

Investigation for insertion loss of noise barrier for sound source moving at high speed

緒方, 正剛

<https://doi.org/10.15017/458565>

出版情報 : Kyushu Institute of Design, 2003, 博士 (工学) , 課程博士
バージョン :
権利関係 :



第4章 高速移動音源に対する防音壁の遮音性能に関する実験

これまでの章では、音源が高速で移動する場合における防音壁の挿入損失の算出にあたり数値計算を用いる手法として、2次元空間での境界要素法で求めた基本解を断面方向に積分変換することで3次元音場の解を求める手法を音源の周波数が変調する場合への適用を検討した。この手法を用いて防音壁の挿入損失の変化について検討した。この計算結果から、音源が高速で移動する場合には、速度に応じて受音点での音圧が上昇し、受音点で最大値を観測する際の音源の位置は受音点正面を原点として音源の進行方向を正とした時の負の位置に移動する。また、防音壁がある場合には、最大値はさらに負の位置に移動し、その移動量は、速度に応じて大きくなることを述べた。本章では、音源が高速で移動する時の防音壁の挿入損失について、実験により検討するために高加速及び高減速度に耐える無指向性の音源を製作し、その音源を用いて、音源が高速移動する場合のドップラー効果を考慮した防音壁の挿入損失について実測した結果について述べる。

4.1. 実験に用いた音源の周波数

音源の周波数は、新幹線や超電導磁気浮上式鉄道が高速で走行する際に車両下部から発生する騒音の周波数のピークが Fig.1.1 に示すように 1~2kHz の帯域であることから、本論文での検討ではその中間的な周波数の 1.5kHz を対象としている。ここで行おうとしている防音壁の挿入損失に関する検証実験については、1/10 の縮尺模型を使用することにした。従って、物理量の相似則の関係から、音源の周波数は対象周波数の 10 倍の 15kHz としている。音源の移動速度は、実物と模型における空気の密度が等しくそれぞれの音速が変わらないため、等価とした[4-1]。

4.2. 音源移動装置の概要

音源を高速で移動させるために、（財）鉄道総合技術研究所のトンネル微気圧波低減対策列車トンネル模型実験装置を用いた。装置の概略図をFig.4.1に示す。また、高速移動音源模型実験概要図をFig.4.2に示す。トンネル微気圧波低減対策列車トンネル模型実験装置は、上下3対（6輪）の回転車輪からなる加速発射装置により、緊張したピアノ線で誘導される軸対象回転体の列車模型を打ち出すことにより、300km/hまでの速度で移動することができる。高速移動音源の実験では、この列車模型に空力的に発生する音源またはスピーカーの音源を装着し、音源を打ち出すことで移動した。

受音点は、Fig.4.2に示すように回折角度が30、67.4、90となる受音点1～3の3カ所として、防音壁が無い条件と防音壁を設置した条件について受音点の音圧の変化の比較を行うことにした。音源発射装置の写真をPhoto4.1に示す。制動装置の写真をPhoto4.2に示す。実験風景の写真をPhoto4.3に示す。

