

土木研究所資料

トンネル坑口周辺における騒音に関する実験結果

昭和53年8月

建設省土木研究所
道路部交通環境研究室

ま え が き

我国における道路交通騒音の予測手法に関しては、昭和50年8月に日本音響学会が、それまでの各機関における調査研究成果をとりまとめて、解析的モデルを基本としてそれに実測資料を加え、中央値予測のための計算式を提案している¹⁾。さらに引続いて同学会で、その後の研究成果の検討が行われ、52年8月には、先のものを補足する結果も発表されている²⁾。しかしながら、そこに提案されている解析モデルが適用されうするためには種々の条件を必要とするものであり、実際の現場での予測にあたっては、それをそのまま適用し得ない場合も少なくない。なお今後、より一層の調査研究が待たれているところである。

トンネル坑口周辺部における騒音については、トンネル内を走行する車からの音が、一般開放条件におけるようには拡散減衰されず、それが集積されて坑口から大きなレベルとなって放射されるために、しばしば問題とされているものである。

トンネル内に存在する車からの音のトンネル内での距離減衰や、それらを合成することで得られるトンネル坑口面でのレベルについては、これまでも実測、実験例があり、またトンネル内壁面での反射を多次に渡って計算したり³⁾、拡散音場として内貼りダクトでの減衰式⁴⁾をあてはめることも考えられるが、坑口周辺でのレベルがどのようになるかという実際の予測においてむしろ必要となるのは、トンネル内で集積された音が、坑口からどの方向にどのような強さで放射されるか、坑口からのレベル距離減衰がいかなるもので、トンネルからの音がどの範囲まで影響するかということである。

このトンネル坑口周辺での問題のように、複雑な伝搬条件を有する場合の騒音予測において、最も有効な手段とされるのが縮尺模型を用いての音響実験である。従来よりホール設計などに用いられており、いくつかの条件に従えば、かなり複雑な条件の現場でも実験室内に再現してダイレクトに音の伝搬結果を得ることができるし、基本的特性を捉えるために任意の伝搬条件を設定することも容易であり、近年、道路交通騒音の問題でもこの模型実験手法がしばしば用いられるようになってきている。

ここでは、トンネル内およびその周辺における騒音伝搬に関する二、三の特性を調べるために、無響室における縮尺模型実験から検討を行い、さらに、得られた結果をより確実なものとするために、実験用実大トンネル（巾員約10m、延長約400m）においても同様の実験を行った。実験検討内容は主として次の4項目に分けられる。

- i) トンネル坑口よりの距離減衰
- ii) トンネル内での距離減衰
- iii) トンネル坑口面音圧分布
- iv) トンネル坑口よりの放射指向性状

また、得られた実験結果から、道路トンネル坑口周辺における騒音レベルの実用的予測手法を

検討し，二，三の供用中の道路トンネル周辺で実測された結果と照してみた。結果は，現場トンネル坑口周辺の地形の複雑さなどを加味すれば比較的良い対応を得ることができた。

昭和 5 3 年 8 月

交通環境研究室	足	立	義	雄
	野	中		宏
	川	名	万寿雄	(現新交通研究室)
	荒	木	隆	雄
	清	家	基	哉

目 次

ま え が き	
1. 実 験 概 要	1
2. 実 験 結 果	5
〔1〕 トンネル坑口よりの距離減衰	5
〔2〕 トンネル内距離減衰	7
〔3〕 トンネル坑口面音圧分布	8
〔4〕 トンネル坑口よりの放射指向性状	11
3. トンネル坑口周辺部での騒音予測の一手法	20
あ と が き	29
参 考 文 献	29

1. 実験概要

(1) 縮尺模型実験

縮尺模型実験は、室内音響特性の確認されている土木研究所無響室（室内容積約 180 m^3 : $7 \text{ m} \times 5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ ）において行った。模型トンネルは、実物大の約 $1/30$ を想定しており、図-1に示すように、 $\phi 298 \text{ mm}$ の円形、 $209 \times 330 \text{ mm}$ の矩形、幅 290 mm 側壁立上り高 50 mm の半円形の3種類であり、厚さ 10 mm のアクリル製である。坑口条件としては、自由空間の他、反射性および吸音性の地表面および面壁型坑門土（以下面壁と称す）が有る場合を設定した。ただし道路路面は反射性である。吸音性部分については、図-2に示すように、吸音率が 8 kHz で 0.84 、 16 kHz で 0.79 の厚さ 3 mm のカーペットを貼り付けた。実験音としては、各実験項目とも 8 および 16 kHz を中心周波数とするオクターブバンドノイズおよびワイドノイズ（ピンクノイズ）を用いた。実験の計測ブロック図を図-3に示す。スピーカは ONKYO ツィータ TW-7S Mk II であり、B & K $1/4$ インチコンデンサマイクロホンによって受音した。

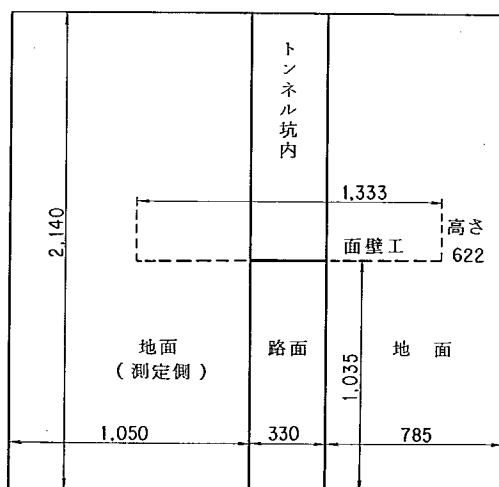
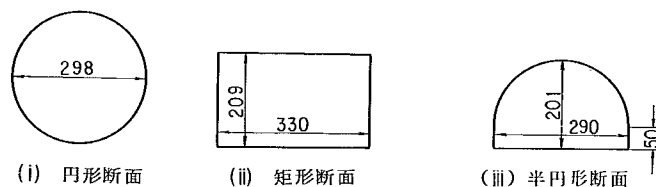


図-1 トンネル模型寸法図（単位mm）

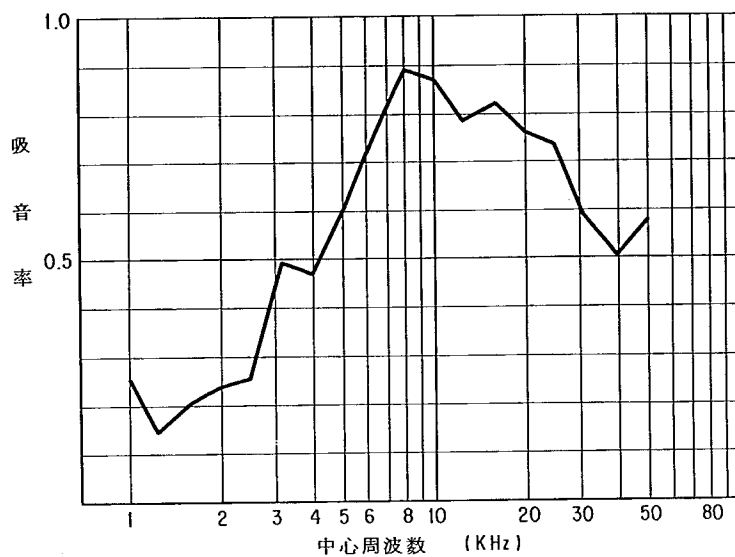


図-2 地表面および面壁（共に吸音性の場合）の吸音率
（カーペット 3 mm）〔模型残響室による測定〕

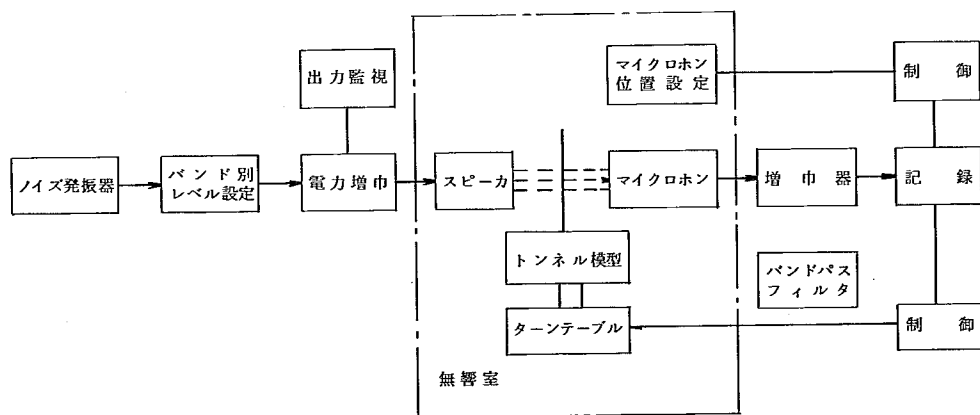


図-3 模型実験ブロック図

(1) トンネル坑口よりの距離減衰

円形断面については基本的な自由空間について、矩形断面についてはその他に反射性または吸音性の面壁がある場合についてそれぞれ行い、半円形断面の場合には、さらに、吸音性または反射性の地面の有無についても加えて行った。受音ラインを、円形、矩形断面の場合にはトンネル断面中心軸上に、半円形断面の場合にはトンネル中心路面上高さ40、105、および180mmの他、中心より120mmずれて高さ105mmにそれぞれ設定して、坑口より50cm入った点から坑外150cmまでのレベル距離減衰を連続記録した。音源位置は、坑口の他、坑口から25cmおよび50cm入った位置で高さ10.5cmとした。

(2) トンネル内距離減衰

模型トンネル内での距離減衰を求めるため、半円形トンネルの全長を4mとし、受音ラインと反対側の坑口はグラスウールで密閉して、(1)と同じ受音ラインについて、音源より10cmから340cmまでの連続記録を行って10cm間隔でレベルを読み取った。なお、音源の指向性による影響を捉えるために、音源（スピーカ）を坑口に向けた場合と横向きにした場合とについて行った。

(3) トンネル坑口面音圧分布

音源指向性の寄与度、坑口面パワーの検討などのために、半円形トンネルについて、音源位置を坑内25cmおよび50cmとして、スピーカを正面に向けた場合と横向きの場合で坑口面における音圧分布を確認した。受音は、路面上40、105および180mmの高さについて水平方向に連続記録を行った。

(4) トンネル坑口よりの放射指向性状

種々の坑口条件で坑口からの騒音放射指向性状を求めるために、音源が坑口にある場合および坑内25、50cmにある場合について、坑口からの距離20、40、60、80、100cmで、トンネル断面中心軸を放射角0度として140度程度まで連続記録を行った。記録されたものより、10度毎に直接読み取ったものと、急激な変化分を目測で平均化して読み取ったものとの双方について検討を行った。

また、模型トンネル両端部を10mm厚アクリル板および50mm厚グラスウールで密閉した状態でトンネル内外の音圧を測定し、使用模型トンネル材料の透過損失、漏れの実験値への影響を確認した。

(2) 実大トンネルでの実験

模型実験から得られた結果をより確実なものとするために、筑波研究学園都市土木研究所内にある実大トンネルにおいても同様の実験を行った。同トンネルはトンネルに関する種々の実験用に作られているもので、全くの開放平坦地の上にあり、模型では地面があって面壁がない場合に相当するものである。測定は夜間に行っているが、非常に暗騒音の小さな音響的にも好条件の場所にあるものである。音源として、FOSTEX・UP-203 SUPERを12個組合せたほぼ無指向性の12面体スピーカ（幾

何学的音源中心高さは50cm)と、指向性を有するものとしてトランペット型ホーンスピーカ TOA, TH60E+TU35Eを用いて、模型実験と同様の項目について測定を行った。実験音としては、模型実験(実大トンネルのほぼ1/30に相当する)と対応するように250, 500, および1,000 Hzを中心周波数とするオクターブバンドノイズとワイドノイズを用いた。

(1) 距離減衰

スピーカをトンネル坑口に置いた場合にはトンネル中心線上で坑口より20m地点から100m地点まで20m毎に、スピーカを坑口から内側7.5mおよび15mに置いた場合には坑口点を含めそれから100m地点まで20m毎に、さらにスピーカを坑内50m地点に置いた場合については坑口から内側に10, 20, 30m地点および坑口点を含めそれから外側に60m点まで20m毎にそれぞれマイクロホンを設定して測定を行った。なお坑内50mの地点に音源を設定した場合に、ホーンスピーカを正面に向けた場合と横向きにした場合とについて測定を行った。受音点高さはいずれも地上1.2mとした。

(2) トンネル坑口面音圧分布

音源位置は、トンネル坑口から内側に7.5, 15, 50および120mの4点とし、受音位置は、トンネル坑口面でトンネル中心路面上1.2, 3.5および5.5mと、中心から側方に2.0および4.0mの位置で路面上1.2および3.5mの点に設定した。ホーンスピーカについては、坑内7.5mの場合以外は、正面を向けた場合と横向きの場合とについて測定を行った。

(3) トンネル坑口よりの放射指向性状

音源位置はトンネル坑口から内側に7.5, 15および50m地点とし、受音点は、坑口中心から6mおよび18mの距離で断面中心軸を0度として11.25度間隔に設定した。ただし、トンネル坑口面より裏側(90度以上)については3.5m間隔でトンネル軸と平行な位置に設定した。実音点地上高さは1.2mおよび3.5mである。

なお、模型実験および実大トンネルでの実験双方とも、記録紙からの読み取りは0.5dB単位とした。実験を行った模型トンネルを写真-1に、実大トンネルを写真-2に示す。

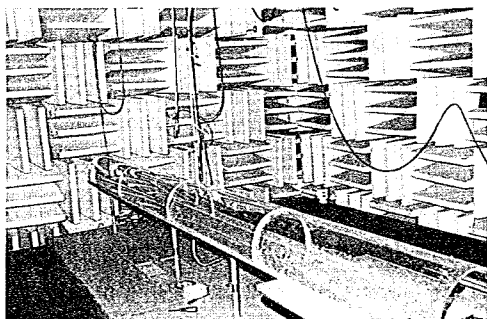


写真-1 模型トンネル

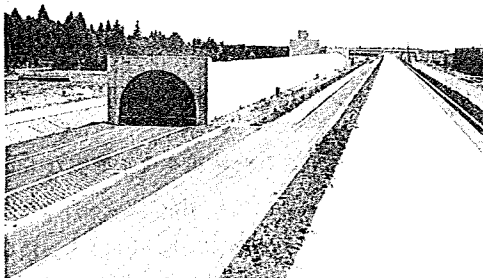


写真-2 実大トンネル

2. 実験結果

(1) トンネル坑口よりの距離減衰

トンネル坑口あるいは坑内に音源がある場合の、坑口よりの道路延長方向距離減衰の測定結果を図-4, 5 および付図-1~11に示す。音源が坑口にある場合には、その軸上（ほぼ断面中心軸上すなわちトンネル中心で路面上高さ10.5cmのライン上）距離減衰性状は、付図-1~3 および8に示されるように、いずれの条件においても、ほぼ逆二乗則（点音源の場合の距離減衰）に従う。模型実験のワイドノイズの場合（半円形トンネルで、吸音性地表面と反射性の面壁がある場合）には、付図-8に示されるように、スピーカを自由空間に置いて測定算出されたパワー・レベルから、路面の反射を考慮して計算されるレベルではほぼ一致する。

トンネル坑内に音源がある場合の、模型および実大トンネルでの実験結果を、ワイドノイズの場合について図-4 および5に、バンドノイズの場合についてを付図-4~11に示す。

トンネル坑内に音源がある場合には、トンネル内壁面および路面（いずれもほぼ完全反射性である）での多次の反射により、坑口面近くに2次的面音源を生ずるものとするのが妥当であると考えられる。面音源よりの断面中心での距離減衰については、音源を指向性を有する点音源の集合と考えれば、理論的には、音源形状、指向性成分によらず、円形ならば直径その他の場合も等価直径の $1/4$ の距離で音源の単位面積当たりのパワーレベルにはほぼ等しく、又、指向性が極度に強い場合を除いては、ほぼ等価直径に等しい距離以遠で、倍距離6dBすなわち点音源からの距離減衰性状を呈することになる。バンドノイズの場合、特に模型実験では、実験条件により減衰性状に変動性がみられるが、図-4 および5に示すワイドノイズでの結果についてみると（音源位置は路面上高さ10.5cm、トンネル内50cmであり、その等価直径は約2.5cmである）、地面がある場合ない場合とも、受音ラインがトンネル中心路面上高さ10.5cmすなわちほぼ断面中心の場合と、トンネル中心で路面上高さ4cmの場合には、ほぼ面音源からの距離減衰性状を呈し（ここでは、面音源を77分割した点音源群から算出した）、等価直径以遠で点音源からの距離減衰性状にはほぼ一致している。トンネル中心路面上高さ1.8cmの場合と中心より側方へ1.2cmずれている場合すなわちトンネル壁面近くの受音ラインでは、もちろん軸中心の減衰とは異なり、音源（坑口）近くではレベルが低く、ほぼ等価直径の倍距離以遠で軸上減衰と一致している（ただし、ここでの音源位置坑内50cmの場合である）。実大トンネルでの実験では、その等価直径が約9mであり、坑口より20m以遠（トンネル中心で地上1.2m高さ）に設定したここでの受音ラインでは、坑内各音源位置の場合とも倍距離6dBの距離減衰性状に一致した。

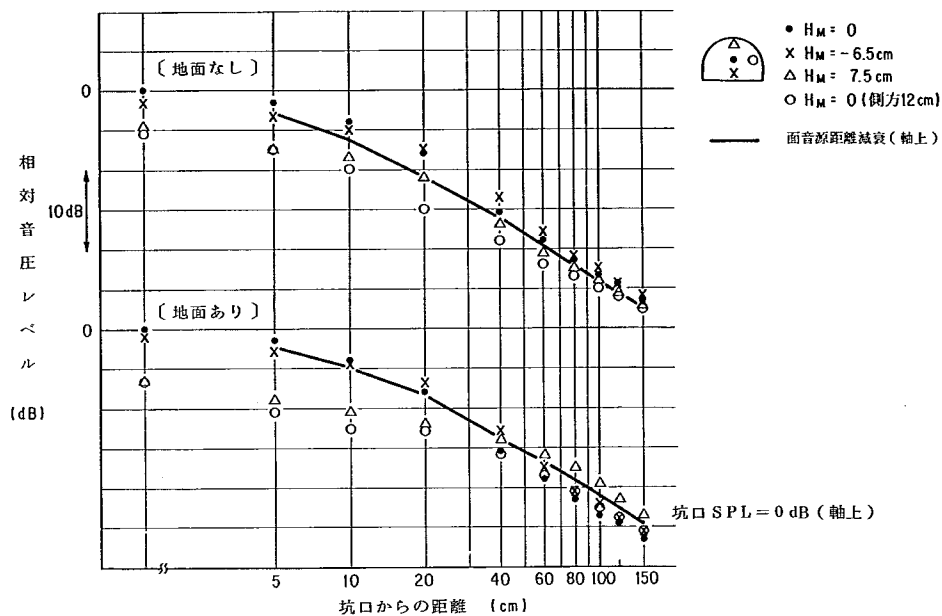


図-4 トンネル坑口よりの距離減衰 (模型実験結果)
音源位置; 坑内 5.0 cm, 半円形トンネル, ワイドノイズ

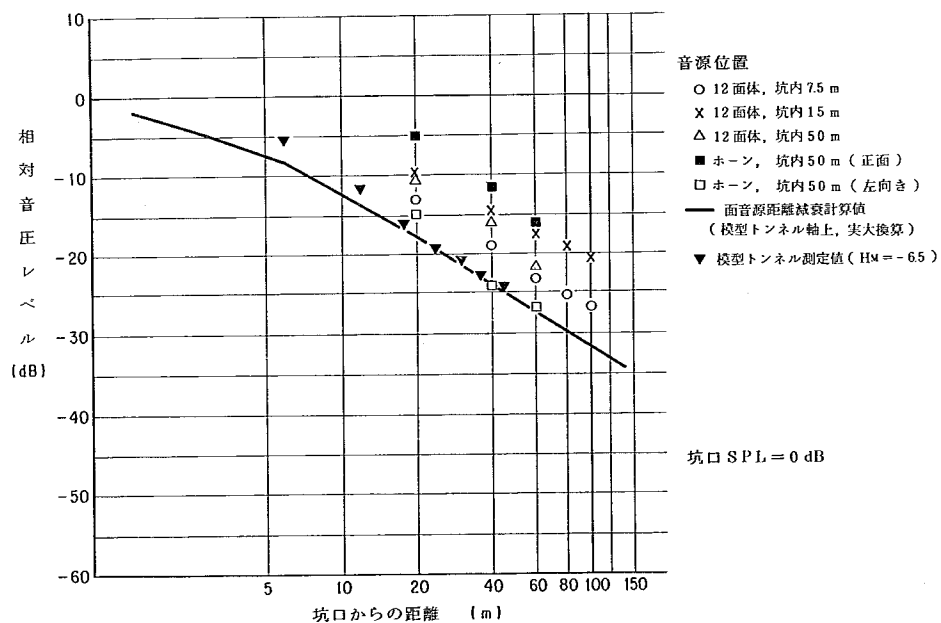


図-5 トンネル坑口よりの距離減衰 (実大トンネル実験結果), ワイドノイズ

(2) トンネル内距離減衰

模型トンネルで、断面中心の他、トンネル中心で路面近くおよび上壁近くに設定した受音ラインについて測定したトンネル内距離減衰性状を付図-12に、得られた結果から最小二乗法により求めた距離減衰の勾配 (dB/m) を付表-1に示す。この模型トンネルでの測定結果と、実大トンネルでの同様の測定結果をともに100m当りの減衰量で表示したものが表-1である (模型トンネルについては30倍の実大トンネルに換算している)。

表-1 トンネル内距離減衰, 100m当りの減衰係数 (dB/100m)
(模型トンネルは30倍の実大トンネルに換算)

周波数 トンネル	250 Hz	500 Hz	1 KHz	ワイドノイズ
実大トンネル	-2.6 (dB/100m)	-2.4 (dB/100m)	-4.2 (dB/100m)	-3.5 (dB/100m)
模型トンネル	-3.7 (dB/100m)	-6.7 (dB/100m)		-4.7 (dB/100m)

1台の自動車からある距離における (近接している場合を除いて) 騒音レベルを求める場合、それが開放条件を走行する場合には、それを点音源とみなし、距離の逆二乗則に従ってレベルが減衰することで求められるが、それがトンネル内を走行する場合には、その拡散減衰が妨げられることにより距離による減衰が非常に小さなものとなる。このトンネル内を走行する1台の自動車からの騒音のトンネル内での距離減衰については既に幾つか実測された例がある。例えば、北海道開発局における断面の異なる幾つかのトンネルでの調査例⁵⁾ (図-6) では、その減衰を $-ax^{\frac{1}{2}}$ (x : 音源から受音点までの距離) の形で表わしており、その係数 a はトンネルにより

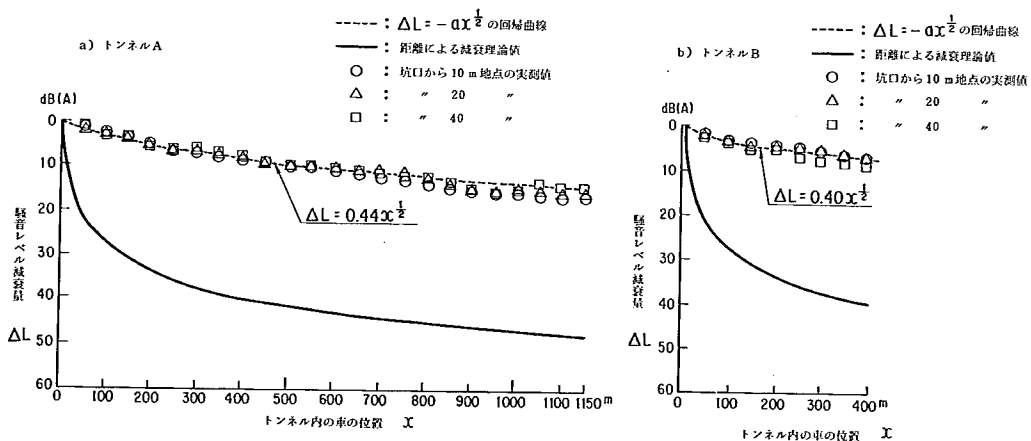


図-6 トンネル内における自動車走行音距離減衰実測例(北海道開発局による)

0.4～0.5を得ている。また、日本道路公団、土木研究所の実測例^{6), 7)}（図-7）もあり、その結果を同様の形で表わせば、その係数 a は0.3～0.5が得られほぼ同様の結果である。

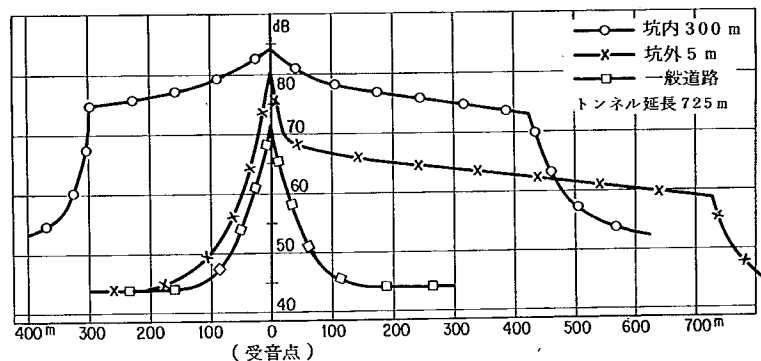


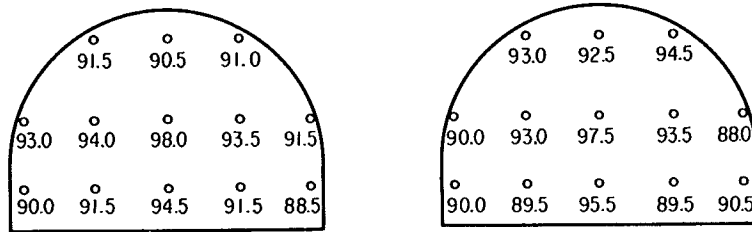
図-7 トンネル内における自動車走行音距離減衰実測例（土木研究所による）

ここで行ったスピーカ人工音を用いての模型および実大トンネルでの実験結果では、表-1に示されるように、ワイドノイズでは、実大トンネルの場合3.5 dB/100mで、模型実験では4.7 dB/100mである。すなわち、これを先の $-ax^{\frac{1}{2}}$ の形で表わせばその係数は0.35～0.47であり、これもほぼ同様の結果であるといえよう。開放条件の場合には、音源から100mでは40 dBの減衰であり、トンネル内においてはそのレベル減衰が非常に小さいということがわかる。

