

報告(Note)

魚眼カメラを用いた航空機飛行経路の把握と航空機騒音の予測

西野 健太郎, 横島 潤紀*, 森 淳一**, 森長 誠***, 山元 一平****

(環境情報部, *調査研究部, **神奈川大学, ***大同大学, ****防衛基盤整備協会)

Measurement of aircraft flight path by camera equipped with fisheye lens and prediction of aircraft noise

Kentaro NISHINO, Shigenori YOKOSHIMA*, Junichi MORI**, Makoto MORINAGA***

and Ippei YAMAMOTO****

(Environmental Information Division, *Research Division, **Kanagawa University,

Daido University, *Defense Structure Improvement Foundation)

キーワード： 航空機騒音 飛行経路 魚眼カメラ 騒音コンター 予測モデル

1 はじめに

環境基本法第 16 条の規定により、都道府県知事は航空機騒音に係る環境基準の類型を当てはめる地域を指定しており、神奈川県では「厚木飛行場の航空機騒音に係る環境基準の類型を当てはめる地域の指定」(昭和 55 年神奈川県告示第 426 号)により厚木飛行場の周辺地域を指定している。地域の指定や見直しを行うためには航空機騒音の大きさを把握する必要があるが、厚木飛行場の場合は神奈川県、相模原市、座間市、海老名市、大和市、綾瀬市、藤沢市及び茅ヶ崎市の各自治体が周辺地域で航空機騒音を常時監視して状況把握に努めている¹⁾。また最近では、東京国際空港(羽田空港)の新飛行経路の運用に伴う航空機騒音を把握するため、神奈川県では令和 2 年度から四半期に 1 回程度、羽田空港の周辺地域で短期測定を実施している²⁾。この短期測定の結果を受けて、「東京国際空港の航空機騒音に係る環境基準の類型を当てはめる地域の指定」(令和 6 年神奈川県告示第 520 号)により、羽田空港の周辺地域も指定した。

航空機騒音を実測により把握するメリットは、測定地点における生の状況を把握できることである。一方、測定にあたっては地点の選定や地点管理者との調整などの準備だけでなく機器の設置・定期点検・撤去などの保守も必要になり、測定地点数が増えるだけ負担も増加する。

航空機騒音の大きさを把握する他の方法として予測モデルを用いる方法がある。実測による方法と異なる特徴は、航空機騒音の状況を面的に把

握することが可能で、推計結果を騒音コンター図で可視化できる点である。また、コンピュータ上で一気に状況を把握できることから現地での実測に比べて少ない労力で済む。さらに、各種条件を自由に設定できるため、例えば飛行場の運用変更が見込まれる場合はそれに応じた「将来における航空機騒音の把握」も可能になる。

吉岡ら³⁾によると、我が国の予測モデルである時間帯別補正等価騒音レベル(L_{den})モデルの計算に必要なデータは、(1)基礎データと(2)予測条件設定データに大別される。(1)基礎データは、航空機から観測点までの距離に対する単発騒音暴露レベル(L_{EA})を機種別・エンジン推力別に記述した「Noise-Power-Distance (NPD) データ」と、航空機の進出距離に対する飛行高度・エンジン推力・飛行速度の関係を機種別・運行形態別・運行重量別に記述した「パフォーマンスデータ」であり、機種別に整備しておけば対象空港が代わっても共通利用が可能である。一方、(2)予測条件設定データは、対象空港の滑走路長、滑走路方向や滑走路ごとの飛行経路、時間帯別離着陸回数等の情報であり、対象空港ごとに設定が必要となる。

先に述べたように、神奈川県では各種飛行場の周辺で実測を行っているが、これまで予測モデルを活用した航空機騒音の面的な把握を行ったことはない。予測モデルが活用できれば業務の幅が広がるだけでなく、実測と組み合わせることで「予測モデルを用いて地域全体の航空機騒音の状況を把握しつつ、住宅密集地や指定地域の境目

となりうる重要な地点は実測で状況を確認する」といった業務の効率化にもつなげられる可能性がある。このようなことを踏まえると、予測に関わる知識を得ることは重要である。

