

高 速 道 路 の 騒 音

文献調査委員会

田 村 幸 久*

はじめに

現在、道路騒音は、航空機騒音、新幹線騒音と並んで大きな社会問題の一つとなっているが、高速道路のような自動車道路の交通騒音の研究は、わが国ではまだ比較的歴史が浅く、盛んに行われるようになったのは、ここ5~6年であろう。

筆者のような道路建設者の側からみた限りにおいては、道路交通騒音に関する道路(交通および構造)と関連づけた体系的な調査研究は、まず昭和43年に日本音響学会によってなされているが¹⁾、その後、道路建設者の側でも、建設省土木研究所をはじめとして、関係各機関で精力的に研究が進められ、現在では、道路騒音の発生、伝搬、減衰のメカニズムのあらましがわかってきたといえる状況である。しかしまだ十分にわかっていない事項も多く、今後の研究が急がれているのが現状である。ここでは、このような現状にある高速道路交通騒音の問題について、できるだけ内外の文献を中心に解説したい。なお、騒音一般および、道路交通騒音に関する基礎的、一般的事項については、すでに本誌(昭和48年8月号)の特集「騒音の考え方」において詳しく説明されているので、それらを再読していただくことにし、ここでは、それらとの重複は、できるだけ避けるように努めるつもりである。しかし、構成上どうしても必要な場合には、あえて重複させていただくこともあるので御了承願いたい。

1. 個々の自動車の騒音

高速道路交通騒音の音源はいうまでもなく、道路上を走行する個々の自動車が発する騒音である。一般に自動車騒音は車内騒音と車外騒音に大別されるが、交通公害として問題となるのは車外騒音である。自動車の車外騒音は、エンジン、タイヤなど各部から発生する騒音が合成されたものであり、さらに、車種、速度、走行条件(定

常、加減速等)、路面条件、その他、車両と道路相互の条件の組み合わせの変化によって複雑に変化するものである。

(1) 自動車騒音の構成要素

自動車騒音は、機関音、動力伝達機構音、風切音、タイヤ音、車体の振動音などから構成されている。前二者をまとめて動力音、残りの三者をまとめて走行音に分類することもある。このうち、動力伝達機構音、風切音、車体振動音などは、通常では他の要素にくらべ、レベルが低く、全体の騒音レベルには、ほとんど寄与していないことが知られている。したがって、走行中の自動車騒音は、機関音とタイヤ音で決まるといえる。

機関音は、エンジン音(エンジンの動弁系の打音、燃焼音)、吸排気音、冷却ファン音(ラジエーター音)などから成り立っており、エンジン回転速度およびトルク負荷が関係する。例えばイギリスでの調査報告では、エンジン騒音は、普通のディーゼルエンジンでは、

$$\text{騒音レベル } \text{dB(A)} = 30 \log_{10} N + k$$

(N : 回転速度, k : 定数)

ガソリンエンジンでは

$$\text{騒音レベル } \text{dB(A)} = 50 \log_{10} N + k \dots \dots (1.1)$$

吸排気騒音は

$$\text{騒音レベル } \text{dB(A)} = 45 \log_{10} N + k \dots \dots (1.2)$$

ファン・ラジエーター騒音は

$$\text{騒音レベル } \text{dB(A)} = 60 \log_{10} N + k \dots \dots (1.3)$$

で表わされるとしている²⁾。

タイヤ騒音は、タイヤ自身および路面相互間から発するものであるが、その構成要素として代表的なものは、

- ① パターンノイズ(トレッドパターンから発生する音)
- ② スケルチ(トレッドが接地するときに発生する音)
- ③ ロードノイズ(路面の加振による音)
- ④ サンプ(タイヤ自体の加振による音)
- ⑤ スキール(タイヤのスリップによって発生する音)

などであるが、このうち主体をなすのはパターンノイズであるといわれている。

* 正会員 日本道路公団技術部技術第三課

タイヤ騒音には、走行速度、タイヤの種別、路面種別、積載量などが影響する。まずタイヤ騒音と走行速度の関係は、イギリスでの調査では、惰行走行時の路面騒音として次式 (Rathe の測定式)

$$\text{騒音レベル dB(A)} = 0.2V + k \dots \dots \dots (1.4)$$

(V : km/h, k : 路面による定数)

を示し、調査した狭い範囲の速度では ($30 \log_{10} V + k$) に等しいとしている³⁾。わが国では、日本自動車研究所 (JARI) と、日本自動車タイヤ協会 (JATMA) がともに、大がかりな調査^{3),4)}を行っているが、JARI の報告では大型トラック・バス用タイヤにおいては、タイヤ騒音レベル (L dB(A)) と速度 (V km/h) の間にはほぼ次式に近い関係が成立つとしている³⁾。

$$L = 30 \log_{10} V + C \quad (C: \text{定数}) \dots \dots \dots (1.5)$$

なお、JATMA の調査では、リップタイヤ (縦みぞのトレッドパターン) とラグタイヤ (横みぞのトレッドパターン) では速度による増加の勾配が異なり、 $40 \leq V \leq 100$ km/h の範囲で、次式を示している⁴⁾。

$$\text{リップタイヤ } L = 30.5 \log V + 24.1 \dots (1.6)$$

(相関係数 $r = 0.963$)

$$\text{ラグタイヤ } L = 41.6 \log V + 9.3 \dots \dots (1.7)$$

(相関係数 $r = 0.964$)

次に、タイヤのパターン種別による騒音レベルの違いは、低いものから順に次のようになり、

スムーズ≒ストレートリップ<リップ

<スノー<ラグ

また、構造的には、ラジアル構造はバイアス構造より低い傾向にある。その結果騒音レベルが最も高いのはバイアス構造のラグタイヤで約 85 dB(A) あり、最も低いのはラジアル構造のリップタイヤで約 76 dB(A) 程度の違いがある (速度 40~100 km/h での総平均値による比較) ことが報告されている⁴⁾。また路面種別による違いはアスファルト路面とセメントコンクリート路面とではタイヤ騒音レベルに差がなく^{3),4)}、積載量による違いは、空車から定積になる場合は、ラグタイヤでは各速度により 4~8 dB(A) 増加するがリップタイヤではほとんど増加せず³⁾、さらに定積 (100%) から過積 (150%) になってもあまり変化しないが、バイアス構造ラグタイヤはわずかながら (1~3 dB(A)) 増加する⁴⁾ ことが報

告されている (後述の路面性状、積荷の影響の項参照)。

このような機関音とタイヤ音のどちらが卓越するかは車両の状態や走行条件などにも関係するのでいちがいにいえないが、図-1 は、これら 2 要素についての実測例である⁵⁾。これによれば乗用車では 50~60 km/h、大型車では 60~70 km/h を境として、それより上 (大体トップギヤで走行する範囲) では、エンジン音よりタイヤ音が優勢であり、それより下では、逆にエンジン音が優勢となる。しかし大型車について上記はラグタイヤの例でタイヤ騒音が大きい場合であるが、最近の大型車のタイヤ騒音に関する調査によれば、タイヤのパターン種別による力行時と惰行時の騒音レベルについて図-2,3 のような結果が得られている^{3),4)}。これによれば、ディーゼルエンジン車では、大体において常にエンジン音がやや優勢であり (図-2(1))、また図-2(2) によれば、特にリップタイヤの場合には、高速領域での定常、惰行の差