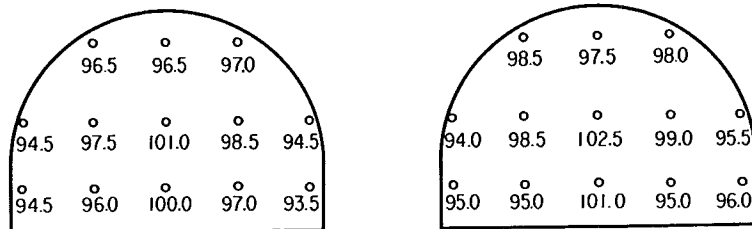
[3] トンネル坑口面音圧分布

例えば、トンネル坑口面をひとつの面音源と考えて坑口周辺の騒音計算を行う場合、その音源パワーレベルに相当する坑口面での音圧の分布を確認する必要がある。そこで、音源の坑内での位置、音源の指向性などによりその音圧分布がどのようになるかを模型実験および実大トンネル実験から検討を行った。得られた模型実験結果を付図-13～16に、実大トンネル実験結果を付図-17～19に、それからワイドノイズについての結果を図-8および9に示す。いずれの実験条件においても、坑口中心付近の方が周辺よりもレベルが高くなっている。特に、坑口断面積に比して音源位置の比較的浅い模型実験の場合に、中心部と周辺部とのレベル差が大きなものとなっている。音源位置が坑口より深い場合、あるいは音源スピーカを横向きにした場合にはその差異が比較的小さくなっており、音源スピーカの指向性による影響も考えられるが、実大トンネルの音源位置によるレベル差を比較すれば（付表-2）必ずしもそれだけともみえず、今後なお検討の必要があろう。ここでの実験結果からは、坑口面に仮想面音源を想定して周辺音圧の計算を行う場合には、このトンネルの坑口断面での音圧分布を考慮する必要があり、断面中央付近でのレベルで代表させることは、坑口面音源パワーが過大となることになるだろう。

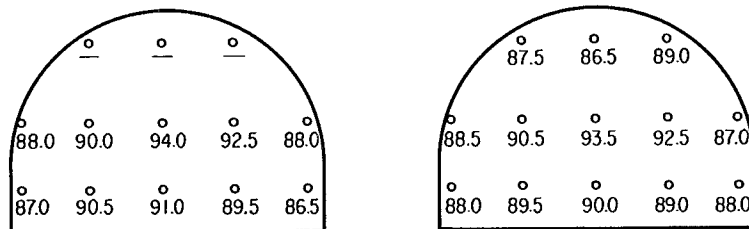
(1) スピーカの向き：正面，地面がない場合



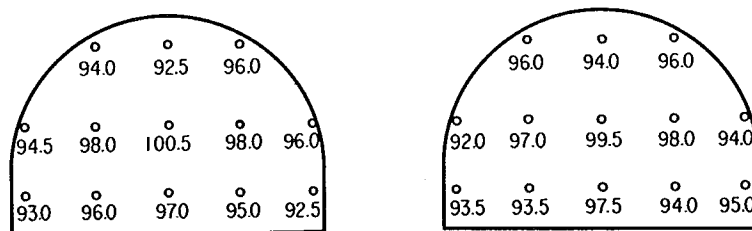
(2) スピーカの向き：正面，地面がある場合



(3) スピーカの向き：左向き，地面がない場合



(4) スピーカの向き：左向き，地面がある場合



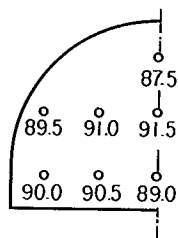
(a) 音源位置：坑内 25 cm

(b) 音源位置：坑内 50 cm

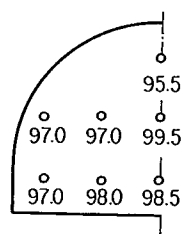
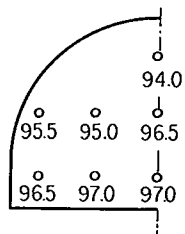
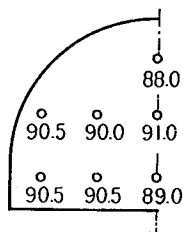
○ 受音点
単位 dB

図-8 トンネル坑口面音圧分布（模型実験結果）ワイドノイズ

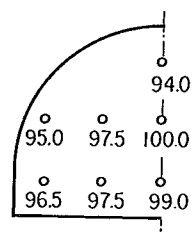
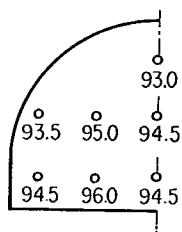
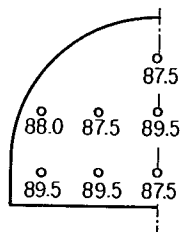
(1) 音源位置：坑内 7.5 m



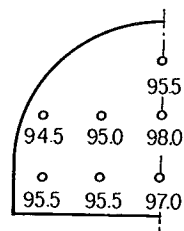
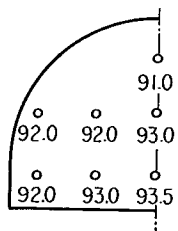
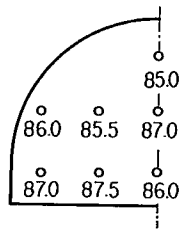
(2) 音源位置：坑内 15 m



(3) 音源位置：坑内 50 m



(4) 音源位置：坑内 120 m



(a) 音源：12 面体スピーカ

(b) 音源：ホーンスピーカ
横向き

(c) 音源：ホーンスピーカ
正面向き

図-9 トンネル坑口面音圧分布（実大トンネル実験結果）ワイドノイズ

(4) トンネル坑口よりの放射指向性状

トンネル坑口よりその周辺への騒音放射指向性状について、まず、音源が坑口にある場合の模型実験結果を、図-10および付図-20~28に示す。坑口に音源がある場合には、坑口に点

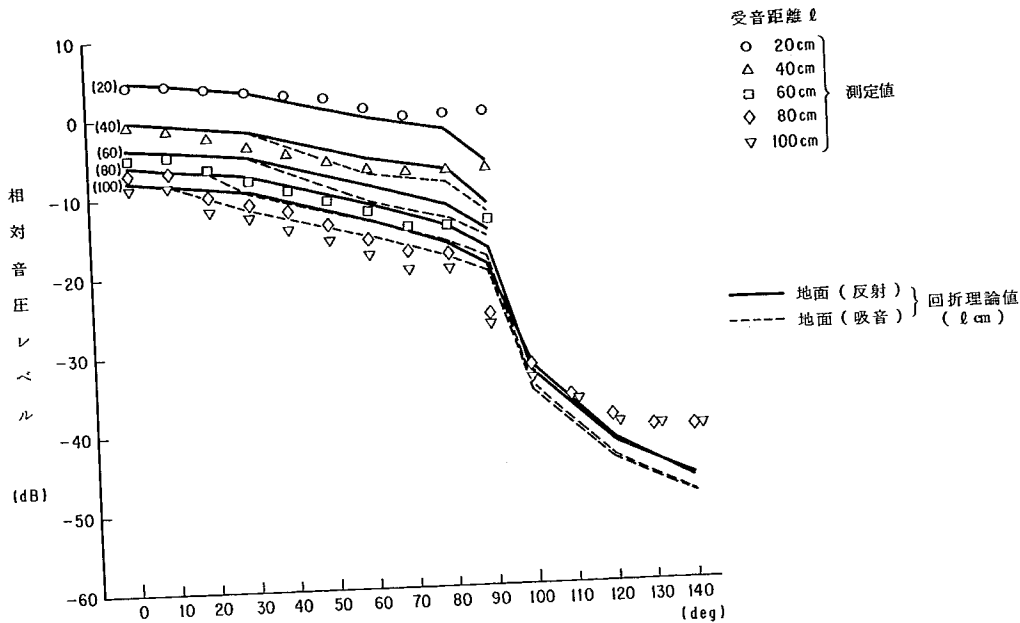


図-10 半円形トンネル坑口の放射性状，模型実験結果，音源が坑口にある場合，
受音高；断面中央高さの $\frac{1}{2}$ ， $H_M = 0$ （路面上10.5cm），地面（吸音性）
があり，坑口に面壁（反射）がある場合，（ワイドノイズ）

音源があるものとして，それに回折理論をあてはめて放射パターンを算出し，それと実験値とを対比させている。ただし，パワー・レベルについては，各受音点毎に，別途実測したスピーカの指向特性からの角度別のみかけのパワー・レベルを用いた。

放射パターンすなわち断面軸からの放射角度によるレベル変化については， 90° より小さい角度の範囲と大きい角度の範囲（トンネル坑口前面と坑口面より後側）とでのレベル差が，回折理論をあてはめた計算値より実験値の方が若干小さくなっている（計算値の方が指向性が強くなっている）。しかし，全体的にみれば，いずれの断面形状，坑口条件でも全体的には計算値と実験値のパターンがほぼ近似しているものと捉えられよう。絶対レベルについては，バンドノイズを用いた結果では，断面形状，坑口周辺条件などにより種々差異がみられるが（その傾向が定性的に妥当なものと説明し得ないものもあり今後の検討を要する），図-10に示されるワイドノイズによる結果では，受音距離が遠くなるに従い地面の吸音性による影響がみられるが，回

折理論をあてはめた計算値とはほぼ一致する結果を示している。

次に、音源がトンネル坑内にある場合の坑口からの放射指向性状に関する模型および実大トンネル実験結果について、以下に述べるように、点音源の集合した仮想面音源を坑口近くに設定する方式と久野ら⁸⁾の近似解との対比から検討を行った。

まず、トンネル坑口近くのある位置に、微小音源（これを点音源とする）が集合した仮想面音源を設定し、それぞれの微小音源からの音に対して坑口端部での回折減衰を計算して坑外への騒音放射指向性状を求めた。仮想面音源は、トンネル断面を3cm平方のメッシュに分割しており、半円形トンネルの場合には55個の微小音源（点音源）の集合となる。回折減衰については、坑口端部での一回回折の場合には、土木研究所の実験結果⁹⁾から(1)式を、坑口端部と面壁工とでの二回回折の場合には、Kurze¹⁰⁾による(2)式を用いることとした。

（一回回折の場合）

$$\Delta L_I = 10 \log_{10} (0.2 + N) + 13 \quad (1)$$

（二回回折の場合）

$$\Delta L_{II} = \Delta L_I + \Delta L_2 - 5 \text{ dB} + 20 \log_{10} (L/d) \text{ dB} \quad (2)$$

ただし、 N ：フレネル数（ $= 2\delta / \lambda$ 、

δ ：音響行路差、 λ ：波長）

ΔL_I ：径路 SOP' での一回回折
による減衰量

ΔL_2 ：径路 S'RP での一回回折
による減衰量

L ：回折径路 $\overline{SORP}$

d ：障壁がない場合の直達径路
 $\overline{SP}$

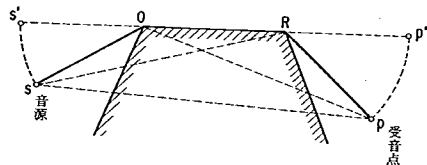


図-11 二回回折の取扱い（Kurze による）

また、地面あるいは面壁工での反射については、ともに反射率を1として計算を行った。

次に、久野らは、半円形（半径 a ）のトンネル坑口周辺における放射場の強度分布について、残響場の理論に Fresnel-Kirchhoff の回折公式を適用することでその近似解を求めている。トンネル内の音場を残響場とし、坑口にさまざまな方向を有する不規則な波動が到達するものと仮定して、坑口周辺に放射される音の強さの期待値を(3)式のように求めている。

$$\langle I(r, a) \rangle = \frac{\langle I \rangle}{4} \int_0^a \rho d\rho \int_0^{2\pi} d\psi \frac{1}{|r - \rho|^2} \left(\frac{1}{3} + \cos \theta + \cos^2 \theta \right) \quad (3)$$

ただし、 $|r, \rho|^2 = r^2 + \rho^2 - 2r\rho \sin \alpha \cos(\psi - \chi)$,

$$\cos \theta = r \cos \alpha / |r - \rho|, \quad r \geq 2a$$

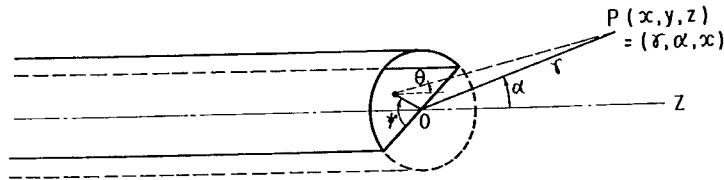


図-12 半円形トンネル坑口周辺騒音分布の算出
(久野らによる)

(3)式において被積分関数 $\hat{r}$ ($= r/a$) の逆数で展開して項別積分を行い次式を得ている。

$$\begin{aligned} \langle I(\hat{r}, \alpha) \rangle &= \frac{\pi \langle J \rangle}{4} \left\{ \hat{r}^{-2} \left(\frac{1}{3} + \cos \alpha + \cos^2 \alpha \right) \right. \\ &+ \hat{r}^{-4} \left(\frac{1}{6} + \frac{3}{4} \cos \alpha + \cos^2 \alpha - \frac{1}{3} \sin^2 \alpha - \frac{15}{8} \cos \alpha \sin^2 \alpha - 3 \cos^2 \alpha \sin^2 \alpha \right) \\ &\left. + O(\hat{r}^{-6}) \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

ただし、 $\langle J \rangle$ ：坑口での平均強度 (W/m^2)

これらの計算値に照し、模型実験および実大トンネル実験の結果を図-13～20および付図-29～54に示す。模型実験は坑口面のパワーレベルを、実大トンネル実験は坑口面の音圧レベルをそれぞれ0 dBとして相対レベルで表示している。ここでは、その放射指向性状すなわち角度によるレベル減衰の傾向について捉える。まず、久野らの近似解による放射指向性状に照してみると（ここでは90°までの範囲）、実験結果は、バンドノイズを用いた模型実験結果で、坑口条件により角度によるレベル減衰がやや大きいものが見られるが、全体には、ほぼ計算値の性状に近似しているとみることができよう。軸上と90°におけるレベル差は、久野らの近似解では約8.5 dBであるが、実験値は全体的にそれよりもやや大きい。

次に、仮想面音源を微小音源に分割して計算する方式については、各図に示されるように、仮想面音源位置をトンネル坑口から種々の位置に設定して計算し、その角度によるレベル減衰の性状が最も適合する位置を検討した。付図-55に示されるように、角度による減衰の傾向のみに着目して仮想面音源位置を求め、以後の予測法の検討にあたっては、絶対レベル差 ΔL を補正量として定めることにした。トンネル断面形状、地面・面壁の有無など実験条件別に最適仮想面音源位置の坑口からの距離別出現頻度を表-2に示す。附表-3～6は、受音高別の同様の結果である。得られた最適位置の出現分布は、各実験条件によってはほとんど相異がなく、いずれもほぼ正規分布を示し、坑口から坑内8～20 cmで適合性が良く、全体的にみると、音源位置は坑内15 cmが最も多く出現している（おおよそ円形断面半径に相当する。面積比が900倍となる実大トンネルでは4.5 mとなる）。この仮想面音源位置をあてはめて、トンネル坑口縁での回折減衰を計算して求められるものに対する補正量 ΔL を各条件ごとに示したものが表-3である。半円形断面で、吸音性地面がある場合に、低い受音位置で小さな値となる以外は、各条件により

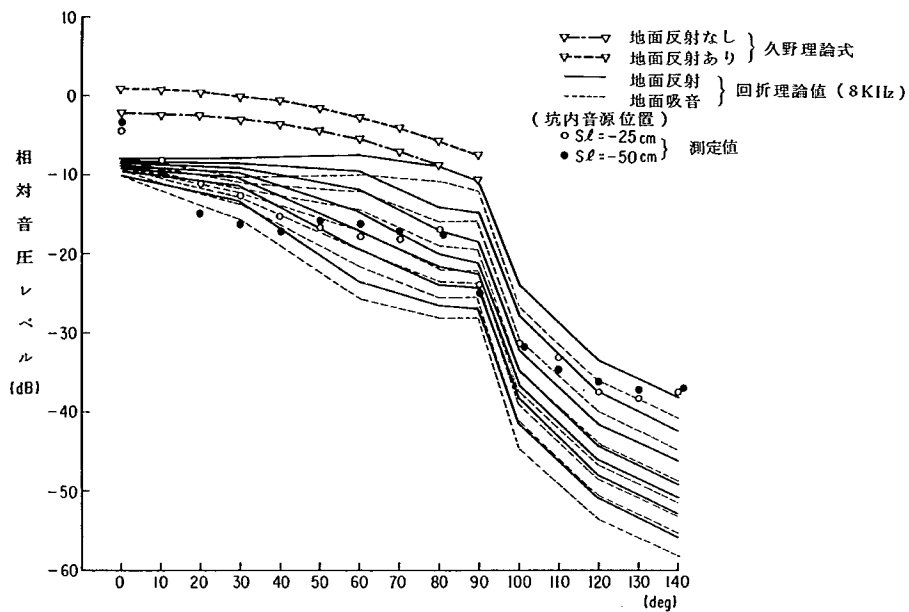


図-13 半円形トンネル坑口の放射性状，模型実験結果，音源が坑内にある場合
地面（吸音）があり，面壁工（反射）がある場合，受音距離 $\ell = 100\text{ cm}$ ，
受音高 $H_M = -10\text{ cm}$ （路面上 0.5 cm ），ワイドノイズ

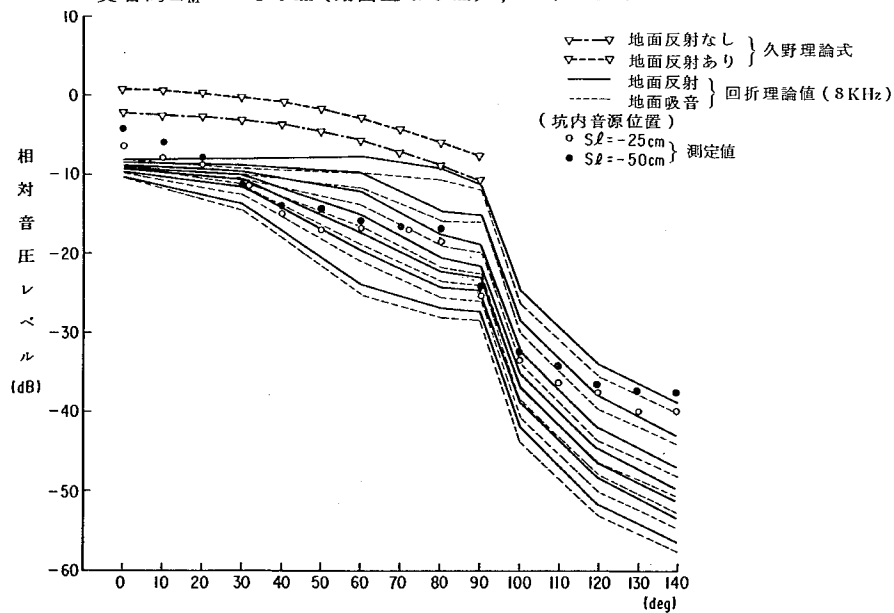


図-14 半円形トンネル坑口の放射性状，模型実験結果，音源が坑内にある場合，
地面（吸音）があり，面壁工（反射）がある場合，受音距離 $\ell = 100\text{ cm}$ ，
受音高 $H_M = 10\text{ cm}$ （路面上 20.5 cm ），ワイドノイズ

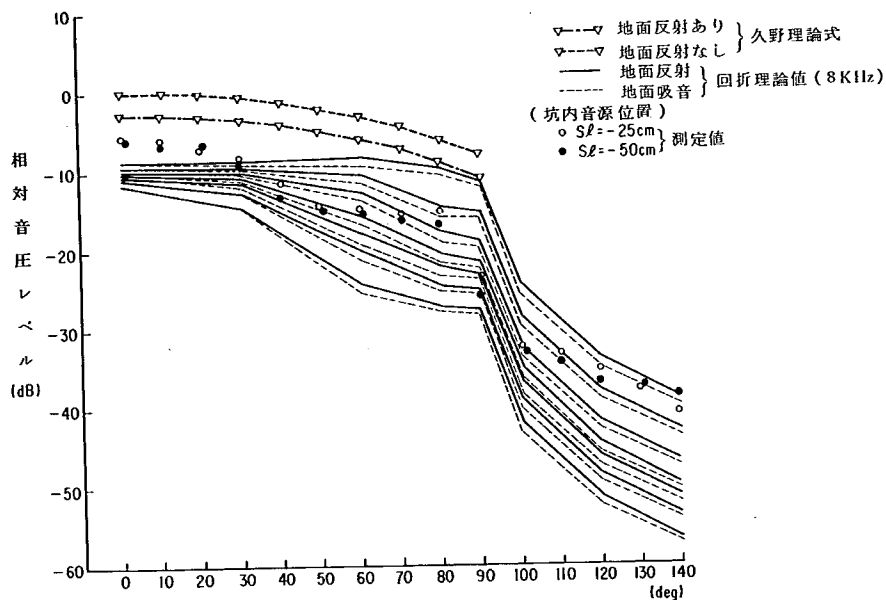


図-15 半円形トンネル坑口の放射性状，模型実験結果，音源が坑内にある場合，地面（吸音）があり，面壁工（反射）がある場合，受音距離 $\ell = 100\text{cm}$ ，受音高 $H_M = 20\text{cm}$ （路面上 30.5cm ），ワイドノイズ

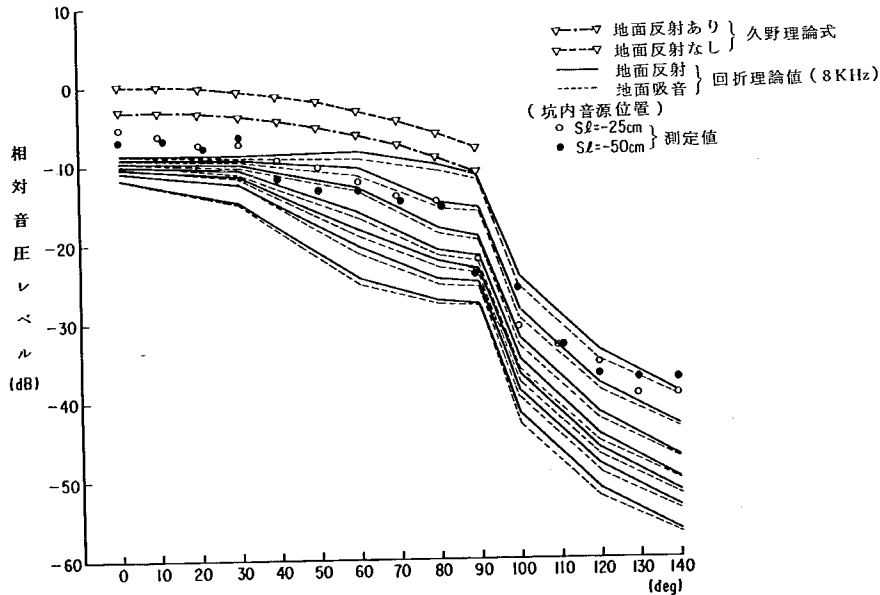


図-16 半円形トンネル坑口の放射性状，模型実験結果，音源が坑内にある場合，地面（吸音）があり，面壁工（反射）がある場合，受音距離 $\ell = 100\text{cm}$ ，受音高 $H_M = 30\text{cm}$ （路面上 40.5cm ），ワイドノイズ

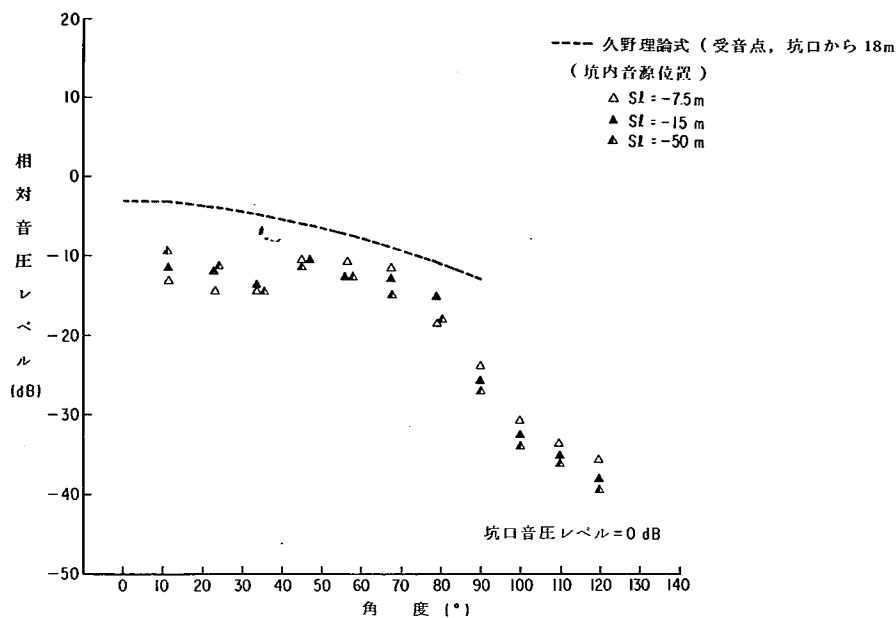


図-17 トンネル坑口の放射性状, 実大トンネル実験結果,
受音距離: $\ell = 18\text{ m}$, 受音高: $H_M = 1.2\text{ m}$, ワイドノイズ

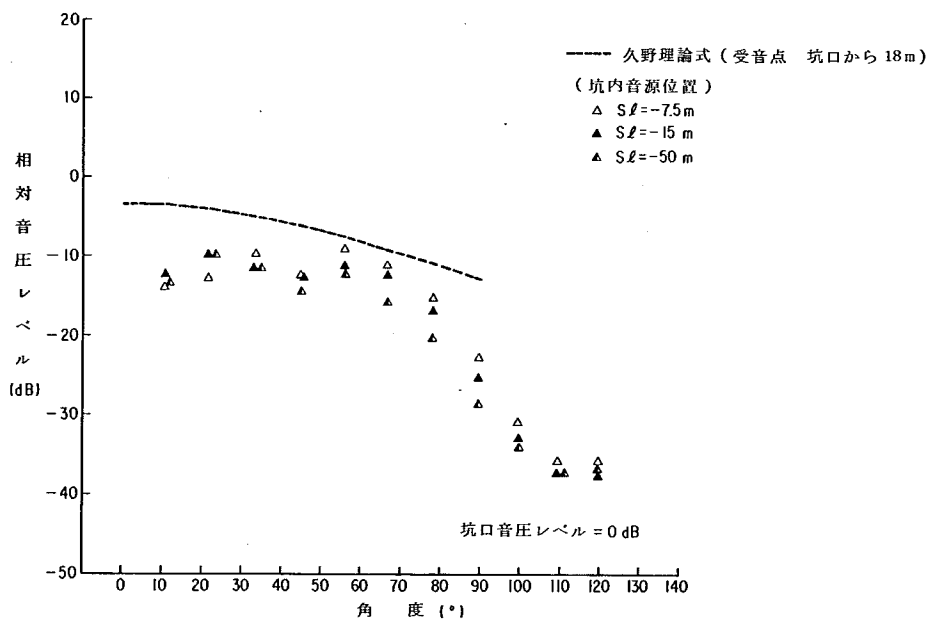


図-18 トンネル坑口の放射性状, 実大トンネル実験結果
受音距離: $\ell = 18\text{ m}$, 受音高 $H_M = 3.5\text{ m}$, ワイドノイズ

