

遠距離における高頻度航空機騒音の評価方法

EVALUATION OF FREQUENT AIRCRAFT NOISE IN FAR DISTANCE

渡辺義則*・角 知憲**・大嶋孝二***・松本嘉司****

By Yoshinori WATANABE, Tomonori SUMI, Koji OSHIMA and Yoshiji MATSUMOTO

Large airports have become to be built far in the distance of cities in Japan. In such cases, the noise duration increases because of the increases of aircraft altitude in residual areas although the noise level is reduced. Therefore it possibly provides some problems to evaluate the aircraft noise independently of environmental noise when the frequency of flight is large.

The purpose of this study is to find the way to evaluate the effect of aircraft noise on the environmental noise level considering the flight frequency on the basis of quantitative relationship between the noisiness and loudness of environmental noise clarified as well as that of aircraft noise in the distance.

1. はじめに

航空輸送需要の増大に伴い、年々主要空港の運航便数も増加され、すでに一部の幹線空港では1日当たり数百回の離着陸が行われている。このような離着陸回数は空港までの距離が十分大きく航空機騒音のレベルがそれほど大きくない地域においても、特にそれが特定な時間帯に集中する場合に、検討すべき課題を提供するといえる。その理由は、空港から遠距離であって航空機の飛行高度が大きいと、なるほど音のやかましきは緩和されるものの、一方では騒音の継続時間が増加し、離着陸間隔に比べてそれを無視できなくなるからである。

もともと航空機騒音は音響出力が著しく大きく、人の聴覚が鋭敏な2~8 kHzの周波数帯域に大きいエネルギー成分をもつ一方、間欠的に発生するので、他の騒音と同列に評価することに無理があるという性質を有す

る。このような性質に対処するため、これまでCNR, NNI, NEF, WECPNLなど、いくつもの評価指標が提案されてきた¹⁾。これらはいずれも航空機騒音のやかましさを、発生頻度あるいはその継続時間や発生時間帯を考慮する指標であり、それぞれ航空機騒音にさらされる住民の反応とよく対応することが認められている。なかでもWECPNLはICAO(国際民間航空機構)が推奨する評価指標であり、わが国でも、これを使用して航空機騒音の環境基準値が定められている。ところが前述のごとく、航空機の運航間隔に比べて、騒音の継続時間が無視できなくなって、騒音の発生が間欠的であるといえなくなると、航空機騒音をレベルが時間的に変動する連続的な騒音として取り扱うことが可能となる。それどころか、空港の新設、拡充などに伴って、航空機騒音が従来からある環境騒音に付加される結果、環境騒音の基準値を越えるか否かは、環境アセスメントとして不可欠な検討事項となる。

本研究は、このような観点から、空港から遠距離にあり、かつ、飛行経路に近い地点が高頻度の飛行によって受ける航空機騒音を評価するための1つの方法を提案しようとするものである。

* 正会員 工博 九州工業大学助教授 工学部開発土木工学科

(〒804 北九州市戸畑区仙水町1-1)

** 正会員 工博 九州大学助教授 工学部土木工学科

(〒812 福岡市東区箱崎6-10-1)

*** 正会員 (株)熊谷組技術研究所第一技術部

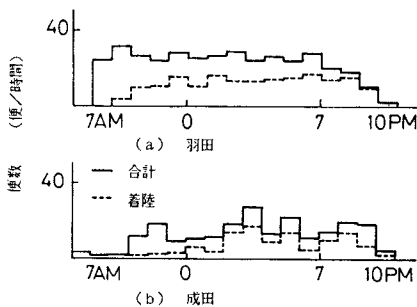
(〒162 西新宿区津久戸町17-1)

**** 正会員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科

(〒113 文京区本郷7-3-1)

2. 運航頻度と騒音の時間変動

図一は1980年当時の航空時刻表に基づいて、わが国の代表的な2つの空港の1日当たり時間帯別離着陸便数を表わしたものである²⁾。なお、国際線の運航便数は1週間単位で決められるので、その1/7を1日当たり便数としてある。両空港とも1日当たり離着陸便数が数百に達することが図からわかるが、その最も集中する時間帯では離着陸便数は31便/時間に達する。さらに特徴的なのは機材や施設の運用が1日をサイクルとすることが多いのに対応して、時間帯によって離陸あるいは着陸の一方が支配的になる傾向がみられることである。離着陸はともに向かい風で行われるので空港からの距離がある程度あれば離陸と着陸のどちらか一方の騒音が優勢になる。その場合の最大頻度は27便/時間(離陸)、平均間隔は2.2分であるが、平均する前の個々の飛行間隔は、



図一 時間帯別離着陸便数(1980年当時)

表一 続行する離着陸機の間隔

	Heavy	Medium	Light
Heavy	4 n.m.	5 n.m.	6 n.m.
Medium	3	3	4
Light	3	3	3

注) n.m.は(nautical mile)の略で1n.m.=1.85km、重量クラスは離陸重量7tf未満がLight,7tf以上136tf未満がMedium,136tf以上がheavyである。

表二 1980年頃のわが国の主要旅客機の離着陸速度と重量

機種	速度(m/s)		最大離陸重量(tf)
	離陸	着陸進入	
B747-5R	76.6	68.9	258.9
DC10-40	86.4	67.4	201.9
L1011-1	78.2	72.0	195.0
DC8-61	84.4	73.6	147.4
B727-200	78.2	64.3	78.0
DC9-41	71.5	67.4	54.9
B737-200	77.2	62.8	49.4
YS11-A-200	52.5	50.4	24.5

