

# 植樹帯による騒音減衰効果の実験検討

計画部環境対策室 上 中 勝  
立 石 泰 三

## 要 約

道路沿道の生活環境を保全することを目的として環境施設帯を設置し、原則として植栽を施している。

本報告では、植樹帯の様々な機能のうち騒音の減衰効果について実験検討を行い、定量的な把握を試みた。その結果、植樹帯による騒音減衰効果を地表面の効果と樹木の散乱による効果に分けて、

- ① 地表面減衰についてはWeyl-vander pol解を用いた計算により実測値と対応のよい減衰量を求めることができた。
- ② 樹木による散乱減衰については単位体積当たりの葉の表面積、伝搬距離、周波数等をパラメーターとする回帰式で表現できる。
- ③ 道路交通騒音に対する樹木の散乱減衰は葉の大きさによって大きく変化し、葉の短辺は5 cm程度以上必要で葉が大きい程減衰量も大きくなる。以上のことが明らかになったので報告する。

## まえがき

阪神高速道路公団では道路沿道の生活環境を保全する目的で環境施設帯を設置しているが、昭和63年度末現在での設置延長は約9.5kmとなっている。環境施設帯は原則として植栽を施し、(以下「植樹帯」という。)様々な機能を期待しており大別して次のものがあげられる。

### ① 修景機能

道路と沿道との景観的調和、通行の快適性の増進および道路を含めた地域全体の風致美観の向上を図る。

### ② 環境保全機能

オープンスペースを提供するとともに道路交通に起因する弊害(道路公害)を軽減し、沿道の居住環境の保全を図る。

このうち環境保全機能については、定量的な把握が重要である。

本文は、植樹帯の騒音減衰効果を検討するにあたり、フィールド実験および室内実験を行い、距離減衰の効果を除いた地表面の効果、樹木による散乱効果を調査したものである。

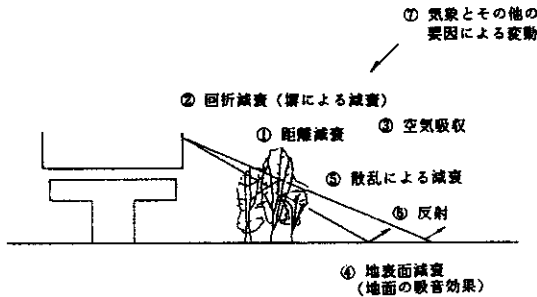


図-1 道路交通騒音の減衰要因

### 1 騒音の伝搬に与える樹木の影響

道路交通騒音の伝搬においては、①距離減衰②回折減衰（塀による減衰）③空気吸収（長距離伝搬の場合に影響）④地表面減衰（地面の吸音効果）⑤植樹等の散乱に起因する減衰⑥路面や建物等からの反射音による増幅、さらには⑦気象その他の要因による変動がある。（図-1参照）

これらのうち、植樹帯が騒音の伝搬に及ぼす要因については一般に以下のものが考えられている。

- (1) 葉や幹による音の吸収
- (2) 木立による音の散乱
- (3) 腐植土（地面）による音の吸収
- (4) 地面の気温勾配、空気の湿度、風の勾配に対する植物の影響、夜間における結露

第1段階(実際の植樹帯の騒音減衰調査)

の影響また、その影響については、以下のことが言える。

- (1) 樹木による音の伝搬減衰は、葉による吸音もさることながら、むしろ散乱による効果のほうが大きいと考えられる。
- (2) 林の地表面の性質、例えば腐植土であるか、細砂ロームであるかなどの違いによる地表面インピーダンスの差も音の減衰に少なからず影響するものと思われる。
- (3) 植物は、季節や時間の違いによって、植物近傍の局部的微気象による影響を与え、これが音の減衰に影響するものと考えられる。実際、夜間においては、植物が音の伝搬を助ける効果さえ認められる。

### 2 調査の概要

過去の研究等を参考に調査は2段階に分け実施した。

第1段階は実際の植樹帯を対象とし、騒音の減衰性状の調査を実施し距離減衰（逆二乗則）、地表面減衰（地面の吸音による減衰）以外による減衰を余剰減衰として求めた。この余剰減衰を植樹されていないコンクリート面、芝生等と比較し、樹木の散乱等による減衰効果を検討した。

第2段階では2種類の樹木について、散乱による減衰効果を把握するための実験を行った。実験は葉の寸法、茂り具合等をパラメータとし、そ

第2段階(散乱による減衰効果を把握するための実験)