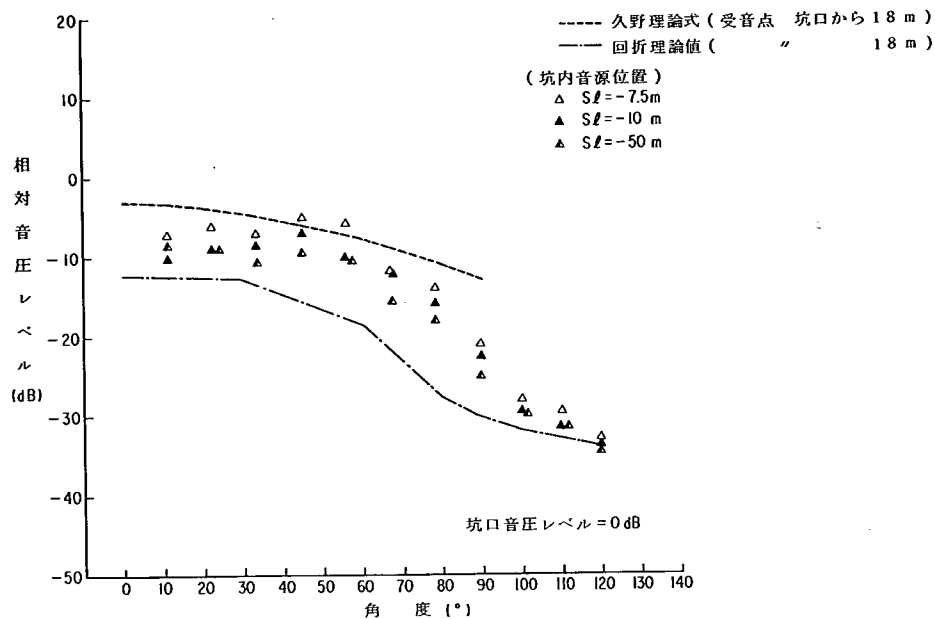


図-19 トンネル坑口の放射性状, 実大トンネル実験結果
受音距離: $\ell = 18 \text{ m}$, 受音高: $H_M = 1.2 \text{ m}$, 500 Hz

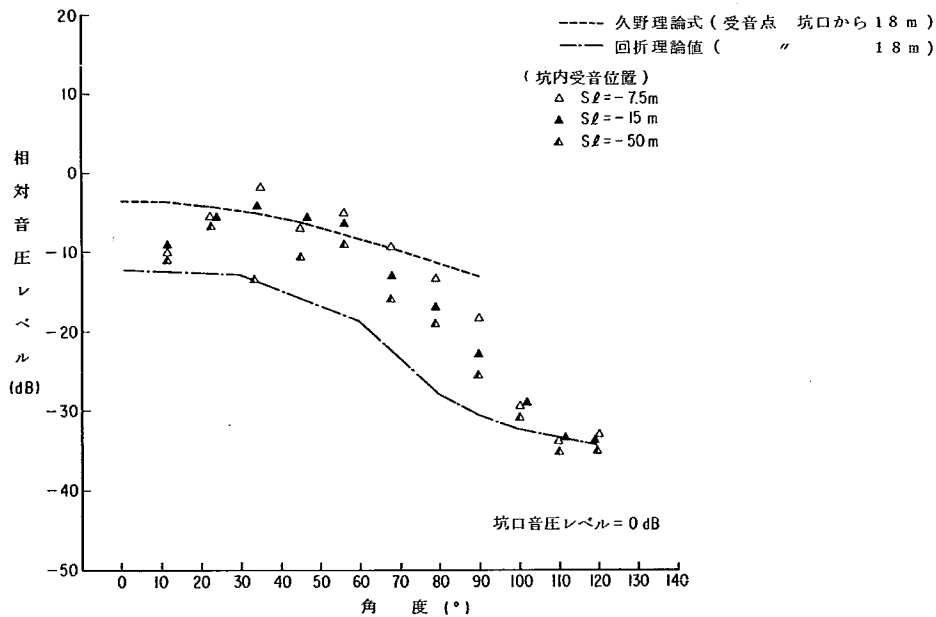


図-20 トンネル坑口の放射性状, 実大トンネル実験結果
受音距離: $\ell = 18 \text{ m}$, 受音高: $H_M = 3.5 \text{ m}$, 500 Hz

表-2 実験結果より得られた仮想面音源位置の出現頻度

トンネル 形 状	地 面	面 壁	面 音 源 位 置 (cm)						
			0	4	8	12	15	20	30
円 形	無	無	0	0	1	6	9	2	2
矩 形	無	無	3	6	15	25	34	14	3
		反 射	2	7	8	12	43	22	6
		吸 音	3	1	6	10	39	29	12
半 円 形	無	無	0	4	35	29	28	3	1
	反 射		0	0	13	23	39	18	7
	吸 音		0	1	12	19	32	24	12
	無	反 射	1	14	21	20	35	7	2
		吸 音	1	2	22	22	36	15	2
	反 射	反 射	0	7	15	22	35	11	9
		吸 音	0	0	6	20	39	27	8
	吸 音	反 射	0	8	15	15	27	22	13
		吸 音	0	1	11	17	41	22	8
合 計			10	51	180	240	437	216	85

表-3 仮想面音源位置を坑内15cmとした場合の
各条件における回折減衰計算値の補正值

トンネル 形 状	地 面	面 壁	補 正 値 (dB)					平 均 値 (dB)
			$H_M = -10$	$H_M = 0$	$H_M = 10$	$H_M = 20$	$H_M = 30$	
円 形	無	無		3.5				3.5
矩 形	無	無	2.5	3.4	4.3	4.3	5.2	3.9
		反 射	6.4	6.8	7.1	8.8	8.6	7.5
		吸 音	7.2	6.3	6.4	7.1	8.0	7.0
半 円 形	無	無	4.5	7.0	6.6	7.0	7.2	6.5
	反 射		5.5	4.4	6.5	6.3	7.0	5.9
	吸 音		2.5	6.9	6.2	5.8	5.7	5.4
	無	反 射	3.5	5.3	4.9	6.4	6.6	5.3
		吸 音	4.7	4.8	5.2	5.6	6.1	5.5
	反 射	反 射	6.2	5.9	6.6	6.7	6.4	6.4
		吸 音	6.7	4.2	6.5	6.8	4.9	5.8
	吸 音	反 射	0.8	5.1	6.2	6.4	3.9	4.5
		吸 音	-0.2	5.9	5.9	4.9	4.7	4.2
全 体 平 均 値			4.2	5.3	6.0	6.3	6.2	5.5

全体に大きな差異はなく、その平均値は 5.5 dB である。すなわち、ここでの実験で得られた結果から、トンネル坑口周辺での騒音放射指向分布を予測するには、坑口から坑内 1.5 m の位置（実大トンネルでは面積比から換算される位置）に仮想面音源を設定し、それをいくつかの微小音源に分割して、各々の音源からの音について坑口端部での回折減衰計算を行って、求まるものに 5.5 dB を加えれば良いことになる。

3. トンネル坑口周辺部での騒音予測の一手法

模型実験および実大トンネル実験で得られた結果から、道路トンネル坑口周辺部における騒音分布について、一般開放部に対する先の日本音響学会提案の予測式を基本として、それに対応すると考えられる実用的なる一予測手法を以下に検討してみる。

予測計算は、図-21に示すように、明り部（トンネルから外の開放部分）からの音と、トンネル部からの音とに分けて計算し、それらを合成することにする。

(1) 明り部からの騒音 (L_0)

トンネル外の開放道路部分からの音については、以下に示すように、従来の日本音響学会提案の予測式を基本とするものとし、それを受音点からの道路明り部分の見通し角度で補正するものとする。

まず、トンネルがないものとして、すなわち、開放道路部分が無限に続いているものとして、対象受音点における騒音レベル L_M を、次式で示される日本音響学会の基本式により算出する。

$$L_M = L_W - 8 - 20 \log_{10} l + 10 \log_{10} \left(\pi \frac{l}{d} \tanh 2\pi \frac{l}{d} \right) + \alpha \quad (5)$$

L_W : 一台の車から発生する騒音のA特性による平均パワーレベル [dB (A)]

l : 車線からの受音点までの距離 [m]

d : 平均車頭間隔, $d = 1000 \nu / Q$ [m]

Q : 交通量 [台/h]

ν : 速度 [km/h]

α : 補正值 ($\alpha = \alpha_d + \alpha_i$, α_d : 回折による補正值, α_i : 沿道の地表条件など種々の原因による補正值)

平均パワーレベル L_W は、二車種分類とした場合、次式で示される。

$$L_W = 87 + 0.2 \nu + 10 \log_{10} (\alpha_1 + 10 \alpha_2)$$

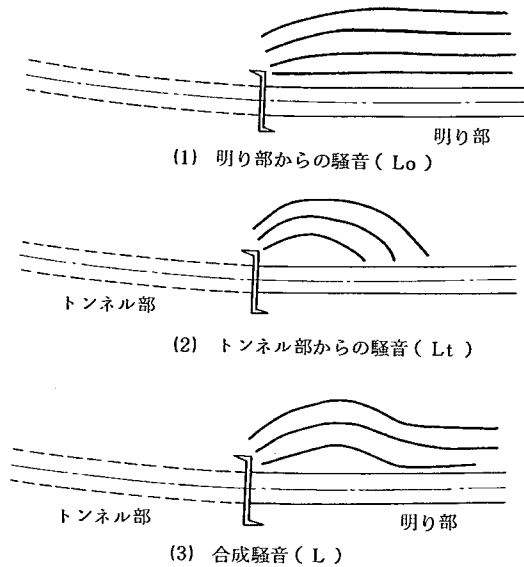


図-21 トンネル坑口周辺部騒音予測

a_1 : 小型車類混入率

a_2 : 大型車類混入率, $a_1 + a_2 = 1$

回折による補正值 α_d は、音響径路差 δ から図-22で求められ、種々の原因による補正值 α_i は、道路構造別、対象受音点地上高さ別に図-23又は表-4から求められる。

表-4 補正值 α_i (一般国道), 図-23から0.5 dB単位で読み取ったもの

構造	受高さ 点(m)	路肩端からの距離											
		0	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
盛土	12.0			-0.5	-2.5	-3.5	-3.5	-4.0	-4.0	-4.0	-4.0	-4.0	-4.0
	7.0			-2.5	-4.5	-5.0	-5.0	-5.0	-5.0	-5.0	-5.0	-5.0	-5.0
	3.5			-4.0	-5.5	-6.0	-6.0	-6.5	-6.5	-6.5	-7.0	-7.0	-7.0
	1.2	-3.0	-4.5	-5.5	-6.5	-6.5	-7.0	-7.0	-7.5	-7.5	-8.0	-8.0	-8.0
切土	12.0			0	0	-0.5	-2.5	-5.0	-6.0	-6.5	-5.0	-5.0	-5.0
	7.0			-1.5	-1.5	-2.5	-3.5	-4.0	-4.5	-4.5	-5.0	-5.0	-5.0
	3.5			-2.5	-3.5	-4.0	-4.5	-4.5	-5.0	-5.0	-5.0	-5.0	-5.0
	1.2	-2.5	-3.0	-3.5	-5.0	-5.5	-5.5	-5.5	-6.0	-6.0	-6.0	-6.5	-6.5
高架	12.0	+3.0	+1.0	0	-1.5	-2.0	-2.5	-3.0	-3.5	-3.5	-4.0	-4.0	-4.5
	7.0		0	-1.0	-2.5	-3.5	-3.5	-3.5	-3.5	-3.5	-4.0	-4.0	-4.5
	3.5		-1.0	-2.5	-3.5	-3.5	-4.0	-4.0	-4.0	-3.5	-4.0	-4.0	-4.5
	1.2		-2.0	-3.5	-5.0	-5.0	-5.0	-4.5	-4.0	-3.5	-4.0	-4.0	-4.5
平坦	12.0		-4.5	-2.5	-2.5	-3.0	-3.0	-3.5	-3.5	-4.0	-4.0	-4.0	-4.0
	7.0		-4.5	-3.0	-3.5	-4.0	-4.5	-5.0	-5.0	-5.5	-5.5	-5.5	-5.5
	3.5		-4.5	-4.5	-5.0	-5.5	-6.5	-7.0	-7.5	-8.0	-8.5	-8.5	-8.5
	1.2	-4.0	-7.0	-8.0	-8.0	-8.5	-9.0	-9.5	-10.0	-10.5	-11.0	-11.0	-11.0

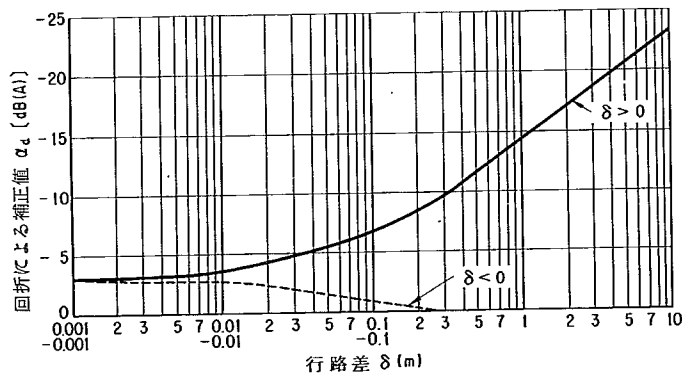


図-22 回折による補正值 α_d の計算図表

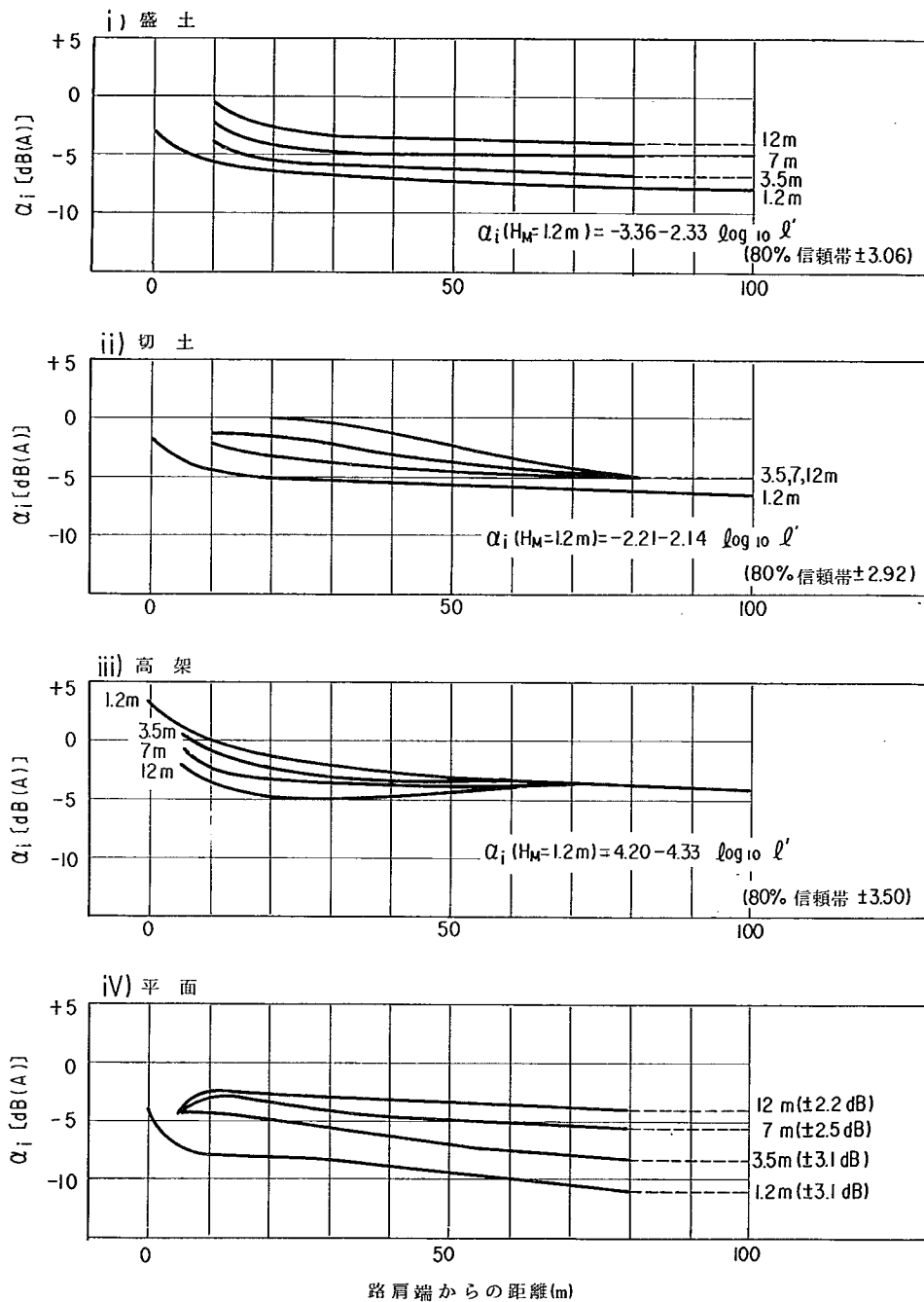


図-23 補正值 α_i (一般国道)

次に、トンネル部分の道路がないものとして、すなわち開放道路部分だけの有限長さの道路があるものとして、先に求めた L_M を、対象受音点からの道路見通し角度（図-24 参照）により補正を行う。すなわち、無限長道路としたときの騒音レベル計算値 L_M から、明り部分に対する騒音レベルすなわち道路見通し角度 θ に対する騒音レベル L_0 は簡略的に次式で示される。

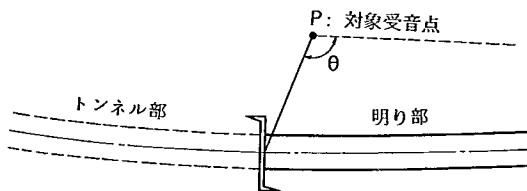


図-24 道路見通し角度による補正

$$L_0 = L_M + 10 \log_{10} \frac{\theta}{\pi} \quad (7)$$

(2) トンネル部からの騒音 (L_T)

まず、坑口面近くに設定する面音源のパワーレベルを求める。与えられた交通条件から、例えば開放条件における場合と同様に、トンネル内に一列等間隔に車を配置し（図-25）、トンネル坑口面においてそれぞれの車からの音を合成する。この場合、トンネル内における一台の車からの音の距離減衰については、実大トンネルでの測定結果および実験車走行での測定例などより、 $-3 \text{ dB}/100 \text{ m}$ と安全側にとることとする。すなわち、トンネル坑口での面音源のパワー W_T は次式で計算されることになる。

$$W_T = \frac{W_0}{2} \sum_{i=1}^n 2^{-\frac{(n-\frac{1}{2})d}{100}} \quad (8)$$

W_0 : 音源（自動車）の平均パワー、 $W_0 = 10^{\frac{L_W}{10}}$
 $\cdot 10^{-12} [\text{W}/\text{m}^2]$

L_W : 平均パワーレベル
 $[\text{dB}(\text{A})]$

n : トンネル内に存在する車の台数

d : 平均車頭間隔、

$$d = 1000V/Q [\text{m}]$$

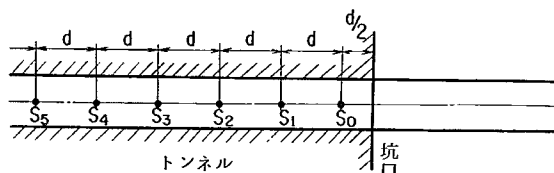


図-25 トンネル内車両の配置

得られたパワーを有する仮想面音源を、模型実験結果に対応する位置（模型実験では坑口から坑内15cmに最多位置が求められている。対象実大トンネルの面積を考慮して、例えば約900倍のトンネルでは坑口から坑内4.5mの位置になる）に設定し、それをいくつかの微小音源に分割する（全体の予測精度のバランスからみて、8～10個程度に分割すれば充分であろうと考えられる）。

n 個に分割されたそれぞれの音源（点音源とみなす）からの音について、距離減衰、坑口端部や面壁工などでの回折減衰を計算して、それらを合成し、補正值（表-3、平均5.5dB）を加

えることで対象受音位置におけるトンネル部からの音を計算することができる。すなわち、トンネル部からの音についての推定基本式は次の(9)式で示される。

$$L_T = 10 \log_{10} \left(\sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_{TW} - 20 \log_{10} l_i - 8 - \Delta L_d}{10}} \right) \quad (9)$$

$$\text{ただし, } L_{TW} = 10 \log_{10} \frac{W_T}{10^{-12}} + 10 \log \frac{1}{n}$$

L_{TW} : n 分割した面音源のパワーレベル [dB (A)]

l_i : i 番目の音源から対象受音点までの直線距離 [m]

ΔL_d : 坑口端部や面壁工等による回折減衰値 [dB (A)]

点音源からの音に対する回折減衰量の算出については、先に掲げた以下の式が適用されよう。

(一回回折の場合)

$$\Delta L_1 = 10 \log_{10} (0.2 + N) + 13$$

(二回回折の場合) (図-11 参照)

$$\Delta L_2 = \Delta L_1 + \Delta L_2 - 5 \text{ dB} + 20 \log_{10} (L/d)$$

上式の計算にあたっての代表周波数については、日本道路公団の実測例⁶⁾があり、例えば大型車についてみれば、トンネルへの進入側では400 Hz、トンネルからの進出側では600 Hzが得られている。

一般国道の対面2車線トンネルでは、その幅員が8.5～9 m、断面中心の高さが6～6.5 m (半径が4～4.5 mの半円形に1.5～2 mの立上り部分を有する)で、ほぼ同一の断面形を有しているものとすることができる(少なくとも坑口周辺への騒音放射性状に明確な差異を与えるほどの相異はないものと考えられる)。

図-26および図-27は、模型実験に用いたトンネルを30倍したもの(断面幅員8.7 m、中央高さ約6 m)について、坑口における音圧レベルを100 dBとして、ここでの予測方式に従って坑口からの騒音放射指向性状を求めたものである。地面および面壁工がそれぞれ反射性の場合と吸音性の場合とについて求めている。すなわち、一般国道の一般的な断面を有するトンネルの場合には、図-26あるいは図-27に示される騒音分布を標準断面における基本パターンであるとし、与えられた交通条件から、そのトンネルでの坑口面における音圧レベルを求め、基準音圧レベル(100 dB)との差分を補正量とすることで、そのトンネル坑口からの放射指向性状を求めることができる。一般国道のトンネル部で、地山が急傾斜面でかなり大きな擁壁工が施工されていない限りは、一般には、山肌を吸音性とみなすことができ、図-27に示す吸音性の面壁工で吸音性の地面の場合に相当するものとみなせることが多いであろう。

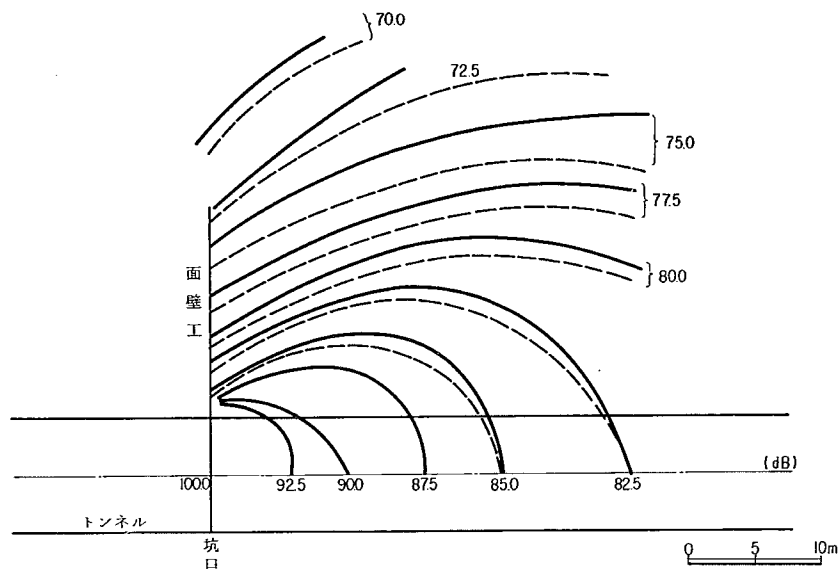


図-26 標準トンネル坑口からの放射性状計算値，反射性面壁工がある場合。
ただし，坑口音圧レベルを100dBとする。(—)：地面が反射性の場合。
(----)：地面が吸音性の場合。

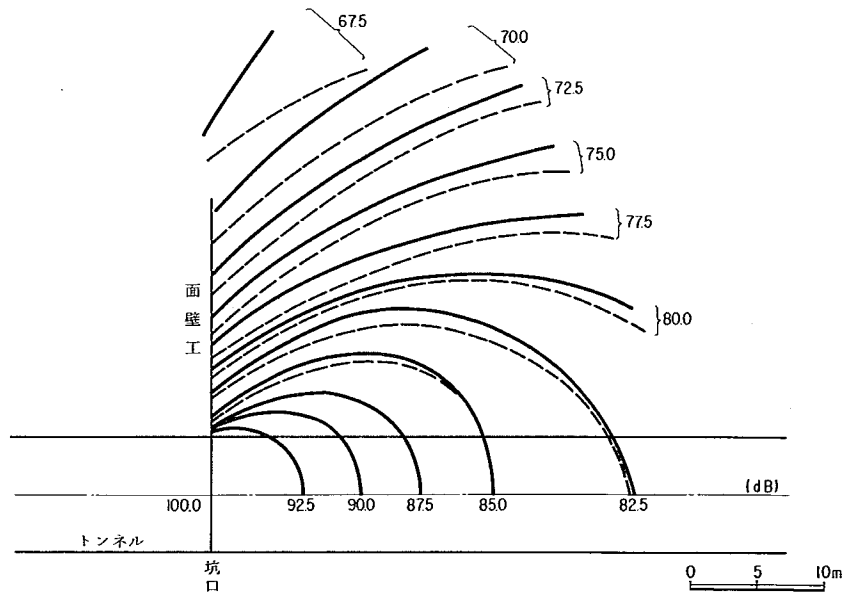


図-27 標準トンネル坑口からの放射性状計算値，面壁工部分が吸音性である場合。
ただし，坑口音圧レベルを100dBとする。(—)：地面が反射性の場合。
(----)：地面が吸音性の場合

(3) 合成騒音 (L)

(1)で求めた明り部からの音 L_0 と、(2)で求めたトンネル部からの音 L_T とを次式で合成することにより、トンネル坑口周辺の任意位置における騒音レベル L を計算することができる。

$$L = 10 \log_{10} \left(10^{\frac{L_0}{10}} + 10^{\frac{L_T}{10}} \right) \quad (10)$$

建設省の各地方建設局技術事務所と北海道開発局土木試験所が、供用中の一般国道トンネルで調査した結果に、ここでの予測方式を照してみた（図-28～32）。トンネル坑口周辺部の地形、特に地面高が一樣でない為に（一般国道トンネルの多くの場合は、ここでのトンネルよりもいっそう複雑な周辺地形条件を有している）、必ずしも条件的には理想的ではないが、結果はおおむね近似しているものとみられる。

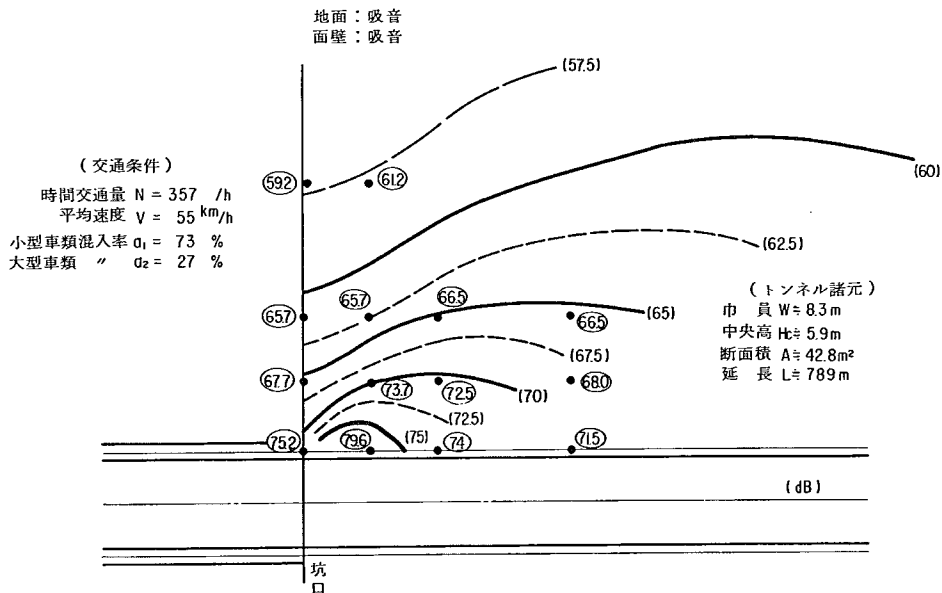


図-28 供用トンネルにおける実測値と計算値との対応(1)
13号中野第2トンネル(北側坑口)