ところで、予測に必要な「(2)予測条件設定データ」のうち飛行経路については、飛行経路を挟む2地点での三角測量の方法や、航空機から発信されるADS-B (Automatic Dependent Surveillance Broadcast) を活用して航空機の位置情報を把握することが可能である。しかし、前者の場合は手作業であるため人手がかかることや測定者ごとの技術の差によるばらつきが発生する恐れがあり、後者については自衛隊機のような防衛上の観点からADS-Bを発信しない航空機は把握することができない。

これらの問題を解決するため、我々は魚眼レンズを搭載したカメラを用いた航空機飛行経路の把握法を確立した⁴⁾。本報では、このカメラを用いて把握した飛行経路を利用して、以下2点の調査研究を行った。

- ①予測モデルを用いた厚木飛行場近傍における航空機騒音の予測
- ②高度別の騒音レベルデータの作成

2 方法

2.1 経路及び騒音の調査地点

2022年5月20日に厚木飛行場北側に隣接する



図1 調査地点と厚木飛行場の位置関係 (国土地理院地図を一部加工)

「大和ふれあいの森」(以下「公園」と記述する。)で航空機の飛行経路の把握調査と騒音測定を実施した。厚木飛行場の滑走路北側端からほぼ真北に位置する公園である。調査当日はタッチアンドゴーの着陸進入経路となっていた。公園と滑走路の位置関係から飛行経路は滑走路延長線上と想定できたため、滑走路延長線を挟む2地点に2.2で説明する魚眼カメラを設置した。また、計測断面(魚眼カメラを設置した2地点を結ぶ断面)と想定経路の交点の直下には騒音計を設置し、着陸進入時の騒音レベルを測定した。なお、調査に当たってはあらかじめ公園管理事務所に調査日時や利用目的等を記載した利用許可申請書を提出し、許可を得たうえで実施した。

2.2 魚眼カメラによる経路の算出方法⁴⁾

魚眼カメラによる経路の算出方法の概要を図2及び図3に示す。まず、航空機の位置情報の把握方法について説明する(図2関係)。カメラレンズの中心座標と画面に投影された航空機の重心の座標との間の距離から仰角 ϕ を、基準方位(真北)のなす角度から方位角 θ をそれぞれ推定している。

続いて、経路の算出について説明する(図3関係)。魚眼カメラを用いた連続的な上空計測と、上述の位置分析により、時々刻々と変化する航空機の方位角 θ 及び仰角 ϕ を求める。この際、2地点

で同時に上空計測を行い(地点 a, 地点 b とする), 時刻情報に基づき対となる位置情報 (θ_a, ϕ_a) 及び (θ_b, ϕ_b) を求める。これらの結果並びに地点 a 及び地点 b の座標 (x_a, y_a, z_a), (x_b, y_b, z_b) を前方交会法の式(1)から(3)に代入し, 航空機の 3 次元座標 (X, Y, h) を算出する。算出した 3 次元座標を結ぶことで経路が描かれる。

$$X = \frac{x_b \tan \theta_b - x_a \tan \theta_a + y_a - y_b}{x_b \tan \theta_b - x_a \tan \theta_a} \quad \text{式(1)}$$

$$Y = (X - x_a) \tan \theta_a + y_a \quad \text{式(2)}$$

$$h = z_a + \sqrt{(X - x_a)^2 + (Y - y_a)^2} \cdot \tan \phi_a \quad \text{式(3)}$$

