

第二部

騒音の屋外伝搬における変動

第1章 騒音のレベル変動の測定

1. 1 はじめに

屋外を伝わる音は地面の音響特性や気象の影響を受けて変化する。その性状についてすでに多くの理論や実験による研究があり[1~4]、条件を限れば伝搬による騒音の減衰を計算することも可能である。しかし、そのような形で個々の要因の影響を積み上げていく方法だけでは飛行場周辺の騒音問題の対策に資するべく騒音を評価するには不十分であり、もっとマクロな観点に立って長期間の平均的な騒音暴露を推定する必要がある。騒音予測コンターの作成や自動監視はそのような目的で行われる。本章ではこれらを念頭において屋外で騒音測定する際に地面反射や気象がもたらす影響を実験的に調べた結果を示す。

屋外伝搬の性状を決める主な要因は発生源の種類や伝搬距離、伝搬経路等で異なる。道路や鉄道の騒音では音源の位置が地面近傍にあり、音源パワーが大きくないので騒音の影響が及ぶ範囲は音源から数百mであるが、地面と気象条件のいずれも重要な要因となる。演習場における砲撃や採石場の発破等による爆発音の場合には音源パワーが極めて大きく、しかも音源の近傍に住家がないので数~十数kmという非常に遠く離れたところへの伝搬が問題になる。この場合は地面の影響より気象による騒音レベルの変動が重要な問題となる。これら地上にある発生源に対して航空機騒音は上空を飛行する際の騒音が地上に聞こえて問題となることが多く、音源パワーも大きい。ただし、騒音が問題になる範囲は音源から数百m~数kmで前記二種類の地上騒音の中間である。

屋外伝搬を伝搬経路の違いで次の3通りに分けることができる(図1-1参照)。

- Air-to-Air (ATA) ; 発生源も受音点も自由空間に近い条件にある
- Air-to-Ground (ATG) ; 発生源は自由空間に近いが受音点は地面の近くにある
- Ground-to-Air (GTA) ; 発生源は地面の近くにあり、受音点は自由空間にある
- Ground-to-Ground (GTG) ; 発生源も受音点も地面の近くにある

ATAは発生源も受音点も地面から離れていて、その影響を無視できる場合である。しかし、騒音が問題になるのは地上付近であり、ATAの条件に該当する場合は少ない。航空機騒音の場合、上空を飛行中の騒音が地上にもたらす影響が最も深刻であり、ATGの騒音伝搬が重要であるが、地上の運用に伴うGTG騒音が問題となることも少なくない。

第一部第4章の機種識別で騒音から特徴パラメータを抽出する際にA特性騒音レベルのピーク値で相対化した。これはエンジン出力の変化や飛行経路のばらつきによるレベル変化を取り除いて安定なパラメータを抽出するためのものであった。そのうち、飛行経路のばらつきによるレベル変化には地面反射の変化が影響している。そこでまず、1. 2節ではATGで観測した航空機騒音のデータから測定条件の違いによるピーク騒音レベルの平均値の違いやばらつきの大きさを調べた結果を述べる。また、航空機が地上で発生する騒音を利用して地面に沿って長い距離を伝搬する際のレベル変動を調べた結果を述べる。この1. 2節は数〜数十分に1回の割合で観測される騒音レベルのばらつきを数時間から数日にわたって調べた結果である。それに対して、1. 3〜1. 4節ではGTGで行った屋外伝搬実験や模型実験の結果から気象による騒音レベルの変動を調べた結果を述べる。こちらは数分間のレベル変動の大きさが数〜数時間のあいだに変化する様子を調べたものである。1. 2節で述べた結果にも当然このような短時間のあいだの変動が含まれていることを考えれば重要な問題である。観測される航空機騒音に地面反射の影響によるレベル変動が含まれることを動機として、ATGで観測される騒音から地面の音響特性を推定し、さらに自由音場スペクトルを推定する手法を考案し、検討した結果を第2章で述べる。

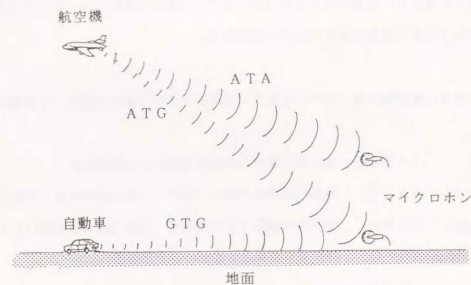


図1-1 屋外騒音伝搬の発生源と伝搬経路の違い

1. 2 屋外で観測される航空機騒音のレベル変動

1. 2. 1 地面反射によるピーク騒音レベルのばらつき

測定の方法は対象とする事象や達成すべき測定精度、事象と測定者(測定器)の関係等によって適切な手順が異なる。本論文で扱う航空機騒音の測定は騒音のうるささを評価することを目的とするものであるため、測定の方法は環境基準[5]や航空機騒音監視測定マニュアル[6]に準拠することが基本となる。それらによれば、騒音測定は地域を代表する屋外の場所で周囲に障害となる建物等がない平坦なところで行い、マイクロホンは設置面から1. 2〜1. 5 mの高さに持ち上げて置くことになっている。騒音のうるささを評価するので人間の耳の高さで観測するように意図している。騒音計の周波数補正はA特性、平滑回路の動特性はSLOW(時定数1. 0 s)である[7]。

地面の上にマイクロホンを持ち上げて航空機騒音を観測すると必ず地面反射が入る。第一部で述べた相関法による音源同定でも機種識別でも地面反射の影響を低減することが重要であった。上述の通り、騒音レベルの測定はマイクロホンを持ち上げて測定することが基本であるため、地面反射は加わるべきものではあるが、その影響は設置面の反射特性、音源とマイクロホン、設置面の位置関係、騒音のスペクトル、気象条件によって変化する。設置面の反射特性は地面の種類(舗装面、土など)や状態(凹凸や傾き、草生えの様子や、降雨降雪の有無)によって異なる。上空を飛行する航空機の場合、道路や線路を移動する自動車や列車と異なり、音源の移動につれてマイクロホンへ入射する直接音と設置面反射音の位相関係が変わるため、干渉の状況が刻々変化し、観測される騒音の性状も変化する。航空機の飛行経路も個々にばらつき、変化は一様ではない。しかも、干渉の影響の程度は騒音のスペクトルに依存するため、航空機の機種や飛行形態によって異なる(プロペラ機やヘリコプタのように周期性の強いスペクトルの場合に一段と顕著になる)。ここでは、観測される航空機騒音のピーク騒音レベルがマイクロホン設置条件や設置面の違い、飛行経路のばらつきでどの程度変動するかを飛行経路の直下付近で測定した結果を述べる[8]。観測される航空機騒音から設置面の反射特性を推定し、その影響を除去する方法については第2章で記述する。

測定は第一部第4章4.2.3節で述べた新東京国際空港における識別実験のために飛行場内で行ったものである。マイクロホンの設置場所は滑走路延長上のミドルマーカーのところである。測定点周辺の地面は平坦で、固めの土に若干の芝が生えている。周囲に大きな反射物はない。マイクロホンは4本で、図1-2のように配置した。 M_1 は地面に直に置いた。 M_2 と M_3 は M_1 の直上、地面から1.2mと1.3mの高さに設置した。残りの1本 M_4 は、直径80cmの円板(厚さ24mmのベニヤ板の上に厚さ0.5mmの塩化ビニールのシートを重ねたもの)を地面に水平に置いて、その上から下向きに設置した。マイクロホンの膜面と円板表面のあいだの隙間は10mm弱である。第一部で述べた通り、 M_4 はinverted microphoneと呼ばれる設置である。マイクロホンには騒音計を使用した。自由音場型であり、正面入射時が一番平坦な周波数特性を持つ。航空機の飛行によって音の入射方向が変化するため常に正面から入射するようにはできないが、航空機騒音の主要スペクトル成分の周波数範囲である5kHz以下の指向性は小さく、正面を中心に±60度の範囲で高々1.0dBであり、騒音レベルを検出する上で指向性を無視して差支えない。

測定は3日間にわたって行い、141機のデータを得た。離着陸の向きが変り、離陸と着陸のデータを得た。着陸は計器着陸方式で行われるため、飛行経路は極めて安定しており、ばらつきは小さい。測定点での高度は50~60mである。離陸は数百mの高度に上昇しており、着陸に比べて飛行経路のばらつきは大きい。なお、1日目は途中から雨になり、地面は乾燥した状態から十分に水を含んだ状態まで変化した。騒音は全てジェット旅客機のもので広い周波数範囲にわたってなだらかなスペクトルを持つので反射の影響ではプロペラ機のような大幅な騒音レベルの変化は起こらない。測定は騒音計の周波数補正特性を平坦にしてデータレコーダに録音する形で行った。持ち返って再生し、またはCの周波数補正をしてレベルレコーダに記録してピーク騒音レベルを目視で読み取った。値は二捨三入して0.5dBの整数倍の値に丸めた。なお、読み取りをチェックするため、一部のデータについては実時間周波数分析器を使って自動的に算出する方法でも処理を行った。読み取ったデータは地上のマイクロホン M_1 と M_4 の結果を基準に相対値化した上で度数分布にまとめた。度数分布のクラス間隔は読み取りの場合は0.5dB、実時間周波数分析器による自動処理の場合は0.1dBである。得られた離陸および着陸の騒音の度数分布を図1-3(1)~(2)に示す。図の最上段は実時間周波数分析器で処理した結果であり、その他は目視の結果である。同一条件では両者に大きな違いは見られなかった。度数分布

から計算した平均値と標準偏差を図中にも記してあるが、表1-1にまとめて一覧する。まず、度数分布の平均値について考察する。地面に直に置いた M_1 と円板上の M_4 の差はC特性では高々1dBと小さいが、A特性は3dB前後と大きい。低い周波数では円板も地面も音響的に固いが、A特性騒音レベルを決める1kHz前後の高い周波数では地面は音響的に柔らかいためであると考えられる。航空機騒音が低域に大きな成分を持つことも原因の1つであると思われる。地面から持ち上げた M_2 と M_3 の結果を音響的に固い円板の上の M_4 の結果と比べるとA特性もC特性ともに3dBほど低い。しかし、地面に置いた M_1 と比べるとC特性では依然として差があるのに対して、A特性は差が1dB以下になっている。言い換えると音響的に固くない地面の上ではマイクロホンを持ち上げて地面に置いてもピーク騒音レベルを測る上で違いは小さいが、音響的に固い面上では違いを無視できない。なお、この傾向は離陸と着陸で程度が少し異なる。これはターボファンジェット旅客機の騒音スペクトルが離陸では低域周波数が大きく、着陸では高域が大きいためである。高い周波数ほど地面反射特性が小さくなることも離着陸の差に寄与していると推測される。

次に、度数分布のばらつきについて考察する。データは全てターボファンジェット機のものだが、機種による騒音レベルの違いがあるため単純に比較はできず、度数分布からマイクロホン間のレベル差のばらつきを見た。ばらつきの標準偏差は概ね1.0dB以下であったが、滑走路近傍の結果であることを考えると無視できないものである。着陸よりも離陸のばらつきが大きい。すでに述べたように、離陸は着陸に比べて高度が大きく、飛行経路側方へずれることがあるためと考えられる。

以上、わずか3日間の測定データを見てもわかるように、マイクロホンの設置環境や飛行経路のばらつきにより地面反射の影響が変化し、測定されるピーク騒音レベルは変化する。従って、騒音測定から予測計算との比較検証に足る資料データを導出するには長期間にわたって多くの観測データを取得し、平均化する必要がある。それには自動監視装置を設置して行う通年測定と測定員を配置して行う短期測定を併用することが望ましい[9]。

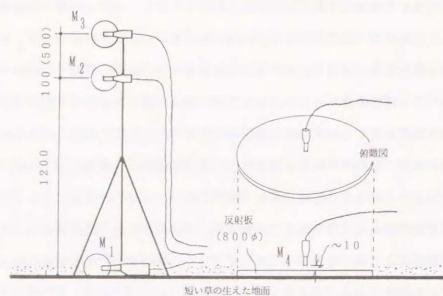


図1-2 地面反射によるピーク騒音レベルのばらつきのためのマイクロホン配置

表1-1 ATGで観測した航空機騒音のピークレベルの差の変動

デブ	実時間周波数分析機	目視による読取り					
		$M_4 - M_2$	$M_4 - M_3$	$M_4 - M_1$	$M_1 - M_2$	$M_1 - M_3$	
A特性	94	3.18	3.0	3.0	2.3	0.7	0.6
	離陸	0.72	0.7	0.8	1.2	0.9	0.8
A特性	47	3.66	3.8	3.7	3.7	0.1	0.0
	着陸	0.37	0.5	0.4	0.8	0.7	0.7
C特性	94	3.22	3.0	3.0	0.3	2.7	2.7
	離陸	0.69	0.7	0.9	0.7	0.6	0.6
C特性	47	3.43	3.0	2.9	1.1	1.8	1.7
	着陸	0.40	0.4	0.3	1.0	0.9	0.9

(注1) 各欄とも上段は平均値、下段は平均値のまわりのばらつき標準偏差

(注2) 第1列の $M_4 - M_2$ は実時間周波数分析機によって自動で読み取ったマイクロホン M_4 と M_2 の観測値の差の平均値と標準偏差

(注3) 第2～6列の各欄はレベル記録を目視で読み取った結果による各々のマイクロホンの観測値の差の平均値と標準偏差

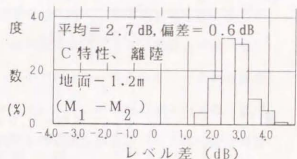
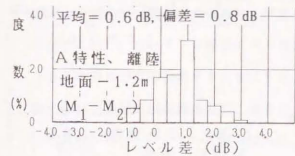
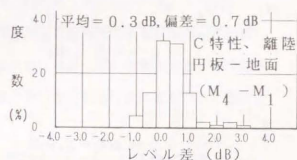
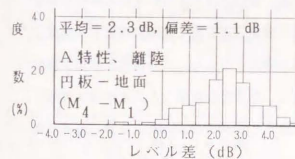
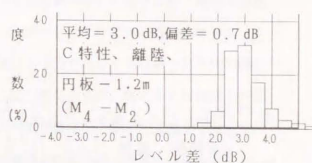
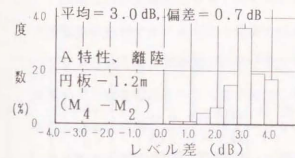
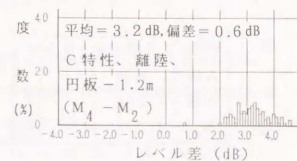
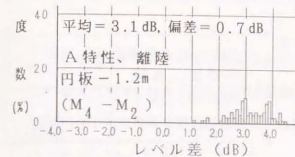


図1-3 (1) 航空機騒音のピーク騒音レベルの度数分布；離陸騒音

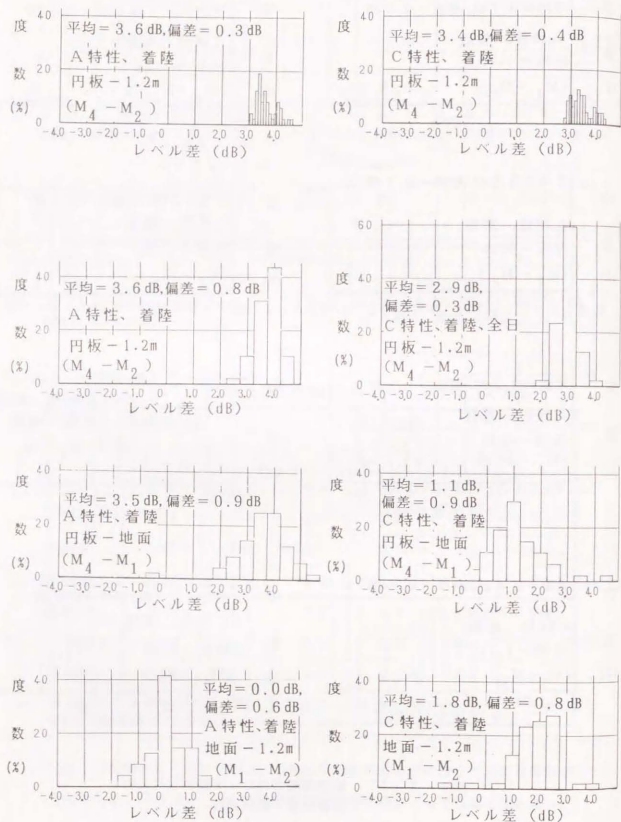


図1-3(2) 航空機騒音のピーク騒音レベルの
度数分布; 着陸騒音

1. 2. 2 航空機による地上騒音の観測値のばらつき

ここでは航空機が離陸の際に地上で出す騒音のレベルを測定した結果を述べる[10]。この騒音は地面に沿ってGTGの状態で伝わり、前節のATGの測定結果と合わせると、空港周辺で航空機騒音が観測される状況を網羅したことになる。

次節で断続試験音とラウドスピーカを用いた屋外実験の結果を述べるが、場所の制限や暗騒音の影響で高々400m程度の距離までしか調べられていない。飛行場にジェットエンジンを据え付けて距離1kmまで測定した実験[11, 12]と同じく飛行場でM系列相関法を用いて2kmを越えるところまで測定した実験[13]の例もあるが、同じような規模の実験を行う機会は容易に得られるものではない。そこで航空機が飛行場から離陸する際に地上(滑走路端)で発生する音に着目して周辺地域で騒音レベルを調べて見ることを考えた。戦闘機が滑走路上の定められた位置(100mほどの区間)をめがけてタッチアンドゴー(着地して直ちに離陸上昇する)を繰り返す特殊な飛行形態を利用するもので、常に同じ位置で着地と同時にエンジン出力を最大に上げるため、ほぼ一定の音響出力と一定の向きで騒音が放射される。厳密に言えば、音源の移動に伴うため固定位置に音源がある場合と異なるが、概略の傾向はつかめると考えた。

滑走路端から後方(真後ろから30°位の範囲)に距離の異なるpt.2~pt.6の5つの測定点を選んだ(図1-4参照)。測定は、3日間にわたって、暗騒音の低い夕方から夜に掛けて行い、合計170機程のデータを得た。測定時の気温は20℃前後、風速は地上10mの高さで音の伝播する向きに5~10m/s以下であった。得られたデータから観測数の多い2種類の戦闘機を選び、録音データをオクターブバンド分析してバンド毎に該当する区間からピークレベルを読み取った。その結果を測定点毎およびバンド毎に統計処理してピークレベルのばらつきの標準偏差と音源からの水平距離の関係として描いたものが図1-5である。(a)はA6の結果(データ数は各測定点45機前後)でどのバンドも距離とともに標準偏差は大きくなるが、測定点pt.3付近から頭打ちになっている。つまり、伝播する距離が2kmを越えてもピークレベルのばらつきの標準偏差は3~4dBにとどまり、大きくなる(本章ではこれをレベル変動の「飽和」と記す)。なお、測定点pt.5では再び標準偏差が小さくなっているが、これは暗騒音の影響をうけているためと考えられる。

(b) はA7の結果(データ数は各測定点2.5機前後)で、この場合はpt.5だけでなく、pt.4でも標準偏差が小さくなっている。これはA7の方がA6より音源パワーが小さく、さらに距離の短いところから暗騒音の影響を受けているためと思われる。(c) はA特性騒音レベルのピーク値のレベル変動のばらつきを標準偏差を算出した結果である。ただし、伝搬距離によってA特性騒音レベルのピーク値に寄与する周波数成分が変化する(空中を伝搬する音が空気吸収で減衰する程度は周波数により異なる)ため、A特性騒音レベルのばらつきを詳細に論じてあまり意味はない。

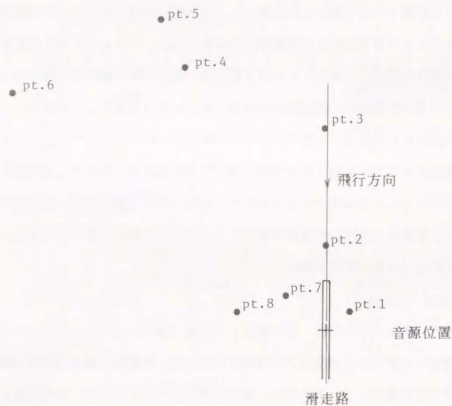
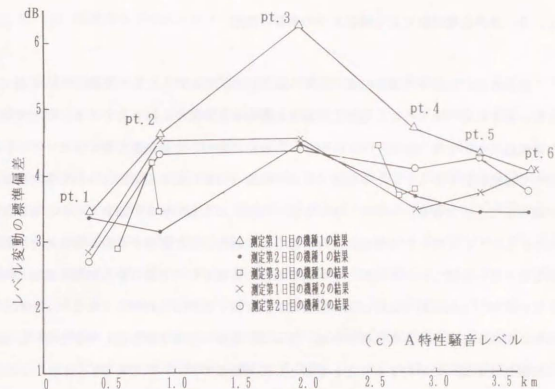
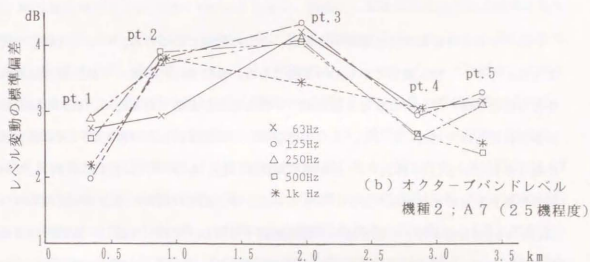


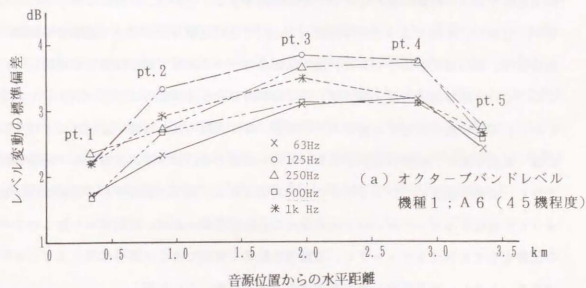
図1-4 測定点の配置と滑走路との位置関係



(c) A特性騒音レベル



(b) オクターブバンドレベル
機種2; A7 (2.5機程度)