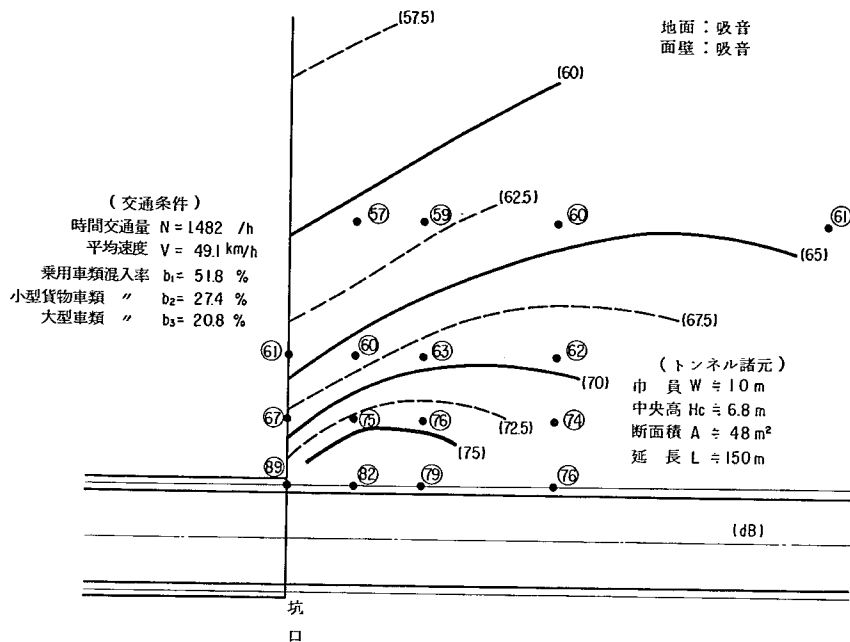


図-2 9 供用トンネルにおける実測値と計算値との対応(2)
 2号屋代トンネル(西側坑口南側)

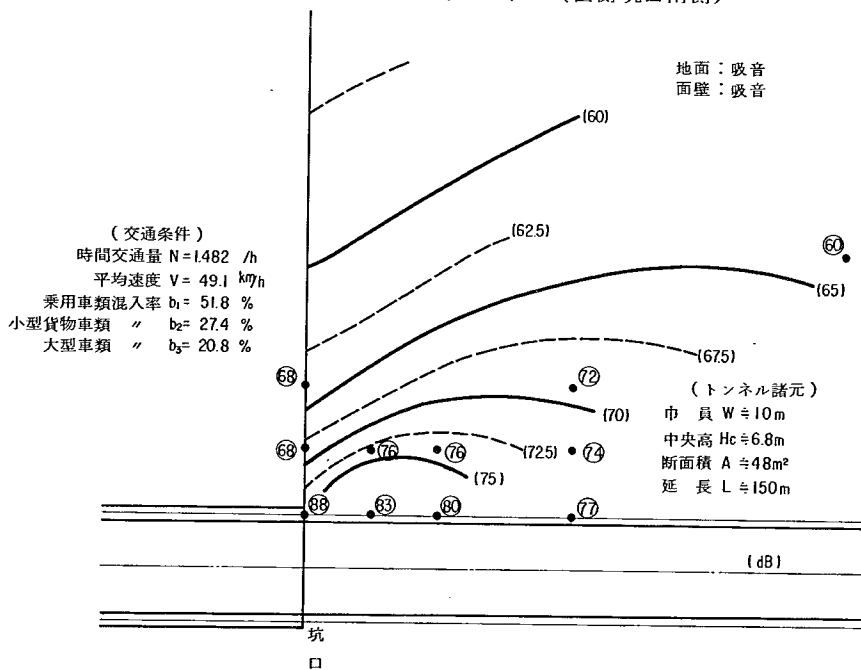
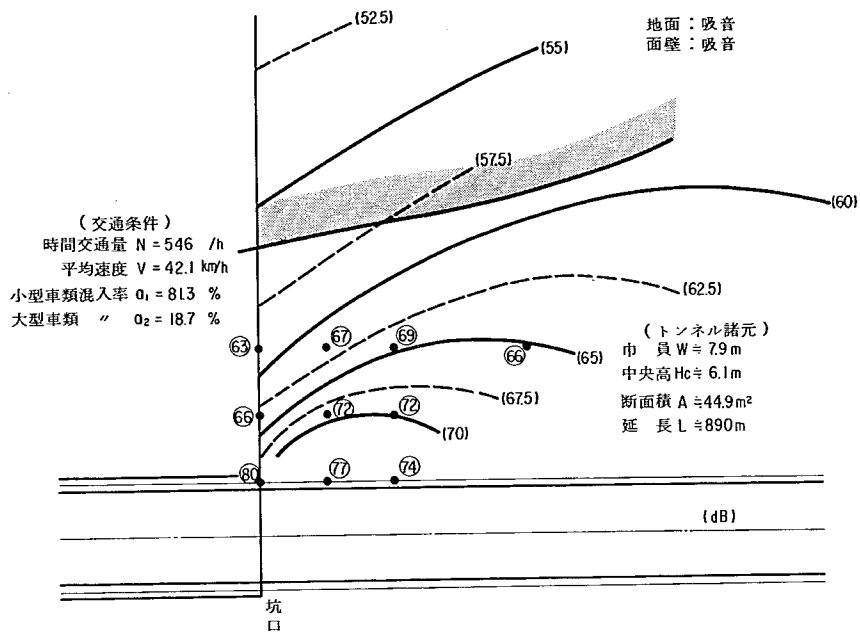
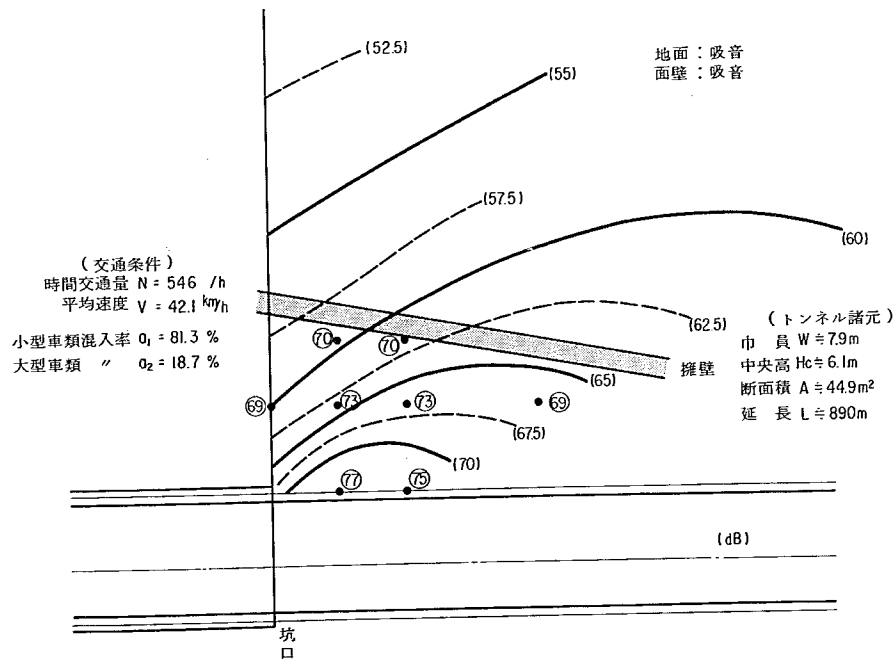


図-3 0 供用トンネルにおける実測値と計算値との対応(3)
 2号屋代トンネル(西側坑口北側)



図－３１ 供用トンネルにおける実測値と計算値との対応(4)
 ４８号関山トンネル（東側坑口）



図－３２ 供用トンネルにおける実測値と計算値との対応(5)
 ４８号関山トンネル（西側坑口）

あ と が き

一般開放道路に対する日本音響学会の予測方式が適用し得ない、特殊箇所のひとつであるトンネル坑口周辺部における騒音の特性について、無響室での縮尺模型実験および実大トンネルでの人工音を用いての実験からいくつかの検討を行った。また得られた結果を利用して、1つの実用的な予測方式を考えてみた。さらに、それを、実際の供用中のトンネルにおける実測値に照し、おおむね近似する結果を得ることができた。しかしながら、坑口面における音圧分布の問題、バンドノイズを用いた実験結果の特異性など、なお今後の検討を要する点もいくつか指摘される。

この実験報告が、関連の研究や、現場における騒音予測のひとつの参考資料となり得れば幸いである。

最後に、本実験は、本州四国連絡橋公団よりの委託により行ったものを中心にしてまとめたもので、同公団企画開発部調査課の方々に深謝する。

また、供用トンネルにおける実測は、51、52年度建設省の技術管理業務の一環として行われたものであり、各地方建設局と各技術事務所ならびに北海道開発局土木試験所の担当者各位に深謝するとともに、実験解析に当り協力を得た（株）ケー・シー・エスの金泉昭、前之園広昭の両氏に感謝の意を表する。

< 参 考 文 献 >

- 1) 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）— 実用的な計算式について —」，日本音響学会誌 31巻8号，1975. 8.
- 2) 石井聖光；「道路交通騒音予測計算方法に関する研究 — 高さ別補正值 a_i について —」，日本音響学会誌 33巻8号，1977. 8.
- 3) 山本照二；「廊下に沿っての音圧分布について」，日本音響学会誌 17巻4号，1961. 4.
- 4) 日本音響学会材料協会編；「騒音対策ハンドブック」
- 5) 北海道開発局土木試験所道路研究室；「トンネル坑口付近の交通騒音について」，第17回北海道開発局技術研究発表会資料，1974. 2.
- 6) 日本道路公団；「道路特殊箇所における騒音予測に関する基礎的研究」，1976. 3.
- 7) 堀内浩三郎；「トンネル騒音の特性について」，第13回土木研究所研究発表会資料，1974. 11.
- 8) 久野和宏，池谷和夫，津田健三；「指向性騒音源群が作る騒音分布について」，日本音響学会誌 33巻5号，1977. 5.
- 9) 建設者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，1971. 12.

-
- 10) Ulrich J. Kurze : "Noise reduction by barriers", Journal of
Acoustical Society of America, Vol. 55 No. 3, 1974. 3.

付 表 お よ び 付 図

2. 実験結果

① トンネル坑口よりの距離減衰

付図－1～8 トンネル坑口よりの距離減衰（模型実験結果）	39
付図－9～11 トンネル坑口よりの距離減衰（実大トンネル実験結果）	43

② トンネル内距離減衰

付図－12 トンネル内距離減衰（模型実験結果）	44
付表－1 トンネル内距離減衰（ ” ）	33

③ トンネル坑口面音圧分布

付図－13～16 トンネル坑口面音圧分布（模型実験結果）	45
付図－17～19 トンネル坑口面音圧分布（実大トンネル実験結果）	47
付表－2 坑口面音圧分布レベル差（最大と最小の差）	33

④ トンネル坑口よりの放射指向性状

付図－20～28 トンネル坑口の放射性状，模型実験結果，音源が坑口にある場合。...	50
付図－29～50 トンネル坑口の放射性状，模型実験結果，音源が坑内にある場合。...	54
付図－51～54 トンネル坑口の放射性状，実大トンネル実験結果	65
付図－55 面音源位置の判定例	67
付表－3～7 測定値より得た面音源位置の出現頻度	34

付表-1 トンネル内距離減衰（模型実験結果）

スピーカ向 周波数	正 面 $H_M=0$	正 面 $H_M=-6.5$	正 面 $H_M=7.5$	左 向 き $H_M=0$	平 均 値
8 kHz	1.4	1.0	1.6	0.6	1.1
16 kHz	2.4	1.8	1.9	1.8	2.0
ワイドノイズ	1.7	1.6	1.6	0.8	1.4

H_M ：路面上受音高（中心を0）（cm）

（単位 dB/m）

付表-2 坑口面音圧分布レベル差（最大と最小の差）（実大トンネル実験結果）

a) 12面体スピーカ

周波数 音源位置	250 Hz	500 Hz	1 kHz	ワイド ノイズ
坑内 7.5 m	4.5	4.5	4.0	4.0
坑内 15 m	5.5	3.5	3.5	3.0
坑内 50 m	5.0	2.5	2.5	2.0
坑内 120 m	2.5	2.5	2.0	2.5

（dB）

b) ホーンスピーカ正面

周波数 音源位置	250 Hz	500 Hz	1 kHz	ワイド ノイズ
坑内 15 m	4.0	5.0	3.0	4.0
坑内 50 m	5.0	5.0	7.0	6.0
坑内 120 m	4.5	4.0	3.5	3.5

（dB）

c) ホーンスピーカ左向き

周波数 音源位置	250 Hz	500 Hz	1 kHz	ワイド ノイズ
坑内 15 m	3.5	3.0	2.5	3.0
坑内 50 m	4.5	2.5	3.0	3.0
坑内 120 m	3.0	2.0	2.0	2.5

（dB）

付表-3 測定値より得た面音源位置の出現頻度

受音高： $H_M = -10$ (路面上 0.5 m)

トンネル 形 状	地 面	面 壁	面 音 源 位 置 (cm)						
			0	4	8	12	15	20	30
円 形	無	無							
矩 形	無	無	0 0	0 0	1 1	0 0	2 3	2 1	0 0
			0 0	0 0	0 0	4 0	0 4	1 1	0 0
		反 射	0 0	0 0	1 0	0 0	2 2	2 2	0 1
			0 0	0 0	1 1	2 2	1 2	1 0	0 0
		吸 音	0 0	1 0	0 0	0 0	1 1	3 1	0 3
			0 0	0 0	0 0	0 2	2 2	3 1	0 0
半 円 形	無	無	0 0	0 1	1 2	2 1	1 0	0 1	1 0
			0 0	0 0	0 2	1 0	4 3	0 0	0 0
	反 射		0 0	0 0	0 0	0 2	2 1	2 1	1 1
			0 0	0 0	0 0	0 0	0 3	3 0	2 2
	吸 音		0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	2 3	3 2
			0 0	0 0	0 0	0 0	0 1	2 2	3 2
	無	反 射	0 0	0 0	0 1	1 3	3 0	1 1	0 0
			0 0	0 0	0 1	0 2	3 1	1 1	1 0
		吸 音	0 0	0 0	0 2	0 3	2 1	3 0	0 0
			0 0	0 0	0 0	0 1	2 3	2 1	1 0
	反 射	反 射	0 0	0 0	0 1	0 0	2 3	2 0	1 1
			0 0	0 0	0 0	0 0	0 2	2 0	3 3
		吸 音	0 0	0 0	0 0	0 1	0 2	3 1	2 1
			0 0	0 0	0 0	0 1	2 1	2 2	1 1
	吸 音	反 射	0 0	0 0	0 0	0 0	0 1	1 0	4 4
			0 0	0 0	0 0	0 0	3 0	2 4	0 1
		吸 音	0 0	0 0	1 0	0 0	0 1	2 2	2 2
			0 0	0 0	0 0	0 0	0 1	4 2	1 2
合 計			0 0	1 1	4 7	3 9	15 15	23 13	14 15
			0 0	0 0	1 4	7 8	17 23	23 14	12 11

(坑内音源位置)

A	B
C	D

A : 8 kHz $S_L = -25$ cm

B : 8 kHz $S_L = -50$ cm

C : 16 kHz $S_L = -25$ cm

D : 16 kHz $S_L = -50$ cm

付表-4 測定値より得た面音源位置の出現頻度

受音高: $H_M = 0$ (路面上 10.5 cm)

トンネル 形 状	地 面	面 壁	面 音 源 位 置 (cm)						
			0	4	8	12	15	20	30
円 形	無	無	0 0	0 0	0 0	1 2	4 3	0 0	0 0
			0 0	0 0	1 0	2 1	0 2	1 1	1 1
矩 形	無	無	0 1	0 1	2 1	2 2	1 0	0 0	0 0
			1 0	0 0	0 0	1 4	3 1	0 0	0 0
		反 射	0 1	1 1	0 0	2 0	1 3	1 0	0 0
			0 0	0 0	1 1	1 3	1 1	2 0	0 0
		吸 音	1 1	0 0	0 1	0 1	2 2	2 0	0 0
			0 0	0 0	0 2	0 0	1 2	4 1	0 0
半 円 形	無	無	0 0	0 0	4 4	0 0	0 0	1 1	0 0
			0 0	0 0	1 0	3 0	1 4	0 1	0 0
	反 射		0 0	0 0	1 1	2 1	2 2	0 1	0 0
			0 0	0 0	1 2	0 0	2 2	2 1	0 0
	吸 音		0 0	0 1	1 2	2 0	1 1	0 0	1 1
			0 0	0 0	1 0	0 0	2 4	2 1	0 0
	無	反 射	0 0	1 2	2 2	2 1	0 0	0 0	0 0
			0 0	0 0	0 1	3 2	2 2	0 0	0 0
		吸 音	0 0	0 0	1 3	0 2	4 0	0 0	0 0
			0 0	0 0	0 0	2 1	3 3	0 1	0 0
	反 射	反 射	0 0	1 2	2 0	1 0	1 2	0 0	0 0
			0 0	0 0	1 1	0 1	1 1	3 2	0 0
		吸 音	0 0	0 0	1 0	1 1	2 2	1 2	0 0
			0 0	0 0	0 0	1 1	1 1	3 3	0 0
	吸 音	反 射	0 0	0 2	2 2	0 0	2 1	1 0	0 0
			0 0	0 0	0 1	0 0	3 1	2 2	0 1
		吸 音	0 0	0 1	2 2	2 0	1 2	0 0	0 0
			0 0	0 0	0 0	0 0	3 4	2 1	0 0
合 計			1 3	3 10	18 18	15 10	21 18	6 4	1 1
			1 0	0 0	6 6	13 14	23 24	21 18	1 3

(坑内音源位置)

A	B
C	D

A : 8 kHz $S\ell = -25$ cm

B : 8 kHz $S\ell = -50$ cm

C : 16 kHz $S\ell = -25$ cm

D : 16 kHz $S\ell = -50$ cm

付表-5 測定値より得た面音源位置の出現頻度

受音高： $H_M = 10$ (路面上20.5cm)

トンネル 形 状	地 面	面 壁	面 音 源 位 置 (cm)							
			0	4	8	12	15	20	30	
円 形	無	無								
矩 形	無	無	1 0	0 1	0 2	2 0	2 1	0 1	0 0	
			0 0	0 0	2 0	3 1	0 4	0 0	0 0	
		反 射	0 0	1 0	0 0	1 1	3 2	0 1	0 1	
			0 0	0 0	0 0	1 0	2 3	2 1	0 1	
		吸 音	0 0	0 0	0 0	0 0	5 2	0 1	0 2	
			0 0	0 0	0 0	0 1	3 2	1 0	1 2	
半 円 形	無	無	0 0	0 1	1 1	2 1	2 2	0 0	0 0	
			0 0	0 0	2 3	2 1	1 1	0 0	0 0	
	反 射		0 0	0 0	0 0	1 0	3 1	1 4	0 0	
			0 0	0 0	0 0	0 1	3 3	2 1	0 0	
	吸 音		0 0	0 0	0 0	2 0	1 3	2 2	0 0	
			0 0	0 0	0 0	1 1	1 3	3 1	0 0	
	無	反 射	0 0	1 1	0 2	0 0	4 1	0 1	0 0	
			0 0	0 0	1 1	0 1	4 2	0 1	0 0	
		吸 音	0 0	1 0	0 4	0 0	2 1	2 1	0 0	
			0 0	0 0	0 1	1 1	2 2	2 1	0 0	
	反 射	反 射	0 0	1 0	0 1	2 4	2 0	0 0	0 0	
			0 0	0 0	1 1	1 1	2 3	1 0	0 0	
		吸 音	0 0	0 0	1 0	0 1	3 2	1 2	0 0	
			0 0	0 0	0 0	1 1	2 3	2 1	0 0	
	吸 音	反 射	0 0	1 1	0 0	1 1	2 1	1 2	0 0	
			0 0	0 0	0 0	1 1	1 3	2 1	1 0	
		吸 音	0 0	0 0	0 1	1 0	3 2	1 2	0 1	
			0 0	0 0	0 0	0 1	2 4	2 1	0 0	
合 計			1 0	5 4	2 10	12 8	32 18	8 16	0 4	
			0 0	0 0	6 6	11 11	23 33	18 7	2 3	

(坑内音源位置)

A	B
C	D

A : 8 kHz $SZ = -25\text{cm}$

B : 8 kHz $SZ = -50\text{cm}$

C : 16 kHz $SZ = -25\text{cm}$

D : 16 kHz $SZ = -50\text{cm}$

付表-6 測定値より得た面音源位置の出現頻度

受音高; $H_M = 20$ (路面上 30.5 cm)

受音筒， $r_M = 20$ (路面上3.05 cm)

トンネル 形 状	地 面	面 壁	面 音 源 位 置 (cm)						
			0	4	8	12	15	20	30
円 形	無	無							
矩 形	無	無	0 0	0 0	1 0	2 0	2 2	0 2	0 1
			0 0	0 0	1 0	2 0	2 2	0 2	0 1
		反 射	0 0	1 0	2 0	0 0	2 2	0 2	0 1
			0 0	0 0	0 0	1 0	3 2	1 3	0 0
		吸 音	0 0	0 0	1 0	1 0	3 1	0 2	0 2
			0 0	0 0	1 0	1 0	2 3	1 1	0 1
半 円 形	無	無	0 0	0 0	0 0	3 3	2 2	0 0	0 0
			0 0	0 0	2 1	3 2	0 2	0 0	0 0
	反 射		0 0	0 0	1 2	1 1	3 1	0 0	0 1
			0 0	0 0	0 0	1 2	4 3	0 0	0 0
	吸 音		0 0	0 0	2 1	0 1	2 2	1 1	0 0
			0 0	0 0	0 0	2 0	2 4	1 1	0 0
	無	反 射	0 0	3 1	0 1	1 0	1 3	0 0	0 0
			0 0	1 0	1 1	0 1	3 3	0 0	0 0
		吸 音	0 0	0 0	3 1	1 0	1 3	0 1	0 0
			0 0	0 0	0 0	4 3	1 1	0 1	0 0
	反 射	反 射	0 0	0 1	2 1	2 0	1 2	0 0	0 1
			0 0	0 0	0 1	2 2	3 2	0 0	0 0
		吸 音	0 0	0 0	0 0	1 2	3 1	1 1	0 1
			0 0	0 0	0 0	0 1	3 3	2 0	0 1
	吸 音	反 射	0 0	1 0	1 2	1 0	2 0	0 2	0 1
			0 0	0 0	0 0	2 2	2 2	1 1	0 0
		吸 音	0 0	0 0	0 2	2 0	3 1	0 2	0 0
			0 0	0 0	0 0	1 2	3 3	1 0	0 0
合 計			0 0	5 2	13 10	15 7	25 20	2 13	0 8
			0 0	1 0	5 3	19 15	28 30	7 9	0 3

(坑内音源位置)

A	B
C	D

A: 8 kHz $S_L = -25$ cm

B: 8 kHz $S_L = -50$ cm

C: 16 kHz $S_L = -25$ cm

D: 16 kHz $S_L = -50$ cm

付表-7 測定値より得た面音源位置の出現頻度

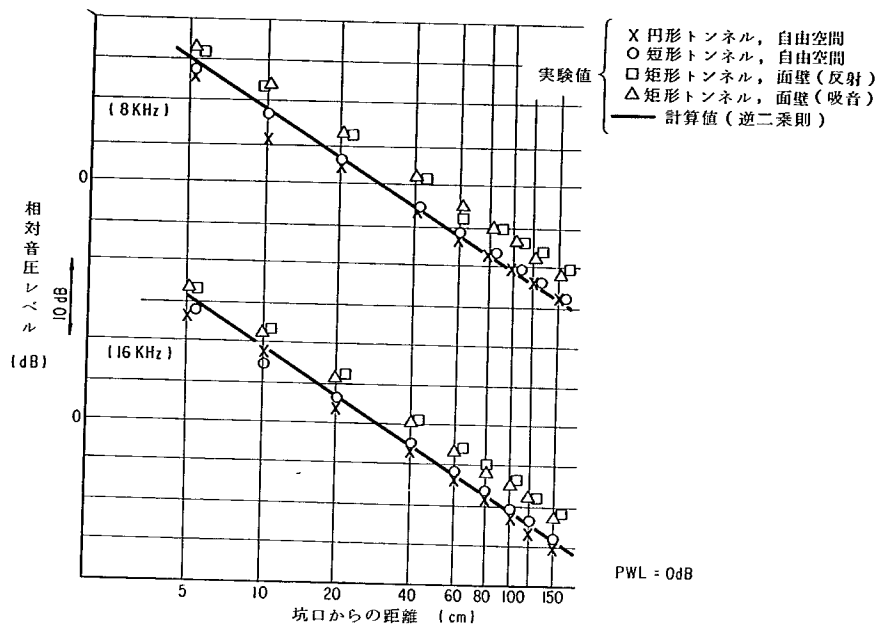
受音高: $H_M = 30$ (路面上 40.5 cm)

トンネル 形 状	地 面	面 壁	面 音 源 位 置 (cm)						
			0	4	8	12	15	20	30
円 形	無	無							
矩 形	無	無	0 0	2 0	2 1	0 1	1 1	0 1	0 1
			0 0	1 1	1 0	1 0	2 1	0 3	0 0
		反 射	1 0	1 1	2 0	0 0	1 3	0 0	0 1
			0 0	1 0	0 0	0 0	3 4	1 1	0 0
		吸 音	1 0	0 0	1 1	2 0	0 1	1 2	0 1
			0 0	0 0	1 0	1 1	1 4	2 0	0 0
半 円 形	無	無	0 0	1 0	3 2	1 0	0 3	0 0	0 0
			0 0	1 0	4 1	0 1	0 3	0 0	0 0
	反 射		0 0	0 0	1 2	3 2	1 1	0 0	0 0
			0 0	0 0	1 1	3 3	1 1	0 0	0 0
	吸 音		0 0	0 0	2 2	2 3	1 0	0 0	0 0
			0 0	0 0	1 0	2 3	2 2	0 0	0 0
	無	反 射	1 0	2 1	1 1	0 1	0 1	1 0	0 0
			0 0	1 0	3 2	0 2	1 1	0 0	0 1
		吸 音	1 0	1 0	3 2	0 0	0 3	0 0	0 0
			0 0	0 0	2 1	2 2	1 1	0 0	0 1
	反 射	反 射	0 0	0 1	1 1	3 1	0 2	1 0	0 0
			0 0	0 1	1 0	1 1	3 3	0 0	0 0
		吸 音	0 0	0 0	0 1	4 1	1 3	0 0	0 0
			0 0	0 0	2 1	2 0	3 1	0 0	0 1
	吸 音	反 射	0 0	1 1	2 2	1 0	1 2	0 0	0 0
			0 0	1 0	1 2	3 2	0 0	0 0	0 1
		吸 音	0 0	0 0	1 2	2 0	3 3	0 0	0 0
			0 0	0 0	0 1	3 3	1 1	1 0	0 0
合 計			4 0	8 4	18 17	18 9	9 23	3 3	0 3
			0 0	5 2	17 9	18 18	18 22	4 4	0 4