注) 各機種とも発達型により数値に多少の差があるがここでは代表的なもののみを記した。

さらに小さくなり得る。

航空時刻表では複数の運航便が同時刻に離着陸を予定していることもあるが、1本もしくは十分な間隔をもたない2本の滑走路を使用する場合には、それが重なることはない。機が滑走路あるいは離着陸コースを完全にはなれるのに多少とも時間を要するほか、レーダー識別や先行機の後流渦の影響を避ける目的から、所定の間隔において離着陸が行われる。この間隔はレーダー管制が行われる場合には表一のように与えられる³⁾。

一方、表二に主要旅客機の離陸速度、着陸進入速度および最大離陸重量を示す^{4),5)}。この速度を用いて、表一中の距離間隔を時間間隔に換算すると¹¹⁾、最小64秒(Mediumの後をDC10が離陸)、最大184秒(Heavyの後をYS11が着陸)となる。通常、航空機騒音の継続時間は(ピークレベル-10dB)となる2つの時点の間をとるが、いま、飛行高度の変化を無視して継続時間を概算すれば、航空機からの距離(スラントディスタンス、以下、SDと略称)1kmに対して69秒(速度86.4m/s)~119秒(同50.4m/s)となる。この継続時間は、続行する航空機の間隔から与えられる時間間隔や平均離(着)陸間隔に比べて決して無視できない大きさである。後述のように騒音のレベルもまた一般の環境騒音と同程度ないしそれ以上となる。以下では、このような場合の騒音を考える。

3. 航空機騒音の時間変動の予測モデル

(1) 騒音予測基本式

現在、環境騒音の基準値は騒音レベルの中央値で与えられる。この中央値を予測するためには、対象観測点における航空機騒音の時間変動を計算する必要がある。いま、従来からよく使用される考え方に従って、航空機騒音の時間変動をコンピュータシミュレーションで求めるとすればその過程において次の計算が必要である。

一般に、航空機は機種別、離着陸別に一定の速度で飛行する無指向性の点音源であることを仮定し、着陸便数は地上航跡(飛行経路)別、機種別に、一方、離陸便数は地上航跡別、機種別、離陸重量(行先)別に、対象空港の平均運航便数として1日の各時間帯について与えられるので、航空機の離着陸時間およびその属性(地上航跡*i*、機種*j*、重量*k*)は、乱数を利用して決定する。なお、実際の飛行経路は所定の経路からずれることが知られているが、このずれに基づく騒音レベルのばらつきは今回の研究では考慮していない。

図二は所定の飛行経路を、所定の機種の航空機が着陸するときの飛行経路と観測点の概図であるが、このよ

注1) 航空機の安全上昇速度は離陸速度より1割程度大きい⁶⁾。

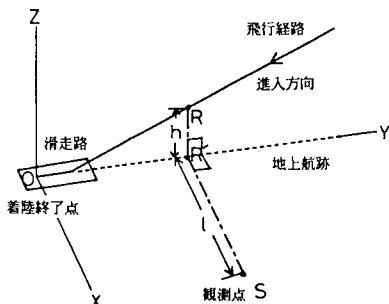


図-2 飛行経路と観測点の概図

うな関係が離陸に対して $i_a \times j \times k$ 個、着陸^[2]に対して $i_l \times j$ 個存在する。ただし、 i_a および i_l はそれぞれ離陸、着陸の地上航跡の総数である。これらすべての場合について、前述の要領で次々に航空機を発生させるので、ある瞬間には航空機が空間に散在する。これらすべての航空機から対象観測点（例：図-2 の S）に伝播する騒音を時々刻々計算すれば、対象観測点における航空機騒音の時間変動が得られる。このとき、その計算時間は、航空機がただ 1 機通過するときの対象観測点における騒音レベルの時間変動（以後、単機観測点通過パターンと略称）の計算時間 T_c に、1 日当たりの離着陸便数の合計 N とシミュレーションの繰返し回数 N_s を乗じたものにおよそ比例する。

しかし、この計算方法には無駄な計算が含まれている。すなわち、航空機の属性が同一ならば、単機観測点通過パターンも同じであるにもかかわらず、機械的に計算を繰り返している。もし、このパターンを異なった属性をもつ航空機の数 N_e について 1 度計算しておけばよい計算方法であれば、離陸に対して $i_a \times j \times k$ 個、着陸に対して $i_l \times j$ 個のパターンを計算しておけばよい。このことは無駄な計算を省き、計算時間を短縮するうえで重要である。たとえば関西国際空港では昭和 75 年に 26 万回/年の離着陸便数を予定しているが^[7]、この場合には $N = 724$ 、 $N_e = 131$ であり、 $N_s = 30$ としても、後者の計算時間は前者のその 131/(724×30) となり 21 589 T_c だけ計算時間が節約される。計算時間短縮のメリットは対象観測点、運航便数、シミュレーションの繰返し回数が多くなるほど大きい。

このような観点から予測計算の効率化を考慮して、次のモデルを航空機騒音に対して考える⁸⁾。航空機が対象観測点に最も近づく飛行経路上の地点（以後、最接近点と略称、例：図-2 の R）を通過した瞬間に発生した騒音が対象観測点に到達する時間（以後、騒音到達時間と略称）に対応して、単機観測点通過パターンと同一の履

