

## 都市鉄道沿線近傍への騒音伝搬に関する研究

A STUDY ON NOISE PROPAGATION IN THE  
VICINITY ALONG URBAN RAILWAY

渡 辺 義 則\*

By Yoshinori WATANABE

## 1. 結 言

今日では、都市鉄道の沿線における土地利用計画を策定する場合や、新しく鉄道を建設する場合などには、効率のよい騒音防止対策をたてるのが不可欠になってきたが、このためには、都市鉄道騒音の伝搬性状を正確に予測することが必要である。鉄道騒音の研究としては、これまで新幹線騒音についてはかなりの研究成果<sup>1),2)</sup>が発表されているが、新幹線より低い速度で走行する都市鉄道騒音の伝搬性状についての研究は比較的少ない<sup>3),4)</sup>。従来の都市鉄道の騒音予測方法では、列車の長さに等しい線音源を発生源とする計算モデルが使用されていた。しかし、騒音が問題となるような鉄道沿線近傍の騒音には、鉄道騒音を構成する個々の音源の影響が顕著に現れるので、列車の長さ方向に音の強さが一様であるとする線音源モデルの仮定には限界がある。都市鉄道のように人口稠密な地域を通過する鉄道の沿線においては、鉄道車両が通過する側の軌道中心から約30m以下の沿線近傍にも人々が生活することが少なくなく、沿線近傍の騒音に対する検討が不可欠である場合には、鉄道騒音を構成する個々の音源の特性を反映する計算モデルを確立して、対象区間の各場所における騒音レベル、スペクトル、距離減衰性状、鉄道騒音に個々の音源がどのように寄与するか（以後、音源の寄与とよぶ）ということなどの伝搬性状を明らかにする必要がある。

本研究では、レール継目のある砂利道床コンクリート高架橋の上を、列車が比較的低速（50 km/h 前後）で走行する場合を想定して、鉄道騒音の音源を各種の点音源に類別し、その点音源で構成される騒音予測計算モデルを示した。さらにケーススタディーとして、この騒音予測計算モデルを都営6号線に適用し、高架上方ならびに高架側方などの高架周辺における騒音の伝搬性状（A特

性における）について考察した。なお、計算はすべて電子計算機で処理した。また、この計算結果を都営6号線の西台—高島平両駅間の高架区間において実測した結果と比較して、この騒音予測計算モデルが実用的な精度の範囲内で妥当であることを確めた。

## 2. 都市鉄道の騒音予測計算モデル

## (1) 計算上の仮定

すでに報告した<sup>5)</sup>ように都市鉄道の騒音レベルでは、① 継目部と中間部の高架上の各測定においては、1/3 オクターブ中心周波数 ( $f_{c,1/3}$ ) で 500~1000 Hz の成分が優勢であること、② この領域でも  $f_{c,1/3}=500$  Hz 付近の成分が一番卓越し、その成分は車輪がレール継目を衝撃する音とボギー台車が接近すればレベルが増加する音から形成されること、③ そのうち前者の卓越周波数は軌道構造を変更することによって変化し、後者の卓越周波数は列車速度に比例して変化するので、前者は軌道振動に、また後者は主動力装置などの車両の回転部分にそれぞれ起因して発生すると考えられること、などの諸性質が認められている。

これらのことを考慮して、鉄道騒音を構成する音源を次の4種類の点音源に類別して考えた。すなわち、① 高架上の騒音はレール継目に起因する衝撃音とレール継目は存在しなくても車両が走行することによって発生する音との複合音であると考えて、高架上面に両者の音源であるJAとMAを仮定する。② 高架直下の騒音はコンクリートスラブからの固体音であると考えて、これもレール継目に起因する衝撃音と走行車両による音との複合音であると考えて、高架直下に両者の音源であるJSとMSを仮定する。③ JAとJSは各レール継目に固定された点音源であり、車輪がレール継目を通過するたびに音を発生する。④ MAとMSは各車両のボ

\* 正会員 工博 九州工業大学講師 工学部開発土木工学科

ギー台車の中央位置に固定された点音源であり、列車速度で移動しながら音を発生する（以後、JA と JS を固定音源、MA と MS を移動音源とよぶ）。⑤ これらの音源は無指向性であって、同一種類の音源の音響出力は等しいものとする。

高架上方の各位置における騒音は、高架上面の音源である JA と MA から生じた音が直接伝搬してきたものであり、高架側方の各位置における騒音は、高架上面ならびに高架直下の音源である JA, MA, JS, MS から生じた音が高架橋側壁あるいは高架橋自身を回折して、直接にあるいは1次反射（反射率 1）して伝搬してきたものであると考える。なお、音の減衰は距離的な減衰と回折による減衰のみを考慮し、他の原因によるものは、伝搬距離が近いので無視して考える<sup>7)</sup>。

なお、これらの仮定の妥当性については 4. において、仮定に従って騒音を予測計算した結果と高架周辺の各位置で実測した結果を比較することによって調べた。

(2) モデルの構造

図-1 (a) には 高架上方の騒音予測計算モデルの概略図を、図-1 (b) には 高架側方のそれを示す。なお、高架側方のモデルは高架上方のモデルをさらに拡張したものであり、モデルを構成するときの基本的な考え方は高架上方のモデルと同じである。したがって図-1 (b) には音の伝搬経路のみを示している。高架側方のモデルでは高架下面と高架上面に剛な半無限の遮音壁を仮定した。なお、高架直下の JS と MS から発生する音は高

架上方あるいは高架側方へ伝搬するが、受音点の位置によっては、高架橋自身を回折して音が伝搬すると考えられるので、その影響を算定するために、コンクリートスラブ上面の位置 ( $z=0$ ) から下方にスラブの厚さと同じ高さの遮音壁を仮定した。いま、図-1 (a) に示すように列車が  $w$  両編成であり、レール継目 ①~④を含む範囲内でモデルを構成すると、固定音源はレール継目の位置に JA と JS のおのおのについて  $u$  個（奇数）、移動音源は各車両のボギー台車の中央位置に MA と MS のおのおのについて  $2w$  個存在することになる。いま、時間  $t=0$  において先頭車両の最初の車輪を継目番号 ①の位置に置き、以後列車を速度  $V$  m/s で移動させて受音点に到達する騒音レベルを 0.1 秒ごとに算出する。