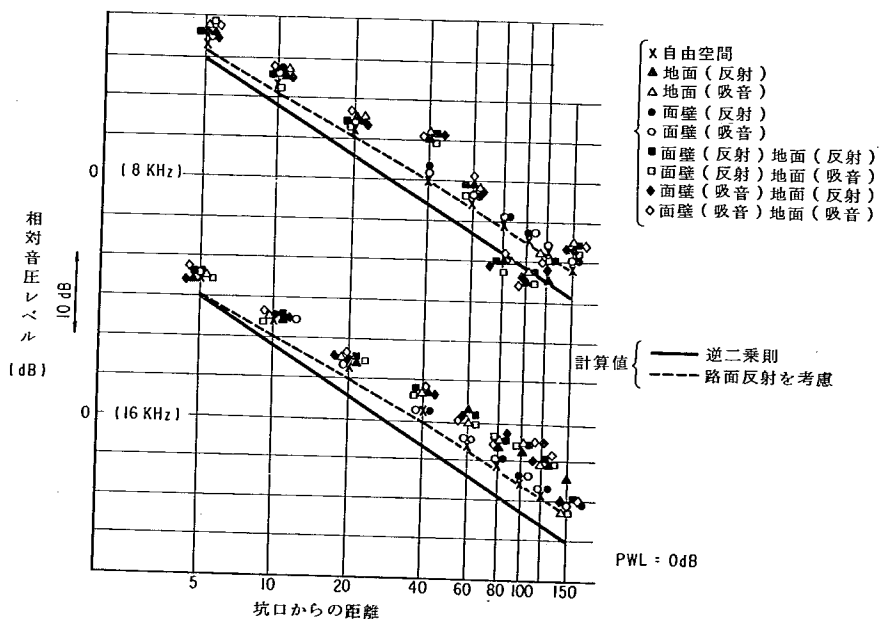
(坑内音源位置)

A	B
C	D

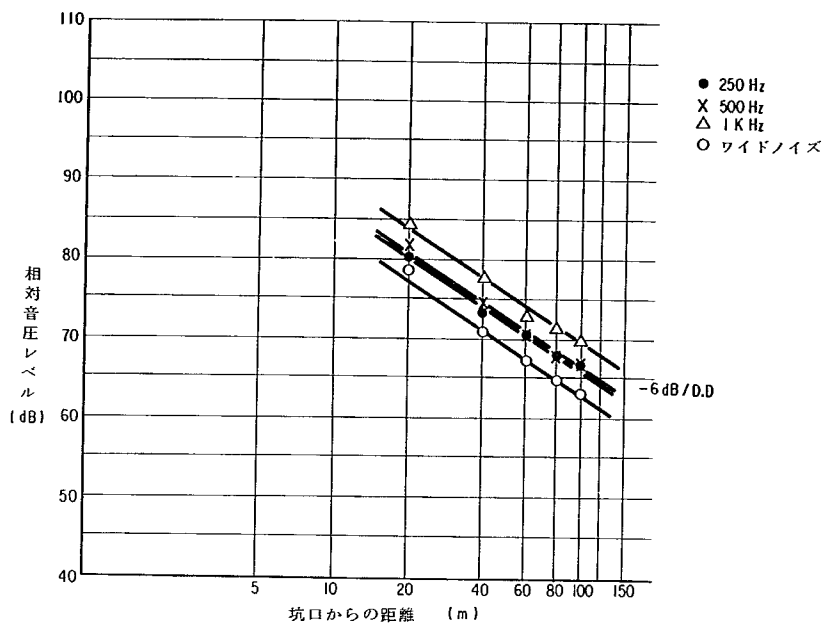
A: 8 kHz $S_L = -25\text{cm}$ B: 8 kHz $S_L = -50\text{cm}$ C: 16 kHz $S_L = -25\text{cm}$ D: 16 kHz $S_L = -50\text{cm}$



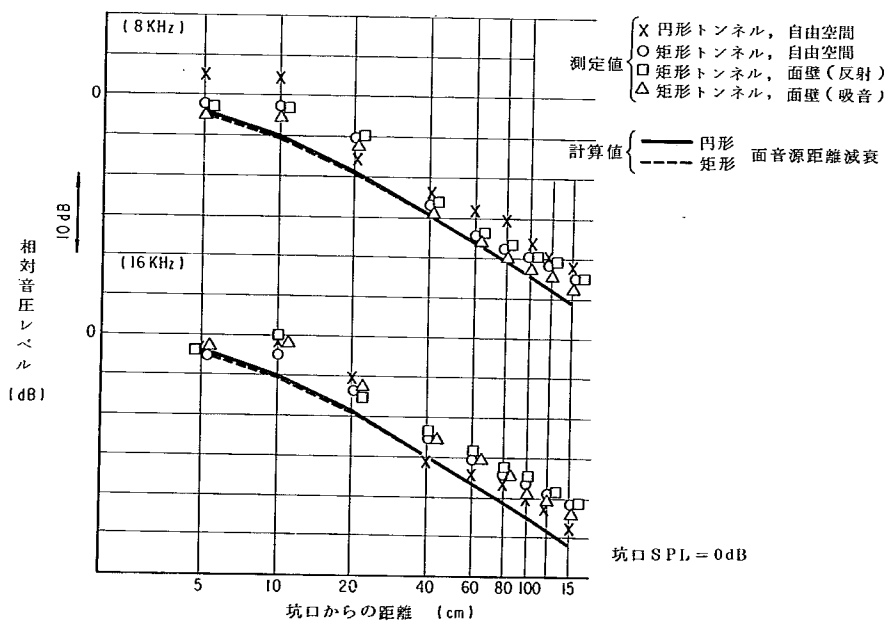
付図-1 トンネル坑口よりの距離減衰（模型実験結果），音源が坑口にある場合，円形および矩形トンネル



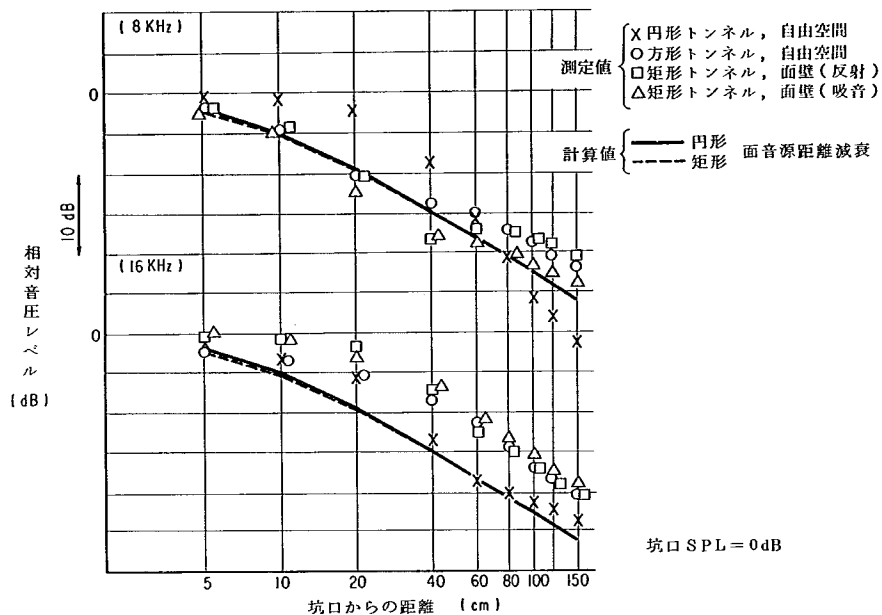
付図-2 トンネル坑口よりの距離減衰（模型実験結果），音源が坑口にある場合，半円形トンネル



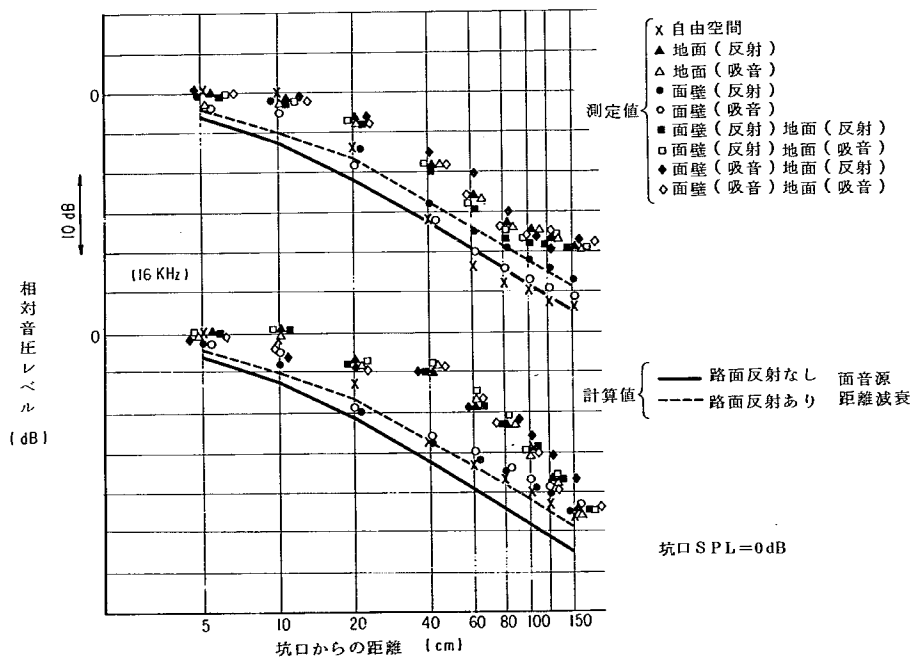
付図-3 トンネル坑口よりの距離減衰（実大トンネル実験結果），音源が坑口にある場合



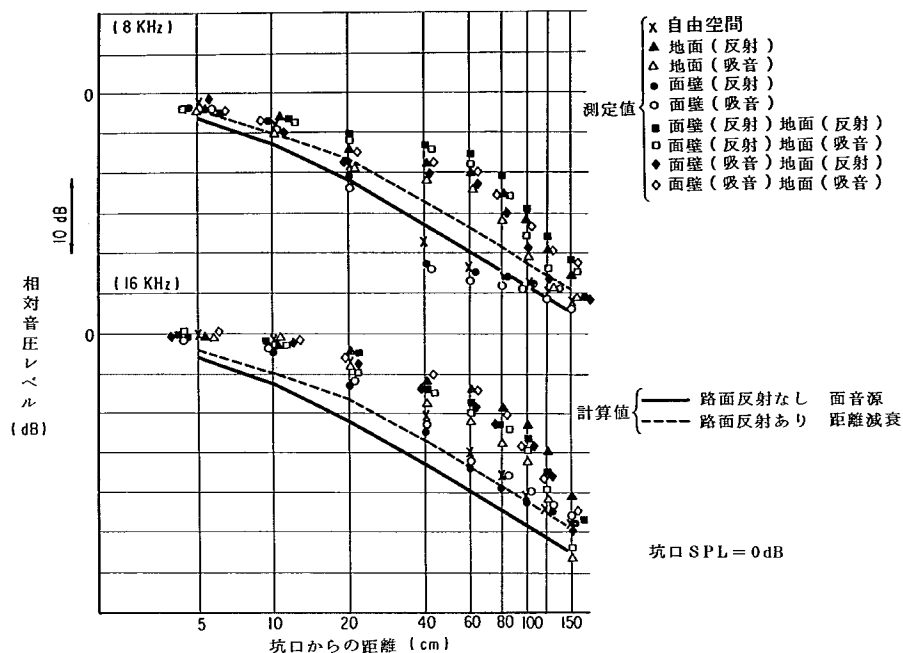
付図-4 トンネル坑口よりの距離減衰（模型実験結果），音源位置：坑内 2.5 cm，円形および矩形トンネル



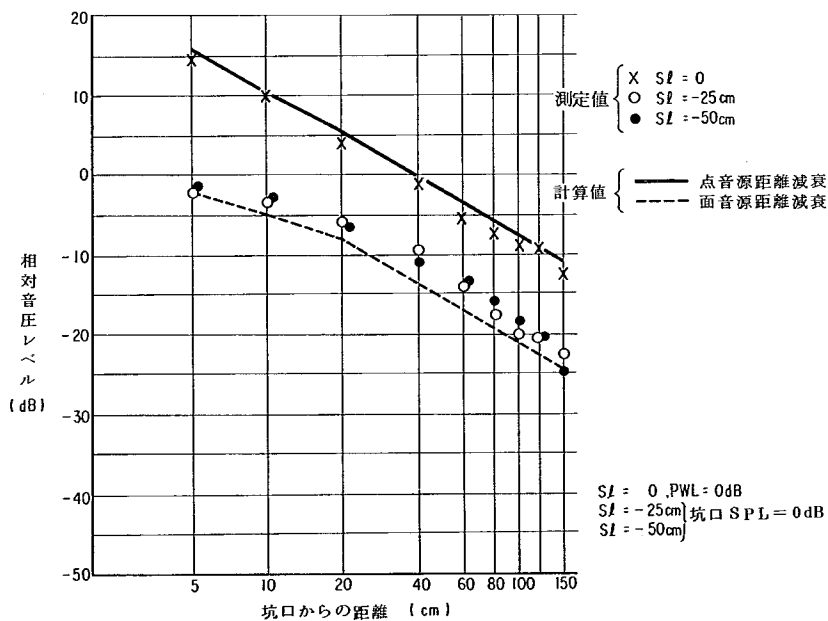
付図-5 トンネル坑口よりの距離減衰（模型実験結果），音源位置：
坑内 50 cm，円形および矩形トンネル



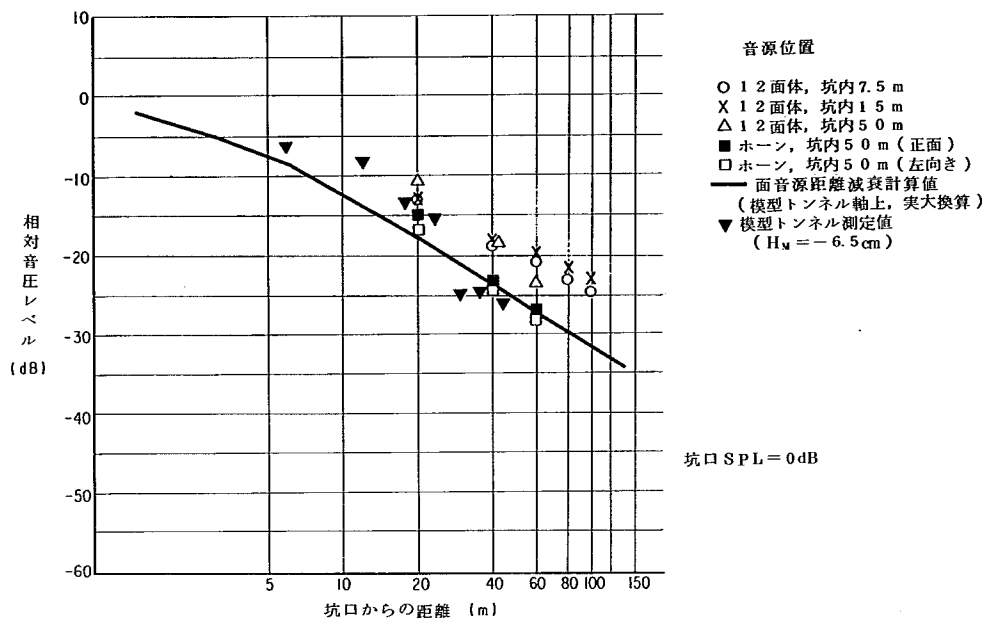
付図-6 トンネル坑口よりの距離減衰（模型実験結果），音源位置：
坑内 25 cm，半円形トンネル



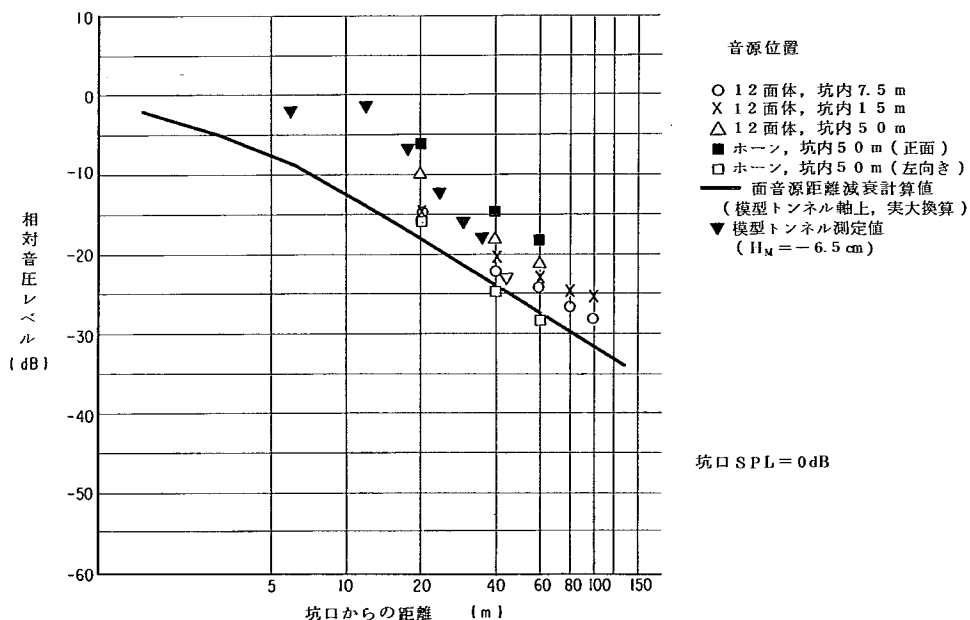
付図-7 トンネル坑口よりの距離減衰（模型実験結果），音源位置：坑内50cm，半円形トンネル



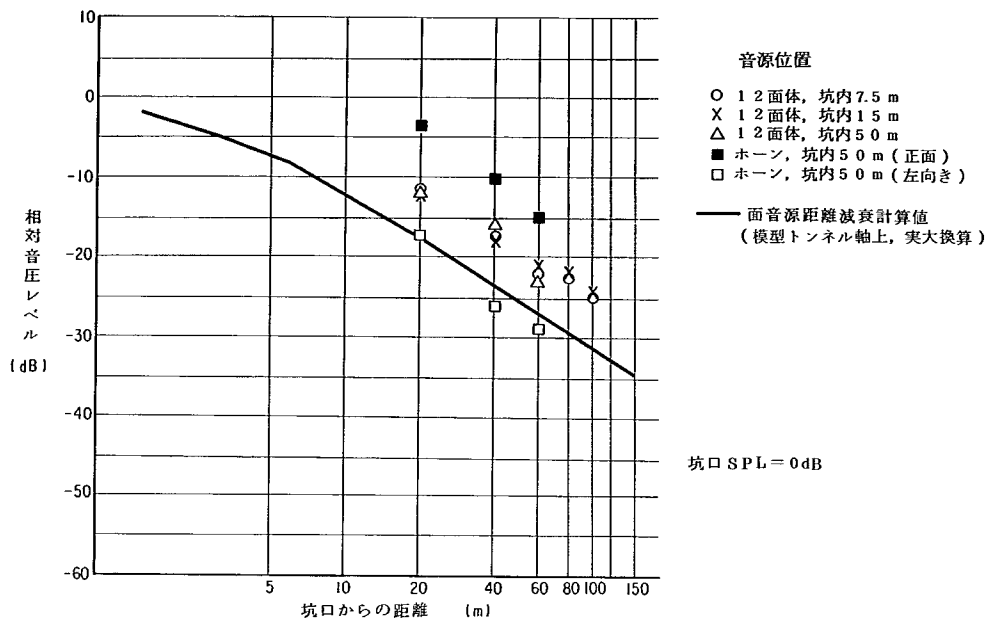
付図-8 トンネル坑口よりの距離減衰（模型実験結果），半円形トンネル，ワイルドノイズ，地面（吸音），面壁（反射）有



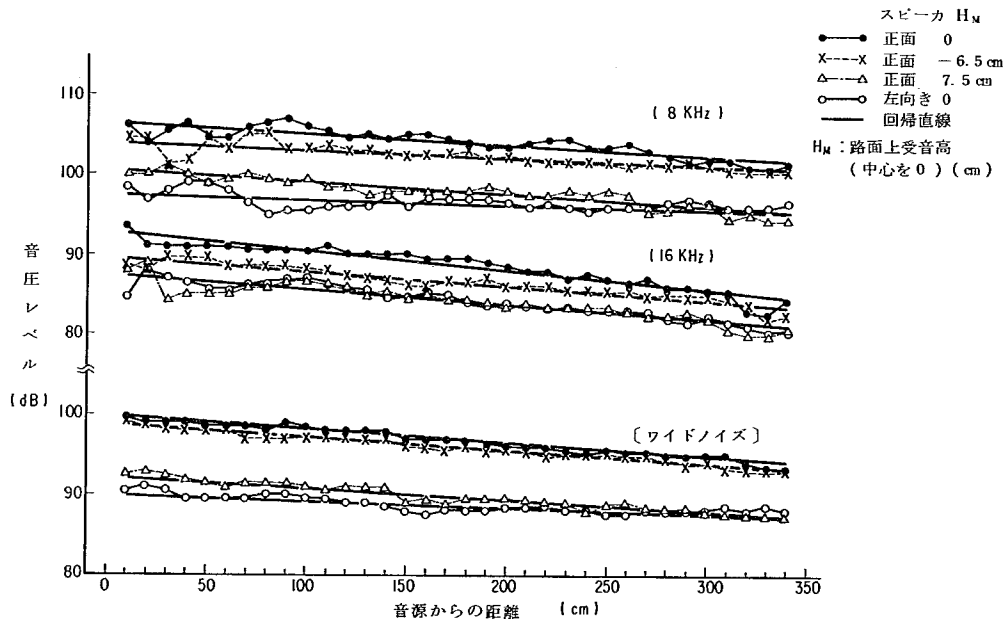
付図-9 トンネル坑口よりの距離減衰 (実大トンネル実験結果), 250 Hz



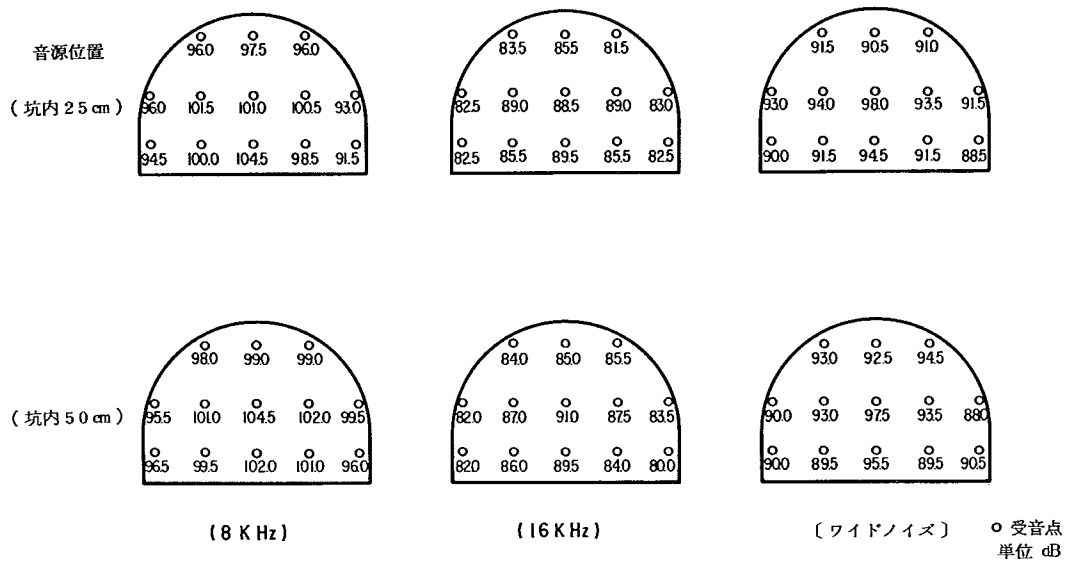
付図-10 トンネル坑口よりの距離減衰 (実大トンネル実験結果), 500 Hz



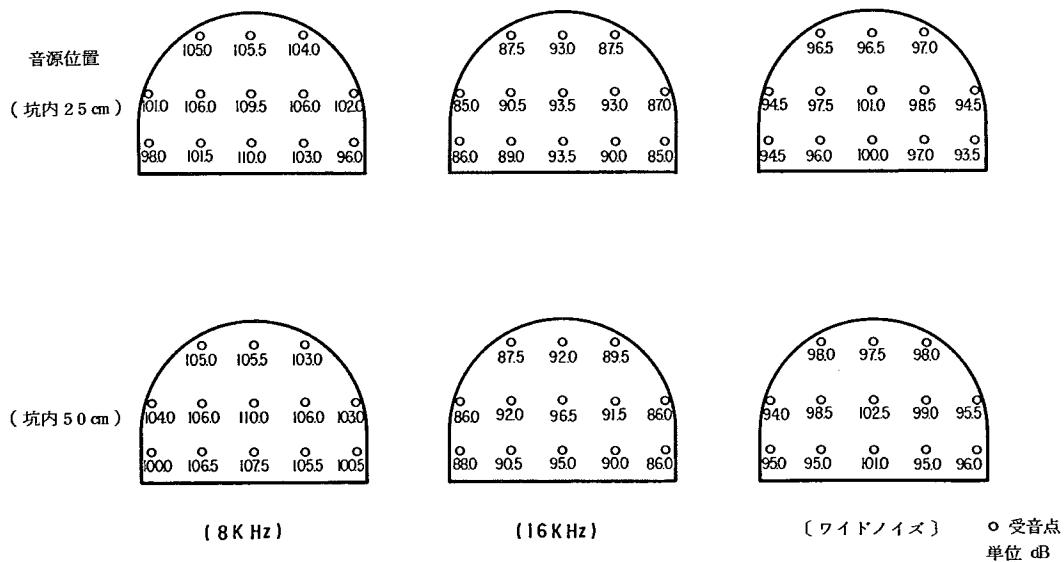
付図-11 トンネル坑口よりの距離減衰 (実大トンネル実験結果) 1 kHz



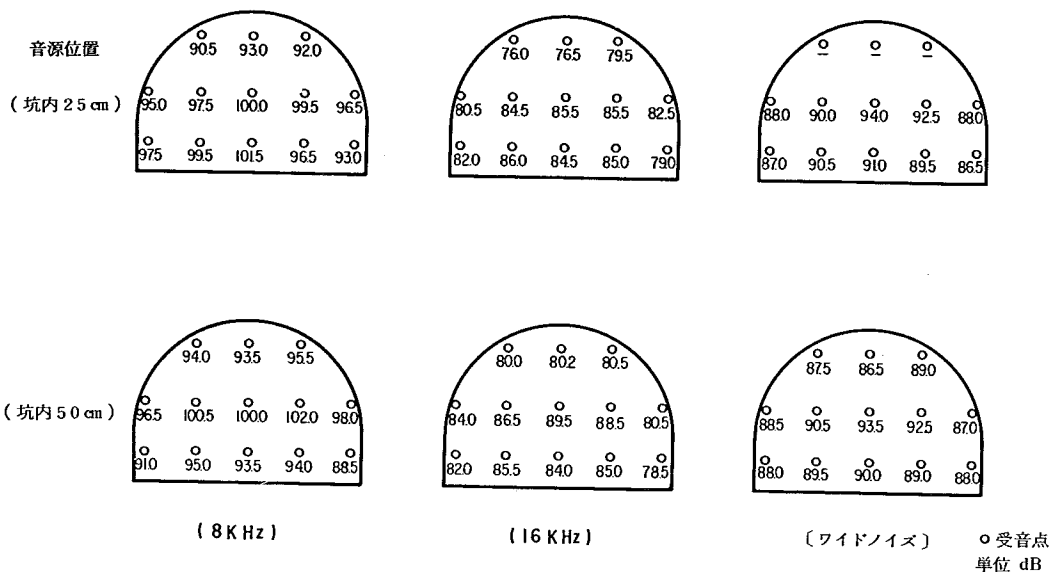
付図-12 トンネル内距離減衰 (模型実験結果)