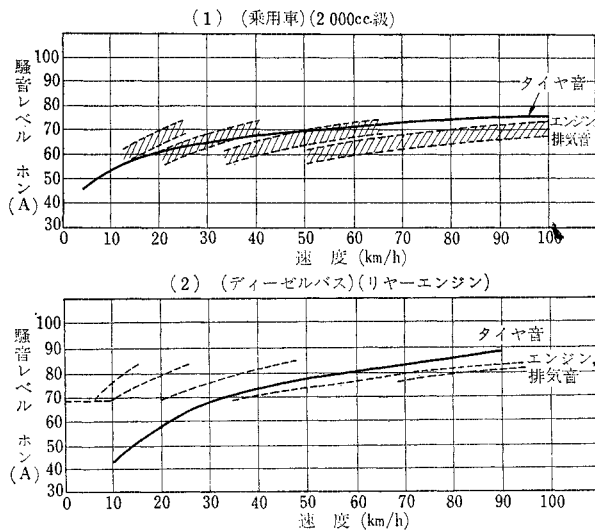


図-1 東側 10 m 位置での走行騒音における二要素の寄与⁵⁾

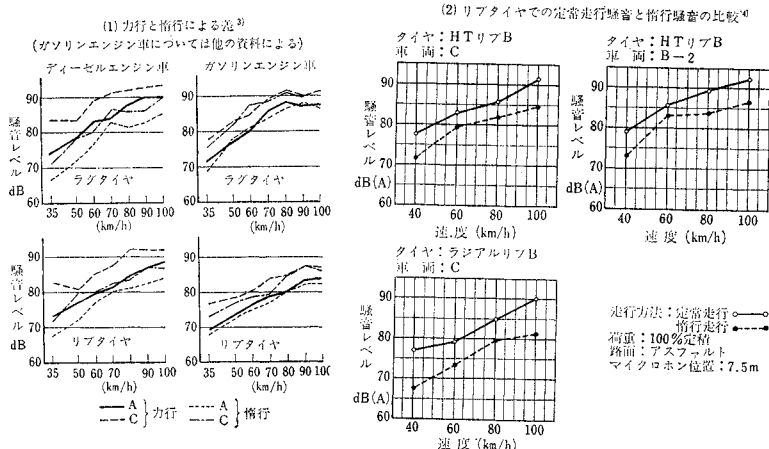


図-2 定常走行騒音と惰行騒音の差^{3),4)}

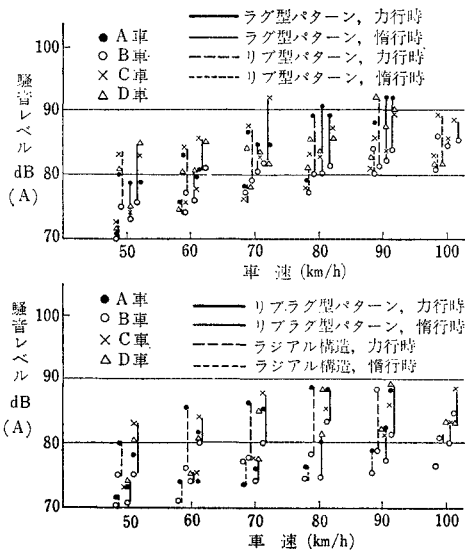


図-3 タイヤの各種パターン別車外騒音レベル比較

は大きく、エンジン音が優勢であると判断される。なお、ラグタイヤの場合は、車速 70~80 km/h 以上の高速では、定常、惰行による差はあまりなく、車外騒音に対するタイヤ騒音の影響は大きいといわれている。以上のような結果から、一般的には、高速道路での通常の定常走行においては、乗用車類ではタイヤ騒音が優勢で、大型車（貨物車）類ではエンジン騒音が若干まさるといわれている。

(2) 定常走行騒音

高速道路においては、本線部分では一般に自動車は定常走行をしており、したがって、交通騒音として問題となるのは、通常の場合は自動車の定常走行騒音である。定常走行騒音は、車種、速度、道路条件などで変化することが知られている。

a) 車種と速度

定常走行騒音をできるだけ同一の条件で測定するために公的に決められている測定法としては、道路運送車両法の保安基準に定められている方法があり、これによって、車種別に速度のときの定常走行音が規制されている⁹⁾が、この値は高速道路のような高速で定常走行を行う場合には適合しない。したがって、高い速度での定常走行騒音は、試験車を走らせたり、道路端で一般の通行車の騒音レベルを測定することにより調査されている。その結果は、種々のものが発表されており、その例を表-1~4 に示す^{7)~10)}。このように、測定結果は、国や測定者、測定位置、対象道路などによって異なり、一様ではないが、通常の道路交通における個々の自動車の発生騒音（定常走行騒音）の実態を表しているものと考えられる。

定常走行騒音と速度と車種の関係について、日本音響学会の報告書¹⁾では、乗用車について 40~100 km/h の速度のとき車線側方 7.5 m で測定した結果として図-4 を示し、速度が 2 倍で約 12 dB 増加していることから自動車の音響出力が速度のほぼ 4 乗に比例するとし、図で 60 km/h の騒音レベルが 70.5 dB(A) であることから、速度 60 km/h の乗用車のパワーレベルを 96 dB(A)

表-1 各種自動車の定常走行騒音（平均値と測定数の 80% の範囲 車速 40~50 km/h, 側方 7.5 m)⁹⁾

	平均騒音レベル dB(A)	台数	80% dB(A)
乗用車			
<1000 cc	70	211	65~74
1100~1600	71	252	67~75
>1600 cc	72	149	68~77
トラック	73	110	69~77
重トラック	81	370	76~86
LTバス	83	24	80~85
二輪車	77	53	72~83

表-2 都市内高速道路における定常走行（車速 50~60 km/h, 道路際)⁹⁾

車種	平均レベル	台数
乗用車	76 ホン(A)	364
軽自動車	77	35
大型トラック	84	137
小型トラック	78	183
バス	85	62

表-3 都市間高速道路における定常走行騒音（走行速度 80~90 km/h, 道路端で測定)⁹⁾

	測定台数(台)	平均値(dB(A))	50%値(dB(A))
大型貨物自動車	48	92.4	92.5
小型貨物自動車	17	83.4	83.0
普通乗用自動車	66	82.0	81.5
ライトバン	24	82.6	81.8

表-4 イギリスにおける道路の種類別の平均騒音レベルの比較（測定点は車線中心から側方 15 m, 地上 1.2 m)¹⁰⁾

道路種別	軽車両	重車両
地方部自動車専用道路	78.8 (dB(A))	85.0
地方部 2 車線道路	77.8	83.9
都市部 2 車線道路	77.4	83.6

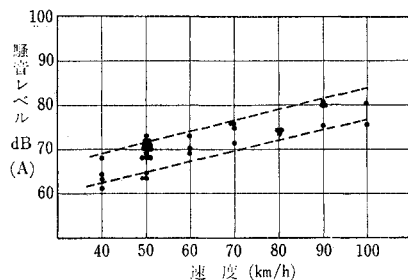


図-4 定常走行時の騒音レベルの速度による変化（側方 7.5 m)⁹⁾

とし次式を示している。

$$PWL=96+40 \log\left(\frac{V}{60}\right) \dots\dots\dots(1.8)$$

また、車種による差としては、大型車の音響出力が乗用車の6倍(すなわち8dB(A)大きい)であるとしている¹⁾。

建設省土木研究所では、通常のアスファルト舗装平坦路の一般通行車についての路側での多くの測定レベルからパワーレベルに換算した結果次式を示している¹⁾。

$$PWL=0.2\bar{V}+C \dots\dots\dots(1.9)$$

\bar{V} : 車両の平均速度

C: 乗用車類 84, 小型貨物類 87, 大型車類 94

このように定常走行騒音と速度の相関関係を、($\alpha \log V+C$)とするものと($\alpha V+C$)とするものがあるが、どちらがより妥当であるかの評価は定まっていない。イギリスでの調査では、前者の方がより相関が高いという報告もある¹⁰⁾が、現状では、高速道路のような50~130 km/hの速度の範囲では、両者の差はほとんどないため、予測計算などに用いる場合には、むしろ計算のしやすさから適当に選んで用いられることが多い。なお、この他にも、パワーレベルに関する測定は数多くなされており、種々の数値(または式)が提案されている。金安と金泉は、これらについての調査結果を表-5のようにまとめている¹²⁾。

b) 縦断勾配

路面の縦断勾配によっても自動車音は変化するが、この場合は、一般に、走行速度や、ギヤの状態などの運転

条件も変化することが多いので、いちがいにはいえない。しかし、トップギヤのまま、あまり速度変化を生じないで、平坦部とほぼ同じ運転条件で走れる場合については実測結果をもとにした次のような補正式が提案され、予測式にも取り入れられている。

例えば、日本音響学会の調査報告¹¹⁾では、大型バスを試験車に用いた測定結果(図-5)から補正のグラフを作成しているが、それはほぼ次式で表される¹²⁾。

$$V=50 \text{ km/h} \text{ で } \Delta L_i=1.8 i \text{ (dB(C))}$$

$$V=60 \text{ km/h} \text{ で } \Delta L_i=1.5 i \text{ (dB(C))}$$

$$V=100 \text{ km/h} \text{ で } \Delta L_i=0.7 i \text{ (dB(C))}$$

ここで ΔL_i は勾配による騒音レベルの変化分(ただしこの場合はdB(C)で示してある)であり、 i は勾配(%)である。

また、建設省土木研究所では、勾配 i が $\pm 5\%$ 以下で、坂路長が数100 m 以下の場合には、車両はトップギヤのまま登降坂するとし、このような場合の実測結果