なお, この方法で計測した飛行経路の精度については, ADS-B の情報から求めた経路と比較してほぼ同等だったことを確認している。

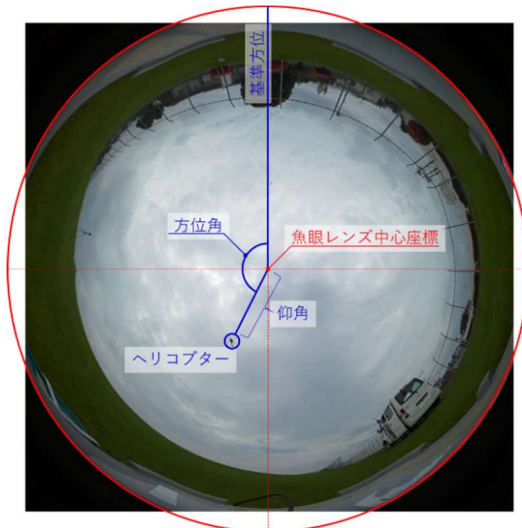


図2 機体位置の求め方

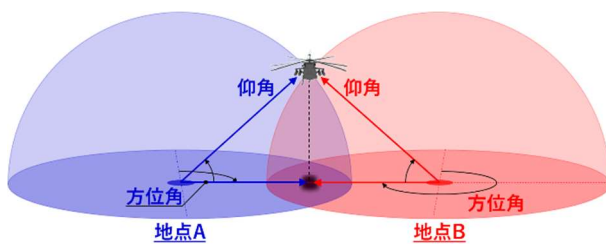


図3 経路算出のイメージ

2. 3 予測モデルを活用した航空機騒音の予測

航空機騒音の予測には, FAA (アメリカ連邦航空局) が開発した「INM」(Integrated Noise Model) のバージョン 7.0 (以下「INM」と言う。) を使用した。INM は航空機騒音を予測するために広く使用されているモデルである。例えば, Bui et al.⁵⁾ は INM を使用して, ベトナムの官民共用空港であるノイバイ国際空港周辺の航空機騒音を予測した。

当空港を離発着する軍用機の NPD データが INM に登録されていないため, 騒音の実測結果をベースとした軍用機の NPD データを作成するとともに, 「軍用機を考慮しない予測 (民間機のみで予測)」, 「民間機+類似軍用機の NPD で代替した予測」, 「民間機+実測をベースとした軍用機の NPD を用いた予測」の 3 ケースで予測し, それぞれの予測結果を実測と比較して予測の精度を確認した。

予測に必要な情報は, 機種の情報と 1 で説明した(2)予測条件設定データ (対象空港の滑走路長, 滑走路方向や滑走路ごとの飛行経路, 時間帯別離着陸回数等の情報等) である。機種を設定すると INM に搭載された基礎データが宛がわれる仕組みとなっている。これらを設定の上, 予測条件 (予測範囲や $L_{A,max}$, L_{eq} , L_{dn} などの評価指標など) を決めて計算を実行し, 結果を騒音コンターとして出力する。予測したい機種の基礎データが INM に搭載されていない場合はオリジナルデータを作成することも可能である。本研究の予測に用いた条件設定については 2.3.1 から 2.3.3 で説明する。

2. 3. 1 機種の特定

調査当日はアメリカ海軍の連絡機「UC-12」が厚木飛行場西側に設定されている場周経路をタッチアンドゴーで周回飛行していることを視認した。INM には「UC-12」と同型機である「C-12」が登録されていたため, この機種を選択した。

2. 3. 2 予測条件設定データの設定

予測条件設定データを表 1 に示す。まず, 飛行場の諸元 (INM の場合, 滑走路幅, 滑走路端の座標 (緯度, 経度, 高度)) は国土交通省が公開する電子航空路誌 (e-AIP)⁶⁾ のデータを活用した。ただし, 一部が未公表となっていたため, これらの情報は GoogleEarth⁷⁾ の公開地図情報で補完した。

続いて, 予測に用いた経路を図 4 に示す。図 4 は縦軸が緯度 (10 進法), 横軸が経度 (10 進法) を表している。約 130 個の座標データ (青及び赤で示した点) がプロットされており, プロットを結ぶことで経路を表現している。本研究では, INM へのデータ入力を簡略化するために代表して赤で示した 6 点の座標データを登録した。なお, INM の仕様上, タッチアンドゴーの飛行形態における航空機騒音の予測を行う場合は, 「経路の始点と終点を滑走路に設定するとともに, 輪にな

るように経路を描く」必要があるが、本調査では滑走路への進入経路のみ把握をしたため、便宜上、「C-12 が 1 回飛行して着陸した」として予測を行った。また、INM で着陸時の予測を行う場合は滑走路に着陸位置の座標を設定する必要があるが、魚眼カメラの視認範囲の限界によりその座標は把握できなかったため、GoogleEarth の公開地図情報を活用した。具体的には、「航空写真」を参照し、着地時に生じるタイヤ痕が集中している箇所に本機も着陸したと想定し、その座標を入力した。

表 1 予測条件設定データ

項目	条件
飛行場標点の座標	35.454722, 139.450000, 205 ft
滑走路の幅	147 ft
滑走路端の座標*	滑走路01 35.443635, 139.450306, 171.5 ft 滑走路19 35.465635, 139.449900, 204.2 ft