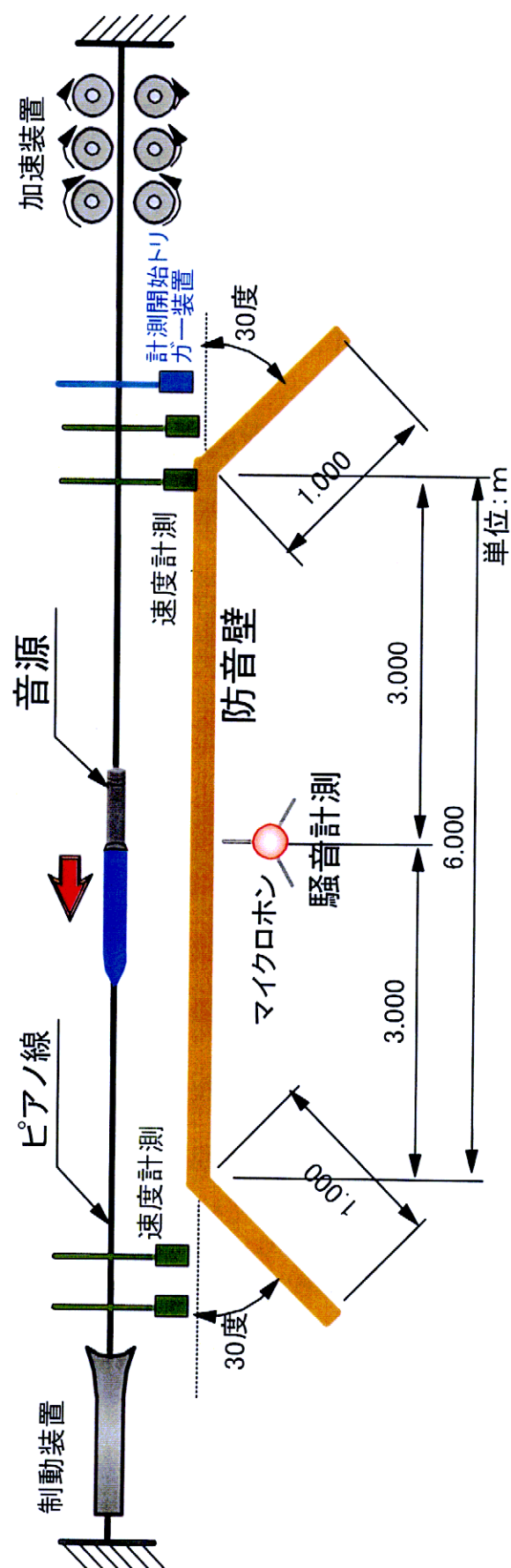


Fig.4.1 高速移動音源模型実験概要図

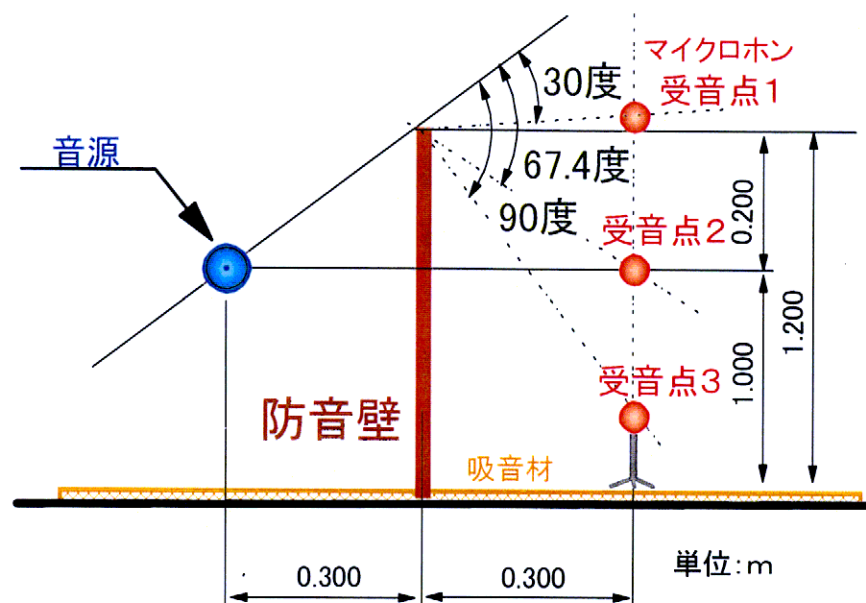


Fig.4.2 高速移動音源模型実験概要図

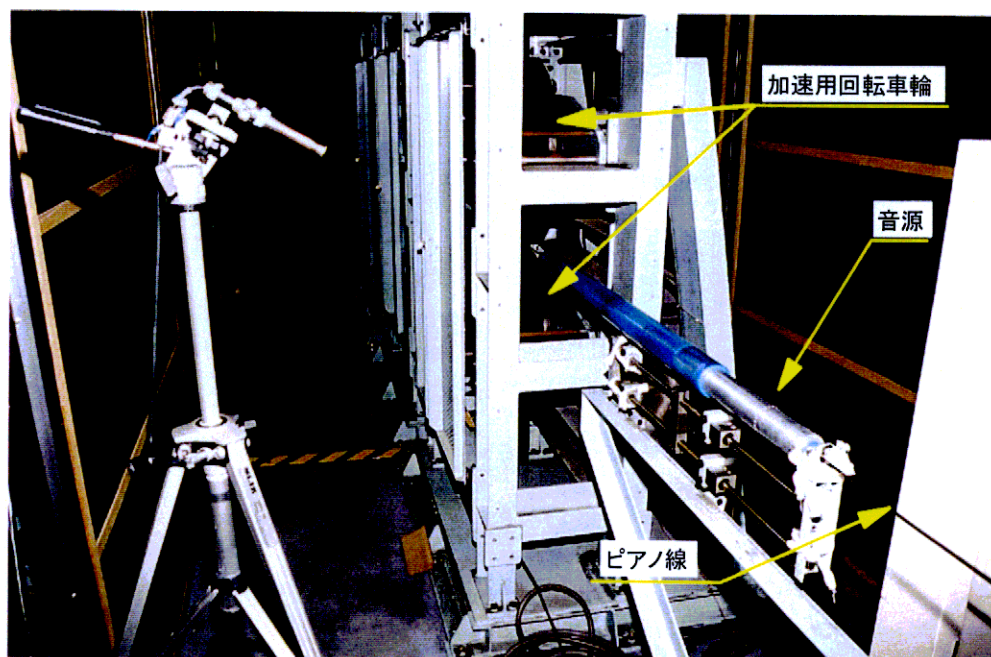


Photo4.1 音源発射装置

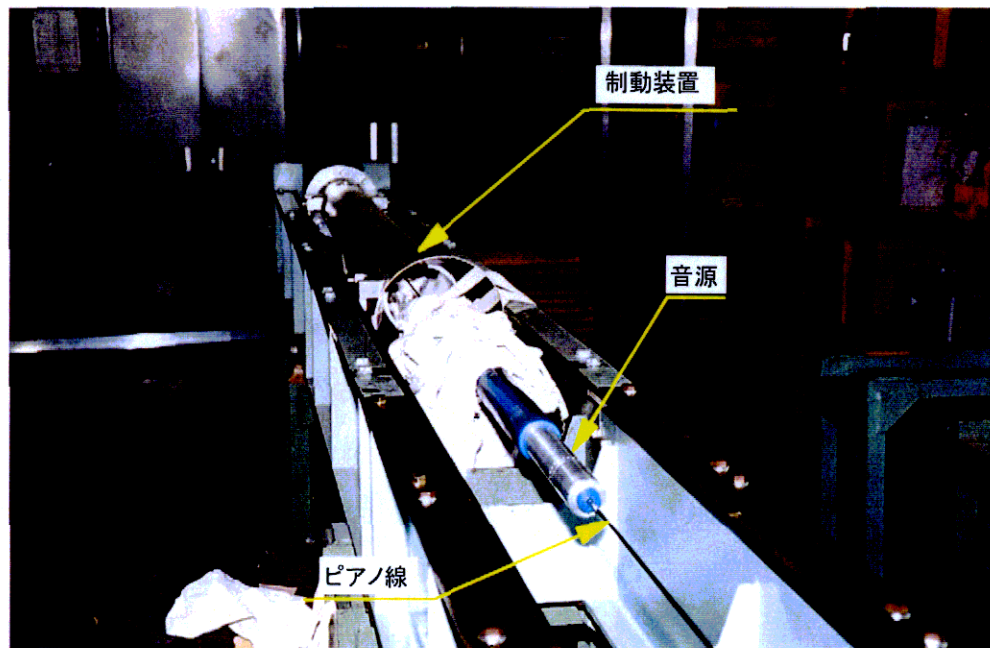


Photo4.2 制動装置

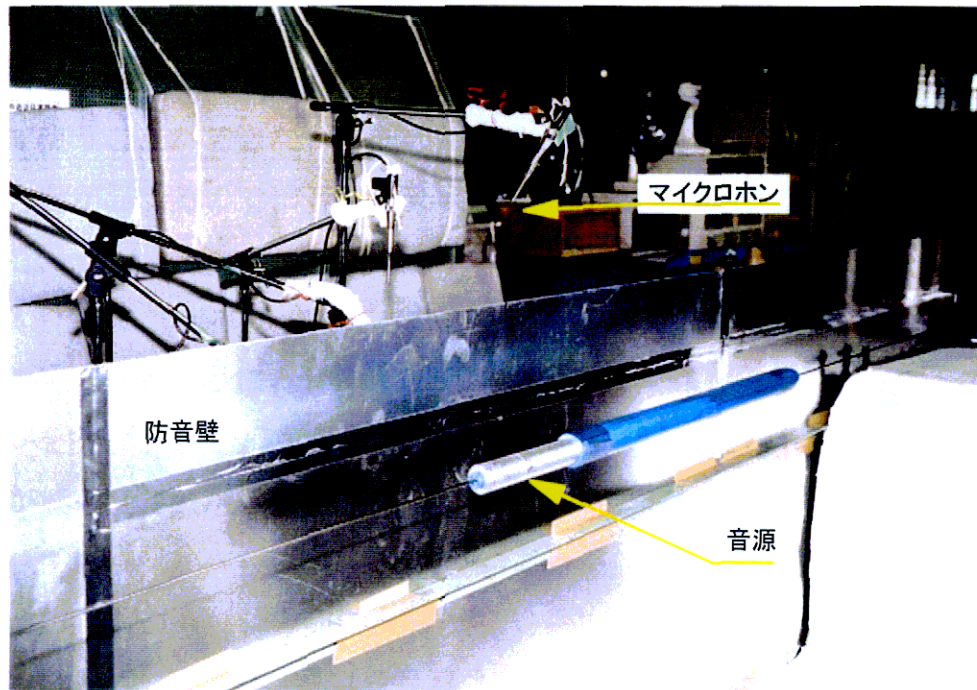


Photo4.3 実験風景

防音壁は厚さ2mmのステンレス鋼板を用いた。実験室の床面及び天井には、音の反射が少なくなるようにグラスウール吸音材(32kg/m^3)を配置し、自由空間を模擬した。音源の移動速度の計測は、列車模型の頭部に磁束密度の高いネオジウム磁石を埋め込み、磁束がリード線で囲う空間を通過する際に発生する電磁誘導パルスが加速装置直後と減速装置直前に1m間隔でそれぞれ2回発生するように設置することにより、打ち出し直後及び制動直前の速度を算出した。同時にこのパルスは音源の位置の算出に用いた。

音源の移動速度の条件は、150km/h, 200km/h, 250km/h である。

4.3. 高周波マイクロホンの指向特性

移動音源に対するドップラー効果などの現象を計測する際には、音源は固定された受音点の前を移動し、その通過前後における音の変動現象を検討することになる。今回の移動音源の実験では、移動している音源に対して固定した受音点で計測を行うために、音源に対してマイクロホンの正面を向けて常に正対した状態で使うことができない。そのため音源の位置が変化しマイクロホンに入射する方向が異なるので、音波が到来する角度に対する感度を把握しておく必要がある。

この実験では、移動する音源がどの位置にある時でもマイクロホン軸に対する角度が一定となるように、音源が移動する線と計測点を含む平面に対してマイクロホンを向きが90度の角度になるように設置することにした。この状態では防音壁が無く受音点から音源が見通せる条件でマイクロホンの向きが音源に対して90度に設定しているため、防音壁がある条件では、音源から音波が伝搬する方向が防音壁のエッジ方向になるのでマイクロホンに入射する角度は受音点1では106.4度、受音点2及び受音点3では123.7度となる。

対象となる音源の周波数は、Fig.2.3.で示したようにドップラー効果の周波数変調により、12kHz~20kHz(300km/h)の高周波帯域である。

測定に用いたマイクロホンの仕様は以下である。

型式：RION UC-29

マイクロホンサイズ：1/4 インチコンデンサ型

測定可能周波数範囲 (Hz)：20～100,000

高周波用マイクロホンに入射する音波の伝達方向に対する感度及び軸回りの回転による感度の影響を把握するために、音源に TSP 信号を用いたインパルス・レスポンスの計測を行い、上記音源の移動速度に応じた周波数に対するマイクロホン感度の指向特性を求めた。周波数が 12kHz, 15kHz, 18kHz におけるマイクロホン膜面の法線を含む平面内の回転角度 (θ) における感度特性をそれぞれ Fig.4.3, Fig.4.4, Fig.4.5 に示す。マイクロホン膜面の法線方向を 0 度としている。