まず、固定音源について考える。継目番号  $i$  の位置に固定された音源は、 $n$  番目の車両の第  $s$  番目の車輪が通過する時間、

$$t_{sni} = \{(n-1) \cdot L_c + (i-1) \cdot L_j + a_s\} / V \dots (1)$$

ただし、

$L_c$  : 車両の長さ

$L_j$  : レール継目間隔

$n$  : 車両番号 1, 2, ...,  $w$

$i$  : 継目番号 1, 2, ...,  $u$

$s$  : 車輪番号 1, 2, 3, 4

$$a_1 = 0, a_2 = L_a, a_3 = L_a + L_d, a_4 = 2L_a + L_d$$

に音を発生し、その音は伝搬時間  $P_i$  秒後に受音点に到達する。音源から発生した音が回折して受音点に到達する場合には、その減音量が周波数によって異なるので、受音点に到達するレベルは各周波数ごとに求める必要がある。いま高架橋側壁、 $i = (u+1)/2$  のレール継目、コンクリートスラブ上面がそれぞれ  $X=0, Y=0, Z=0$  の各平面上にあるように座標軸をとり、固定音源  $i$  と受音点の座標をそれぞれ  $(X_S, Y_S, Z_S), (X_0, Y_0, Z_0)$  とし、側壁の頂点と地面の  $Z$  座標を  $ZF_k, ZG$  とすると ( $k=1, 2$ , 図-1 (b), (c) 参照)、固定音源  $i$  の音は  $t_{sni} + P_i$  秒後に、バンドレベル  $L_{if}$  の音となって受音点に到達する。

$$L_{if} = L_{of} - 10 \log_{10} (D_i^2 / D_0^2) - 4L_{if} \dots (2)$$

ただし、

$$D_i^2 = (X_S - X_0)^2 + (Y_S - Y_0)^2 + (Z - Z_0)^2$$

$$Y_S = \{i - (u+1)/2\} \cdot L_j \quad i = 1, 2, \dots, u$$

$$Z = \begin{cases} ZS & \text{(直接音の場合)} \\ 2ZG - ZS & \text{(地面反射音の場合)} \end{cases}$$

$4L_{if}$  : 回折による減衰量

$f$  : 1/3 オクターブ中心周波数

$L_{of}$  : 距離  $D_0$  で測定した騒音のバンドレベル

$L_{if}$  を  $i=1, 2, \dots, u$  の固定音源について求めて、同じ時間に受音点に到達したものを加算すれば、 $u$  個の固定

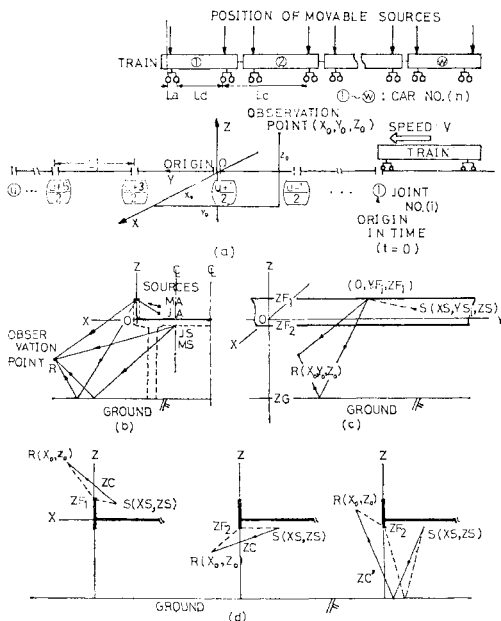


図-1 騒音予測計算モデルの概略図

音源から伝搬してきた音を合成したバンドレベルを刻々と求めることができる。

移動音源についても固定音源と同様に計算できる。計算を開始したときの位置を列車が通過してから  $T$  秒後において、移動音源  $i$  から発生した音は、 $T+P_i$  秒後にバンドレベル  $L_{if}$  の音となって受音点に到達する。

$$L_{if} = PWL_{if} - 8 - 10 \log_{10} D_i^2 - \Delta L_{if} \dots (3)$$

ただし、

$$D_i^2 = (XS - X_0)^2 + (YS_i - Y_0)^2 + (Z - Z_0)^2$$

$$YS_i = V \cdot T - a_i - (i-1) \cdot L_c / 2 \quad i=1, 2, \dots, 2w$$

$$i \text{ が奇数: } a_i = L_j \cdot (u-1) / 2 + L_a / 2$$

$$i \text{ が偶数: } a_i = L_j \cdot (u-1) / 2 + 3 L_a / 2 - L_c / 2 + L_a$$

$$PWL_{if} = L_{0f} + 8 - 10 \log_{10} \left( \sum_{i=1}^{2w} 1 / D_{0i}^2 \right) \dots (4)$$

$D_{0i}$ : 距離  $D_0$  の測定点と移動音源  $i$  の直線距離  
移動音源の場合には隣接する音源との隔たりが小さいので、その影響が式 (4) の右辺第 3 項目に現れる。

なお、 $\Delta L_{if}$  は従来よく使用されている前川の実験図表<sup>7)</sup> を数式で近似したものから求めたものである。このとき必要なフレネル番号  $N_{if}$  は、

$$N_{if} = f \cdot (FS_i + FR_i - D_i) / 170 \dots (5)$$

ただし、

$$FS_i^2 = XS^2 + (YS_i - YF_i)^2 + (ZS - ZF_k)^2$$

$$FR_i^2 = X_0^2 + (Y_0 - YF_i)^2 + (Z' - ZF_k)^2$$

$$Z' = \begin{cases} ZR & \text{(直接音の場合)} \\ 2 ZG - ZR & \text{(地面反射音の場合)} \end{cases}$$

$$YF_i = \{-XS \cdot (Y_0 - YS_i) / (X_0 - XS)\} + YS_i$$

で求められる。また、フレネル番号の正負の判定が必要であるが、これは音源と受音点を結んだ直線を  $X-Z$  面に投影して求めた。すなわち、図-1 (d) に示すように、高架上面の音源に対しては、

$$Z_c = Z_0 - X_0 \cdot (ZS - Z_0) / (XS - X_0) > ZF_1$$

高架直下の音源に対しては、

$$Z_c < ZF_2 \text{ (直接音の場合)}$$

$$Z_c' = Z_0 + X_0 \cdot (ZS - 2 ZG + Z_0) / (XS - X_0) < ZF_2$$

(地面反射音の場合)

