在実施されている運用としては、東風時に実施される運用方式と、西風時に実施される運用方式がある。運用割合は年によって異なるが、東風運用は20～30%、西側運用は70～80%である。

1) 東風時に実施される運用方式 DROps Early Morning

奇数日と偶数日で滑走路と飛行経路を交替して離陸経路下の騒音軽減を図る運用手順である。東風運用時の5時～6時に実施する運用方法である。2011年から実施されたDROps Early Morningのトライアル時には東風運用、西風運用両方が検討され一度中断したが、2015年から再開され、現在は東風運用時のみ実施されている。

奇数日の運用

奇数日の離陸は18離陸専用滑走路のみ使用する。そのため、西側に離陸することはないために空港西側の地域に当たる、フランクフルト (Frankfurts)、オッフェンバッハ (Offenbach)、ノイイーゼンブルク (Neu-Isenburg) 等の地域において静穏時間が確保される。そのため奇数日の運用をDROpsと呼ぶ。

偶数日の運用

偶数日には、18離陸専用滑走路と中央滑走路を使用した離陸が行われる。南側平行滑走路からの着陸はないため滑走路直近は離陸時の騒音を避けることが出来るが、中央滑走路からの離陸があるために、離陸経路下では頭上通過するために、空港西側の地域では静穏が

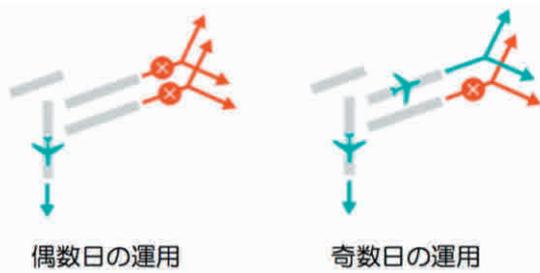


図-4 DROps Early Morning の運用方法 (出典 UMH)

確保されない。そのため偶数日の運用は Nicht-DROps (Non-DROps) と呼ばれる。

2) 西風時に実施される運用方式 DROps Lärmpausen (Noise respite)

滑走路を夜間と早朝に交替して、騒音から救済される時間を確保する運用方式である。それにより夜間・早朝に静穏時間が1時間確保され、23～5時の夜間飛行禁止時間と合わせると、騒音から救済される時間は計7時間となる。

この運用方式はフランクフルト航空機騒音委員会 (FLK) と空港と地域のフォーラム (FFR) によって推奨されたもので、当初 “Noise absence model” と呼ばれ、1～5の5パターンについて西風、東風の両方の運用が検討されていた。最終的に model4 のパターンが採用され、2015年4月23日以降1年間トライアルされ、2016年5月以降標準となった。現在は西風運用時のみ実施されている。

夜間禁止時間は6時間であるが、夜間禁止時間の前後に1時間を加えて7時間とすることは、夜間睡眠の保護を目的としたものと思われる。DROps による静穏時間の確保の稼働率の推定

DROps Early Morning の偶数日には空港西側の地域では偶数日の運用では、朝の静穏時間を確保できない。航空機は風に向かって離着陸するため、フランクフルト空港における風向き別運用と静穏時間確保の稼働率の関係を推定する。

最も深夜早朝帯の運航数の多い2016年の年間当たり西風運用は70% (68.9%)、東風運用は30% (31.1%) である。風向きは1日を通し

て変化するが、この運用割合をもとに算出する。DROps Lärmpausen は西風運用時に実施されるために、年間のうち70%は静穏時間が確保される。残り30%は DROps Early Morning が運用されているが、これらのうちの半分 (奇数日) には静穏時間が確保される。これらの数値を併せると静穏時間の確保率は机上では約85%となる。運用検討の際には住民代表も加わって協議されている。夜間規制は6時間であるが、さらにこの1時間が加わり、この7時間の静穏が確保することが空港と住民の1つの合意点とも考えられる。

5.2 住宅密集地を避けた運用方法 Segmented RNAV (GPS) Approach

フランクフルト空港は23時から5時まで夜間禁止の措置が取られているが、23時以降の例外的措置も認められている。そこで、特に遅延便の運航が多い23時から0時の人口密集地上空を避けた運用がある。航空会社の責任以外の事由により遅れている「Chapter4」適合機材は、監督官庁の許可が得られれば24時まで離着陸が可能となっている。また、安全等の理由によるものは0時以降も許可される。

トライアルが開始された2011年当時でも、これら住宅地を通過する航空機は僅かであったが、人口密集地区の人口密集地区のオフエンバッハ (Offenbach)、ハーナウ (Hauau)、マインツ (Mainz) 上空を避けて曲線的に進入する運用方法が行われた。西風運用時の中央滑走路と南側平行滑走路の通常進入を図-5に赤線として示す。

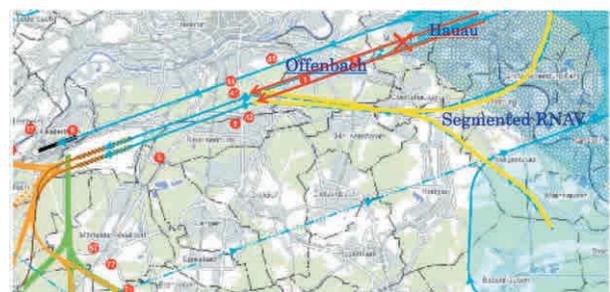


図-5 西風運用時の Segmented RNAV (GPS) Approach (出典 Fraport AG の資料をもとに筆者が作成した)

通常進入では ILS アプローチ下に Offenbach、Hauau の住宅密集地があり航空機騒音の影響を受ける領域は経路下に集中する。そこで、曲線進入(黄色線)を行うことにより住宅密集地を避けた運用が可能となる。

東風運用時の運用を図-6に示す。西風運用時同様に、Segmented RNAV (GPS) Approach を行うことにより住宅密集地を避けた運用が可能となる。

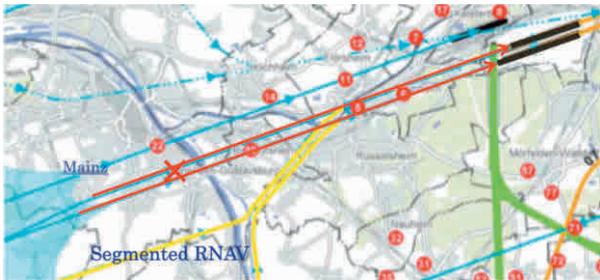


図-6 東風運用時の Segmented RNAV (GPS) Approach (出典 Fraport AG の資料をもとに筆者が作成した)

現在は午後 11 時から 0 時の遅延便に適用されているが、今後 22 時以降の便にも適用されることが検討され、2018 年以降地元と協議が開始されると、アナウンスされている。

5.3 人口密集地上空を避けた旋回進入(終日実施)

Segmented RNAV (GPS) Approach と同様のコンセプトであるが、フランクフルト空港では人口密集地上空を避けた旋回進入を終日実施している。西風、東風運用時ともに、住宅密集地から離れた地点で旋回させることにより騒音軽減をはかる運用である。2012 年からトライアルが開始され、2014 年に標準となった。

5.4 Steeper Approach (3.2° 進入)

高高度を通過することにより地上到達騒音の軽減をはかることが可能となる。通常の進入角は 3° であるが、北西滑走路においてそれより若干高い 3.2° の着陸が 2012 年からトライアルされ、2014 年 12 月 19 日から標準手順となった。トライアル期間における騒音測定の結果、21Km 付近では 1dB (A) の軽減効果が認めら

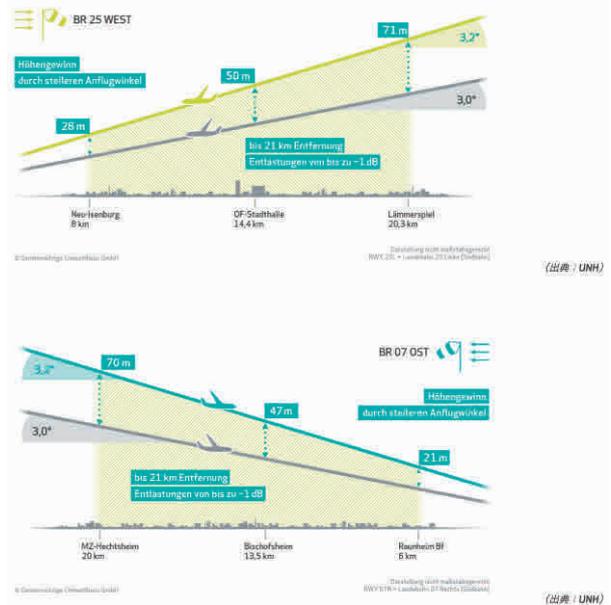


図-7 Steeper Approach の様子 (出典 UMH)

れたことが報告されている。

Steeper Approach はロンドン・ヒースロー空港でもトライアルが実施されている。フランクフルト空港と同様に 10 海里 (18.5km) 付近の騒音軽減を目的としたものであり、2015 年 8 月から 2016 年 3 月まで施行された。なお、東京国際空港との位置関係で言えば、18km は早稲田付近に相当する。

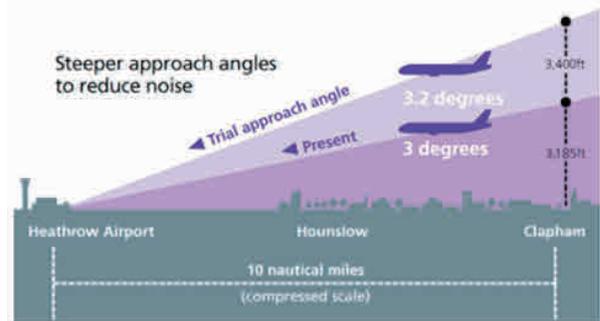


図-8 Steeper Approach の様子 (出典: Heathrow Airport Limited)

フランクフルト空港では深夜早朝帯における騒音対策の方法として、1) 「静穏時間を確保」して騒音から救済される時間を 7 時間設ける方法と、2) 遅延便対策としての「住宅密集地を避けた運用方法」の 2 つがある。なお、住宅密集地を避けた運用方法 Segmented RNAV (GPS) Approach、平行滑走路にお

ける Steeper approach を実施するには、衛星ベースの精密飛行法 GBAS (Ground-Based Augmentation System) に必要な機材が搭載されている必要がある。2017年4月現在、フランクフルト空港を利用している航空会社の10%未満しか GBAS に必要な機材を搭載していない。そこで Fraport AG は航空会社に対して GBAS 装備の導入促進プログラムを実施している。

6. 騒音軽減運航方式のアイデアから運用まで

騒音とその負の影響を軽減するには、様々な騒音軽減運航方式を実施する必要がある。フランクフルト空港では夜間飛行禁止の判決が下された2011年以降も、様々な騒音軽減のための運航が行われてきた。さらに現在も様々な騒音軽減運航方式の導入が検討されている。

こうしたフランクフルト空港では積極的な騒音対策には発生源対策とも言える。法的拘束はなく、自主的に実施されている。こうした新しい運航軽減方式の導入を担うのが FFR (空港と地域のフォーラム) である。FFR は、前出のフランクフルト空港と地域対話フォーラム (RDF) を後継する組織として2008年に設立された。なお、RDF は前述した通り、第4滑走路建築承認の際の条件として設立された組織である。FFR はフランクフルト市と航空業界を結びつける組織であり、いくつかの委員会に分かれて様々なトピックスを取り扱っている。

騒音軽減運航方式のアイデアから運用までの手順において、フランクフルト空港ではユニークな手続きが行われている。1) 騒音軽減運航方式のアイデアは、ExpASS (エキスパートグループアクティブノイズ保護) の呼ばれる部署のメンバーが提示する。ExpASS は騒音対策の開発に必要な専門知識と経験を有する機関や地方自治体の代表者で構成されている。委員会への参加は自発的であり、法的義務はない。ヘッセン首相がメンバーを招集する。2) 提示されたアイデアは2段階の基準でチェックされる。1つ目の基準は、騒音防止区域変更が必要となるか、

航空利害関係者にとって経済的な利点、不利な点があるかである。これをクリアすると、2つ目の基準、バランス、費用便益、効率性、適用性、迅速性等から検討される。3) 選択されたアイデアは承認手続を経る、4) 「地域の協議」と呼ばれる、空港と地域のフォーラム (FFR)、航空機騒音保護委員会 (FLK) と、市長や地方自治体の代表者、さらに無作為に選ばれた市民が参加して協議が行われる。5) FFR 調整委員会が承認決定し、試験運用が行われる。6) その後、航空騒音委員会 (FLK) は管轄当局およびドイツ航空管制官のサポートを受けて勧告を決定する。7) 最終的な決定は連邦監督局に委ねる。

このように、騒音軽減運航方式の導入に当たり、フランクフルト空港ではユニークな取り組みが行われている。特筆すべき点は、承認手続きの段階で、様々なステークホルダーが関与することと、試験運用を経て標準運用とすることの2点であろう。

7. ドイツにおける法律に基づく騒音対策

6. 騒音軽減運航方式のアイデアから運用までの手続きが法的拘束力をもたない自発的な騒音対策であるのに対して、法律に基づく騒音対策も行われている。

1) 法律に基づく騒音対策 (Gesetz zum Schutz gegen Fluglärm 航空機騒音防止法)

1971年、一般の市民および近隣住民における危険、不利益、および航空機騒音の相当な迷惑からの保護を目的とし、定められた法律。この目的のために、飛行場近くに2つの騒音保護区域を定めた。昼間区域 (Tagschutzzone) 1については、等価騒音レベル75dB (A) を越える地域であり、住宅の建設を禁止されている。昼間区域2については、等価騒音レベル67dB (A) を越える地域である。2007年10月31日同法が改正され、昼間地域に加えて新たに夜間区域 (Nachtschutzzone) が追加された。州政府は同法に従って、騒音防止区域を法令として設定することが義務づけられた。既存空港