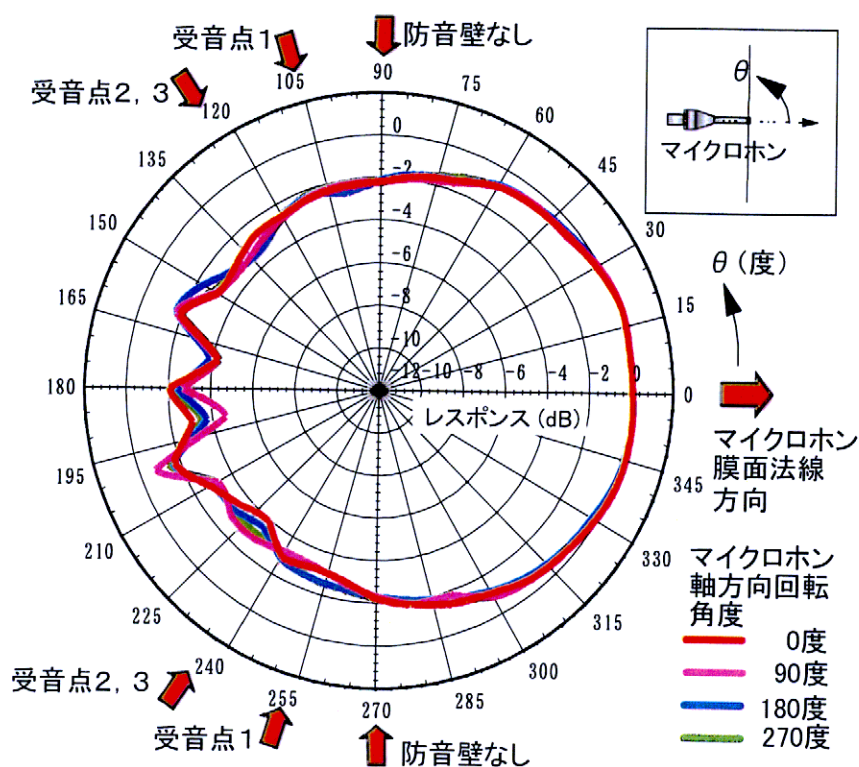


Fig.4.3 マイクロホンの回転角度における感度特性
(12000Hz、グリッド外し)

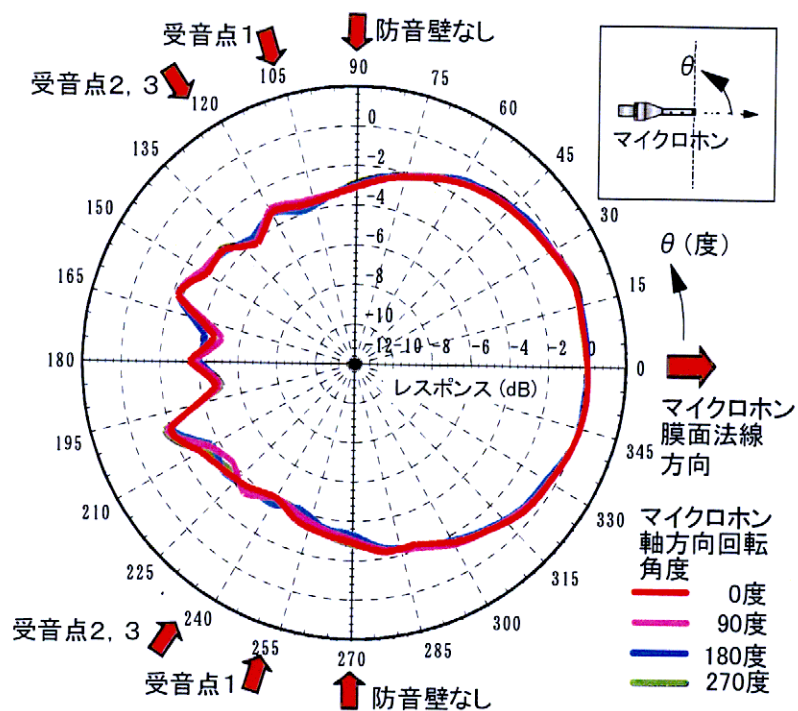


Fig.4.4 マイクロホンの回転角度における感度特性
(15000Hz、グリッド外し)

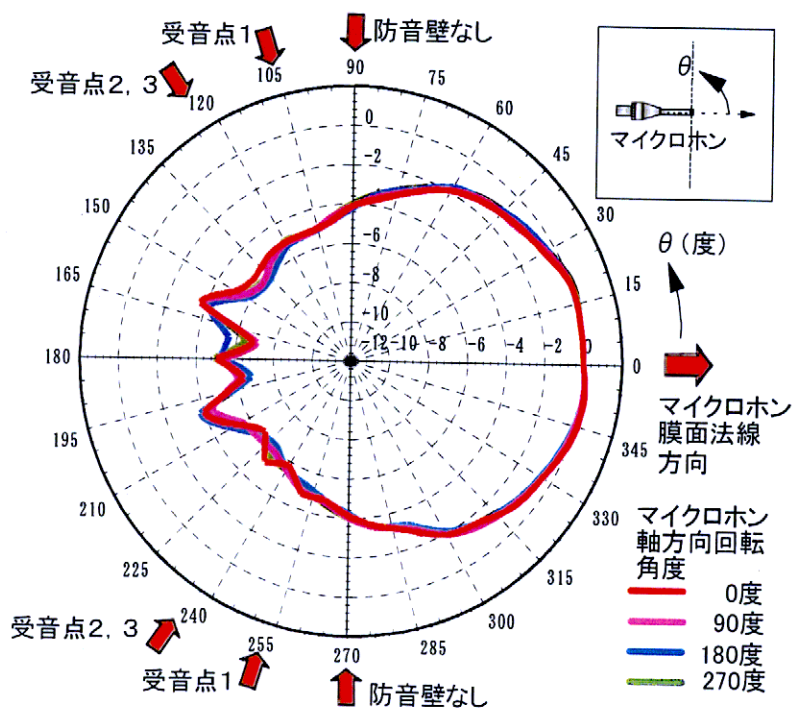


Fig.4.5 マイクロホンの回転角度における感度特性
(18000Hz、グリッド外し)

Fig.4.3, Fig.4.4, Fig.4.5 から、マイクロホンの中心軸に対する回転方向の感度特性について見ると、何れの周波数においても、0 度から 90 度ごとの 270 度までの測定結果は、どの角度においてもほぼ同様の感度特性を有している。これはマイクロホンの構造から考えても、回転方向に対しては概ね無指向性とみなせるものと考えられる。

マイクロホンの音波入射方向の角度における感度特性の測定結果から、正面から外れて入射する音波に対する感度は、正面からの角度が大きくなるに従い下がる傾向がある。Fig.4.4 において周波数が 15kHz の条件では、正面の感度に対して 90 度の角度での感度は 3.0dB 低下している。今回の防音壁の挿入損失に関する実験において、防音壁がある場合には、音波がマイクロホンに入射する角度は、受音点 1 では 106.4 度、受音点 2 及び受音点 3 では 123.7 度となる。従って、今回の防音壁の挿入損失に関する実験の解析にあたっては、各受音点の音圧の測定値に対して、防音壁のエッジ方向の角度における感度（受音点 1 では-3.5dB、受音点 2, 3 では-3.6dB）と 90 度における感度（-3.0dB）のレベル差について補正を行った。

4.4. 空力的な音源を用いた実験

高速移動音源に対する防音壁の遮音性能に関する基礎的研究を行うに際して、実験による検討として、(財)鉄道総合技術研究所が所有するトンネル微気圧波低減対策列車トンネル模型実験装置を用いて、音源を高速で移動させ、防音壁の有無の条件による影響の検討を行うことにした。

音源は、車両を模擬した車両模型の先頭部分に周方向に溝を彫り込み、車両模型が高速で移動する際にキャビティ部から空力的に発生する音を音源とすることにした。これは、高速で移動する乗り物、例えば新幹線車両の側面のドア部や車両継ぎ目部の凹凸から走行時に発生する音や航空機の離着陸時に車輪格納室が開いた際に大きな音が発生する現象などから発想したものである。

4.4.1. 音源発音に関する風洞試験

4.4.1.1. キャビティ音源の形状に関する検討

予備実験として、(財)鉄道総合技術研究所の低騒音風洞を用いて、車両模型の先頭部分にキャビティを作り、音源としての有効性を検証すると共に、キャビティの幅を変えることで対象となる周波数の発生可否を判断することにした。Fig4.6 に示すように、幅は 3mm, 5mm, 8mm の各条件の深さ 5mm のキャビティとした。風速（音源の移動速度に相当）を 100, 150, 200, 250, 300km/h とした場合の音の発生状況と音が発生した場合には、その周波数について計測を行った。

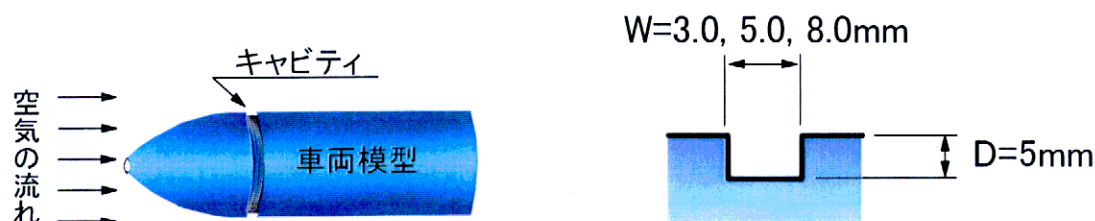


Fig.4.6 音源特性風洞実験

キャビティに空気の流れをあてた時に発生する音を推定すると、音の発生状況は、二通りが考えられる。一つは、1/4 波長の音響管の閉管共鳴と仮定した場合であり、もう一つは、キャビティのエッジにできる渦により音が発生する状況である。1/4 波長の音響管と仮定した場合、キャビティの深さは5mm で一定であるから、発生する音の周波数 f はキャビティ上を通過する流れの速度に関係なく $f = c/\lambda = 340(\text{m/s}) / (D(0.005\text{m}) \times 4) = 17\text{kHz}$ で一定になることになる。一方、キャビティのエッジに発生する空気の渦により音が発生するのであれば、周波数 f は、Rossiter の式で与えられる[4-2]。

$$\frac{fL}{U} = \frac{n - \beta}{\left\{ \frac{U}{U_c} + \frac{M}{\sqrt{1 + (\gamma - 1)M^2/2}} \right\}}, \quad n=1, 2, \dots, \quad (4.3.1)$$