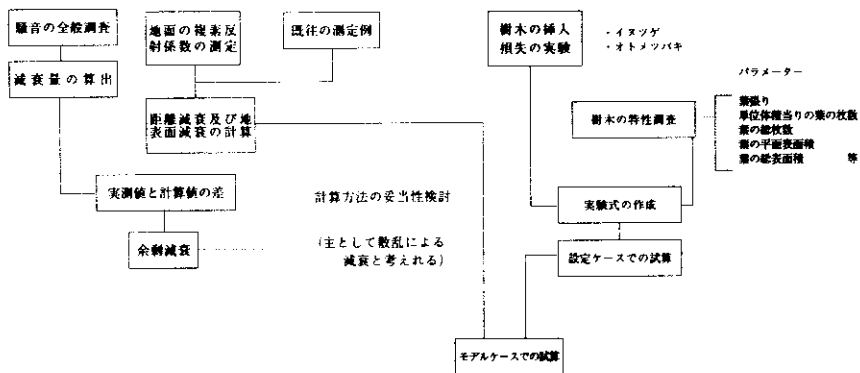


図-2 調査の流れ

れらを透過する際の挿入損失を無響室において実施した。

この結果をもとに散乱による減衰効果の実験式を作成した。

さらに、上記の結果から道路交通騒音に対する植樹帯の効果を、地表面減衰と散乱による減衰について試算した。(図-2参照)

### 3 騒音の伝搬調査と地表面減衰

調査方法は、植樹帯による減衰効果と地表面の効果を分離するために、実測によって得られた減衰量から、距離減衰および現在比較的研究の進んでいる地表面効果の計算値による過剰減衰量を除くことによって、樹木による減衰効果を求める方法をとった。

#### 3-1 調査場所および測定点の配置

調査場所は日本万国博覧会記念公園、服部緑地公園の2ヶ所で9種類である。

調査場所の例を写真-1に示す。



写真-1 調査場所例(日本万国博覧会記念公園)

#### 3-2 調査方法

音源として中心周波数が、125Hz~4 kHzの1/1オクターブバンドノイズの断続音(2秒ON/OFF)を、エッジを向い合わせたコーンスピーカーから発生させ、図-3に示す音源、受音点位置において普通騒音計(F特性)のマイクロホン

を配置し、その出力をデータレコーダーで収録した。

音源高さが0.3mの場合は平面道路上の自動車からの騒音伝搬を、同じく音源高さが5mの場合は高架道路上の自動車からの騒音伝搬を想定した。

また、受音点の音源からの離れ(水平距離)は対数スケールに一致するように倍距離とした。

受音点の高さは騒音の評価を行う場合に一般的である成人の立位の耳の位置を想定している地上1.2m、および家屋の2階窓面の中央に対応する地上5.0mとし、音圧分布の連続性をみるために地上3.0mを追加した。

使用した信号はホワイトノイズである。

調査現場においては断続音によるS/Nの確認を行った。

調査に使用したスピーカーは、あらかじめ調査対象とする周波数帯域において十分なパワーを発

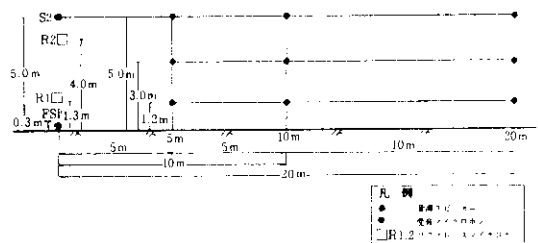


図-3 音源、受音点配置図

生させ、かつ各オクターブバンド毎にほぼ無指向性とみなせることを確認した。

解析にあたっては、データレコーダーの出力にオクターブバンドフィルターを介在させ、レベルレコーダーに波形を記録させ読みとった。

#### 3-3 調査結果

音源高さが0.3mの場合のアスファルト、土、芝生、植樹帯の各々について、各オクターブバンド毎の距離減衰例を図-4に示す。パラメータは、受音点の地上高さであり、横軸は音源からの離れ(水平距離)である。

音源高さが0.3mの場合、音源と受音点からの

水平距離が同じであれば、一般的には受音点の地上高さが高いほど音源、受音点間の距離は遠くなり、減衰量が大きくなるが、調査結果によるとそのパターンがところどころ乱れている。特に地表面が硬いほど顕著である。

また、アスファルト、土、芝生の地表面の調査結果においては、各オクターブバンド毎の減衰パターンの傾向が似ている。これは、音源から受音点へ直接伝搬する直接音と、地表面からの反射音によって生じる干渉である。しかし、地表面が柔らかくなるにつれ、反射音との干渉のみではあらず、地表面吸音効果によって説明されるようになる。なお、このことは植樹帯における減衰特性においても見受けられ、微妙ではあるが、受音点の高さによる減衰量の逆転が生じている。

植樹帯の場合は、表面が腐植土で覆われた柔らかい地表面であり、アスファルト等の硬い地表面に比べ乱れは少なくなっている。また、他の地表面に比べ減衰量が大きめであり、特に500Hz、1kHzでは、距離が増加するとともに減衰量は大きくなる。これは、植樹帯の地表面減衰、散乱による減衰と考えられる。