注1 座標については、左から緯度 (10進法)、経度 (10進法) 及び標高を表す。

注2 「*」の項目はGoogleEarthの情報を採用したデータである。

2. 3. 3 予測指標

今回は便宜上「C-12 が 1 回飛行して着陸した」としたため、予測指標については「 $L_{A,max}$ 」(最大騒音レベル) を設定した。

2. 4 高度別の騒音レベルデータ

2. 4. 1 騒音測定

航空機騒音の測定には、低周波音測定機能付き精密騒音計 NL-62A (リオン(株)製) を使用し、周波数重み付け特性は A、時間重み付け特性は S、ストロブ間隔は 100 ms とした。また、オプション機能

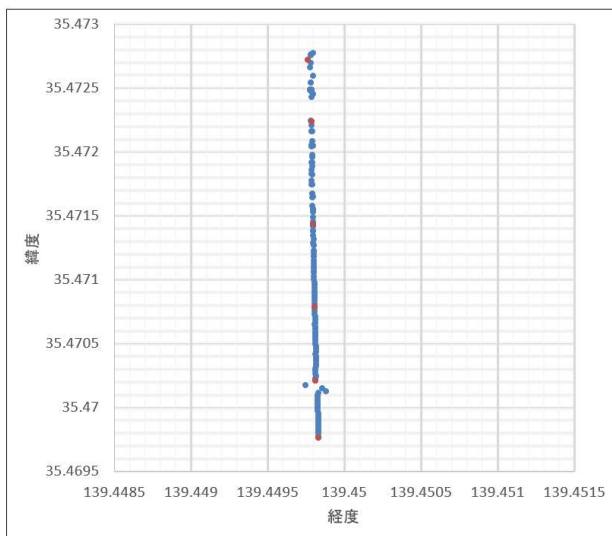


図 4 飛行経路 (緯度-経度)

として当該機器に「オクターブ・1/3 オクターブ実時間分析プログラム NX-62RT」(リオン(株)製) をインストールし、1/3 オクターブバンド中心周波数 1 Hz から 20 kHz までの音圧レベルを記録した。なお、周波数分析における周波数重みづけ特性は Z、時間重みづけ特性は S とした。マイクロホンに全天候型防風スクリーン WS-15 を装着し、地面に直置きした。

2. 4. 2 高度の算出

魚眼カメラで観測した航空機の経路を図 5 に示す。図 5 は縦軸が高度 (単位: m)、横軸が緯度 (10進法) を示す。図 4 を緯度-経度の平面図とするのであれば、図 5 は同データの高度-緯度の立面図にあたる。測定の結果、騒音計が設置されている経路計測断面付近を航空機が通過した時の高度は赤点で示すとおり約 38.8 m だった。

2. 4. 3 高度別騒音レベルの算出

音源から放射された音が長距離を伝わる過程では音波の発散による距離減衰だけでなく空気吸収による減衰も考慮する必要がある。本研究での高度別騒音レベルの算出フローを図 6 に示す。詳細な手順は次のとおりである。

1) 減衰係数 α の算出

空気吸収の計算に必要な減衰係数 α は「JIS Z 8738:1999 屋外の音の伝搬における空気吸収の計算」の方法で求めた。 α の算出には気温、気圧及び相対湿度の 3 種類の気象データが必要になる。ここで、気温と相対湿度のデータは、大気汚染防止法 (昭和 43 年法律第 97 号) 第 22 条に基づく

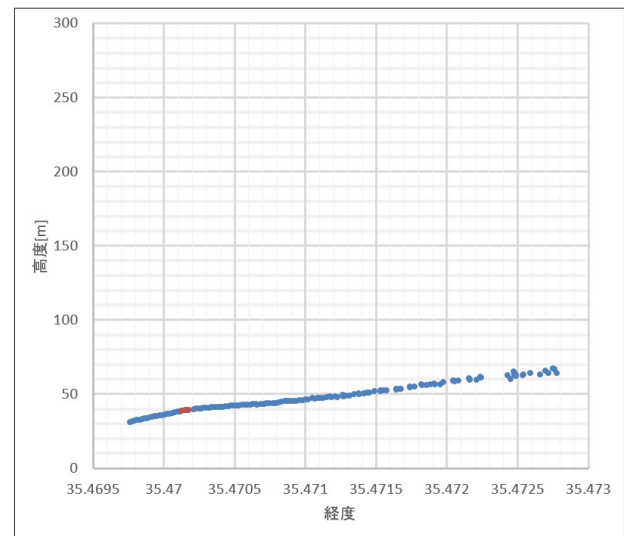


図 5 飛行経路 (高度-緯度)