と新設あるいは大幅に拡張された空港について民間空港と軍用空港をそれぞれ区別して規定した。また、騒音レベルも引き下げられた。さらに、2011年以降、新規あるいは大幅に拡張される民間空港の夜間騒音が強化された。2007年の評価値は午後11時から午前6時の8時間の等価騒音であるLAeq,nightが53dB(A)から50dB(A)に引き下げられた。また、騒音レベルの最大値LAm_{ax}も57dB(A)×6回から、53dB(A)×6回に強化された。なお、騒音レベルの最大値は屋内の推定値であり、屋内外遮音レベルは15dB(A)を見積もっている。

「昼間区域1」は、新規の住居建築が禁止されている。また、既存の学校、幼稚園、保育園、老人ホームなど公共施設の防音対策・換気設備設置などが行われている。「昼間区域2」は、学校、幼稚園、保育園などの新設が禁止されている。「夜間区域」は、新規の住宅建築が禁止され、既存の住居については、子供部屋、寝室の防音対策・換気設備設置（窓を閉めたままでの換気が可能な仕様）が行われている。

	内容	2007年	2011年～
昼間区域1	新規の学校、幼稚園、保育園、老人ホーム、病院等公共施設は建築禁止 新築住居の建設禁止 既存住宅は防音工事*	LAeq, day 60dB(A)	LAeq, day 60dB(A)
昼間区域2	新規の学校、幼稚園、保育園、老人ホーム、病院等公共施設は建築禁止 既存施設は防音対策*	LAeq, day 55dB(A)	LAeq, day 55dB(A)
夜間区域	新規住居の建設禁止 既存住宅は防音工事*	LAeq,night 53dB(A) LAm _{ax} 57dB(A) ×6回	LAeq, night 50dB(A) LAm _{ax} 53dB(A) ×6回

表-1 法律に基づく騒音対策
新規あるいは大幅に拡張した民間空港

空港周辺環境対策は航空機騒音防止法(Gesetz zum Schutz gegen Fluglärm)(2007年改正)に基づき実施している。

2) Fraport AGによる騒音対策

2007年に改正にともない、Fraportの騒音対策も見直された。同法に基づき、空港周辺地域の一定のエリアは、建物の防音対策などを空港会社の費用において定められた騒音値以内を保つ必要があり、防音工事の費用等は、空港運営者であるFraport AGが負担している。さらにFraport AGが独自に実施している対策としてFraport Casa Programがある。航空交通と住民の保護との両立性にとって貴重な貢献と位置づけて、滑走路の延長線上、かつILS(計器着陸装置)による着陸の際に航空機の高度が350m(985ft)未満となる地域にある家屋などを買取るものである。なお、対象となるのは空港拡張計画以前から建築された家屋である。2012年からプログラムが実施され、2014年10月にこのプログラムは締め切られた。1億ユーロ以上の費用が費やされた。

8. まとめ

本稿で明らかになった点は、次の通りである。(a) フランクフルト空港における第4滑走路建築計画時には過去の経緯から地元との対話のもと進められた。(b) プロジェクトチームによる第4滑走路建設の容認に際して条件が付けられ、その1つとして23時～5時の全ての滑走路の夜間禁止があった。(c) フランクフルト空港を管轄するヘッセン州は空港拡張計画を承認した。その際、夜間飛行禁止を解除した。(d) 周辺自治体等は夜間飛行取消訴訟の提起し、2012年に23時～5時の飛行禁止が確定した。(e) フランクフルト空港周辺における騒音対策は深夜早朝帯の騒音負担軽減を中心に実施されている。

こうした事実から見えてくるフランクフルト空港における空港と住民の合意形成の重要な点は

下記の3点であると考えられる。

- * 飛行禁止の時間帯は6時間である。フランクフルト空港ではさらにその前後の1時間を加えて、静穏時間7時間を確保する工夫を行っている。空港需要と環境負荷はトレードオフの関係であるが、この夜間の静穏時間7時間が空港と周辺地域の合意点(妥協点)になっていると思われる。
- * フランクフルト空港では午後11時から午前5時は原則飛行禁止となっているが、例外措置も認められている。状況を確認すると、離着陸回数ともに7月が最も多く一日当たりに換算すると2.5回以上であることが分かった。これに対応するために住宅密集地を避けた運用も行われている。こうした例外的な運航についても対策を取るなどの工夫がなされている。
- * 様々な騒音軽減運航方式が考案されているが、導入にあたりユニークな手続きが行われている。特筆すべきは、騒音軽減運航方式のアイデアを採用するに当たり、各関係機関による検討の場が設けられていることと、トライアルが実施されて、その効果等を確認した上で標準運用として採用される点である。

このように、環境と調和した持続可能な民間航空の成長に向けた取り組みにおいては、空港を運用することにより空港や地域が得られる利益と負担のバランスをどのように保つかは、空港毎の歴史的経緯、文化等によって異なるため一律の手法はなく、また容易なことではない。また、空港の立地条件や、空港と住宅地の位置関係によっても対応が異なるため、オーダーメイドの対応が必要である。しかし、フランクフルト空港における試行錯誤は、大いに示唆的であるように思われる。

参考文献：

- 1 山本沙知「ドイツにおける空港周辺の飛行経路決定と航空騒音防止」一橋法学, 15 (1) : 397-422
- 3 <https://de.wikipedia.org/wiki/Wutb%C3%BCrger>
- 4 出所：国際空港評議会 (ACI- Airports Council International) <http://www.aci.aero/>

その他主要な参考資料：

- 判決文 VGH Hessen,13.01.2016-9 C 1509 /12.T
- ヘッセン州経済省エネルギー・交通・地域開発省資料
- フランクフルト空港と地域対話フォーラム (RDF)
- 空港と地域のフォーラム (FFR)
- 空港と近所の家 (UMH)
- Fraport AG (フラポート社) 資料
- オッヘンバッハ市資料

研究報告

WHO ガイドラインの改訂動向と航空機騒音

金子 哲也**

WHO ガイドラインの改訂作業状況

WHO の騒音ガイドライン改訂版は、公表予定だった 2017 年が暮れ、本年が明けて早や 4 か月が経過してもまだ発刊の予告もなく、作業は難航しているように思われる。昨年夏の騒音生物影響国際委員会 ICBEN の第 12 回大会 (チューリヒ) では、下記の諸段階で (5) にあたる大詰めにあると報告された。

- 1) 改定の決定
- 2) 改定提起の委員会承認
- 3) 証拠資料の体系的総覧
- 4) ガイドラインの発展的改訂
- 5) 委員会による最終承認
- 6) 出版・PR 等

上記 3) に掲げた体系的な総説は、本年に入って 8 表題が揃い、国際雑誌 International Journal of Environmental Research and Public Health (ISSN 1660-4601) 特別号として発刊された。

WHO Environmental Noise Guidelines for the European Region: ではじまる 7 論文は下記の 1 ~ 7) をテーマとした既報科学論文の体系的総括であり、8) は同ガイドラインの経緯に関する解説である。

- 1) 睡眠¹⁾
- 2) 心疾患および代謝影響²⁾
- 3) 認知³⁾
- 4) アノイアンス⁴⁾
- 5) 異常出産⁵⁾
- 6) 聴力損失および耳鳴り⁶⁾
- 7) 交通騒音制御の効果⁷⁾
- 8) 歴史と動向⁸⁾

以上はすべて open access であるため、下

記 URL よりどなたも入手できる。

http://www.mdpi.com/journal/ijerph/special_issues/WHO_reviews#published

これらの報告を見聞する限り、ガイドラインは改訂案の妥当性を含め、最終審議段階に入っていると思われる。新たな証拠とされているのはいずれも疫学データだ。だが、その解釈なかなか難しい。現在、上記委員会 ICBEN の会長であり医師でもある M.Basner 氏が認めるように、健康影響の因果関係に対する絶対的な証拠 golden standard とはいえ無作為化比較試験 (randomized controlled trial: RCT) なのだ⁹⁾。RCT とは乱暴に言えば、対象者をランダムに割って影響因子の曝露の有無・多少をコントロールする「実験」である。空港や道路の新設・改廃 (上記課題 7 に相当) などは実施可能な状況ではあるが、厳密に行うのは大変困難だ。RCT では基本、対象者、計測者のいずれもがその条件を知らない、二重盲検 double blind test が求められる。先入観や願望などの影響で自覚症状の報告や観察・測定にバイアス (偏り) が生じうるからである。環境騒音の疫学データは押しなべてこうした制約下にあり、議論は難航していると想像できる。

本稿は上記の特集号より抜粋した航空機騒音の影響、とくに身体影響についての概説だが、その前にまず、当課題に関する疫学的な考え方と経緯を整理しておきたい。

* WHO Environmental Noise Guidelines under Review and Aircraft Noise.

** 航空環境研究センター技術アドバイザー、杏林大学名誉教授

騒音疫学研究の経緯

環境騒音の健康影響、とりわけ身体的影響については1960年代から疫学的データによる議論・推論が重ねられてきた。その核は一貫して「騒音ストレスによる関連疾患の招来」である。脳・心臓血管系の機能抑制・かく乱による疾患として、高血圧、心臓疾患、脳卒中、ガンなどの誘発がテーマとなった。通例こうした環境因子による健康影響は、機序の確認には動物実験を、人間での影響確認には疫学調査や事故例データ分析を行って検討され、特別な条件が整えば倫理上許されるデザインの下で人間対象の実験も行われる。例えば喫煙集団に対する禁煙指導の効果観察のように、有害影響（推定を含む）を取り除くデザインである。上述の施設変更など騒音源の変化はこれにあたるが、極めて限られたケースといえる。

環境騒音に関しては当初より、疫学調査において多々、示唆的なデータは得られていたが、確証には至らなかった。その理由は、単純だ。毒性化学物質や放射線などは通常、われわれの身近に高レベルで存在することはないが、騒音もストレスも日常生活には溢れるほどあるからである。他方、上記の諸疾患の主たる原因、誘因は、食事や喫煙、運動不足等、生活習慣の中に数多あり、そこから騒音ストレスの寄与分だけを切り出して両者の因果関係を証明するのは至難の業なのだ。人間のライフサイクルやライフスタイルとは全く異質な実験動物で、騒音ストレスによる疾病を誘発しても、その意義はきわめて限られている。何によらず大きなストレスが動物の諸器官に障害を生じることが前世紀から既知のことだからだ。

当分野での初期の疫学研究には多くの制約があった。そもそも医学データと騒音データを結び付けたデータベースが世界的にも限られており、その規模も大きなものとは言えなかった。従って、上記諸疾患の発症を検討す

ることができず、比較的データを得やすい関連因子、血圧や血清データに限った検討が中心だった。当時、当協会の健康診断データは世界的に見ても稀有な存在だったといえる。今日、世界的に著名なHYENA studyはこれより後に実施されたものである¹⁰⁾。

今世紀に入って個人用計算機(PC)の能力向上とこれに呼応した統計解析ソフトの開発が急速に進んで、大量のデータを多次元で、多面的に検討できるようになった。これを受けて欧州を中心に、環境騒音に関わる疫学プロジェクトが進められてきた。そもそも医療が国の管理下にある英国やデンマークでは、疾病データの蓄積があった。他方、スイスでは以前から積極的に騒音地図を作成してきた。疾病情報と居住地騒音を組み合わせれば、推定騒音曝露量と疾病の関連が観察できることになる。当初は地域ごとに推定騒音量と疾病の有無を比較した横断研究が中心だったが、これでは”鶏と卵”のいずれが先か、単純な相関関係しか分からない。病気がちだった者が騒音地区に留まり、他者は転出した、と解する余地が残るのである。

既存大量登録データに基づく調査にはいくつか隘路がある。なかでも最大の難点は騒音曝露量の推定が難しいことだろう。本主題で対象となっている疾患はいずれも、年余にわたる騒音曝露を想定しなければならないものだ。疾病罹患の有無を問わず、対象者全員の過去の曝露歴を把握せねば、騒音影響の有無が論じられないのである。しかしながら、騒音地図で得られるのは在宅中の環境騒音—主に交通騒音のみ—にすぎず、他にいかなる音曝露があっても考慮されえない。職場や買い物先等での騒音曝露はおろか、交通騒音に限ってさえ通勤・通学時の曝露は不明である。しばしばこうした報告に「控えめに見積もって」との表現があるが、控えめか過剰かもわからないのが実情だ。既存の騒音地図で影響を評価するのであれば、丸一日その地区に留

まるライフスタイルの人のみを対象とすべきだろう。

こうした諸点を踏まえ欧州では、原因→結果の関係がより明らかな、つまり証拠能力がより高いコホート調査が計画・実施されるようになった¹¹⁻¹⁶⁾。これは健康な人が騒音下で健康を維持できるか、あるいは疾病になるか、個々人を追跡して調査するものだ。騒音曝露に関しても、個々人のライフスタイルを逐次調査して、一定の補正を行うことも可能である。また、騒音曝露の有無でどれだけ対象疾患が増えるか、という相対危険 relative risk を算定できる利点もある。ただし、一時的、面的にデータを収集・解析する横断研究に比して、長年にわたる個別データを積み重ねて解析するコホート調査は、経費も時間も膨大で、周到な計画が必要となる。また、生活習慣や身体的条件等、強い関連因子の影響を調整しなければ「騒音のみ」の影響は抽出できないのは上記と同様である。体力的・経済的に弱い者が家賃の安い騒音地域に居住する可能性など地域固有の要因をどこまで補正できるか、という懸念は捨てきれない。