(a) オクターブバンドレベル
機種1; A6 (4.5機程度)

図1-5 離陸時の航空機騒音レベルの距離によるばらつき

1. 3 屋外伝搬実験による騒音レベル変動の測定

気象変動が地面上の騒音伝搬 (G T G および A T G) にもたらす影響について調べた。本章の最初に述べたように、地面上の騒音伝搬の研究は数多く行われている。平坦で均一な地表面については local reaction などの仮定に基づいて地表面音響インピーダンスを使って理論計算できるし、上空気象 (風速や気温の勾配) による屈折についても音線理論で調べることができる。大気ゆらぎや地面の凹凸による音の散乱や減衰についても研究がある。しかし、これらの各要因は同時に複合的に騒音伝搬に影響するのが常であり、理論的な取り扱いには難しい。長期間の平均騒音暴露の評価が目的であるから気温や風速の勾配がない状態 (neutral condition) を想定すれば良いと考えられがちであるが、それらが同時に実現することは実際は稀である。従って、実際の環境で繰り返し実験を行い、騒音の伝搬性状を調べて平均することが依然として重要なアプローチである。

屋外で騒音の伝搬特性を測定する場合、2つの困難にぶつかる。一つは暗騒音の混入であり、もう一つは伝搬音そのもの変動である。暗騒音に打ち勝って長距離の伝搬実験を行うには音響パワーの大きな音源と広い平坦な場所が必要であるため、過去の研究報告は限られたものである [11, 12]。この困難を解決して簡便に伝搬特性を調べる方法が幾つか報告されている [13~16]。一つは M 系列相関法 [13]、もう一つは同期積分法 [16] である両者の測定原理の記述は異なるが、後者の方法が導く結果は前者の方法で M 系列の代りに duty ratio 50% の方形波を使って振幅変調・放射し、受音・復調して変調信号と相互相関関数を取った結果の遅れ時間 0 の値に相当することから、本質的に異なるものではない。しかし、本節で述べる屋外実験 [17~29] では同期積分法によって試験音を断続して放射した。理由は次の通りである。屋外伝搬の今一つの困難である伝搬音の変動について、この二つの手法は測定時間 (数分間) の平均伝搬特性を求めるという形で解決している。しかし、屋外伝搬を左右する要因のうち気象、特に大気の乱れは遅い変化だけでなく非常に速い変動もあり、伝搬音は数分のあいだにも変動する。従って、伝搬音の平均特性だけでなく、変動の程度についても知ることが大切である。屋外で観測される暗騒音は比較的ゆっくり変化するものが多いので同期積分の試験音断続の都度、試験音有り無しのレベルの比較をして SN 比をチェックし、暗騒音の影響を無視できない部分は捨てることが可能である。しかし、M 系列法は断続が不規則であるため、これが難しい。

1. 3. 1 実験および分析の方法

実験は平坦なグラウンドや造成地など多数の場所で行った。音源はラウドスピーカで、一定の大きさのピンクノイズを断続的に放射した。ラウドスピーカを使用して放射できる音響パワーには限界があり、帯域制限をして音を出す方が得であるにも関わらず、ピンクノイズを使用したのは長い時間にわたって連続で広い周波数範囲の観測を行うためである。受音点側の測定には騒音計を用いた。騒音計の周波数補正特性は平坦または C 特性とし、観測される騒音を断続の同期信号とともに 1~2 台の 8 チャンネルデータレコーダに FM 録音した。観測点の数は 5~16 点、音源から観測点までの距離は 2~400 m、音源の高さは 0.5~1.0 m、受音点の高さは 0.5~1.0 m (1 m が多い) であった。測定中は超音波風速計を伝搬経路の中ほどに据えて風向と風速の変化を連続記録するとともに気温と湿度も計測した。実験は様々な季節に繰り返し行った。1 回の測定はおよそ 5 分間で、繰り返し周期 4 s、duty ratio 50% で、断続的に試験音を放射した。観測されたデータは 1/1 オクターブバンドパスフィルタ (中心周波数 250~4 kHz) に通した後で、二乗平滑 (FAST; 時定数 0.1 s) と対数変換を行い、サンプリング間隔 0.1 s で 2048 または 2560 個 (およそ 3 分間半~4 分間) のデータを計算機に取り込んだ。断続の同期信号を基準に HIGH (試験音+暗騒音) と L0 (暗騒音のみ) の区間に分類し、音の伝搬時間を考慮して断続による過渡的な部分を取り除き、残ったデータ (HIGH と L0) をそれぞれ 750~900 個を使って、(1) 同期積分法で HIGH と L0、それぞれの区間のパワー平均を計算して差を取って伝搬による減衰特性を定める処理と、(2) 試験音のレベル変動の大きさ (標準偏差) を求める処理の 2 通りのデータ処理を行った。混入する暗騒音に交通騒音などの非定常な音が含まれるため厳密ではないが、平均の SN 比は概ね十分で 750~900 個のデータによる (1) の平均特性の推定精度は ± 0.5 dB 以内に収まっているものと考えられる [16]。(2) については HIGH と L0 の区間のレベルの差を見て SN 比が十分であることを確認した上で HIGH 区間のデータを用いて計算した。SN 比の良くないものについて音を断続する毎に HIGH と L0 の区間のパワーの差を取って暗騒音の影響を低減するやり方を試みたが [10]、必ずしも良い結果に結び付かなかった。

1. 3. 2 実験結果と考察

ここでは伝搬特性の平均とばらつきが大きさが気象条件とともに距離、周波数、時間帯によってどう変わるかを調べた結果を述べ、騒音が伝搬する際に様々な時間スケールのレベル変動が生じ、その影響を考慮することが長期間平均の騒音評価に重要であることを示す。なお、音源の直前2mの位置でのレベル変動の大きさは、前述のデータ整理の仕方によって、バンドや時間帯などによらず常に安定で、標準偏差で0.5dB以内に収まった(図1-8または図1-10参照)。

図1-6は初夏に造成地で行った屋外伝搬実験(1)の音源やマイクロホンの配置を示す。場所は南北1km、東西500mの建設予定地で、概ね平坦で短い草が生えていた。測定系は東西方向に配置したが、音源から400mでは背後から交通の騒音影響があった。マイクロホンの高さは基本的に1mとし、ラウドスピーカーの幾何中心と高さを揃えた。ただし、距離80mのところでは地面から5mと10mの高さにもマイクロホンを置いた。測定は24時間にわたり、2時間毎に繰り返した。図1-7はそのデータを処理した結果である。図の(a)~(e)は250~4kHzのオクターブバンドの平均伝搬特性の変化を音源の直前(スピーカーから2mの地点)のレベルを基準に相対値化して描いたものである。(f)は気温と風向・風速の変化を示す。気温は地面と地面から上に2mと3mの点で測った。風向・風速は超音波風速計によって地上3.5mで測ったものである。音源パワーがわずかに100dB程度であったため、低周波数バンド(250~500Hz)は距離の長いところ(240~400m)でSN比が悪く、良いデータは得られなかった。図を一見して、伝搬による減衰の大きさが球面波拡散による逆二乗則よりも大きいこと、距離80mあたりから伝搬による減衰は時間とともに大きく変動すること、周波数が高い方が変動が大きいことが分かる。さらに、2~4kHzのバンドでは気温勾配がneutralに近い夕方と早朝の減衰が小さいが、その変化のパターンはベクトル風速(音源と受音点を結ぶ方向の風速成分)の変化と似ている。ただし、ベクトル風速は順風になっているが、極くわずかである。深夜(22時~4時)は気温勾配がinversionであるもののベクトル風速が負で逆風の条件になっているためか、2~4kHzの伝搬減衰は大きな値になっている。ただし、1kHzより下のバンドでは逆に減衰が小さくなっている時間もある。このように、地面近傍を伝わるGTG伝搬音の特性は気温と風の相互作用で非常に複雑な変動を示すが、

地面から離れると事情は異なる。80m地点における地面から5mと10mの高さの結果は高さ1mの結果に比べて減衰は小さいしレベル変動も非常に少ない。音源からマイクロホンを見る仰角の差は3°(5m)と6.5°(10m)とわずかであるが、GTGからGTAに変わる影響が大きいと見ることができる。

レベル変動の標準偏差を整理した結果を述べる。図1-8(a)は図1-7の実験の結果に秋から冬にかけて田んぼで行った別の実験(2)の結果を加えて距離と標準偏差の関係をプロットしたものである。図には2つの実験結果がマークを変えて示してある他、それぞれの平均カーブも描いてある。幾つもの時間帯や季節が含まれているにも拘らず、2つの実験結果は同じような傾向を示している、すなわち、レベル変動の標準偏差は距離とともに増大するが、200m前後から増加が鈍り、やがて飽和する。飽和時の標準偏差は3~4dBである。データの中には気温勾配がlapseの場合やinversionの状態の結果も含まれており、飽和現象を単純にshadow zoneなどと結び付けて解釈することはできない。なお、図中に注記してあるように、深夜のデータだけだと距離に対するばらつきが増加が小さく距離240mでも飽和に至っていない。前節の夕方から夜間に掛けて航空機の地上音で調べたピーク騒音レベルの変動も距離1kmでは飽和していない。図1-7より、この深夜の時間帯の2~4kHzの平均減衰が大きいことも考え合わせると、大気ゆらぎの影響は平均の気温勾配や風速から単純に推し量ることができないと思われる。

図1-8(b)と(c)は周波数および風速をパラメータにして実験(1)の80m地点の3つの高さのレベル変動の標準偏差をプロットしたものである。まず、(b)より、距離12.5mではどの周波数でも標準偏差は1dB以下であり、試験音がもともと持っている変動幅と変わらない。しかし、距離がこれより大きくなるにつれて、高い周波数から次第に標準偏差は大きくなっていく。距離が100mを越えると、全周波数でばらつきが増加している。周波数に対する標準偏差の増加割合は大雑把に見れば1オクターブ当たり0.5dB程度である。ここで注意しておきたいことは、(a)より明らかなように、距離が200mを越えると、1~4kHzで距離に関してばらつきが飽和しているにも関わらず、周波数に対しては標準偏差は増加の一途で、飽和の傾向が見られないことである。これは大気ゆらぎに非常に大きなスケールからマイクロスケールのものまで幅広い種類のものがあることを示唆していると考えられる。

(c)より風速とばらつきを見ても、風速の絶対値とともにばらつきが増えていく。ベクトル風速との関係については、実験(4)で確かめた結果とともに後に示す。なお、(c)では風速が3m/sを超えたあたりからばらつきが飽和する傾向を示しているようにも見えるが、マイクロホンの高さによって異なり、地上1mではまだ増加している。深夜のデータで風速2m/sの時に標準偏差が1dB以下にとどまっていることも考えると、音のレベル変動に対する風の影響は風速だけでは決まらず、別何等かの乱れのスケールを尺度として眺める必要があると思われる。

さらに2つの異なる実験結果を示す。まず、図1-9のように、広さ約150m²の草の生えたグラウンドにマイクロホンを配置して(高さ0.4mと1.0m)、真夏の暑い日に2回(午後と日没後)伝搬測定の実験(3)を行った。暗騒音が小さくSN比が良いことを確認して試験音を3分連続放射したが、レベル変動の標準偏差は試験音断続の場合と同じ時間の長さのデータから算出した。周波数バンドは250~8kHzである。その結果は図1-10に示してある。(a)と(b)より、日照時は距離がわずかに20mでも、周波数4~8kHzのバンドでは大きなレベル変動が見られ、飽和する傾向にある。マイクロホンの高さによる顕著な傾向は見られない。周波数に対する標準偏差の増加割合は図1-8(b)の場合と大きく変わらない。一方、日没後の(c)と(d)では周波数に対する標準偏差の増加は40mと80mの地上0.4mを除き、鈍っている。これらについても距離20mの標準偏差は小さくなっており、飽和の傾向は減少している。陽炎を想像すれば分かるように、高い周波数のレベル変動は日照に大きく左右される。

図1-11と図1-12は音源の周りの円周上にマイクロホンを配置して伝搬実験を行った結果である。マイクロホンは等間隔に配置し、8チャンネルデータレコーダ2台に録音した。音源は指向性を無くするため、ホーンスピーカーを地面に向けて音を放射した。伝搬距離が40mだったため、低い周波数ではばらつきも小さく顕著な傾向は見られない。しかし、4kHzでは順風(ベクトル風速が正)の時に平均的減衰は小さく、レベル変動は大きい。逆風(ベクトル風速が負)では平均的減衰は大きく、レベル変動は幾らか小さい。ここで実験(1)の結果を振り返ると、図1-7と図1-8で、深夜に気温がinversion、風は逆風となっている時に平均的減衰は大きくレベル変動の標準偏差が小さくなっていったことと図1-12の結果は符合しており、風がレベル変動を運ぶ姿が想像される。

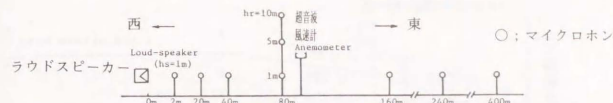


図1-6 屋外伝搬実験(1)の音源とマイクロホンの配置

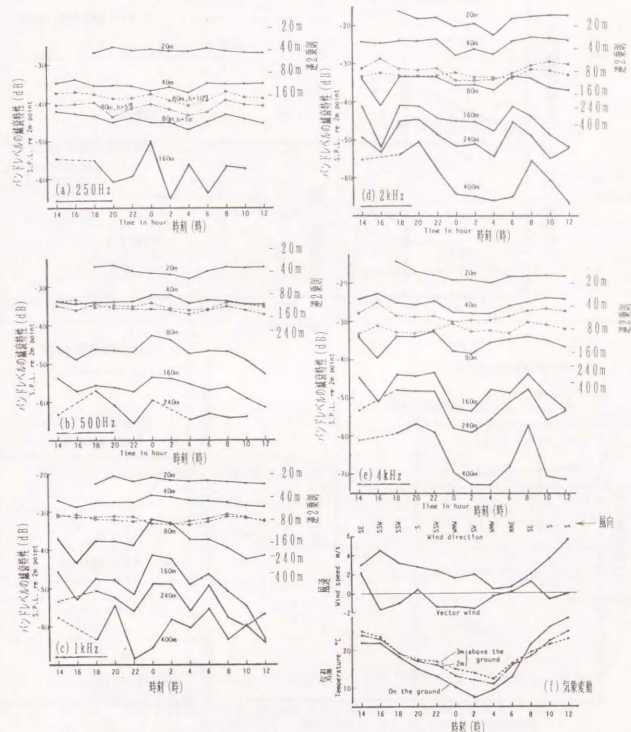


図1-7 屋外伝搬実験(1)の結果による短時間平均減衰特性の時間変化(a)~(e)オクターブバンド別・伝搬距離別の平均減衰特性(f)測定時の気象(気温および風速)の時間変化

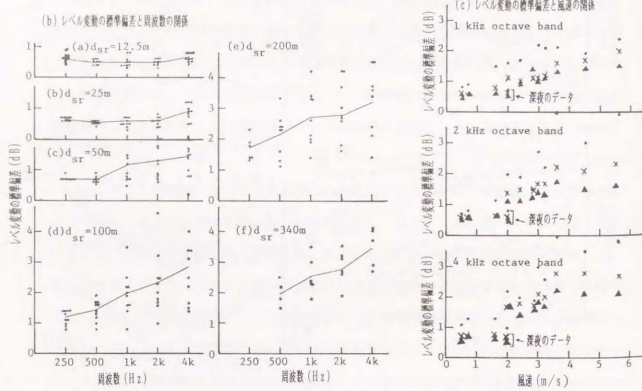
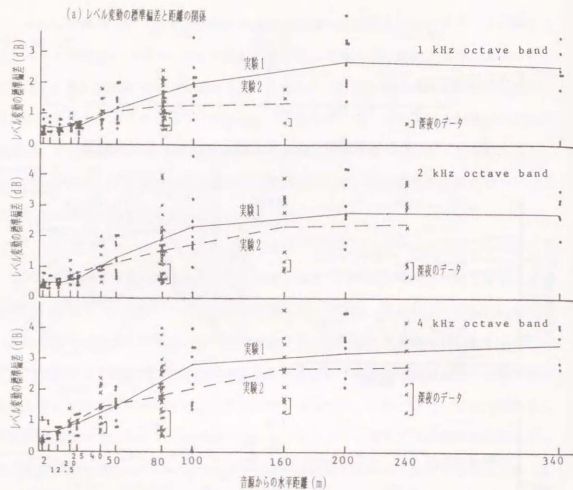


図1-8 屋外伝搬実験(1)と(2)による短時間レベル変動の整理結果
 (a) 距離に対するレベル変動の標準偏差の関係
 (b) 周波数に対するレベル変動の標準偏差の関係
 (c) 風速に対するレベル変動の標準偏差の関係

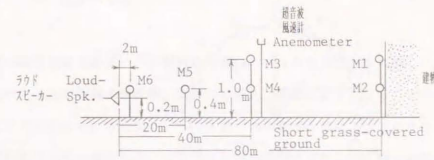


図1-9 屋外伝搬実験(3)の音源とマイクホンの配置

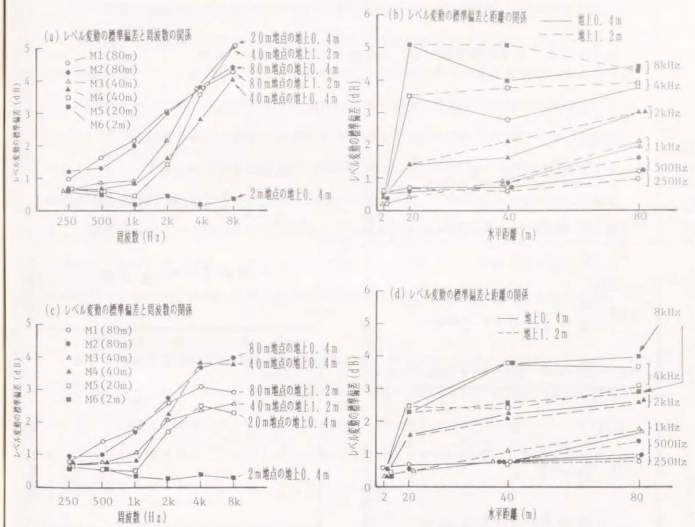


図1-10 屋外伝搬実験(3)による短時間レベル変動の整理結果;日照時と日没後の測定結果の比較
 午後4時(日照時;気温30℃、風速2.5m/s)の
 (a) 周波数に対する関係、(b) 距離に対する関係
 午後7時半(日照時;気温29℃、風速2.0m/s)の
 (a) 周波数に対する関係、(b) 距離に対する関係

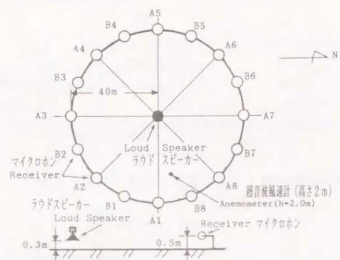
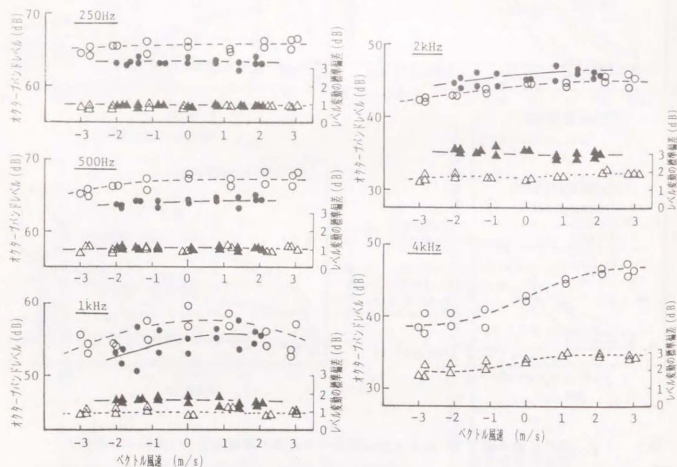


図1-11 屋外伝搬実験(4)の音源とマイクロホンの配置



●, ▲: 日照計のデータ(気温32℃, 南東の風(平均風速)2.0m)
○, △: 夜間のデータ(気温23℃, 南の風(平均風速)3.0m)

図1-12 屋外伝搬実験(4)の結果
平均の減衰およびレベル変動の標準偏差の周波数、ベクトル風速との関係

1. 3. 3 レベル変動の分布

前節では屋外伝搬実験データの解析から音のレベル変動の特性を考察した。その結果、レベル変動の大きさが距離や周波数、気温(日照)、風速によって変ることや長距離では飽和することが分かった。さらに、レベル変動が大気のゆらぎによって作り出され、風とともに運ばれることも示唆された。本節ではレベル変動の振幅分布を調べた結果を示し、ついで、レベル変動の時間特性を時間および空間相関関数で調べた結果を述べる。

これまで、地面の上を伝搬する音のレベルが変動することを繰り返し述べてきたが、その測定例から、試験音の断続が暗騒音チェックに有用であることを示す。図1-13は屋外伝搬実験(3)で観測された250Hzのオクターブバンドレベルの変動を示すもので、(a)は原波形、(b)は試験音断続の過渡的な部分を捨ててHIGH(試験音+暗騒音)の区間とLOW(暗騒音のみ)の区間それぞれを時間的な連続性を無視して続けて描いたものである。図1-14には500Hz~4kHzの各バンドについて同じように描いた例を示す。暗騒音には衝撃的な音もあるが、これらの図にあるように、一般に屋外で観測される音は4sの周期で断続しても概略の変化が分かるものが多い。従って、このようにレベル変化を描いてみれば、SNをチェックすることができる。前節のレベル変動の標準偏差はこのようにしてチェックした後、SN比の確保できない部分は捨てて、計算したものである。