ここで、 L はキャビティの幅(m)、 U は空気の流れ速度(m/s)、 $M = U/c_0$ マッハ数、 γ は流れの固有温度比で表すことができる。この周波数は、キャビティの幅と流れの速度の関数により、変化することになる。

ここで、キャビティ音源の風洞実験の結果を Table4.1 に示す。

Table4.1 音源特性風洞実験結果

単位: kHz

風 速 (km/h)	100	150	200	250	300
幅3.0mm 深5.0mm	音せず	音せず	音せず	11.15	12.45
幅5.0mm 深5.0mm	音せず	音せず 160km/hから音発生	11.1	12.9	15.25
幅8.0mm 深5.0mm	3.7	5.25	10.4	12.3	14.15

キャビティ幅が 3mm の条件では、100～200km/h では音が発生せず、250km/h では 11.15kHz の音が発生し、300km/h では 12.45kHz の音であった。

幅が 5mm では、風速が 160km/h から音が発生し、300km/h では 15.25kHz の音であった。幅が 8 mm では、風速が 100km/h から音が発生し、100km/h では 3.7kHz の音が発生し、300km/h では 14.15kHz の音が発生した。発生した音は、純音に近い鋭いピーク周波数を持つ音である。周波数は、流れの速度上昇に応じて高い周波数にシフトする傾向がある。従って、音の発生は、1/4 波長音響管により発生する機構とは異なり、キャビティ部で空気の渦が発生することによるものと考えられる。キャビティの幅が 8mm と広い条件では、低速から音が発生するものの、周波数が倍の周波数に移るなど不安定な速度領域があり、渦の生成が安定していないものと考えられる。

以上の結果から、車両模型の先頭部分に幅 5mm×深さ 5mm のキャビティを周方向に彫り込み、車両模型が高速で移動する際にキャビティ部から空力的に発生する音を音源とした。

4.4.1.2. 音源の周波数及び指向性に関する検討

空気の流れ場において車両模型のキャビティ部で発生する音源の基礎的な特性を把握するために、(財)鉄道総合技術研究所の低騒音風洞を用いて、風速(音源の移動速度に相当)を 150~300km/h (25km/h ステップ)にした場合の周波数、音圧、水平方向放射指向性、軸回転方向放射指向性について計測を行った。車両模型の軸を含む平面に対して水平方向の角度を β とし、軸回転方向の角度を α とした。風洞実験概要図を Fig.4.7、Fig.4.8 に示す。

音源の水平方向放射指向性の測定は、マイクロホンが空気の流れの中に入らないように水平方向の回転角度(β)を 30~135 度の範囲において 15 度間隔で行うこととした。音源からマイクロホンまでの距離は、0.5m とした。床面や音源を支える治具などによる音の反射がなるべくないように、吸音材(グラスウール 32kg/m²)を敷き詰めた。

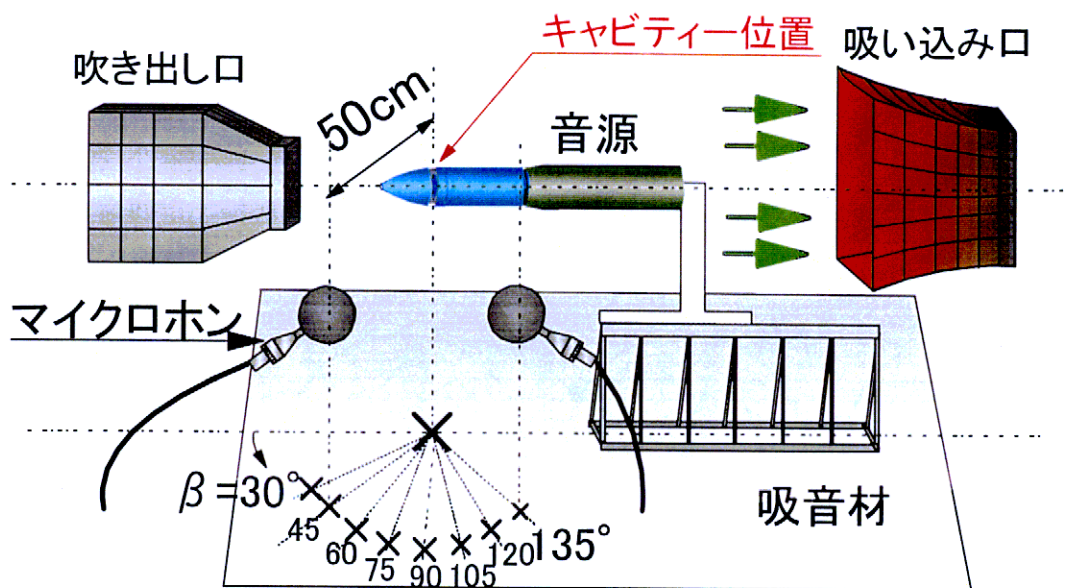


Fig.4.7 キャビティ音源風洞実験概要図（水平方向指向性）

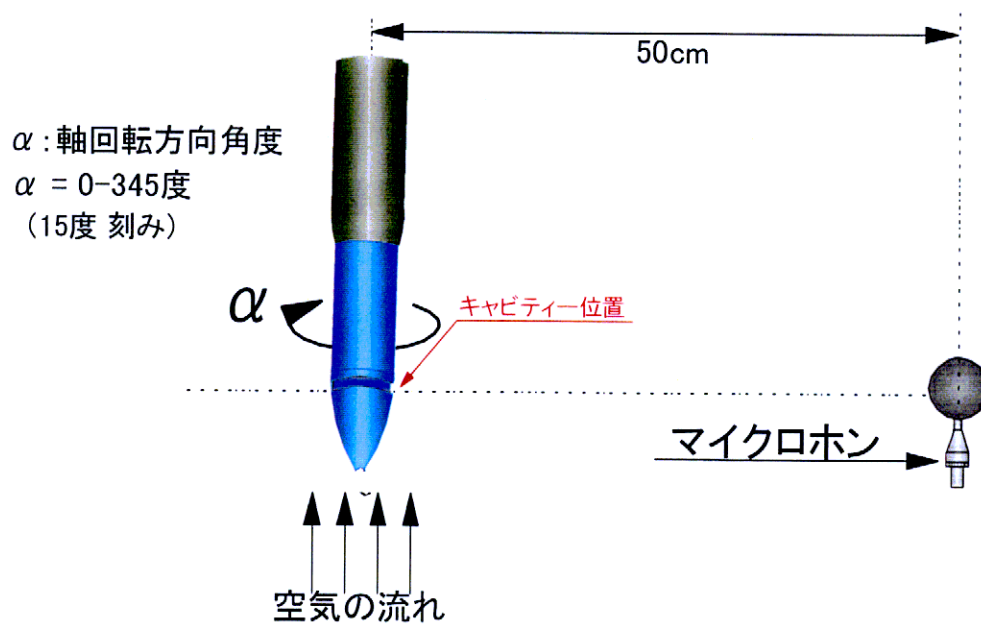
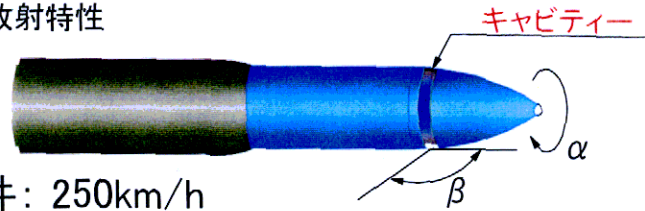