WHO ガイドラインの改訂作業においては、上記一連の疫学研究が一定の基準で精選、精査され、各テーマでまとめられて、現在ある証拠のレベルとして評価・報告された。以下、航空機騒音に関わる部分に絞って、健康影響の報告を解説する。

表 1 交通騒音と睡眠影響

Sleep Outcomes	Noise Source	Number of Participants (Studies)	Quality of Evidence	Noise Metric	Odds Ratio per 10 dBA Increase (95% CI)
Cortical Awakenings in Adults	Road	94 (2)	Moderate There was evidence of dose-response	Indoor L_{A50max}	1.36 (1.19-1.55)
	Rail	33 (1)	Moderate There was evidence of dose-response	Indoor L_{A50max}	1.35 (1.21-1.52)
	Aircraft	81 (1)	Moderate There was evidence of dose-response	Indoor L_{A50min}	1.35 (1.22-1.50)
Self-Reported Sleep Disturbance in Adults (Noise Source Specified)	Road	20,120 (12)	Moderate There was evidence of dose-response	Outdoor L_{night}	2.13 (1.82-2.48)
	Rail	7133 (5)	Moderate There was evidence of dose-response	Outdoor L_{night}	3.06 (2.38-3.93)
	Aircraft	6371 (6)	Moderate There was evidence of dose-response	Outdoor L_{night}	1.94 (1.61-2.33)

(Basner M. et al. 2018 より抜粋)

睡眠影響

表 1 は上述特集号における“主題 1) 騒音による睡眠妨害”の論文の総括表から、証拠能力が moderate 中程度の項目を並べたものだ。これ以外はいずれも「低い」「とても低い」だったので省略した。

表 1 の Odds Ratio (OR) は、表 2 の RR (relative risk) と同様、対照群と比した相対的な影響の強さを表す。細かい説明は省略するが、これらが 1.0 ならば、10 dB の騒音増でも対象疾患が変化しないことを示す。() 内の 2 つの数値は統計学的に見た 95% 信頼区間で、この範囲に 1.00 が含まれていた場合には、統計学的に有意な増減はない、と解される。航空機騒音 10 dB の増加に対する OR は、屋内 L_{ASmax} では脳波レベルでの覚醒、 L_{night} では自己申告による睡眠妨害、に有意な増加を認めた。ただ、脳波による睡眠評価では個人差が非常に大きいことが指摘されており、また、頻度を含む自己申告での睡眠妨害の程度を複数の研究間でまとめる手法の妥当性等にも検討の余地がある。

表 2 航空機騒音と脳心臓血管系疾患および代謝系の影響

Noise Source	Outcome [§]	Number of Study Design (s) [*]	RR per 10 dB (95% CI) [†]	Number of Participants (Cases)	Quality of Evidence [‡]
Air traffic	Prev	9 CS	1.05 (0.95-1.17)	60,121 (9487)	⊕⊕
	Inc	1 CO	1.00 (0.77-1.30)	4721 (1346)	⊕⊕
Table 2. Noise exposure and the risk of hypertension: summary of findings.					
Air traffic	Prev	9 CS	1.05 (0.95-1.17)	60,121 (9487)	⊕⊕
	Inc	1 CO	1.00 (0.77-1.30)	4721 (1346)	⊕⊕
Table 3. Noise exposure and the risk of IHD: summary of findings.					
Air traffic	Prev	2 CS	1.07 (0.94-1.23)	14,098 (340)	⊕
	Inc	2 ECO	1.09 (1.04-1.15)	9,619,082 (158,977)	⊕
	Mort	2 ECO	1.04 (0.97-1.12)	3,897,645 (26,066)	⊕
	Mort	1 CO	1.04 (0.98-1.11)	4,580,311 (15,532)	⊕⊕
Table 4. Noise exposure and the risk of stroke: summary of findings.					
Air traffic	Prev	1 CS	1.01 (0.78-1.31)	9365 (89)	⊕
	Inc	1 CO	0.99 (0.47-2.09)	5156 (159)	⊕⊕
Table 5. Noise exposure and the risk of diabetes: summary of findings.					
Air traffic	Prev	2 CS	1.02 (0.80-1.28)	14,098 (151)	⊕
	Inc	2 ECO	1.05 (0.96-1.15)	9,619,082 (97,949)	⊕
	Mort	2 ECO	1.07 (0.98-1.17)	3,897,645 (12,086)	⊕
	Mort	1 CO	0.99 (0.94-1.04)	4,580,311 (25,231)	⊕⊕⊕

[§] Outcome: Prev = prevalence of IHD, Inc = incidence of IHD, Mort = mortality due to IHD; ^{*} ECO = ecological study, CS = cross-sectional study, CC = case-control study, CO = cohort study; [†] RR = Relative Risk per 10 decibel

(Kempen E. et al. 2018 より抜粋)

心臓血管疾患と代謝障害

表 2 は“主題 2) 心臓血管疾患と代謝障害”に関する上述特集号の文献から、航空機騒音部分のみ切り出したものである。表中の Prev は有病率で病気を持っている者の率、Inc は

罹患率で一定期間に発病した者の率を表し、前者は横断研究 (CS)、後者はコホート研究 (CO) という個々人の追跡調査において計算される。その他、Mort は心疾患による死亡率、ECO は生態学的研究で、個々人ではなく小集団毎に関連因子を調整したものである。Quality of evidence の項は、各調査研究の証拠能力を⊕の数で表わしている。とはいえ研究デザイン自体に証拠能力の差があり、上記の中では CO の証拠能力が最も高く CS は最も低い。これらを踏まえて表を見直すと、相対危険度 RR が有意に 1.00 を越えているのは虚血性心疾患 IHD の罹患率 Inc のみであるが、生態学的研究 ECO から得られたこのデータの証拠能力は高いとは言えない。逆に証拠能力からみてゆくと、⊕⊕⊕は糖尿病 diabetes の Inc のみで RR は有意ではない。つまり統計学的に見て「騒音 10 dB 増による糖尿病の死亡率増減はない」ことになる。ついで ⊕⊕の項では同様に、高血圧の有病率と罹患率、IHD による死亡率、脳卒中の罹患率などでは、いずれも有意な増加が認められなかったことになる。

表 3 航空機騒音と肥満および子供の高血圧

Table 6. Noise exposure and the risk of obesity: summary of findings.

Noise Source	Outcome	Number of Study Design (s) *	Change per 10 dB (95% CI) †	Participants	Quality of Evidence ‡
Air traffic	Change in BMI (kg/m ²)	1 CO	0.14 (-0.18-0.45)	5156	⊕⊕
	Change in waist circumference (cm)	1 CO	3.46 (2.13-4.77)	5156	⊕⊕⊕

Table 7. Noise exposure and the impact on children's blood pressure: summary of findings.

Noise Source	Setting	Outcome	Number of Study Design (s) *	Change in Blood Pressure (mmHg) per 10 dB (95% CI) †	Participants	Quality of Evidence ‡
Air traffic	School	Systolic blood pressure (mmHg)	2 CS	-	2013	⊕
		Diastolic blood pressure (mmHg)	2 CS	-	2013	⊕
	Home	Systolic blood pressure (mmHg)	2 CS	-	2013	⊕
		Diastolic blood pressure (mmHg)	2 CS	-	2013	⊕

(Kempen E. et al. 2018 より抜粋)

表 3 は上表と同文献からの抜粋だが、こちらは肥満と子供への影響である。コホート研究により、肥満度 (body-mass index : BMI) では増加が認められないが、腹囲の変化は有

意でその証拠能力も高かったことになる。これは航空機騒音の曝露でウエストサイズが大きくなり、ズボンやスカートが穿けなくなるということだろうか？ 他方、睡眠時間の短縮で脂質代謝に関わるホルモン、レプチンの分泌が変化する、というデータが 10 年ほど前から報告されている。上記データもこれに関わるのか、それとも別の要因、例えば生活環境やライフスタイルの変化などが影響しているのかは分からない。この点に絞った調査が必要だろう。

子供の血圧については、変化について記載がなく、文献の証拠能力も低いとされている。変化が大きく、収集、評価が難しい子供の追跡データは、将来にわたる健康リスクを考えると、本人ばかりでなく社会的にも重大な課題に直結している (関連事項・後述)。

交通騒音制御の効果

“主題 7) 交通騒音制御の効果” の原題には Transport Noise Interventions の語が入っている。「intervention : 介入」は、疫学研究においては”実験”に相当する、最も証拠能力が高い研究デザインである。冒頭の項で述べたように環境騒音では極めて難しいが、当報告では空港の滑走路新設・廃止などを希貨とした報告を取り上げていた。これらが真に介入研究と呼べるかどうか疑問である上、当総説で有意な増加が認められた“健康影響”がアノイアンスのみだったため、本稿ではデータの抜粋は省略した。アノイアンスは周知のとおり、心身・生活の不快・不満を統合した不快感の表明で、評定尺度法 (程度を示す言語表現の選択法) の最上位選択肢出現率という、環境騒音だけに使用される「特異な指標」である。血圧測定もないまま「自分は高血圧だ」と診断を下すに等しい、ガラパゴス指標と言ってよいだろう。WHO がアノイアンスを健康影響のひとつとしている立場については、すでに本誌や当センターの研究発

表会等で幾度かご紹介した。回答者の自己診断のみに基づく「健康影響」を「環境規制値の根拠」に加えるならば、広範な環境科学分野のみならず、広く一般社会とも合意形成を諮るべきだろう。この点については誌面を改めたい。

付記

ちなみに上記 website では掲載記事へのアクセスが表示されており、興味深い。5月21日現在、総アクセス数は概要で781件（全文では332件）で、最多が独国の290件、次いで米国223件、仏国60件、中国29件と続き、以下は蘭国、英国、露国いずれも20件に及ばない。これが各国研究者の関心度を反映するとすれば、本件を主導する力がどこにあるか伺われる。ちなみに我が国からのアクセス数はわずか9件である。

今後の動向

稿を終えるに当たり、先の当センター研究発表会でも紹介したことであるが、今後の進展が期待される重要課題を3点挙げたい。昨年のICBEN2017における多くの議論と、個人的な意見交換も踏まえたものである。

- 1) 睡眠影響
- 2) 騒音感受性（脆弱性）
- 3) 子供への影響

1) は、昨年の第17回ICBENで、環境騒音影響の核心は夜間騒音であることが浮き彫りにされてきたこと、現ICBEN会長であるDr. Basnerが、心理学部生物時計分野の准教授であること、を考えても中心的な課題になることは間違いない。

2) は、睡眠影響の大きな個人差、アノイアンスの大きな地域差、疫学研究における関連要因間の分析で、騒音曝露量と心身影響を結ぶ因子としての感受性の評価法を煮詰める必要性が再認識されつつある。今回、上記特集号の特別編集責任者であったPrf. Lercherは、筆者との議論で、同課題に強く関心を持っ

ていることが確認できた。公衆衛生学の視点からは、騒音弱者の発見と保護の上でも重要な課題といえる。

3) は、幼児、学童を対象とした課題で、研究が難しい。これまで比較的小集団において小児の情緒、行動、血圧、学習能力等の影響が調査されてきたが、成果は断片的である。だが、幼少期の影響は後年になって現れる可能性も考慮しなければならない。近年、発生・発達期起源の健康・疾病（Developmental Origins of Health and Disease ; DOHaD）について関心が高まり、在胎期～幼少期の環境影響が成長後の健康リスクをもたらす可能性も議論されるようになった。わが国でも国立環境研究所が主導して平成23年1月から「子どもの健康と環境に関する全国調査（通称；エコチル調査）」が行われており、逐次、経過報告も行われている。とはいえ子供の成長を追って環境影響を検討する研究としては、まだ緒についたばかりといえる。

◆文献◆

- 1) Basner M and McGuire S.V. WHO Environmental Noise Guidelines for the European Region: A Systematic Review on Environmental Noise and Effects on Sleep. *Int J Environ Res Public Health*. 2018 Mar 14;15(3) ; <https://doi.org/10.3390/ijerph15030519>.
- 2) Kempen E et al. WHO Environmental Noise Guidelines for the European Region: A Systematic Review on Environmental Noise and Cardiovascular and Metabolic Effects: A Summary. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2018, 15(2), 379; <https://doi.org/10.3390/ijerph15020379>
- 3) Clark C and Paunovic K. WHO Environmental Noise Guidelines for the European Region: A Systematic Review on Environmental Noise and Cognition. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2018, 15(2), 285; <https://doi.org/10.3390/ijerph15020285>
- 4) Guski R, Schreckenber D and Schuemer R. WHO Environmental Noise Guidelines for the European Region: A Systematic Review on Environmental Noise and Annoyance. *Int J Environ Res Public Health*. 2017 Dec 8;14(12) ; <https://doi.org/10.3390/>