屋外を伝搬する音の強さは対数正規分布に従う、すなわち、レベルの変動は正規分布するといわれる[30]。これについて実験データから調べた結果を述べる。標準偏差が変動の大きさを首尾よく表現するには、レベル変動が正規分布すること、少なくとも、それに近いことが必要である。ここではレベル変動の度数分布を求め、歪度と尖度を計算して、正規性の検定を行った。用いたデータは屋外伝搬実験(3)の日照時の観測データである。

図1-15は観測データから求めた度数分布の例である。(a)は距離80m、高さ1.2m、1kHzのレベル変動の度数分布、(b)は距離40m、高さ0.4mの1kHzのレベル変動の度数分布である。(c)は(a)と実験の条件は同じだが、観測データのサンプリング時間間隔を1.0sとした場合の結果である。(d)はレベルではなく振幅強度で度数分布を求めた例である。各図には得られた分布の平均値と標準偏差を持つ正規

分布のカーブが重ねて描いてある。各図の結果を正規分布と見比べると、(a)は対称性がくずれ、レベルの小さいほうに偏っていることが分かる。(b)は正規分布より尖っている。(d)では強い非対称性が示されている。ただし、レベル変動の度数分布は正規型に近い。なお、(c)は(a)とサンプリング時間間隔が異なるが、分布の形状は大きく変わらないことが分かる。同じ処理を各周波数帯、各距離のレベル変動について行った。その結果、図1-15と同様に、比較的正規分布に近いが、伝搬距離が長いほど、地面に近いほど、周波数が高いほど、非対称性が強く左傾(右に尾を引く)が強くなる分布形状をすることが分かった。なお、レベル変動が飽和状態になっている4~8kHz、80mの地点では分布のピークが鈍形になっていた。目で観察した分布形状を表1-2にまとめる。

このような度数分布の正規分布からのずれを定量的に吟味するために、歪度と尖度による正規性の検定を行った[32]。歪度と尖度の定義は次の通りである。

$$\text{歪度} : g_1 = k_3 / (k_2)^{3/2}, \quad \text{尖度} : g_2 = k_4 / (k_2)^2$$

ただし、 k_2 、 k_3 、 k_4 は2、3、4次のキミュラントである。もし、母集団が正規分布をし、サンプルが互いに独立であれば、 g_1 と g_2 は平均値が0、分散がそれぞれ、

$$\sigma^2(g_1) = 6n \cdot (n-1) / \{(n-2) \cdot (n+1) \cdot (n+2)\},$$

$$\sigma^2(g_2) = 24n \cdot (n-1)^2 / \{(n-3) \cdot (n-2) \cdot (n+3) \cdot (n+5)\}$$

なる正規分布に従うことが分かっている。ただし、 n はサンプルの数である。これより、測定されたレベル変動の正規性を検定するが、独立なサンプルの数が幾つかを知る必要がある。図1-15(c)に例を示したように、同一の測定データについてサンプルを取る時間間隔を変えて度数分布の計算を繰り返してみると、3sより短い間隔の場合には同じような結果になった。また、次節で述べるように、このデータのレベル変動の相関時間はおよそ3sである。そこで、3s隔たったデータは互いに独立であるとしてサンプル数を算出し、歪度と尖度による正規性の検定を行うことにした。その結果を表1-2に示してある。表中、数値0が記したところは正規、±の記号を記したところは正規からはずれるところであり、程度に応じて+または+のように記してある。その結果は目で分布形状を観察したものと良く合致している。すなわち、距離が短く周波数の低いところでは比較的正規分布に近いが、伝搬距離が長くなり周波数が高くなるほど、非正規性が強くなることが分かった。

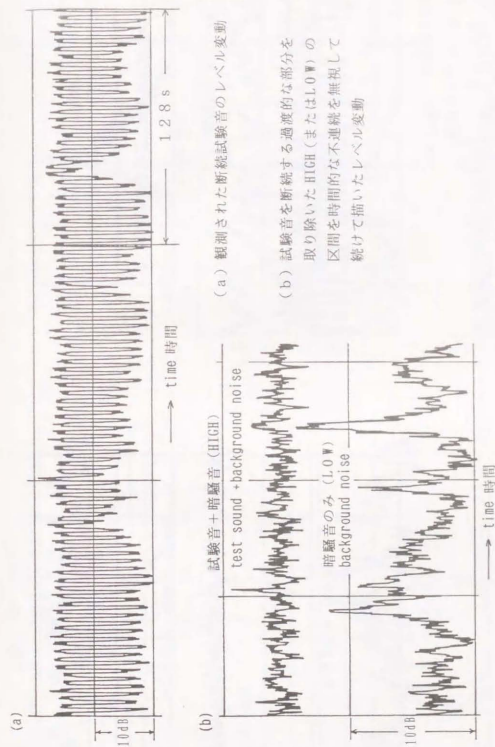


図1-13 断続試験音を用いた屋外伝搬化験で観測された試験音の変動
; 試験音はピンクノイズで、断続の間隔は4.5 duty ratioは5.0%
; 観測された試験音を中心周波数2.50kHzのオクターブバンドフィルタに通
過後、PASTの特定数で二乗平滑し、乱数変換してある

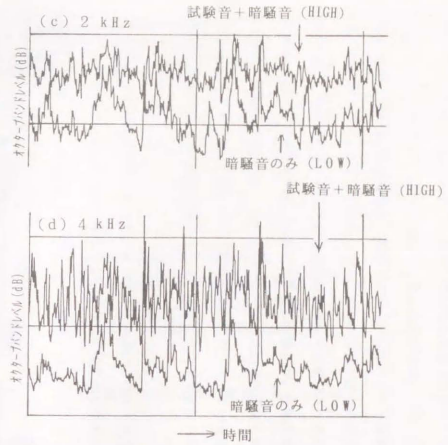
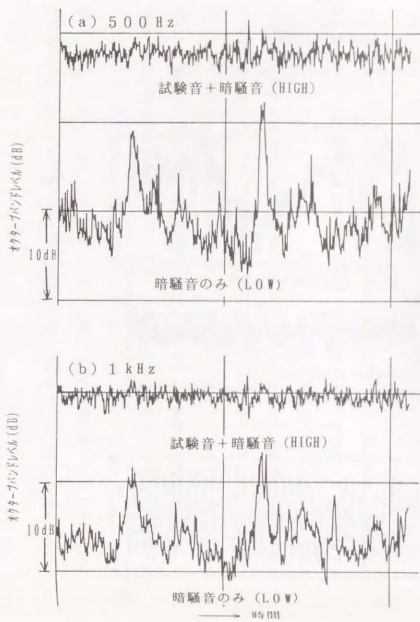


図1-14 過渡部分を除去した断続試験音の
オクターブバンド別のレベル変動
(a) 500 Hz (b) 1 kHz
(c) 2 kHz (d) 4 kHz

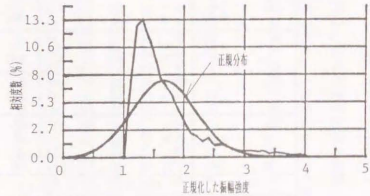
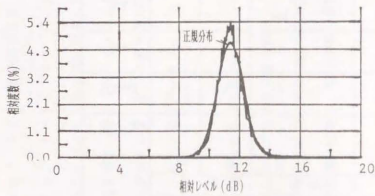
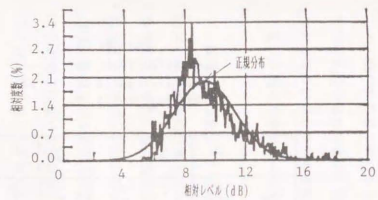
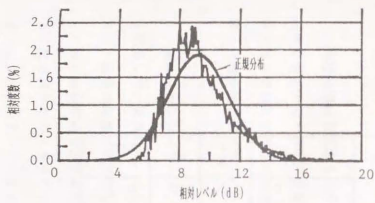


図1-15 伝搬実験で得たオクターブバンドレベルの度数分布 (断続試験音による)

- (a) 1 kHz オクターブバンド (距離80m、マイクロホン高さ1.2m レベルのサンプリング間隔0.1s) のレベルの度数分布
- (b) 1 kHz オクターブバンド (距離40m、マイクロホン高さ0.4m レベルのサンプリング間隔0.1s) のレベルの度数分布
- (c) 1 kHz オクターブバンド (距離80m、マイクロホン高さ1.2m レベルのサンプリング間隔1.0s) のレベルの度数分布
- (d) 4 kHz オクターブバンド (距離20m、マイクロホン高さ0.4m レベルのサンプリング間隔0.1s) の振幅強度の度数分布

表1-2 歪度と尖度によるオクターブバンドレベルの正規性の検定の結果

d	2m		20m		40m		80m	
	0.4m		0.4m		0.4m		0.4m	
	g ₁	g ₂	g ₁	g ₂	g ₁	g ₂	g ₁	g ₂
c								
a	250Hz	0	0	0	0	0	0	0
b	500Hz	0	0	0	0	0	0	0
	1kHz	0	0	0	0	0	0	0
	2kHz	0	0	0	0	0	0	0
	4kHz	0	0	0	0	0	0	0
	8kHz	0	0	0	0	0	0	0

a オクターブバンド下の中心周波数 (Hz)
 b g₁: 歪度、g₂: 尖度
 c マイクロホンの配置からの向き
 d 音源からの距離

1. 3. 4 レベル変動の相関関数

大気の流れはマイクロからマクロまで幅広いスケールを持ち、変動するが、或る時間と空間の範囲の乱れは互いに相関を持つ。乱れの様子が或る状態から別の状態へ移り変わるには時間経過と空間の移動が必要である。大気を伝える音の変動も、大気の流れの影響で生じるものであり、同じ様に或る時間と空間の範囲で相関を持つと考えるべきである。

屋外伝搬実験(3)の日照時の観測データについてオクターブバンド毎のレベル変動の自己相関関数を計算してみた。その結果を図1-16に示す。相関関数は遅れ時間0の時の値で正規化した。図は2~80mの各地点の1kHz、80m地点の500Hz~8kHzのオクターブバンドの音のレベル変動の自己相関および風速変動の自己相関を描いてある。通常、音のレベル変動の自己相関は近似的にガウス関数 $\exp(-\tau^2 / \tau_c^2)$ で表現できることが知られている[31]が、図1-16の結果はそれと異なり、 $\exp(-|\tau|/\tau_c)$ の関数形になっている。いずれにしても $\tau = \tau_c$ の時に関数値が1/eになるので、 τ_c は信号のコヒーレンスが保たれる時間の長さの目安(相関時間)として用いられる。図1-16の結果では音源の直前を除いて相関時間は3sに近い。これより、3sよりも離れた時刻のレベル変動は互いに独立な振る舞いをすると思われることができる。

相関時間は空間の1点で観測される音のレベル変動の統計的な性状が保たれる時間の長さの目安を与えるが、大気の流れの空間的な変化による音のレベル変動の統計的な性状が保たれる空間的な範囲の指標として相関距離を考えることができる。これを調べるため、屋外伝搬実験を新たに行い、離れた場所で観測される音の変動の相互相関関数を算出した。

屋外伝搬実験(5)を、図1-17のように平坦なグラウンドに音源とマイクロホン配置して、実施した。40mの間隔を隔ててA、B2系列のマイクロホン列(音の伝搬方向と直角の向きに不規則な間隔でマイクロホンを並べた)を配置した。間隔を不規則にした理由は少ないマイクロホン数で多数の異なるマイクロホン間隔を作り出すためである。A系列では6本のマイクロホンで、 $L_n = 0.25 \sim 7.75$ mの15通り、B系列は5本で $L_n = 0.5 \sim 7.5$ mの9通りの間隔を作り出した。音源位置は図に示した2ヶ所で、結局、伝搬距離 $D_n = 20, 40, 60, 80$ mの測定結果を得た。なお、音源から

5 mの所にもマイクロホンを置き、試験音の状況をモニターした。季節は夏、時刻は午後2時、天候晴れ、気温30℃前後、東から東南の風が3~4 m/sで吹き、砂埃りが上がる状態だった。風向きとマイクロホン列の向きはほぼ同じであった。音源から一定の大きさのピンクノイズを放射した時の伝搬音を各マイクロホンで観測し、多チャンネルのデータレコーダに同時録音した。観測データは持ち返って再生し、バンドパスフィルタに通した後、二乗器と時定数回路(Fast)で二乗平滑し、対数変換して計算機に取り込んだ。サンプリング間隔は0.1 sとした。250 Hz~2 kHzのオクターブバンドでは暗騒音に対するSN比は良好であり、測定系のダイナミックレンジも適切だったが、4 kHzバンドは音源パワーの低下もあり、SNが多少悪かった。

観測された音の振幅強度の変動の空間相関を調べるため、マイクロホン間の相互相関関数を計算した。図1-16ではレベル変動の相関関数を計算したが、今度は計算機上でレベルから真数に戻し、振幅強度の変動で相互相関関数を計算した。レベル変動でも同じ計算したが、大差なかった。相互相関関数は前と同様に正規化し、相関係数としてある。図1-18は伝搬距離 $D_p = 60$ m、1 kHzオクターブバンドの結果の一部を示したもので、(a)~(e)はそれぞれマイクロホン間隔が異なる。各図にマイクロホン対の自己相関関数と相互相関関数が重ねて描いてある。なお、(f)は風速と音の相互相関である。

図を見ると、相関波形は次の2種類の形の波形の重ね合わせになっている。

①遅れ時間0にピークを持つ、 $\exp(-|\tau|/\tau_c)$ の関数形の項

②正の遅れ時間にピークを持つ、 $\exp(-(\tau - \tau_0)^2 / \tau_c^2)$ の関数形の項

マイクロホン間隔 L_m が小さい(a)~(b)では相互相関も自己相関も同じ形で、ほぼ①になっている。(c)から(e)へと次第に L_m が大きくなるにつれ、①の項は小さくなるが、②の項が現れて両者が重なり合形になっている。②の項のピークの時間遅れは L_m とともに大きくなっている。この関係を図示すると図1-19のようになり、傾斜は4~5 m/sに近い。測定時の風向きはマイクロホン列の向きに近く、風速が3~4 m/sであったことを考え合わせると、②項は風による大気の流れに関連して生じる伝搬音の変動の相関を示すと推測される。逆に、①項は常に遅れ時間0にピークを持つので、風速変動に依存しない気温等のゆらぎによる伝搬音変動の相関を表すと推測される。マイクロホン間隔 L_m を変えた時の相互相関関数の形状の変化がよく分かるように重ね合わせた結果を図1-21に示す。図は伝搬距離 $D_p = 60$ mの各オクターブバンドと距離20 mの2つ

のオクターブバンドの結果である。図より、伝搬距離が変わっても傾向が同じであること、高い周波数ほど②項の相関が鈍で視野が広がること、①項の鋭さは伝搬距離とともに変わることが分かる。音源に近い20 mでは τ_c が小さく、①項は鋭い。これより、20 mではまだ大気の流れの影響が成長していないと考えられる。前と同様にして、相関時間 τ_c を求め、伝搬距離に対して整理した(図1-20)。相関時間 τ_c は高々2 sであり、前に比べて短い。相関時間も大気の流れの状況によって変化するものと考えられる。さて、マイクロホン間の相互相関関数から相関距離を調べるため、②項のピーク(相関係数)を L_m に対してプロットした(図1-22)。この図の(a)は20 m、(b)は60 m、(c)は(b)と同じ60 mでの結果だが、レベル変動の相関から算出した結果である。図より周波数が高いほど短い距離で相関が小さくなること、振幅強度もレベル変動も結果の傾向は似ていることが分かる。伝搬距離 $D_p = 20$ mの1~4 kHzは音源からの距離が短いにも関わらず、相関係数の減衰が早い。これは大気の流れの影響がマイクロホンのあいだで異なるためと思われる。実際、 $D_p = 20 \sim 80$ mの時、音源からマイクロホン列を見る方位角の拡がりは20、1~5、5°となる。 $D_p = 20$ mの場合は、他の距離に比べて、マイクロホン間の方位角の拡がりが増え、伝搬で被る流れの影響の差が大きくなる。これが音源に近いにも関わらず、早々と相関係数が減衰した理由であろう。これより、 $D_p = 60$ mの結果から相関距離を求める方が適当であると思われるが、(b)で相関値が1/eになるマイクロホン間の距離 L_m は7 mより大きく、測定範囲からはずれてしまった。つまり、相関距離は7 mより大きかった。

図1-11に示した円周配列の実験では音源を出た音はマイクロホンにはほぼ同じ時刻に到達する。音源から見た隣接するマイクロホンの向きの違いは45°、距離 $D_p = 40$ mである。上の空間相関の結果を考慮するとマイクロホン間の相関は小さいはずである。実際、相互相関を算出してみると(図1-23)1 kHzで相関係数は高々0.2であった。さて、同一データレコーダに録音されていた8チャンネルのレベル変動を同時サンプリングし、時刻別に各方向で観測されるレベル分布の様子を算出した。図1-24はその一例である。(a)~(e)は異なる時刻の方向分布、(f)は(a)~(e)を重ね合わせた結果である。個々の時刻の方向分布では大きなレベルの向きがばらついているが、重ね合わせた(f)図では順風になる右側で大きなレベル、逆風の左側で小さなレベルに見え、測定時の風向が南東から南の風2~3 m/sであったことを考えると、妥当な結果になっている。

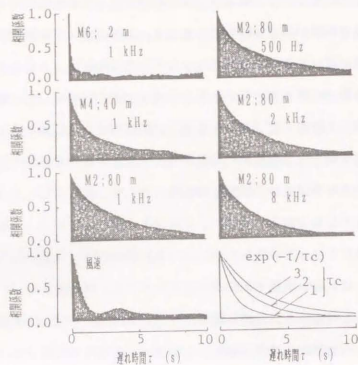


図1-16 屋外伝搬実験(3)の日照時の観測データによる
オクターブバンドレベル変動の自己相関関数

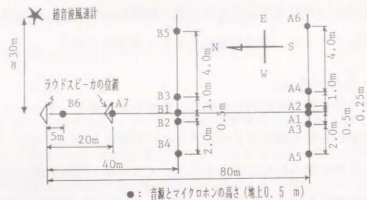


図1-17 屋外伝搬実験(5)における音源とマイクロホンの配置

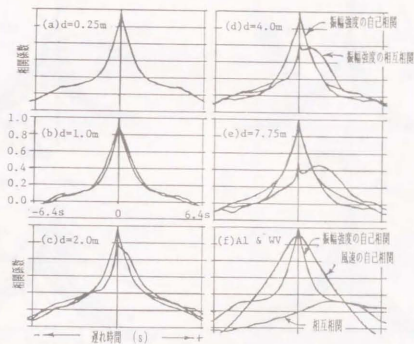


図1-18 屋外伝搬実験(5)の観測データによる振幅強度の
相互相関関数および自己相関関数の例
；伝搬距離 $D_p=60$ m、1 kHz オクターブバンド

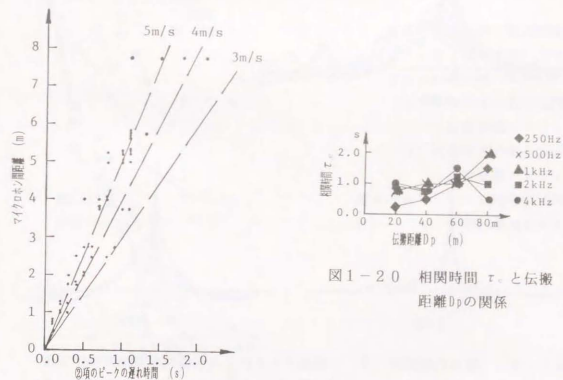


図1-20 相関時間 τ と伝搬
距離 D_p の関係

図1-19 相互相関関数の②項のピークの遅れ
時間とマイクロホン間距離の関係
；伝搬距離 $D_p=60$ m

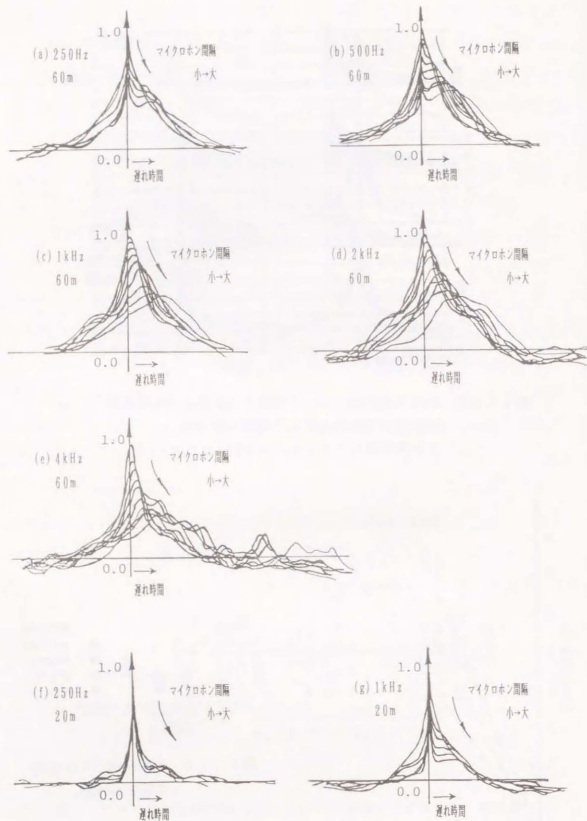


図1-2-1 屋外伝搬実験(5)の観測データによる振幅強度の相互相関関数
 (a) ~ (e) ; 伝搬距離 $D_0 = 60$ m, マイクロホン高さ 0.5 m
 (f) ~ (g) ; 伝搬距離 $D_0 = 20$ m, マイクロホン高さ 0.5 m