Fig.4.8 キャビティ音源風洞実験概要図（軸回転方向指向性）

水平方向放射特性

速度条件: 250km/h



回転角度 $\alpha=0$ 度

回転角度 $\alpha=90$ 度

回転角度 $\alpha=180$ 度

回転角度 $\alpha=270$ 度

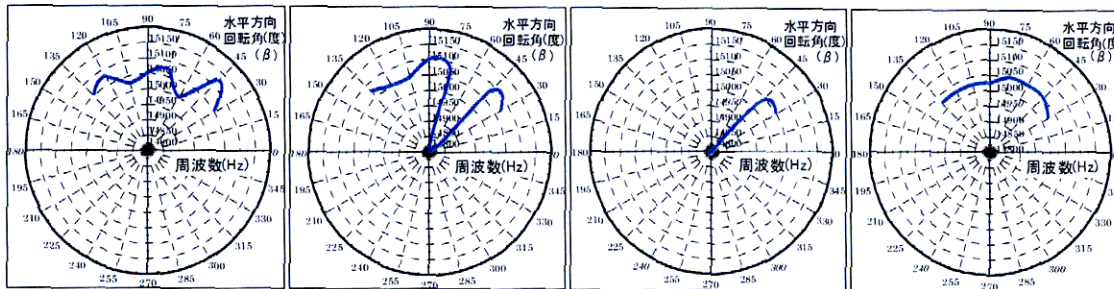
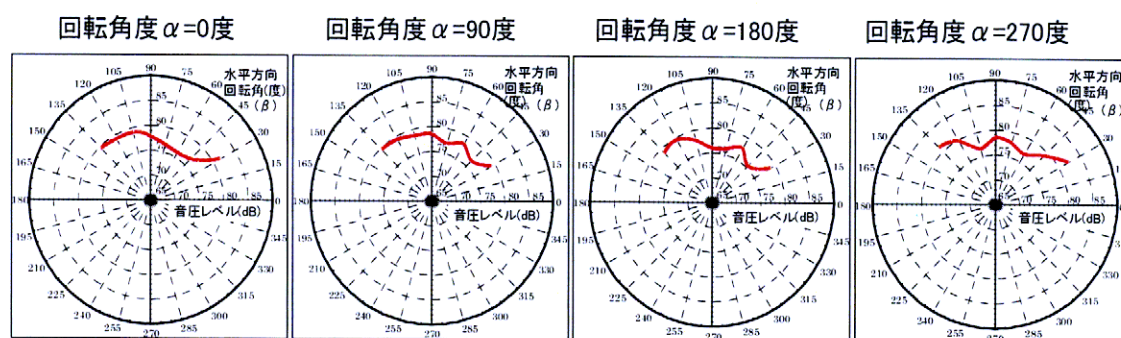
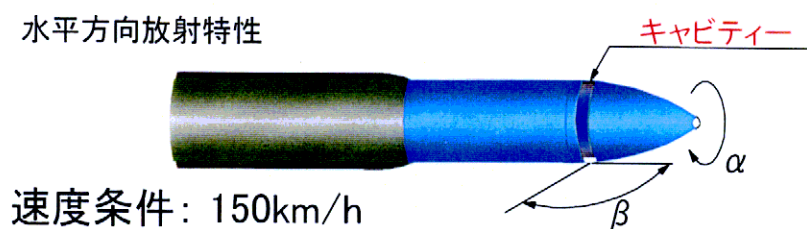


Fig.4.9 キャビティ音源風洞実験結果（水平方向周波数変動）

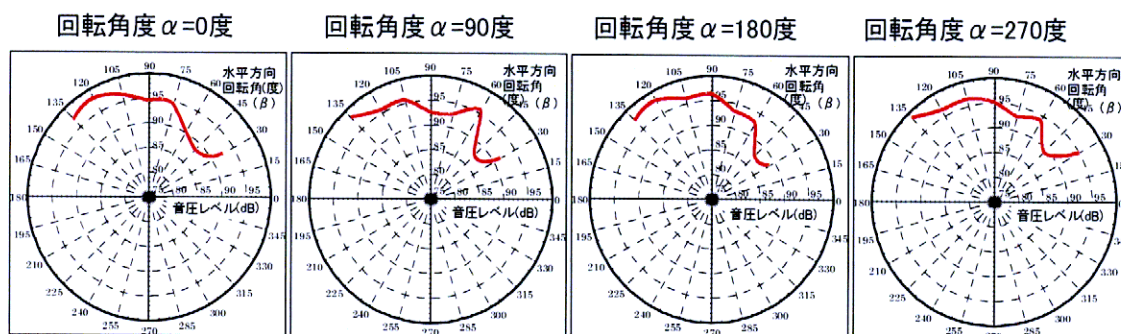
キャビティ音源を用いた風洞実験のうち、風速が 250km/h における各軸方向回転角度（ α ）での水平方向の周波数変動の結果を Fig.4.9 に示す。Fig.4.9 によると、音源から 0.5m の受音点における音の計測の結果から、音源の周波数は、模型の軸回転方向（ α ）によって大きく変動することが分かった。最も周波数が安定している回転角度 α が 270 度の場合における周波数の変動幅は、250km/h の条件の場合、14.875kHz から 15.025kHz である。各風速における水平方向の放射特性を Fig.4.10(a)～(c)に示す。

水平方向放射特性



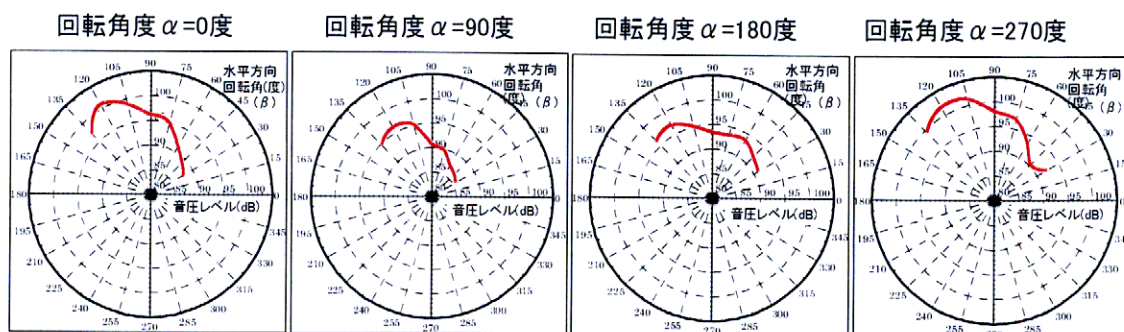
(a) 水平方向指向性 150km/h

速度条件: 250km/h



(b) 水平方向指向性 250km/h

速度条件: 300km/h



(c) 水平方向指向性 300km/h

Fig.4.10 キャビティ音源風洞実験結果

Fig.4.10(a)より、風速が 150km/h の場合、音圧は 75～80dB の範囲で、比較的均一な指向性である。最も均一な指向性になるのは、回転角 α が 90 度の場合である。Fig.4.10(b)より、風速が 250km/h の場合の音圧は 87～98dB の範囲であり、回転角 α が 90 度の場合には大きなディップが見られる。いずれの回転角度でも水平方向の放射特性は、前後方向に対称に放射されておらず、例えば回転角 α が 0 度の時、前方 $\beta = 45$ 度の方向では 87dB であるのに対して、側方 $\beta = 90$ 度で 95dB、後方 $\beta = 135$ 度では 97dB であり、音が車両模型の後方側に強く放射される傾向があることが分かる。Fig.4.10(c)より、風速が 300km/h の条件における回転角 α が 0 度の場合の音圧は 87～102dB の範囲であり、速度が速くなるに従い水平方向の放射特性が車両模型の後方側に強く放射される傾向はさらに強まることが分かる。これらより、流れの速度が速まると発生する音の音圧は上昇し、速度に応じて水平方向の放射特性は後方側に向く傾向であることが分かった。

トンネル微気圧波低減対策列車トンネル模型実験装置を用いて、音源の車両模型を高速で移動する実験にあたっては、模型を打ち出した直後から模型が回転しながら移動することが懸念される。上述の結果から、受音点前を通過する際の音源の軸方向回転角度に応じて音の放射特性が異なることが判明したため、高速度ビデオカメラなどを用いることにより、音源が計測区間を通過する際の軸方向の回転状況を正確に把握する必要があることが分かった。

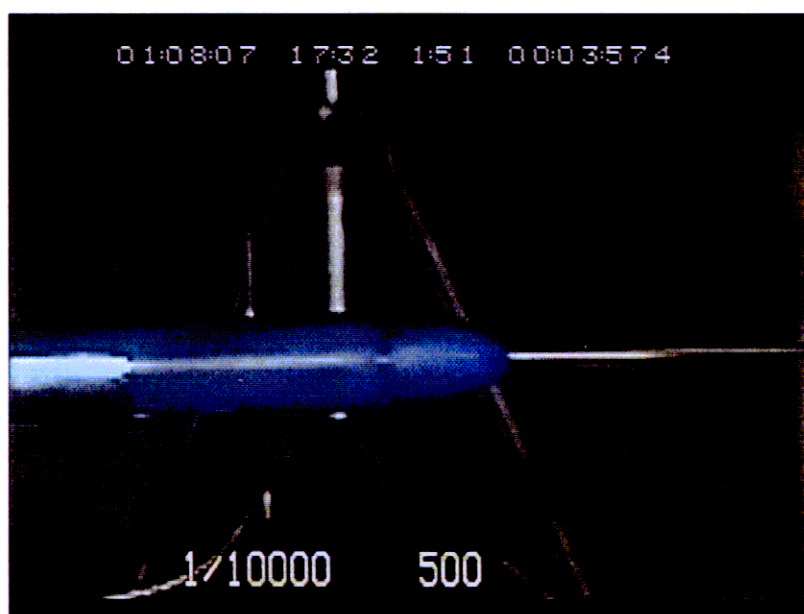
4.4.2. 空力的な音源を用いた防音壁の挿入損失に関する実験

トンネル微気圧波低減対策列車トンネル模型実験装置を用いて上記で検討した空力的な音源を用いて、防音壁が無い条件と防音壁を設置した条件について比較する実験を行った。音を計測する点は、Fig.4.2 に示すように、音源から防音壁の頂部に向かい回折角度が 30, 67.4, 90 度になる各受音点に加えて、防音壁がある場合でもその影響が小さい基準点として、防音壁直上の受音点を選定し