- ijerph14121539
- 5) Nieuwenhuijsen MJ, Ristovska G and Dadvand P. WHO Environmental Noise Guidelines for the European Region: A Systematic Review on Environmental Noise and Adverse Birth Outcomes. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2017, 14(10), 1252; <https://doi.org/10.3390/ijerph14101252>
 - 6) Śliwińska-Kowalska M and Zaborowski K. WHO Environmental Noise Guidelines for the European Region: A Systematic Review on Environmental Noise and Permanent Hearing Loss and Tinnitus. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2017, 14(10), 1139; <https://doi.org/10.3390/ijerph14101139>
 - 7) Brown AL and Kamp VI. WHO Environmental Noise Guidelines for the European Region: A Systematic Review of Transport Noise Interventions and Their Impacts on Health. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2017, 14, 873; <https://doi.org/10.3390/ijerph14080873>
 - 8) Jarosińska D, Héroux ME, Wilkhu P et al. Development of the WHO Environmental Noise Guidelines for the European Region: An Introduction. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2018, 15(4), 813; <https://doi.org/10.3390/ijerph15040813>
 - 9) Basner M et al. Aviation Noise Impacts: State of the Science. *Noise and Health*. 2017 ; 19(87): 41–50. doi: 10.4103/nah.NAH_104_16
 - 10) Jarup L et al. HYENA Consortium. Hypertension and Exposure to Noise near Airports (HYENA): study design and noise exposure assessment. *Environ Health Perspect*. 2005 Nov;113(11):1473-8.
 - 11) Sørensen M et al. Long-Term Exposure to Road Traffic Noise and Nitrogen Dioxide and Risk of Heart Failure: A Cohort Study. *Environmental Health Perspective* 2017; <https://doi.org/10.1289/EHP1272> .
 - 12) Pyko A et al. Long-Term Exposure to Transportation Noise in Relation to Development of Obesity—a Cohort Study. *Environ Health Perspect*. 2017 Nov 20;125(11):117005. doi: 10.1289/EHP1910.
 - 13) Dimakopoulou K et al. Is aircraft noise exposure associated with cardiovascular disease and hypertension? Results from a cohort study in Athens, Greece. *Occup Environ Med*. 2017 Nov;74(11):830-837. doi: 10.1136/oemed-2016-104180. Epub 2017 Jun 13.
 - 14) Roswall N et al. Long-term residential road traffic noise and NO₂ exposure in relation to risk of incident myocardial infarction - A Danish cohort study. *Environ Res*. 2017 Jul;156:80-86. doi: 10.1016/j.envres.2017.03.019. Epub 2017 Mar 21.
 - 15) Roswall N et al. Residential road traffic noise exposure and colorectal cancer survival - A Danish cohort study. *PLoS One*. 2017 Oct 30;12(10):e0187161. doi: 10.1371/journal.pone.0187161. eCollection 2017
 - 15) Roswall N et al. Modeled traffic noise at the residence and colorectal cancer incidence: a cohort study. *Cancer Causes Control*. 2017 Jul;28(7):745-753. doi: 10.1007/s10552-017-0904-0. Epub 2017 May 17.
 - 16) Roswall N et al. Long-term exposure to residential railway and road traffic noise and risk for diabetes in a Danish cohort. *Environ Res*. 2018 Jan;160:292-297. doi: 10.1016/j.envres.2017.10.008. Epub 2017 Oct 15.

解説

騒音と人々の健康に関わりを探る調査～疫学調査の手法の解説～*

後 藤 恭 一**

1. はじめに

空港周辺において住民を対象に騒音による健康影響の調べる唯一とも思われる研究方法が疫学研究である。疫学研究で騒音と健康事象との間に統計学的有意性が認められた場合には、騒音と健康関連性にエビデンスが認められたと称し、因果関係があることを疑う。2011年、WHO 欧州事務局が発行した「欧州のための夜間騒音ガイドライン」では、騒音と健康影響の関連性については、疫学研究に立脚してガイドライン値が定められている。そこで、疫学研究の仕組み、リスクの指標とその解釈、そして疫学研究の限界について解説する。

2. 疫学とは：個人ではなく、より多くの人に合う解決方法を提案する学問。

一言で言えば疫学とは、「人間集団における健康状態の頻度を測定して、予防する“実践的”学問」である。あえて“実践的”と記したのは疫学の原点を振り返ると分かる。疫学の草分けは1854年に英国で実施されたコレラの調査である。当時、病気は空気を伝わる悪臭「瘴気（しょうき）」であるとする説（miasma theory）が考えられていた。だが英国人医師のジョン・スノー（John Snow）は、同じ井戸の水を飲む人にコレラを発症する割合が高いことを突き止めた。そして、感染経路である井戸水の飲用を禁止することにより、コレラの予防を成功した。日本でも同様の例がある。東京慈恵会医科大学の創始者である高木兼寛（たかぎかねひろ）は、1882年（明治15年）に海軍医務局副長に就任し

た後、当時日本軍を悩ませていた脚気の対策に取り組んだ。高木は、脚気（かっけ）の原因が食物にあると考え、海軍の兵士たちに改善食（主として洋食）を与えた群と改善食を摂らなかった群を比較した。その結果、前者のグループで脚気が激減したというのは、良く知られているエピソードである。ちなみにこの時、陸軍の軍医だった森林太郎（森鷗外）は脚気病原菌説を唱えて、菌の同定に力を注いだが成果は得られず、陸軍の脚気罹患者が減ることもなかった。ロベルト・コッホによりコレラ菌が発見されたのは1884年、抗脚気のビタミンが発見されたのは1910年、二人の業績よりもずっと後になる。原因は分からないが疾病の予防法を見いだすというのは疫学の強みといえる。

その後、疫学は公害病や天災、生活習慣病などに研究対象を広げてきた。ただし、ウイルスでインフルエンザが引き起こされたり、病原性大腸菌で下痢や嘔吐等の胃腸症状を呈したりする等の発生要因が明確に特定できるものとは事情が異なり、騒音による身体影響は喫煙、飲酒、食事などの生活習慣や、その他の環境汚染など、多くの環境要因が関わって発生する。また、騒音曝露から影響が現れる時間の長さも関係し、長期に渡るほど騒音以外の様々な要因が複雑に関与するため、騒音曝露と疾病の綾を解きほぐすのは相当困難となる。さらに原因を特定することは難しい。疫学ではコントロール出来ない要因に接触したり、取り込むことを「ばく（曝）露（exposure）（暴ではない）」という。

* Explanation of epidemiological research on the influence of noise on health

**（前）航空環境研究センター 調査研究部 部長代理（現）いわき明星大学 看護学部 講師

なお、疫学ではある疾病を引き起こす因子を、「原因」とは言わず「要因」と呼ぶ。一般的には、「原因」は1つしかない場合や1つに特定できる場合に用い、「要因」は複数ある場合や1つに特定できない場合に用いる。また、ある事象を起こしたものを「原因」、ある事象に影響のあるものを「要因」と区別する見方もある。さらに、過去の特定の事象を起こしたものを「原因」、今後ある事象を起こす可能性のあるもの「要因」と区別することもある。「要因」と「原因」は、さまざまなシーンでよく使われる言葉であり、意味も似ているためによく混同されるが、このように整理すると疫学研究でなぜ「要因」という用語を用いるかが分かる。

3. 疫学研究の種類

3.1 研究デザイン：実験か観察か

疫学では、研究デザインが重要となる。研究デザインとは、誰を対象に、どのような方法で、何を評価・測定方法として、どれくらいの期間をかけるかといった研究計画を組み立てることである。研究方法「型」を大別すると、要因を人為的に与えて影響を調べる「実験（介入）疫学」と、研究者は対象者を観察して曝露による影響を調べる「観察疫学」の2つがある。ジョン・スノーと高木兼寛の逸話に触れたが、ジョン・スノーが行ったのは観察疫学であり、高木兼寛が行ったのは介入疫学である。

介入疫学の場合には研究者が曝露量を人為（実験）的に変化させることによって反応の違いを観察することができる。一方、観察疫学の場合には研究者は曝露量を変化することが出来ないため、曝露と結果の両者を観察することになる。観察疫学の場合、この部分に不確実性（不確定性）が入り込む。騒音による健康影響に関する疫学研究には、この不確実性が壁となる。これについては後ほど触れる。

3.2 観察疫学の方法「型」

騒音による健康影響に関する疫学研究は、かつては横断研究が多かったが、最近の欧米における報告はコホート研究 (cohort study) や、大規模調査として生態学的調査も行われている。最近ではメタ解析も多く行われている。そこで、先ず疫学方法を紹介する。

1) 横断研究：疾病と要因の保有状況を同時に調べる方法

横断研究は、ある集団のある一時点における状況を観察して、要因と結果の関連を調べる方法である。疾病の評価としては、集団中における病気の者の割合（有病率）が用いられる。

この研究の利点は、調査が比較的容易で、短期間で多くの対象者を対象とできることである。そのため疫学の他、社会調査でもこの手法が良く用いられる。欠点としては、疾病と要因の時間的な前後関係が不明なため、因果関係の推定が困難なことである。例えば、運動不足と肥満に関連性が認められたとしても、「運動不足だから肥満になる」とも考えられるし、「肥満だから運動不足（嫌い）」になるとも考えられるため、横断研究では因果関係を明らかにすることは出来ない。そのため、現状を把握するとともに、その後の因果関係を追求するためのヒントを与える（研究仮説を立案）入口としての研究と位置づけられている。

2) コホート研究：疾病の発生を観察する方法

そこで、健常者の集団を2回以上追跡して、曝露の有無、あるいは多少によって事象（結果）が生じるかを観察することにより、より確からしい因果関係を推定しようとするのがコホート研究である。研究に時間の流れが加わるのが特徴である。コホート研究は観察疫学研究の中心となる研究である。同義語として、追跡研究、縦断的研究がある。コホート (cohort) とは元々、古代ローマの軍隊の数百人程度の

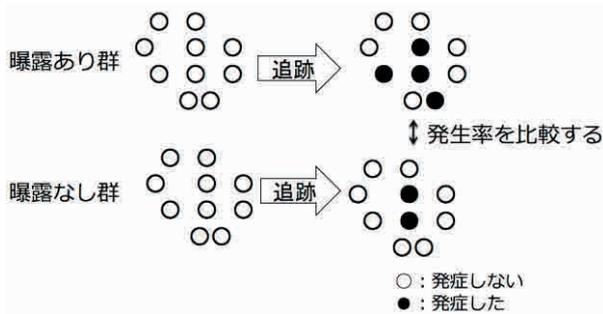


図-1 コホート研究のイメージ○・●の単位は個人

兵員単位を表すもので、疫学研究では転じて、ある共通の特徴を持つ集団の意味で使われる。例えば、同じ地域に住んでいる、同じ職業を持っている、同じ年に生まれたなど、共通の特性を持つ集団を追跡して、その集団からどのような疾病が発生し、また健康状態が変化したかなどを観察して、各種要因との関連を明らかにしようとするものである。仮説を検証する研究として位置づけられている。

コホート研究は時間の流れに沿って観察することが出来るので、環境の変化、症状の変化を正確に捉えることができるとのメリットがある。一方、時間や費用が多くかかることや、稀な疾病や、長い潜伏期間を持つ疾病には不向きである。また、追跡不能になるケースもあるとのデメリットがある。

最近、国際学会で発表される騒音による健康影響に関する疫学調査は、このコホート調査によるものが多い。

3) 症例対照研究：疾病の原因を過去にさかのぼって調べる方法

ある時点で疾病に罹患した集団と、その対照として罹患していない集団の過去に遡って曝露状況を調査して、両者を比較して要因と疾病の関連を評価する研究手法である。ケース・コントロール研究、患者対照研究、結果対照研究とも呼ばれる。例えば、特定の疾病の発生に騒音が関係すると考えられる場合、症例群として現在疾病に罹っている患者と、対照群として疾病ではない人を集めて、過去

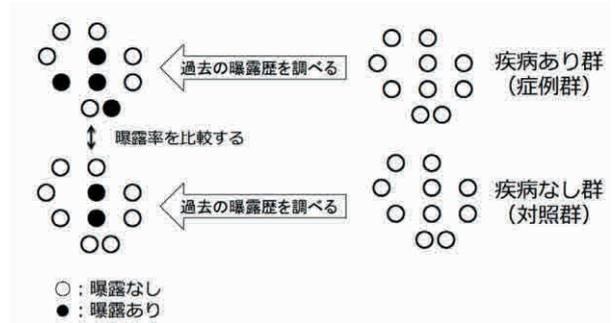


図-2 症例対照研究のイメージ○・●の単位は個人

の曝露量を調査し、騒音と疾病の関係について調べるものである。

この調査は、比較的簡単に調査が行え、追跡調査が不要という長所があるが、思い出しバイアス*の影響を受けやすい。また症例と特性の揃った対照を選択することが困難である短所もある。

4) 生態学的研究：疾病と関連要因を地域または集団単位で検討する方法

2013年10月に医学関連で権威ある研究雑誌「The BMJ」に航空機の騒音によって心血管疾患のリスクが増加することを示す生態学的研究の結果が掲載された。英国のヒースロー空港付近の住民360万人のデータを用いて、ヒースロー空港近辺の21の地区における脳卒中と心臓疾患による入院件数および死亡率を航空機騒音のデータと照らし合わせた。研究対象の全域を12,110のエリアに分割し、

* 症例と対照とは過去の事象に対する思い出しやすさが異なり、症例の方が過去の記憶が明確である。従って、本来は両者で差がない場合でも、症例群の方が曝露を受けているとの誤った結果が得られてしまう。

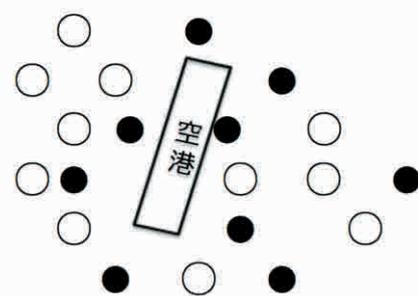


図-3 生態学的研究のイメージ○・●の単位は集団

各エリアの 2001～2005 年にかけての騒音レベルを調べた。結果、航空機騒音レベルの増加によって心血管疾患の入院件数も死亡率も増加する傾向が見られた。ただし、研究者は、今回見られた心血管疾患による入院・死亡のリスクの増加の原因が、航空機騒音以外の要因による可能性もあると報告している。