歴曲線が対象観測点 S に与えられる。つまり、異なった属性をもつ航空機の数（たとえば関西国際空港では 131）だけの履歴曲線を考えれば、多入力線形系の出力の和として、対象観測点の航空機騒音の時間変動が計算できる。すなわち、本研究では航空機の通過に伴って、対象観測点に生じる騒音レベルの時間変動 $L(t)$ を次式で表わす。ただし、 t は時間である。

$$L(t) = 10 \log_{10} z(t) / 10^{-12} \dots \dots \dots (1)$$

$$z(t) = \sum_{i=1}^{i_a} \sum_j \sum_k z_{aijk}(t) + \sum_{i=i_l+1}^{i_l+i_l} \sum_j z_{uij}(t) \dots \dots \dots (2)$$

$$z_{aijk}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} g_{aijk}(\lambda) \cdot y_{aijk}(t-\lambda) d\lambda \dots \dots \dots (3)$$

$$z_{uij}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} g_{uij}(\lambda) \cdot y_{uij}(t-\lambda) d\lambda \dots \dots \dots (4)$$

- $z(t)$: 航空機の通過に伴って対象観測点に生じる音の強さの時間変動 (ワット/m², W/m²)
- $z_{aijk}(t)$: 地上航跡 i をもつ経路を飛行する機種 j 、重量 k の離陸機によって対象観測点に生じる音の強さの時間変動
- $y_{aijk}(t)$: 同離陸機通過機数の時間変化率 (機/s)
- $g_{aijk}(t)$: 同離陸機通過に対応して対象観測点に与えられる履歴曲線 (W/m²/s)
- $z_{uij}(t)$: 地上航跡 i をもつ経路を飛行する機種 j の着陸機によって対象観測点に生じる音の強さの時間変動
- $y_{uij}(t)$: 同着陸機通過機数の時間変化率
- $g_{uij}(t)$: 同着陸機通過に対応して対象観測点に与えられる履歴曲線

なお、航空機の通過機数は 5.(2) に示すように、騒音到達時間に航空機が対象観測点を通過すると仮想して算出する。ここで $z(t)$, $z_{aijk}(t)$, $z_{uij}(t)$, $g_{aijk}(t)$, $g_{uij}(t)$, $y_{aijk}(t)$, $y_{uij}(t)$ のフーリエ変換をそれぞれ $Z(f)$, $Z_{aijk}(f)$, $Z_{uij}(f)$, $G_{aijk}(f)$, $G_{uij}(f)$, $Y_{aijk}(f)$, $Y_{uij}(f)$, f を周波数とすると式 (2)~(4) は

$$Z(f) = \sum_{i=1}^{i_a} \sum_j \sum_k Z_{aijk}(f) + \sum_{i=i_l+1}^{i_l+i_l} \sum_j Z_{uij}(f) \dots \dots \dots (5)$$

$$Z_{aijk}(f) = G_{aijk}(f) \cdot Y_{aijk}(f) \dots \dots \dots (6)$$

$$Z_{uij}(f) = G_{uij}(f) \cdot Y_{uij}(f) \dots \dots \dots (7)$$

となり、計算が簡単になる。最後に、式 (5) の $Z(f)$ を逆フーリエ変換すれば、航空機の通過に伴って対象観測点に生じる音の強さの時間変動 $z(t)$ 、さらには、騒音レベルの瞬時値 $L(t)$ が算出でき、中央値 L_{50} や等価騒音レベル $L_{Aeq, T}$ が求まる。なお履歴曲線は、航空機の運用状態ごとに与えられているスラントディスタンス-騒音ピークレベル曲線（以後、SD-dB(A) 曲線と略称）を用いて 5.(2) に示す要領で計算できる。

(2) 等価騒音レベルの簡易予測式

JIS Z 8731 の改訂によって、騒音の評価量として等

注 2) 着陸の場合には、機体重量によるプロファイルの相違はない。

騒音レベル $L_{Aeq, T}$ が導入され、環境アセスメント時に $L_{Aeq, T}$ を計算する必要が生じている。 $L_{Aeq, T}$ の予測は対象観測点の音の強さの時間平均値の予測に帰着されるので、対象観測点の騒音レベルの確率分布の情報がないと予測できない L_{50} に比べて予測が容易である。そこで、本節では電子計算機によるシミュレーションを必要としない簡易予測式を $L_{Aeq, T}$ について考察する。

等価騒音レベル $L_{Aeq, T}$ は式 (8) で定義される。

$$L_{Aeq, T} = 10 \log_{10} \mu_z / 10^{-12} \dots \dots \dots (8)$$

ここで、 μ_z は対象観測点における A 特性での音の強さの時間変動を、実測時間 T に関して時間平均した値である。いま、 T が 1 時間で、しかも単機観測点通過パターンを利用した予測方法を μ_z について考える。まず、音の強さの単位で表わした単機観測点通過パターン、すなわち、3.(1) で定義した履歴曲線を時間に関して積分する。なお、航空機騒音の場合には、(a) 音源と受音点間に音の伝播を妨害するものはない、(b) 実測時間は積分値の増大に影響する履歴曲線の積分時間範囲に比べて十分長い、という理由で、積分する時間範囲は $[-\infty, \infty]$ と考える。なお、この積分値は航空機の属性の数 (履歴曲線の数) だけ得られ、この値の平均発生頻度は、その属性をもつ航空機の平均運航便数に等しい。したがって、 T が 1 時間の場合の μ_z は式 (9) から得られる。

$$\mu_z = \left[\sum_{i=1}^{i_t} \sum_j \sum_k F_{aijk} \int_{-\infty}^{\infty} g_{aijk}(t) dt + \sum_{i=1}^{i_l} \sum_j F_{lij} \int_{-\infty}^{\infty} g_{lij}(t) dt \right] / 3600 \dots \dots \dots (9)$$