音源高さが5.0mの場合も、音源高さが0.3mの場合と同様な現象が見受けられたが、あまり顕著ではなかった。これは、音源が地表面からかなり高い位置にあり、地表面の影響を受けにくいと考えられる。

### 3-4 地表面減衰の算出

バンドノイズを用いた騒音伝搬調査においては、地表面による減衰効果と植樹による減衰効果が総合された値が観測される。そこで、ここでは地表面減衰の減衰量を以下の方法による算出した。

理論的には、音源からの直接音と地表面からの反射音の干渉によるものと考えられるが、多くの研究はSommerfeld、WeylおよびVan Der Pol等が電磁波の伝搬のなかで地表面に沿った伝搬現象について解いた理論を音の伝搬に応用したものであり、Weyl-Van Der Pol解と言われている。

地表面減衰量は地表面の音響特性により異なり、Delany-Bazley等の実験式モデルによれば、周波

数と地表面の流れ抵抗（空気の通しにくさ）によって表される。

この流れ抵抗は、地表面の種類によって異なっており、Embleton等によって表-1の値が示されている。

地表面の種類	流れ抵抗 $\sigma$ (cgs rays/cm <sup>2</sup> )
森の地表	80
芝生	300
土	6,000
アスファルト	20,000

表-1 流れ抵抗の値

本調査においては、各測定場所においてパルス音源を用いた測定により直接、音響インタピーダンスの計測を試みている。その結果より求めた流れ抵抗はEmbletonによる値と平均的には同程度の値を示しているが、周波数によるばらつきが大きい。

このため以降の計算においては表-1の値を用いることとした。

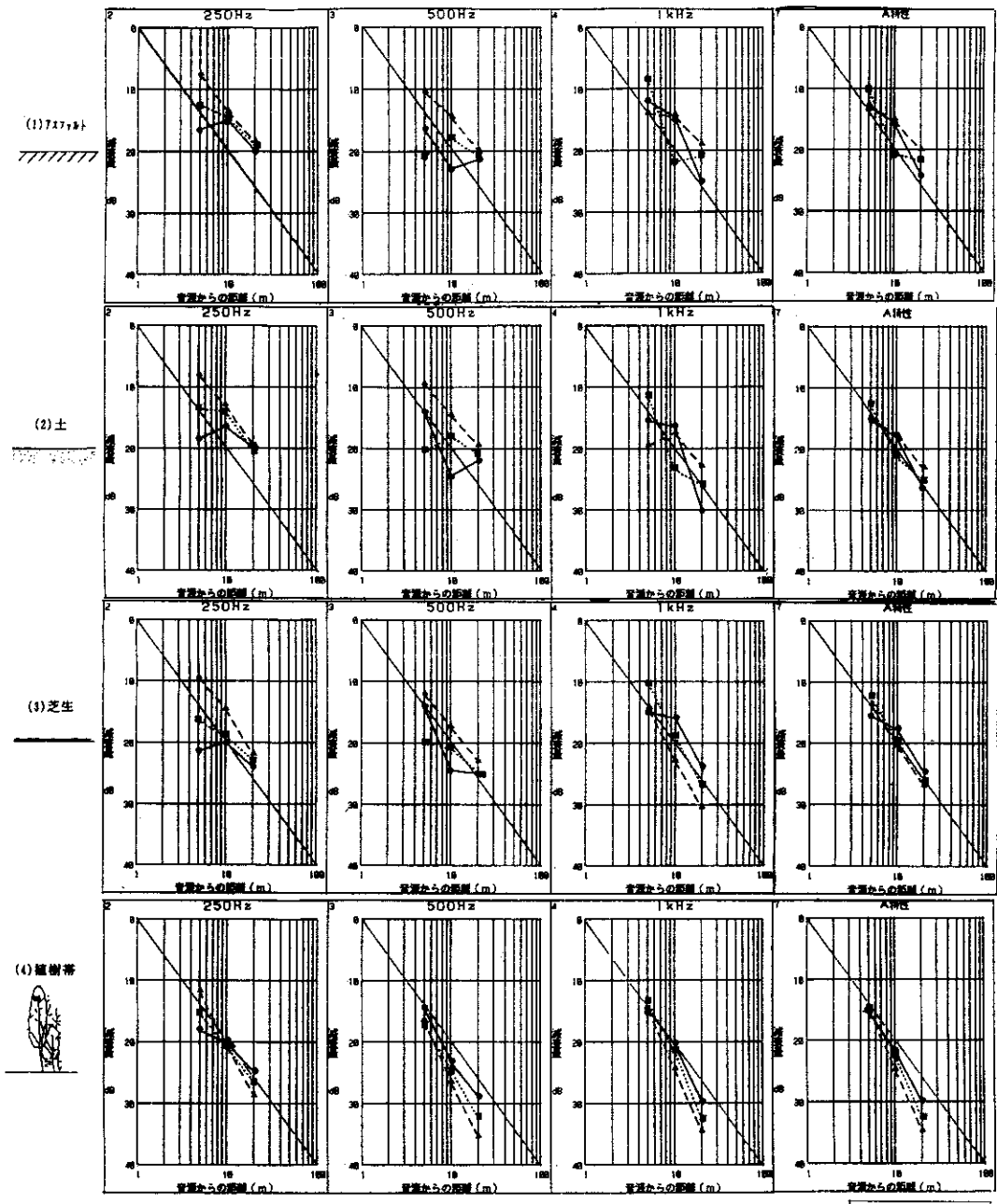
計算値を実測減衰量（距離減衰を除いた）と比較したものを図-5(1)及び(2)に示す。