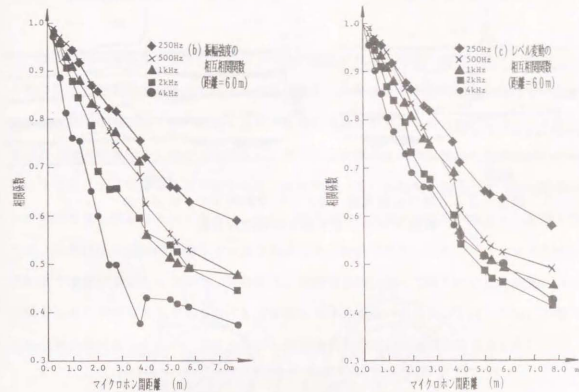
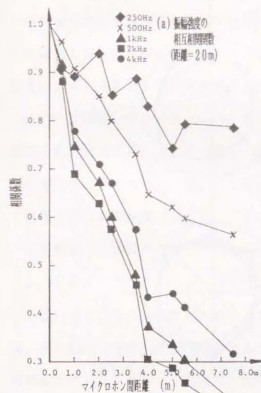


図1-2-2 騒音の変動の相互相関関数のピーク値(相関係数)とマイクロホン間距離の関係
 (a) 振幅強度の相互相関関数 ; 伝搬距離 $D_0 = 20$ m
 (b) 振幅強度の相互相関関数 ; 伝搬距離 $D_0 = 60$ m
 (c) レベル変動の相互相関関数 ; 伝搬距離 $D_0 = 60$ m



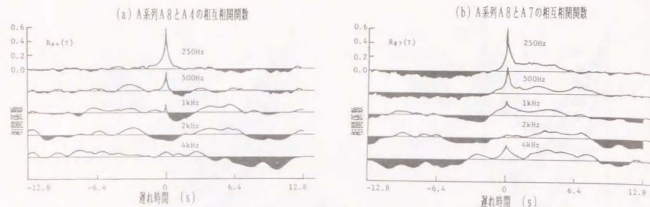


図1-2-3 屋外伝搬実験(4)の円周配列マイクロホンの観測データによる相互相関関数の例

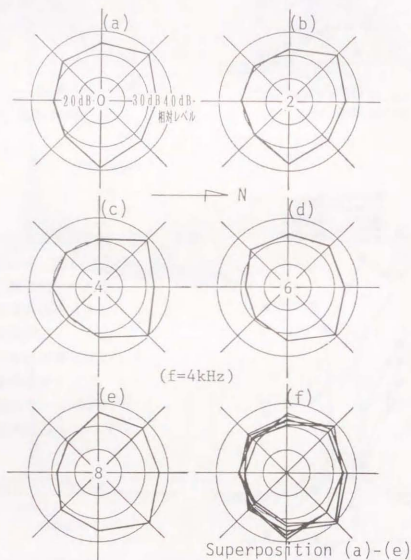


図1-2-4 屋外伝搬実験(4)の円周配列マイクロホンの観測データによるオクターブバンドレベル(4 kHz)の方向分布
(a)~(e) : 瞬時の分布
(f) : (a)~(e)の重ね合わせ

1.4 模型実験によるレベル変動の測定

地面に沿って伝搬する音に生じるレベルの変動は気温や風速の高さ方向の勾配よりも大気の流れの影響を強く受けて起きるものであり、大気の流れがどの程度発達しているか、乱れた大気の中をどれくらい通過するかが変動の大きさを左右すると考えられる。大気の流れは上空より地面の近傍の方が大きい。従って、大気の流れの影響は伝搬経路がATGかGTGかによって異なると予想される。屋外実験(1)の結果、図1-8(c)から、その傾向を推し量ることができる。しかし、屋外測定では種々の要因が複合して影響するため、伝搬経路の違いの影響をはっきり見ることは容易ではない。そこで大きな模型用の実験室で簡単な測定をしてみた。すなわち、実験室を締め切って室内の気温の変動以外は伝搬音にゆらぎを与える要因を無くして変動の大きさを測ってみた。ただし、短い距離で屋外伝搬の状況をシミュレートするため、超音波領域の高い周波数の音を用いた。

実験室は容積1200 m³で、壁には吸音処理がしてある。音源は図1-2-5に示すノズルから圧縮した空気を吹き出す時に発生するジェットノイズ[31]で20~30 kHzにピークを持つ広帯域雑音が放射される。音源の軸を含む面での指向性は小さい。圧縮空気の吹き出し方向は伝搬経路と直交する向きであり、伝搬へ影響を及ぼす可能性は小さい。受音には1/4寸コンデンサマイクロホンを用いた。音源とマイクロホンは塩化ビニール(hard; 反射性)やネル布(soft; 吸音性)で上張りしたコンクリート床の上に設置した。実験の条件は次の通りである(図1-2-6)。

音源(H_s)と受音点(H_m) ; 設置面から20, 200, 500 mmの高さ

音源・受音点間距離(D_{sm}) ; 1 m, 5 m

伝搬経路下の地面の状態 ; hard(反射性; 塩ビ板)、soft(吸音性; ネル布)

1/3オクターブバンド ; 中心周波数12.5, 25, 50, 100 kHz

縮尺を1/50と想定した場合、高さは実寸で1~25 m、伝搬距離は50~250 m、周波数は250~2 kHzに相当する。ただし、乱れのスケールや空気吸収については相似則が成り立たないし、測定時に空気流の乱れも観測しなかったため、定性的な考察に止まる。H_s = H_m = 20 mmはGTG条件、H_s = 200 mm(500 mm)、H_m = 20 mmはATG条件、H_s = 20 mm、H_m = 200 mm(500 mm)はGTA条件、H_s = H_m = 200 mm(500 mm)はATAの音の伝搬の条件を想定したものである。

測定の際には実験室の入り口を締め切り、照明を消して室内の空気をできるだけ静的な状態にした。測定は入り口を閉じて15分過ぎてから行い、一定の大ききで放射した音を観測して1/3オクターブバンドフィルタに通し、時定数FASTで二乗平滑し、対数変換して計算機に取り込み(サンプリング間隔0.1s; データ数2048個)、平均値のまわりの標準偏差を算出した。この処理を個々の実験条件毎に2~10回繰り返した。その結果を整理して表1-3に示す。表はバンド別・実験条件別にレベル変動の標準偏差(平均値と標準偏差)、測定回数が示してある。

顕著な変化が現われたのは100kHz・soft(ネル布)の場合だけで、音源と受音点の高さを変えるにつれてレベル変動の標準偏差は次のように変化した。

- G-T-G条件(H₁=H₂=20mm, 伝搬距離5m, soft); 0.53dB
- G-T-A条件(H₁=20mm, H₂=200mm, 伝搬距離5m, soft); 0.34dB
- A-T-A条件(H₁=H₂=200mm, 伝搬距離5m, soft); 0.31dB
- A-T-G条件(H₁=200mm, H₂=20mm, 伝搬距離5m, soft); 0.26dB
- G-T-G条件(H₁=H₂=20mm, 伝搬距離5m, hard); 0.25dB
- G-T-A条件(H₁=20mm, H₂=500mm, 伝搬距離5m, soft); 0.13dB
- A-T-A条件(H₁=H₂=500mm, 伝搬距離5m, soft); 0.12dB
- A-T-G条件(H₁=500mm, H₂=20mm, 伝搬距離5m, soft); 0.10dB
- G-T-G条件(H₁=H₂=20mm, 伝搬距離1m, hard); 0.15dB

上記のうち、A-T-A条件(H₁=H₂=200mm, 伝搬距離5m, soft)を別にすれば、

- ・hard(反射性)よりsoft(吸音性)の面の上のレベル変動が大きい、
- ・伝搬経路が地面に近い方がレベル変動が大きい、
- ・G-T-AとA-T-Gで違いは見られない、
- ・音源または受音点の高さが500mmになると、顕著なレベル変動は見られない

のような特徴を見ることができる。50kHz以下のバンドでは、どの周波数もG-T-G条件(H₁=H₂=20mm, 伝搬距離5m, soft)の標準偏差が特別に突出することもなく、音源または受音点の高さが500mmの場合に他より小さな変動に止まっていたこと以外、特別な傾向は見られなかった。これより結論めいたことは言えないが、航空機騒音のように、上空から地上に到来する音には大気のゆらぎは大きな影響を及ぼさない可能性が示唆されたと考えられる。

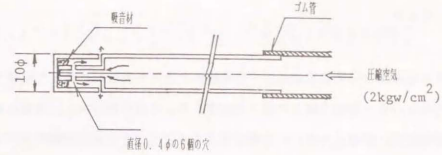


図1-25 模型実験に用いたジェットノイズ音源の構造

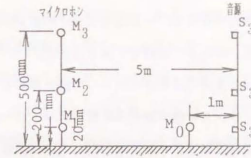


図1-26 模型実験の音源とマイクロホンの配置

S₁ ~ S₃ : 音源位置

M₁ ~ M₃ : マイクロホン位置

表1-3 模型実験による地面上の伝搬音のレベル変動の標準偏差

propagation type	G-G	G-G	G-G	G-A	G-A	A-A	A-A	A-G	A-G
	soft	hard	soft	soft	soft	soft	soft	soft	soft
ground									
12.5k 1/3 oct.	0.18 0.0 (2)	0.22 0.012 (3)	0.20 0.012 (10)	0.26 0.008 (3)	0.19 0.0 (2)	0.215 0.005 (2)	0.20 0.005 (3)	0.21 0.0 (2)	0.19 0.005 (3)
25.0k 1/3 oct.	0.145 0.005 (2)	0.20 0.021 (3)	0.17 0.015 (10)	0.21 0.012 (3)	0.13 0.0 (2)	0.335 0.025 (2)	0.13 0.005 (3)	0.245 0.015 (2)	0.13 0.031 (3)
50.0k 1/3 oct.	0.11 0.0 (2)	0.20 0.033 (3)	0.21 0.047 (10)	0.20 0.024 (3)	0.13 0.0 (2)	0.19 0.01 (2)	0.11 0.022 (3)	0.22 0.0 (2)	0.15 0.033 (3)
100.0k 1/3 oct.	0.15 0.01 (2)	0.25 0.054 (3)	0.53 0.052 (6)	0.34 0.041 (3)	0.13 0.0 (2)	0.31 0.01 (2)	0.12 0.005 (3)	0.26 0.01 (2)	0.10 0.04 (2)
D _{g-r}	1m	5m	5m	5m	5m	5m	5m	5m	5m
H _s	20mm	20mm	20mm	20mm	20mm	20mm	500mm	200mm	500mm
H _r	20mm	20mm	20mm	200mm	500mm	200mm	500mm	20mm	20mm

H_s : 音源の高さ

H_r : マイクロホンの高さ

D_{s-r} : 音源とマイクロホンの間の距離

soft : ネル布による吸音性地面

hard : 強化ビニール紙による反射性地面

1. 5 まとめ

本章では屋外を伝搬する音のレベル変動の大きさを実験的に調べた結果を述べた。

- (1) 上空から来る航空機騒音を地上で観測すると地面反射が入る。地面反射は相関法や機種識別に影響を及ぼした大きな要因であった。地面と反射板の上、さらに、地面から1.0～1.2 m持ち上げたところに騒音計を置いてピーク騒音レベルを観測した結果、滑走路の近くではあったが、各マイクロホンで測定された騒音レベルの関係は観測する都度変化し、無視できないばらつきを生じた。平均値同士の間隔はAとCの周波数補正特性で異なり、A特性のピーク騒音レベルでは地面と1.2 mで同じような値を示し、C特性では顕著な差を生じた。
- (2) 航空機が地上の決まった場所ですす音を利用して長距離伝搬によるバンドレベルのばらつきを調べたところ、その標準偏差は距離により、2 kmを越えると飽和した。
- (3) 断続試験音を用いて屋外伝搬実験を繰り返し行った。伝搬騒音の3分半～4分間のあいだのレベル変動の平均と標準偏差を求めた。平均値は同期積分法で推定した。伝搬特性はGTG、ATG等、伝搬経路によって異なり、地面に沿うGTGの方が地面や気象の影響をより強く受けることが分かった。レベル変動の標準偏差は距離や周波数、風速とともに大きくなり、やがて飽和する。周波数に対する標準偏差の増加は0.5 dB/ octave程度である。レベル変動は日照時に大きい。風は大気の流れを運び、レベル変動も運ばれる。
- (4) 屋外を伝搬する音の強さの分布は対数正規分布するといわれるが、伝搬距離が長いほど、地面に近いほど、レベルの分布は正規分布からはずれることが分かった。
- (5) 伝搬特性の相関を調べたところ、レベル変動の自己相関関数はガウス関数ではなく、 $\exp(-|\tau|/rc)$ の関数形になることが分かった。相関時間 rc は一定でなく大気の状態が変わった。レベル変動の空間相関を調べたところ、 $\exp(-|\tau|/rc)$ の項と $\exp[-(\tau - \tau_0)^2 / \tau_0^2]$ なる項の重ね合わせであった。後者はマイクロホンの間隔に応じてピークの遅れ時間が大きくなり、風による大気の流れに関する変動を表すと考えられる。前者はマイクロホン間隔が大きくなると、相関のピークの値が小さくなるが、ピークの時間遅れはない。
- (6) 伝搬経路の違いによる伝搬特性の差について模型で基礎的な考察をした。その結果、GTGでレベル変動が大きいこと、反射性より吸音性の地面の方が変動は大きい。

第2章 クロススペクトル法による地面反射特性と自由音場スペクトルの推定

2. 1 はじめに

第一部で航空機騒音に関する音源同定の方法を論じた。マイクロホンを地面から持ち上げて観測するため、地面で反射してくる音が測定のため妨げとなり、その影響を抑えることが重要であった。第二部第1章で屋外を伝搬する騒音のレベル変動を調べた結果を述べた。ここでも地面反射は気象の影響とともに伝搬する音を減衰させたり変動させたりする重要な要因であった。地面の影響は不変ではなく、降雨や降雪、草木の有無等により、日々、変化する。乾燥した草地は音響的に柔らかいことが多いが、水分を含むと、音響的に固くなる[33]。地表面の音響特性を測定する方法は種々提案されている[33-39]が、いずれも試験音を使って実験し、推定する方法である。しかし、屋外で航空機騒音を測る場合に、一々、試験音を使った実験を行って地面の特性を調べ、影響を補正することは現実的ではない。できれば、観測される騒音自体から地面の影響を推定して補正することが望ましい。地面の状態に左右されずに騒音レベルを測定する手段として、第一部で利用した反射板と inverted microphone を活用する方法や地面から十分離してマイクロホンを置き、反射の影響を減ずる考え方がある[40, 41]。前者はマイクロホンを反射板に近接して置いて干渉をなくする考えで自由音場の騒音レベルに6 dB加えた値に近い結果が得られる。しかし、反射板の寸法が小さいと回折の影響を受けるし、それより、地面のそばで測定することはマイクロホンの高さが環境基準[5]で記述される条件(地上1.2～1.5 m)と異なることになる。航空機の製造時の騒音証明のための騒音測定の手順を定めたICAO(国際航空連盟)の付属書[55]でも地面の状態については過度の音の吸収が無いことという簡単な記述しかないが、マイクロホンの高さは地上1.2 mと定められている。それ故、地面から持ち上げたマイクロホンで観測する騒音自体から地面の反射特性を知り、その影響を取り除いて騒音レベルを評価ができることが望ましい。本章で述べる方法[42]はこの点を満たすべく考案されたもので、複数のマイクロホンをを用いるが、地上1.2～1.5 mの測定により観測騒音から地面の反射特性と自由音場スペクトルの両方を得ることができる。

地面の上で騒音を観測するとマイクロホンに直接到来する音と地面で反射してくる音が重なる。このマルチパスによる干渉で強められたり弱められたりして騒音のスペクトル

にリップルが生じる。図2-1に草地の上で観測した航空機騒音のスペクトルの時間変化を示す。図の横軸は周波数、縦軸はスペクトルの強度であり、実時間スペクトル分析器で繰り返し分析した結果を縦に少しずつ位置をずらしながら描いてある。スペクトルの山谷の間隔は次第に密になり、やがて再び疎になっていく。これは航空機が頭上を通過するにつれマイクロホンに到達する直接音と反射音の時間差が小→大→小と変化するためである。このスペクトルリップルの変化は音源が移動しなくても起きる。地面に立ち上から来る音を聞いている時にしゃがむと音色が変化する。つまり、地面からの高さが変わり、直接音と反射音の時間関係が変化すると起きる。本章で述べる推定の方法はこれを利用するもので、調べたい周波数範囲でスペクトルが有ればスペクトルの形状が分からなくても構わない。従って、観測する騒音そのものを利用して地面の音響特性を推定できることとなる。

本章で述べる手法を検討したのは1978~1979年[43~45]であり、1980年2月に論文にまとめて投稿した[42]。同年9月にJASAに掲載されたJ. Y. Chung & D. A. Blaserの論文[46]は問題のとらえ方や記述の仕方では違いはあるものの同じ手法である。この論文は掲載の前年の1979年12月に投稿されたもので筆者より少し早い。筆者が手法を検討したのは1979年だが、D. A. Blaser & J. Y. Chungの関連発表[47]はその前年である。いずれにしても彼等のほうが若干早い。しかし、彼等が試験音を用いてダクト内の垂直入射で材料の吸音特性を推定することを目的としたのに対し、筆者は航空機騒音などの未知騒音の斜め入射で地面の反射特性を推定し、自由場スペクトルを算出することを目的とした点で異なる。

本章の議論はクロススペクトルとパワースペクトルを用いて周波数領域でなされる。第一部では主に相互相関関数を用いて時間領域で議論した。両者は同一の関係式を基本にしている。それ故、本章では筆者の論文[42]に基いて手法の原理を述べ航空機騒音による処理例を示すとともに、時間領域に戻って第一部の議論を若干補う。本章の議論では音源は観測点から十分遠くにあつて、観測点へ来る音は平面波と考えると良いものと仮定する。また、地面は平坦で、地面以外からの反射音はないとする。さらに、航空機が頭上を通過する騒音などを音源に考えるので、音源パワーが大きいことから暗騒音は無視できるものとする。前章の議論により、大気の流れによる観測騒音のコヒーレンスの低下はGTGの伝搬状態では大きいATGではあまり大きくない。そこで、ここでは直接音と地面反射音は互いに完全にコヒーレントであると仮定する。

2. 2 原理

図2-2に示すように、2つのマイクロホンを設置面に沿直な軸上に近接して並べる。これは第一部第1章の相関法による航空機騒音の識別の際のマイクロホン配置と変らない。第一部第1章ではマイクロホン間隔を1~2mとしたが、ここでは1桁小さい5~10cm程度の間隔を考えている。理由は後で述べる。第一部第1章では設置面からの音の反射は周波数によらないと仮定したが、ここでは設置面が音響的に固いコンクリート舗装などを施した面ではなく、草などの生えたような柔らかい地面を想定しており、その周波数特性を調べることを目的としているので、反射特性は1つのインパルス応答で表される。なお、音響的に柔らかいということは図2-2に示したマイクロホンの鏡像が点ではなく広がりを持つ像として表されることを意味する[2]。

俯角 θ で到来する騒音 $s(t)$ をマイクロホン M_i 、 $i=1, 2$ で観測した信号 $x_i(t)$ は次の(2-1)式のように表される。

$$x_i(t) = s(t - \tau_{2i}) + \int_0^{\infty} a(\tau) \cdot s(t - \tau_{2i} - \tau_1 - \tau) d\tau \quad (2-1)$$

$$\tau_1 = 2(H_1 / c) \cdot \cos \theta \quad (2-2)$$

$$\tau_{2i} = (H_2 - H_1) / c \cdot \cos \theta = (\tau_2 - \tau_1) / 2 \quad (2-3)$$

M_2 に直接音が来る時間を基準にしている。 H_i は設置面からマイクロホン M_i までの高さ、 c は音速、 $a(\tau)$ は設置面の音圧反射特性を表すインパルス応答である。この式は遅れ時間と音圧反射特性の表し方以外は第一部の第1章と同じである。対象とする騒音は一過性であり定常ではないが、パワースペクトルを推定するのに必要な時間 T のあいだは定常と見做せるものとする。信号 $x_i(t)$ のパワースペクトル $P_i(f)$ は、(2-1)式より、次式のようになる。ただし、 j は虚数単位、 $P_i(f)$ は $s(t)$ のパワースペクトル、 $A(f)$ は $a(\tau)$ のフーリエ変換で設置面反射の伝達特性である。

$$P_i(f) = P_s(f) \cdot |1 + A(f) \cdot \exp(-j2\tau_1 f)|^2 \quad (2-4)$$

($i=1, 2$)

$x_2(t)$ と $x_1(t)$ のクロススペクトル $P_{21}(f)$ は次式となる。* は共役複素数を表す。

$$P_{21}(f) = P_*(f) \cdot [1 + A^*(f) \cdot \exp(j2\pi f \tau_2)] \cdot [1 + A(f) \cdot \exp(-j2\pi f \tau_1)] \cdot \exp(-j2\pi f \tau_2) \quad (2-5)$$

$P_{21}(f)$ 、 $P_i(f)$ 、 $i=1, 2$ 、 τ_{21} 、 τ_1 、 τ_2 が既知ならば、(2-4) ~ (2-5) 式を $A(f)$ を未知数とする連立方程式と考えて解くことができる。すなわち、これらの式を変形して次式が得られる。

$$A(f) = \exp(j2\pi f \tau_{21}) \cdot \frac{Q_{21}(f) \cdot \exp(j2\pi f \tau_{21}) - 1}{\exp(j2\pi f \tau_{21}) - Q_{21}(f)} \quad (2-6)$$

$$A(f) = \exp(j2\pi f \tau_{21}) \cdot \frac{R_{21}(f) \cdot \exp(-j2\pi f \tau_{21}) - 1}{\exp(-j2\pi f \tau_{21}) - R_{21}(f)} \quad (2-7)$$