F_{aijk} : 地上航跡 i をもつ経路を飛行する機種 j 、重量 k の離陸機の 1 時間当たりの平均運航便数

F_{lij} : 地上航跡 i をもつ経路を飛行する機種 j の着陸機の 1 時間当たりの平均運航便数

次に、着陸時の履歴曲線が近似的に式 (10) のように表現できると仮定する。

$$g_{lij}(t) = a_{ij} \{ SD_{lij}^2 + (v_{ij} \cdot t)^2 \}^{-b_{ij}/2} \\ a_{ij} = 10^{A_{ij}/10}, \quad b_{ij} = -B_{ij}/10 \dots \dots \dots (10)$$

SD_{lij} : 地上航跡 i をもつ経路を飛行する機種 j の着陸機と対象観測点の SD (ft)

v_{ij} : 機種 j の着陸機の進入速度 (ft/s)

A_{ij}, B_{ij} : 着陸時の SD-dB(A) 曲線の定数項と \log_{10} SD の係数 (後掲の表—4)

同様に離陸時の履歴曲線は

$$g_{aijk}(t) = a_{aj} \{ SD_{aijk}^2 + (v_{aj} \cdot t)^2 \}^{-b_{aj}/2} \\ a_{aj} = 10^{A_{aj}/10}, \quad b_{aj} = -B_{aj}/10 \dots \dots \dots (11)$$

SD_{aijk} : 地上航跡 i をもつ経路を飛行する、機種 j 、

重量 k の離陸機と対象観測点の SD (ft)

v_{aj} : 機種 j の離陸機の数 (ft/s)

A_{aj}, B_{aj} : 離陸時の SD-dB(A) 曲線の定数項と \log_{10} SD の係数

このような場合には、式 (9) の積分値は次式から求まる。

$$\int_{-\infty}^{\infty} g_{aijk}(t) dt = \frac{a_{ij} \sqrt{\pi} \Gamma((b_{ij}-1)/2)}{v_{ij} SD_{aijk}^{b_{ij}-1} \Gamma(b_{ij}/2)} \\ \int_{-\infty}^{\infty} g_{aijk}(t) dt = \frac{a_{aj} \sqrt{\pi} \Gamma((b_{aj}-1)/2)}{v_{aj} SD_{aijk}^{b_{aj}-1} \Gamma(b_{aj}/2)} \dots \dots \dots (12)$$

$\Gamma(x)$: ガンマ関数

4. 航空機騒音と環境騒音のやかましさ

前述のように、航空機騒音を環境騒音に含めて評価しようとする、航空機騒音とその他の騒音を共通の尺度ではかることが前提となる。騒音は聴感を考慮した音の大ききのレベルに近い dB(A) で測定評価されることが多いが、航空機騒音にも共通の尺度として無条件に dB(A) を用いることには問題がある。その理由は、一般に航空機騒音が他の環境騒音に比べて高周波成分を多く含み、同じ騒音レベルであっても他の騒音よりはるかに耳障りであるという性質があるためである。そこで、航空機騒音そのものを取り扱う場合には dB(A) ではなく、音のやかましきのレベル PNL を用いる。ただ、騒音は広く普及している騒音計を用いて dB(A) で計測する方が都合がよく、SD と騒音レベルの関係も dB(A) で与えられている。そこで、FAA (米連邦航空局) では dB(A) と PNL の換算式として数多くの測定結果から

$$PNL = dB(A) + K \dots \dots \dots (13)$$

を与えている。ここで、 K は航空機から受音点までの距離によって $K=13 \sim 8$ という値が用いられる⁹⁾。

そこで、環境騒音と航空機騒音を総合的に評価するために、環境騒音についても上式と同様に dB(A) と PNL の換算式を用いて、共通の尺度として PNL を用いることとする。また、航空機騒音についても上述の換算式が作成されて以来、低騒音型ファンエンジンを搭載した新機種が就航している現状から、本研究で対象としている範囲で PNL と dB(A) の関係を再検討する。

(1) 航空機騒音における dB(A) と PNL の関係

千葉県木更津の海岸において、東京羽田空港に着陸する航空機の騒音を測定して dB(A) と PNL の関係を調べた。木更津は東京羽田空港から 17 km に位置し同空港を出入りする多くの航空機の通り道となっている。また、測定地点は海岸であるために、航空機通過時以外の騒音の影響はほとんどない。図—3 に観測された dB(A) と PNL の対応関係を示す。なお、この結果に含まれる機種は、B 767, B 747, B 737, B 727, DC 10, DC 9,

A 300, L 1011, YS 11 の 9 機種である。また、以下にこの結果を式で表わす。

$$PNL = dB(A) + 9.5 \dots\dots\dots(14)$$

(定数項の標準偏差は 0.60)

(2) 環境騒音における dB(A) と PNL の関係

自動車騒音が支配的な環境騒音、もしくはそれをほとんど含まない静かな環境騒音について dB(A) と PNL の関係を調べた。なお、前者は自動車が発音している間は渋滞しているときに、道路から 7~70 m の地点で測定し、一方後者は近距離からの自動車騒音の影響をほとんどうけないような大学構内、住宅街、海岸の各地点で測定した。図-4, 5 に dB(A) と PNL の対応関係を示