の条件を満足するときにフレネル番号を負に判定した。

以上の計算手順で固定音源と移動音源から受音点に到達する合計 4 種類のバンドレベルを 0.1 秒ごとに求めることができる。これらのバンドレベルを同一の時間のものについて合成すれば鉄道騒音のバンドレベルが、さらにこれを合成すれば鉄道騒音のオーバーオールレベルが刻々と求められる。なお、高架上方の各位置における騒音は、JA と MA から生じた音が遮音されることなく伝搬する ( $\Delta L_{if} = 0$ ) と仮定しているため、両音源のオーバーオールレベルを用いて計算することができる。

### 3. 都営 6 号線への適用

#### (1) 計算モデル

2. に従って都営 6 号線の騒音予測計算モデルを作成した。まず、4 種類の各音源の位置をそれぞれ次のように定めた。JA と MA の音源については、JA の音源高さを枕木下面に、MA の音源高さを車軸の位置に仮定し、JA と MA は受音点側のレールに沿って生ずるものと考えた。なお、レール継目に起因する衝撃音 JA の発音機構が定量的に明らかにされていないので、JA の音源高さを明確に示すことはできないが、定性的にはすでに報告<sup>3)</sup> したように、継目衝撃音の卓越周波数は軌道構造を変更することによって変化し、軌道振動に密接な関係があることが認められたので、本研究では JA の音源高さを枕木下面に仮定した。JS と MS の音源については、音源高さをコンクリートスラブの下表面に仮定し、両者は列車走行側の軌道中心線に沿って生ずるものと考えた。

各音源のパワーレベル (半自由空間) を図-2 に示す。図-2 は、音源を仮定した位置からそれぞれ  $D_0$  離れた位置で測定した騒音を 1/3 オクターブ周波数分析し、各バンドの最大レベルについての平均的な値を求めた結果から逆算したものである。なお、騒音の測定および整理方法は後述の 4. (1) と同じであり、また、列車が測定点に最も近づいたときには、各音源の位置と測定点の直線距離は図-2 中の  $D_0$  になる。各音源のスペクトルとしては互いに影響を受けていないものが必要であるが、このようなスペクトルを実際に得ることは困難である。しかし、各音源の近くで騒音を測定することによって、その影響が比較的小さいスペクトルを得ることは可能である。ここでは、JA, JS, MS としては在来の軌道で測定したものを、MA としてはレール継目衝撃音の影響をより小さくするために、次のようなものを用いた。すでに報告したように<sup>5)</sup>、MA では  $f_{c,1/3} = 500 \text{ Hz}$  付近が一番卓越し、この領域の成分は軌道構造

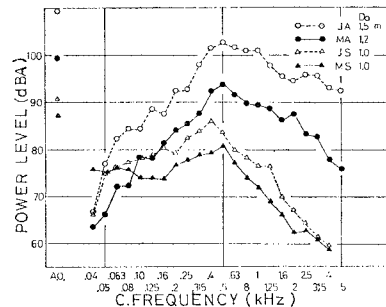


図-2 各音源のパワーレベル

に無関係に生ずること、また枕木下に合成ゴムを挿入した軌道（以後、弾性軌道とよぶ）と在来の軌道のレール継目衝撃音のスペクトルを比較すると、弾性軌道で  $f_{c,1/3}=125\sim 200$  Hz の成分のレベルが増加し、 $f_{c,1/3}=400$  Hz 以上のそれは減少することなどが認められているので、 $f_{c,1/3}=400$  Hz 以上の領域では弾性軌道の中間部で測定した騒音の方が在来の軌道のそれよりレール継目衝撃音の影響は小さい。したがって弾性軌道の中間部で測定した騒音について、おもにレール継目衝撃音の伝搬によって増大した成分 ( $f_{c,1/3}=125\sim 200$  Hz) のレベルを、在来の軌道の中間部で測定した騒音の  $f_{c,1/3}=125\sim 200$  Hz のレベルに置き換えて得た 1/3 オクターブバンドの騒音スペクトルを、MA のスペクトルとして用いた。

なお、都営6号線においてはパンタグラフの集電摩擦音は、以下の理由で鉄道騒音の主音源でないと判断した。① 中間部のパンタグラフに近い測定点（表-2 の No. 4）における騒音を周波数分析（1/3 oct.）して、各バンドレベルの時間変動を調べると、パンタグラフが車両に設置された位置に対応してレベルが上昇していない。② この測定点の騒音を分析したスペクトルと、前述の JA と MA の音源から伝搬すると仮定して算出したスペクトルは比較的よく一致する（図-3）。

ただし、列車の種類、走行条件などによってはパンタグラフの集電摩擦音も高架上の移動音源の1つとなることもあるが<sup>9)</sup>、このようなときにはパンタグラフが車両に設置された位置にも音源を仮定して、前述の MA と同様な計算を行えばよい。

表-1 に都営6号線の計算モデルの諸元を示す。都営6号線の列車は6両編成（全長120m）であるので、レール継目①～⑩を含む範囲内（ $|Y| \leq 125$  m）でモデルを構成した。したがって、固定音源は JA と JS のお

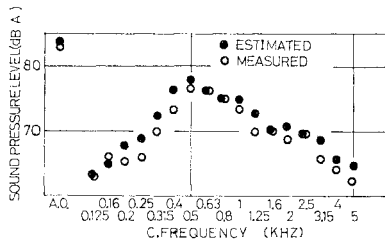


図-3 車身上部の騒音のスペクトルの実測値と計算値（測定点：表-2 の No. 4）

表-1 都営6号線の計算モデルの諸元

XS : JA, MA	-1.9 m	ZG : -7.3 m	$L_d$ : 11.4 m
JS, MS	-2.5	ZF <sub>1</sub> : 1.7	$L_j$ : 25.0
ZS : JA	0.4	ZF <sub>2</sub> : -0.3	V : 13.9 m/s
MA	1.1	$L_a$ : 2.2	$u$ : 11 個
JS, MS	-0.3	$L_c$ : 20.0	$w$ : 6 両