アスファルト、芝生での計算値と実測値は非常によい対応を示しており、特に特定の周波数帯域で生じる減衰量の増減のパターンはほぼ一致している。

これより、Weyl-Van Del Pol解による計算方法により、地表面減衰効果がほぼ説明できることがわかったため、これを植樹帯にあてはめた。

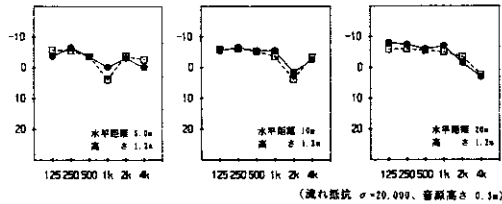
(図-5(3)参照)

その結果1kHz以下の低い周波数では、受音点位置に関係なく、実測値と計算値は非常によく一致している。2kHz以上の周波数域では、実測値と計算値の差が、周波数が高い程、かつ伝搬距離が長い程大きくなっており、植樹帯の散乱による減衰効果が現れているものと考えられる。減衰量は2kHz~4kHzの周波数で伝搬距離が10~20mの範囲で5~10dB程度である。

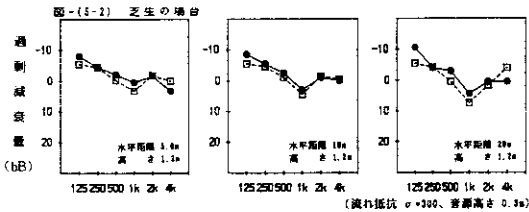


受音点の位置  
 ● 地上5.0m  
 ■ 地上3.0m  
 ▲ 地上1.2m

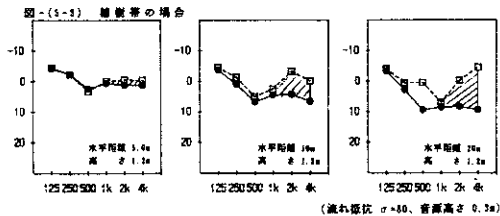
図-4 騒音の距離減衰特性 (音源高さ 0.3m)



(1) アスファルトの場合



(2) 芝生の場合



(3) 植樹帯の場合

図-5 過剰減衰量における実測値と計算値の比較

#### 4 樹木による散乱効果の実験と減衰実験式の作成

植樹帯による騒音の低減は、植樹帯地表面の吸

音効果と樹木による音の散乱減衰効果によるものに大別される。地表面の効果は、騒音伝搬調査の結果により、Weyl-Van Der Pol解を用いた計算により、精度よく求めることができることが示された。

また、2 kHz以上の周波数において、伝搬距離が長くなるにつれ、周波数が高くなるにつれ余剰減衰が増加する傾向が見られた。これは、樹木による散乱減衰によるものと考えられる。ここでは、オトメツバキ、イヌツゲの2種類の樹木を対象とし、それぞれ形状、葉張りの異なる約20本について散乱効果の実験を無響室内で行った。

#### 4-1 実験に用いた樹木の諸元

##### 4-1-1 樹木の選定基準

調査に使用する樹木は、

- (1) 植樹帯に用いられており、その使用頻度が比較的高い樹種であること。
- (2) 調査期間（秋～冬）においても、通常の着葉状態が見られる常緑樹であること。
- (3) 葉の大きさ大小によって、比較検討が可能な2以上の樹種であること。
- (4) 同一樹種で、着葉量の疎密による比較検討が可能な樹木であること。
- (5) 室内実験が容易な大きさ（樹高1.5～2.0m）であって、しかも成木に近い形状をもつ樹種であること。