この研究の最大の欠点は、曝露や疾病発生を個人単位ではなく、集団としてしか把握していないため、「曝露と疾病発生に関連あり」と言うための根拠としては弱い。また、生態学的錯誤も生じる。例えば、集団レベルでの変数間に観測される関連が、必ずしも個人レベルで存在する関連を表すものではないことによるバイアスがある。

5) メタ解析：複数の研究を収集・統合して、より高い見地から分析する方法

メタ解析（メタアナリシス meta-analysis、pooled analysis と呼ばれる）は、単独に実施された複数の疫学研究を統合して評価する手法である。メタ解析と聞くと統計手法の一つと思われるが、メタ解析は研究をデザインし、複数の調査結果を統合して、統計学的検定を行うという一連の手順である。

具体的にメタ解析の手順を示すと以下通りになる。統計解析が研究の初期段階で検討される。

- 1) 研究テーマの決定と仮説の設定
- 2) デザイン、エンドポイント、統計解析方法の決定
- 3) 研究資料の収集
- 4) 適格基準によるデータ抽出
- 5) 抽出データの統合
- 6) 統合データの検討（検定）

メタ解析において、3.の研究資料とは、研究の信頼性が高い“全ての”研究資料である。そうすることによりバイアスが排除される。一方で、別のバイアスが入り込む。出版バイアス（お蔵入りバイアス）である。「影響が有り」の論文の方がジャーナルに掲載されや

すく、「影響が無い」論文は掲載されにくい。また、研究中の段階で中止になることも多い。研究資料の収集がメタ解析の成果の鍵を握る。

4. リスクの定量化

騒音の疫学調査では騒音曝露によるリスクは、寄与リスク（attributable risk, AR）、リスク比（risk ratio, RR）あるいはオッズ比（odds ratio, OR）としてリスクを定量化する。

先の図-1を集計すると分割表（contingency table）と呼ばれる表が得られる（表-1）。なお、公衆衛生学の分野では行方向には要因、列方向には結果を置く。また、表の縦線は引かないルールがある。

表-1 図-1の集計結果1

		発症		横計
		有	無	
曝露	有	4	6	10
	無	2	8	10

実際にリスクを算出してみる。「発症した」数を横計の数で割って得られた「割合」がリスクである。なお、医学では病気にかかることを罹患（りかん）と呼ぶ。

1) 寄与リスク

曝露「有」群と「無」群のそれぞれのリスクは群全体のうち何割が発症したか割合で示される。

表-1（図-1）の集計結果2

		発症		横計	割合
		有	無		(リスク)
曝露	有	4	6	10	40%(4/10)
	無	2	8	10	20%(2/10)

表-1では曝露「有」群が40%、「無」群が20%となる。曝露が無くても20%発症することから、そこで曝露「有」群から「無」群の

リスクの差分を取る。これを寄与リスク（寄与危険度）と呼ぶ。

寄与リスクは20% (40% -20%) となる。寄与リスクとは、ある曝露により集団における発症がどのくらい増えるかを示す指標なので「曝露が有った群は無かった群によりもリスクが20%増し」とも表現することができる。

2) 相対リスク

寄与リスクがリスクの絶対量を示すのに対して、ある曝露により、集団における発症が何倍高いか、と相対的にリスクを示すものが相対リスクである。相対リスクは、曝露「有」群と「無」群の比を取ることに由る得られる。表-1の場合の相対リスクは2 (40% ÷ 20%) である。「曝露が有った群は無かった群に比べてリスクは2倍増し」と表現することができる。疫学で単にリスクといった場合には、この相対リスクを指すことが多い。

3) オッズ比

リスク20%増し、リスクは2倍といった表現は日常の報道で目（耳）にするが、オッズ比は馴染みのない用語である。オッズ (odds) とは「見込み」を表し、「起こる確率と起こらない確率の比」である。これを式にすると下式になる。

$$odds = \frac{p}{1-p}$$

「曝露有り」群のオッズは0.67 (4/6) となる。「曝露無し」群のオッズは0.25 (2/8) となる。

表-1 (図-1) の集計結果3

		発症		比
		有	無	(オッズ)
曝露	有	4	6	0.67 (4/6)
	無	2	8	0.25 (2/8)

曝露無しを分母に、曝露有りを分子としたものがオッズ比であり、2.68 (0.67/0.25) となる。

では、このオッズ比から、曝露群は非曝露群に比べて罹患するリスクは2.68倍であると言っているのだからだろうか。そういった解釈は論文も含めて時折見かけるが、オッズ比が相対リスクに近似するのは、稀な罹患、つまりイベント発症確率が十分小さい疾患の場合のみである。

具体例を示してこれを説明する。飲酒、喫煙、性別の発症を調べた結果を分割表として示したものが表-2である（仮想データ）。

表-2 飲酒、喫煙、性別の集計

		発症		横計	割合 (リスク)	比 (オッズ)
		有	無			
飲酒	有	4	6	10	40% (4/10)	0.67 (4/6)
	無	2	8	10	20% (2/10)	0.25 (2/8)

相対リスクとオッズ比を表-3に整理する。

表-3 相対リスクとオッズ比の整理

	発症率	相対リスク	オッズ比
飲酒	40%	2.00	2.68
喫煙	20%	2.00	2.27
性別	60%	2.00	3.49

相対リスクは全て2.00である。一方、オッズ比は大きく異なっている。オッズ比と相対リスクの関係は常に、オッズ比 > 相対リスクとなっているが、発症率が高いほどオッズ比と相対リスクの乖離が大きくなる。従って稀な罹患の場合、オッズ比は相対リスクに近似する。稀とは、人口100人あたり1人以下と定義されることが多い1。なお、オッズ比は0~∞の値を取り、オッズ比が1とは、事象の起こりやすさが両群で同じということである。オッズが1未満の場合には、曝露有り群の方が事象が起こりにくいことを示し、逆に、1より大きい場合には、事象がより起こりやすいことを意味する。本来オッズ比は、先に説明した、症例対照研究（ケースコントロール研究）のリスクを示す指標である。

では、疾病頻度が比較的高い場合や、コホート研究で、何故オッズ比がリスク比の近似値として用いられるのであろうか。薬 (A～C) と効果を集計したものを表-3に示す (仮想データ)。表-2と同様にオッズ比>相対リスクの関係になっている。

表-4 薬 (A～C) と効果の集計

薬	効果		横計	相対リスク	オッズ比
	有	無			
A薬	有	46	64	110	4.83
	無	9	95	109	

複数の曝露因子に対する要因の相対リスクとオッズ比の順番が一致していることがわかる。オッズ比の数値自体がリスクを x 倍にするという意味を持たないが、複数の要因のリスクの順番が示されることからオッズ比が用いられる。

4) ハザード比

オッズ比と似たようなものにハザード比 (hazard ratio : HR) がある。これは発症の有無だけではなく、「いつ発症したのか」という時間情報も加味して計算した発症率 (ハザード) がリスクの指標として用いられる。航空機騒音の疫学研究では用いられることが殆どないため、説明は良書に譲る。

5. 統計学的推定と検定

疫学研究の結果は偶然の影響にも左右されるので統計学的推定や検定を行い、精度評価を行う必要がある。

5.1 統計学的推定

統計学的推定 (estimation) とは、サンプルから得られた平均値から母集団の平均値を推定することである。

点推定

標本から得られた平均値を母集団の平均値

(母平均値) として推定することを点推定という。例えば、ある地点で7日間、航空機騒音を測定したところ、期間中の L_{den} 平均が 61.0dB だったとする。この 61.0dB を母集団の推定値 (この例の場合、年間平均値が該当する) とするのが「点推定」の考え方である。

区間推定

母平均はピッタリ 61.0dB とは限らないため、61.0dB とピンポイントで推定しまうと、推定が外れる危険性が生じる。そこで幅を持たせ「この調査結果から母集団の推定値は $xx\%$ の確率で 60.8~62.1dB の範囲中にある」と推定するのが「区間推定」である。つまり、「標本から推定すると、母平均はこの値からこの値までの間にはいるのではないか」という推定を行うものである。区間は「信頼区間 (CI, Confidence Interval)」と呼ばれ確率的に決められる。疫学では通常「確率 95%」が用いられ、これを「95%信頼区間 (95% CI)」と呼ぶ。信頼区間が広いほど、推定を外す確率が小さくなる。

標準誤差 (Standard error)

区間推定をするために必要な統計量が標準誤差である。標準誤差は、標本データの散らばりが大きいほど母平均と標本平均の差 (標本誤差) は大きくなる。また、標本数が少ないほど標本誤差も多くなる。この理論を散らばり (標準偏差) を s 、標本数を n として式にすると、下式が得られる。標準誤差、標本誤差、標準偏差と似たような用語が続くが概念が異なるので注意したい。

SE 標準誤差は下式で算出される。

$$SE = s / \sqrt{n}$$

s : 標準偏差 n : 標本数

分子が大きくなるほど SE は大きくなり、分母が小さくなるほど SE が大きくなることがわかる。

大標本の場合の 95%信頼区間は下式から求

めることが出来る。

$$95\% \text{ CI} = \text{標本平均} \pm 1.96 \times \text{SE}$$

小標本の場合の95%信頼区間の式は下記の通りとなる。

$$95\% \text{ CI} = \text{標本平均} \pm t \text{ 値} \times \text{SE}$$

例えば、先に例として掲げた航空機騒音を実例として計算してみる。7日間の航空機騒音の測定において、期間中のLden平均が61.0dB、標準偏差が0.8dBだったとする。

t分布表をもとに臨界値、t値を求める。t分布とは0を中心とした左右対称の分布である。図中のtが臨界値である。山の高さは自由度によって異なり、自由度が大きいほど山の高さは高くなる。

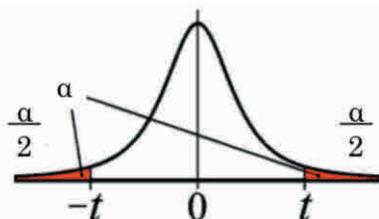


図-4 t分布

t分布表には、自由度がdf (degree of freedom) である場合の赤色部分の面積が α (両側) となるtの値が示されている。95%信頼区間の場合の α は、 $1-0.95=0.05$ (5%) である。下表から、df 6 と 0.05 が交差する値が臨界値であり、2.4469 と読み取ることができる。t値はt分布表から求めることができる。Excelでも関数TINV(両側確率P, 自由度df)を用いてt値を求めることができる。「=TINV(0.05,6)」と入力すると、2.446911851 とt値が返される。

表-4 t分布表

df	α (両側)			
	0.10	0.05	0.01	0.001
1	6.3138	12.706	63.657	636.62
2	2.9200	4.3027	9.9248	31.598
3	2.3534	3.1825	5.8409	12.941
4	2.1318	2.7764	4.6041	8.610
5	2.0150	2.5706	4.0321	6.859
6	1.9432	2.4469	3.7074	5.959

これらの値から信頼区間は、

$$95\% \text{ CI} = \text{標本平均} \pm t \text{ 値} \times \text{SE} \\ = 61.0 \pm 2.4469 \times 0.8 / \sqrt{10}$$

従って、下限値は60.381、上限値は61.619となり「母集団の推定値は95%の確率で60.4～61.6の範囲の中に収まる」というように示すことができる。

なお、自由度(df)と聞き慣れない用語が出てきたので簡単に説明する。自由度は独立に動くことができる数を意味する。例えば、平均値が2の時、1つ目のデータが「1」、2つ目のデータが「3」であれば、3つ個目のデータは必然的に「2」となる。つまり、3個の観測値のうち2個が決まれば最後の1個は値が拘束されてしまうので、自由に値を取れるデータの個数が1つ分減らした数、つまり、 $df=n-1$ となる。なお、統計量によって自由度の計算方法が異なることに留意されたい。

5.2 統計学的有意差検定

統計学的検定 (Statistical Significance Test) とは Test との文字が示すとおり○×式で差や関連があるか否かを統計学的に検証することである。

日本工業規格 (JIS) では、(有意差) 検定 (statistical test) とは「帰無仮説を棄却し対立仮説を支持するか、又は帰無仮説を棄却しないかを観測値に基づいて決めるための統計的手続き。その手続きは、帰無仮説が成立しているにもかかわらず棄却する確率が α 以下になるように決められる。この α を有意水準という。」と定義する。少々この説明では難しいので、ある人が「犯人である」ということを立証する手順を考えてみる。

1. 『Aが犯人であること』を立証したい。(立証したい仮説を「対立仮説」と呼ぶ)
2. 犯人であるかは神(とその本人)のみぞ知る真実である。そこで『Aは犯人とは無関係』から検証をスタートする(この仮説を「帰無仮説(きむかせつ)」と呼ぶ)

3. 「証拠」を収集する。偶然に証拠が得られることもあるが、証拠が多いほど犯人である確率が高い。なお、犯人である確率が高くなるにつれて「冤罪確率 (α)」は小さくなる。冤罪確率は、誤った判断を犯す確率ともいえるので危険率とも呼ばれる。

4. 冤罪確率をもとに判断する。

1) 設定レベル一定以下の場合

証拠が一定以上収集されるのは、『A は犯人とは無関係』とする仮説と矛盾する。そこで帰無仮説を棄却して『A が犯人である』との対立仮説を支持する

2) 設定レベルを越える場合

帰無仮説である『A は犯人とは無関係』を保留する。しかしこれは「A が犯人ではない」ことを立証したわけではない。あくまで「A を犯人と認証するだけの証拠が見つからなかった」ので「犯人であるとは言えない」との消極的判断となる。