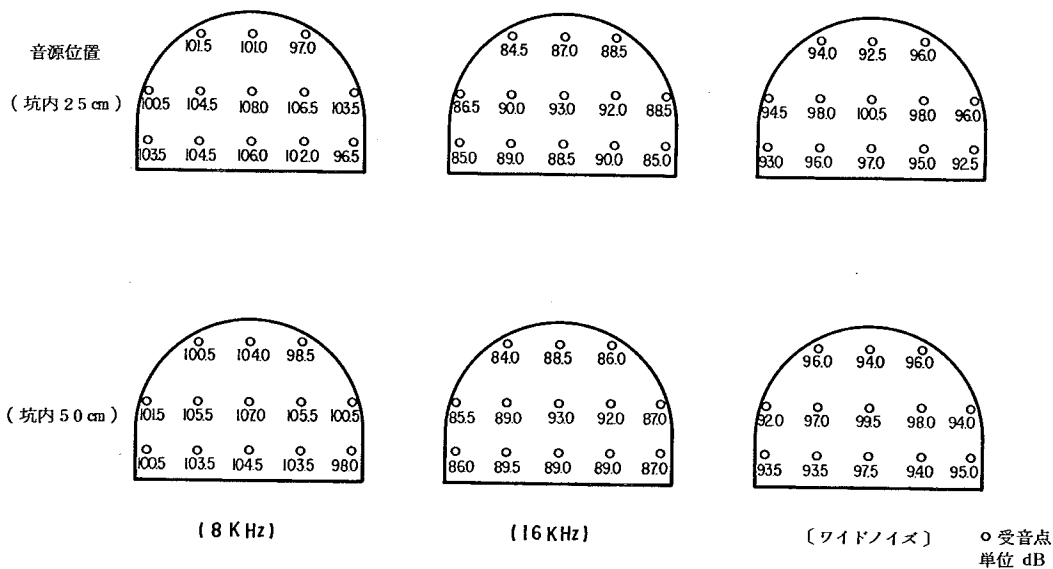
付図-13 トンネル坑口面音圧分布 (模型実験結果)
(スピーカ向き; 正面, 地面がない場合)



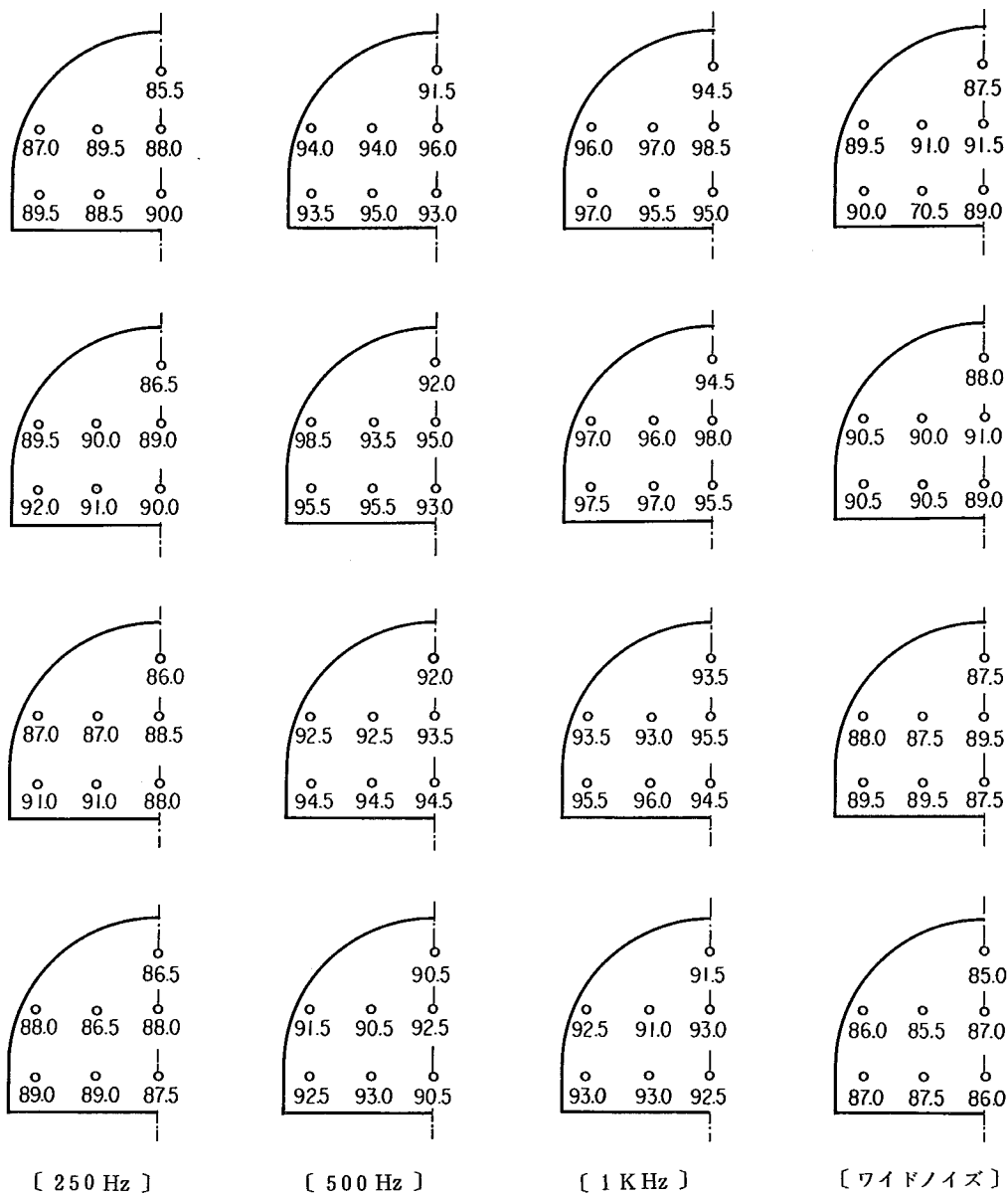
付図-14 トンネル坑口面音圧分布 (模型実験結果)
(スピーカ向き; 正面, 地面がある場合)



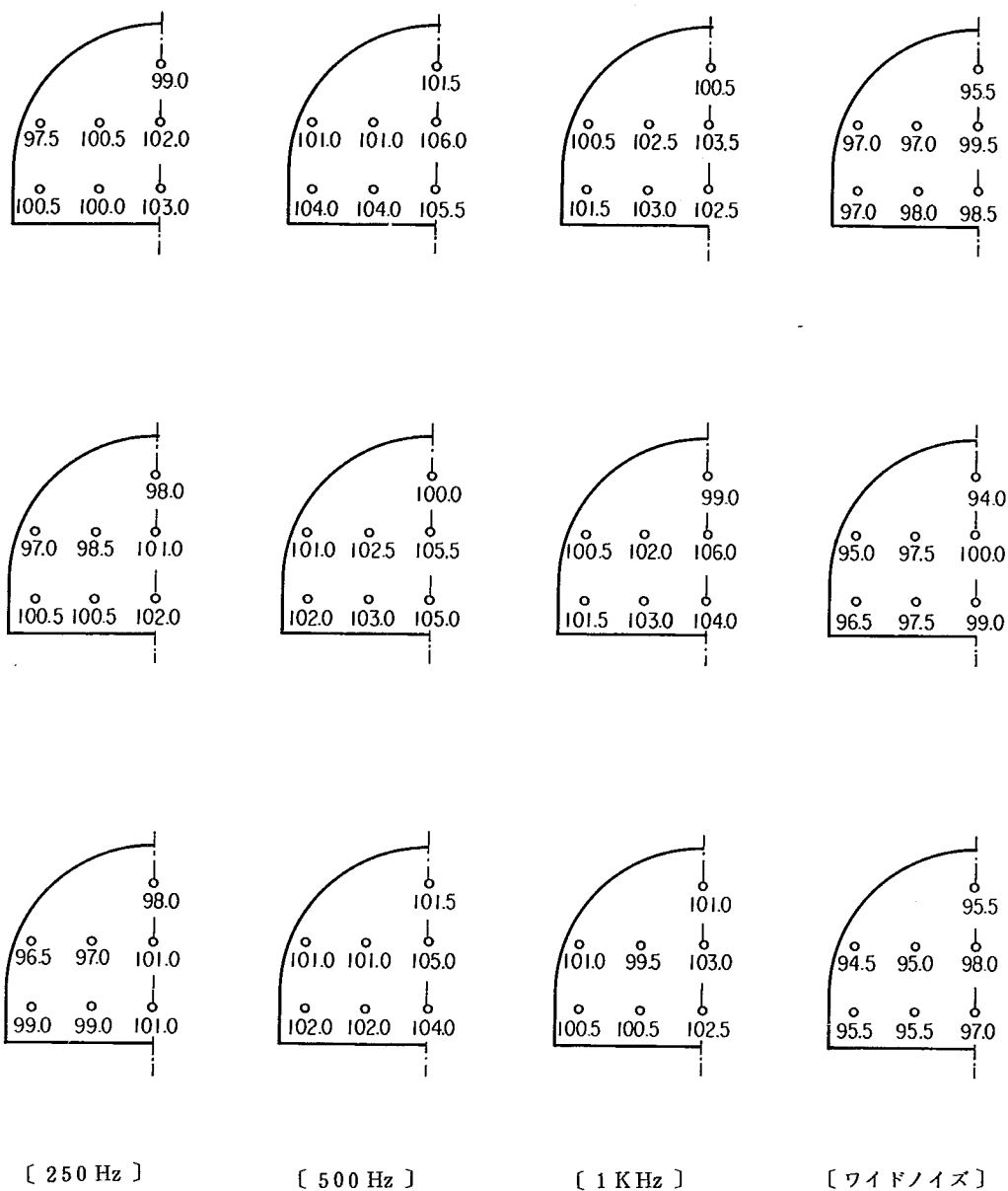
付図- 15 トンネル坑口面音圧分布 (模型実験結果)
(スピーカ向き; 左向き, 地面がない場合)



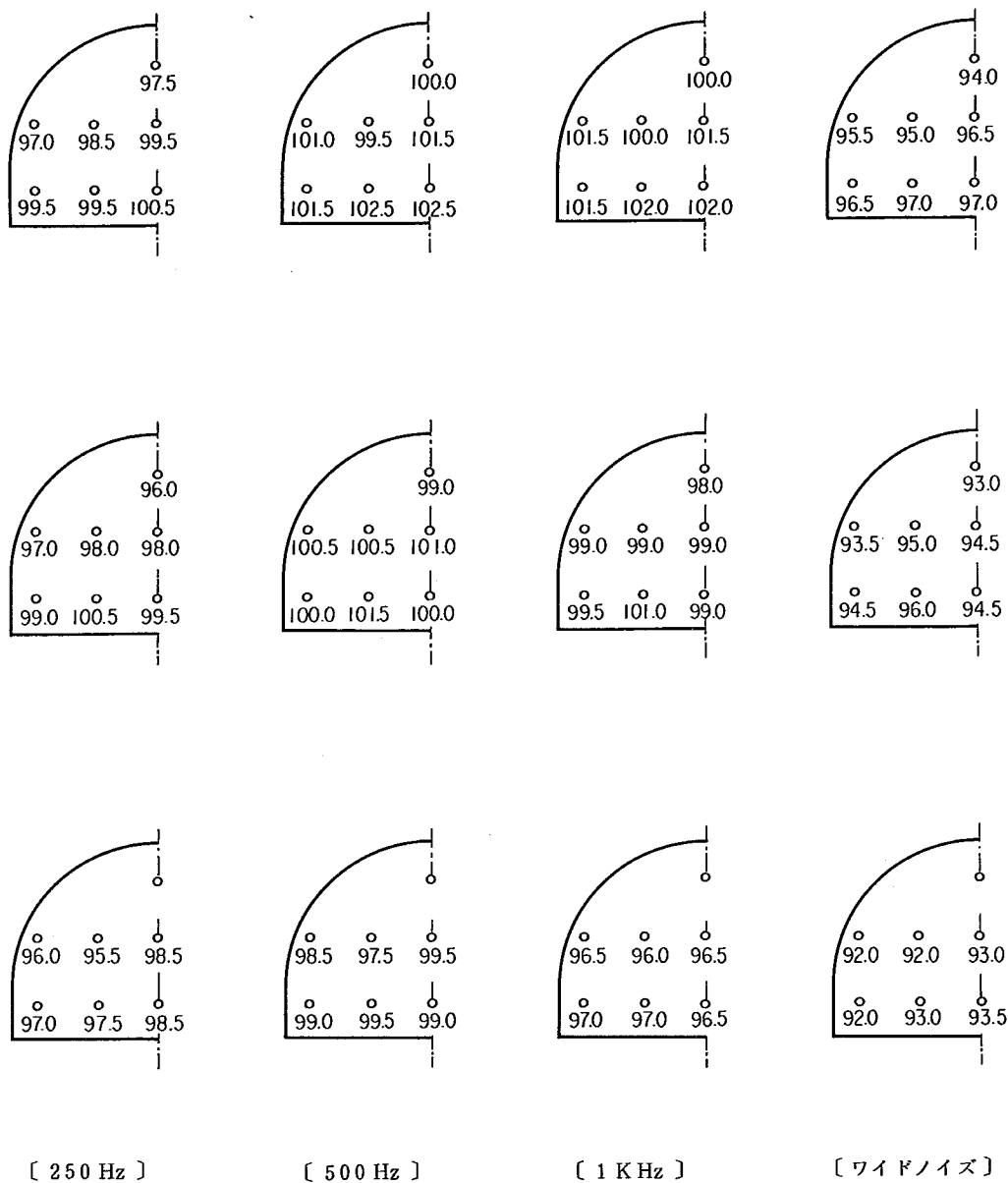
付図- 16 トンネル坑口面音圧分布 (模型実験結果)
(スピーカ向き; 左向き, 地面がある場合)



付図-17 トンネル坑口面音圧分布（実大トンネル実験結果）
（音源；12面体スピーカ）

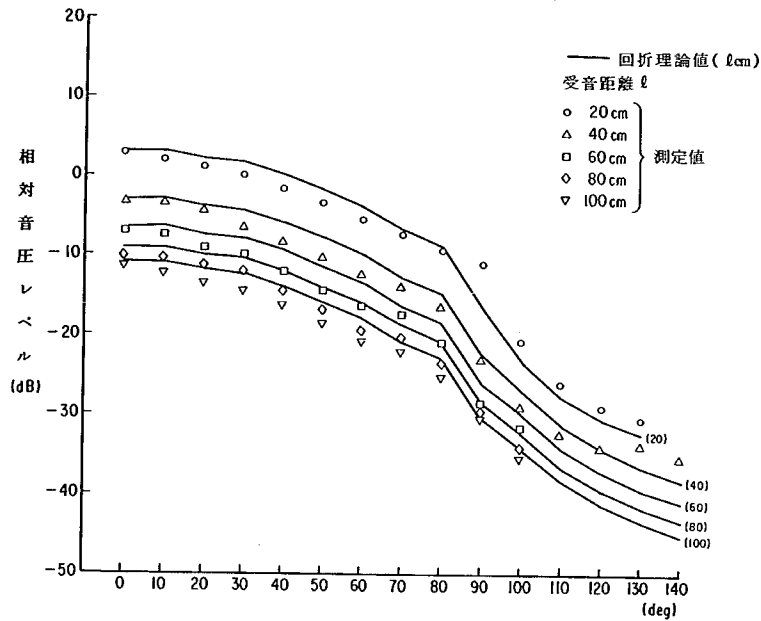


付図-18 トンネル坑口面音圧分布 (実大トンネル実験結果)
(音源; ホーンスピーカ正面)

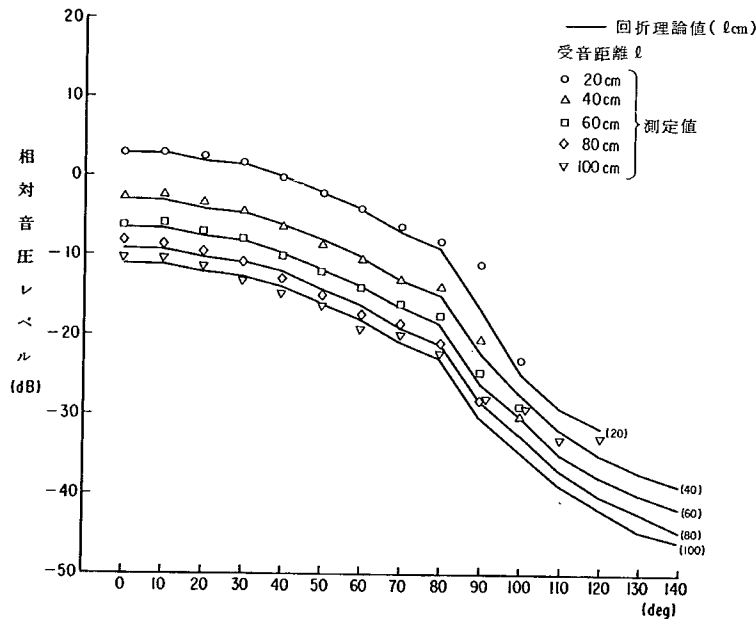


上段 坑内 15 m
音源位置 中段 坑内 50 m 単位 dB
下段 坑内 120 m

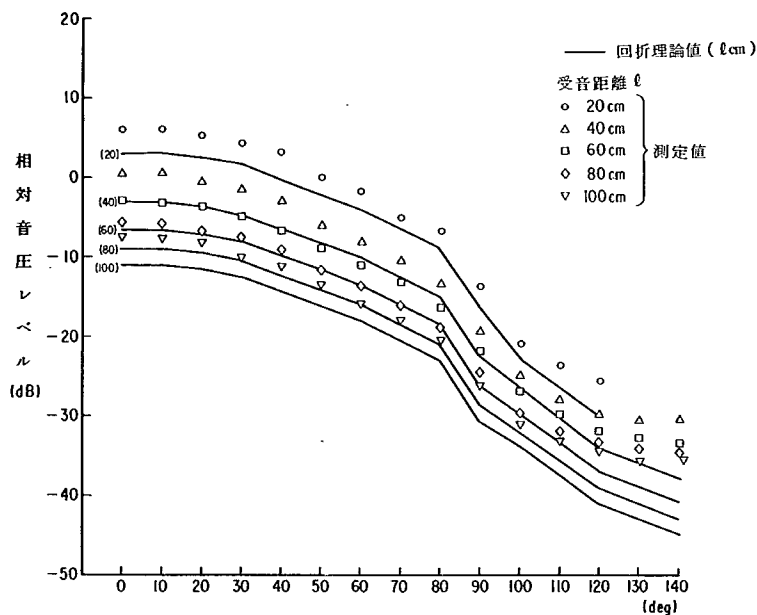
付図-19 トンネル坑口面音圧分布（実大トンネル実験結果）
（音源；ホーンスピーカ左向き）



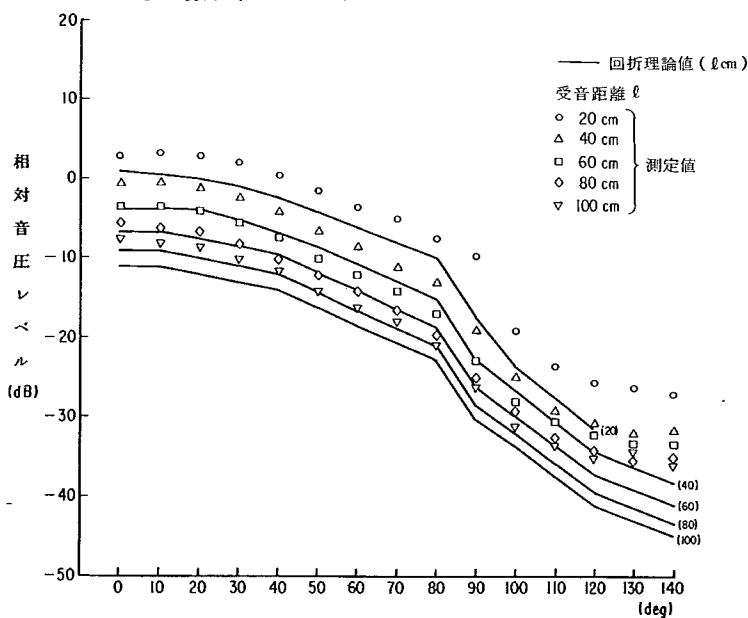
付図-20 円形トンネル坑口の放射性状，模型実験結果，音源が坑口にある場合，
受音高；断面中央高さの $\frac{1}{2}$ ， $H_M = 0$ ，坑口が自由空間にある場合（16 kHz）



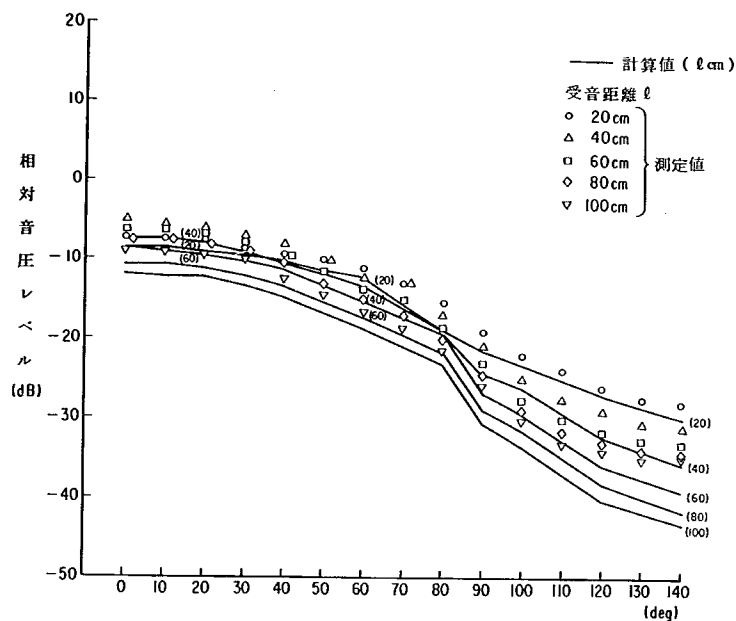
付図-21 矩形トンネル坑口の放射性状，模型実験結果，音源が坑口にある場合，
受音高；断面中央高さの $\frac{1}{2}$ ， $H_M = 0$ （路面上10.5cm），坑口が自由空間にある場合（16 kHz）



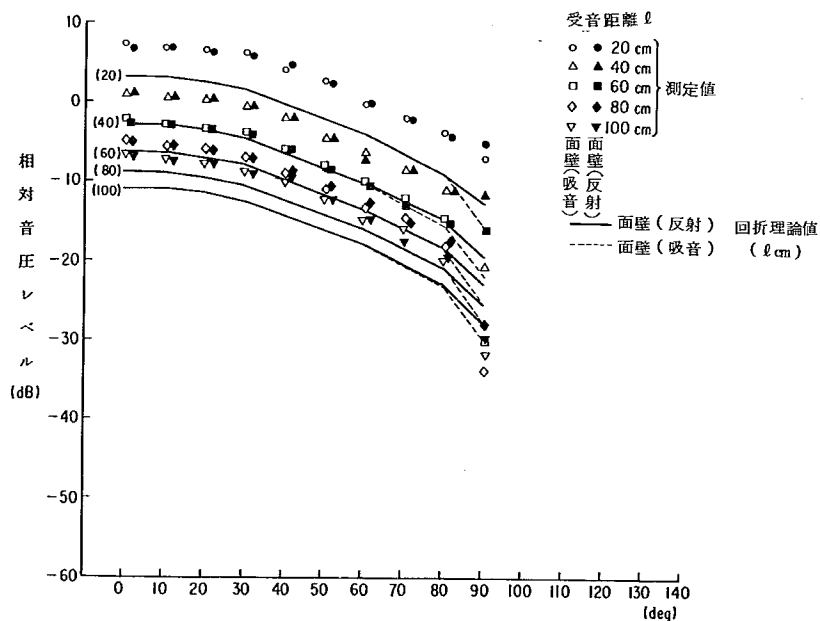
付図-2.2 半円形トンネル坑口の放射性状, 模型実験結果, 音源が坑口にある場合, 受音高; 断面中央高さの $\frac{1}{2}$, $H_M = 0$ (路面上10.5cm), 坑口が自由空間にある場合 (16 kHz)



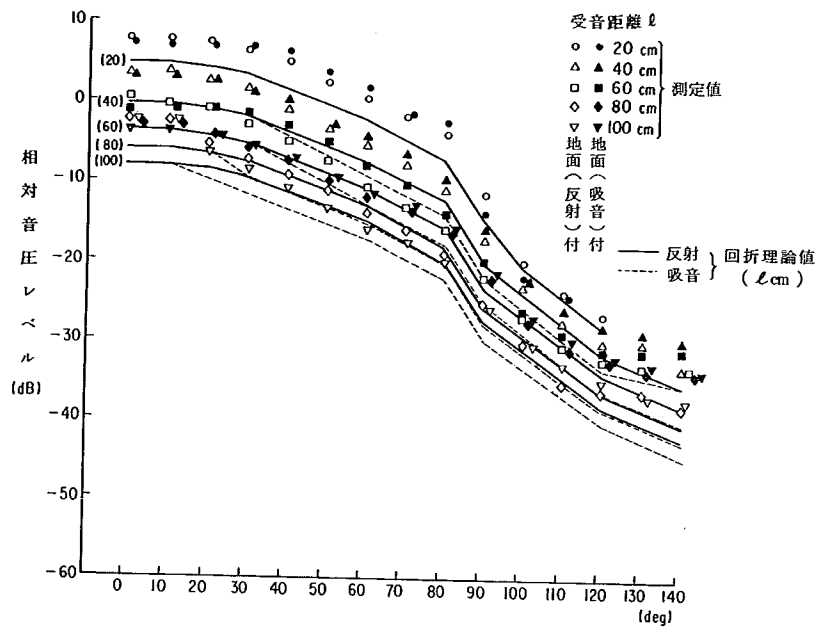
付図-2.3 半円形トンネル坑口の放射性状; 模型実験結果, 音源が坑口にある場合, 受音高; $H_M = -10$ cm (路面上0.5cm), 坑口が自由空間にある場合 (16 kHz)



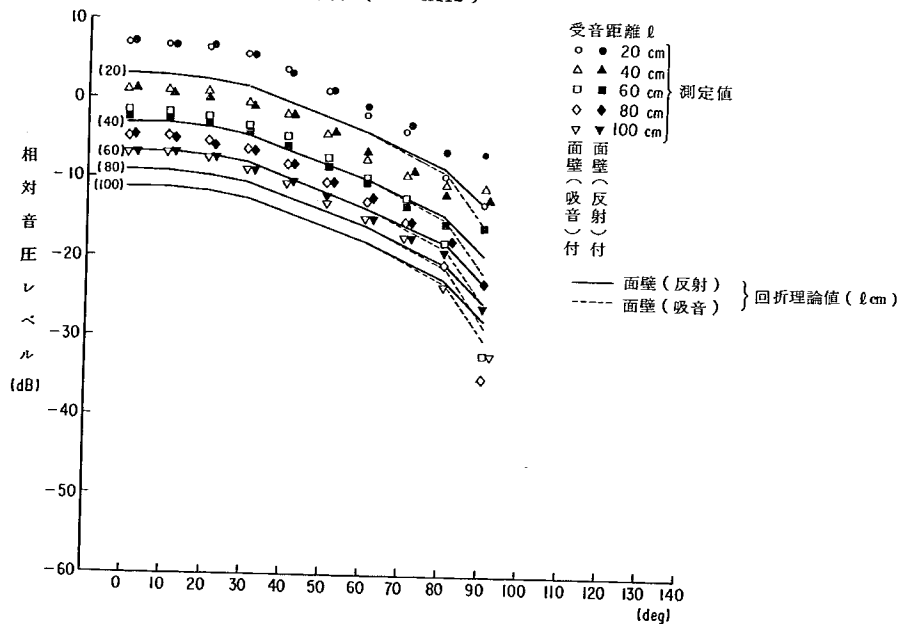
付図-24 半円形トンネル坑口の放射性状, 模型実験結果, 音源が坑口にある場合, 受音高; $H_M = 30$ cm (路面上 40.5 cm), 坑口が自由空間にある場合 (16 kHz)