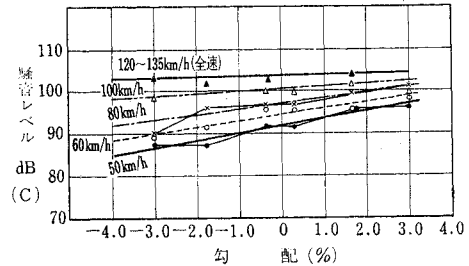


図-5 道路勾配に対する大型自動車(大型バス)の速度と騒音レベルdB(C)の関係¹⁾

表-5 自動車のパワーレベルに関する提案式(値)一覧(金安・金泉による)¹²⁾

発表者	車種とPWLの実測値	車速とPWLとの相関	文献
日本音響学会	音響出力は乗用車1に対して大型車6の割合、よってデシベル差は8である	$\Delta PWL_V = 40 \log \frac{V}{V_0}$ ΔPWL_V : 速度によるPWLの変化分, $V_0=60 \text{ km/h}$ で $PWL=96$	日本音響学会道路騒音調査研究委員会: 道路騒音調査報告書, 昭和44年3月, p. 21~24
建設省土木研究所	乗用車1に対して小型貨物車2および大型車10の割合, デシベルは小型貨物車+3, 大型車+10	乗用車 $0.2V+84$ 小型貨物車 $0.2V+87$ 大型車 $0.2V+94$	金泉 昭: 道路構造と自動車騒音-その1-, 土木技術資料13-1, 昭和46年1月, p. 34
首都高速道路公団	乗用車 $PWL=40 \log \frac{V}{60} + 100$ 大型車 $PWL=40 \log \frac{V}{60} + 110$		日本音響材料協会: 首都高速道路の騒音に関する研究報告書, 昭和46年2月, p. 59
同志社大・京大他	普通乗用車 96.5 軽バン型車 98.0 4トン以上トラック 109.0 ($V: 55 \sim 65 \text{ km/h}$)	乗用車 $PWL=A_0+30 \log\left(\frac{V}{60}\right)$ 軽乗用車 $PWL=A_0+40 \log\left(\frac{V}{60}\right)$ ($V: 40 \sim 80 \text{ km/h}$)	姫野有三・野田純一・卜部泰正・馬場秀和・高木興一・山本剛夫: 日本音響学会研究発表会講演論文集, 昭和46年11月, p. 161~164
同上	普通乗用車 $PWL(V)=96.9+0.11V$ ($V: 75 \sim 135 \text{ km/h}$) 大型トラック $PWL(V)=97.7+0.21V$ ($V: 55 \sim 95 \text{ km/h}$) (名神高速道路)		野田純一・姫野有三・卜部泰正・馬場秀和: 日本音響学会研究発表会講演論文集, 昭和47年5月, p. 483~484
京都市衛生研究所 他	乗用車 $PWL=20 \log V/60+98$ 中型トラック $PWL=20 \log V/60+103$ 大型トラック $PWL=20 \log V/60+111$ 大型バス $PWL=20 \log V/60+110$ オートバイ $PWL=40 \log V/60+110$		橋本和平・高田進・徳田純一・中西重治・北村茂・上田順一・山本剛夫・高木興一: 日本音響学会研究発表会講演論文集, 昭和47年10月, p. 17~18

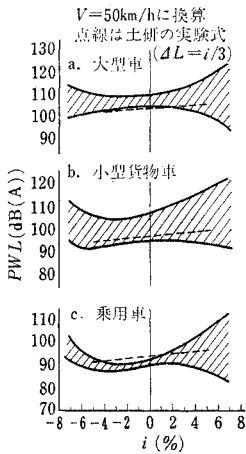


図-6 勾配によるパワーレベルの変化¹⁴⁾

(図-6) をもとにして次式を示している^{11), 13)}。

$$\Delta L_i = \frac{1}{3} i \text{ (dB(A))}$$

さらに、首都高速道路公団の調査¹⁵⁾では、次式が提案されている。

$$\Delta L_i = 90/V \times i \text{ (dB(A))}$$

その他、測定時の運転条件等は明確ではないが、アメリカの H.R.B. (Highway Research Board) の報告¹⁶⁾では、トラックのみに対する補正值として表-6 を示している(乗用車については、勾配の影響は無視できるとしている)。

e) 路面性状

路面の舗装の種類によって、タイヤ音が変化することは経験的には、よく知られているが、これに関する定量的な研究としては、わが国には、土木研究所が、路面の粗さと関連づけた調査を行い、補正の図と表を発表している(土木学会誌 1973年8月号参照)^{9), 11)}。その結果は、粗さの指数 0.1~0.4 (密粒式アスコン程度) が一番騒音が小さいという結果が得られている。海外では、E.J. Rathe が、

アスファルトとセメントコンクリート路面での測定結果として図-7 を示しているが¹⁷⁾、一方イギリスでの調査では、乾燥路面においては、通常用いられているアスファルトと、ブラシされたセメントコンクリー

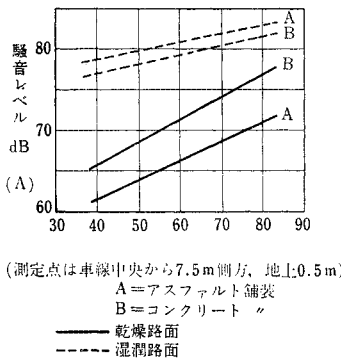


図-7 乗用車のタイヤ騒音の速度依存性 (E.J. Rathe による)¹⁷⁾

表-6 勾配によるトラックの騒音レベルの補正(HRBによる)¹⁶⁾

勾配 (%)	補正值 (dB)
≤2	0
3~4	+2
5~6	+3
≥7	+5

表-7 路面の粗さによる騒音の補正 (HRB による)¹⁶⁾

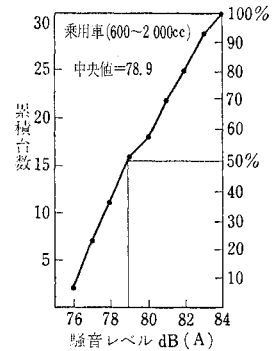
路面状態	説明	補正值 (dB)
なめらか	非常になめらかなシーラコートアスファルト舗装	-5
普通	普通の粗さのアスファルトおよびコンクリート路面	0
あらい	1/2 in. またはそれ以上の径の大きな間げきのあるあらいアスファルト舗装およびみぞ付きコンクリート舗装	+5

ト路面の路側での騒音レベルの差は非常にわずかであると述べている²⁾。また、アメリカでは、前記 HRB が、表-7 のような補正值を提案している¹⁶⁾。

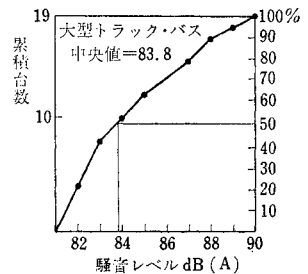
なお、その他のわが国における最近の測定結果では、アスファルトとコンクリート路面の差は、リブタイヤ(縦溝のトレッドパターン)で若干の差がみられるが、総じて明確な有意差はなく^{3), 4)}、この傾向は、路面が乾燥状態のときばかりでなく、湿潤状態のときにも変わらないことが報告されている⁹⁾。しかし、同一路面について、路面が乾燥と湿潤では、湿潤の方が騒音は大きく、かなりの差がある。これに関する測定結果は、前記図-7の他に、日本自動車研究所の測定などがあるが、それによれば、湿潤時は、乾燥時に比べてリブタイヤで 8~10 dB(A)、ラグタイヤで約 2 dB(A) 高くなり、結果として湿潤時の騒音レベルはタイヤや、路面の種別に関係なく決まることが報告されている³⁾。

(3) 加減速走行音

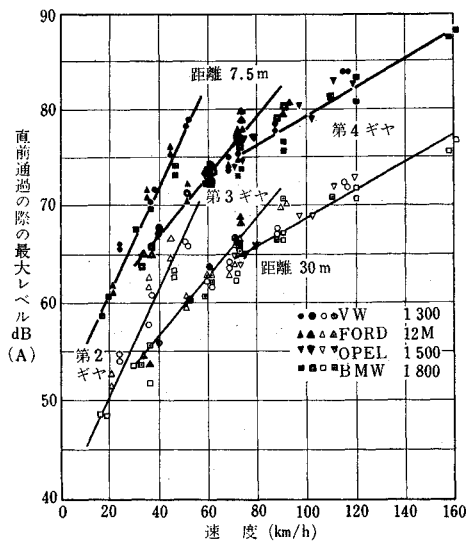
加減速走行時の音が同じ速度の定常走行時の音に比べて大きいことは定性的にはよく知られているが、測定の困難さから、定量的な測定結果は比較的少ない。自動車の加速走行条件をできるだけ一定にして、加速音を測定するための方法としては ISO (国際標準化機構) の加速騒音測定法があり、わが国の車両保安基準にも採用されている。図-8, 9 は、日本音響学会がこの測定法による加速騒音の測定結果を調査してまとめた結果である。したがって、これは、走行速度がほぼ 50 km/h から加速した状態での音であり、エンジン



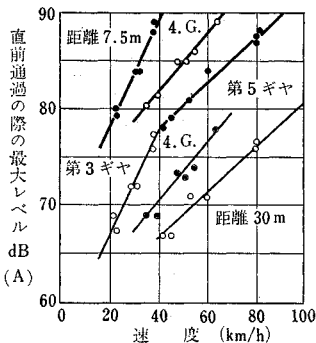
(ISO 測定法, 側方 7.5 m)
図-8 乗用車の加速騒音



(ISO 測定法, 側方 7.5 m)
図-9 大型トラックおよびバスの加速騒音

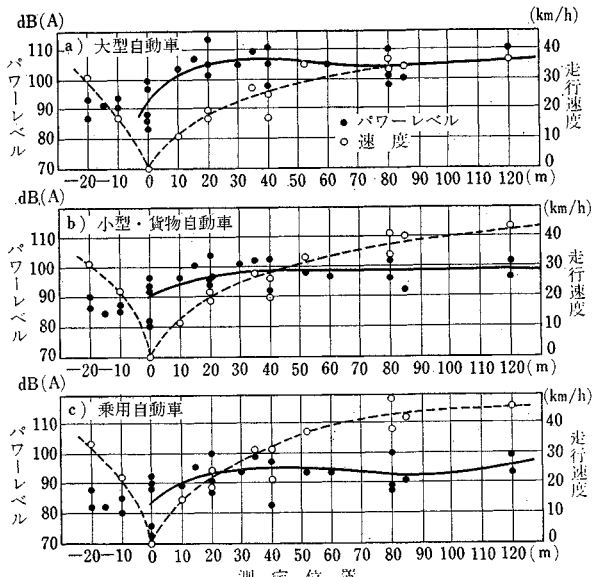


図一〇 各種乗用車通過の際の発生騒音の測定¹⁷⁾



(車種 Magirus 110 D7 FL 7.5 t, 110 馬力トラック)