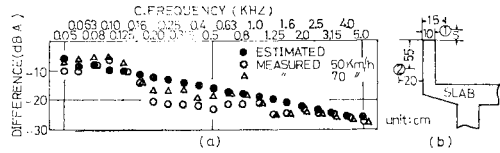


図-4 高架橋側壁の遮音（継目部断面）

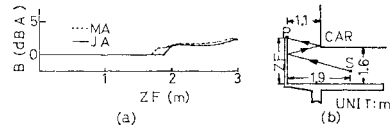


図-5 高架橋側壁と車体間の多重反射によるレベルの増加

のおのについて11個、移動音源は MA と MS のおのについて12個存在する。また、前述のように高架下面にスラブの厚さ（0.3m）と同じ高さの遮音壁を仮想した。

また、高架上面には高さ1.7mのコンクリート製の側壁が続くが、この側壁が高架上面の音源から発生する音をどの程度遮断するかということは実測によって調べた。図-4(a)は図-4(b)の測定点①、②のバンドレベルの差について、実測した結果と高架橋側壁を剛な半無限の遮音壁と仮定した本研究でのモデルを用いて計算した結果を示したものである。大部分の周波数領域で計算で推定される値以上の減衰が認められるので、この側壁は高架上面の音源から発生する音を十分遮断していると考えられる。また、側壁と車体間の多重反射に起因して騒音のレベルが増加することが考えられるが、このとき車体の表面の複雑な形状をも考慮して、その増加量を算定することは困難であるので、ここでは側壁と車体を平坦な完全反射面と仮定した。図-5(a)は図-5(b)の点音源 S から受音点 P へ伝搬する音のレベルが多重反射によって増加する量 B を算定したものであるが、これから都営6号線においては多重反射の影響を考慮する必要がないことが推察される。なお、壁が高くなれば多重反射の影響が現れる傾向が認められるが、その大きさについては今後の検討が必要である。

(2) 鉄道騒音の伝搬性状に関する考察

前述の計算手順に従って高架上方ならびに高架側方へ伝搬する騒音のレベル(A特性)を算出して、その伝搬性状について考察した。

a) 高架上方へ伝搬する騒音

高架直下で発生する固体音ならびに高架橋による遮音の影響を無視できる場合の騒音、つまり高架橋の斜上方へ伝搬する騒音や平坦な砂利道床上を列車が走行するときに軌道周辺に伝搬する騒音を想定して検討した。なお、ここでは JA と MA の音源高さは同じ位置に考え

たが、上述の計算条件においては、この近似は結果に大きな影響を及ぼさない。

鉄道騒音が人家に及ぼす影響を検討する場合には、列車進行方向に直交する方向の伝搬性状が必要であるが、軌道にレール継目が 25 m 間隔に存在するために、その伝搬性状は一様ではない。このため、レール継目位置の断面（継目部断面  $Y=0$ ）から継目と継目の中間位置の断面（中間部断面  $Y=12.5$ ）までの各断面の各位置において騒音レベルを計算した。その一例として図-6 に継目部と中間部断面の計算結果を示す。図中の JOINT は JA に、MOTOR は MA に相当し、O.A. は両音源の合成音のレベルを示す。このように各断面の各位置において時間的に変動する騒音レベルが得られるが、この波形について大きい方から 12 個のレベルを読み取り、それを算術平均したものをその位置の騒音の平均的な最大レベルとみなした。図-6 で認められるように、レールからの距離  $W$  が近ければ騒音レベルの波形はかなり変動するので、算術平均するレベルの個数によって平均的な最大レベルの値がかなり異なる。したがって、ここでは移動音源を構成する点音源の個数（12 個）と同数のレベルを算術平均することを基準にした。レール継目から列車進行方向に 12.5 m の範囲について騒音レベルの等音線を作製したのが図-7 である。JA と MA の両音源を同じ高さに仮定しているため、レールからの距離（ $W = \sqrt{X_0^2 + Z_0^2}$ ）が等しいところでは騒音レベルは等しく、したがって音場は  $W=0$  を軸とした半回転体になる。このような音場が  $Y_0=0$  あるいは  $Y_0=12.5$  を対称面にして続いている。図-8 は継目部と中間部の両断面における騒音レベルのレールからの距離による減衰性状を示したものである。これらの図から、次のことが認められる。レールに近いところでは各音源の特性が強く反映するので断面位置によって鉄道騒音の伝搬性状（各音源の寄与、距離減衰

性状など）は大きく異なっている。たとえば図-6, 8 から継目部と中間部の両断面の各位置について、各音源の寄与が検討できる。つまり継目部断面でレールから約 16 m 以内では鉄道騒音のレベルは JA から伝搬してき