ただし、

$$Q_{21}(f) = P_{21}(f) / P_2(f) \quad (2-8)$$

$$R_{21}(f) = P_{*21}(f) / P_1(f) \quad (2-9)$$

$$\tau_{21} = (\tau_1 + \tau_2) / 2 \quad (2-10)$$

さらに、(2-6) 式に (2-7) 式の共役複素数を取ったものを掛けると、

$$|A(f)|^2 = \frac{\gamma^2 - r_p \cdot \gamma \cdot w + w^2}{1 - r_p \cdot \gamma \cdot w + \gamma^2 \cdot w^2} \quad (2-11)$$

ここに、 γ はコヒーレンスであり、次式で定義される。

$$\gamma = P_{21}(f) / [P_1(f) \cdot P_2(f)]^{1/2} \quad (2-12)$$

$$r_p = [P_1(f) + P_2(f)] / [P_1(f) \cdot P_2(f)]^{1/2} \quad (2-13)$$

$$w = \exp(-j2\pi f \tau_{21}) \quad (2-14)$$

(2-6) 式または (2-7) 式を用いれば $A(f)$ の絶対値と位相 (実部と虚部) を算出できるが、推定式には 2 つの遅れ時間パラメータ τ_{21} と τ_{21} が必要である。 τ_{21} は M_1 と M_2 へ音が到来する時間の差、 τ_{21} は (2-10) 式より M_1 と M_2 の中点にマイクロホンを設置した場合の直接音と反射音の時間差に相当する。それに対し (2-11) 式は $A(f)$ の絶対値しか求められないが、推定式に必要な遅れ時間パラメータは τ_{21} のみである。また、式へのスペクトルの関与の仕方は M_1 と M_2 の間のコヒーレンスおよびパワースペクトルの相対平均と相乗平均の比の形である。 τ_{21} を知るには 2 本のマイクロホンの間隔と音速、俯角 θ が分かれば良いが、 τ_{21} を知るには設置面からマイクロホンまでの高さを知る必要がある。しかし、設置面の位置はコンクリート舗装などでは厳密に定まるが、草の生えた地面などの場合、必ずしも明確ではないことがある。

マイクロホンの高さが違ってさえいれば、必ず、(2-4) ~ (2-5) 式から (2-6)、(2-7)、(2-11) 式の解が導かれるわけではない。実際、 n を任意の整数として、

$$2\pi f \cdot (\tau_1 - \tau_2) = 4\pi f \cdot \frac{H_2 - H_1}{c} \cdot \cos \theta = 2n\pi \quad (2-15)$$

なる条件が満たされる時には $P_2(f) = P_1(f) = P_{21}(f)$ となり、解は求められない。これは空間的な aliasing を意味している。調べたい周波数範囲でこの条件が満たされないようにするには、(2-15) 式から分かるように、音の入射角に応じてマイクロホン間隔を狭くする必要がある。例えば、屋外で航空機騒音を観測する場合、音源と観測点の距離が短い場合を除けば、安定に測定できる騒音のスペクトルの上限周波数は高々 5 kHz である。従って、音が真上から到来する時にはマイクロホン間隔をおよそ 35 mm 以下にする必要がある。斜め入射になれば、さらに短くする必要がある。しかし、航空機騒音の場合、飛行経路がばらつくため、音の入射角も変化し、常に空間的な aliasing が起きないようにすることはできない。言い換えると、aliasing が起きることを前提として推定精度の悪い部分の結果を除外する必要があるということである。屋外測定の場合、観測される騒音レベルの大きさは高々 100 ~ 110 dB 程度であり、マイクロホンの径を小さくすると測定感度が悪くなるため通常 1 ~ 1/2 径のマイクロホンが使用される。従ってマイクロホン間隔を

小さくすると今度はその精度が問題になる。なお、周波数0は条件(2-15)を常に満たすため、マイクロホン間隔や音の入射角によらず、推定できない。

さて、 $A(f)$ が推定されれば直接音だけによるパワースペクトル $P_1(f)$ が(2-4)式から推定できる。この $P_1(f)$ には設置面の反射の影響は含まれておらず、自由音場で観測されるパワースペクトルを推定したことになる。

$$P_1(f) = P(f) / |1 + A(f) \cdot \exp(-j2\tau f r_1)|^2 \quad (2-16)$$

音源が測定点から十分遠くにあり音が平面波として観測点に到達すると仮定していることから、 $A(f)$ は周波数 f の成分の複素反射率に相当する。地表面が音響的にlocally reacting surface[48, 49]であると仮定すると、 $A(f)$ は地表面での音響インピーダンス $Z(f)$ を用いて次式のように記述される。

$$A(f) = \frac{Z(f) \cdot \cos \theta - \rho c}{Z(f) \cdot \cos \theta + \rho c} \quad (2-17)$$

ここに、 ρ は空気の密度、 c は空気の音速で、 ρc は空気の特性インピーダンスである。local reactionは音がどんな入射角で設置面に入射しても垂直に伝わるだけで面に水平な向きには拡がらないことを仮定するものであり、直観的に少し不自然さを感じるものの、通常の地面や草地の上の騒音伝搬にうまく当てはまる。

(2-6)式または(2-7)式から $A(f)$ が求められれば、逆に(2-17)式から $Z(f)$ を推定することができる。

$$Z(f) / \rho c = \frac{1}{\cos \theta} \cdot \frac{1 + A(f)}{1 - A(f)} \quad (2-18)$$

上式の $\cos \theta$ は(2-3)式より2本のマイクロホン間での距離間隔と音の到来時間差 τ_{21} を使って計算できる。

$A(f)$ を推定する(2-6)、(2-7)、(2-11)の各式は2本のマイクロホンの間のパワースペクトルとクロススペクトルを用いて導かれた。 $A(f)$ はパワースペクトルだけから推定することも可能である。鉛直線上の高さの異なる3点で騒音を観測し、(2-4)式を用いると、次の連立2次方程式を解くことで $A(f)$ を算出することができる。

$$S_1(f) = S_2(f) = S_3(f) \quad (2-19)$$

$$S_1(f) = \frac{1}{P_1(f)} \cdot \{1 + |A(f)|^2 + 2 \cdot \text{Re}[A(f) \cdot \exp(-j2\tau f r_1)]\} \quad (2-20)$$

このやり方ではパワースペクトルしか用いないので、観測対象が定常で有りさえすれば、マイクロホン1本で推定が可能であることから、次節で触れるマイクロホン間の位相差の影響を受けることはない。しかし、測定に利用する音が航空機騒音のように非定常な騒音である場合にはやはり3本のマイクロホンを用いて同時に観測する必要がある。

2. 3 遅れ時間の推定

垂直に並べたマイクロホンで同時に観測される騒音のパワーおよびクロススペクトルから地表面の複素反射特性 $A(f)$ および音響インピーダンス $Z(f)$ 、自由音場スペクトル $P_0(f)$ を推定する原理を述べた。推定にはパワーおよびクロススペクトルの他に2つの遅れ時間のパラメータ τ_{21} と ν_{21} 、音の入射角の余弦 $\cos\theta$ 、空気特性インピーダンス ρc が必要である。 ρc は気温から計算される。 $\cos\theta$ は τ_{21} により (2-3) 式を用いて計算できる。従って、任意の俯角で到来する騒音から τ_{21} と ν_{21} を知る必要がある。なお、音が真上から来る場合には τ_{21} と ν_{21} はマイクロホン間隔と地面からの高さに帰着するが、ここではスペクトルの未知な一過性騒音が任意の方向から来ると想定している。

さて、 τ_{21} と ν_{21} は各マイクロホンで観測される直接音と地面反射音の到来時間の差 τ_1 と τ_2 から求められる。 τ_1 と τ_2 は信号にエコーが1つ含まれる場合の遅れ時間であり、自己相関関数から推定できる。しかし、第一部第1章の主題が信号の白色化による相関波形の改善であったように、観測される騒音は白色ではなく種々のスペクトル形状を持つため、相関波形が周期的あるいはブロードになり、遅れ時間に対応する相関ピークが正確に検出できない場合がある。そこでケプストラムによる方法[50]と線形予測モデルのあてはめによる予測残差の自己相関から推定する方法[51, 52]を試みた。ケプストラムはパワースペクトルの対数のフーリエ変換で定義され、エコーによるスペクトルのリップルはケプストラム上でパルス列に変換される。予測残差の自己相関は第一部第1章で述べたように信号を白色化した後で相関を求めることに相当し、エコーの遅れ時間に等しい位置にパルスが現れる。一過性騒音の場合は、残差相関の方がデータ長が短くても安定な推定ができるためケプストラムに優る。航空機の上空通過音による地面反射の遅れ時間推定の結果を図2-3に示す。(a)は観測された原騒音の自己相関、(b)はケプストラム、(c)は残差相関である。いずれも地面反射の遅れ時間に相当するところにピークがあるが、(b)と(c)ではパルス状の顕著なピークが得られたのに対し、(a)の原波の相関は辛うじてピークを判別できるに過ぎない。なお、(a)の相関は(c)の線形予測計算に用いたものでデータ領域が限られているため、遅れ時間が大きくなると値は0に近づく。(c)の線形予測は1次のモデルを用いたものであるが、(d)に示すように、スペクトルの概形を推測し、白色化することの価値が分かる。

(2-5)式に戻り、 τ_{21} と ν_{21} を使って書き直してみると、次式となる。

$$\frac{P_{21}(f)}{P_0(f)} = [\exp(-j2\tau f_{21}) + A(f) \cdot \exp(-j2\tau f_{21}) + A^*(f) \cdot \exp(j2\tau f_{21}) + |A(f)|^2 \cdot \exp(j2\tau f_{21})] \quad (2-21)$$

上式を逆フーリエ変換して相関領域に戻すと、次式となる。

$$F^{-1}[P_{21}(f)/P_0(f)] = \delta(t - \tau_{21}) + a(t - \nu_{21}) + a(t + \nu_{21}) + \int_0^{\infty} a(\tau) \cdot a(t + \tau_{21} - \tau) d\tau \quad (2-22)$$

これは第一部第1章の(1-5)式を白色化した表現に他ならない。結局、 τ_{21} と ν_{21} を求めることはマイクロホン間の相互相関関数の4つの相関ピークの遅れ時間を推定することと同じである。第一部の議論では地面の反射特性は周波数によらない定数としたが、上式より、反射特性がインパルス応答 $a(t)$ を持つ場合には、相関を計算する前に信号を白色化しても反射による相関ピークはインパルス応答の形で現れる。

最後に、遅れ時間の推定誤差が及ぼす影響について考えておく。ケプストラムや予測残差相関によって推定される遅れ時間 τ_{21} と ν_{21} には誤差が含まれる。推定の時間分解能が限られていることや地面の反射特性が周波数に依存することが原因であるが、測定系の特性(マイクロホンの振幅や位相特性の差)の影響もある。筆者の論文[42]では測定系の誤差について吟味しなかったが、J. Y. Chung らの論文[46]ではこれを論じ、対処の仕方を示している。クロススペクトルを求めるための2系統の測定系(マイクロホン以降の全て)を交換して2回測定を行い、幾何平均するものである。これは非常にうまい方法で測定に先立って測定系を校正する必要がない。しかし、繰り返し述べるように、本章で意図するのは一過性の未知の騒音による測定であり、測定系を交換して測定を繰り返し、処理する時間的な余裕はない。従って、測定系の特性が問題になる時は事前にマイクロホンを同一音場に並べてチャンネル間の特性差を校正しておく必要がある[47]。

遅れ時間 τ_{21} と ν_{21} に誤差が加わった時の影響を計算機でシミュレーションした[42]。図2-4(a)~(b)は ν_{21} に誤差が含まれる時に(2-6)式または(2-7)式による $A(f)$ の位相と絶対値の推定が受ける影響を計算した結果である。 $A(f)$ 、 τ_{11} 、 τ_{21} の値を現実に合わせて設定して(2-4)~(2-5)式に代入し、 $P_1(f)$ と $P_2(f)$ を計算した。それらと誤差を加えた τ_{21} を(2-6)または(2-7)式に代入して、誤差混入時の $A(f)$ を算出した。マイクロホン間隔10cm、音速340m/s、 θ は 0° とした。 $A(f)$ の設定値は図の(a)、(b)に直線で示してある。 τ_{21} に数~十数 μ sの誤差が加わると $A(f)$ に振動的な誤差が生じ、周波数とともに大きくなること、(2-15)の条件を満たす周波数(1.7kHz付近および3.4kHz付近)では影響がさらに大きいことが分かる。

実際の推定においてはケプストラムや残差相関から得られる遅れ時間 τ_{21} と ν_{21} の値を少しずつ変化させて誤差の影響を評価し、誤差が最小になるような推定値を決定した。すなわち、推定に用いた2本のマイクロホン M_1 、 $i=1, 2$ とは異なる高さにもう1本のマイクロホン M_3 を置いて同時に騒音を観測しておき、そのパワースペクトル $P_3(f)$ を、 $A(f)$ や $P_1(f)$ の推定結果から計算した予測値 $P_3(f)$ と実測値を比較する作業を τ_{21} の値を変化させて繰り返し行い、両者が最も良く合致する場合を最終推定値とした[42]。

合致の判断は次式の正規化された二乗平均誤差により行った。

$$E^2 = (1/N) \cdot \sum_{f_1}^{f_2} \{ (P_3(f) - P_3(f)) / P_3(f) \}^2 \quad (2-23)$$

その逐次計算による最小誤差を $E_{f_{1 \rightarrow 2}}$ とすると、推定結果は平均して次式の推定精度の範囲に収まっていると見ることができる。

$$P_3(f) / P_3(f) = 1 \pm E_{f_{1 \rightarrow 2}} \quad (2-24)$$

図2-4(c)~(d)は ν_{21} の誤差が $A(f)$ の推定値に与える影響をシミュレートしたもので、計算条件は(a)~(b)の場合と同じである。 ν_{21} の誤差影響については計算するまでもなく(2-6)~(2-7)式より明らかに、 $A(f)$ の位相に直線的な誤差をもたらすが、振幅には影響しない。図の計算例もそれを裏付けている。

2.4 検証実験

2.4.1 航空機騒音による実験例

観測される騒音から地面の反射特性や地表面インピーダンス、自由音場スペクトルを推定した例を示す。最初の例は東京国際空港(羽田)の滑走路端の側方200mの平坦な地面で観測した離陸する航空機の騒音によるものである。地面には殆ど草が生えておらず柔らかかったが、測定時に激しい雨が降って水を多く含んでいた。そのため、推定された地面の反射特性は完全反射に近い結果になった。

測定には普通騒音計を用いた。マイクロホン直径は1 ϕ である。マイクロホンの地面からの高さは1.05mおよび0.95mである。騒音は2チャンネルのテープレコーダに記録して持ち帰り処理をした。通過帯域1.8Hz~4.5kHzのバンドパスフィルタに通し、サンプリング時間間隔100 μ sで計算機に取り込んだ。パワー、クロススペクトルは512点のFFTで計算した結果を15回平均して推定した。データ長0.768sは、第一部第1章1.1節で示した、定常とみなせる時間の長さ0.1~0.2sに比べると数倍長い。音源までの距離が遠いため、許容できる範囲にあると考えられる。この測定では第3のマイクロホンを置かなかったため、 τ_{12} の誤差影響の低減には $P_3(f)$ の代りに、 $P_1(f)$ と $P_2(f)$ のうち、地面反射特性の推定に使用しなかった方を用いた。

図2-5は観測された航空機騒音のある時刻の処理結果を示したものである。図中の(a)と(b)は上下のマイクロホンで観測されたパワースペクトル $P_2(f)$ 、 $P_1(f)$ 、(c)は両者のコヒーレンス、(d)と(e)は推定された地面の反射特性の位相と振幅、(f)は自由音場スペクトルである。反射特性の推定は(2-6)式による。測定点の地面は柔らかかったが、推定された反射特性は概ね1に近い。パワースペクトルには直流から3.75kHz付近までリップルがきれいに続いている。地面が柔らかかったにも係わらず、反射特性が1に近い理由は、前述の通り、降雨によると考えられる。推定された反射特性は滑らかではなく、スペクトルが成分を持つ直流から3.75kHzまで所々暴れがある。特に暴れが大きいのは(2-15)式で示した解不在条件に該当する1.7kHzと3.4kHz付近、および直流である。より詳細に見ると、(a)の $P_2(f)$ が谷間の(値が小さい)

ところでは某かの乱れがある。スペクトルが小さい3.75kHz以上では位相が直線的に大きくなっている。このような部分はいずれも(c)のコヒーレンシの値が小さくなっている。この例の場合、反射特性が1に近いので谷間の部分は直接音と反射音の干渉でほぼ完全に打ち消しあってパワーが0に近くなるはずであるが、コヒーレンシも小さくなっており、暗騒音の存在や周波数分解能が限られていることから、有限の値にとどまっているものと思われる。このような $P_2(f)$ の真値からのずれは(2-6)式による計算に影響を及ぼす。これが推定された反射特性の暴れの理由と考えられる。(2-6)～(2-7)式は暗騒音が無視できれば理論的に等価であるが、上述のように、実際には幾らかの暗騒音が存在するし、測定系で混入する雑音の影響もあるため、どちらを用いるかで違いが生じる。(2-6)～(2-7)式にはクロスおよびパワースペクトルが、比すなわち伝達特性の形で含まれる。観測信号と相関のない暗騒音はパワースペクトルに和として加算されるため、元来のパワースペクトルの値が小さいところでは伝達特性の値が小さい方にずれる。そのため、 $A(f)$ の推定結果が乱されるものと思われる。対策として次の手順が考えられる。2本のマイクロホンは高さは異なるので、(2-15)式の条件が満たされる周波数を除くと、パワースペクトルの値が2チャンネル同時に0に近づくことはない。故に、2チャンネルのパワースペクトルを比べて値の大きい方に対応する式を用いることにすれば改善される。

図2-5(f)は得られた地面の反射特性から自由音場スペクトルを推定した結果である。全体に反射の影響によるリップルが除去されて滑らかなスペクトルが得られている。高い周波数領域(3.75kHz以上)でレベルが急激に立ち上がっているが、上述の通り、ここは元のスペクトルには成分が無かったところで、コヒーレンシが小さく、推定された反射特性の位相が回ってしまったために起きたことと考えられる。

この自由音場スペクトルと比較するため、パワーケプストラム上で反射のリップルを除去したスペクトルを求めてみた。反射のリップルによりパワーケプストラム上に生じるパルス列をノッチフィルタで除去し、逆フーリエ変換して算出するものである。すなわち、地面の反射特性 $A(f)$ と位相 $2\pi f \cdot t$ で表すと、(2-4)式のパワースペクトルの対数は次式のようになる。

$$\ln(P_1(f)) = \ln(P_2(f)) + \ln[1 + 2|A| \cdot \cos(2\pi f \cdot t) + |A|^2] \quad (2-25)$$

この式の $|A|$ と t はともに周波数の関数であるため、厳密に言えば、フーリエ級数展開することは難しいが、位相の変化は小さく、また、 $|A|$ は1より小さいとすると、次式のように展開できる。

$$\ln(P_1(f)) = \ln(P_2(f)) - 2 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} [((-1)^n / n) \cdot \cos(2\pi f \cdot t - t)] \quad (2-26)$$

この式を見るとパワースペクトル $\ln(P_1(f))$ は自由音場スペクトル $\ln(P_2(f))$ に正弦波を重ね合わせたものになっている。従って、(2-26)式からフーリエ変換して得られるパワーケプストラムは直流付近の大きな成分(自由音場スペクトル $\ln(P_2(f))$)によるインパルス列が加算されたものになる。

図2-6は図2-5(a)と同じデータをこのようにして処理して得たスペクトルであり、(b)はその時のパワーケプストラムとノッチフィルタで除去したパルス列部分を示したものである。図2-6(a)は図2-5(f)と概ね、一致する形状になっている。しかし、厳密に重ね合わせてみると、図2-5(f)の方が3dBほど大きい。J.H.Miles et als.の論文[54]ではノッチフィルタでパワーケプストラムのパルス部分を除去すると直接音と地面反射音のパワーの和が得られると記してある。彼等の説明はテラー展開に基づいており、 $|A| < 1$ の場合には展開表現は(2-26)式の方が正しいと思われるが、図の実験結果は彼等の説明に近いものになっている。ただし、図2-5の例はすでに説明したように、 $|A| \sim 1$ で地面の音圧反射特性は完全反射に近い状態だった。 $A=1$ 、 $\epsilon=0$ の場合には、(2-25)式より、 $P_1(f)$ は $2P_2(f)$ になるので、図2-6の(a)の結果は直接音のパワーの倍に近い値になると考える方が妥当であり、自由音場スペクトルより約3dB大きい結果の説明が見つかる。

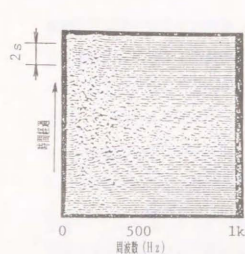


図2-1 草地の上で観測した航空機騒音のパワースペクトルの時間変化の例

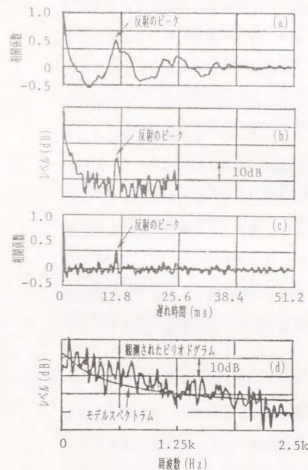


図2-3 マイクロホンに直接到来する音に対する地面反射音の遅れ時間の推定の例
(a) 原波形の自己相関関数
(b) パワースペクトラム
(c) 線形測残差処理
(d) 予測モデルのスペクトル