図一一 トラックの発生騒音の測定¹⁷⁾



(各点は 20 台の平均値)¹⁸⁾
図一二 発進時のパワーレベル

の最高回転数付近での車両の最高騒音を示したものであるといえる。

これとは別に、交差点や、高速道路の料金所などでは、一旦停止した車両が発進加速や、減速を行うが、この場合は上記ほど大きくないが、定常走行音と大きく異なり、特に、変速ギヤの位置によりエンジン回転数が大きく変わるため、その変化も大きい。図一〇、一一は、試験車を用いた西ドイツでの測定結果である¹⁷⁾。また、建設省が全国的に発進加速区間(一時停止をする地点の前後)のそれぞれの地点における速度と騒音レベル(この場合はパワーレベルに換算している)を調べた結果は、図一二に示されている。これによれば、各車種とも発進後20~30 m地点(車速は20 km/h)で最大レベルとなり、その後120 m地点(車速は40 km/h)まで速度は増しても、ほとんど同レベルであり、その値は、速度60 km/hの定常走行音にほぼ等しいことが報告されている¹⁸⁾。なお参考までに、前記アメリカのHRBの報告¹⁹⁾では、定常走行区間の速度が50 mile(80 km/h)以上の区間では、発進加速の補正は、中央値に関しては必要なく、前後の定常走行区間の騒音と同じとみなしてよいとしている。

(4) 積荷(積載荷重)の影響

積載荷重の違いによっても自動車騒音が増えることが認められているが、測定が困難なこともあって、これに関する調査研究はまだ数が少ない。積載荷重の増加はエンジンのトルク負荷を増大させシリンダー圧力を増大させるが、イギリスでの調査報告²⁾では、その影響として、空載と満載の間のエンジン騒音レベルの変化は、ディーゼルエンジンでは3 dB(A)を、めったに越えないが、ガソリンエンジンでは10 dB(A)程度高くなるとしている。またすでに述べたようにタイヤ騒音については、積載荷重の増加によってラグタイヤでは4~8 dB(A)増加し、リップタイヤではほとんど変わらないことが報告されている⁴⁾。しかし、実際の道路を定常走行している場合の荷重の影響は、条件が複雑なため、まだよくわかっていないのが現状であるが、日本道路公団が大型トラックを用いて行った調査¹⁹⁾では、速度80 km/hで定積載に対して、50%過積載(定積の1.5倍)では2~5 dB(A)、100%過積載(定積の2倍)では5~6 dB(A)騒音レベルが増大することが報告されている。

2. 道路交通騒音と沿道騒音

道路交通にともなって、今まで述べたような性質をもつ個々の自動車から出る騒音が合成された

結果が、道路交通騒音であり、それがさらに、沿道に伝搬して、沿道騒音となる。したがって、これらの性質には、音源である個々の自動車音が影響するのはもちろんであるが、それに劣らず、交通条件、道路構造、沿道の地形、障害物、地面性状、風などの影響も大きい。

(1) 道路交通騒音の基本的性質と予測

道路交通騒音の基本的性質を明らかにするために数多くの実態調査が行われているが、それと並んで、理論的な面からも研究が行われている。

a) 理論的性質

道路交通騒音の基本的性質は次のような理論的検討から導き出される。

いま、音響出力の等しい自動車が1列等間隔で直線上を一定速度で走行しているものとし、さらに周辺の地面は、一様に平面平坦なものであるという単純な仮定をすると、任意地点における車道からの騒音の中央値 (L_M) は自動車を無指向性の点音源と仮定し、地面を完全反射体とすると理論的には、次式で与えられる^{1),20)}。

$$L_M = PWL + 10 \log_{10} \left(\frac{1}{2ld} \tanh 2\pi \frac{l}{d} \right) \dots (2.1)$$

(PWL: 1 台の車のパワーレベル (音響出力),

d : 車頭間隔, l : 車道から受音点までの距離)

ここで交通量を N (台/時)、走行速度を V (km/h) とすれば、 $d = 1000 V/N$ (m) であるから式 (2.1) は誤差 0.5 dB 以下で次式で近似される^{1),11)}。

$l/d > 1/4$ のとき

$$L_M = PWL - 33 + 10 \log_{10} \frac{N}{V} - 10 \log l \dots (2.2)$$

$l/d < 1/10$ のとき

$$L_M = PWL - 55 + 20 \log_{10} \frac{N}{V} \dots (2.3)$$

なお実用上は、 $l/d \div 1/6$ をさかいにして $l/d > 1/6$ で式 (2.2) を $l/d < 1/6$ で式 (2.3) を用いてよいといわれている¹¹⁾。以上の結果から道路交通騒音の基本的性質として、線音源としての性質 (倍距離 3 dB の減衰) があることがわかり、実測結果でも確認されている。ここで式 (2.1)~(2.3) を用いれば、平坦地の道路の沿道騒音を予測できることになるが、すでに述べたように自動車のパワーレベルに関しては、種々の実測結果とそれに基づいた関係式が発表されており (表-5)、したがって式中の PWL の項に何を用いるかによって、種々の予測式が導かれている。

Johnson and Saunders は、平均速度 65 km/h、大型車混入率 20% のときの PWL を基準として次式を示している^{2),20)}。

$$L_M = 46.5 + 10 \log_{10} \frac{N}{d} + 30 \log \frac{V}{65} \dots (2.4)$$

日本音響学会の報告書では、乗用車の速度が 60 km/h

のとき $PWL = 96$ dB(A) で PWL は速度の 4 乗に比例し、大型車の音響出力は乗用車の 6 倍すなわち、大型車の PWL は乗用車より 8 dB(A) 大きい (表-5 参照) として次式を示している¹⁾。

$$L_M = 45 + 10 \log_{10} \frac{N}{l} + 30 \log \left(\frac{V}{60} \right) + 10 \log \left(1 + \frac{5}{100} a \right) \dots (2.5)$$

(a : 大型車混入率 (%))

建設省土木研究所では PWL に車種構成を考慮した平均パワーレベル (PWL) というものを考えており、乗用車、小型貨物車、大型車の構成比率をそれぞれ a_1, a_2, a_3 とし、音響出力をそれぞれ 1:2:10 (表-5 参照) として次式を示している¹¹⁾。

$$PWL = 0.2V + 84 + 10 \log_{10} (a_1 + 2a_2 + 10a_3) \dots (2.6)$$

上式 (2.6) を式 (2.2) に代入した結果は次式となる。

$$L_M = 51 + 10 \log \frac{N}{l} + 0.2V - 10 \log V + 10 \log (a_1 + 2a_2 + 10a_3) \dots (2.7)$$

その他、よく使われている予測式としては、この他に、首都高速道路公団が日本音響材料協会に委託してとりまとめた都市内の高架道路で用いている次の予測式がある¹⁵⁾。

$$L_M = 25 \log_{10} V - 15 \log_{10} \frac{N}{r} - 11 + 10 \log_{10} \left(1 + \frac{10}{100} a \right) \dots (2.8)$$

(r : 道路中心から測点までの距離 (m), N : 測定全交通量 (台/時), a : 大型車混入率 (%))

ただし式 (2.8) は、前記 3 者の式と異なり、理論式から出たものではなく実測結果から経験的に求められたものであり、このような経験式は他にも多く、金安、金泉はそれを表-8 のように整理して示している¹²⁾。

なお、道路交通騒音の予測式には、この他にも種々のものが発表されており、最近では、電子計算機により、モンテカルロ法などを用いてシミュレーションを行う手法も研究されている²¹⁾。また W.J. Galloway 等は、交通流は、ポアソン分布であるという仮定でシミュレーションを行っている²²⁾。なお以上のような各種予測式に関しては、金安と金泉が詳細な比較検討を行っているので文献 (12) を参照されたい。

b) 地表面性状による減衰

道路騒音の沿道への伝搬は、周辺地域の地表面の性状によっても大きく影響される。その度合は、一般に距離減衰性状の違いとして測定される。道路騒音のような線音源の距離減衰の理論値は、すでに述べたように、 $-10 \log_{10} l$ (l : 距離), すなわち、倍距離 3 dB の減衰であ