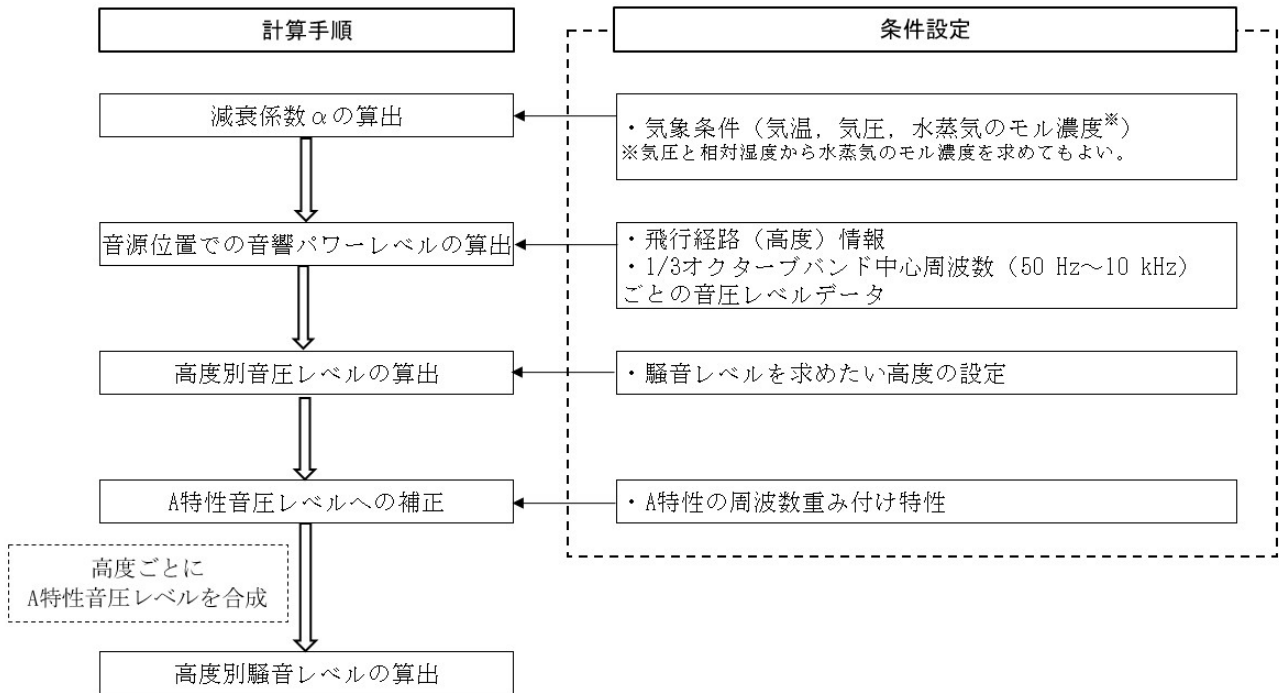


図6 高度別騒音レベルの算出フロー

大気環境の測定が行われている相模原市相模台（相模原市南区相模台）の気象データ⁸⁾を使用した。飛行経路及び音圧レベルのデータは午前10時から午前11時の間に観測されたデータを用いたため、当該測定局の10時時点の気温及び湿度を用いることとした（気温：24.2℃，相対湿度41.2%）。なお、気圧は相模原市相模台では測定されていないため、1気圧（101.325 kPa）として計算した。

α の算出結果を表2に示す。算出結果は有効数字3桁になるように四捨五入し、指数で表示した。

2) 航空機の音響パワーレベルの算出

航空機を点音源とみなし、式(4)により1/3オクターブバンド中心周波数50 Hz～10 kHz別に航空機の音源位置での音響パワーレベルを求めた。

$$L_{w,f} = L_{p,f} + 20 \log_{10} h_s + 11 - (-\alpha \times h_s) \quad \text{式(4)}$$