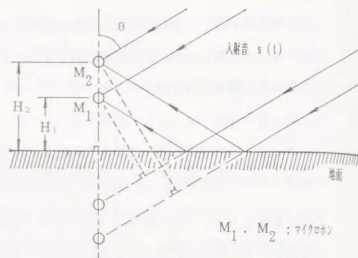


図2-2 地面の反射特性を推定するためのマイクロホンの配置

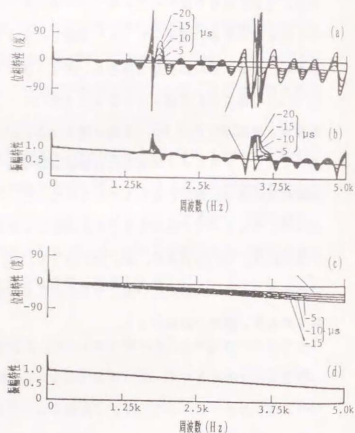


図2-4 遅れ時間 τ_{21} と ν_{21} に誤差が混入した場合の反射特性 $A(f)$ の推定への影響のシミュレーション
(a) τ_{21} の誤差による位相特性の変化
(b) τ_{21} の誤差による振幅特性の変化
(c) ν_{21} の誤差による位相特性の変化
(d) ν_{21} の誤差による振幅特性の変化

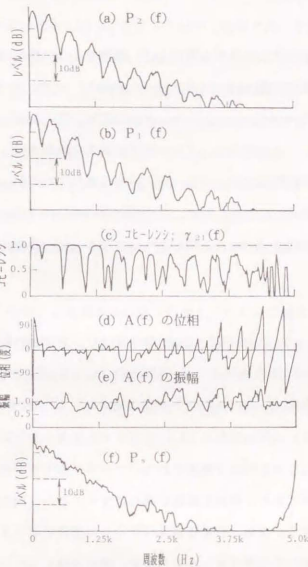


図2-5 航空機騒音による地面反射特性と自由音場スペクトルの推定の例
(a) $P_2(f)$
(b) $P_1(f)$
(c) コヒーレンシ
(d) 反射特性の位相
(e) 反射特性の振幅
(f) $P_0(f)$

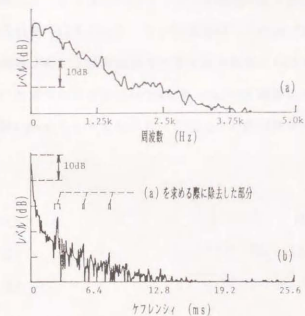


図2-6 (a) パワースペクトラム上で反射の影響を除去したパワースペクトル、(b) 図2-5(a)について計算したパワースペクトラム

2. 4. 2 草地上でのスピーカ実験

地表面インピーダンスが有限な場合として草地を取り上げ、実験をした。測定場所は建物に面したグラウンドの一角で、建物の屋上にラウドスピーカを据え、マイクロホンはグラウンドに三脚で支柱を立てて取り付けた。マイクロホンの数は3本、その地面からの高さは0.81m、0.96m、1.11mである。スピーカの地面からの高さは1.2m、スピーカからマイクロホンまでの水平距離は2.9mであった。地面は概ね平坦だが、若干の傾斜が有った。地面には短い草が生えているが、特別に湿り気が多い感じではなかった。観測した音は録音して持ち帰り、航空機騒音の場合と同じように処理をした。音源は雑音発生器で発生した白色雑音である。

推定した結果を図2-7に示す。(a)と(b)は0.96mと0.81mの高さのマイクロホンで観測された音のワースベクトル、(c)は両者のコヒーレンシである。ワースベクトルが谷間になる部分を除き、コヒーレンシの値は低域から4.3kHz付近まで1に近い。しかし、(d)と(e)の反射特性は3kHz付近までしか滑らかな結果が得られていない。これらの図は1.11mの高さで観測されたワースベクトルを使って遅れ時間の誤差の影響を低減した結果であり、高域周波数の曇れはマイクロホン間の位相特性の差に帰せられるべきものと考ええる。なお、自由音場スペクトルの推定結果(f)で低い周波数(およそ300Hz)の部分に不自然なピークがあるが、理由は分からない。

反射特性(d)と(e)は周波数とともに低減し、2.5kHz付近で0.5に落ちる。この反射特性の結果に(2-18)式をあてはめて、地表面インピーダンス $Z(f)$ を計算した結果が図2-8である。反射特性の小刻みな変動を減らすため周波数軸上で少し移動平均をした上で(2-18)式に入れた。図中の破線はDelany & Bazleyの吸音材の実験式[53]をプロットしたものである。 σ は吸音材の流れ抵抗で、図2-8では $\sigma = 4.00 \text{ cgs}$ 単位として計算した結果を描いてある。

$$Z(f) = R(f) + j \cdot X(f) \quad (2-27)$$

$$R(f) / \rho c = 1 + 9.08 \cdot (f/\sigma)^{-0.75} \quad (2-28)$$

$$X(f) / \rho c = -11.9 \cdot (f/\sigma)^{-0.73} \quad (2-29)$$

反射特性が滑らかに求められた3kHz付近までのインピーダンスの推定結果と実験式の合致は比較的良い。図2-9は同じ場所と同じ音源とマイクロホン配置で季節を変えて実験した結果から算出した地表面インピーダンスである。前の実験は6月、こちらは2月である。図2-9の測定結果に前述の実験式をあてはめると、今度は $\sigma = 2.00 \text{ cgs}$ 単位で良く合致した。この時期は地表面の草が枯れており、6月の実験時より乾燥していた。これより、文献33に記されているように地面の音響的な反射特性は地面の水分の含有率や地表面の状態によって変化することが確かめられた。結局、本章の最初に述べたように、騒音測定で観測される騒音レベルから地面の影響を取り除くには騒音測定と並行して地面の音響特性を調べるのが欠かせない。本章で示した方法はその1つの解答と言える。

なお、この実験では第3のマイクロホンで観測された騒音と(2-23)式を用いて繰り返し計算を行い、遅れ時間の誤差影響を低減している。ここでは周波数の範囲を390Hz~2930kHzとして計算したが、最終的に残った誤差の範囲は(2-23)式より、最初の測定では+1.48dB~-2.25dB、後の測定では+2.1dB~-4.2dBとなった。

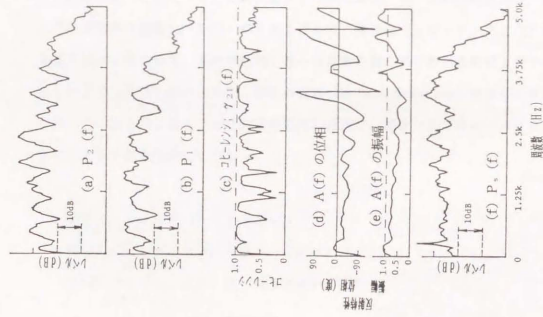


図2-7 草畑の上のスピーカ裏面に
よる地面反射特性と自由音
場スペクトルの測定結果の例

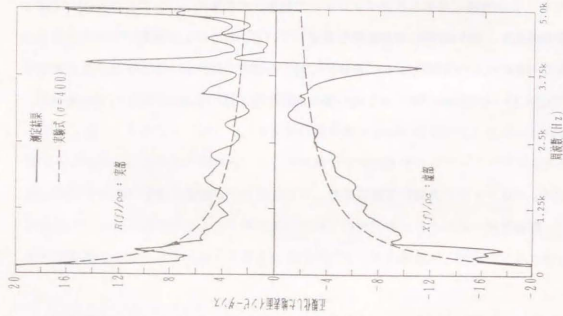


図2-8 図2-7で得た反射特性から
計算した地面表面インピーダン
ス(0月の測定結果)

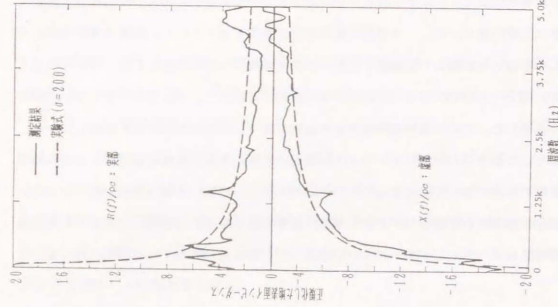


図2-9 図2-8と同一場所での異なる
季節の測定から得た反射特性から
計算した地面表面インピーダン
ス(2月の測定結果)

2.5 球面波伝搬の場合の計算式

音源が測定点から遠くない場合は観測される騒音は球面波として取り扱う必要がある。
この場合、図2-12に示す配置において、2本のマイクロホンで観測される音のパワー
およびクロススペクトルは次式のように表される ($i = 1, 2$)。

$$P_i(f) = \frac{P_s(f)}{R_{s1}^2} \cdot \left| 1 + \frac{R_{a1}}{R_{r1}} \cdot A_1(f) \cdot \exp(-j2rf_{r1}) \right|^2 \quad (2-30)$$

$$P_{21}(f) = \frac{P_s(f)}{R_{s1} \cdot R_{s2}} \cdot \left\{ 1 + \frac{R_{a2}}{R_{r2}} \cdot (A_2(f))^* \cdot \exp(j2rf_{r2}) \right\} \\ \cdot \left\{ 1 + \frac{R_{a1}}{R_{r1}} \cdot A_1(f) \cdot \exp(-j2rf_{r1}) \right\} \\ \cdot \exp(-j2rf_{r21}) \quad (2-31)$$

$$r_{r1} = (R_{r1} - R_{a1}) / c \quad (2-32)$$

$$r_{r21} = (R_{a1} - R_{a2}) / c \quad (2-33)$$

ここで、2本のマイクロホンへの直接音の入射角同士、および反射波同士の差は小さく、
反射特性の差も小さい；

$$\theta_{s1} \sim \theta_{s2} \sim \theta_a, \quad \theta_{r1} \sim \theta_{r2} \sim \theta_r, \quad A_1(f) \sim A_2(f) \sim A(f)$$

と仮定すると、(2-30)式と(2-31)式は平面波の場合と同様に解くことができ次式が
得られる。

$$A(f) = (R_{r2} / R_{a2}) \cdot \exp(j2\pi f \cdot (\tau_{21} + \delta))$$

$$\cdot \frac{P_{z1}(f) / P_z(f) \cdot \exp(-j2\pi f \cdot (\tau_{21} - \delta)) - (R_{a2} / R_{a1})}{(R_{r2} / R_{r1}) \cdot \exp(j2\pi f \cdot (\tau_{21} + \delta)) - P_{z1}(f) / P_z(f)} \quad (2-34)$$

$$A(f) = (R_{r1} / R_{a1}) \cdot \exp(j2\pi f \cdot (\tau_{21} + \delta))$$

$$\cdot \frac{P_{z1}^*(f) / P_1(f) \cdot \exp(-j2\pi f \cdot (\tau_{21} - \delta)) - (R_{a1} / R_{a2})}{(R_{r1} / R_{r2}) \cdot \exp(-j2\pi f \cdot (\tau_{21} + \delta)) - P_{z1}^*(f) / P_1(f)} \quad (2-35)$$

ここで、 δ は次の式であたえられる量である。

$$\delta = (H_2 - H_1) \cdot (\cos \theta_1 - \cos \theta_2) / 2c \quad (2-36)$$

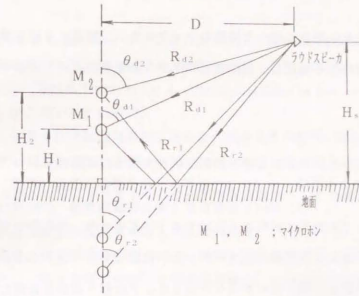


図2-10 音源から測定点までの距離が小さく球面波として音を取り扱わなければならない場合の音源とマイクロホンの位置関係

本章では地面の上に垂直に並べた複数のマイクロホンで観測する航空機騒音等の未知騒音から地面の反射特性を推定し、自由音場スペクトルを算出する手法について研究した結果を述べた。

- (1) マイクロホンへ直接到来する音と地面反射音の到来の時間差はクロススペクトルの位相となって現れる。この時間差が地面からマイクロホンまでの高さにより異なることを利用して地面の反射特性を推定する手法を考えた。反射特性が得られると、反射の影響を除去した自由音場スペクトルが推定できることが示された。直接音と地面反射音の到来時間差はパワーケプストラムや線形予測残差相関により推定した。
- (2) 航空機騒音による検証実験の結果、考え方の妥当性が示された。検証実験に用いたマイクロホン間隔は10cmと大きかったため、推定された反射特性は解不在条件に該当する周波数の付近で大きく乱れた。測定は柔らかな地面の上で行ったが、雨で水分を多く含んでいたため、音響的には完全反射に近い結果が得られた。
- (3) 有限の地表面音響インピーダンスの場合の例として、草地の上でスピーカから雑音を放射して測定した。得られた地表面インピーダンスはDelany & Bazleyの吸音材の実験式と比較的良く合致した。同じ場所で季節を変えて測定を繰り返したところ、当てはまる実験式のパラメータ（流れ抵抗）は異なる値となった。この結果より、地面の音響反射特性は水分の含有率や地表面の状態で変化することが確かめられたと言える。
- (4) 音源が十分速くない場合には球面波として扱わなければならない。その場合の推定式を導いた。

- [1] J. E. Piercy, T. F. W. Embleton & L. C. Sutherland, "Review of noise propagation in the atmosphere," *J. Acoust. Soc. Am.* 61, 1403-1418 (1977).
- [2] M. E. Delany, "Sound Propagation in the atmosphere; a historical review," *ACUSTICA*, 38, 201-223 (1977).
- [3] 日高孝之, 音波の屋外伝搬における地表面・気象条件の影響に関する研究 (学位論文, 1986).
- [4] 音響学会, 騒音の伝搬に影響を与える諸因子について—解説と文献抄録集 (1983).
- [5] 環境庁告示第54号, 航空機騒音に係る環境基準 (1973.12).
- [6] 環境庁, 航空機騒音監視測定マニュアル (1988.7).
- [7] 日本工業規格, 普通騒音計 (JIS C 1502, 1990) 及び精密騒音計 (JIS C 1505, 1988).
- [8] 山田, 吉村, "航空機騒音の測定と地面の影響," *日本音響学会講演論文集*, 413-414 (1987.3).
- [9] J. Igarashi & I. Yamada, "Aircraft noise monitoring by short-term measurement," *J. Acoust. Soc. Jpn. (E)*, 10, 197-204 (1989).
- [10] 山田, 山本, 吉村, "地表面に沿った音の伝搬特性の変動", *日本音響学会講演論文集*, 419-420 (1984.3).
- [11] P. H. Parkin & W. E. Scholes, "The horizontal propagation of sound from a jet engine close to the ground at Radlett," *J. Sound & Vib.* 1(1), 1-13 (1964).
- [12] P. H. Parkin & W. E. Scholes, "The horizontal propagation of sound from a jet engine close to the ground at Hatfield," *J. Sound & Vib.* 2(4), 353-374 (1965).
- [13] N. Aoshima & J. Igarashi, "Field measurement of noise propagation by W-sequence correlation method," *I. Space & Aero. Sci. Res. NOTE*, 9, (1975).
- [14] 石井, 五十嵐, 山田, 幹, "信号検出の手法を用いた騒音伝播測定," *東京大学宇宙航空研究所報告*, 14(1)C, 619-642 (1978.3).
- [15] 石井, 山田, "断続する試験音を用いた音響測定," *日本音響学会騒音研究会資料*, N-7807 (1979.3).
- [16] 石井, 山田, 幹, 五十嵐, "同期積分の手法による騒音伝播測定," *日本音響学会誌*, 35(5), 226-234 (1979).
- [17] 山田, 石井, "野外における音の伝搬特性の変動の測定 (断続する試験音を用いた音響測定その2)," *日本音響学会講演論文集*, 337-338 (1979.6).
- [18] 山本, 山田, 山下, "音の断続手法を用いた地表面近傍の音響特性の測定," *日本音響学会講演論文集*, 243-244 (1980.10).
- [19] 山本, 山田, 山下, "音の断続手法を用いた地表面近傍の音響伝搬特性の測定—その2: 遮蔽物の介在する場合," *日本音響学会講演論文集*, 55-56 (1981.5).
- [20] 山田, 山本, 山下, "地表面近傍における伝搬音のゆらぎと地表面性状の関係—模型実験による検討," *日本音響学会講演論文集*, 57-58 (1981.5).
- [21] 山本, 山田, "地表面に沿った音の伝搬特性の時間変動について," *日本音響学会*

- 講演論文集, 463-464 (1981.10).
- [22]吉村, 木村, 田矢, 山田, 山本, "音の断続手法を用いた地表面近傍の音響伝搬特性の測定—その3:伝搬距離が400mまでの場合," 日本音響学会講演論文集, 459-460 (1981.10).
- [23]山本, 山田, "音の断続手法を用いた地表面近傍の音響伝搬特性の測定—その4:音源, 受音点の高さが異なる場合について," 日本音響学会講演論文集, 461-462 (1981.10).
- [24]山田, 吉村, 山本, 山下, "地表面に沿った音の伝搬特性の時間変動について—変動の分布について," 日本音響学会講演論文集, 383-384 (1982.3).
- [25]山本, 吉村, 山田, 山下, "地表面に沿った音の伝播特性の測定—受音点を円周上に配置した場合," 日本音響学会講演論文集, 405-406 (1982.10).
- [26]吉村, 山本, 山田, 山下, "地表面に沿った音の伝播特性の測定—複数の音源からの寄与," 日本音響学会講演論文集, 407-408 (1982.10).
- [27]山田, 吉村, 山本, "地表面に沿って伝播する音の空間相関の測定," 日本音響学会講演論文集, 403-404 (1982.10).
- [28]I. Yamada, K. Yamamoto et al., "Measurements of level fluctuation of noise propagation over ground," 11-th ICA, 69-72 (1983).
- [29]K. Yamamoto, I. Yamada & M. Yamashita, "Measurement of sound propagation characteristics over ground using intermittently radiated sound," 11-th ICA, 65-68 (1983).
- [30]T. F. W. Embleton & J. E. Piercy, "Relation between steady and normally distributed sound levels," J. Acoust. Soc. Am. 58, S108-9(A), (1975).
- [31]M. Yamashita & K. Yamamoto, "Scale Model Experiments for the Prediction of Road Traffic Noise and the Design of Noise Control Facilities," Applied Acoustics, 31, 185-196(1990).
- [32]石川, 新統計学(横書店), 196-201.
- [33]P. J. Dickinson & P. E. Doak, "Measurements of the normal acoustic impedance of ground surfaces," J. Sound & Vib., 13(3), 309-322 (1970).
- [34]S. P. Pao, A. R. Wenzel & P. B. Onclay, "Prediction of ground effects on aircraft noise," NASA, TP-1104, (1978).
- [35]T. F. W. Embleton, J. E. Piercy & N. Olson, "Outdoor sound propagation over ground of finite impedance," J. Acoust. Soc. Am., 59, 267-277 (1976).
- [36]J. E. Piercy, T. F. W. Embleton & N. Olson, "Impedance of soft ground and its effect on practical measurements," J. Acoust. Soc. Am., 54, 341(A), (1973).
- [37]Fr. Mechel, "New method of impedance measurement," 6-th ICA, H217-220(1968).
- [38]幹, 石井, "パイロット信号による同期相関法," 日本音響学会誌, 35, 554-561 (1979).
- [39]Y. Miki, "Application of the synchronized correlation method to the measurement of sound propagation over a ground surface," J. Acoust. Soc. Jpn. (E), 1, 157-166 (1980).
- [40]A. H. Marsh, "Recommendation for field measurements of aircraft noise," NASA CR-3540, (1982).
- [41]山田, 五十嵐, "航空機騒音の測定と予測," 騒音制御, 12(1), 11-16 (1988).
- [42]I. Yamada, "Cross spectral method for the estimation of ground-reflection characteristics and free-field spectrum of noise," J. Acoust. Soc. Jpn. (E), 1(4), 249-259 (1980).
- [43]山田, 石井, "航空機騒音を利用した地表面反射特性の測定," 日本音響学会講演論文集, 339-340 (1979.6).
- [44]山田, 石井, "地表面インピーダンスと自由音場スペクトルの推定(クロススペクトルを用いた地表面反射特性の測定)," 日本音響学会講演論文集, 325-326 (1979.10).
- [45]山田, 石井, "クロススペクトルを用いた地面の反射特性と騒音の自由音場スペクトルの推定—球面波性考慮—," 日本音響学会講演論文集, 367-368 (1980.5).
- [46]J. Y. Chung & D. A. Blaser, "Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties. I. Theory, II. experiment," J. Acoust. Soc. Am., 68(3), 907-921 (1980).
- [47]D. A. Blaser & J. Y. Chung, "A transfer function technique for determining the acoustic characteristics of duct systems with flow," INTER-NOISE 78, 901-908 (1978).
- [48]R. B. Lawhead & I. Rudnick, "Acoustic wave propagation along a constant normal impedance boundary," J. Acoust. Soc. Am., 23, 546-549 (1951).
- [49]P. M. Morse & K. U. Ingard, Theoretical acoustics (McGraw-Hill Inc., 1968), 259-263.
- [50]A. V. Oppenheim & R. W. Schaffer, Digital signal processing (Prentice Hall Inc., 1963).
- [51]小畑, "線形予測によるエコーの検出," 日本音響学会誌, 31(9), 529-535 (1975).
- [52]J. Makhoul, "Linear prediction: a tutorial review," Proc. IEEE, 63, 561-580 (1975).
- [53]M. E. Delany & E. N. Bazley, "Acoustical property of fibrous absorbent materials," Appl. Acoustics, 3, 105-116 (1970).
- [54]J. H. Wiles, G. H. Stevens & G. G. Leiniger, "Application of cepstral techniques to ground reflection effects in measured acoustic spectra," J. Acoust. Soc. Am., 61, 35-38 (1977).
- [55]INTERNATIONAL STANDARDS AND RECOMMENDED PRACTICES, Environmental Protection ANNEX 16 Vol.1, Aircraft noise (ICAO, 2nd edition, 1988).