表—8 経験予測モデルによる予測式一覧 (金安・金泉による)¹²⁾

発表者	予測式	道路条件	交通条件	文献
Johnson and Saunders	$L_{50} = 3.5 + 10 \log N - 10 \log D + 30 \log S$	① On a level roadway ② D : roadway の中心線からの距離 (ft)	① Normalized to include 20% commercial vehicles such as trucks ② Speed range was considered from 33 to 55 mph	J. Sound and Vibration, 7, (2), 1968. (from HRB Report, 117, (5))
北村音彦, 佐々木 実 斎藤正浩	騒音レベル = $10 \log N + 34.8 - 20 \log r / 10 + 0.18 \times (V - 80)$	① 名神高速道路 ② r : 路肩端からの距離 (m)	$1000 < N < 3000$ 台/時 $10 < r < 40$ m $50 < V < 100$ km/h	日本音響学会研究発表会講演論文集, 昭和 44 年 5 月, p. 206
守田 栄, 望月富雄	$SL(A) = 18 \log N + 13$	都市内街頭騒音レベル	$N < 5000$ 台/時 (注 1)	日本音響学会研究発表会講演論文集, 昭和 45 年 10 月, p. 391
建設省土木研究所	$L_M = 10 \log N + 40$ $L_M = 10 \log N + 41$ $L_M = 10 \log N + 41$ $L_M = 15 \log N + 27$ $L_M = 20 \log N + 12$	市街 平面部の路肩 * 交差部の路肩 郊外 平地部の路肩 * 盛土部の路肩 * 切土部の路肩	$200 < N < 6000$ 台/時 $400 < N < 12000$ $200 < N < 3600$ $200 < N < 3600$ $600 < N < 3600$	道路交通騒音調査資料 (1), 昭和 45 年 12 月
出塚 征彦	$SPL = 14.2 \log n + 38.5$		SPL: 騒音レベル (dB(A)) n : 交通量 (台/5分)	日本音響学会研究発表会講演論文集, 昭和 47 年 5 月, p. 489
山口道征, 朝生周二 石井聖光	$L_{A50} = 13.0 \log n + 41.5 \log \left(1 + \frac{a}{100}\right) + 43.5$	環 7 車道端 6 車線	$80 < n < 600$ 台/5分 $55 < V < 75$ km/h	日本音響学会研究発表会講演論文集, 昭和 47 年 5 月, p. 491
交通工学研究会 東京都建設局・公害局	$L = 41 + 10 \log N^*$	環 7 道路端	L : 騒音レベルの中央値 $N^* = 6 N_1 + N_2$ = 等価交通量 (台/時)	環状 7 号線沿線交通環境調査報告書, 昭和 48 年 5 月, p. 3~43

注: 1) 文献には範囲は明記していないが, 掲載の図から筆者等が推定したものである。

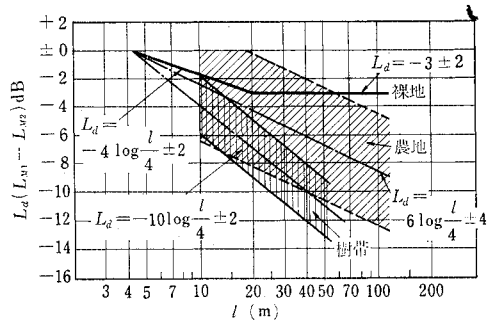
るが, いままでの調査結果から, 地表面が吸音性の場合や, 草や樹木でおおわれている場合には, 地表面付近の距離減衰がかなり大きくなるが知られている。この効果は音の伝搬経路が地表に近い(低い)ときに強く表われ, 音が地表面をこするよう伝わる(擦過音といわれている)ことによる結果と考えられている。これに関して, 例えば, イギリスの B.R.S. (Building Research Station) の報告では, 舗装がなくて草や樹木におおわれた地面は, 地表近くの音波から, ある周波数のエネルギーを吸収するため, 約 20 m 以上の伝搬距離に対し騒音レベルが減少するとし, その補正值として表—9 を示している²³⁾。このような地表面性状による効果は M.E. Delany らによっても報告されており, この場合遮音壁の効果においても, 地表面性状が影響することが模型実験や実測により認められている²⁴⁾。

表—9 吸収性の地面による減衰²³⁾

伝搬経路の平均高さ (m)	地面による減衰 dB(A)/100 m
6	1
4.5	2
3	3
1.5	4
0.7	5

わが国では, 建設省で, 土木研究所が中心となって, 全国的な調査を行っているが, その結果を図—13 に示す¹⁴⁾。

なお, 各種断面構造の道路の模型実験においても, 地表面が反射性が吸音性かによって, 減衰性状が大きく異



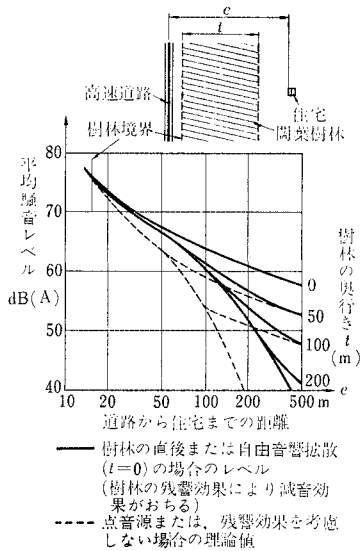
(路肩からの理論減衰値 (L_{M1}) と実測減衰値 (L_{M2}) との差)¹⁴⁾

図—13 沿道の地表面性状による影響による減衰

なることが上記の Delany や, 土木研究所により報告されている^{24), 25)} (後述の道路構造による減衰の項参照)。しかし, 現状では実測値との対応がまだ十分でないため, 推定計算などでは, 安全をみて, 地面は完全反射と仮定し, 上記のような効果は無視されることが多い。

e) 樹林, 植栽の減衰効果

よく繁った樹林が音の減衰に効果があるであろうことは, だれしもが直感的に思うことであり, 騒音対策にも樹木の効果を取り入れたいという発想から, 測定調査が各方面で行われている^{26), 27)}。しかし, 樹林の減音効果について, 定量的にとらえることはむずかしく, また, その効果も, よほど幅の広い奥行のある樹林以外は, あ



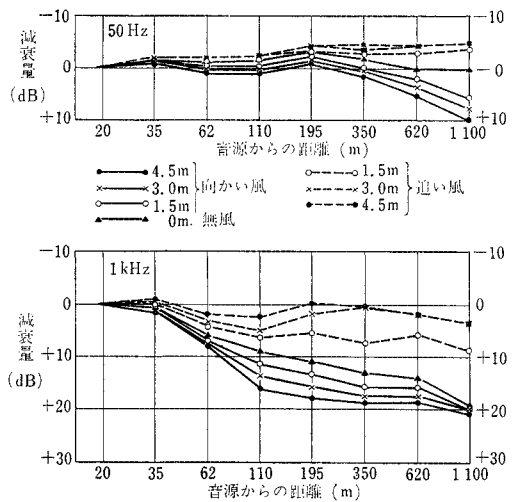
図一14 樹林の減音効果¹⁴⁾

まり効果は期待できないといわれている。例えば、日本音響学会の調査報告¹¹⁾では、樹林 100 m あたり 10~14 dB という値を示しているが、100 m あたり 10~25 dB という値を示したもの¹³⁾もあり、また最近の土木研究所の調査結果¹⁴⁾では $10 \log_{10}(l/4) \pm 2$ (l : 距離) という結果が報告されている (図一13 参照)。海外でも多くの測定がなされているようであるが^{28), 29)}、G. Reinhold は、樹林の効果として 図一14 を示しており、さらに植生の効果は奥行き 50 m 以上ではじめて期待でき、その場合樹林の奥行き 1 m あたり 0.05~0.15 dB である (F.J. Meister および W. Ruhrberg の報告による) としている¹⁷⁾。また、DIN 18005 (案) では、森林の奥行き 10 m ごとに 0.2~1.5 dB(A) という値を示している³⁰⁾。一方、アメリカの HRB の報告¹⁶⁾では、樹林が少なくとも 15 ft 以上の高さがあり、かつ視線がさえぎられ道路の存在がわからないほど十分な密度であれば、100 ft 当り 5 dB の減衰 (ただし 10 dB を限度とする) を見込むことができるとしている。

このように、樹林の効果は、対象となる樹林の特性が場所ごとに異なり、周囲の地表面性状、地形なども一様でないことなどから、定量的に明確な結論はなかなか得られないのが現状である。しかし、最近では、木や葉の密度を考慮した樹林内の音の散乱の計算モデルを作成し、電子計算機で計算し、実測と併せて、樹林の特性を明らかにしようとする試みもなされている³¹⁾。

d) 風 (風向, 風速), 気温の影響

騒音の伝搬距離が長くなると、風や、大気中に温度差があると著しい影響があることは、経験的にもよく知られているが、これらの影響は気象条件を適確に測定する



(風だけによる影響, 距離減衰は入っていない)

図一15 音の伝搬に対する風の影響 (Parkin による)³²⁾

ことが困難で、減衰量を定量的に求めることはむずかしい。特に、道路騒音の場合には、一般に伝搬の対象となる距離が数 100 m までで比較的短いため、測定がむずかしく、道路騒音についてこれらの影響を定量的に明らかにした資料はほとんど見当らない。しかし、Parkin らが、ロンドン空港で数か月にわたり調べた結果 (図一15)³²⁾ などから、一般に道路騒音の場合のような比較的短い伝搬距離においては、風の影響のみによる音の減衰は風下では無視でき、風上では風向風速などにより異なるが、かなり大きい場合もあり得る¹⁾といわれている。なお、イギリスの Road Research Laboratory でも同様な見解を述べており²⁾、それによれば「風上では、風は騒音を非常に減少させるが、風下ではわずかに増大させる。この場合、距離と地面の粗度によるが、草地を伝搬する交通騒音レベルの代表的な差は、風速が 16 km/h のとき向い風と追い風との差は 200 m で 7 dB(A)、100 m で 5 dB(A)、50 m で 2 dB(A) である」としている。その他、風の影響を調べたものには、E.J. Rathe の測定¹⁷⁾や理論計算結果³³⁾などがあるが、いずれも上記と同様な傾向を示している。