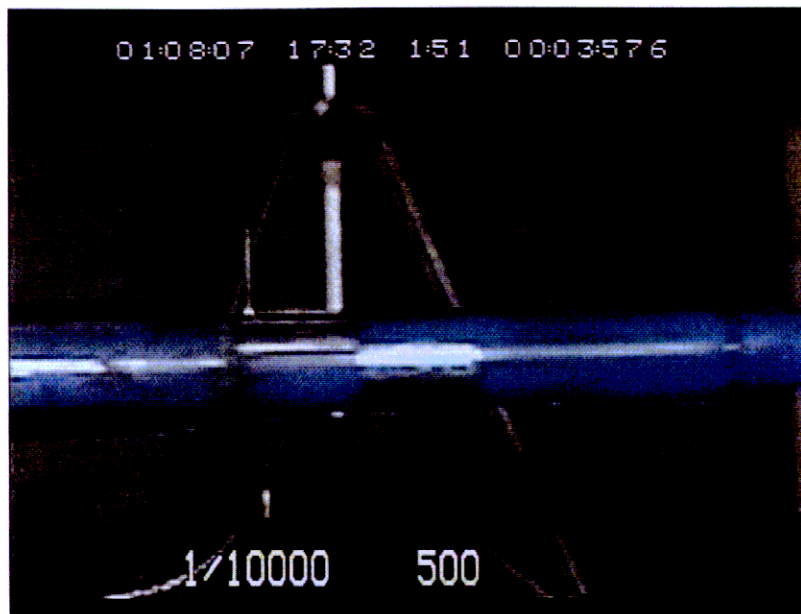
た。騒音の計測区間は、マイクロホン正面に対して前後 2.5m の 5.0m の区間について、計測を行った。

音源の移動速度の計測は、車両模型の頭部にネオジウム磁石を埋め込み、リード線で囲う空間を通過する際に電磁誘導パルスが発生させることにより、打ち出し直後及び制動直前の速度を測定した。同時にこのパルスは音源の位置の算出に用いた。

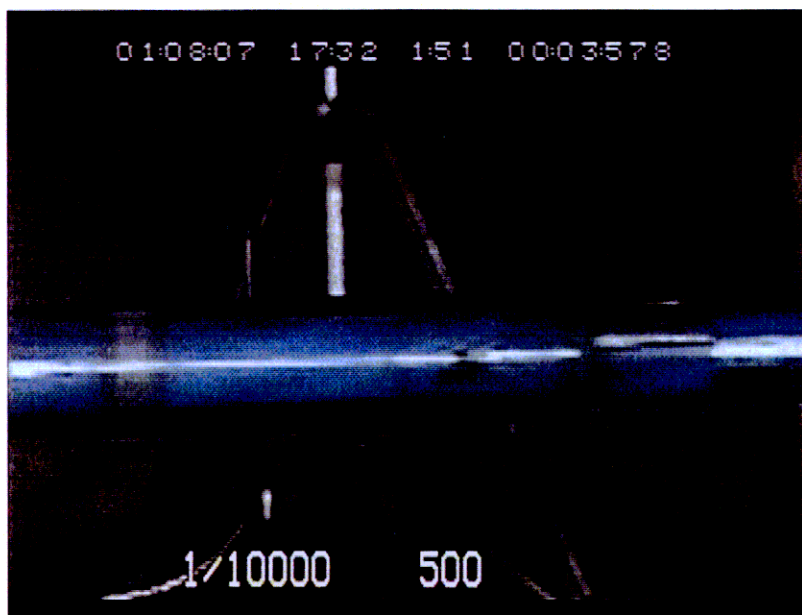
風洞を用いた音源の指向特性把握実験の結果から、この音源は、軸の回転方向に対して 3～4 dB のディップがあることから、音源が計測点を通過する際にどの面が通過したのかを把握しておく必要がある。音源の移動中における回転状態を把握するため、回転が 90 度ごとに判別するためのマーク（銀色のシール）を付け、超高速ビデオカメラ(500 コマ/秒)で撮影することにより回転状態を観察した。撮影した画像の例を Photo4.4(a)～(c)に示す。音源の移動速度は、250km/h である。



(a)受音点正面通過時



(b) 受音点正面から 0.002 秒後



(c) 受音点正面から 0.004 秒後

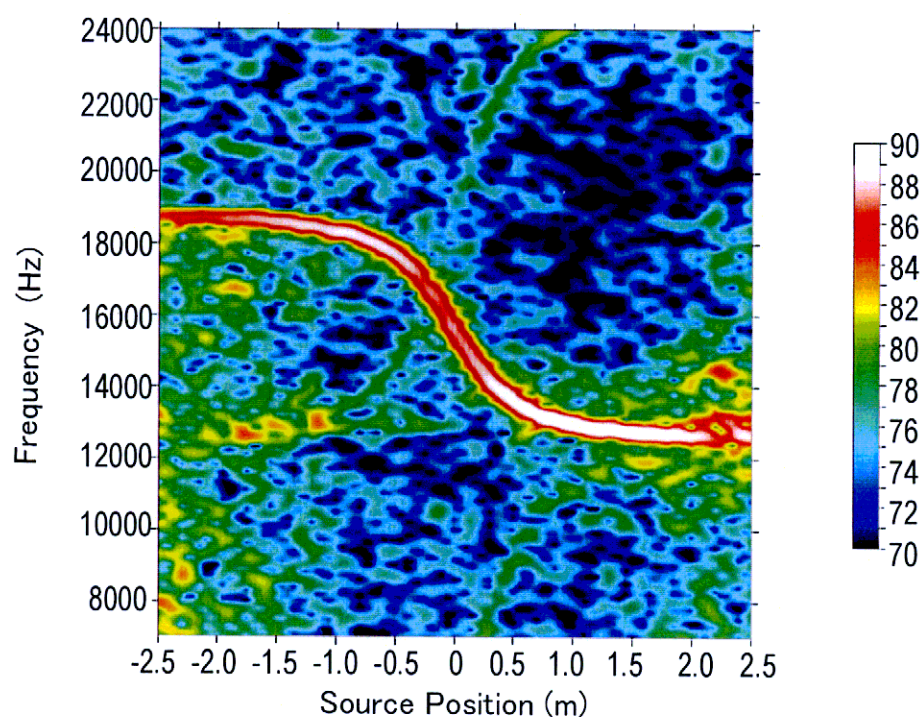
Photo4.4 超高速度ビデオで撮影した画像の例

音源が計測点を通過する際の車両模型の回転について高速度ビデオカメラの画像を解析した結果、模型は、発射装置に装填したままの状態ですべて回転をすることなく計測点前を通過して、制動装置まで到達していることが分かった。

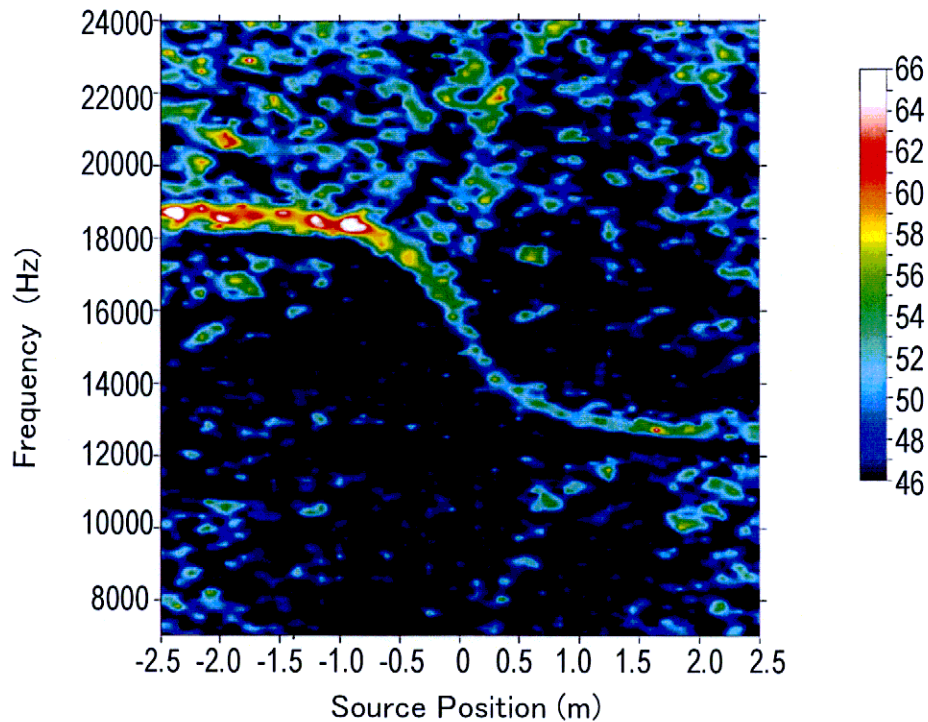
従って、Fig.4.9 のキャビティ音源風洞実験結果の水平方向周波数変動や Fig.4.10 の各速度の水平方向指向性により、最も安定している軸方向回転角度が $\alpha = 270$ 度を受音点側に向けて車両模型を発射することにした。