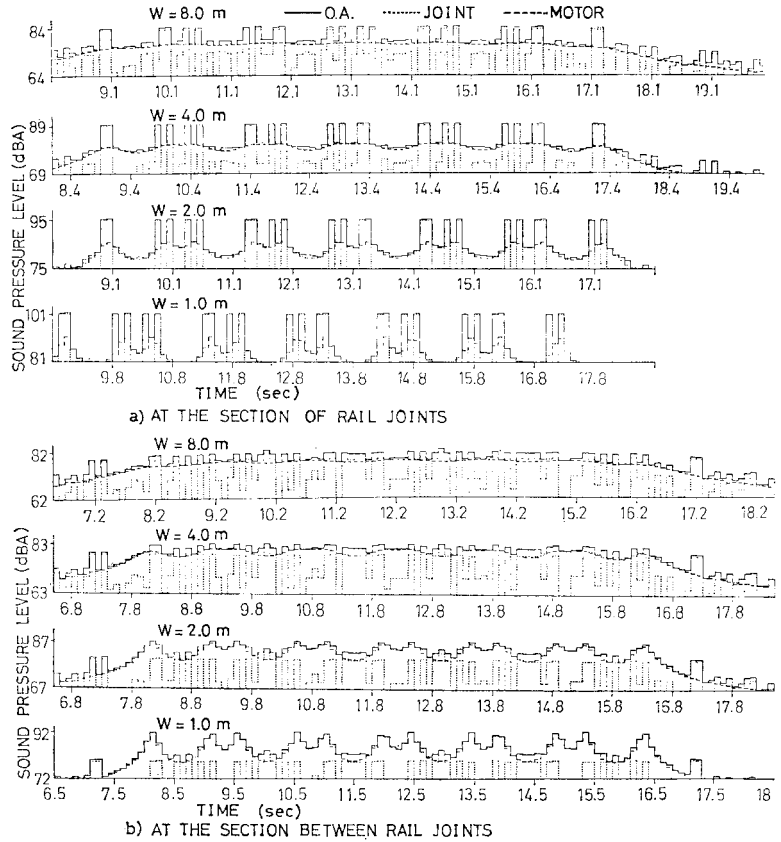


図-6 高架上方へ伝搬する騒音の時間的变化

移動音源の個数（12 個）と同数のレベルを算術平均することを基準にした。レール継目から列車進行方向に 12.5 m の範囲について騒音レベルの等音線を作製したのが図-7 である。JA と MA の両音源を同じ高さに仮定しているため、レールからの距離（ $W = \sqrt{X_0^2 + Z_0^2}$ ）が等しいところでは騒音レベルは等しく、したがって音場は  $W=0$  を軸とした半回転体になる。このような音場が  $Y_0=0$  あるいは  $Y_0=12.5$  を対称面にして続いている。図-8 は継目部と中間部の両断面における騒音レベルのレールからの距離による減衰性状を示したものである。これらの図から、次のことが認められる。レールに近いところでは各音源の特性が強く反映するので断面位置によって鉄道騒音の伝搬性状（各音源の寄与、距離減衰

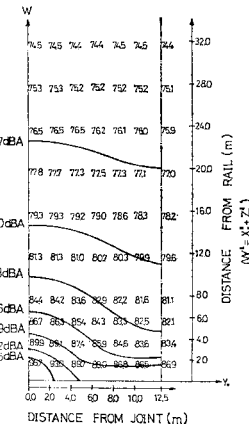


図-7 高架上方へ伝搬する騒音の等音線

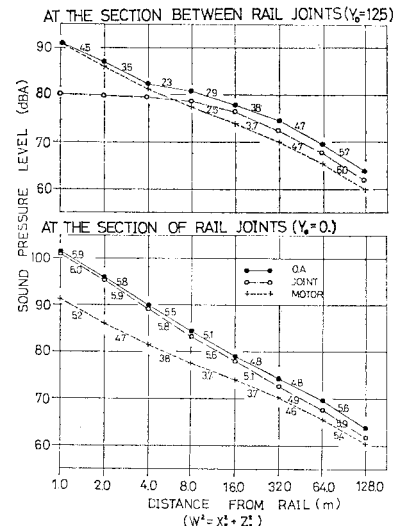


図-8 高架上方へ伝搬する騒音の距離減衰性状

た衝撃音のレベルに支配され、これより遠方になればしだいに MA から伝搬してきた音のレベルにも影響される。一方、中間部断面でレールから約 2 m 以内では、各ボギー台車が受音点のすぐ前を通過するとき鉄道騒音のレベルが最大になり、その大きさは MA からの音に支配される。また、この範囲では各ボギー台車が通過するごとに騒音レベルが変動し、最大レベルと最小レベルの差が大きい。これより遠方になれば、MA からの音はしだいに一樣なレベルを示すようになってともに、むしろ衝撃音のレベルの方がやや大きくなっていく。このようにレールに近いところでは JA と MA の両音源が鉄道騒音のレベルに与える影響は複雑である。

このことは距離減衰性状にも大きく影響し、減衰性状が断面位置で異なる原因になっている。そして図-8 から認められるように、鉄道騒音の減衰性状には JA と MA の両音源の減衰性状が反映している。このうち MA からの音は断面位置によらず同一の減衰性状を示し、4 m 付近までは点音源的減衰、4~30 m 付近までは線音源的減衰、さらに遠方では再び点音源的減衰をする。しかし JA からの音の減衰性状は、レールの近くにおいては断面位置によって大きく異なる。これは列車の走行によって各所のレール継目が騒音を発生するのが原因であると考えられる。これを継目部断面でみれば、レールの近くではほとんど1つのレール継目衝撃音が点音源的に減衰しているが、減衰量の少なくなる約 16 m 付近ではより多くのレール継目衝撃音が影響を及ぼし、そして再び減衰量が大きくなる約 64 m 以上では有限個のレール継目から構成される音源全体が点音源とみなされるようになる。また、JA からの音を中間部断面でみれば、約 8 m 付近までの騒音レベルはほとんど変化しないが、これより遠方になるとしだいに減衰量が増す。しかし、JA からの音もレールから約 32 m 以上遠方においては、断面位置によらず同一の減衰性状を示し、したがって鉄道騒音の距離減衰性状ならびに両音源の寄与も一樣になってくる。

#### b) 高架側方へ伝搬する騒音

高架側方では鉄道騒音に寄与する音源の数も増え、計算モデルは 3. (2), a) のモデルより複雑になるが、前述と同様な計算手順によって、JA・MA・JS・MS の各音源から生ずる音の伝搬性状と、その複合音である鉄道騒音の伝搬性状を求めることができる。なお高架上面の音源は高架橋側壁によって遮音され、音源高さの相違が結果に大きな影響を及ぼすので、この計算では JA の音源高さは枕木下面に、MA のそれは車軸位置に仮定した。図-9 には継目部と中間部の両断面の各位置における鉄道騒音のレベル(最大値)と 3 dBA ごとの等音線を示す。また、各音源の寄与を明らかにするために、各位置