(2) 道路の横断形状による減衰

a) 障壁による減音効果

以上、平面平坦の場合を中心に述べたが、音の伝搬経路に、音に対する障害物があると、伝搬が妨げられ、音は、その障害物の裏側 (陰の部分) へは、回折作用で伝わり、その際に、回折による減衰効果が生ずる³⁴⁾ことはよく知られている。道路騒音の場合にも、遮音壁や、道路構造自体が、このような回折減衰効果をもつことが認められているが、その減衰効果の (予測) 計算には、現

在, 前川の実験結果が広く用いられている。

前川は, スピーカーによる点音源を用い, 野外の塀を用いて実験し, 図-16のような実験曲線を示した³⁵⁾。

日本音響学会の調査報告¹⁾では, 回折による音の減衰の計算に, 上記前川の実験値から Fresnel zone number N による減衰量 (ΔL) として次式を提案している。

$$\Delta L = 13 + 10 \log_{10} N \quad (1 \leq N) \dots\dots(2.4)$$

$$= 13 + 5 \log_{10} N \quad (0.1 \leq N < 1) \dots\dots(2.5)$$

$$= 10 + 2 \log_{10} N \quad (0.01 \leq N < 0.1) \dots\dots(2.6)$$

$$= 5 \quad (N < 0.01) \dots\dots(2.7)$$

(ただし $N = 2/\lambda \cdot \delta$, λ : 波長, δ : 行路差 (図-16 参照))

この場合, 実際の遮音壁や道路構造による回折減衰を計算する場合には, 地面による反射などを考慮して, 上記から (-) 3 dB した値を用いている³⁾。

また, 建設省土木研究所でも, 独自に同様な実験を行い, 図-17 に示すように, 同様な傾向の実験値が得られているが, 実験式として次式を発表している³⁶⁾。

$$\Delta L = -5 \log_{10} |N| - 2 \quad (N < -0.1) \dots\dots(2.8)$$

$$= 30N + 6 \quad (-0.1 < N < 0.1) \dots\dots(2.9)$$

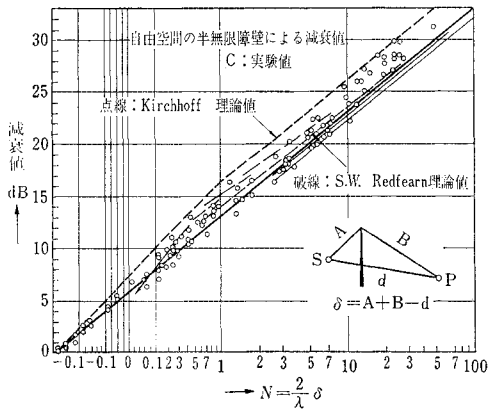
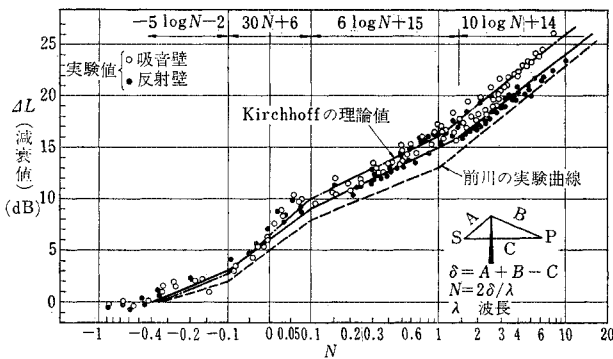


図-16 半無限障壁の減衰実験曲線 (実線)。○点, 高音による実験値 (前川による)³⁵⁾



(土木研究所による)³⁶⁾
図-17 半無限障壁による減衰値

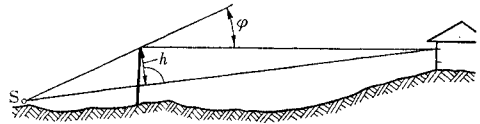
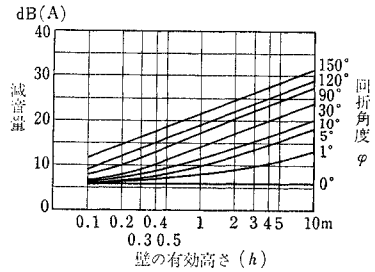
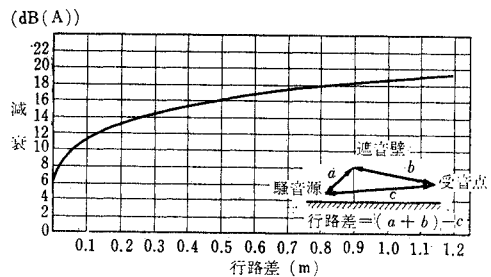
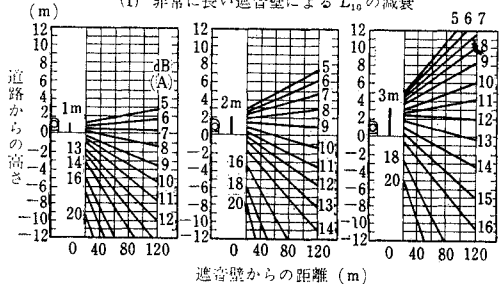


図-18 障壁による減音³⁰⁾



(1) 非常に長い遮音壁による L_{10} の減衰



(2) 非常に長い遮音壁による L_{10} の減衰 (等減衰線)

図-19 遮音壁の減音効果²³⁾

$$= 6 \log_{10} N + 15 \quad (0.1 < N < 1.5) \dots\dots(2.10)$$

$$= 10 \log_{10} N + 14 \quad (N > 1.5) \dots\dots(2.11)$$

なお, 障壁の効果の推定計算に用いる式としては, 前記の前川の実験式の4つの式を, 一つで近似する式として, 次式を示しており,

$$\Delta L = 10 \log_{10} \left(0.2 + \frac{2\delta}{\lambda} \right) + 12 \dots\dots(2.12)$$

このとき, 道路における遮音壁の効果を計算する場合には, 地面反射および複数音源による補正として, 上式から (-) 3 dB した次式を用いることを提案している^{11), 36)}。

$$\Delta L = 10 \log_{10} \left(0.2 + \frac{2\delta}{\lambda} \right) + 9 \dots\dots(2.13)$$

その他, DIN 18005 では, 道路交通騒音については, 図-18 を用いて計算できるとしている³⁰⁾

が、この場合は、Redfearn の理論に基づいて、行路差 δ でなく、回折角 φ と壁の有効高さ h とを用いて計算する方法である。また、イギリスの B.R.S. (Building Research Station) では、図-19 のようなグラフを示している²³⁾ (ただし 図-18, 19 は、ともに L_{10} (80% レンジの上端値) の減衰値を与えるグラフである)。

上記前川の方法は、点音源に対する障壁の減音効果を表すものであり、それを補正することによって、道路騒音のような線状音源に近いものに適用しているのが現状であるが、これに対し、最近、線状音源に対する障壁の減音効果が研究され^{37), 38)} 注目されている。山下・子安は、線状音源を用いた室内模型実験により 図-20 のような結果を示しており、点音源の場合に比べ、3~5 dB 小さい値となっている³⁷⁾。また、Kurze and Anderson は、完全な線音源と、点音源の連続した線状音源とについて、壁による減衰効果を計算しており、図-21 のような結果を示している³⁹⁾。

以上は、無限長の音源と、無限長の障壁を前提とした議論であるが、実際の道路では、音源が有限長 (道路が一部分しか見えない) であったり、遮音壁が有限長であったり、またその両方であったりする。このような場合には、受音点から道路を見込む角度と、道路が壁で隠される割合または角度で補正する考え方が提案されている^{16), 39)}。また、遮音壁の延長による、遮音効果の変化に

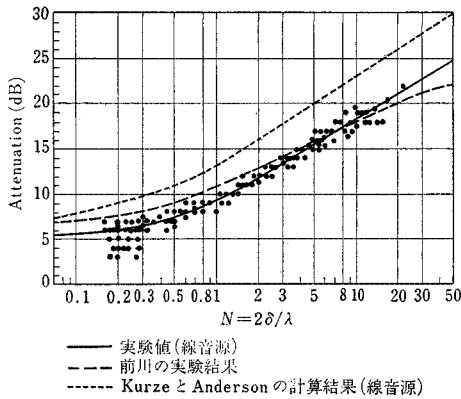
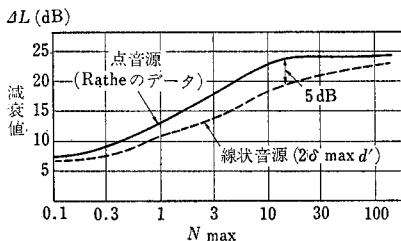
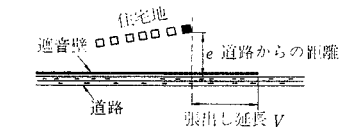