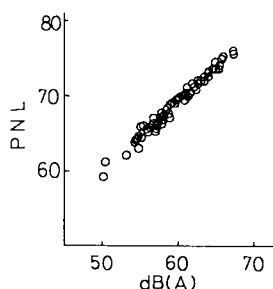


図-3 航空機騒音の dB(A) と PNL の対応関係

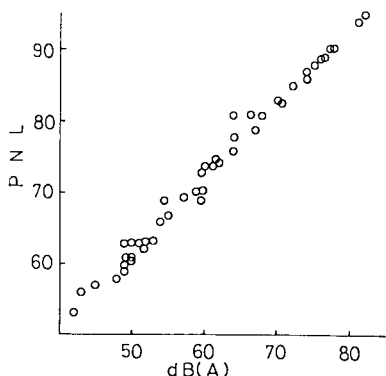


図-4 自動車騒音が支配的な環境騒音の dB(A) と PNL の対応関係

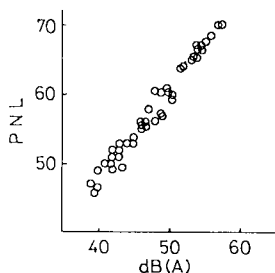


図-5 自動車騒音を含まない環境騒音の dB(A) と PNL の対応関係

す。また、以下にこれらの結果を式で表わす。

① 自動車騒音が支配的な環境騒音

$$PNL = dB(A) + 12.4 \dots\dots\dots(15)$$

(定数項の標準偏差は 1.38)

② 自動車騒音を含まない環境騒音

$$PNL = dB(A) + 9.9 \dots\dots\dots(16)$$

(定数項の標準偏差は 1.94)

なお、統計的検討を行ったところ式 (15), (16) の定数項には有意な差があることが認められた。式 (13)~(16) を用いれば、式 (5) から計算される航空機騒音を環境騒音に含めて評価することができる。

5. 数値計算

(1) 計算上の前提

空港から遠距離の地点でも、飛行経路に近く、かつ、飛行が高頻度であれば、本来間欠的な航空機騒音が時間的に連続的に変動する騒音となる結果、従来からある環境騒音にこれらの騒音が付加され、ひいては環境騒音の基準値を越えるという事態も予想されることはすでに述べた。そこで、本節では以上の観点から航空機騒音が環境に及ぼす影響を考察する。対象観測点(評価対象地点)は図-6 に示すように、東京羽田空港から 17 km 離れているものの飛行経路に近く、地上航跡から 1 km 離れた所にある¹⁰⁾。このときの計算上の前提を以下に示す。

① 平均運航便数は表-3 に示す 1980 年当時の東京羽田空港のものを利用する。なお、表-3 は 1 週間当たりの航空時刻表から各時間帯別に着陸便数を算出し、それを 1 日当たりの便数に換算したものである²⁾。また、航空機が離陸する場合には、空港から北東方向に離陸し旋回して対象観測点上空に来たときにも、南東方向に離陸した場合にも、上昇角は離陸進入降下角より大きい¹⁾

表-3 東京羽田空港の平均運航便数 (1980 年当時, 着陸便数)

	YS11	B737	B747	DC10	L1011	B727	DC9	DC8	合計
8~9	0.0	0.0	1.0	0.0	2.0	0.0	0.0	1.0	4.0
9~10	2.0	1.0	0.0	1.0	2.0	3.0	1.0	0.0	10.0
10~11	3.0	1.0	3.0	0.0	2.0	2.0	1.0	0.0	12.0
11~12	5.0	1.0	1.0	1.0	3.0	0.0	3.0	0.0	14.0
12~13	5.4	0.0	1.0	0.0	1.0	2.0	0.0	1.0	10.4
13~14	5.3	1.4	3.0	0.0	3.0	1.3	2.0	0.0	16.0
14~15	4.0	0.4	3.4	0.0	3.0	0.0	0.9	1.0	12.7
15~16	3.4	0.0	2.0	1.0	1.4	2.0	3.0	0.0	12.8
16~17	3.0	2.0	2.0	1.0	2.0	4.0	0.0	0.0	14.0
17~18	5.3	1.0	2.3	0.0	2.0	2.0	2.0	0.0	14.6
18~19	4.0	2.0	2.0	2.0	3.0	0.0	3.0	1.0	17.0
19~20	4.0	0.0	1.0	0.0	2.0	2.0	4.0	1.0	14.0
20~21	1.0	2.0	3.1	2.0	3.0	2.0	2.0	0.0	15.1
21~22	3.0	0.0	3.0	1.0	2.0	1.0	2.0	0.0	12.0
合計	48.4	11.8	27.8	9.0	31.4	21.3	23.9	5.0	178.6

注) この他に B707 も就航しているが、一週間当たり 4 便と便数も少なく、しかも、14~15 時の時間帯だけに集中しているので計算では無視した。

で、航空機が対象観測点を通過するときにはすでに相当な高度にあり、観測点に伝播する騒音レベルは着陸騒音に比べて小さい。また通常は空港から南東方向（機体進入方向からみて 332° の方位角）から進入すること、また、北東方向（機体進入方向からみて 221° の方位角）から進入した場合には、その地上航跡と対象観測点が相当離れることになり¹⁰⁾、対象観測点に伝播する騒音レベルは無視できるほど小さいことから、ここでは評価上最も不利となる南東方向に着陸が集中するケースを考えた。

② 航空機着陸時の地上航跡は図-6 とする。なお、地上航跡は東西方向を x 軸、南北方向を y 軸、原点を空港滑走路の着陸終了点にとった②~④の座標として、大型計算機に入力した。ただし、②は滑走路端、③は MM（ミドルマーカ、北緯 35°31'38"、東経 139°47'21"）、④は MM と OM（アウターマーカ、北緯 35°23'30"、東経 139°54'32"）の延長線上の点である。なお、着陸プロフィールは上空待機の場合と直接進入する場合とは若干異なるが¹⁰⁾、後者の方が普通であるので、ここでは直接進入する場合の着陸プロフィールを用いた。着陸プロフィールは全機種ともに同じであり、原点を空港滑走路上の着陸終了点にし OM を地上航跡に沿った距離 21.13 km、高度 0.914 km にする。そして、原点と OM との飛行高度は、原点から地上航跡に沿った距離に比例し、また、OM 以遠では一定の飛行高度 0.914 km をとる¹⁰⁾（図-7）。