謝辞

本論文は著者が東京大学宇宙航空研究所に助手として在籍した当時から財団法人小林理学研究所に勤務する現在までに行った研究の成果を取りまとめたものである。第一部の音源同定の研究および第二部の騒音の屋外伝搬の研究は財団法人小林理学研究所で行った。第二部のクロススペクトル法による地面の反射特性と自由音場スペクトルの推定の研究は宇宙航空研究所で行ったものである。本論文を仕上げるまでに非常に多くの方々のご指導やご協力、ご助力を仰いだ。心から謝意を表する。

東京大学工学部先端科学技術研究センター 石井 泰 教授には研究の端緒から論文の取りまとめまで本研究の全般にわたりご指導を仰いだ。相関関数やスペクトルに関する基礎もご教示頂いた。屋外伝搬の測定は石井研究室で携わった同期積分法の研究に基づく。

小林理学研究所 五十嵐寿一 理事長（東京大学名誉教授）は研究の発端となり今も課題であり続ける航空機騒音の問題に取り組む機会を与えて下さった。本論文をまとめる際に有益なご助言を頂いたこと、終始激励して下さいたことも記し、謝意を表す。

航空機騒音の音源同定の研究を行う際に、研究の動機となった航空機騒音の自動監視システム設計の業務に携わる機会を与え、飛行場の周辺での測定に便宜を図って下さった運輸省、防衛施設庁、新東京国際空港公団、航空公害防止協会（吉岡 淳氏）、防衛施設周辺整備協会（岡本圭弘氏、月岡秀文氏）、小林理学研究所（所長、山下充康氏）に感謝する。数多くの屋外測定を一緒にに行い、研究内容について討議して頂いたリオン株式会社（林 範章氏）にも感謝する。屋外測定とデータ分析にご協力頂いた落合博明、大島俊也、牧野康一、三田隆英氏に感謝する。機種識別及び屋外騒音伝搬の研究は清水進、横田明則、山本貢平の各氏を含む多くの方々との共同研究に基いてまとめたものであり、心から感謝する。最後に、本論文の仕上げに際して図面の作成等で水野八重子氏にご助力を頂いた。

付録

航空機騒音の評価、予測、自動監視

はじめに

第一部では航空機騒音に関する音源同定の方法について検討してきた結果を述べた。いずれも航空機騒音の予測の基礎となるデータを取得し、予測の妥当性を検証するために行われる騒音の自動監視に必要な機能である。第二部では航空機騒音の測定による評価を前提として地面に沿って伝搬する騒音のレベル変動を調べた結果を示した。地面の及ぼす影響が変化することから、地面の上で観測される騒音から地表面の音響反射特性を推定し、その影響を取り除いた自由音場スペクトルを推定する方法を検討した結果を述べた。このように第一部も第二部も航空機騒音の評価に関係する研究である。そこで、この付録では研究の背景をなす航空機騒音の評価や予測の方法、航空機騒音の自動監視等について筆者の研究の成果を引用しつつ簡単に述べる。

空港周辺の航空機騒音を抑制するため昭和48年に環境庁が「航空機騒音に係る環境基準」[1]を定めてから16年の歳月が経過した。この間に種々の騒音対策や規制が実施され、騒音に関する環境は改善されたが、基準に掲げられた目標は依然達成されていない。むしろ、航空需要の増大につれ、悪化の兆候すら見受けられる。このように航空機騒音は今もなお重大な環境問題の一つであり、騒音の監視や影響の評価を今後も継続することが大切である。自衛隊や米軍の飛行場でも運用の目的や機能からして騒音の抑制は容易ではなく「防衛施設周辺の生活環境の整備等に関する法律」[2]などに基いて家屋移転や居室防音工事等の対策が行われるに止まっているのが現状であるが、対策の根拠資料の取得のため騒音の自動監視や影響評価が欠かせない。環境基準が告示された頃と現在を比べると、民間の航空輸送は確実に増加している。しかし、航空機の離着陸回数は空港の処理能力や騒音対策等の理由から横ばいで、需要の増加は昭和50年あたりから始まった第3世代の大型旅客機導入でカバーされた。大型機の導入は運航方式の改良とともに空港周辺の騒音軽減に役立った。さらに低騒音のエンジンを装備した第4世代の航空機が導入され、騒音影響範囲は一段と狭まったが、発生源側の騒音低減の努力は限界に近い。今後、運航回数の増加とともに騒音の影響が大きくなることが予想される。飛行原理や騒音特性が固定翼航空機と異なるヘリコプタの運航も急速に活発化している。このような状況から、航空機騒音の評価や予測、測定方法、監視機能、測定点配置について見直す必要が生じた[3]。

付録 1 航空機騒音の評価と予測

1. 1 航空機騒音の特徴

航空機騒音は航空機が上空を通過する際に発生する一過性の騒音が主であり、地上でエンジン試験をする際の長々と続く騒音を含めても一回の騒音事象は数秒～数分で終わる。一過性騒音であることは航空機騒音を評価する基本であり、第一部の音源同定でも処理の基本として用いた。ここでは航空機の種類や騒音の特徴について簡単に述べる。

航空機は飛行原理で固定翼と回転翼の航空機に分類される。固定翼機はジェット機とプロペラ機に分けられる。ジェット機はタービジェットエンジンで推進力を得ているが、大径のファンでエンジンに取り込む空気流の一部をエンジン外側にバイパスしてジェット排気を包み込み騒音の低減と推力の増大を図るターボファン型が主である。騒音発生源はジェット排気とタービン、コンプレッサ等である[4]。ジェット排気は四極子音源として斜め後方に低域の強い広帯域騒音を放射する[5]。エンジンの外側を通過する空気流量の割合をバイパス比という。その大小で騒音の特性が異なる。最新の旅客機はバイパス比が5～7と大きく、騒音レベルは大幅に下がったが、ファンの回転による数kHzの純音成分が際立つ。このファン音は前方に指向性を持ち、頭上通過の直前に顕著に聞こえるため、第一部第1章の航空機騒音識別の信号の白色化で問題となった。図1-1にターボファンエンジンの騒音の指向性を示す[4]。プロペラ機のエンジンはターボプロップとレシプロに分けられるが、いずれも騒音はプロペラの回転音が主で進行方向に指向性を示す。騒音のスペクトルは低い周波数に集中するが、YS11は2kHz付近にも強い純音成分を持つ。従来、航空機騒音と言えばジェット機の音であったが、最近では回転翼機（ヘリコプタ）の数が著しく増加してきた。市街地の上空を飛行すること等から騒音問題もクローズアップされている[6, 7]。ヘリコプタはロータを回転させて揚力と推力を得ているが、その回転で発生する翼端渦を次のブレードが叩くことにより独特の衝撃性騒音（ブレードスラップ騒音）が発生する。

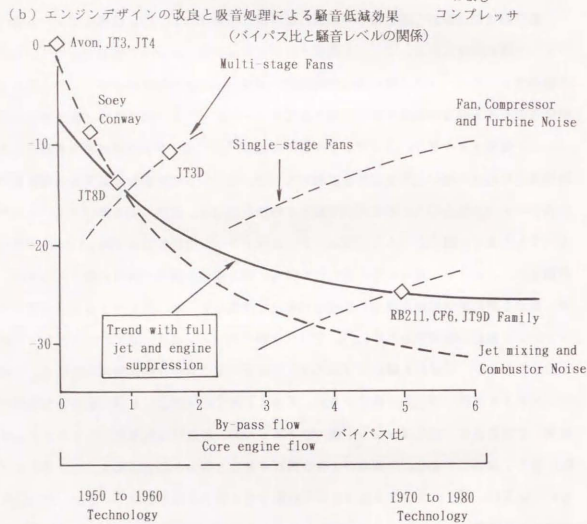
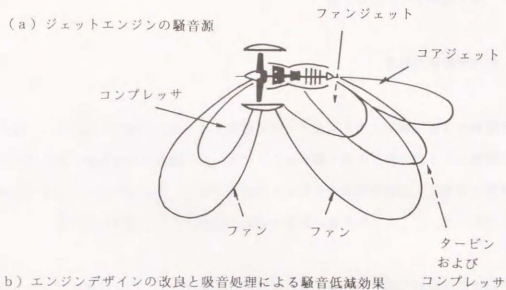


図1-1 ジェットエンジンの騒音特性

1.2 航空機騒音の評価

まず、PNLとEPNLについて述べる[8,9]。PNL (Perceived Noise Level) は K.D.Kryter の研究に基づく騒音評価量である。航空機騒音だけを対象に考案されたものではないが、ISOの「空港周辺における航空機騒音の記述方法」[10]に採用されてから広く航空機騒音の評価に用いられるようになった[8]。航空機製造時の騒音証明の評価量としても用いられている[11]。PNLは騒音のバンド分析に基いて計算される(バンド毎にうるさを表すノイズネス(noisiness)に変換し、結果を合成して全体のノイズネスとする)。その値と等しくなる1kHzバンドのノイズネスに対応する音圧レベルをPNLとする)。広帯域騒音に純音性の音加わると一層うるさく聞こえるという事実に基づいて純音補正手順が追加された。それがPNLT (Tone-corrected PNL)である。航空機と一口にしても戦闘機、ジェット旅客機、プロペラ機、ヘリコプタと種類が多く、音の継続時間や騒音特性に大きな違いがある。この違いを乗り越えて単一の評価量で比較することを目的として考案されたのがEPNL (Effective PNL)である。騒音のうるささについて等エネルギー則が成り立つと仮定して時々刻々のPNLTを時間的にエネルギー積分した値としてEPNLは定義される[8]。

空港の周辺では日々多くの航空機騒音が観測される。このように繰り返し暴露される騒音のうるさを評価するため多くの指標が提案されている。WECPNL (Weighted Equivalent Continuous PNL) もその一つである。WECPNLはICAO (国際航空連盟)が飛行場周辺の土地利用の騒音指標として定義した評価量であり[11]、空港で運航される全ての航空機騒音のEPNLを発生時刻と季節補正をしてエネルギー加算し、その結果を1日で平均してレベルに表した量である。わが国で航空機騒音の評価に用いられるWECPNL[1]はICAOの定義式の近似である。つまり、PNLをA特性騒音レベルのピーク値+13で近似し、継続時間を2.0秒と近似し、季節補正を省いて得られる[12]。EPNLやWECPNLはPNLを基本とするエネルギー評価量である[12]が、わが国ではA特性騒音レベルで近似したため、単発騒音暴露レベル L_{AE} や昼夜騒音レベル L_{dn} 等のエネルギー評価[13~17]に近いものになっている。エネルギーを基本にする種々の騒音を同一方法で評価したり、比較することが可能になる。第一部第4章の機種識別でバンドレベルを L_{Amax} で相対化した背景には騒音評価量がA特性に基づくこともある。

筆者らは航空機騒音、特に、ヘリコプタ騒音を評価する指標や衝撃性の補正の必要性について聴感実験を行って調べてきた[18-24]。しかし、その詳細を論じることは本論文の目的を外れるため、ここでは2つの聴感実験の結果を示すにとどめる。

単発騒音暴露レベル L_{AE} でヘリコプタ騒音を適切に評価できることを確かめるために実施した聴感実験の結果の一部を図1-2に示す。環境庁の委託でヘリコプタ騒音の評価指針を作成するため行った調査[24]の一部である。実験はME法(Method of Magnitude Estimation)[8]で行った。ME法では被験者に試験音を聞かせ、そのうるさを正の数で答えさせる。試験音には屋外で測定したヘリコプタ、プロペラ機、大型ジェット機の音が含まれる。ヘリコプタ騒音には衝撃騒音(ブレッドスラップ音)の強いもの、中くらいのもの、弱いものを用意した。被験者は47名、実験は無響室で行った。図1-2(a)と(c)は騒音のうるささの主観評価値とCおよびA特性のピーク騒音レベル(L_{Cmax} と L_{Amax})の対応を調べた結果、(b)と(d)は騒音のうるささの主観評価値とCおよびA特性の単発騒音暴露レベル(L_{CE} と L_{AE})の対応を見た結果である。図の主観評価値は被験者全員の幾何平均値である。図より、ピーク騒音レベルおよび単発騒音暴露レベルと騒音のうるささのあいだに強い正の相関が認められ、特に衝撃音の補正をしなくとも、ヘリコプタを含めた航空機騒音全体のうるささの評価指標として適切であることが分かる。

今一つ、プロペラ機YS11の騒音がジェット機と同一の評価量で記述できることを確かめるために行った聴感実験[25]の結果を図1-3~図1-4に示す。実験はME法とラウドネス連続判断法で行った。後者はME法と同様の主観評価を連続的に行わせるもので、ピンクノイズで作った標準音の大きさをスライドボリュームで調節することによって、被験者は試験音のラウドネスを時々刻々感じる通りに表現する。被験者は37名、無響室で音を提示した。試験音は図1-2の場合と同じく屋外で測定した音がもとなっている。図1-3はME法を用いて主観評価と物理量(ピーク騒音レベル、単発騒音暴露レベル、EPNL)の対応を調べた結果である。図1-4の方はラウドネス連続判断法で主観評価(標準音のレベル変化の最大値)と物理量の対応を見た結果である。いずれも良い相関を示しており、プロペラ機とジェット機に顕著な差は認められなかった。

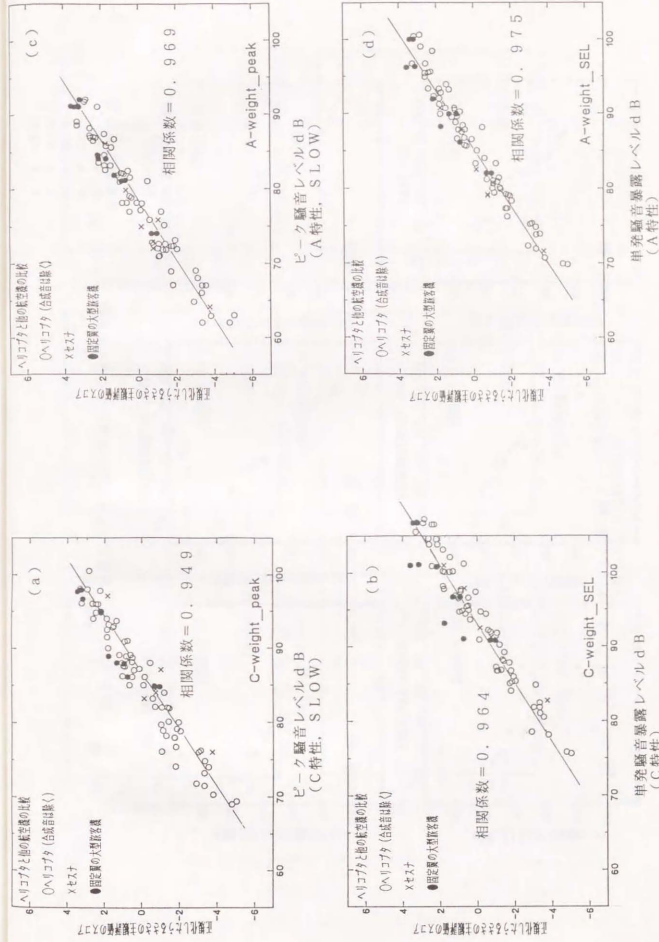


図1-2 ヘリコプタと他の航空機の騒音のうるささの比較(ME法)

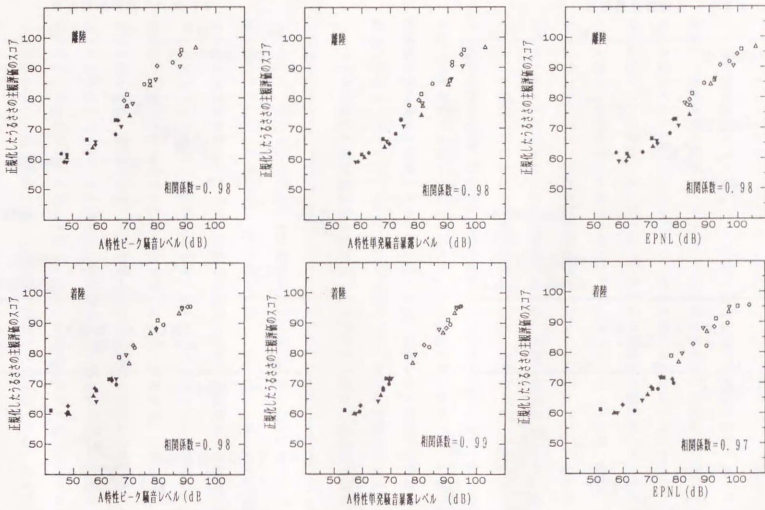


図1-3 プロペラ機とジェット機の騒音のうるささの比較 (M法)

屋外 屋内 航空機
 ○ ● YS11
 △ ▲ DC9-41
 □ ■ B747
 ◇ ◆ B767
 ▼ ▽ MD81

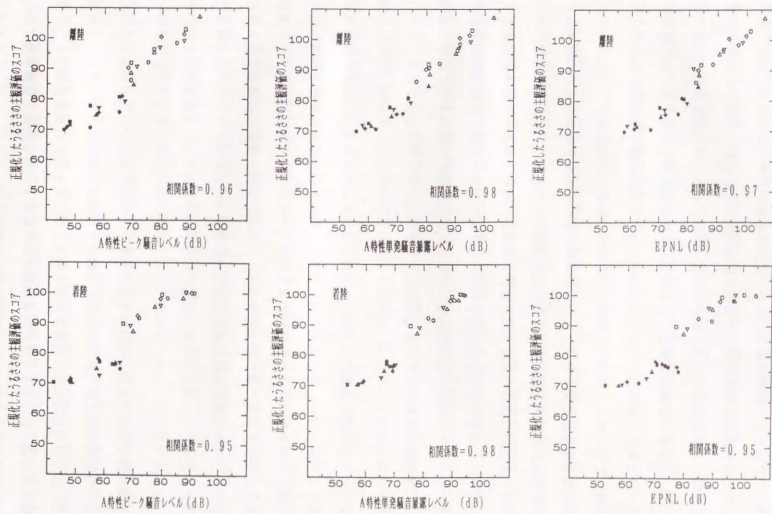


図1-4 プロペラ機とジェット機の騒音のうるささの比較 (ラウドネス連続判断法)

1. 3 航空機騒音の予測

空港周辺で観測される航空機騒音は多くの要因の影響を受けて変化する(図1-5)。第二部第1章では飛行経路がばらついて地面反射の状況が変化しピーク騒音レベルに影響を及ぼすのを調べた結果を述べた他、気象や地面の影響によるレベル変動について調べた結果を述べた。このような変動を考えると空港周辺の航空機騒音を評価するには短期間の測定では不十分であり、長期間にわたって観測を行い統計的に処理する必要があることが分かる。付録2ではこのような通年の測定を行うための騒音の自動監視について述べるが、空港の周辺地域全体を漏りなくカバーするには非常に多くの測定点を設けなければならない、設置費用や保守運用に掛かる費用や人員を考えると非現実的である。しかも騒音測定では、騒音対策のために飛行経路や運航手順を変更する場合に事前に効果や影響の評価を行うことはできない。このような場合には騒音レベルの予測コンターを描いて騒音対策や土地利用に役立てるという手順が一般的である。ただし、予測計算が可能なように現実の複雑な飛行状況や騒音暴露状況について仮定を設けたり簡略化したりする必要がある。

このように空港周辺の騒音評価は測定と予測の両面から行われるが、両者で得られる結果は必ずしも一致しない。理由は次の通りである。飛行状況や騒音の暴露が複雑に変化するため、限られた期間の限られた観測による測定データは事実ではあっても1つの実現値に過ぎない。一方、予測に用いる基礎騒音データや運航情報は現実の複雑な状況を単純化したもので、平均的な騒音暴露状況を想定して計算するに止まる。それ故、空港周辺の騒音を適正に評価するには実測と予測を併用し、総合的に評価するのが最善と考えられる。

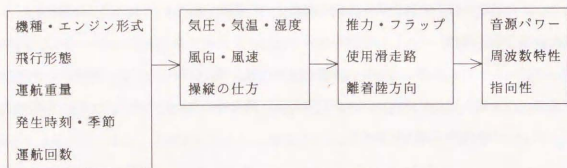
騒音予測の考え方には大きく分けて2通り有る。一つは交通流シミュレーションで、コンピュータの中で音源の移動に伴う騒音の放射、伝搬および観測の過程を再現するものである。道路騒音でしばしば用いられる。自動車や切れ目なく通行し、比較的定常な騒音レベルの変動が観測される場合にはうまくモデルを構築すれば騒音レベルの変動を模倣することは難しくない。道路騒音では評価にレベル統計量(時間率騒音レベル L_x)を用いるため、交通流シミュレーションが有効である。しかし、航空機の場合には飛行経路等の自由度が大きく、繰り返し間隔が自動車よりも遙かに長い一過性騒音であるため、シミュレートは簡単ではないし、 L_x による評価が用いられる訳ではないので有用な手法とならない。

もう一つの考え方は航空機が測定点上空を通過する間に観測される騒音のエネルギー積分値(EPNLまたは単発騒音暴露レベル L_{AE})を計算してエネルギー加算する方法である。この方法では予め観測点から飛行経路までの距離と騒音レベル(ピーク騒音レベルまたは単発騒音暴露レベル)の関係を表すテーブルを機種や飛行形態、エンジン出力別にデータベースとして用意しておき、実際の運航状況と飛行経路に応じて、観測点から飛行経路までの距離を出して騒音レベルを計算する手順を繰り返し、エネルギー的に累積することによって騒音評価量を計算する。

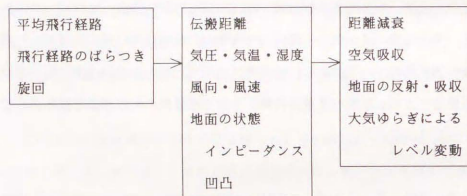
以前作成した固定翼機の騒音を予測するカーブフォリア型コンタープログラムはこの方法によるものである[26, 27]。予測計算には騒音レベルと距離の関係を表す騒音データベース、エンジン出力やフラップ条件等の運航パラメータ、標準飛行経路とそのばらつき、滑走路と飛行経路の利用率、時間帯および機種・飛行形態別の運航回数、地面による余剰減衰などを用いる。第一部第2章の飛行位置検出や移動方向検出は飛行経路の確認に利用できるし、管制から運航情報を入力できない米軍等の特殊飛行場の場合には滑走路の使用割合や運航回数の推定のために音源の移動方向検出や航空機騒音の判別機能を組み込んだ騒音の自動監視が利用される。