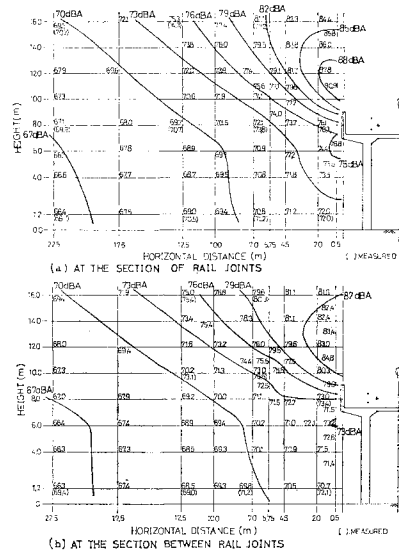


図-9 高架側方へ伝搬する騒音の等音線

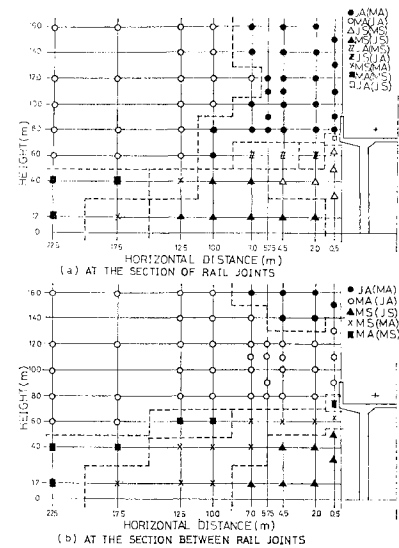


図-10 高架側方の騒音に対する各音源の寄与

において各音源から伝搬したレベルを比較し、大きい方から 1, 2 番目のレベルを示す音源を整理して図-10 に示す。これらの図から次のことが認められる。

高架側方の騒音に対する各音源の寄与は複雑であり、特に高架橋に近いところでは、地面からの高さ、高架橋側壁からの水平距離、継目部や中間部などの断面位置(以後、高さ、距離、断面と略記する)によって異なっている。たとえば図-10 (a) の継目部断面において、高さ 8 m 以上では高架上面の JA と MA によって鉄道騒音のレベルが支配されている。そのなかでも特に距離 7 m 以内では JA が、距離 10 m 以上では JA より MA がそれぞれ優勢である。なお距離 10 m 以上の遠方

における騒音の伝搬性状は前節と異なり、MA から伝搬した騒音のレベルがJA のそれより大きい、これはJA と MA の音源高さに差があるために、高架橋側壁を回折することによる減音量が両者で異なることに起因するものである。

高さ 7 m 以下で距離 10 m 以内では、高架直下の音源である JS と MS が優勢である。そのなかでも特に距離 2 m 以内の高架橋近くでは JS が、それ以遠では MS が優勢である。しかし距離 12.5 m 以遠では高架上面の MA の回折音が MS とともに鉄道騒音のレベルに主要な影響を及ぼしている。なお各音源から伝搬してきた騒音のレベルを比較すると、この部分では特に卓越した音源はなく、おのおのが鉄道騒音にかなりの影響もっている。それゆえ 図-9 (a) に認められるように、この部分における鉄道騒音の水平方向の距離減衰量は小さくなっている。

MA と MS の伝搬性状は継目部や中間部などの断面位置によらず同じであるが、レール継目に起因する JA と JS の伝搬性状は断面位置によって異なっている。したがって、中間部断面における鉄道騒音に対する各音源の寄与も 図-10 (b) のように変化する。中間部断面ではレール継目から離れるために、遠方だけでなく高架橋に近いところも含めて、MA が一番優勢になる。JA は高さ 13 m 以上で距離 5 m 以内の高架上方でのみ卓越する。その結果、 図-9 (b) の鉄道騒音の等音線にも、MA の伝搬性状が強く反映している。

また、距離 15 m 以遠の各場所での鉄道騒音は、継目部と中間部の断面位置によらずほとんど同じ音源構成であり、したがって両断面のレベル差も小さくなり、鉄道騒音の伝搬性状は一緒になってくる。

次に鉄道騒音が 70 dBA 以上になる場所について、計算結果をもとにして考察してみた。 図-9 から、該当する場所は、地面からの高さ 10 m 以下で高架橋側壁からの水平距離 10 m 以内の高架橋に近いところと、高さ 10 m 以上で距離 17 m 以内の高架上方であることがわかる。高架上方でも特に距離 10 m 以内では、高架橋側壁を回折することによる減衰が少ないので騒音レベルが高くなり、この部分に存在するビルディングやアパートにおいて、騒音が問題になるものと考えられる。

減音対策の1つとして、レール継目を撤去して鉄道騒音を低減させることが考えられる。 図-11 は継目部断面において JA と JS を除いた場合の騒音レベルならびにその減音量を求めたものである。これによると他の音源より JA または JS からの音がかかなり優勢である距離 7 m 以内の場所では、約 3~8 dBA の減音効果が見込まれるが、各音源からの騒音が錯綜する遠方の場所では、減音量は 3 dBA 以下に低減する。また、高架上

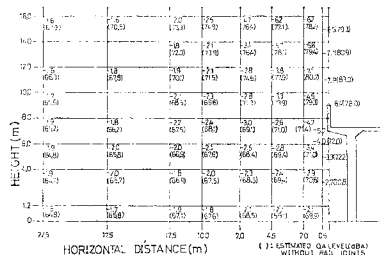


図-11 レール継目を撤去した場合に見込まれる減音量ならびに騒音レベル(継目部断面)

方では依然 70 dBA 以上のところがあり、これをさらに減音するためには MA にも対策を施すことが必要になる。しかし、レール継目を撤去しないでは、他の音源に有効な減音対策を施しても鉄道騒音の減音効果は小さい。減音対策上よりすれば、レール継目の撤去は不可欠なことであると考えられる。

同様にして、他の音源の減音効果が鉄道騒音に及ぼす影響も予測でき、その対策の効果の限界について検討することができる。一般に、各音源が高架側方の騒音に及ぼす影響は複雑であって、それは地面からの高さ、高架橋からの水平距離、継目部と中間部などの断面位置によって異なっている。したがって、特定な1つの音源に有効な減音対策を施しても、場所によっては鉄道騒音の減音効果があまり上がらないこともある。このことは特定な1つの音源についての減音効果と、ある地点における鉄道騒音の減音効果とを区別して評価すべきであること、また鉄道騒音のレベルを減少させるためには複合的な対策が必要であることを示している。

#### 4. 実測結果との比較

2. (1) の仮定に従って作成したモデルで計算した結果が実測値とどの程度合致するかをみるために、都営 6 号線西台-高島平区間における騒音の実測結果と比較した。