③ 航空機が飛来しないときの対象観測点には、この

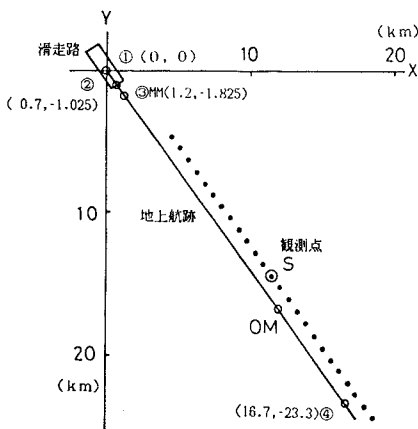


図-6 着陸機の地上航跡（・は想定した基準点）



図-7 着陸プロフィールの例（東京羽田空港）

場合には自然音しか存在しない。このときの自然音は平均値 μ 、標準偏差 σ の正規分布に従うと仮定するとともに、人工的な騒音源が存在しない海岸での実測結果に基づいて (a) 昼間の時間帯 (7:00~19:00) : $\mu=52.6$, $\sigma=1.85$, (b) 夕方の時間帯 (19:00~22:00) : $\mu=49.2$, $\sigma=1.91$, の値 (単位 PNL) にした。

(2) 計算手順

航空機騒音の時系列波形を算出するための基本式は 3.(1) に示したが、実際の計算にあたっては大型電子計算機を利用する。このとき、式 (4) 中の $y_{ij}(t)$ は次のようにして求める。まず、

$$x_{ij} = u_{ij} - t_{ij} + p_{ij} \dots \dots \dots (17)$$

- x_{ij} : 地上航跡 i をもつ経路を飛行する機種 j の着陸機の騒音到達時間
- u_{ij} : 同着陸機が着陸を終了する時間
- t_{ij} : 同着陸機が経路 i 上の最接近点から滑走路上の着陸終了点に至るまでの時間
- p_{ij} : 経路 i 上の最接近点で発生した同着陸機の騒音が対象観測点に伝播する時間

なお、 u_{ij} は対象空港の平均運航便数および管制の方法（表-1, 3）をもとに決める。本研究では以下に示す方法をとった。

- ① 航空機の機種を一樣乱数を用いて決める。
- ② 機体が着陸する時間間隔 q を乱数発生によって求め、それを次々に加算することによって、各時間帯の着陸終了時刻を決定した。なお、 q は以下に示すような指数分布に従うと仮定した。

$$q \text{ 未満の時間間隔で着陸する確率} = 1 - \exp\{-(\tau - q)/(\tau - 3600/F)\} \dots \dots \dots (18)$$

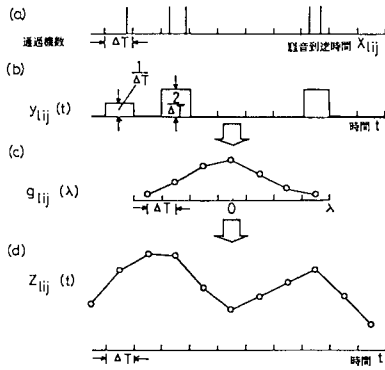
- F : 着目する時間帯の全便数（表-3）
- τ : 最小着陸間隔 (s)

③ 前記②の航空機の重量クラスと1つ前の時点で着陸した航空機の重量クラスとの組合せによって、前掲の表-1 に示す各値を対応させた後に、この値を②の航空機の数 (表-2) で除して τ を決定した。

次に、 t_{ij} は航空機の数と滑走路上の着陸終了点から経路 i 上の最接近点までの距離（地上航跡 i の平面座標ならびに着陸プロフィールから算出する飛行高度から得られる）から求める。さらに、 p_{ij} は音の伝播速度と対象観測点の SD から算出する。以上の手続きを経て、全機の x_{ij} を決定した後に航空機騒音を予測しようとする時間間隔 ΔT 中に存在する機数を集計した値に $1/\Delta T$ を乗じて $y_{ij}(t)$ を求める（図-8）。

なお、離陸機を考慮しなければならないときには、式 (3) 中の $y_{aijk}(t)$ を $y_{ij}(t)$ と同様に求めればよい。ただしこのとき、 x_{ij} のかわりに x_{aijk} を考える。

$$x_{aijk} = u_{aijk} + t_{aijk} + p_{aijk} \dots \dots \dots (19)$$



図—8 騒音時間変動の予測手順

- x_{aijk} : 地上航跡 i をもつ経路を飛行する機種 j 、重量 k の離陸機の騒音到達時間
- u_{aijk} : 同離陸機が離陸を開始する時間
- l_{aijk} : 同離陸機が滑走路上の離陸開始点から経路 i 上の最接近点に至るまでの時間
- p_{aijk} : 経路 i 上の最接近点で発生した同離陸機の騒音が対象観測点に伝播する時間

次に、 $g_{ij}(t)$ は機種 j の航空機が滑走路に着陸するとき、地上航跡 i をもつ経路を經由して対象観測点をただ1機通過するときの騒音レベルの時間変動を音の強さの単位で表わしたものであり、その求め方を以下に示す。