ここで、

$L_{w,f}$ ：1/3オクターブバンド中心周波数 f における音響パワーレベル[dB]

$L_{p,f}$ ：1/3オクターブバンド中心周波数 f における音圧レベル[dB]

h_s ：上空通過時の航空機の高度[m]
を表す。本研究では $h_s = 38.8$ である。また、計算に用いた $L_{p,f}$ は航空機が上空を通過した際の音圧レベルを用いた。音圧レベルの測定結果を表3に示す。

表2 減衰係数の算出結果

周波数 [Hz]	減衰係数 α [dB/m]	周波数 [Hz]	減衰係数 α [dB/m]
50	8.27.E-05	800	4.43.E-03
63	1.30.E-04	1000	5.26.E-03
80	2.02.E-04	1250	6.39.E-03
100	3.12.E-04	1600	8.03.E-03
125	4.76.E-04	2000	1.05.E-02
160	7.11.E-04	2500	1.44.E-02
200	1.03.E-03	3150	2.05.E-02
250	1.45.E-03	4000	3.01.E-02
315	1.95.E-03	5000	4.51.E-02
400	2.52.E-03	6300	6.86.E-02
500	3.11.E-03	8000	1.05.E-01
630	3.74.E-03	10000	1.61.E-01

表3 音圧レベルの測定結果

周波数 [Hz]	音圧レベル [dB] ($L_{z,Smax}$)	周波数 [Hz]	音圧レベル [dB] ($L_{z,Smax}$)
50	69.5	800	88.1
63	71.7	1000	84.2
80	78.0	1250	79.4
100	91.3	1600	77.3
125	87.4	2000	74.6
160	83.3	2500	71.1
200	86.9	3150	71.4
250	86.3	4000	74.7
315	94.8	5000	77.1
400	91.0	6300	75.7
500	92.0	8000	72.4
630	90.4	10000	70.7

3) 高度別周波数別音圧レベルの算出

式(5)により、1/3オクターブバンド中心周波数50 Hz～10 kHz別に高度ごとの航空機の音圧レベルを求めた。

$$L_{p,f,h} = L_{w,f} - 20 \log_{10} h - 11 + (-\alpha \times h) \quad \text{式(5)}$$

ただし、計算結果が

$L_{p,f,h} < 0$ となる場合は $L_{p,f,h} = 0$ とした。

ここで

$L_{p,f,h}$: 1/3 オクターブバンド中心周波数 f の高度 h における音圧レベル[dB]

h : 航空機の高度[m]

を表す。なお h については、本研究では INM の NPD データと同じ 200 ft (61 m), 400 ft (122 m), 630 ft (192 m), 1,000 ft (305 m), 2,000 ft (610 m), 4,000 ft (1,219 m), 6,300 ft (1,920 m), 10,000 ft (3,048 m), 16,000 ft (4,879 m) 及び 25,000 ft (7,620 m) とした。

4) A 特性音圧レベルへの補正及び高度別騒音レベルの算出

3)で得られた $L_{p,f,h}$ を周波数重み付け特性 A で補正し、A 特性音圧レベルを求めた。ただし、 $L_{p,f,h} = 0$ の場合及び補正結果がマイナス値になる場合、A 特性音圧レベルは 0 dB とした。ここで求めた A 特性音圧レベルを高度ごとに合成することで、高度別騒音レベルのデータを得た。

3 結果及び考察

3. 1 航空機騒音の予測

予測結果をコンター図として出力する際の条件として、最大値は 100 dB, 最低値は 55 dB とし、騒音レベルの範囲を 5 dB ピッチで区切るよう設定した。出力結果を図 7 に示す。縦軸が緯度方向、横軸が経度方向を示しており、図の中心位置に滑走路の中心がある。予測最高値 ($L_{A,max}$) は黄色の領域の 75 dB であり、外側へ離れるにつれて 70 dB, 65 dB, 60 dB, 55 dB と低減していた。また、この予測結果を GIS の広域地図へ投影した結果を図 8 示す。地図中央に厚木飛行場が位置しており、飛行場上の赤い長方形が 2.3.2 で設定した滑走路の図形、北側滑走路端付近から延びる青い線が同じく 2.3.2 で設定した飛行経路の図形、赤色から緑色までの範囲が騒音コンターの図形を示している。調査地点の予測値は最高値である 75 dB だった。一方、調査地点における実測値の最大騒音レベルと比較したところ、実測値が 95.8 dB だったため、約 20 dB と大きく差があった。INM の操作マニュアル⁹⁾を確認したところ、INM は単一イベントの騒音レベルの予測のためには設計され