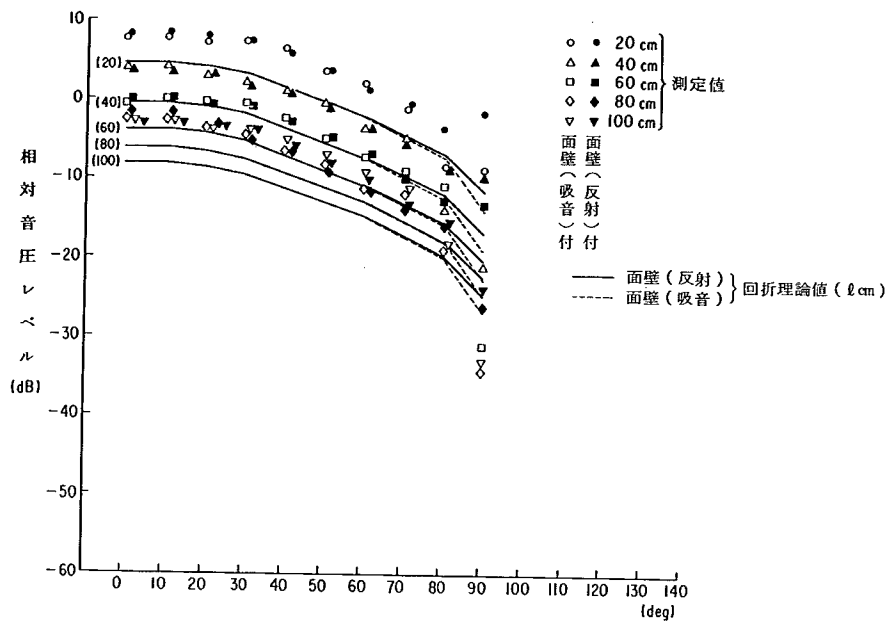
付図-25 矩形トンネル坑口の放射性状, 模型実験結果, 音源が坑口にある場合, 受音高; 断面高さの $\frac{1}{2}$, $H_M = 0$, 坑口に面壁(反射または吸音)がある場合 (16 kHz)



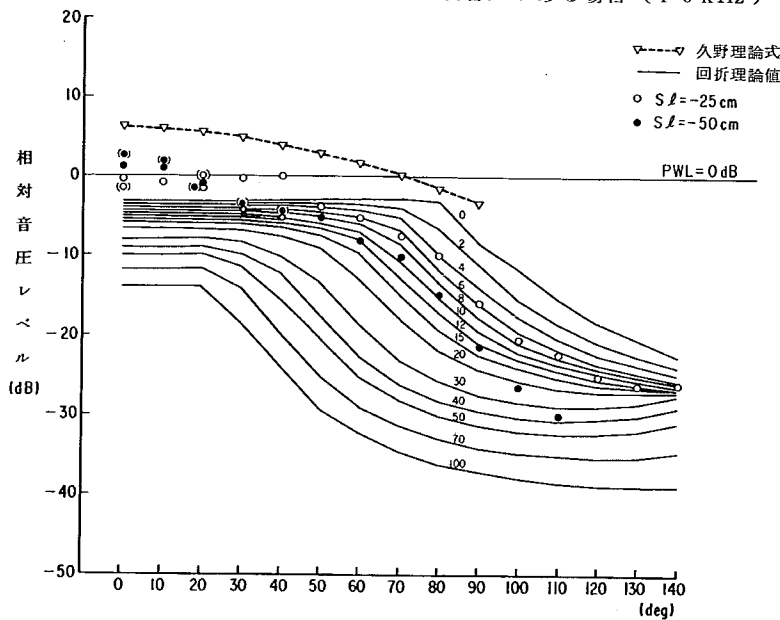
付図-26 半円形トンネル坑口の放射性状, 模型実験結果, 音源が坑口にある場合, 受音高; 断面中央高さの $\frac{1}{2}$, $H_M = 0$ (路面上 1 0.5 cm), 地面 (反射または吸音) がある場合 (1 6 kHz)



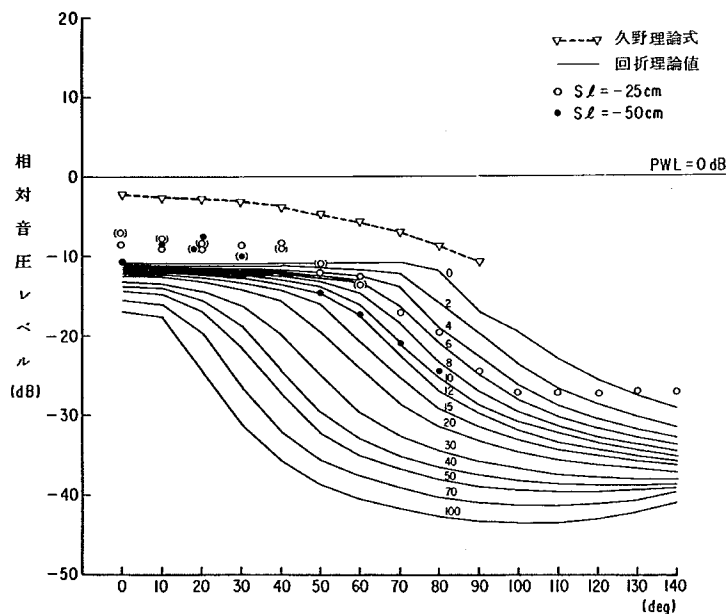
付図-27 半円形トンネル坑口の放射性状, 模型実験結果, 音源が坑口にある場合, 受音高; 断面中央高さの $\frac{1}{2}$, $H_M = 0$ (路面上より 1 0.5 cm), 坑口に面壁 (反射または吸音) がある場合 (1 6 kHz)



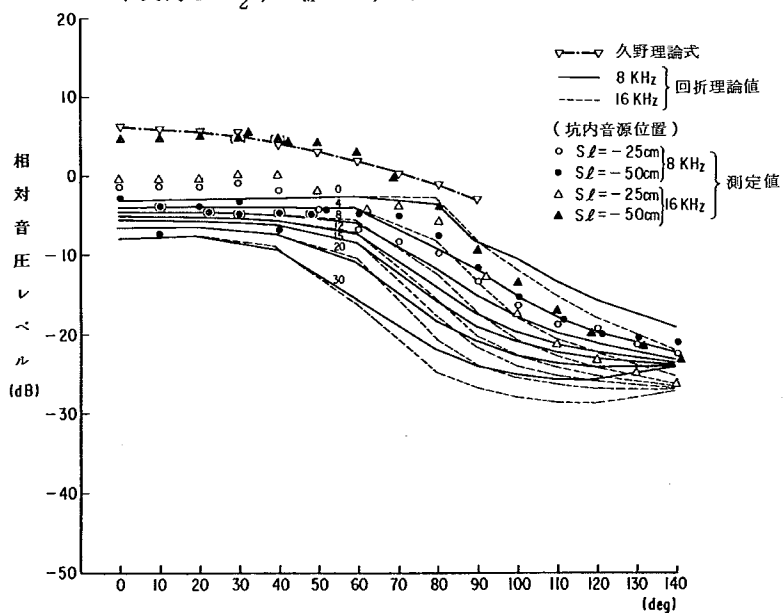
付図-28 半円形トンネル坑口の放射性状, 模型実験結果, 音源が坑口にある場合, 受音高; 断面中央高さの $\frac{1}{2}$, $H_M = 0$ (路面上より10.5 cm), 地面 (反射) があり, 面壁 (反射または吸音) がある場合 (16 kHz)



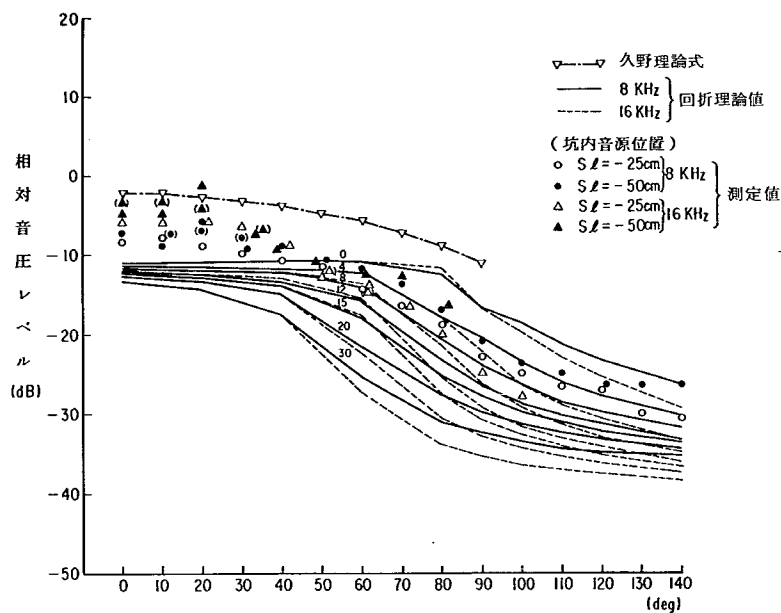
付図-29 円形トンネル坑口の放射性状, 模型実験結果, 音源が坑内にある場合, 坑口が自由空間にある場合, 受音距離 $l = 40$ cm, 受音高; 断面中央高さの $\frac{1}{2}$, $H_M = 0$, (16 kHz)



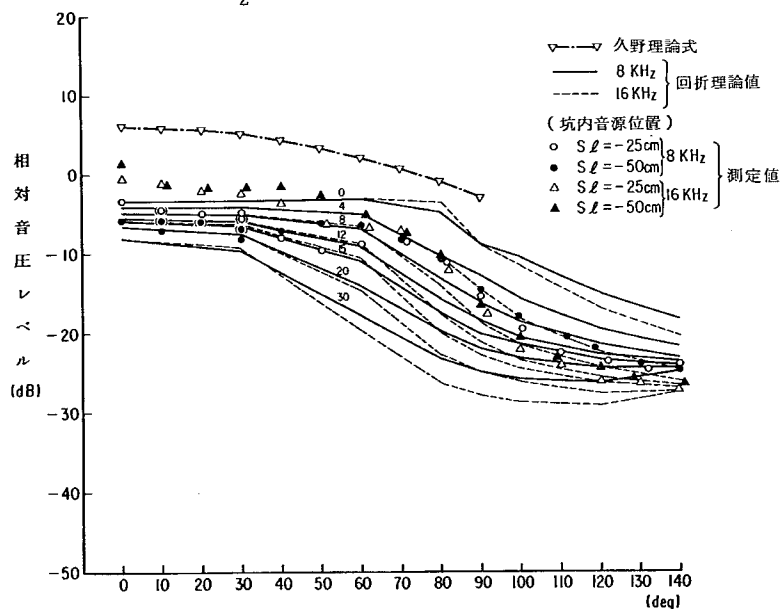
付図-30 円形トンネル坑口の放射性状，模型実験結果，音源が坑内にある場合，坑口が自由空間にある場合，受音距離； $l = 100$ cm，受音高；断面中央高さの $\frac{1}{2}$ ， $H_M = 0$ ，(16 kHz)



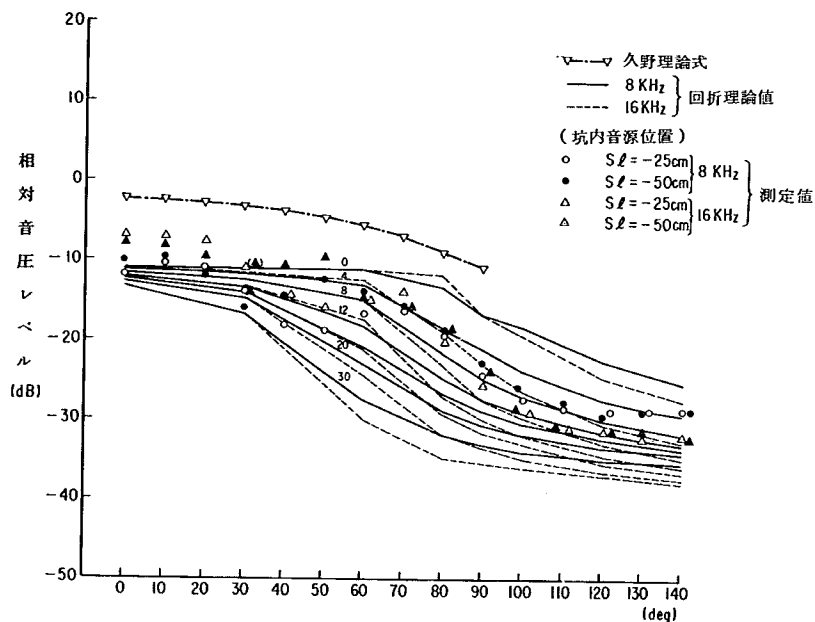
付図-31 矩形トンネル坑口の放射性状，模型実験結果，音源が坑内にある場合，坑口が自由空間にある場合，受音距離； $l = 40$ cm，受音高；断面中央高さの $\frac{1}{2}$ ， $H_M = 0$



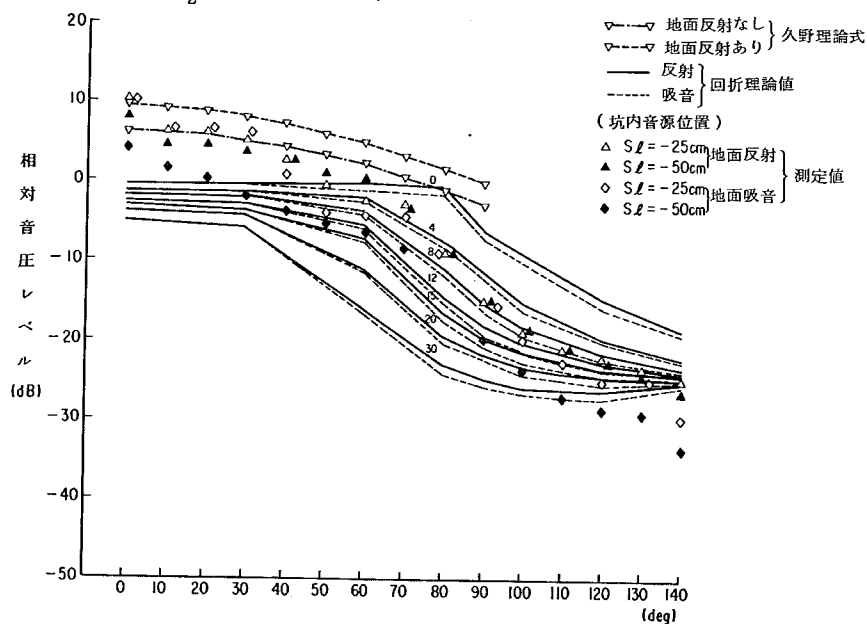
付図-3 2 矩形トンネル坑口の放射性状, 模型実験結果, 音源が坑内にある場合, 坑口が自由空間にある場合, 受音距離; $l = 100\text{ cm}$, 受音高; 断面中央高さの $\frac{1}{2}$, $H_M = 0$



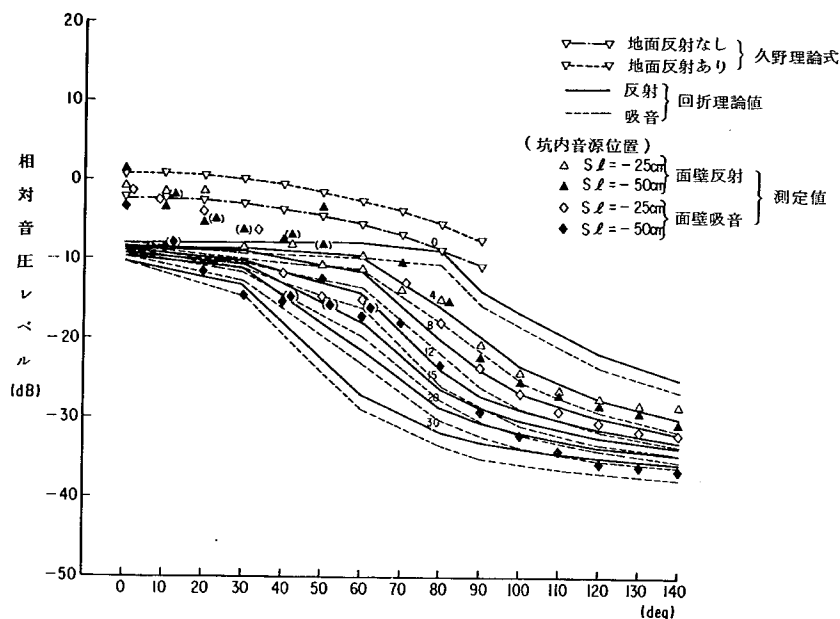
付図-3 3 半円形トンネル坑口の放射性状, 模型実験結果, 音源が坑内にある場合, 坑口が自由空間にある場合, 受音距離; $l = 40\text{ cm}$, 受音高; 断面中央高さの $\frac{1}{2}$, $H_M = 0$



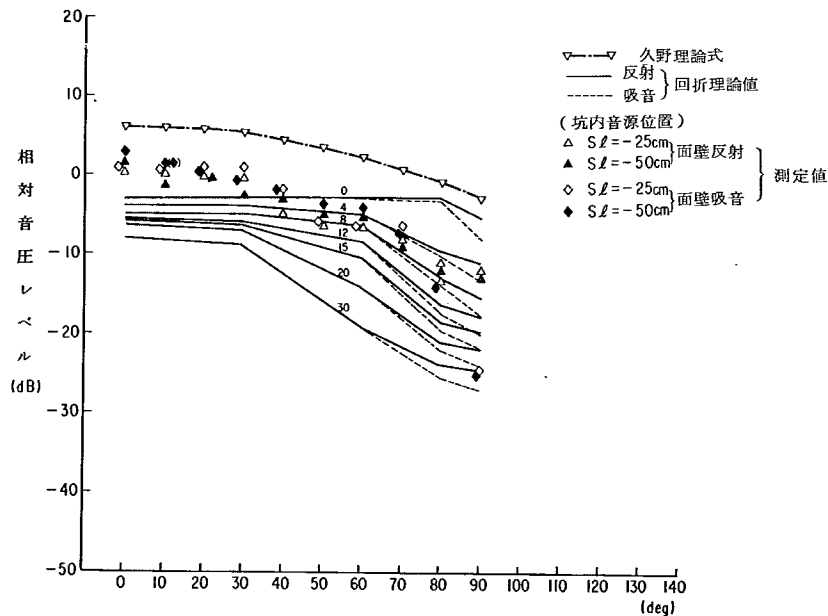
付図-3 4 半円形トンネル坑口の放射性状, 模型実験結果, 音源が坑内にある場合, 坑口が自由空間にある場合, 受音距離 $l = 100\text{cm}$, 受音高; 断面中央高さの $\frac{1}{2}$, $H_M = 0$



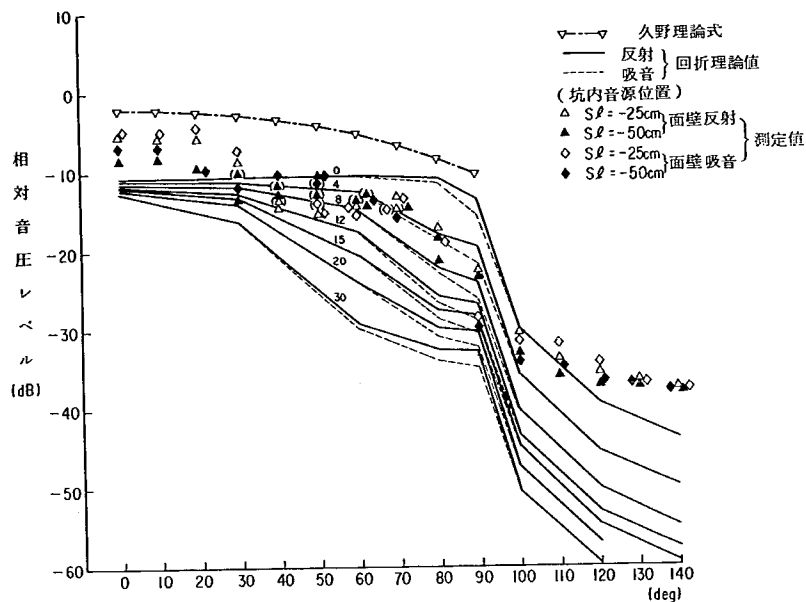
付図-3 5 半円形トンネル坑口の放射性状, 模型実験結果, 音源が坑内にある場合, 地面がある場合, 受音距離; $l = 40\text{cm}$, 受音高; 断面中央高さの $\frac{1}{2}$, $H_M = 0$, (16 KHz)



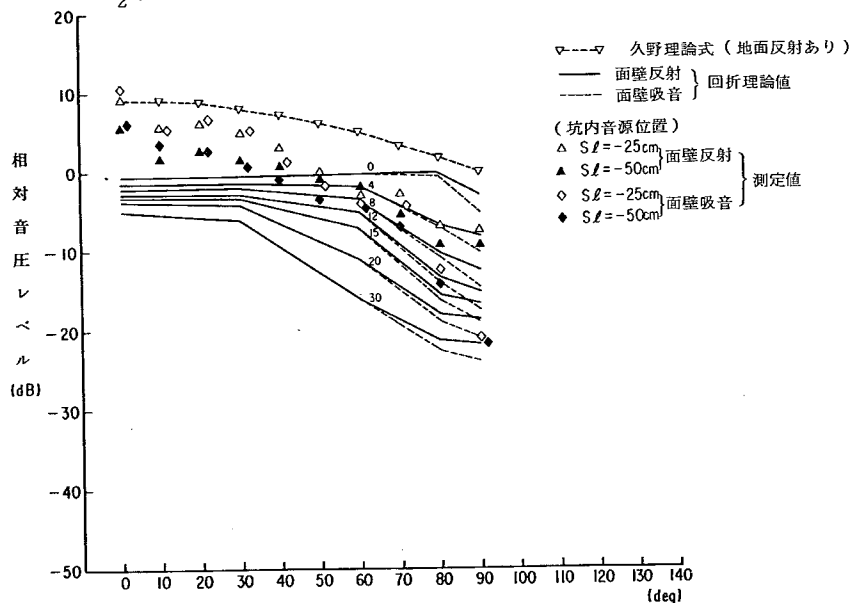
付図-3 6 半円形トンネル坑口の放射性状，模型実験結果，音源が坑内にある場合，地面がある場合，受音距離； $\ell = 100\text{cm}$ ，受音高；断面中央高さの $\frac{1}{2}$ ， $H_M = 0$ ，(16 kHz)



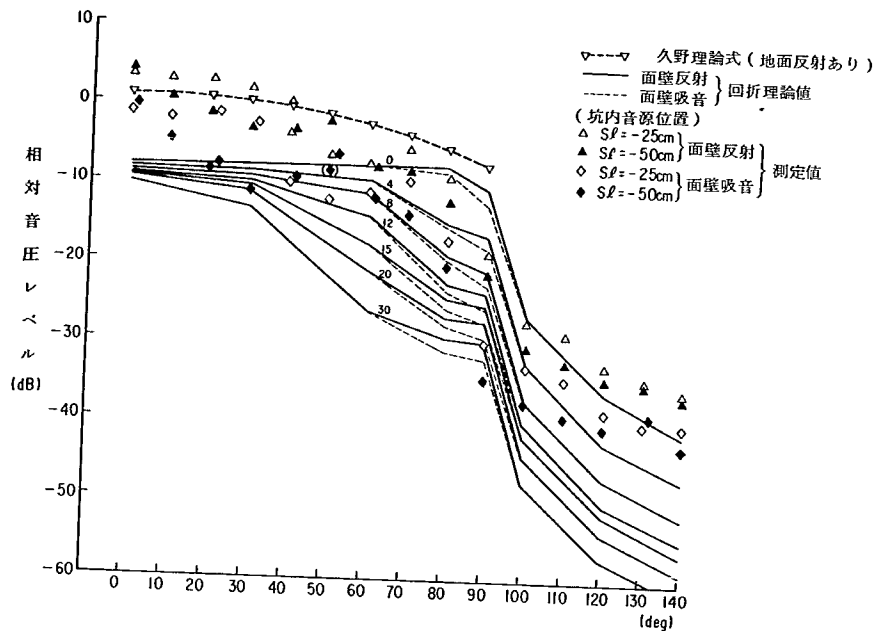
付図-3 7 半円形トンネル坑口の放射性状，模型実験結果，音源が坑内にある場合，面壁工がある場合，受音距離； $\ell = 40\text{cm}$ ，受音高；断面中央高さの $\frac{1}{2}$ ， $H_M = 0$ ，(16 kHz)



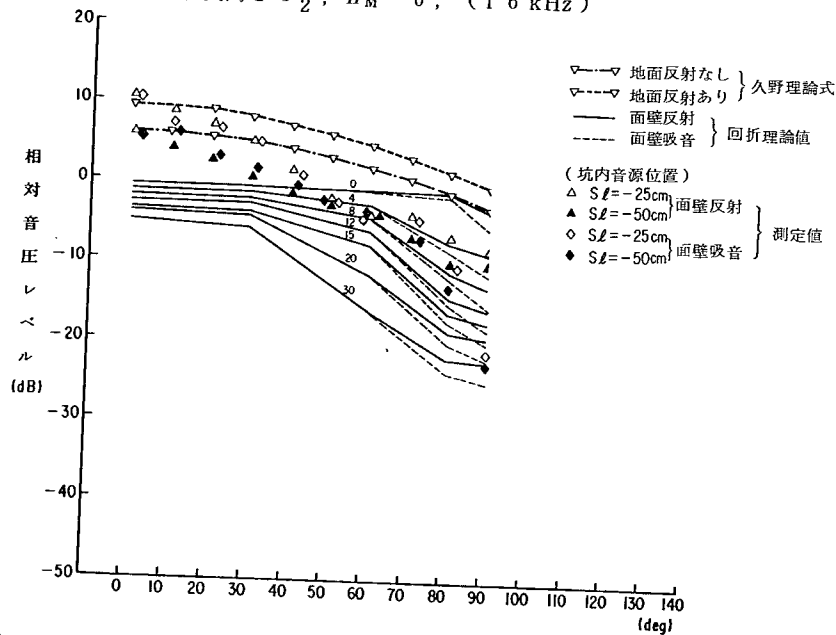
付図-38 半円形トンネル坑口の放射性状，模型実験結果，音源が坑内にある場合，面壁工がある場合，受音距離； $\ell = 100\text{cm}$ ，受音高；断面中央高さの $\frac{1}{2}$ ， $H_M = 0$ ，(16 kHz)