##### 4-1-2 選定樹種及び鉢数

樹木の選定基準に基づき、次の通り選定した。

- (1) 葉の大きな常緑広葉樹…ツバキ、21鉢
- (2) 葉の小さな常緑広葉樹…イヌツゲ、18鉢

##### 4-1-3 単位体積当りの葉の枚数調査

単位体積当りの葉の枚数は、ツバキ、イヌツゲ別に着葉量の疎密により標準木を選んで求めた。（表-2 参照）

表一 2 単位体積当りの葉の枚数

樹種	疎密区分	1 m <sup>3</sup> 当りの葉の枚数
ツバキ	疎	1,700
	中	2,750
	密	3,800
イヌツゲ	疎	16,000
	密	35,700

4-1-4 葉の表面積調査

葉の表面積は、ツバキ、イヌツゲ別に大、中、小の標準的な葉の表面積を測定し、その平均値を求めた。(表-3参照)

表一 3 葉の表面積

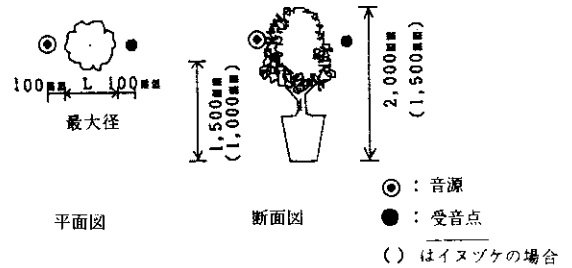
樹種	表面積の範囲 (cm <sup>2</sup> )	1枚当たりの表面積
ツバキ	7.0 ~ 26.4	17.8cm <sup>2</sup> ≒ 0.0018cm <sup>2</sup>
イヌツゲ	0.7 ~ 1.4	0.97cm <sup>2</sup> ≒ 0.0001cm <sup>2</sup>

4-2 実験方法

実験は無響室内に各樹木を1本毎配置し、スピーカーからパルス音を発生させ、樹木の反対側に配置したマイクロホンで音圧波形を受音して行った。

なお、測定に際しては、暗騒音の影響を除くため、パルスジェネレーターによりトリガーを発生させ、20回の同期加算を行い音圧波形を直接パーソナルコンピューターに収録した。また樹木が不整形なため、葉張りの中心を軸として鉢を30°ピッチで回転させ0°~150°の6個のデータを収録した。このようにして求めたデータと樹木を配置しないデータ(リファレンスデータ)との比較により、樹木による挿入損失IL(Insertion Loss)を算出した。なお、データ収集に用いたパラメータを以下に示す。

音源信号：パルス(パルス幅： $\Delta t = 20 \mu s$ )  
 ポイント数：1,024点  
 観測時間：20.48(ms)  
 ナイキストのサンプリング周波数：25(kHz)  
 周波数分解能：48.828125(Hz)  
 図-6に音源(スピーカー)と受音点(マイクロホン)の配置関係を示す。

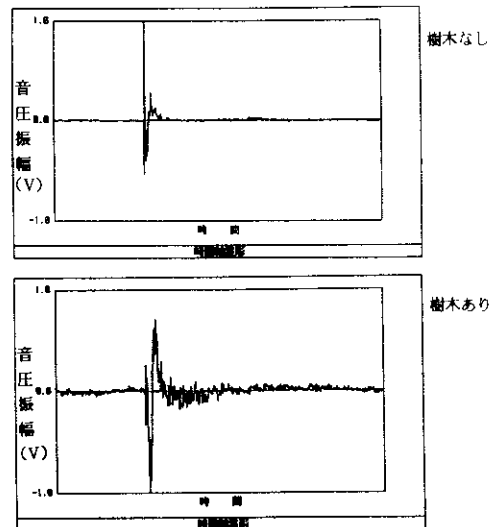


図一 6 音源、受音点配置図

4-3 実験結果

4-3-1 時間軸波形

時間軸波形(音圧波形)のオトメツバキの測定例を図-7に示す。なお、縦軸は各データの音圧の最大値で基準化している。樹木がある場合は、直接波以降の成分に散乱現象が生じているのがわかる。



図一 7 時間軸波形の測定結果 (樹木の種類：オトメツバキ)

#### 4-3-2 挿入損失と減衰予測式

時間軸上のパルスレスポンスをフーリエ変換し、更に1/3オクターブバンド毎の音圧レベルを求め、リファレンス信号との差を取ることで、各々の樹木の挿入損失を求めた。オトメツバキの例を図-8に示す。

2 kHz以上で周波数の増加とともに、減衰量も増大している。この特定の周波数と葉の寸法は関連があるものと考えられ、イヌツゲの場合は約8 kHzであった。それぞれの葉の短辺(31.8 mm, 7.1 mm)と波長定数の積はほぼ一致する。なお、波長定数は次式に示すとおりである。

$$K = \frac{2\pi f}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}$$

k : 波長定数

f : 周波数 (Hz)

c : 音速 (m/s)

t : 気温 (°C)