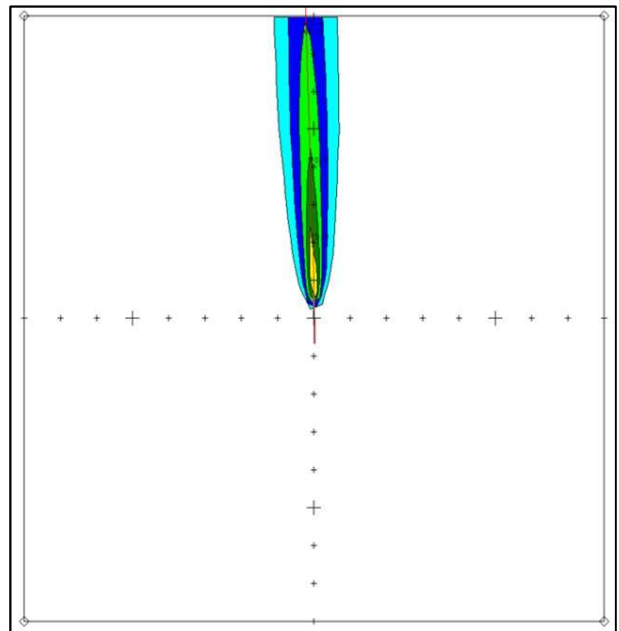


図 7 予測結果 ($L_{A,max}$)

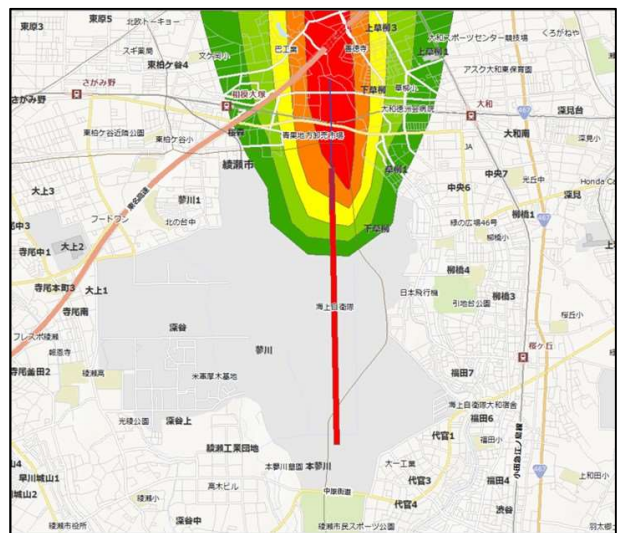


図 8 予測結果 ($L_{A,max}$) (GIS 投影)

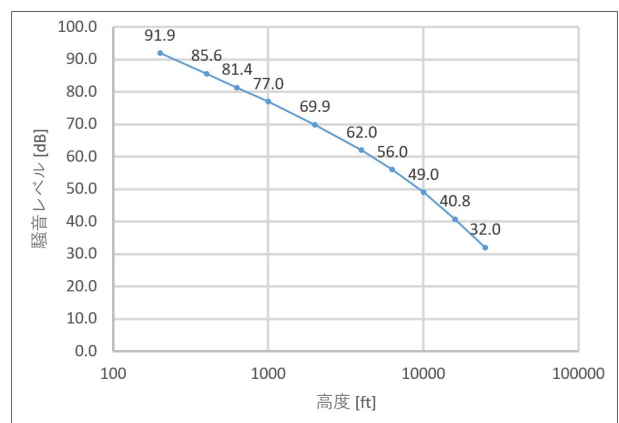


図 9 高度別騒音レベルの算出結果

ておらず、平均的な条件を用いて長期平均の影響を推計するように設計されているとの記述があったため、差が生じた理由は INM の仕様による可能性がある。

なお、予測結果と環境基準を比較する場合は、 L_{den} で予測結果を算出する必要がある。INM には L_{den} を予測する機能はないが、 L_{den} の基となる等価騒音レベル (L_{Aeq}) ベースで予測することは可能である。今回は調査の都合で短時間の測定となったが、年間を通じて平均的な滑走路ごとの飛行経路や時間帯別離着陸回数の情報が機種ごとに得られれば L_{Aeq} ベースで予測することができるため、より実測に近い予測結果が得られると考えられる。