##### (1) 高架上方へ伝搬する騒音

高島平行(北行)ならびに三田行(南行)の列車の騒音レベルを高架上の各場所で実測した。騒音の測定および整理方法は前報<sup>5)</sup>に示したとおりであり、その実測値は精密騒音計のペンの応動特性: Fast の指示値であり、騒音レベルの最大値の平均的な値である。

計算値と実測値を比較したものを表-2に示す。なお、表中の座標軸は 図-1 (a) のようにとり、 $X_0$  は測点側のレールからの距離、 $Y_0$  はレール継目からの距離、 $Z_0$  は枕木下面からの高さである。表-2 から音源を仮定した位置に近い車両下部付近の測定点だけでなく、車

表-2 高架上方の騒音レベルの実測値と計算値の比較

No.	( $X_0, Y_0, Z_0$ ) (m)	Measured (dBA)	Estimated (dBA)	
1	1.2, -0.6, 0.7	98.1	98.2	For Mita
2	1.9, -0.6, 4.2	87.1	88.9	
3	1.2, -9.7, 0.7	92.5	90.0	
4	1.9, -9.7, 4.2	83.0	83.7	
5	1.2, 1.8, 0.7	93.4	94.9	For Takashimadaira
6	5.4, 1.8, 4.2	83.3	85.6	
7	1.2, -7.3, 0.7	90.9	89.2	
8	5.4, -7.3, 4.2	82.1	83.5	

表-3 高架直下の騒音レベルの実測値と計算値の比較  
(\* は参考文献 8) より)

No.	( $X_0, Y_0, Z_0$ ) (m)	Measured (dBA)	Estimated (dBA)	
1	-1.8, 0, -0.2	81.6	79.9	For Takashimadaira G=6.1 m
2	-1.8, 0, -2.2	72.9	76.4	
3	-1.8, 0, -4.2	74.3	73.7	
4	-1.8, 0, -1.0	78.8*	78.7	For Takashimadaira G=7.0 m
5	-1.8, 0, -3.0	76.0*	74.9	
6	-1.8, 0, -5.8	75.5*	72.2	

両上部付近の測定点についても実測値と計算値の差は比較的小さいことが認められる。車両上部付近の測定点の近くにはパンタグラフが存在するにもかかわらず、このような結果を得たということは、都営6号線においてはパンタグラフの集電摩擦音が優勢ではないことを示すとともに、高架上の音源について 2.(1) で行った仮定ならびに 2.(2), 3.(1) で作成した計算モデルが実用的な精度の範囲内では妥当であることを示すものと考えられる。

(2) 高架直下へ伝搬する騒音

高島平行の列車の騒音レベルを高架直下の各位置で実測した。計算値と実測値を比較したものを表-3 に示す。計算モデルは基本的には高架上方へ伝搬する騒音に関するモデルと同じであるが、それと異なる点は、①音源が 3.(1) に示した JS と MS である、②高架直下の各位置には音源からの直接音と地面を1次反射した音が伝搬すると仮定して、両者の合成レベルを求めるところである。なお、表中の座標軸は 図-1 (a) のようにとり、 $X_0$  は列車走行側の軌道中心線からの距離、 $Y_0$  はレール継目からの距離、 $Z_0$  は高架橋のコンクリートスラブの下面からの高さ、 $G$  は同スラブの下面から地面までの距離である。表-3 から計算値と実測値の差は 3.5 dBA 以下であり、両者は比較的一致していることが認められる。したがって、高架下の音源について 2.(1) で行った仮定は実用的な精度の範囲内では妥当であると考えられる。

(3) 高架側方へ伝搬する騒音

比較の対象として昭和 49 年に東京都交通局が西台-高島平間で深夜に試験列車を走行させて高架側方の各場所の騒音を実測した結果を用いた<sup>8)</sup>。図-9 の高架側方の騒音レベルの等音線における「MEASURED」はその実測値で、測定した鉄道騒音をオクターブバンドで周波数分析し、そのスペクトルをA特性に換算して、オーバーオール値を求めたものである。図-12 は高架側方の騒音のスペクトルの一例であり、実測によって得たオクターブバンドスペクトルをA特性に換算したもの(実測値)と、高架側方の騒音予測計算モデルによって得た1/3 オクターブバンドスペクトルをオクターブバンドに合成したもの(計算値)を比較して示したものである。図-12 においても認められることであるが、高架上方を除けば、高架上面の音源から生じた音が高架橋側壁によって遮音され、高い周波数成分のレベルが大きく減衰

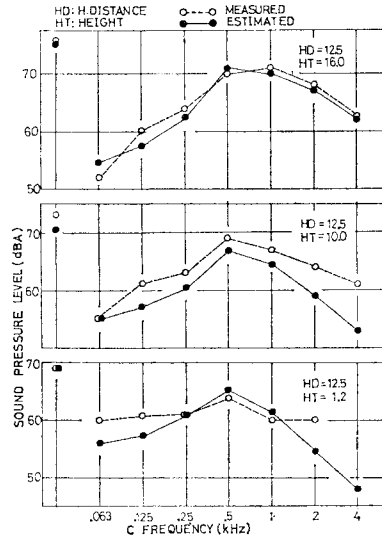


図-12 高架側方の騒音のスペクトル (中間部断面)

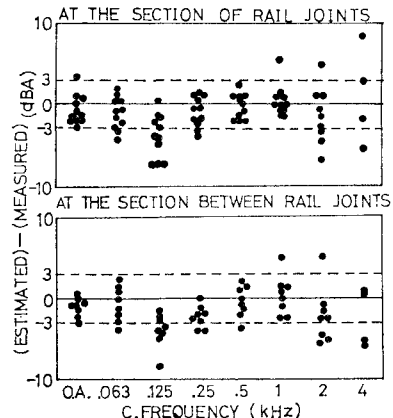


図-13 高架側方の騒音のスペクトルの実測値と計算値の差



するので、高架側方の多くの場所で 500 Hz の中心周波数が一番優勢なスペクトルとなる。また、図-13 は実測値と計算値との差を、継目部と中間部の両断面の各位置についてまとめたものである。これより、一部の中心周波数については実測値との差が大きいものもあるが、全般的に実測値と計算値の差は小さい。しかも高架側方の各場所で一番優勢な 500 Hz 付近の中心周波数が、比較的適確に予測できたために、オールオーバーレベルについても  $\pm 3$  dBA 以下の差で実測値と計算値が一致していることが認められる。したがって、高架側方へ伝搬する騒音について 2.(1) で行った仮定ならびに 2.(2)、3.(1) で作成した計算モデルが実用的な精度の範囲内では妥当であると考えられる。