① 航空機は時々刻々と高度を変えながら、図—6 に示した地上航跡に沿って進むが、各時刻について航空機と対象観測点の相対位置は計算できる。しかし、このときの航空機の音響出力はデータとして与えられないので、直接、単独機観測点通過パターンを算出できない。そこで、地上航跡付近に図—6 の・で示す多数の基準点を設定して、次の手順で算出する。まず、基準点のスラントディスタンス $SD_{ui1} \sim SD_{ue}$ と $SD-dB(A)$ 曲線より基準点の騒音ピークレベル $SP_1 \sim SP_e$ を求める。なお、 $SD-dB(A)$ 曲線は機種別、推力別で得られているので、機種と離着陸に必要な推力が与えられれば、その推力に近い当該機種の $SD-dB(A)$ 曲線を選び出して利用すればよい。また、本研究が対象とする地域 ($SD \geq 1$ km) ではこの曲線は直線とみなしてよい⁷⁾。たとえば、本研究で対象とする地域は高度 3000 フィート付近であるので、このとき使用する推力について各機種の $SD-dB(A)$ の関係を直線で表わすと表—4 のようになる¹¹⁾。さらに、航空機を無指向性の点音源と仮定しているので、各基準点に最も近づく飛行経路上の地点 $R_1 \sim R_e$ に航空機があるときに対象観測点に伝播する音のレベル $SL_1 \sim SL_e$ が次式で算出できる。ただし、 $\bar{R}_m S$ は R_m と観測点 S 間の距離である。

$$SL_m = SP_m - B_{ij} \log_{10} \frac{\bar{R}_m S}{SD_{uij}} \dots \dots \dots (20)$$

表—4 $dB(A)$ と SD の関係 (着陸時)

	A_{1j}	B_{1j}		A_{1j}	B_{1j}
YS11	138.5	-21.5	L1011	167.4	-28.2
B737	172.5	-29.0	B727	166.4	-27.1
B747	171.8	-28.8	DC9	158.9	-25.6
DC10	167.4	-28.2	DC8	172.0	-27.0

注) $dB(A) = A_{1j} + B_{1j} \log_{10} SD$ 、 SD の単位はフィート

B_{1j} : $\log_{10} SD$ の係数 (表—4)

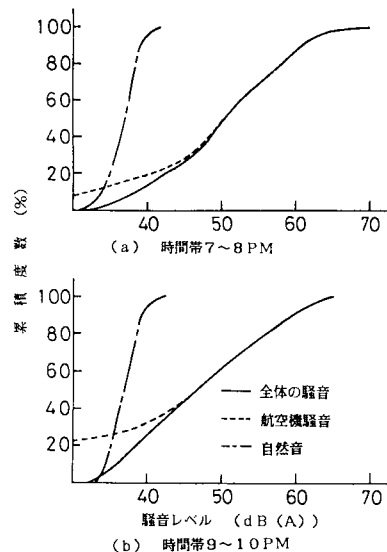
なお、このとき地表面減衰を考慮することがあり、いくつかの方法がある⁷⁾。ここでは航空機の高度が比較的高く、背景騒音に比べて航空機騒音が問題となる飛行経路の範囲内では、地表面減衰が顕著になるまで航空機に対する仰角が小さくならないことから、地表面減衰に対する補正を施さなかった。

② 以上のことから航空機が $R_1 \sim R_e$ に到着したときの対象観測点の騒音レベルとその到着時間を対応させることができるので、これを等時間間隔に補間して図—8 の $g_{ij}(t)$ が設定できる。なお、離陸機を考慮しなければならないときには、式 (3) 中の $g_{aijk}(t)$ を $g_{ij}(t)$ と同様に求めればよい。

次に、以上のようにして求めた航空機騒音は $dB(A)$ であるので、式 (14) を用いてこれを PNL に換算する。そして、自然音とこれを合成した全体の波形を PNL で求めた後に、これを式 (15) を用いて自動車騒音の $dB(A)$ に換算する。

(3) 計算結果と考察

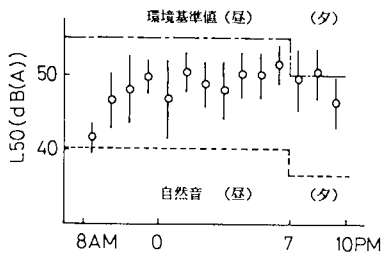
全体の騒音の累積度数分布曲線を図—9 に示す。全体の騒音は低いレベルでは自然音が主体であり、高いレベ



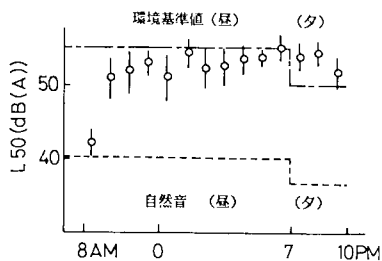
図—9 観測点の騒音の累積度数分布曲線 (自動車騒音に換算)

ルでは航空機騒音が主体である。また、7～8PMの時間帯より9～10PMの時間帯の方が着陸便数が少ないために、自然音が主体となる領域が広い。着陸便数が少なくなるほど、この傾向が強くなる。