図-20 線状音源に対する障壁の遮音効果 (子安, 山下による)³⁷⁾

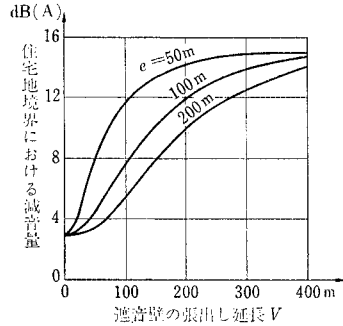


(Kurze と Anderson による計算結果)³⁹⁾

図-21 線状音源に対する遮音効果



住宅地境界における実際の騒音レベル減少量



無限長の遮音壁の減音量が15 dB(A)の場合

図-22 防音対策を行う住宅地より張り出して設ける遮音壁の必要な張出し長さ¹⁷⁾

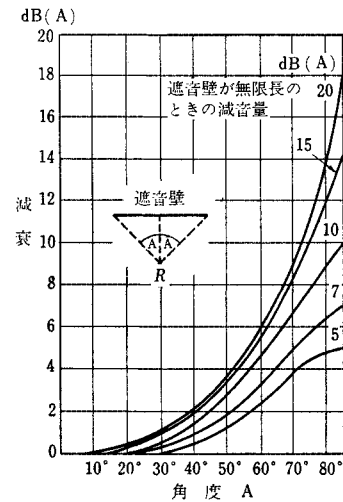


図-23 有限な遮音壁の効果 (L_{10} の減衰)⁴⁰⁾

については、例えば、G. Reinhold は 図-22 を示しており¹⁷⁾、W.E. Scholes と J.W. Sargent は 図-23 を示している⁴⁰⁾。ともに、あまり短い延長の遮音壁は、周辺からの音のまわり込みによって、効果が著しく悪くなることを示している。

b) 道路構造による減衰

盛土・切土・高架などの形式の道路では、のり肩や高欄などの道路構造の一部が、仮想的な障壁の役目をはたすことにより車道からの騒音がさえぎられ、遮音壁と同様な効果が生ずることが知られている。従来からこのような効果の推定計算には前記障壁の理論がそのまま適用されている^{11), 111)}が、最近の調査研究によれば、道路構造について上記のように仮想障壁を考えて式 (2.12) により計算した計算値 (ΔL) と実際の道路で測定した値や模

型実験を行った結果とは、道路構造の種別と地表面の性質によっては、かなり異なる場合もあることが報告されている。例えば土木研究所が行った調査では、切土および盛土では、のり面が吸音性の場合には、計算値が適用できるが、反射性のり面では $4L$ の 0.6~0.7 倍となり、高架、堀割りでも、それぞれに応じた補正が必要であることが指摘されている（詳しくは、本学会誌 昭和 48 年 8 月「騒音特集」文献 6）および 14）、25）参照）。海外では同様な問題についてイギリスの N.P.L. (National Physical Laboratory) で M.E. Delany らが模型実験などを用いて調査を行っている²⁴⁾。

e) 模型実験

以上述べたように、沿道騒音には、多くの要因が複雑に関与しているため現地での実測調査だけでは、その基本的性質がつかみにくいことが多い。そのため、条件をできるだけ単純化して縮尺模型による無響室内での室内実験がよく行われている。これはまた、計算できないような音の複雑な反射や放射が予想される場合に騒音を予測する手段としてもよく用いられている。

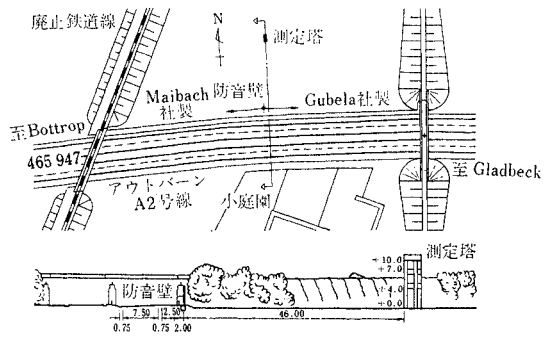
模型実験に関する研究報告は数多くなされているが、その中から、各種道路構造に関する模型実験結果の一例を図一24に示す。例えば J.M. Rapin は、8車線高速道路の代表的な各種道路構造に関し屋外の広場で大縮尺の模型実験を行っている⁴¹⁾(図一24(1))。土木研究所は無響室内で各種道路構造に関し、のり面や地表面の反射性、吸音性と関連した模型実験を行っている^{25)、42)}(図一24(2))。同様な実験は M.E. Delany ら、も行っている²⁴⁾。また、山下・子安らは、線状音源を用いて、トン

ネル等の特殊な道路構造について室内実験を行っている⁴³⁾(図一24(3))。この他にも数多くの模型実験が行われ、結果が報告されている^{44)、45)}。

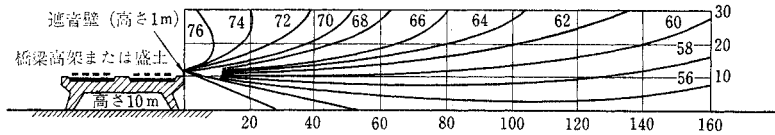
3. 遮音壁の実例と効果

現在、道路交通騒音の最も実際的な対策として、遮音壁がよく用いられているが、現状では、まだ、遮音壁の構造や、適した材料を開発し、実際の効果を確認するために試験的な意味も含めて設置されることが多い。最近では設置例も多くなり、このような遮音壁の実例と効果についての報告もしだいに増えつつあるのでその中からいくつかを紹介する。

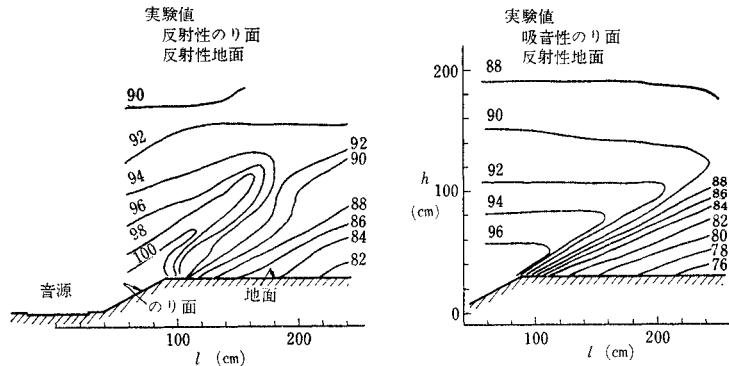
まず、実際に供用している(車が走っている)道路を用いて遮音壁の大きかりな現地実験を行ったもので、有名なものに西ドイツのボトロップ付近のアウトバーンで行われた試験施工がある。図一25はその位置図である



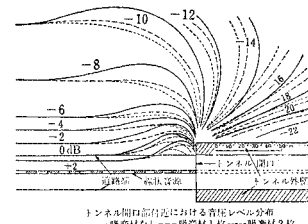
図一25 防音壁試験築造区間の平面図および横断面



(1) Rapinによる模型実験結果(一例)(8車線交通量5000台/h)⁴¹⁾



(2) 土木研究所による模型実験(一例)
(のり面が反射性と吸音性の比較)²⁵⁾



(3) 山下・加来・子安らによる模型実験(トンネル坑口からの音の影響)⁴³⁾

図一24 各種模型実験結果の例

が、ここでは、タイプの異なる2種類の吸音性遮音壁がテストされ、図-26に示すような遮音壁による減音効果の実測値が得られている^{46),47)}(これには日本からも多くの調査団が行っているようである)。

わが国では、建設省で土木研究所が中心となって全国的に調査を行ったものがあり、その結果は図-27のようになっている¹⁴⁾。ただし、これは、新たに実験的に遮音壁を設けて調べたものではなく、既存の塀や囲いを利用した測定結果である。なお高速道路に遮音壁を設けて測

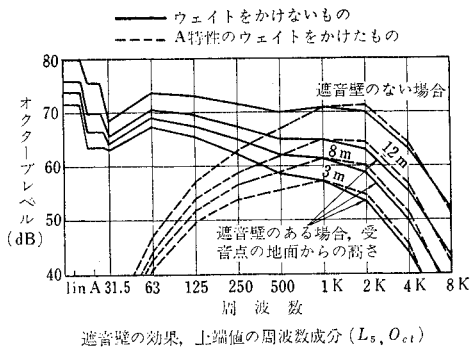


図-26 遮音壁の効果

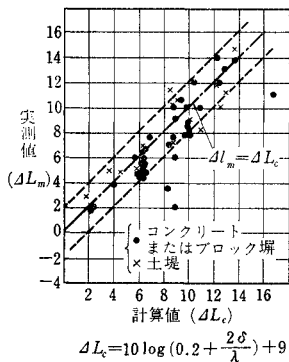


図-27 遮音壁の減衰値 (土木研究所)¹⁴⁾

定した例としては、日本道路公団が東名高速道路で行ったものなどがあり、図-28にその結果を示してある⁴⁸⁾。

また最近は、アメリカでも、かなり研究されているようであり、アメリカ土木学会誌 (Proceedings of A.S.C.E.) や、H.R.R. (Highway Research Record) などにも、いくつかの事例が報告されている^{49)~52)}。その中には、ヘルムホルツの共鳴吸収効果 (resonating) を応用したルーバー状の吸音性遮音壁 (kinematic sound screen) など興味ある報告もある⁵²⁾。なお、わが国でも最近種々の遮音壁 (吸音性および反射性) が開発されており、土木研究所では実際の道路にそれらを試験的に建てて効果の調査を行っている⁵³⁾。