3. 2 高度別騒音レベルの算出結果

高度別騒音レベルの算出結果を図 9 に示す。図 9 は縦軸が騒音レベル、横軸が高度（単位はフィート：ft）を示している。なお、横軸が常用対数を取った片対数グラフである。高度が上昇するにつれて騒音レベルの低減傾向が大きくなっているのは、高音域の影響が小さくなるためである。すなわち、表 2 に示すとおり、周波数が高くなるほど減衰係数が大きいことから空気吸収の影響を受けやすく、伝搬距離が長くなるほど騒音レベルへの寄与が小さくなるためである。

航空機騒音は、高度別騒音レベル、高度及び経路の情報が揃えば予測可能となるため、機種別、運行形態別（離陸、着陸など）に高度別騒音レベルの情報を整備することは非常に重要である。例えば、我々が開発した魚眼レンズ付きカメラなどを使用して航空機の高度と飛行経路を求めれば、実測や予測モデルを使用しなくても航空機騒音を予測できる。また、高度別に単発騒音暴露レベル (L_{EA}) を整備し、高度や飛行経路の他に時間帯別の飛行回数の情報も得られれば、 L_{den} ベースの航空機騒音の予測が可能になる。さらに、高度別騒音データにエンジン出力の情報を付加すれば、予測モデルに欠かせない NPD データの完成となる。

4 まとめ

我々が開発した魚眼カメラを用いて把握した飛行経路と INM を活用して厚木飛行場近傍の航空機騒音の予測を行った。INM の操作を通して予測モデルによる航空機騒音の予測の仕組みや、実

際に予測結果を出力するまでの一連の操作手順を学ぶことができた。ただし、出力した予測結果と実測値には乖離があった。より実態に即した結果を得るためには年間を通じて平均的な滑走路ごとの飛行経路や時間帯別離着陸回数の情報を把握する必要がある。

また、把握した飛行経路と実測した航空機騒音のデータを用いて特定の機種の高高度別騒音レベルを得た。

今回の研究業務で得られた知見や技術を今後の航空機騒音に係る環境行政に生かして行きたい。

参考文献

- 1) 西野健太郎, 横島潤紀, 筒井洋介, 厚木海軍飛行場周辺地域における航空機騒音の推移, 神奈川県環境科学センター研究報告, 43(1), 37-44
- 2) 神奈川県: 羽田空港の新飛行経路の飛行に伴う航空機騒音モニタリングについて, https://www.pref.kanagawa.jp/docs/pf7/kotsu/koukuki_haneda.html (参照: 2024, 9)
- 3) 吉岡 序, 篠原 直明: 航空機騒音予測の過去から現在, 航空環境研究, 21, 80-85(2017)
- 4) J. Mori, M. Morinaga, T. Asakura, T. Tsuchiya, I. Yamamoto, K. Nishino, S. Yokoshima: Three-dimensional positioning for aircraft using IoT devices equipped with a fish-eye camera, sensors, 23(22), 9108(2023)
- 5) T. L. Bui, T. L. Nguyen, M. Morinaga, T. Morihara, Y. Hiraguri: Effect of measurement-based noise source model of military airplanes on the validity of aircraft noise estimation in Vietnam, *Acoust. Sci & Tech*, 42, 50-57(2021)
- 6) 国土交通省: AIS JAPAN, <https://aisjapan.mlit.go.jp/Login.do> (参照: 2024.9)
- 7) Google: Google Earth, <https://www.google.com/intl/ja/earth/about/> (参照: 2024.9)
- 8) 神奈川県: 月報データ (速報値), <https://www.pref.kanagawa.jp/sys/taikikanshi/kanshi/download/index.html> (参照: 2024.9)
- 9) Federal Aviation Administration, Office of Environment and Energy: Integrated Noise Model (INM) Version 7.0 User's Guide, 13