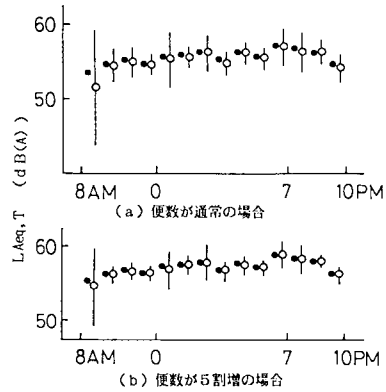
同一時間帯についてシミュレーションを30回繰り返して中央値L50を求めた後に、その平均値と95%信頼区間を算出した結果を図一10に示す。図中、L50の95%信頼区間が自然音のレベルより小さくなっているのは、L50の標準偏差を単に2倍して95%信頼区間を求めたためであり、全体の騒音の瞬時値が自然音のそれを下回ることではない。また、どのような環境基準値を採用するかについては議論の分かれるところではあるが、今回は騒音にかかわる環境基準のうちで、主として住居に供される地域において2車線の道路に面する地域における値を使用して考察を加えた¹²⁾。この結果から、8～9AMの時間帯では着陸便数が4便ときわめて少ないために、全体の騒音のかかなりの部分が、自然音のレベルに支配されており、全体の騒音のL50の値は自然音のL50に近いこと、また、表一3に示す平均運航便数では昼間の時間帯においては環境基準値を越えることはないが、夕方の時間帯においては環境基準値を越える可能性がかなりあることがわかる。独立に運用される滑走路が2本になるなど運航便数が増加すれば、このような事情はさらに強まる。たとえば、表一3に示す平均運航便数を5割増にした場合には図一11に示す結果となる。これから、便数のきわめて少ない8～9AMの時間帯を除



図一10 時間帯別中央値 (○平均値, 実線は95%信頼区間, 自動車騒音換算)



図一11 便数5割増の時間帯別中央値 (○平均値, 実線は95%信頼区間, 自動車騒音換算)



図一12 簡易予測式とシミュレーションによる予測値の比較 (●簡易予測値, ○シミュレーションの平均値, 実線は95%信頼区間, 自動車騒音換算)

いた残りすべての時間帯でL50の平均値が4～5dB増加していること、L50のばらつきが図一10に比べて小さくなっていること、また、夕方の時間帯については環境基準値を完全に越えており、昼間の時間帯についても環境基準値を越える可能性が生じることがわかる。

L50と同様に同一時間帯についてシミュレーションを30回繰り返して等価騒音レベルL Aeq, Tを求めた後にその平均値と95%信頼区間を算出した。次に3.(2)の簡易予測式から航空機騒音の等価騒音レベルを、また5.(1)③の仮定と式(21)から自然音の等価騒音レベルを求め(昼間で40.6dB(A)、夕方で37.3dB(A))、両者を合成して自然音に航空機騒音が付加されたときの全体の等価騒音レベルを算出した。

$$\text{等価騒音レベル} = \text{騒音レベルの平均値} + 0.115$$

$$\times \text{騒音レベルの分散} \dots \dots \dots (21)$$

簡易予測式とシミュレーションによる予測値をまとめて図一12に示す。いま、シミュレーションから求めたL Aeq, Tは同一時間帯でもばらついたので、その平均値について、簡易予測式から求めた値と比較すると、両者は近い値を示し、シミュレーションを用いなくとも3.(2)に示す簡易予測式で容易に算出できることが認められる。

6. 結 論

これまで航空機騒音はその特異な性質のために、他の騒音とは分離して取り扱われ、独立して評価されることが多かったが、大規模な空港が遠方に立地する場合には従来の評価方法では必ずしも十分でないことがある。本論文は、比較的高高度を飛行する航空機の高頻度騒音を従来からその地域にある環境騒音の一部に含めて、総合的に評価する方法の提案を試みたものである。

本論文によって得られた結論は次のとおりである。

(1) 一般に航空機騒音は、その他の音源から発生する騒音に比べて高周波成分が多く、相対的に著しくやかましいという性質を有するが、本研究のように伝播距離が1 km前後を越える地点では、純音成分と高周波成分の減少によって、PNLとdB(A)の関係が自動車騒音を含まない環境騒音と差がなくなるまで、その性質は著しく弱まる。

(2) 自動車騒音が支配的な環境騒音、それを含まない環境騒音および航空機騒音は、それぞれdB(A)で測定したうえ、PNLを介して相互に換算することができる。したがって、従来からその地域にある環境騒音に含めて、全体として表現することが可能である。

(3) 環境騒音と総合して予測するための航空機騒音の変動特性の計算は、多入力線形システムの出力特性の計算法とランダムシミュレーションを組み合わせた方法により効率的に実行することができる。特に等価騒音レベルの計算はシミュレーションを必要としない。

本研究に際しては財団法人トヨタ財団昭和58年度研究助成を受けた。また、日本放送協会片岡敬二氏(当時東京大学工学部学生)、九州工業大学工学部吉田勇氏およびショーボンド建設若菜和之氏(当時九州工業

大学大学院工学研究科学生)には、調査・計測・データ整理、あるいは数値計算に協力を受けた。付記して深謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) 日本建築学会：騒音の評価法，彰国社，1981.
- 2) カラリー社：フライトインデックス9月号，1980.
- 3) 運輸省航空局：管制方式基準(V)後方乱気流関連管制方式，鳳文書林，1975.
- 4) Taylor, W.J. (ed.): Jane's All the Worlds Aircraft, Jane's, 1981.
- 5) 梅田克彦ほか：新・日本航空機ガイド，酣燈社，1977.
- 6) 山名正夫・中口 博：飛行機設計論，養賢堂，1968.
- 7) 関西空港調査会：航空機騒音予測調査報告書，1980.
- 8) 渡辺義則：交通流変動と騒音伝播特性の場所的な違いを考慮した道路交通騒音の予測，土木学会論文集，第347号/IV-1, pp.127~134, 1984.
- 9) ICAO: Annex 16, Volume 1, Aircraft Noise, First Ed. 1981.
- 10) 運輸省航空局：航空路情報誌，鳳文書林，1982.
- 11) 運輸省航空局：飛行場概論，航空振興財団，1978.
- 12) 建設環境行政研究会：建設環境要覧，中央法規出版，1980.
(1985.6.17・受付)