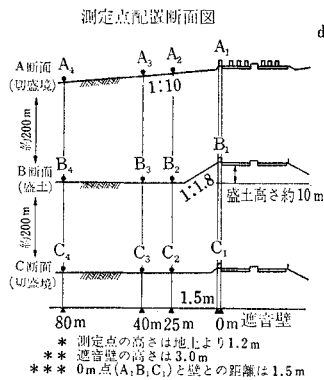
あとがき

限られた誌面の中で高速道路の騒音問題について総括的に述べたために、中途半ばな記述になってしまったことをまずおわびしたい。

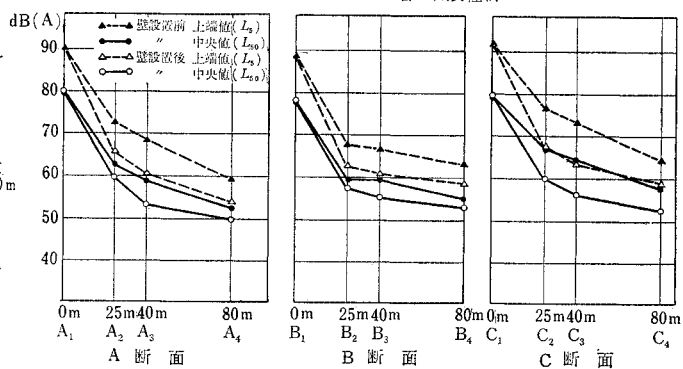
高速道路騒音に関連する分野は非常に広く、音源である自動車、道路、受音側の人体に対する影響などの各分野で盛んに研究されているが、これらをすべて網らした解説はとてもできないので、道路建設者の側からみて日頃、入手した資料をもとに解説した。なにかの参考となれば幸いである。なお、本文をとりまとめるにあたり、多くの文献資料を引用させていただいたことを感謝するとともに、もし引用に、誤りや誤解があれば、筆者の責任であり、御許し願いたい。

参考文献

- 1) 日本音響学会・道路騒音調査研究委員会：道路騒音調査報告書 (日本道路公団委託)，昭和44年3月
- 2) Road Reseach Laboratory: A review of road traffic noise, RRL Report LR 357, 1970.
- 3) 日本自動車研究所：トラックおよびバス用タイヤのタイヤ騒音に関する研究，日本自動車研究所研究報告第6号，



遮音壁の設置前後の騒音の減衰性状



(東名高速道路での実施例)⁴⁸⁾

図-28 遮音壁の効果

昭和47年9月

- 4) 日本自動車タイヤ協会：トラック・バス用タイヤ騒音試験報告書，昭和48年10月
- 5) 科学技術庁研究調整局：騒音防止に関する総合研究報告書1（別冊）昭和40年3月
- 6) 金安公造：道路騒音の防止技術，土木学会誌，Vol. 58-9, 1973. 8.
- 7) Stephenson, R.J. and Vulkan, G.H. : Traffic noise, *J. Sound and Vibration*, 7 (1968), 252.
- 8) 小林理学研究所：首都高速道路騒音調査報告書（昭和39年3月）
- 9) 日本道路公団：騒音測定解析調査報告書，昭和48年3月
- 10) Lewis, P.T. : The noise generated by single vehicles in freely flowing traffic, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 30, No. 2., 1973.
- 11) 金安公造・金泉 昭：交通公害，技術書院
- 12) 金安公造・金泉 昭：道路交通騒音の予測式に関する一考察，道路，1974. 2.
- 13) 金泉 昭：道路構造と自動車騒音—その1— 土木技術資料，13-1, 昭和46年1月
- 14) 金安公造・金泉 昭：道路交通騒音と道路構造に関する調査研究，土木技術資料15-6(1973), *Autobahn, Straße und Autobahn*, 1971. 1.
- 15) 日本音響材料協会：首都高速道路の騒音に関する研究報告書（首都高速道路公団委託），昭和46年2月
- 16) Gordon, C.G., Galloway, W.J., Kugler, B.A. and Nelson, D.L. : Highway Noise, a design guide for highway engineers, National Cooperative Highway Research Program Report, 117, 1971.
- 17) Günter Reinhold : Bau- und verkehrstechnische Maßnahmen zum Schutz gegen Straßenverkehrslärm, *Forschungsberichte Heft*, 119, 1971, *Straßenbau und Straßenverkehrstechnik*.
- 18) 金泉 昭：道路騒音のメカニズムと対策，環境情報科学，2-4, 1973.
- 19) 日本道路公団：新空港自動車道大型車走行騒音測定解析調査報告書，昭和48年3月
- 20) Johnson, D.R. and Sanders, E.G. : The evaluation of noise from freely flowing road traffic, *J. Sound and Vibration*, 7 (1968), 287.
- 21) 庄司 光・山本剛夫・中村隆一・橋本和平・片山 徹：モンテカルロ法による交通騒音の推定，土木学会論文集第154号，昭和43年6月，および中村隆一：大阪府下の道路騒音の現状，土木学会第1回環境問題シンポジウム講演集 12. 3~4, 1973.
- 22) Galloway, W.J., Clark, W.E. and Kerrick, J.S. : Highway noise measurement simulation.
- 23) Building Research Station : Motorway noise and dwellings, *BRS Digest*, 135, 1971.
- 24) Delany, M.E., Rennie, A.J. and Collins, K.M. : Scale model investigations of traffic noise propagation, *NPL Acoustics Report Ac 58*, Sept. 1972.
- 25) 金泉 昭・平野 彰：道路構造と自動車騒音—その2—，土木技術資料，15-1, 1972年1月
- 26) 日本道路公団：植栽を用いた遮音施設に関する基礎的研究，昭和47年1月
- 27) 林業経営研究所編：都市林，農林出版，昭和47年3月
- 28) Cook, D.I. and Haverbeke, D.F. : Trees and shrubs for noise abatement, *The Forest Service U.S. Department of Agriculture*.
- 29) Donald Aylor : Noise reduction by vegetation and Ground. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 51, No. 1, 1972. 1.
- 30) DIN 18005 : Schallschutz im Städtebau, Blatt. 1, Mai 1971.
- 31) Pao, S.P. : Prediction of Excess attenuation spectrum for natural Ground cover, *Wyle Laboratories Research staff report*, WR 72-3.
- 32) Parkin, P.H. and Scholes, W.E. : The horizontal propagation of sound from a jet engine close to the ground at Radlett, *Journal of Sound and Vibration*, 1964, 1, 1-13 および The horizontal propagation of sound from a jet engine close to the ground at Hatfield, *J. Sound Vib.*, 1965, 2, (4), 353~374.
- 33) 日本音響材料協会：騒音対策ハンドブック，技報堂，昭和41年12月
- 34) 松井昌幸：音の減衰，遮音，吸音，土木学会誌，Vol. 58-9, 1973. 8.
- 35) 前川純一：障壁の遮音設計に関する実験的研究，日本音響学会誌，18 (1962) p. 187.
- 36) 建設省土木研究所交通環境研究室：遮音壁に関する基礎的研究，土木研究所資料，第707号
- 37) 山下充康・子安 勝：線状音源に対する障壁の遮音効果—模型実験による検討—，日本音響学会誌 29 卷 4 号，pp. 207~213 (1973).
- 38) Kurze, U.J. and Anderson, G.S. : Sound attenuation by barriers, *Applied Acoustics*, 4 (1971), p. 35.
- 39) 木倉正美・岡崎徳次：有限長壁の音響設計，第11回日本道路会議特定課題論文集，昭和48年，pp. 333.
- 40) Scholes, W.E. and Sargent, J.W. : Designing against noise from road traffic, *Applied Acoustics* (4), 1971.
- 41) Rapin, J.M. : Protection phonique aux abords des voies, *Chaiers du Centre Scientifique et Technique du Batiment*, No. 109.
- 42) 土木研究所交通環境研究室：掘削道路の騒音に関する模型実験，土木研究所資料，第880号，昭和48年11月
- 43) 山下・子安・加来・松本：自動車トンネル騒音に対する内装吸音効果—模型実験による検討—，日本音響学会講演論文集，1973. 5.
- 44) 山下・加来・子安・松本：縮尺模型実験による道路交通騒音伝搬性状の検討，日本音響学会講演論文集，1973. 5.
- 45) 橋本・山口・石井：模型実験による高速道路からの騒音伝搬の検討，日本音響学会講演論文集，1973. 10.
- 46) Reinhold, G. und Burger, W. : Die funktionelle und betriebliche Erprobung absorbierender Lärmschutzwände an einer und mixed reactions, *National Cooperative Highway Research Program Report*, 78, 1969.
- 47) 日本道路協会：道路と公害—第7回欧米道路調査団報告書
- 48) 田村幸久：遮音壁の効果と景観，環境情報科学，2-4, 1973.
- 49) Harmelink, M.D. and Hajek, J.J. : Performance testing of freeway noise barriers, *Transportation engineering journal*, *Proceeding of the A.S.C.E.* Feb. 1973.
- 50) Harmelink, M.D., Hajek, J.J. : Evaluation of freeway noise barriers, *HRR*, No. 448, pp. 46~59.
- 51) Beaton, J.L. and Baurget, L. : Traffic noise near highways, *Testing and evaluation*, *HRR*, No. 448, pp. 32~45.
- 52) Hauskins, Jr, J.B. : The kinematic sound screen, An effective solution to highway noise abatement, *HRR*, No. 448, pp. 60~67.
- 53) 土木研究所交通環境研究室：道路用遮音壁の現場実測調査，土木研究所資料第924号，昭和49年2月