また、高速度ビデオカメラの画像から、車両模型が通過する際に模型の荷重によりピアノ線が下方にたわむ変位について、その変位量は、ピアノ線の直径の約半分の 2~3mm であり、問題にならない量であることが確認できた。

打ち出し目標速度 250km/h の条件における受音点 2 での音圧レベルの変化及び周波数の変調の例を Fig.4.11 に示す。防音壁がない条件が(a)、防音壁を設置した条件が(b)である。



(a) 防音壁がない条件



(b) 防音壁がある条件

Fig.4.11 音圧レベルの変化及び周波数の変調の例 (250km/h, 受音点 2)

Fig.4.11 により、打ち出し目標速度 250km/h の条件の測定結果から周波数の変調は、計測点の通過速度 249.8km/h (打ち出し直後 250.0km/h、制動直前 249.7km/h) の時、計測区間入口の周波数 18.7kHz、計測点通過時の周波数 15.1kHz、計測区間出口の周波数 12.6kHz であり、ドップラーの変調周波数を計算により求めた結果と一致する。

Fig.4.11(a)において、防音壁がない条件では、計測点通過後から出口までの区間での音圧は、入口から計測点までの音圧よりも高くなる傾向が見られた。これは、Fig.4.10(b)で示した、回転角度が $\alpha = 270$ 度の場合の水平方向放射特性によると水平角度が 60 度と 135 度の時に最も音圧が高くなっており、受音点の正面よりも前後の音圧の方が高くなるものと考えられる。また、Fig.4.11(b)において、防音壁がある条件では、入口から計測点までの音圧が高くなる傾向が見られる。この傾向は、水平方向放射特性のディップにより生じると考えられ、音源がキャビティ部で発生する空力音であるため、音源として点音源のような均

一の指向性とは異なるものであると考えられる。また、Fig.4.10(a)～(c)の水平方向指向性から見ても、この音源の場合、速度が増加するに従いキャビティ部で発生する空気の渦が後方に移動する現象が起きることになり、音源の指向性が後方に向いていることに起因していると言える。

以上の結果から、超高速移動音源の防音壁の遮音性能に関して、本実験手法を用いることで、検討が可能であると考ええる。しかし今回のように、音源にキャビティから発生する空力的な音を用いると音源の移動速度に応じた後方への放射指向性を持つことや水平回転角度に対してそれぞれ指向性が異なり、防音壁がある場合とない場合を差し引きして挿入損失を求めるのには、それぞれの指向性が異なるのでは、挿入損失を求めることができないことから、このキャビティ音源を用いて防音壁の遮音量の検討を行うのは困難であることが分かった。新幹線やリニアモーターカーなどが高速に移動する際に発生する騒音として問題である空力騒音は、このキャビティ音源が持つ音源と同様の特性を有していると思われるため、その意味でこの検討は有効であるものと考えられる。従って、音源が静止した状態においてもまた空気中を移動している状態でも、音源から放射される音が均等に広がる特性を有する音源が必要であり、なおかつ防音壁により遮音された状態でも十分な S/N が確保できる音源を用いた実験を行う必要があると考える。

4.5. スピーカー音源を用いた実験

次に本章では、音源が高速で移動した時の防音壁の挿入損失について、実験により検討するために高加速・高減速に耐えるスピーカーによる無指向性の音源を製作し、音源が高速移動する場合のドップラー効果を考慮した防音壁の挿入損失について実測した結果を述べる。

音源を高速で移動させるために、4.2.章で示した（財）鉄道総合技術研究所のトンネル微気圧波低減対策列車トンネル模型実験装置を用いた。

音源は、列車の車両模型の後尾部分に発振器、アンプ、電源及びスピーカーを一体として組み込み、スリット部から放射される音を音源とした。音源の周波数は、新幹線が高速で走行する際に車両下部から発生する騒音の周波数のピークが1~2kHzの帯域であることから、本実験ではその中間的な周波数の1.5kHzを対象とした。また本実験では、縮尺は1/10であり、物理量の相似則の関係から、音源の周波数は対象周波数の10倍の15kHzとした。速度に対する縮尺は、実物と模型における空気の密度が等しく音速が変わらないため、等価としている[2-11]。

4.5.1. 回路の仕様及びスピーカー特性

車両模型の後尾に発振器、アンプ、電源及びスピーカーを一体として組み込むためには、車両模型の中心部をピアノ線が貫通しているため、超小型の発振器とアンプをピアノ線に接触しない空間に配置する必要がある、またスピーカーについても中心部をピアノ線が貫通するための空間を有する構造である必要がある。音源装置の概要をFig.4.12に示す。

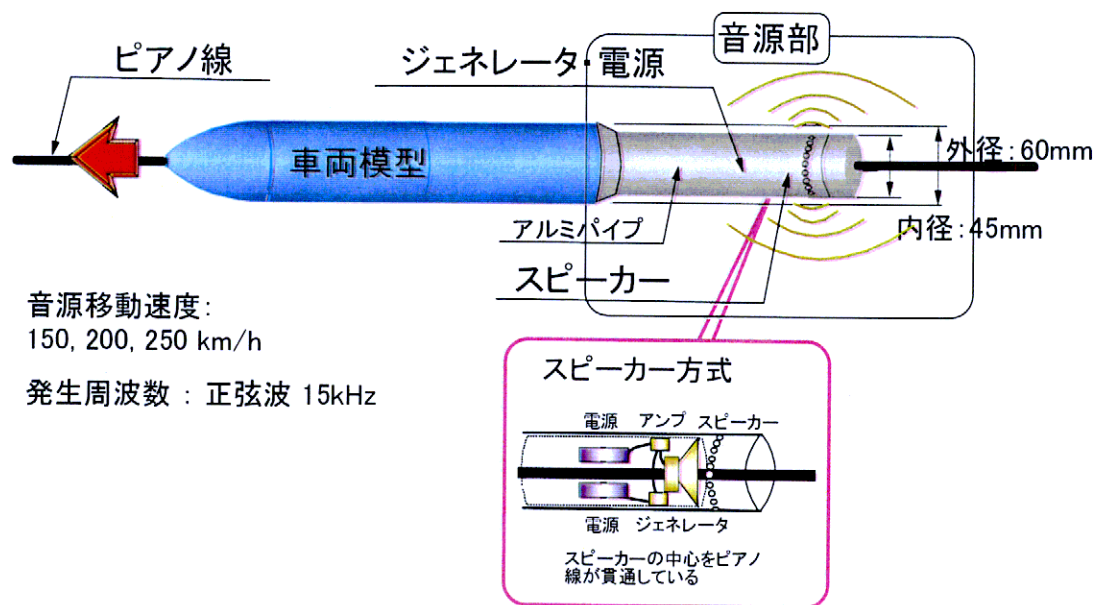


Fig.4.12 音源装置の概要

これらの条件を満たす音源の仕様を下記に示す。

4.5.1.1. 構成要素

高速移動用音源装置は、以下の構成要素からなる。

- ・ 電子回路部
 - (1) 発信器、電力増幅器
 - (2) 電源部、電源安定器
- ・ 発音部 (中心部分穴あき特殊スピーカー)

4.5.1.2. 各部仕様

・ 電子回路部仕様

(1) 発信器仕様

- a. 発信周波数 : 15kHz $\pm$ 100Hz (正弦波)
- b. 発信周波数安定度 : $\pm$ 10Hz (電源投入後 10 分以内)
- c. 歪率 : 1%以内 (15kHz $\pm$ 100Hz)