したがって、挿入損失の検討は葉の短辺に対する波長定数の周波数を限界周波数とし、その周波数以上を対象として行った。

また、周波数の増加に伴う挿入損失の増加分、すなわち図-8の直接の傾きは、伝搬距離および単位体積当りの葉の表面積によって変化している。過去の研究を参考にこの傾きを決定するパラメータに  $F \times L$  (単位体積当りの葉の表面積  $\times$  伝搬距離) をとり、直線の傾きと関係を示したのが図-9である。これによれば  $F \times L$  の増加とともに傾きは大きくなるが、頭打ちの分布を示している。

そこで、両者に

$$m = k (FL)^X$$

m : 傾き

k : 定数

で表される関係があるものとし、べき乗の値を求めた。その結果  $X = 0.58$  を得た。従って周波数を波長定数で表現しなおし、減衰量の形を次式とした。

$$IL = n (FL)^{0.58} \log(ka) + d$$

IL : 挿入損失 (dB)

F : 単位体積当りの葉の表面積 ( $m^{-1}$ )

L : 伝搬距離 (m)

k : 波長定数

a : 葉の短辺の長さ (m)

n, d : 定数

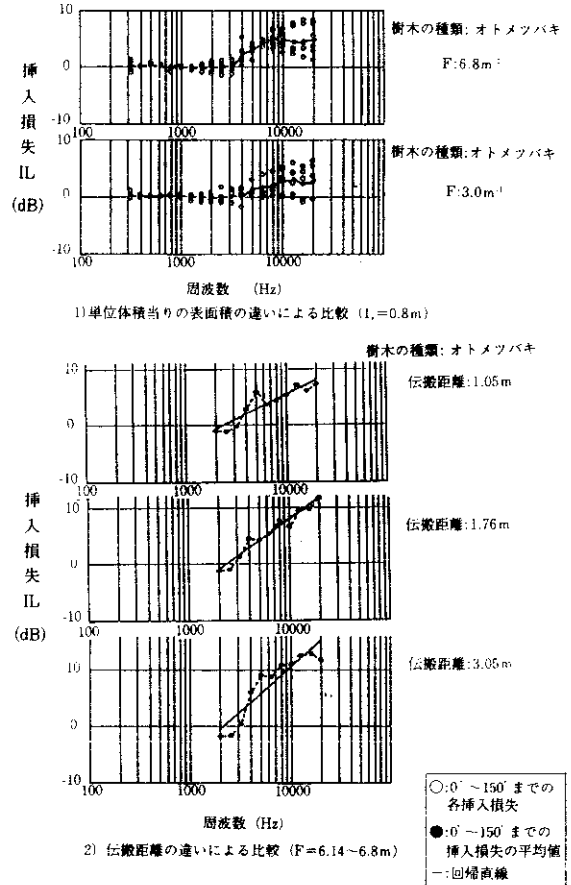


図-8 挿入損失の測定例

この式は山田らの実験式の形と同型であり更に  $(FL)$  のべき乗の値も山田らの値  $0.5 \sim 0.7$  と一致している。図-10は、 $IL$  と  $(FL)^{0.58} \log(Ka)$  の関係を示したもので、これらの回帰式より、 $IL = 1.59 (FL)^{0.58} \log(ka) - 0.11$  を得た。