予測計算の結果と比較検証を行うデータを騒音測定で取得するには測定期間の長さや回数、時期について事前に十分検討する必要がある。航空機の離着陸方向は風向きで変る。航空機の運航状況は飛行場により異なる。民間空港では運航のスケジュールや手順は長期にわたって変化が小さいし、深夜の離着陸も無い。自衛隊や米軍の飛行場では戦闘機等が訓練をするため、飛行形態や飛行回数の変化が極端に大きく、夜間運用もある。プロペラ機やヘリコプタが主な飛行場の状況もまた異なる。民間空港では環境基準に基いて1週間測定することが原則であるが、季節によって運航状況や騒音放射、伝搬特性等が変化するので少なくとも夏冬の2度、測定を行うことが推奨されている[1]。特殊飛行場では飛行状況や騒音暴露が極端に変化するので通年測定と短期測定を併用して評価する方法が推奨されている[29]。

発生源側の要因



伝搬経路の要因



受音点側の要因

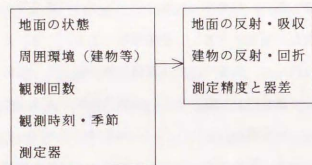


図1-5 航空機騒音の発生から観測に至るまでの影響要因

付録. 2 航空機騒音の自動監視

国が大規模空港周辺の航空機騒音を監視するために設置する自動監視システムの設計や適地調査に何度か携わってきた[32-36]。その経験に基づいて自動監視に関する基本的な考え方や機器の設置場所の選び方について簡単に紹介し、第一部と第二部の研究の動機を明らかにする。

2. 1 自動監視の考え方

航空機騒音の性状は観測されるまでの各段階（発生源、伝搬経路、受音点）で様々な要因の影響を受けて変動する。航空機が離着陸する回数も飛行場の種類や季節等によって変化する。民間空港では季節とともに輸送需要が増減し、それに伴って運航便数や機材が変更される。特殊飛行場では社会情勢によって演習の有無が変り、飛行回数も変化する。図2-1に1日毎に計算したWECPNLの値の一年間の変化をプロットした例を示す。このように飛行場周辺の騒音状況を測定で評価するには長い年月にわたり観測を継続することが不可欠である。そしてその手段は自動監視装置を用いる方法以外に考えられない。測定対象となる周辺地域は非常に広く設置運用に多くのコストが掛かることも考えると、自動監視装置をくまなく配置することは不可能であり、個々の地域を代表する場所、数〜数十ヶ所に配置するのがせいぜいである。その解決策として、自動監視装置による通年の測定と測定員を配置して行う短期の測定を併用して飛行場周辺の騒音を総合的に評価する方法が用いられる。この考え方が飛行回数の変化が大きい特殊飛行場について有効であることはすでに確かめた[29-30]。環境庁の依頼で作成した環境基準を補うマニュアル[31]でも通年と短期の2種類の測定点を設けるように記述した。

2. 2 自動監視の測定点の選び方

通年測定を行うところは飛行場周辺の地域を代表する場所を選ぶことが基本になる。騒音の監視は技術的な観点だけでなく、しばしば行政的な地域対策の観点から論議される。測定点の数や配置についても様々な視点から検討しなければならないが、ここでは技術的な側面のみを簡単に述べる。

通年測定点として選ぶ場所には少なくとも飛行経路の直下付近で飛行場に離着陸する殆どの航空機騒音を観測できるところを含める。できれば、滑走路の近傍が良い。設置の目的は騒音評価の基準となるデータを取得することにあるが、飛行場に離着陸する全ての航空機騒音が観測されると騒音予測に用いる総離着陸回数の年間統計の算出に活用できる。今のところ、第一部第4章で述べた通り、機種を正確に同定するに至らないため、全ての航空機の離着陸回数の合計を推定するに過ぎないが、特殊飛行場では他に情報がないことも少なくなく、自動監視のデータが利用されている。民間空港ではこの統計を管制の運航情報から入手している。しかし、情報の目的が異なる騒音監視の観点からは不確定な部分が残るので、自動監視データから知ることができれば騒音とうまく対応するのが好ましい。さらに、管制の運航情報には離着陸方向の情報が入っておらず、滑走路照明の端子盤から信号を取って補っている。これも第一部第2章で述べた水平方向の相互相関関数によって音源の移動する方向を検出することで観測される騒音から知ることができる。飛行経路が大きく旋回するところでは一方の相関では音源の移動方向をとらえにくい場合がある。その場合には第一部第3章で述べた3次元的な移動方向の検出が役に立つ。

自動監視装置の設置場所を決める前に適地調査が行われる。周辺の環境が長い年月にわたって変化しないこと、機器を安全に設置しておけることが必要である。第二部第1章、第2章で述べたように、地面反射は観測される騒音にばらつきをもたらし、航空機騒音の識別を妨げる。建物等による不必要な反射や回折がないような場所を選ぶ。測定点は騒音が問題になるところに選ぶので、航空機の音が大きいのは当たり前だが、それでも長い間には航空機以外の予期せぬ音が観測される。測定場所や時間帯、季節によって種類は様々だが、例えば、チャイムやサイレン、モーターバイクの音、セミやカエルの鳴き声、強風による風雑音や風切り音、工事作業の音である。暗騒音の混入の様子は測定点毎に異なる。

そのため、測定点毎に独自に、観測される音が航空機の音であるか否かを判別する機能を持つ必要がある。

測定点の適地調査の一環として測定点で音環境の時間変化を測定した例を図2-2に示す。長時間にわたり2分毎の等価騒音レベルを測ったものである。(a)、(b)とも同じ空港の異なる場所で同じ日に観測した結果である。その日は昼過ぎまで離陸、その後、着陸に変わった。(a)は飛行経路から側方に1km離れた小学校屋上で測定した結果で、航空機騒音の有無によって観測される等価騒音レベルに顕著な差が見られ、自動監視する上で支障の無いことがわかる。この図で12時に暗騒音が小さくなっているのは昼食時である。(b)は滑走路端の測定点の結果である。10時過ぎに騒音レベルが全体的に高くなっているのは滑走路端手前で離陸の順番を待って待機する航空機のアイドリング騒音によるもので、離陸基準点として騒音ピークから離着陸時刻を算出するのに支障は無い。

自動監視では測定点周辺の音の環境を総合的に評価するため、航空機騒音に限らず、観測される一過性騒音のピークはできるだけ多く記録したい。しかし、記憶容量に限りがあるので長い期間の観測データを装置中に保持するにはあまり意味のないデータは捨てる必要がある。この相反する条件を満たすように騒音レベルと継続時間に閾値条件を設けてデータの足切りをする。適地調査では測定点毎に航空機騒音のピークレベルと継続時間がどのように分布するかを調べる。図2-3～図2-4に測定例を示す。いずれも大阪国際空港の測定結果である。図2-3は着陸側の例で(a)の方が(b)より滑走路に近い。航空機騒音のデータは2つのグループに分かれている。これは測定点が2本有る滑走路の片方の直下付近であるため、真上を通過する航空機の騒音ともう一本の滑走路へ着陸する航空機の騒音でレベルが異なるためである。レベルの小さい方のグループが航空機以外の騒音と混じりあっているのが分かる。図2-4は離陸側の例で、(a)は飛行経路の直下、(b)は旋回する飛行経路の内側の結果である。やはり、騒音レベルが小さくなると航空機以外の騒音ピークと混じり合っており、航空機騒音とそれを識別する手段を持つ必要があることが分かる。

測定点で取得される航空機騒音のピーク値は最終的に機種・飛行形態別に整理するが、航空会社や機種で仕分けすることが必要であり、運航情報と照合される。管制の運航情報

の離着陸時刻は管制官が手で記録するデータであるため、分のオーダーでしか得られない。しかも、空港を離着陸する時刻と騒音が観測される時刻は当然ながらズレる。オンライン監視システムでは自動照合をするため、両者の関係をプログラムに組み込む必要がある。そのため、適地調査で騒音の観測時刻を記録しておき、運航情報の離着陸時刻と比較照合して関係を調べることが行われる。図2-5はその例である。(a)は新東京国際空港の滑走路端飛行経路付近の運航情報の離着陸時刻と騒音観測時刻の差の度数分布、同じく、(b)は福岡空港の滑走路からおよそ3km離れた測定点の度数分布である。基本的に着陸では騒音の観測時刻の方が早く、離陸はその逆になると思われるが、測定結果では離陸の運航情報と騒音観測の時刻の差はあまりなかった。理由は管制記録のタイミングのためと思われる。図2-5(c)は滑走路端の測定点と他の多くの測定点の間の騒音観測時刻の差と距離の関係を眺めたものであり、概ね直線上に並んでいる。第一部第4章の機種識別の解析はいずれも滑走路に近い飛行経路の直下付近で測定したデータをもとに行ったが、(c)図より、自動監視データの整理を意図する限り、それで足りることが分かる。

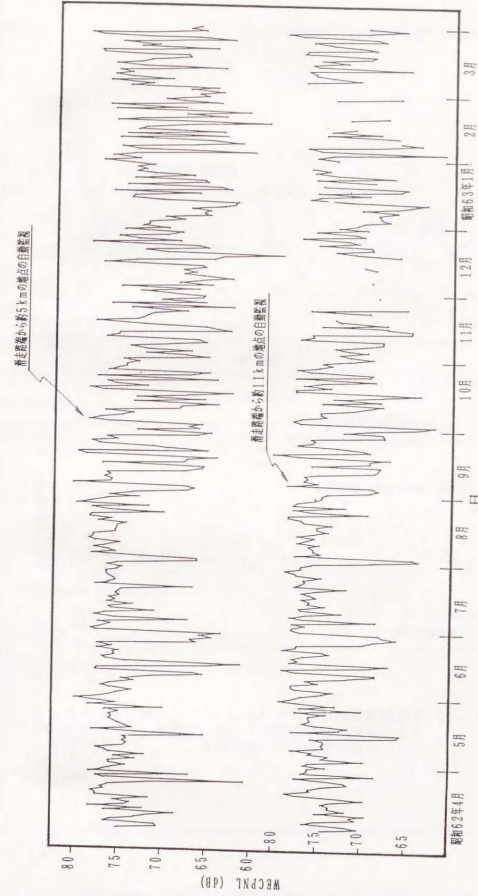


図2-1 WECPNLの日変化の例：新東京国際空港周辺の測定点の例

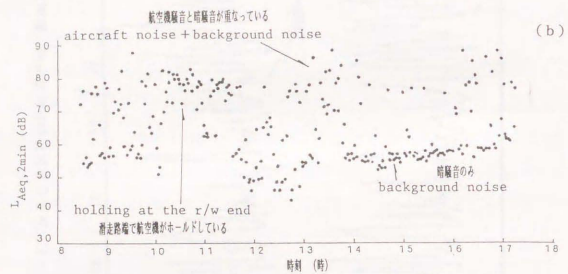
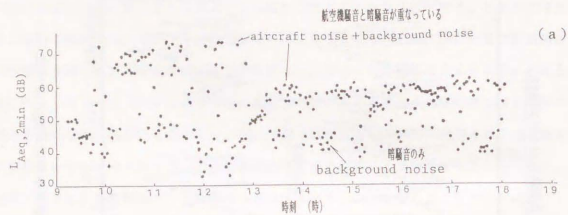


図2-2 2分間等価騒音レベル (Leq,2min) の時間変化の測定例
 (a) は飛行経路の側方1kmの小学校屋上
 (b) は滑走路端の飛行経路直下

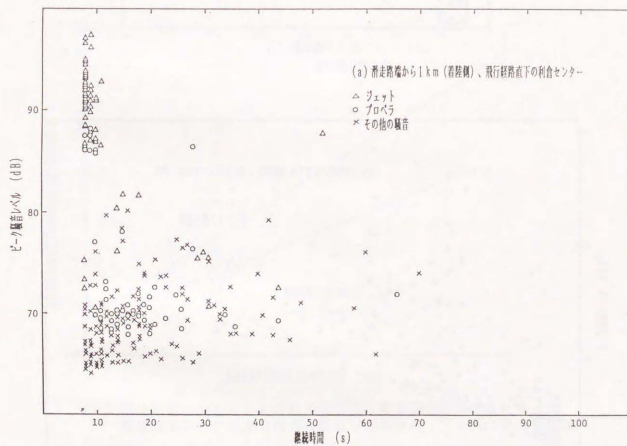
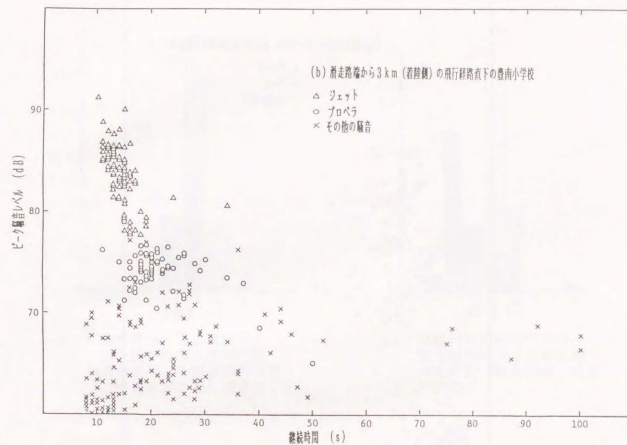


図2-3 大阪国際空港で測定した航空機騒音のピーク騒音レベルと継続時間の散布図

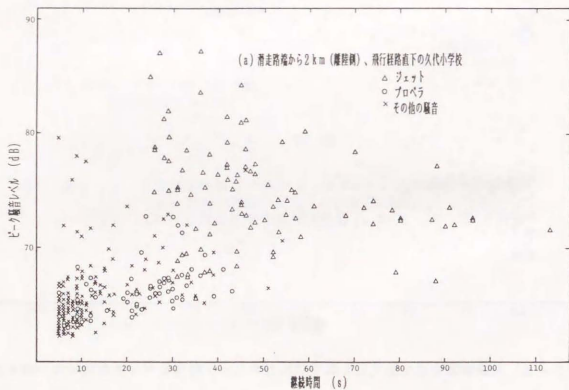
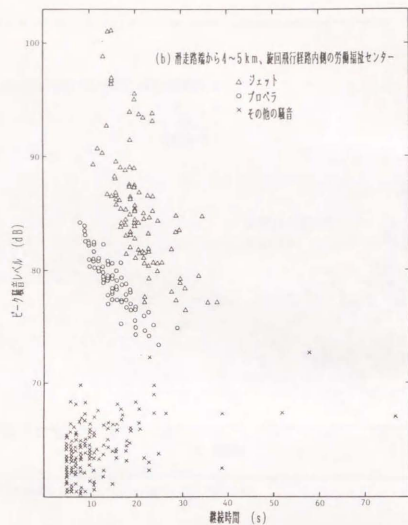
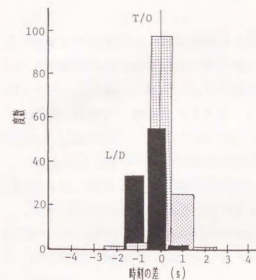
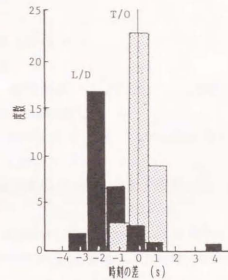


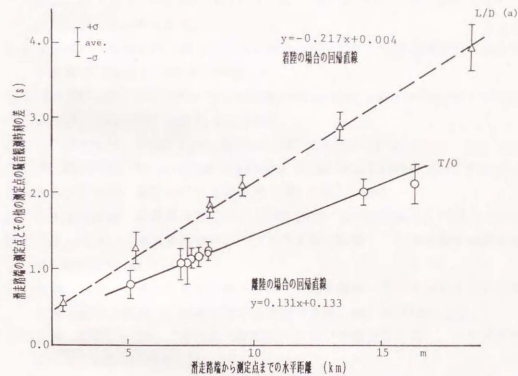
図2-4 大阪国際空港で測定した航空機騒音のピーク騒音レベルと継続時間の散布図



(a) 運航情報の離着陸時刻と騒音観測時刻の差の度数分布の例 (新東京国際空港; 滑走路端の飛行経路直下)



(b) 運航情報の離着陸時刻と騒音観測時刻の差の度数分布の例 (福岡空港; 飛行経路直下)



(c) 滑走路端の測定点とその他の測定点の騒音観測時刻の差と滑走路端からの距離の関係 (新東京国際空港; (a) に対応する結果)

図2-5 運航情報の離着陸時刻と騒音観測時刻の比較

付録の参考文献

- [1] 環境庁告示第54号, 航空機騒音に係る環境基準(1973.12)。
- [2] 防衛施設周辺の生活環境の整備等に関する法律
- [3] 山田, 五十嵐, “航空機騒音の測定と予測,” 騒音制御, 12(1), 11-16 (1988)。
- [4] 運輸省航空局, 数字でみる航空(航空振興財団, 1990.3)。
- [5] M. J. Lighthill, “On sound generated aerodynamically, I, II,” Proc. Roy. Soc., A211, 564-587 (1952) & Proc. Roy. Soc., A222, 1-32 (1954)。
- [6] 日本騒音制御工学会, 航空機騒音に関する基礎的研究(ヘリコプター騒音に関する文献, 資料等の収集整理) 報告書(1987.3)。
- [7] Molino, J. A., “Should Helicopter Noise Be Measured Differently from Other Aircraft Noise? A Review of the Psychoacoustic Literature,” NASA, CR-3609, (1982)。
- [8] 日本建築学会編, 騒音の評価方法, 各種評価法の系譜と手法(彰国社刊, 1981)。
- [9] 騒音制御工学会, “諸各国における騒音予測手法,” 技術レポート, 5, (1986.1)。
- [10] ISO Recommendation, Acoustics-Procedure for describing aircraft noise heard on the ground (ISO 3891, 1978)。
- [11] INTERNATIONAL STANDARDS AND RECOMMENDED PRACTICES, Environmental Protection ANNEX 16 Vol. 1, Aircraft noise (ICAO, 2nd edition, 1988)。ただしWECPNLの記述は1981年以前の版に限る。
- [12] 五十嵐, “環境基準(騒音)の設定経過(その2), II 航空機騒音に係る環境基準,” 小林理研ニュース, No. 20, (1988.4)。
- [13] INTERNATIONAL STANDARD, Acoustics-Description and measurement of environmental noise (ISO 1996/1, 2, 3, 1987)。
- [14] IEC STANDARD, Sound Level Meters (IEC Pub. 651, 1979)。
- [15] IEC STANDARD, Integrating-averaging sound level meters (IEC Pub. 804, 1985)。
- [16] 日本工業規格, 騒音レベル測定方法 (JIS Z 8731, 1983)。
- [17] 日本工業規格, 普通騒音計 (JIS C 1502, 1990) 及び精密騒音計 (JIS C 1505, 1988)。
- [18] 山田, 清水, “通常離着陸時のヘリコプター騒音特性,” 日本音響学会講演論文集, 467-468(1983.3)。
- [19] 大島, 山田, “通常離着陸時のヘリコプター騒音特性—ICAOとISOの評価方式の相異に関する検討,” 日本音響学会講演論文集, 455-456(1983.10)。
- [20] 大島, 木村, 山田, “通常離着陸時のヘリコプター騒音の評価”, 日本音響学会講演論文集, 317-318(1984.19)。
- [21] 大島, 山田, “通常離着陸時のヘリコプター騒音の評価—低周波成分に着目した場合,” 日本音響学会講演論文集, 449-450(1986.19)。
- [22] 大島, 山田, “ヘリコプター騒音の評価方法に関する考察,” 日本音響学会講演論文集, 475-476(1988.3)。

- [23] T. Ohshima & I. Yamada, "The evaluation of normal take-off/landing helicopter noise," INTER-NOISE 87, 1037-1040 (1987).
- [24] 大島, 山田, 環境庁委託調査(ヘリコプタ騒音の評価指針作成調査)報告書, (1989).
- [25] 佐伯, 加来, 山田, 吉岡, "M E法とラウドネス連続判断法による間欠騒音の評価について," 日本音響学会騒音研究会資料, N88-7-2(1988).
- [26] 山田, 石井, 五十嵐, "ミニコンピュータによる騒音コンターの作成," 日本音響学会講演論文集, 155-156(1972.10).
- [27] 五十嵐, 石井, 山田, "ミニコンピュータによる航空機騒音の予測コンターの計算と作成," 東京大学宇宙航空研究所報告, 9, 2(C), 606-625 (1973.6).
- [28] ICAO CIRCULAR, "Recommended method for computing noise contours around civil airports," ICAO CIRCULAR 205-AN/1/25(1988).
- [29] J. Igarashi & I. Yamada, "Aircraft noise monitoring by short-term measurement," J. Acoust. Soc. Jpn. (E), 10, 4, 197-204 (1989).
- [30] J. Igarashi & I. Yamada, "Estimation of yearly NEL of aircraft noise by short term measurement," INTER-NOISE 87, 747-750(1987).
- [31] 環境庁, 航空機騒音監視測定マニュアル (1988.7).
- [32] 林, 尾野, 奥田, 山田, 五十嵐, "航空機騒音監視システムの最近の開発例," 日本音響学会講演論文集, 323-324(1984.10).
- [33] 山田, 五十嵐, "航空機騒音の自動監視と音源同定," 日本騒音制御工学会講演論文集, 65-68 (1989.9).
- [34] I. Yamada, J. Igarashi, M. Okuda, I. Ono & N. Hayashi, "Recent development of aircraft noise monitoring system," INTER-NOISE 84, 703-706(1984).
- [35] I. Yamada, J. Igarashi & N. Hayashi, "Unattended monitoring and source identification of aircraft noise," INTER-NOISE 89, 1133-1136(1989).
- [36] 林, 吉川, 山田, "航空機騒音の自動監視システム開発の考え方," 日本騒音制御工学会講演論文集, 1-4 (1990.10).