## 5. 結 語

本研究で得られた結果を整理して示すと次のようになる。

(1) 砂利道床コンクリート高架橋の上を、列車が比較的低速で走行するときに、高架周辺に生ずる騒音を予測する計算モデルを示した。計算モデルは高架上面と高架直下に仮定した 4 種類の点音源 (JA, MA と JS, MS) によって構成されている。ここで JA と JS は各レール継目の位置に固定され、車輪がレール継目を通過するたびに音を発生する。一方、MA と MS は各車両のボギー台車の中央位置に固定され、列車速度で移動しながら音を発生する。そして高架上方の騒音は高架上面の音源 (JA, MA) から生じた音が直接伝搬してきたものであり、また高架側方の騒音は高架上面ならびに高架直下の音源から生じた音が、高架橋側壁あるいは高架橋自身を回折して、直接あるいは地面で反射して高架側方へ伝搬してきたものである。このような騒音予測計算モデルを用いて、都営 6 号線の騒音レベルならびにオクターブバンドスペクトル (A 特性) を計算した結果を、そこでの実測値と比較すると、両者はかなりよい一致を示し、この計算モデルは実用的な精度の範囲内では妥当であることが確かめられた。

(2) このモデルで鉄道騒音の伝搬性状を計算した結果によれば、鉄道騒音に対する各音源の寄与は複雑であって、高架上方の騒音においてはレールからの距離と断面位置によって異なり、また高架側方の騒音においては地面からの高さ、高架橋からの水平距離と断面位置によって異なっている。つまり高架上方の騒音でレールに近いところにおいては、継目部断面で JA が、中間部断面で MA がそれぞれ卓越する。しかし、レールから遠ざかるにつれて、両音源の寄与は同じ程度になる。また、高架側方の騒音で高架橋に近いところにおいては、一定

の高さ以上のところでは高架上面の JA と MA が、一定の高さ以下のところでは高架直下の JS と MS がそれぞれ優勢であり、特に継目部断面では高架橋に近づくにつれて JA と JS が卓越してくる。一方、中間部断面では高架橋に近いところでも MA と MS が一番優勢になり、JA は高架上方でのみ卓越する。しかし、高架側方の騒音においても、一定の距離以上高架橋から離れると、継目部と中間部などの断面位置によらず、各音源の寄与は同じ程度になり、したがって鉄道騒音の距離減衰性状も一樣になる。

(3) 減音対策の 1 つとしてレール継目を撤去できたと仮定して計算した結果によれば、レール継目に起因する音源が優勢な場所ではかなりの減音効果が見込まれるが、各音源からの騒音が錯綜する場所では減音効果は低減する。しかし、レール継目を撤去せずには、他の音源に有効な減音対策を施しても鉄道騒音の減音効果は小さく、減音対策上まずレール継目の撤去が不可欠であると考えられる。

(4) 高架側方の騒音をこのモデルで計算した結果によれば、70 dBA 以上の騒音レベルは高架橋側壁から約 10 m 以内の部分であり、そのなかでも特に高架上方でレベルがかなり大きい。この部分ではレール継目の撤去による減音効果を見込んで依然 70 dBA のところがあり、これにはレール継目以外に起因する高架上面の音源 MA についての対策も同時に必要になる。

なお、本研究では鉄道沿線近傍の騒音を対象にして検討したが、これは次の理由による。① 新幹線とは異なって、都市鉄道においては 70 dBA 以上の騒音レベルが発生する範囲は沿線近傍に限られる<sup>11), 12)</sup>。② 都市鉄道においては沿線近傍にも人々が生活することが少なくないので、沿線近傍の騒音に対する検討が不可欠である。③ 一般に計算モデルの差違が明確に現れるのは沿線近傍の音場においてであり、沿線から離れるほどモデルによる差は小さくなる。④ 沿線から離れた場所においては、鉄道騒音だけでなく道路交通騒音、工場騒音などの影響が無視できなくなることが考えられるので、その影響を考慮した計算モデルでその位置の騒音を検討する必要がある。

また、本研究では 2.(1) の仮定が実用的な精度の範囲内では妥当であることを種々の実測によって確かめた。音源の指向性、移動音源をボギー台車の中央位置に置かれた点音源とみなせる範囲、側壁と車体間の多重反射による影響などについてはさらに詳細な検討が必要である。しかし、これらの問題は鉄道騒音を構成する主音源の発音機構と密接な関連があり、今後音源の発音機構が解明されていく過程で漸次解決されていくべき性質のものであると思われる。

最後に、本研究にあたり、終始ご指導を賜った東京大学工学部 松本嘉司教授、実験などでご助力をいただいた東京都交通局、東京大学交通研究室の皆様には深甚の謝意を表明いたします。

#### 参 考 文 献

- 1) 荒井昌昭・井川敬之介ほか：鉄道車輛の走行による車外騒音の軽減の研究，鉄道技術研究報告，No. 81，1967.
- 2) Arai, M. and Y. Ban : Noise Control for Shinkansen Railways, Proceeding of Inter-Noise 75, pp. 69~76, 1975.
- 3) Lyon, R.H. : Transportation Noise, Grozier Publishing, 1973.
- 4) Serendipity, Ic. : A Study of the Magnitude of Transportation Noise Generation and Potential Abatement Vol. V, Train System Noise, DOT, pp. 118, 1970.
- 5) 松本嘉司・小沢康人・渡辺義則：都市鉄道の騒音発生に関する研究，土木学会論文報告集，第262号，pp. 101~112, 1977.
- 6) 松本嘉司・渡辺義則・角 知憲：鉄道騒音，土木学会第4回環境問題シンポジウム講演集，pp. 19~24, 1976.
- 7) 日本音響材料協会：騒音対策ハンドブック，技報堂，1965.
- 8) 日本鉄道施設協会：地下鉄6号線高架線部騒音振動調査報告書，1975.

(1977.5.30・受付)