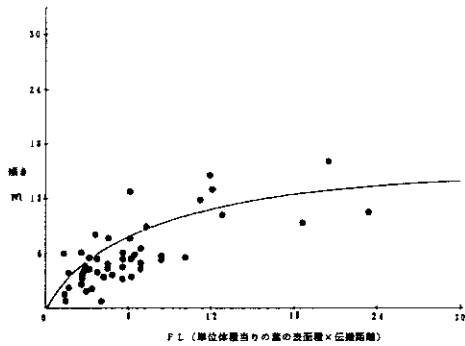


図-9 FLと傾きmの関係

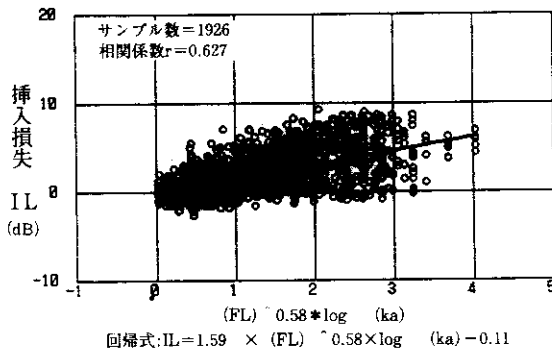


図-10 挿入損失と減衰予測式

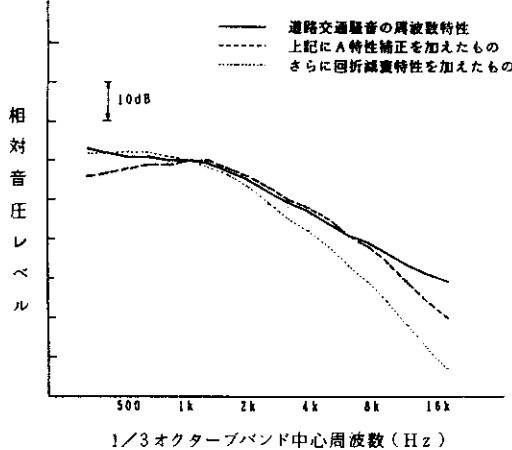


図-11 道路交通騒音の周波数特性

#### 4-4 自動車騒音に対する減衰量

樹木の散乱による減衰の実験式を基に自動車騒音のスペクトルを考慮し、dB(A)での散乱による減衰量を検討する。

自動車騒音のスペクトルは、直接伝搬の場合と、防音壁等の障害物を介して伝搬する場合の2種類を設定して行った。これは、防音壁による回折減衰が高い周波数程大きく、自動車騒音のスペクトルを大きく変化させるためであり、当公団の道路形状（高架構造防音壁付）を想定している。

図-11は、自動車騒音のスペクトル及びそれぞれの補正を加えたものを示した。

このスペクトルを用い、各周波数毎に散乱による減衰量を求め、合成したものが図-12である。

図-12は、葉の短辺の長さaが1cm、5cmと10cmの3種類、単位体積当りの葉の表面積Fが10m<sup>-1</sup>、5m<sup>-1</sup>の2種類について、伝搬距離と減衰量の関係を示したものである。葉の短辺の長さ1cmのものについては、自動車騒音に対しては、dB(A)ではほとんど効果はなかった。

道路交通騒音に対する樹木の散乱による効果は、葉の大きさによって大きく変化し葉の短辺が10cmのものは5cmのものに比べ約2～3倍程大きく、樹木中を伝搬する距離の増加に伴う減衰効果も大きい。また、単位体積当りの葉の表面積Fによる減衰量の変化は、葉の大きさaによる変化よりも小さい。

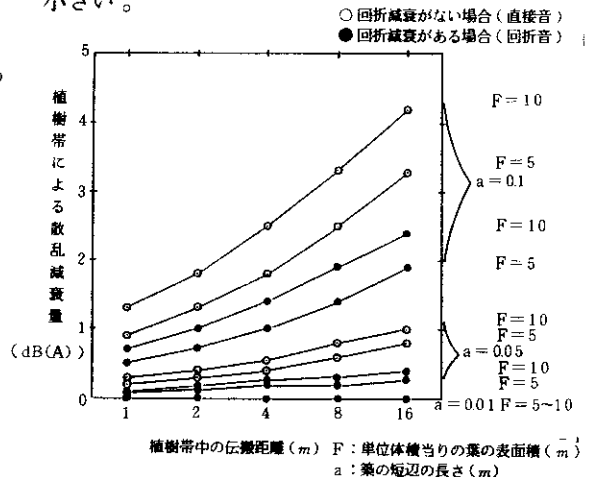


図-12 自動車騒音に対する樹木の散乱減衰量

すなわち、葉の量を倍にするよりも、葉の大きさが倍の樹木を選択するのが望ましい。

防音壁等の回折を伴って伝搬してくる騒音に対しては、直接伝搬してくる騒音に比べ、散乱による減衰は半減している。これは、散乱効果が大きい高周波数域での成分が回折により減衰しているためである。

### 5 植樹帯による道路交通騒音の減衰効果

樹木による騒音の減衰は、植樹により地表面が変化し地表面減衰が増加すること、葉の大きさにもよるが散乱による減衰が期待できることがわかった。地表面がアスファルト等の堅い地盤を巾5mの植樹帯にした場合の、道路交通騒音の減衰量の変化を地表面減衰と散乱による減衰に分けて試算した結果を図-13に示す。

散乱による減衰量は単位体積当たりの葉の表面積が  $5 \text{ m}^{-1}$ 、葉の短辺が5cmと10cmのものの中で示した。高架構造に対するものは、上部の防音壁の回折減衰に伴う騒音スペクトルの変化を考慮して求めている。地表面減衰による減衰量の増加は、1~2dB(A)程度見られ、特に平面道路の場合の低い受音点では、4~6dB(A)と大きくあらわれている。散乱による減衰は、短辺が10cm程度の葉がかなり密に繁っている場合で2dB(A)程度であり、葉の大きさが5cm程度になれば1dB(A)程度以下となっている。