このように、ある主張Aを証明するのに、Aでないという前提からは矛盾が生ずると示すことで行う証明法を背理法（はいりほう）と言う。

これを元の有意差検定の手順に戻してみる。

1. 『差・関連が0とは異なる』を立証したい
2. しかし、真は不明なので『差・関連は0である』から検証を開始する
3. 証拠「検定統計量」から p 値 Probability を算出する。検定統計量が大きいほど危険確率 (α) は小さくなる。1-p = α の関係がある。
4. α = 5% 水準（ハードル）基準で判断する
 - 1) α 以下の場合『差・関連は0である』を棄却し「差・関連がある」と解釈する
 - 2) α を越える場合『差・関連は0である』は棄却されず保留される。ただし「差・関連は0」ではなく誤差の範囲に留まり「差があるとはいえない」と解釈する。

このように置き換えることができる。すなわち、犯人が「差・関連」、証拠が「検定統計量」、冤罪確率が「 α （危険率）」に相当する。

先に示した例、7日間の航空機騒音の測定において、期間中の L_{den} 平均が 61.0dB、標準偏差が 0.8dB に基づき計算してみる。ここでのテーマは「この地点の観察値は 61.0dB だが、母平均 62.0dB と差があると言って良いのか」ということになる。「差がある」と言えれば、観察値は「有意に低い」と判断することができる。集めたデータの平均と既知の母平均を比較したい場合には、下式の学生 t 検定 (Student) の t 統計量を求める。検定手法は「1 標本 t 検定」と呼ばれる。

$$t = \frac{\text{標本平均} - \text{母平均}}{\frac{\text{標準偏差}}{\sqrt{\text{標本数}}}}$$

式 Student-t 検定統計量

この式を用い t 値を求めると -3.3072 と計算される。

$$t = \frac{61.0 - 62.0}{0.8 / \sqrt{7}}$$

観測数が7のときの自由度は6である。自由度6、 α 5% (両側) の t 値は 2.4469 である。証拠能力を表す統計量が臨界値である有意水準値を上回っていると、帰無仮説が棄却され「母集団と差がある」と判断することができる。従って、観察値は「有意に低い」と判断することができる。

ところで、先に推定において算出された 95% 信頼区間は 60.4 ~ 61.6 であった。62.0 は 95% 信頼区間の範囲の外にある。このことから、信頼区間の範囲の外に仮説値があれば統計学的に有意となり、逆に信頼区間の範囲の中にあれば統計学的に有意とは言えないと言える。両者は推論の方向が逆の関係にある。

6. 多変量解析

6.1 なぜ多変量解析を使うのか

医学・生物学における共通の狙いの1つは、例えば要因の曝露の有無と罹患の有無の関係といったように、疾病と疾病要因間に存

在する関係を明らかにすることにある。しかし、疾病の発症には様々な要因が関与するため、得られた結果がそのまま因果関係を示すものではない。

表-2および表-3（再掲）の集計結果が得られたとする。

表-2 飲酒、喫煙、性別の集計（再掲）

	発症 (名)	横		割合 (リスク)	比 (オッズ)	
		有	無			計
飲酒	有	4	6	10	40%(4/10)	0.67(4/6)
	無	2	8	10	20%(2/10)	0.25(2/8)
喫煙	有	2	8	10	20%(2/10)	0.25(2/8)
	無	1	9	10	10%(1/10)	0.11(1/9)
性別	男	6	4	10	60%(6/10)	1.50(6/4)
	女	3	7	10	30%(3/7)	0.43(3/7)

性別のオッズ比が最も高いことから、直ちに疾病発症には性差が関与することを表すと結論することはできない。男性は女性よりも飲酒や喫煙率が高いので、性差の背後にある生活習慣が関与した見かけ上の因果関係であることが考えられる。さらにお酒を飲む人はたばこを吸う、といったように飲酒と喫煙にも関係がある。そこでそれらの複雑な関係を取り除いて、飲酒、喫煙、性別と発症のダイレクトな関係を調べる必要がある。

多変量解析の「多」とは、「複数の要因（変量）を同時に使う」という意味である。「複数の要因を同じに使って」解析することにより、他の要因による影響を調整した（取り除いた）影響度合いを調べることができる。

代表的な多変量解析として、重回帰分析が良く知られている。例えば3つの要因があり、それらの結果 y への影響を見ようとした場合には、以下の3つの単回帰（式）分析を繰り返すのではなく、

$$y = \beta_1 * x_1 + \beta_0$$

$$y = \beta_2 * x_2 + \beta_0$$

$$y = \beta_3 * x_3 + \beta_0$$

下式を用いて分析すれば、各要因の y への単独した影響力が β として示される**。

$$y = \beta_1 * x_1 + \beta_2 * x_2 + \beta_p * x_3 + \beta_0$$

騒音の疫学調査では**多重ロジスティック分析**が多く用いられる。両者の違いは式中の y に当たる結果のデータの尺度の違いである。血圧値や、血糖値のような連続尺度データの場合には重回帰分析を用いる。他方、y がカテゴリのような順序尺度データや、「病気になる / ならない」あるいは「死亡した / 生存している」のような名義尺度データの場合にはロジスティック回帰分析を用いる。ロジスティック (logistic) とは「物流」という意味ではなく「記号論理学の」という意味である。

$$\log \frac{p}{1-p} = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_p x_p + \beta_0$$

なお、多重ロジスティック分析の場合は、影響力の大きさを示す β はオッズ比として示される。さらにオッズ比は例えば「1.2 (95%CI: 0.5 ~ 1.5)」95%信頼区間も同時に示されることが多い。信頼区間の中に1が含まれていない場合には、統計的有意差が認められたことを意味する。

統計解析で取り扱うデータの尺度を少し詳しく説明する。尺度は、名義尺度、順序尺度、連続尺度の3つに大きく分類することができる。

①名義尺度

単に区別するために用いられている尺度であり、例えば、血液型でA型・B型・O型・AB型を、それぞれ0・1・2・3と数値に対応させたもの。数値の大小関係はなく、平均値を求めることに意味は無い。

** 回帰係数 (b) は重回帰分析することにより算出される。しかし、b は単位依存性があり、単位を変換するとそれに応じて値も異なる。また、単位が異なるもの同士の b を比較することは意味をなさない。そこで各データを平均値0、標準偏差を1と標準化して重回帰分析を行うことによって算出される標準化偏回帰係数 (β) を影響力の指標として判断する。

②順序尺度

大小関係にのみ意味がある尺度。例えば、治療効果の判定において、悪化・不変・改善・著効を、それぞれ -1・0・1・2 と数値に対応させたもの。数値の差がまちまちなので、平均値は定義できないが中央値は定義できる。

③連続尺度

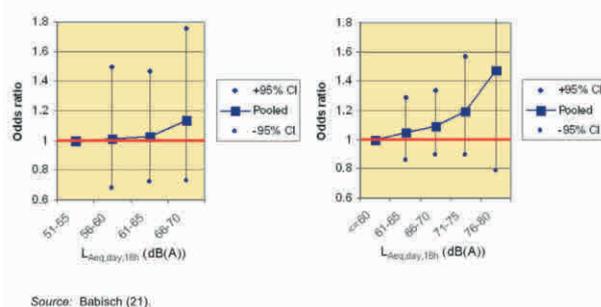
数値の差のみに意味がある尺度や、数値の差とともに数値の比にも意味がある尺度。前者の例としては、摂氏温度のように温度が 10℃ から 15℃ になったときに、50% の温度上昇があったとは言えないが、差分の 5℃ という数値には意味がある。後者の例としては、体重が 50kg から 60kg になったときと、100kg から 110kg になったときとは、同じ 10kg の増加であっても、前者は 20% 増、後者は 10% 増といえる。しかし、統計処理の際には両者は区別しない。比が定義できるということは絶対零点を持つことと同じことを表す。

6.2 騒音による疫学研究の実例

これまで説明した内容をもとに道路交通騒音と心臓疾患に関する疫学研究の論文の結果をしてみる。下図は、WHO 欧州事務局が 2011 年に公表した「Burden of disease from environmental noise」に掲載された、自動車騒音による心筋梗塞 (myocardial infarction) の関係である 3。

この結果から、WHO 欧州事務局は「ヨーロッパのための夜間騒音ガイドライン値 (NIGHT NOISE GUIDELINES FOR EUROPE)」を導き出している。

Fig. 2.1 & 2.2. Pooled effect estimates (meta-analysis) of the association between road traffic noise and the prevalence (Fig. 2.1, left) and incidence (Fig. 2.2, right) of myocardial infarction (odds ratio +/- 95% confidence interval)



グラフのタイトルを見ると Pooled effects estimates(meta-analysis) となっており、複数のコホート研究をまとめて評価するメタ解析による解析結果であることが分かる。左図は心筋梗塞の有病率 (疾病を有している者の割合: Prevalence)、右は罹患率 (疾病に罹った者の割合: incidence) と騒音レベルとの関係が示されている。統計学的手法として多重ロジスティック分析を用いて、年齢や性等の他要因を調整して、最も騒音レベルが低い LAeq,day,16h 51-55(dB(A)) を基準とし、オッズ比を 1 とした時の 56-60、61-65、66-70、・・・の相対オッズ比の値が図中 (■) に示している。■から上下に延びている線が 95% 信頼区間である。

図を見ると、Prevalence(有病率)、incidence(罹患率)ともに騒音が高くなるにつれてオッズ比の上昇が見られる。では、この関係は統計学的に有意と言えるのであろうか。この場合の帰無仮説は「オッズ比は 1 である」。先に説明した通り「95%信頼区間に 1 が含まれて」いなければ「オッズ比は統計学的有意差」があるといえる。逆に 95% 信頼区間が 1 を含んでいれば「統計学的有意差は認められない」ことになる。つまりこのグラフからは、騒音増加に伴って相対リスクが上昇するとは言えないと読み取れる。しかし、WHO レポートでは「図 2.1 と図 2.2 からは 60 dB (A) を超えるノイズレベルの場合に心筋梗塞リスクが増加する (For noise levels greater than 60 dB(A), the myocardial infarction risk increases.)」と記述されている。95% 信頼区間、統計学的有意差は考慮されることなく、60dB(A) が越えたところからオッズ比が上昇することを視覚的 (ビジュアル) に捉えて解釈している。なお、原典を確認すると、有意差が得られていないことが明記されている。このあたりに WHO 欧州事務局の政治的思惑を読み止めることが出来る。WHO 欧州事務局は、55dB 以上で心疾患のリスクのあることから、子どもや高齢者、妊婦、交代制勤務

者などの高感受性群を含むほとんどの住民を健康影響から保護するためのガイドラインとして40dB（夜間帯23.00-07.00における屋外の等価騒音レベル：Lnight,outside）が定められた。また、様々な事由で短期間にガイドラインを達成できない場合の暫定目標値として55dBが提案している。

さらにこのメタ解析は、同一の研究者によるデータのみを統合して解析を行った結果である。メタ解析の手順に照らし合わせると、手順3と手順4に不備があり、手順6が適格に解釈されていないということになる。

7. 疫学の限界

冒頭で「原因は分からないものの予防法を見いだすというのは疫学の強みといえる」と述べたが、逆に「原因と因果が明確に分からないままの情報が提供される」のが疫学の弱みとも言える。騒音と疾病の関係が得られたとしても、それが真の関係ではない可能性を多々含んでいるとも言える。

さらに解析上で性、年齢、人種、社会経済的要因を調整したといっても全て拭い去れるわけでもない。また、地区ごとの騒音レベルとの関係の様に見えるが、騒音量で区分されたエリアの違いに騒音以外の地域特性が乗っかってくる。地域特性は、地域に基づく特性もあれば、そこに居住する者の特性、さらにそれらが相互に複雑に関連し合い、多変量解析で解き明かすこと困難となる。実験とは異なり、生活している人々を観察して、要因と結果の関連性を推定するのが疫学であるために、一定の限界はある。偏りや交絡因子による誤差を排除することが困難であるという問題をそもそも含んでいる。

騒音による疫学研究の場合に一番の課題が個人毎の曝露レベルの不確実性（不確定性）である。騒音と同様に環境影響を取扱う環境疫学の場合、食物や飲料水による影響では個人毎の曝露（摂取）量が調べられ健康事象と

の関係が検討される。水銀、鉛、ヒ素、カドミウム等の重金属の影響を調べる場合には、個人毎の毛髪に含まれる重量から曝露量を推定する。このように個人毎の曝露量と健康事象との関係を調べるのに対して、騒音による影響の場合には、曝露量はブロック毎の代表的な値を求めて、そこに居住する者は全て同じ曝露量とする、いわば個人毎を対象とした生態学的デザインによる調査となっている。では、自宅周囲の騒音レベルを正確に予測出来れば良いのであろうか。しかし、家屋の構造、主に生活する部屋の位置関係によって個人曝露レベルは相当異なるし、同居する居住者によっても、昼間は居住地を離れて学校、職場に通う者と、日中を居住地で過ごす主婦では曝露量は相当異なる。さらに、疫学における曝露量とは、どれくらいの音のレベルを聞いていたのか、どれくらいの時間聞いていたのか、の両方を考慮する。つまり、「曝露レベル×曝露時間（期間）」を考慮するが、これを考慮した研究は見当たらない。これらが騒音による疫学研究の最大の課題であり、限界となっている。