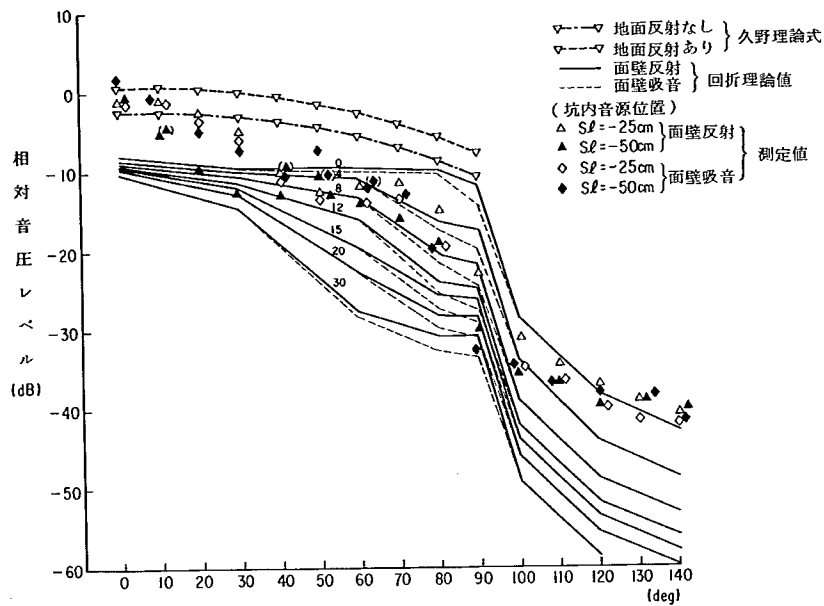
付図-39 半円形トンネル坑口の放射性状，模型実験結果，音源が坑内にある場合，地面（反射）及び面壁工がある場合，受音距離； $\ell = 40\text{cm}$ ，受音高；断面中央高さの $\frac{1}{2}$ ， $H_M = 0$ ，(16 kHz)



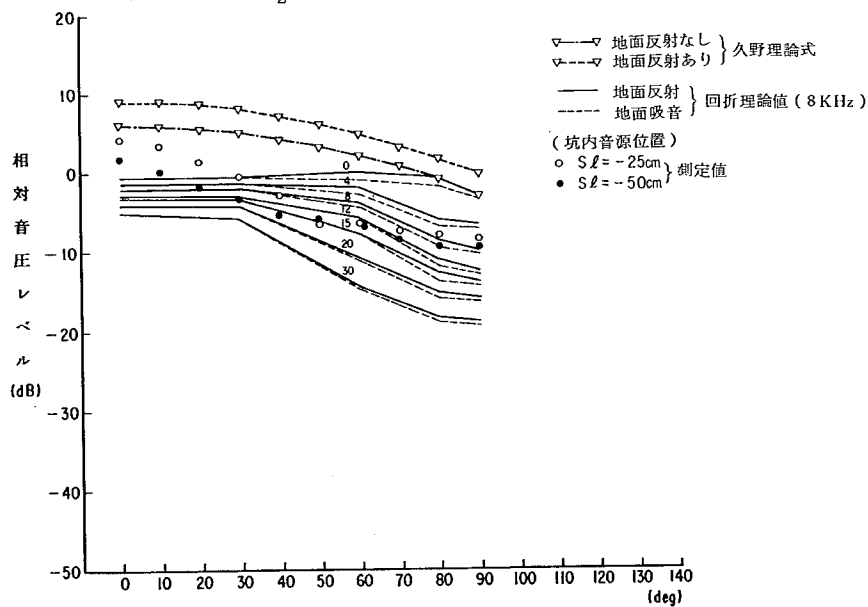
付図-4 0 半円形トンネル坑口の放射性状，模型実験結果，音源が坑内にある場合，地面（反射）及び面壁工がある場合，受音距離； $l = 100\text{cm}$ ，受音高；断面中央高さの $\frac{1}{2}$ ， $H_M = 0$ ，（16 kHz）



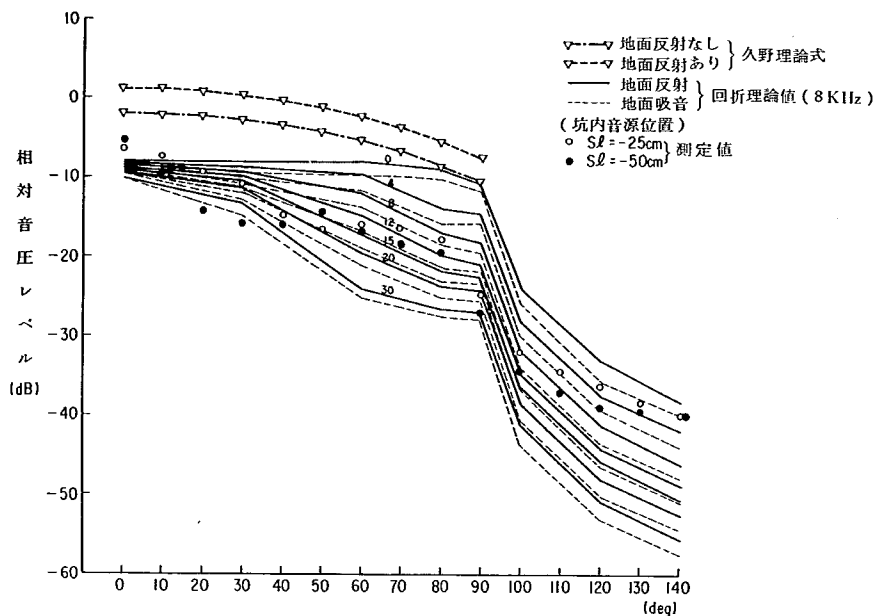
付図-4 1 半円形トンネル坑口の放射性状，模型実験結果，音源が坑内にある場合，地面（吸音）及び面壁工がある場合，受音距離； $l = 40\text{cm}$ ，受音高；断面中央高さの $\frac{1}{2}$ ， $H_M = 0$ ，（16 kHz）



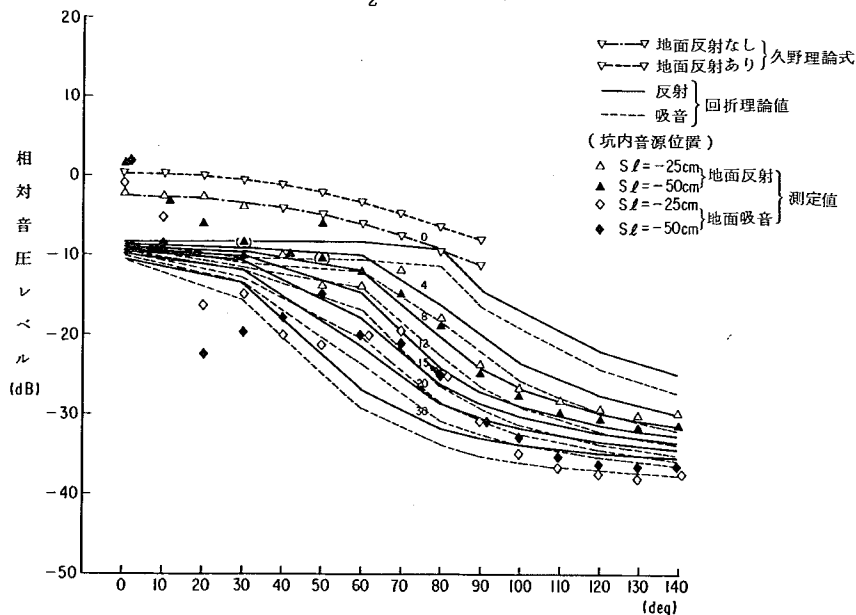
付図-4 2 半円形トンネル坑口の放射性状，模型実験結果，音源が坑内にある場合，地面（吸音）及び面壁工がある場合，受音距離； $\ell = 100\text{ cm}$ ，受音高；断面中央高さの $\frac{1}{2}$ ， $H_M = 0$ ，（16 kHz）



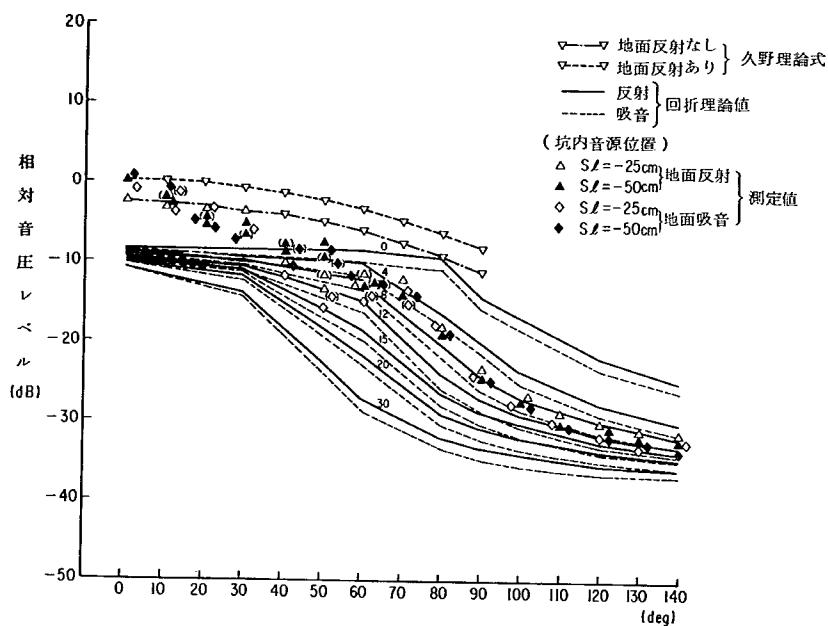
付図-4 3 半円形トンネル坑口の放射性状，模型実験結果，音源が坑内にある場合，地面（吸音）及び面壁工（反射）がある場合，受音距離； $\ell = 40\text{ cm}$ ，受音高；断面中央高さの $\frac{1}{2}$ ， $H_M = 0$ ，（ワイドノイズ）



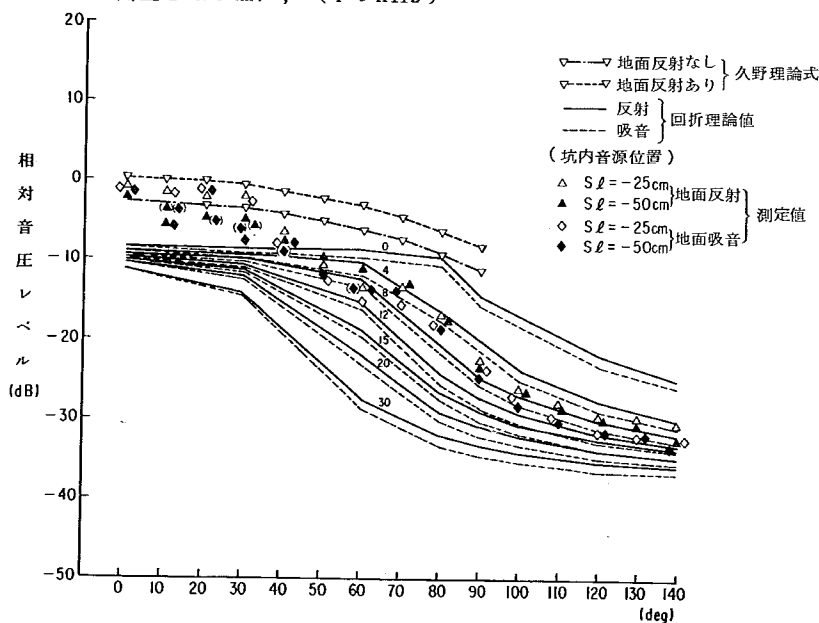
付図-4 4 半円形トンネル坑口の放射性状，模型実験結果，音源が坑内にある場合，地面（吸音）及び面壁工（反射）がある場合，受音距離； $l = 100\text{ cm}$ ，受音高；断面中央高さの $\frac{1}{2}$ ， $H_M = 0$ ，（ワイドノイズ）



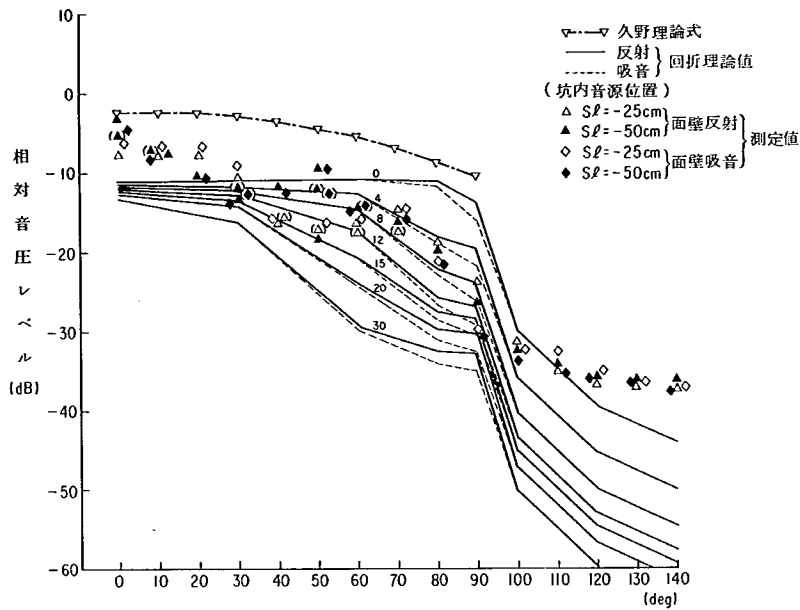
付図-4 5 半円形トンネル坑口の放射性状，模型実験結果，音源が坑内にある場合，地面がある場合，受音距離； $l = 100\text{ cm}$ ，受音高； $H_M = -10\text{ cm}$ ，（路面上 0.5 cm ），（ 16 kHz ）



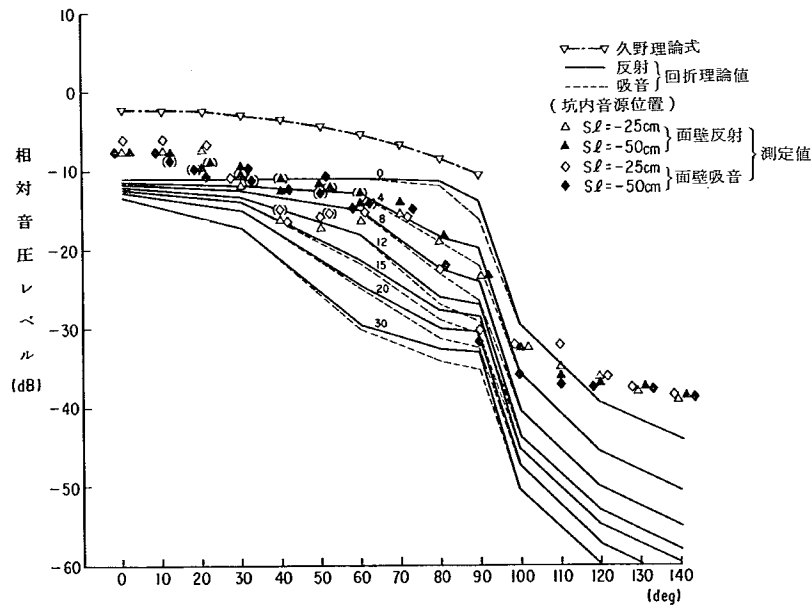
付図-4 6 半円形トンネル坑口の放射性状，模型実験結果，音源が坑内にある場合，地面がある場合，受音距離； $\ell = 100\text{ cm}$ ，受音高； $H_M = 10\text{ cm}$ （路面上 20.5 cm ），（ 16 kHz ）



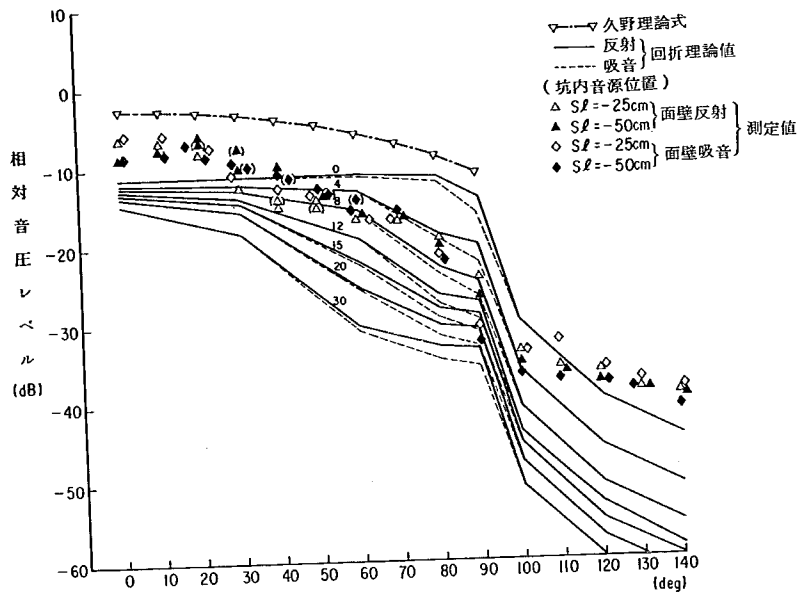
付図-4 7 半円形トンネル坑口の放射性状，模型実験結果，音源が坑内にある場合，地面がある場合，受音距離； $\ell = 100\text{ cm}$ ，受音高； $H_M = 20\text{ cm}$ （路面上 30.5 cm ），（ 16 kHz ）



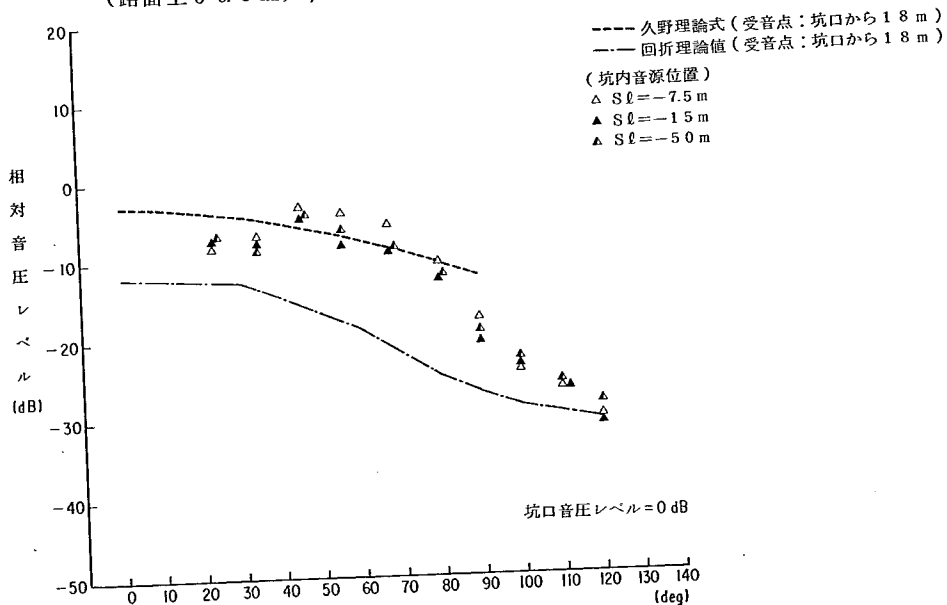
付図-4 8 半円形トンネル坑口の放射性状，模型実験結果，音源が坑内にある場合，面壁工がある場合，受音距離； $l = 100\text{ cm}$ ，受音高； $H_M = -10\text{ cm}$ （路面上 0.5 cm ），（ 16 kHz ）



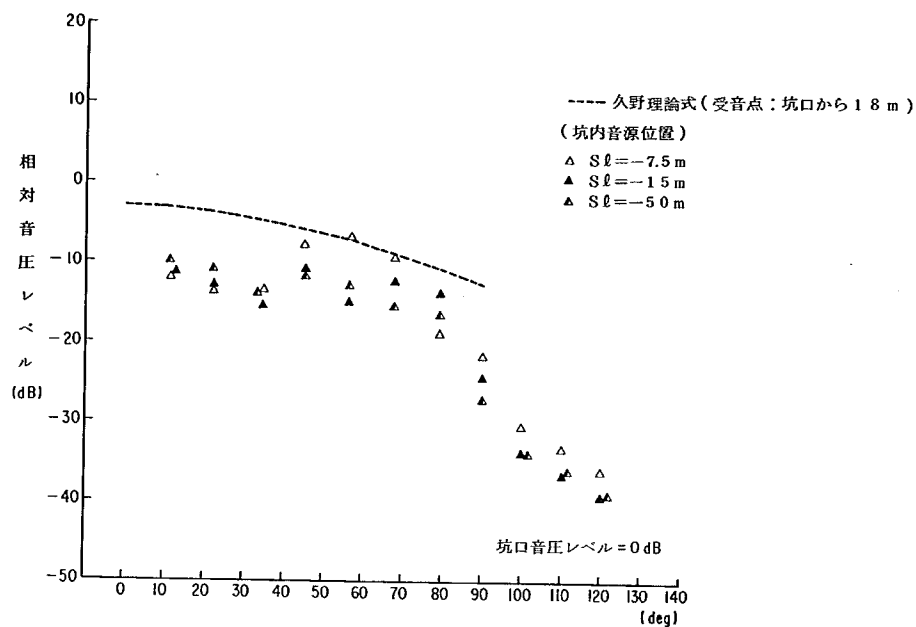
付図-4 9 半円形トンネル坑口の放射性状，模型実験結果，音源が坑内にある場合，面壁工がある場合，受音距離； $l = 100\text{ cm}$ ，受音高； $H_M = 10\text{ cm}$ （路面上 20.5 cm ），（ 16 kHz ）



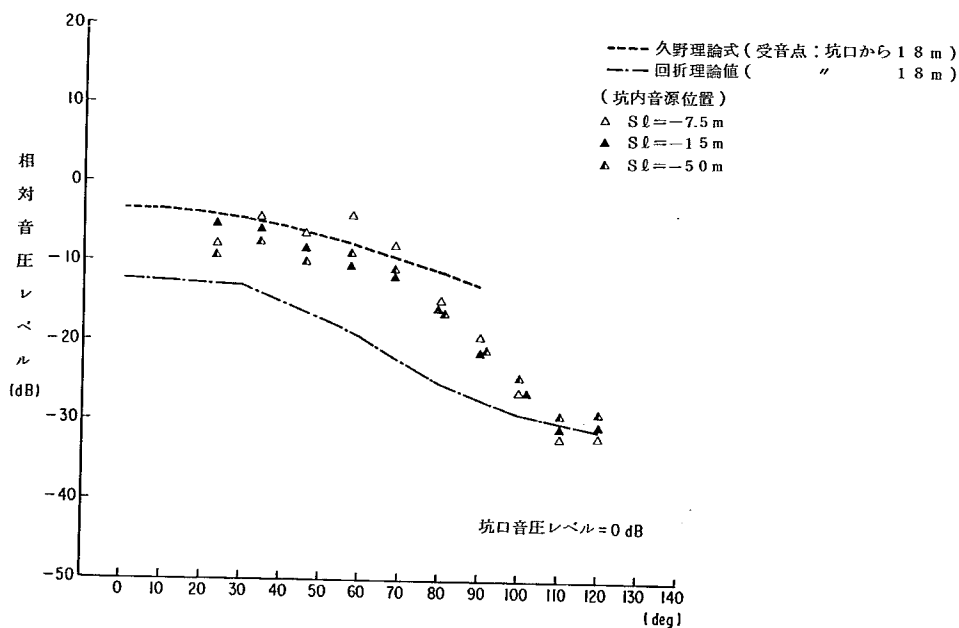
付図-50 半円形トンネル坑口の放射性状，模型実験結果，音源が坑内にある場合，面壁工がある場合，受音距離； $\ell = 100\text{ cm}$ ，受音高； $H_M = 20\text{ cm}$ （路面上 30.5 cm ），（ 16 kHz ）



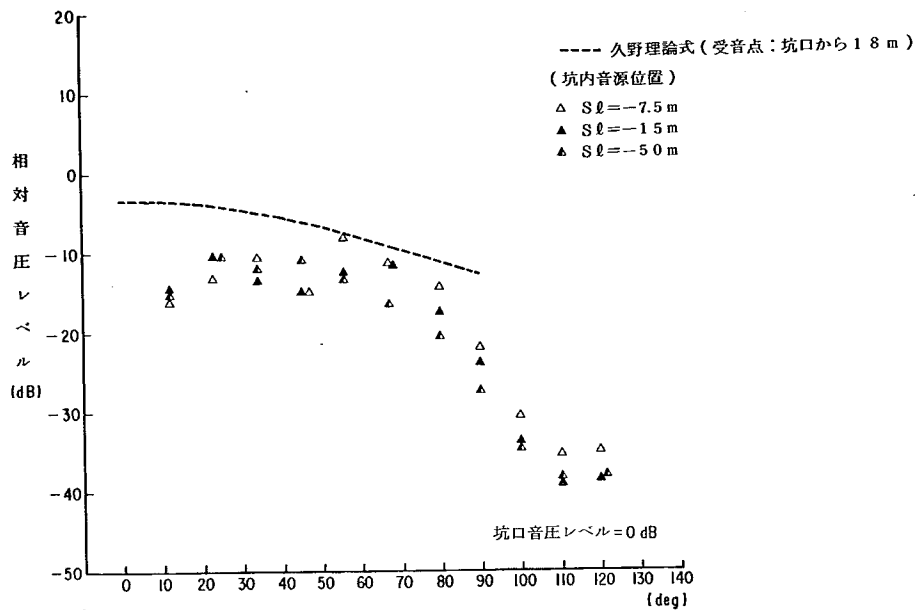
付図-51 トンネル坑口の放射性状，実大トンネル実験結果
受音距離； $\ell = 18\text{ m}$ ，受音高； $H_M = 1.2\text{ m}$ ， 250 Hz



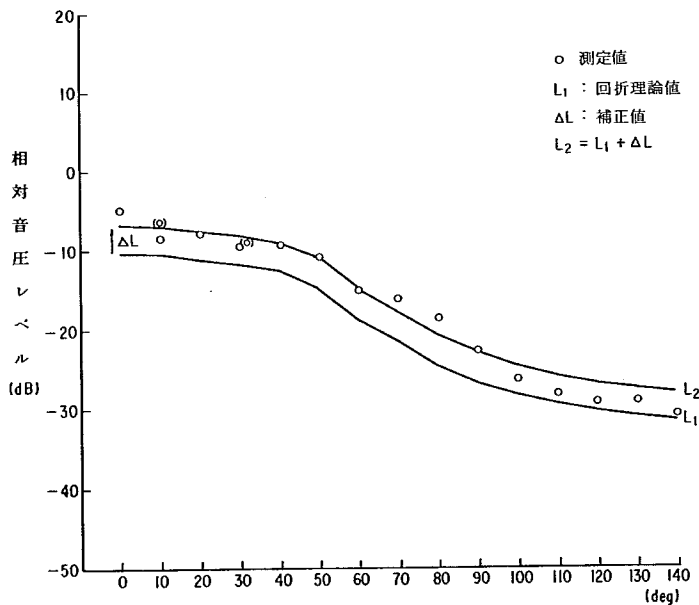
付図-52 トンネル坑口の放射性状, 実大トンネル実験結果
受音距離; $\ell = 1.8$ m, 受音高; $H_M = 1.2$ m, 1 kHz



付図-53 トンネル坑口の放射性状, 実大トンネル実験結果
受音距離; $\ell = 1.8$ m, 受音高; $H_M = 3.5$ m, 250 Hz



付図-5.4 トンネル坑口の放射性状, 実大トンネル実験結果
 受音距離; $\ell = 1.8$ m, 受音高; $H_M = 3.5$ m, 1 kHz



付図-5.5 面音源位置の判定例
 円形トンネル, 自由空間 $\ell = 8.0$ cm, $H_M = 0$ cm, 8 kHz, $S\ell = -2.5$ cm
 回折理論値の面音源位置 1.5 cm, 補正值 3.5 dB