### 6 まとめ

本調査では、地表面の性状による異なる地表面減衰の推計方法および樹木の散乱による音の減衰の実験より、道路交通騒音に対する減衰量を求め

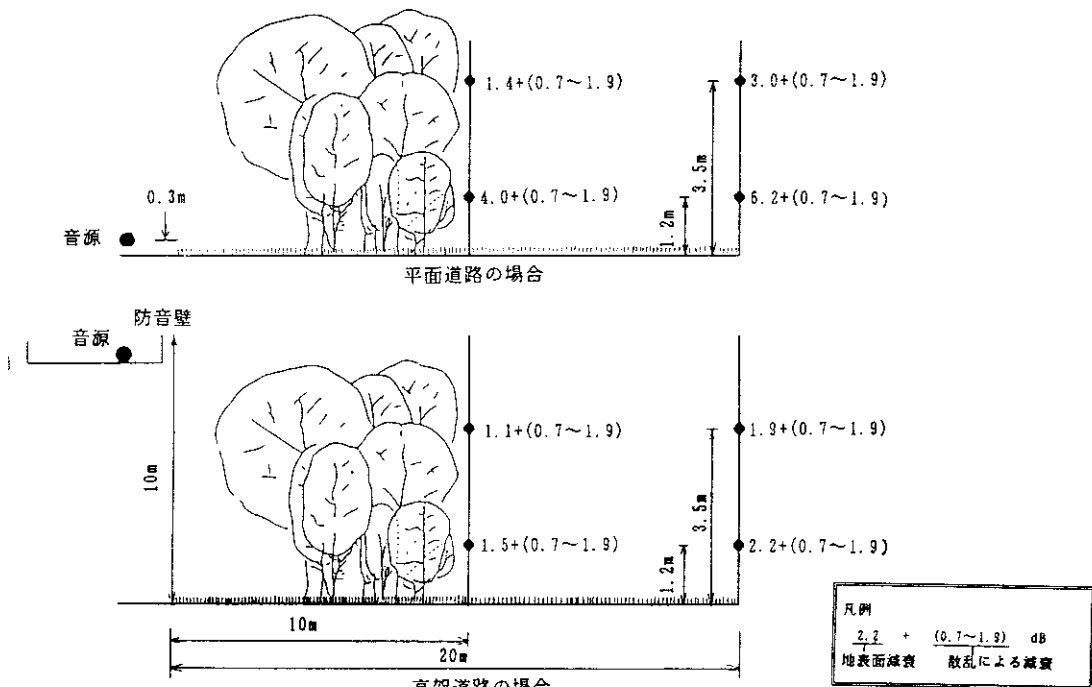


図-13 植樹帯による道路交通騒音の減衰効果  
単位体積当たりの葉の表面積  $5 \text{ m}^{-1}$   
葉の短辺の長さ 5cm、10cm

た。その過程で次のようなことが明らかになった。

- (1) 地表面減衰については、音源、受音点の距離が20m程度の範囲では、Wey Van Der Pol解を用いた計算により、実測値と対応の良い減衰量を求めることができた。音源から20m程度、高さ数mの範囲では、堅いアスファルト等の地盤を植樹帯のやわらかい地盤に変えることで1～2 dB(A)程度、音源受音位置が低い場合には、4～6 dB(A)の騒音の減衰が見込まれる。
- (2) 樹木による散乱減衰は、葉の短辺の寸法で決まる限界周波数より高い周波数で生じる。  
このため道路交通騒音を減衰させるためには、その周波数特性を考慮すると葉の短辺の長さは5 cm程度以上必要と考えられる。植樹帯の巾が5 mの場合、葉の短辺が5 cmのもので0.7dB(A)、10cmのもので1.9dB(A)程度の減衰が見込まれる。
- (3) 散乱効果は、周波数、単位体積当りの葉の表面積、樹木中の伝搬距離に比例して増大する。

また、今後の課題として次のような点があげられる。

- (1) 実際の道路における移動音源に対する植樹帯の減衰効果の検討、定量的把握
- (2) 実際の環境施設帯のような断面形状、平面形状での減衰量の推計方法の検討
- (3) 高架構造の道路騒音に有効に機能する植樹方法の検討

## あとがき

最後に、本調査を進めるにあたって、貴重な御助言をいただいた京都大学工学部高木興一助教授、財団法人大阪府緑化環境協会中村隆一氏、ならびに調査を担当された株式会社アクト音響振動調査事務所の方々に感謝致します。

## 参考文献

- 1) 阪神高速道路公団「阪神高速道路の環境施設帯検討業務報告書」昭和59年3月
- 2) 日本音響学会「騒音の伝搬に影響を与える諸因子について」昭和58年1月
- 3) J. A. Stratton“Electro magnetic Theory” McGraw Hill.1941
- 4) I. Rudnick“The propagation of An Acoustical Wave along a Boundary”JASA Vol.19.No.2 (1947) 他
- 5) Delany Bazley; “Acoustical Properties of fibrous absorbent materials.” Appl. Acoust.51 (3) 1982
- 6) 渡辺他「植物模型による音の散乱」日本音響学会誌43巻11号(1987)
- 7) 石井聖光「道路交通騒音予測計算方法に関する研究(その1)」日本音響学会誌31巻8号(1975)