また、職場を対象とした研究では騒音により高血圧を誘発する報告例があるが、地域を対象とした環境疫学では騒音と健康被害（循環器障害）の関連は薄いとされている。例えば航空機や道路からの騒音によってアノイアンス（心理的な煩わしさ）への影響は良く知られるが、明確な健康被害に結びつくことはない。職場と地域では騒音レベルの違いが大きく異なることが考えられる。職場では比較的レベルが高い騒音が研究対象となるが、地域では日常レベルの騒音が対象となる。そのため、地域では、アノイアンス～ストレスを介した間接的な影響を観察することになる。そのため、個人毎の騒音の受け止め方が相当異なり、こうした個人差により集団としての健康影響が捉えにくいとも考えられる。

一方、こうした課題はあるにせよ、そもそ

も我が国における騒音による影響に関する疫学的知見が乏しい。生活習慣病には体質、遺伝的要素も関与するために、人種が異なる疫学調査の結果を我が国に当てはめることが出来ない。欧州や米国では大規模なコホート調査が計画、あるいは実施されているが、我が国も実施に向けた検討も必要である。

8. まとめ

騒音によって高血圧が生じる、ある食品を食べると長生きできる等々、多くの医学に関する報道は、疫学研究にもとづくものである。

疫学は「学問」というよりもむしろ「方法論」といった方が適切だと思われる。何の方法かといえば、「因果関係を推論する」ための方法であり、「疾病を防止あるいは予防する」ための方法である。そのどちらにも統計学、正式にいえば生物統計学が用いられる。疫学の三本柱は「疫学理論、生物統計学、因果推論」である。

疫学理論とは、簡単に言えば時間の経過の中で病気が「発生」するということを整理することである。少し乱暴な言い方をすれば「品質管理」と同様の考えである。品質管理は故障が発生することを知り、防止するためのものであるから、その考え方は疫学と似通っている。

生物統計学とは、医療・健康科学分野を対象とした応用統計学であり、疫学研究における研究デザイン（設計）と統計解析の両方を含む方法論のことである。

因果（関係の）推論は、どちらが原因でどちらが結果なのかを理論的に考えることである。「理論的に」といっても単に日常的な常識を突き詰めて考えているだけである。

従って、疫学は医学・医療の日常的常識を定式化した方法論と言える。「疫学の使命は医学研究の結果が示す数値の意味と、その背景となる方法論を分かりやすく説明することであり、それ以上の判断は社会が行うべきで

ある」という意見もあることから、疫学の結果は、聞き手（読み手）側も日常的常識の範囲で吟味して（批評的）評価する必要があるのではないだろうか。もう一つ加えれば、「あれがなければこれがなし B would be false if it were not for A.」を考えるのも重要である。

日常生活における騒音による影響は、産業職場における騒音レベルよりも低いいため、心理～ストレスを介した影響となる。そのため個人差の関与が大きいために騒音影響を見出すのが困難とも言える。今後の疫学研究の知見の積み重ねが望まれる。

以上、騒音による健康影響に関する疫学研究について、疫学にまつわる話題や、リスクや、リスクの指標等について解説するとともに、結果の実例を示して解析した。ご参考になるものがあれば、幸いである。

- 1 田中平三. 疫学入門演習 - 原理と方法 - 東京：南山堂、1989；45-46.
- 2 日本規格協会, JIS Z 8101-1:1999 統計 - 用語と記号 - 第1部：確率及び一般統計用語
- 3 World Health Organization /Europe, Burden of disease from environmental noise (2011)

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す、騒音削減で乗客への機内環境の快適性をもたらす、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概要したものである。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ので、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。

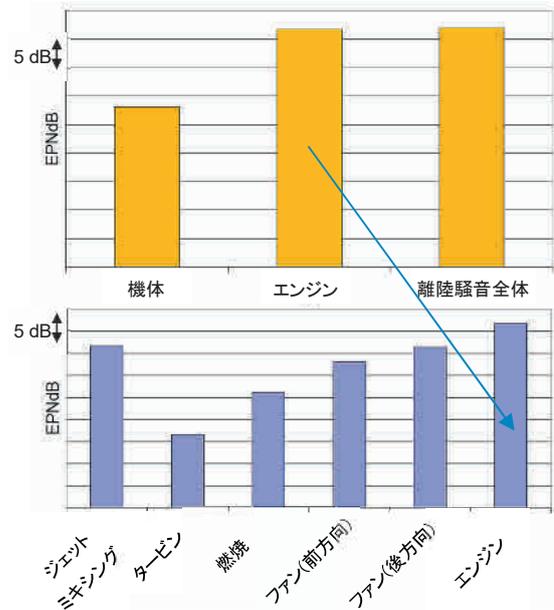


図1 離陸時の機体直下の部位別騒音 1)
(上段: エンジン騒音 - 機体騒音、下段: エンジン騒音の内訳)

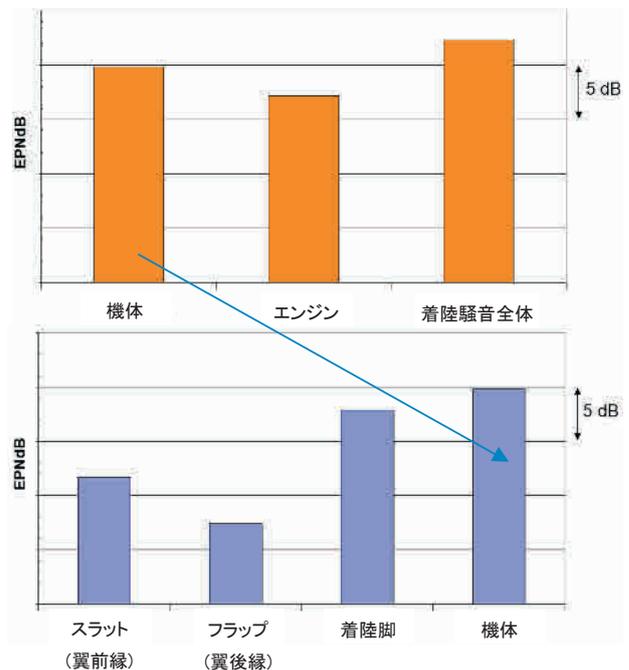


図2 着陸時の機体直下の部位別騒音 1)
(上段: エンジン騒音 - 機体騒音、下段: 機体騒音の内訳)

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。

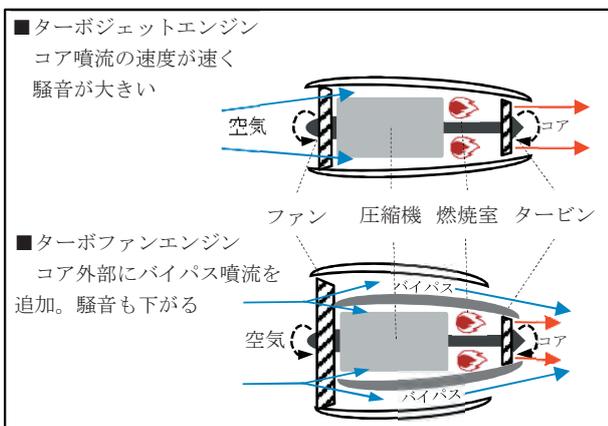


図3 ターボジェットエンジン（上）とターボファンエンジン（下）の簡略断面図

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 (Volume 1, Chapter 2) 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 Annex 16 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、Chapter 2 に関しては、Chapter 2 以前しか対応しない機種、つまり Chapter 3 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 Chapter 2 までで、空港特有の規制を別にすれば、Chapter 3 基準以降の機体は運航できる。Chapter 3 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 Chapter 4 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 Chapter 14 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。

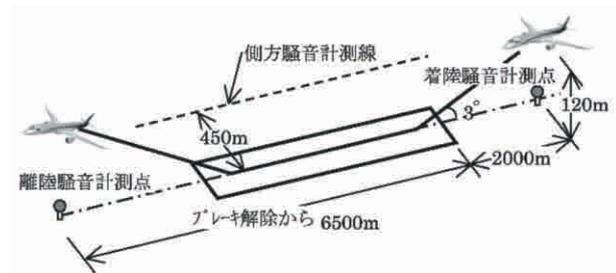


図5 騒音証明制度の飛行方法と測定地点2)

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る限りは、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。

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: エムブラエル 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	11.0
		PW1100G	12.0
2018	ボンバルディア CS100	PW1500G	12
2018	エンブラエル E2	PW1700G	9
		PW1900G	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

海外事情

Inter-Noise 2017 参加報告 *

篠原直明**

中澤宗康**

1. Inter-Noise 2017 概要

第46回騒音制御に関する国際会議 Inter-Noise 2017 は、2017年8月27日～30日に中華人民共和国 香港特別行政区において開催された。国際騒音制御工学会 (IINCE) が主導し、香港音楽学会 (Hong Kong Institute of Acoustics)、香港理工大学 (Hong Kong Polytechnic University) 等の共催で開催された。会場は香港島北部、灣仔 (Wan Chai) 地区の海辺にある Hong Kong Convention and Exhibition Center (HKCEC) であった。



HKCEC 外観

Inter-Noise は毎年同時期に開催され、騒音研究における権威ある国際学会の一つであり、騒音制御に関連した幅広い分野を対象としている。今回は100近くの Technical Session、789件の発表があり、かなり多岐にわたるものであった。オープニングセレモニーで参加

者は約1000人で、最多は中国(本土)、次いで日本だと紹介された。適度な難易度の研究発表が多く、専門外の分野についても知ることが出来て、非常に有意義な会議であった。



Opening Ceremony

日程

- 8/27 (日) Opening Ceremony
- 8/28 (月) Technical Session -- Day 1
- 8/29 (火) Technical Session -- Day 2
- 8/30 (水) Technical Session -- Day 3
Closing Ceremony

なお Closing Ceremony において、次回の Inter-Noise は、2018年8月にアメリカ合衆国シカゴ市で開催予定とのアナウンスがあった。

2. 当研究センターの発表について

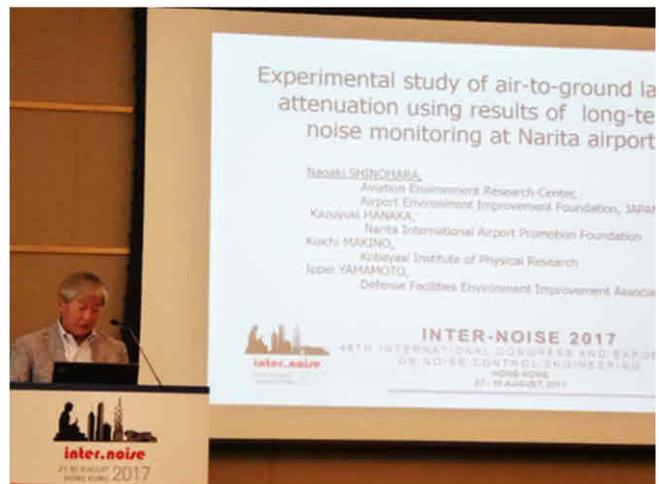
当研究センターからは、所長の篠原と研究員の中澤の2名が参加し、それぞれ1件ずつの発表を行った。

* Report of Inter-noise 2017

** 航空環境研究センター



Airport community noise (room S223)



篠原の発表の様子

両方共 8/29 (火) の Technical Session 3.3 - Airport community noise [空港周辺騒音] (room: S223) において発表した。セッション座長は当協会理事で、I-INCE 理事の山田一郎と、ノルウェー産業科学技術研究所 (SINTEF) の Idar Granoien 氏であった。本セッションは発表件数全 18 件、午前から午後まで続く比較的規模の大きなセッションで、騒音のみならず運航や政策に関するところまでのかなり幅広い分野にまたがる発表が集まった。

- ・ N. Shinohara, K. Hanaka, K. Makino and I. Yamamoto

Experimental study of air-to-ground lateral attenuation using results of long-term noise monitoring at Narita airport ¹⁾

[成田空港での長期自動監視結果による側方過剰減衰の空中対地上効果の実証研究]

篠原は午後のセッションで、航空機騒音を予測する際にその補正項として必要な、航空機騒音の側方減衰量について、成田空港の長期間の自動監視結果を用いて、航空機が上空に位置する場合の経路側方での減衰量の実態を把握し、既存のいくつかの側方減衰量評価式と比較した結果を報告した。

- ・ T. Nakazawa; M. Sugawara; N. Shinohara, I. Yamada

Difference in airport noise calculation procedures between AERC Model and ECAC DOC.29 ²⁾

[航空機騒音予測における AERC モデルと ECAC DOC.29 モデル間の差異]

中澤は、午前のセッションで日本の AERC2 (JCAB2) 予測モデルを用いた航空機の飛行騒音の予測における手順の詳細を、ヨーロッパの ECAC Doc.29 予測モデルと比較しながら、その共通点と差異についての分析と、検討すべき課題について報告した。

3. その他共著者の発表

その他、篠原はさらに共著者として 3 件に名前を連ねており、それぞれの発表著者が報告した。

- ・ K. Hanaka, N. Shinohara, K. Makino and I. Yamamoto

Changes in over-ground lateral attenuation determined from short-term measurements dependent on topographical conditions ³⁾

[短期測定からみる地形による側方過剰減衰の地上伝搬の変動]

成田空港振興協会の花香氏は、航空機騒音

の側方減衰量について、航空機が地上に位置する場合の滑走路側方への伝搬について検討した結果を報告した。成田空港と仙台空港で短期測定した結果を比較し、空港間の違い（すなわち、空港周辺の起伏や土地利用状況の違い）があることが分かった。これをどのように空港ごとの騒音予測に適用するかは今後の課題としている。

- H. Ishii, T. Yokota, K. Makino, T. Matsumoto and N. Shinohara
Numerical study on lateral attenuation of aircraft noise by using the meteorological effect database developed in JAXA's DREAMS project - Part 1. Air-to-ground propagation ⁴⁾

[DREAMS プロジェクトでの気象影響データベースを用いた数値計算による側方過剰減衰の予測 その1 空中対地上伝搬]

- T. Yokota, K. Makino, M. Koichi; T. Matsumoto, H. Ishii and N. Shinohara
Numerical study on lateral attenuation of aircraft noise by using the meteorological effect database developed in JAXA's DREAMS project - Part 2. Ground-to-ground propagation ⁵⁾

[DREAMS プロジェクトでの気象影響データベースを用いた数値計算による側方過剰減衰の予測 その2 地上対地上伝搬]

JAXA の石井氏と小林理研の横田氏は、JAXA の「DREAMS プロジェクト」から得た気象条件を考慮できるシミュレーションモデルの構築成果を利用し、航空機騒音の側方減衰量を気象条件別に推定した。石井氏は航空機が空中にある場合の空中対地上伝搬について、横田氏は地上対地上伝搬について報告した。篠原らのアプローチは実態測定結果から側方減衰量を導きだそうとするものだが、彼らは、シミュレーションに基づく予測モデルを用いた数値検討によるものである。

4. その他の発表

その他、興味を引いた発表を列挙する。

- S. Ogata, K. Tamaki , Efforts for further airport function enhancement without increasing noise impact at Narita
成田空港でのさらなる機能強化と騒音対策の取り組みについての事例
- C. Struempfel, O. Lehmann, Challenges and Potentials of Aircraft Noise Modeling using enhanced Aircraft Performance Parameters and Flight Deck Procedures
航空機騒音予測の際の推力や速度などの条件設定の適正化について、シミュレータなどを利用した考察を報告。
- J.M. Wunderli, C. Zellmann, O. Schwab,
The sonAIR aircraft noise simulation tool
スイスで開発している航空機騒音予測 sonAIR モデルについての発表。シミュレーションモデルについて3次元の音源特性やコンポーネント別の音源モデルの作成について報告。計算例も示した。エミッションデータベースも用意しているらしい。
- J. Mori, M. Morinaga, I. Yamamoto, T. Matsui , A development of aircraft type identification system by convolutional neural networks using acoustic information
ニューラルネットワーク (CNN) を適用した自衛隊航空機種の識別の報告。航空機騒音に関する FFT または 1/3 オクターブバンド分析によるサウンドスペクトログラムの写真は、CNN への入力データとして使用。良好な識別率だったことを報告した。
- M. Scholz, F. Abdelmoula, Active Noise Abatement Using the New Developed Pilot Assistance System LNAS

ドイツ航空宇宙センターが開発した、着陸時の最適なフラップ、着陸脚および速度操作をパイロットに指示・支援するシステム LNAS の報告。研究試験機 A320 を用いて、2016 年 9 月の 3 日間に 74 回のアプローチを実施したとのこと。

その他に、経路の最適化についてはマンチェスター大学による騒音影響面積や騒音暴露人口といった環境影響を最小化する飛行経路を算出するモデルの報告があった。

- ・ M.Y. Pereda Albarran, A.K. Sahai, E. Stumpf, Aircraft Noise Sound Quality Evaluation of Continuous Descent Approaches
CDA（連続降下進入）時に高度上昇による減衰以外にも、音質の変化で不快感が減るという報告。
他にもスウェーデンの研究所による Steeper approach（急角度進入）でのパイロットの操作負荷に関する報告などがあった。
- ・ N. Porter, A. Knowles, R. Norman, I. Flindell, P. Lemasurier, Respite from Aircraft Noise
ヒースロー空港での滑走路交互運用での騒音影響に関する検討の報告と研究プロジェクトの紹介があった。

5. 感想等

Airport Community Noise のセッションでは騒音予測のモデリングに関する研究と航空機騒音低減対策に関する研究が主に発表された。

騒音予測のモデリングでは航空技術の進化によって多様化する運航パターンを受けて、推力設定や運航プロファイル設定をどのようにすべきかが話題となりつつある。これらについては当研究センターでも今後の研究課題として取り組みたいと考えている。

また空港周辺の騒音低減については、CDA（連続降下進入）や Steeper approach（急角度進入）のみならず、運航管理によって騒音暴露を抑えようとする動きが多いことが分かった。着陸料の設定や空港間の運航状況（環境負荷）の比較などは、Inter-noise でも興味を持って受け入れられるテーマだと感じた。

文献

- 1) N. Shinohara, et al., Experimental study of air-to-ground lateral attenuation using results of long-term noise monitoring at Narita airport, Inter-Noise 2017.
- 2) T. Nakazawa, et al., Difference in airport noise calculation procedures between AERC Model and ECAC DOC.29, Inter-Noise 2017.
- 3) K. Hanaka, et al., Changes in over-ground lateral attenuation determined from short-term measurements dependent on topographical conditions, Inter-Noise 2017.
- 4) H. Ishii, et al., Numerical study on lateral attenuation of aircraft noise by using the meteorological effect database developed in JAXA's DREAMS project - Part 1. Air-to-ground propagation, Inter-Noise 2017.
- 5) T. Yokota, et al., Numerical study on lateral attenuation of aircraft noise by using the meteorological effect database developed in JAXA's DREAMS project - Part 2. Ground-to-ground propagation, Inter-Noise 2017.

活動報告

研究センターの動き *

平成29年度航空環境研究センターでは、主に次の自主研究、受託事業、研究発表・講演及び広報活動等を実施した。

1. 自主研究

- (1) ICAO/CAEPの動向調査
- (2) ①航空機騒音予測技術検討調査その1
航空機騒音予測モデルの性能向上
②航空機騒音予測技術検討調査その2
騒音シミュレーションによる3次元騒音解析
- (3) 航空機騒音予測における側方過剰減衰の評価に関する検討
- (4) 飛行経路データ処理を体系化・効率化した処理システムの構築
- (5) 海外空港における環境対策情報の収集
- (6) 国内外主要空港における環境負荷の比較
- (7) 主要空港における環境負荷低減の試みの効果分析
- (8) 暗騒音による航空機騒音評価への影響
- (9) 騒音の健康影響等に関する海外動向の把握、知見の整理

2. 受託事業

- (1) 航空機騒音基礎調査
- (2) 空港周辺航空機騒音等実態調査
- (3) 航空機騒音予測計算作業
- (4) その他航空機騒音に関する調査

・委託者別件数	公的機関等	4件
	公益・一般法人	2件
	民間	6件

3. 研究発表・講演等

- (1) 第46回国際騒音制御工学会議 I N T E

R - N O I S E 2 0 1 7

[中華人民共和国/香港特別行政区]

Experimental study of air-to-ground lateral attenuation using results of long-term noise monitoring at Narita airport
「成田空港の常時監視結果を用いたATG側方減衰量に関する考察」

篠原直明、花香和之（成田国際空港振興協会）、牧野康一（小林理学研究所）、山元一平（防衛施設協会）

Difference in airport noise calculation procedures between AERC Model and ECAC DOC.29

「AERC,ECACモデル間の計算手順の違いについて」

中澤宗康、菅原政之、篠原直明、山田一郎（前研究センター所長）

- (2) 日本音響学会2017年秋季研究発表会
「航空機騒音予測時の側方減衰補正－航空機が上空に位置する場合に関する検討－」

篠原直明

- (3) 第58回大気環境学会年会
「航空機からの大気汚染物質排出量推計結果に関する考察－国内主要空港の空港間比較と経年変化－」

篠原直明

- (4) 第76回日本交通学会
「騒音を考慮した着陸料と航空会社の機材選択」

高橋達

- (5) 騒音制御工学会2017年秋季研究発表会

* Annual activities of Aviation Environment Research Center

「航空機騒音の測定・評価の信頼性に関する検討～短期測定の時期と回数～」

篠原直明

- (6) 日本騒音制御工学会シンポジウム
地方自治と騒音対策—空港と航空機騒音について—
—航空機騒音に係る周辺環境対策—
篠原直明

4. 広報事業

- (1) (一財) 航空振興財団／航空少年団
第42回航空教室（北海道千歳市）
講話「飛行機と音の話」と大声の実測体験。
- (2) 第42回空港環境対策関係担当者研修の開催
空港周辺地域を管轄する関係自治体等職員を対象に研修を行った。
(50団体、71名参加)
- (3) 第3回航空環境研究センター自主研究発表会の開催
航空環境に関する動向や研究成果を広く社会に還元・普及することを目的とする。
(46団体、101名出席)
- (4) 機関誌「航空環境研究」No.21号の発行。
航空環境に関する国内外の多岐にわたる情報の提供。

5. 各委員会委員等の委嘱状況

- (1) 航空機騒音監視評価委員会委員（公益財団法人成田空港周辺地域共生財団）
[任期：H29.6.2～H31.3.31]
篠原直明
- (2) JIS Z 8731 環境騒音の表示・測定方法原案作成委員会委員（一般社団法人日本音響学会）
[任期：H29.12.1～H30.11.30]
篠原直明
- (3) 公益社団法人日本騒音制御工学会副会長
[任期：H 30.6～H 32.5]
篠原直明

6. その他（学会等への出席）

- (1) I C B E N 2 0 1 7
[スイス／チューリッヒ]
- (2) 日本音響学会第155回技術講習会
「系列データモニタリングの基礎と最近のトピックス」
菅原政之

編集後記

この度、法人名が改称されることになりました。

新名称は、「一般財団法人 空港振興・環境整備支援機構」（略称「空港支援機構」）となります。どうぞ皆様よろしく申し上げます。

昭和43年設立時名称の「航空公害防止協会」から平成5年に「空港環境整備協会」となり、今回で3回目の名称となります。また、今年は、創立50年と言う節目の年ですので、新たな気持ちでスタートするには相応しいのではないのでしょうか。

なお、付属機関としての「航空環境研究センター」の名称は変わりませんので、どうぞ御安心下さい。そして巻頭言で触れられておりましたが、岩崎会長が退任されることとなりました。

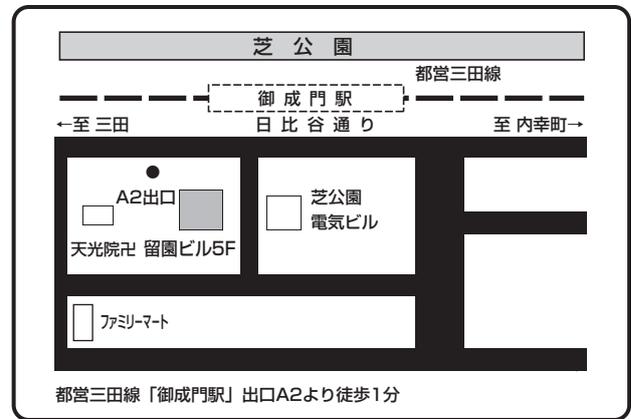
航空環境研究センターは、岩崎会長には、足を向けて寝られないくらいに大変お世話になりました。長年、内向的で閉塞感があった意識を外へ向かって情報発信するという大切なことを教えていただき、本来研究とはこうあるべきとの自覚も植えつけて頂きました。その代表は、「自主研究発表会」です。研究員を時には厳しく時には優しく叱咤激励して頂いた事で、今年で3回目の発表会も多くの方々に御出席頂きました。

自主研究についても、研究員に多くのアドバイスを頂きました。そのお陰で本号にも多くの研究を掲載することが出来ました。

岩崎会長が退任されてもその意義を忘れることなく努力し続けていくことが恩返しになるものと思っております。

最後に、現名称での発刊は本号が最後となりますが、新名称になりましたも従来どおり発刊いたしますので、皆様の御感想や御意見、御提案等がございましたら事務局宛頂戴できれば有り難く存じます。

なお、記事の投稿も受け付けておりますので、関心がある方は遠慮なく事務局に御連絡下さい。



航空環境研究センター案内図

航空環境研究 第22号 平成30年6月26日発行 ©2018

発行人 篠原直明

発行所 一般財団法人 空港環境整備協会 航空環境研究センター

105-0011 東京都港区芝公園1-3-1 留園ビル5階

電話 (03) 6721-5271 FAX (03) 6721-5272

URL : <http://www.aerc.jp/>

無断転載を禁じます

CONTENTS

PREFATORY NOTE

AERC Looking back over the past 5years

Teiji Iwasaki 1

FOCUSES

Research and Development of Satellite Navigation System

Yutaka Fukuda 3

RESEARCH REPORTS

Consideration for improvement of reliability of long-term evaluation of aircraft noise based on short-term measurement
Naoaki Shinohara 9

Consideration of seasonal factors on measurement and evaluation of aircraft noise
- Influence of seasonally background noise for evaluation value of aircraft noise - Naoaki Shinohara 18

The treatment of input data to consider the accuracy of prediction on an aircraft noise prediction model
Masayuki Sugawara, Toshiyasu Nakazawa, Hiroki Hashimoto 28

Study aircraft ground operation noise prediction using three-dimensional acoustic simulation
Toshiyasu Nakazawa 32

Noise related airport charges and airlines aircraft choice
Toru Takahashi 36

Continuous descent operation under 10,000ft
Hidemasa Takahashi 45

Case study on countermeasures against aircraft noise at Frankfurt Airport
Kyoichi Goto 53

WHO Environmental Noise Guidelines under Review and Aircraft Noise
Tetsuya Kaneko 62

TUTORIAL PAPER

Explanation of epidemiological research on the influence of noise on health
Kyoichi Goto 68

Brief review of aviation technology development and reduction at noise source
Toshiyasu Nakazawa 80

OVERSEAS CIRCUMSTANCES

Report of Inter-noise 2017
Naoaki Shinohara, Toshiyasu Nakazawa 87

ACTIVITIES OF AERC

Annual activities of Aviation Environment Research Center
Management Division 91