(2) 電力増幅器仕様

- a. 最大出力電力 : 0.45W (電源電圧: 9V)

b. 歪率 : 3%以内 (15kHz $\pm$ 100Hz)
($R_L=8\Omega$ 、 $T_a=25^\circ$)

c. 出力連続可変可能のこと

(3) 電源部仕様

a. 9V: 単4型アルカリ乾電池6本直列接続

b. 6本を一度に交換することが可能。

・発音部 (穴あき特殊スピーカー) 仕様

a. 外径 : $\phi 36 \sim \phi 38$

b. 中心穴部径 : $\phi 8 \sim \phi 10$

c. 出力音圧レベル : 90dB 以上 (15kHz, 0.5m)

・筐体部

a. 外径 : $\phi 38 \pm 0.5\text{mm}$

・電子回路部回路構成

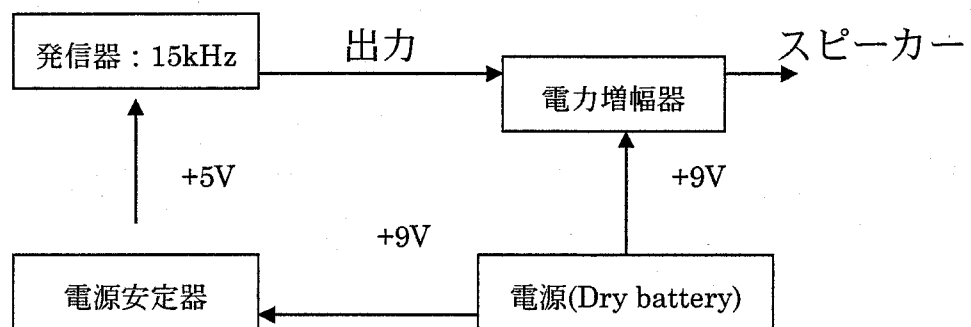


Fig.4.13 高速移動音源装置ブロック図

発信器: 低歪率ウィーンブリッジ発信器(LM-386)

電源安定化: 3端子シリースレギュレータ (78L05)

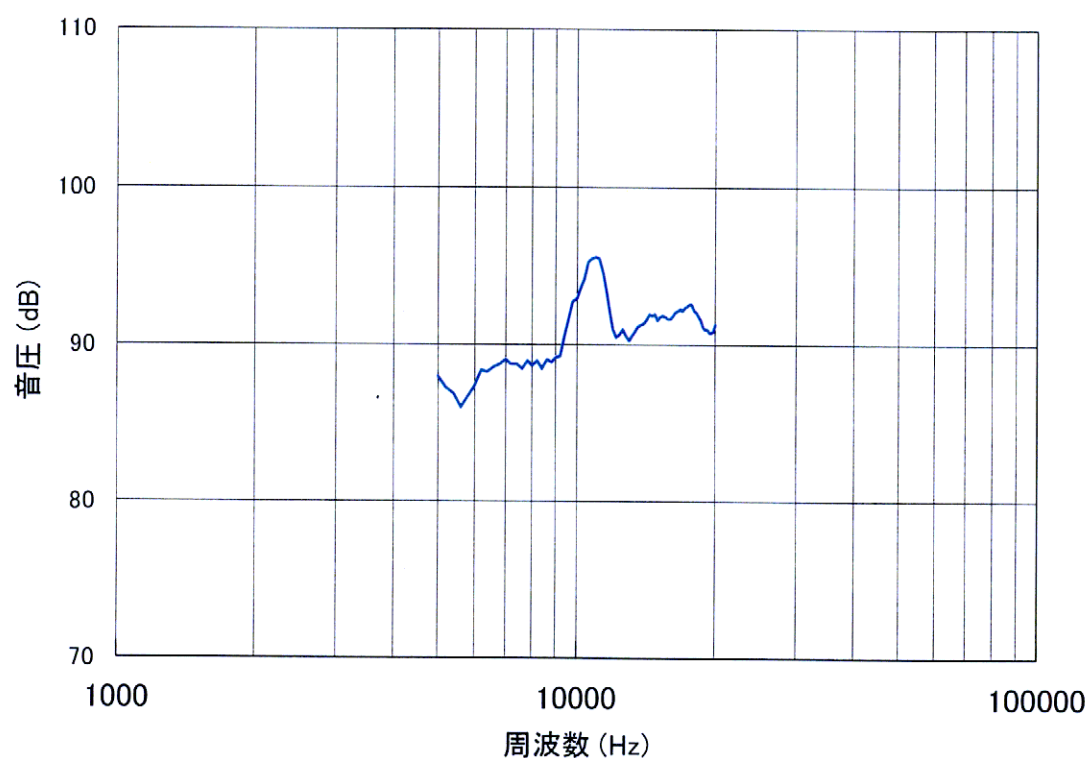
電力増幅器: 低歪率非反転線形電力増幅器(LM-386)

電源: 9V (単4型アルカリ乾電池6本直列接続)

・発音部

$\phi 50$ ドームタイプ電磁結合式動電型スピーカー [4-3]

Fig.4.14 に使用したスピーカーの出力特性を示す。測定は、無響室内で行い、測定点は、スピーカー正面の前端部から 0.5m 離れた位置である。スピーカーの出力試験の風景を Photo4.3 に示す。



マイクロホン：RION UC-29（グリッド外し） ハイパスフィルター：4,500Hz
スピーカー入力：10kHz 3.38V

Fig.4.14 スピーカー出力特性

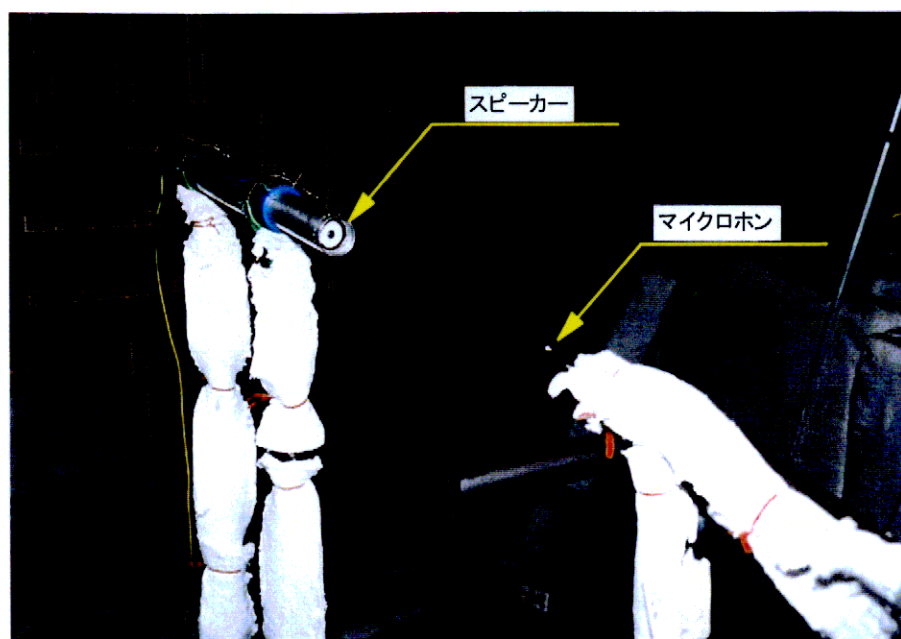
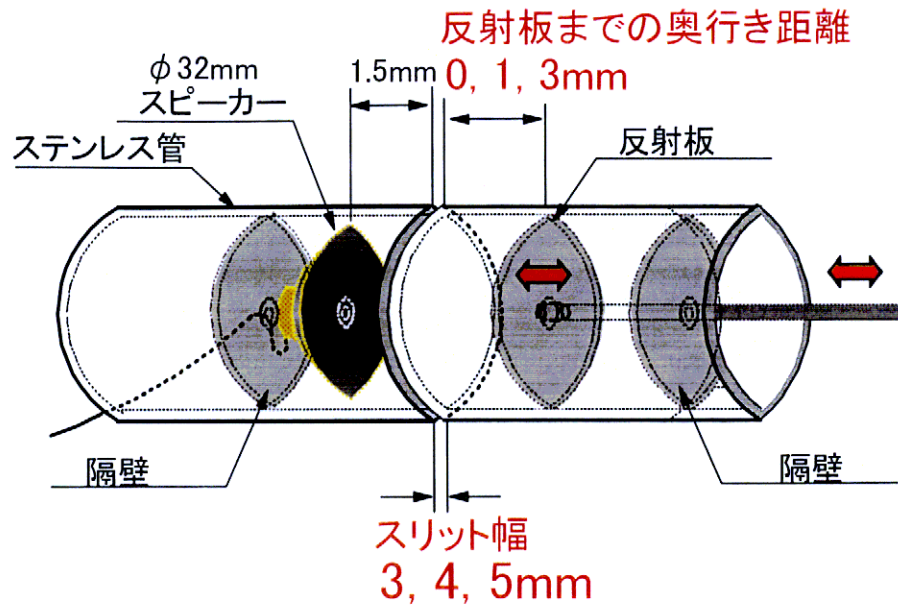


Photo4.3 スピーカー出力試験の風景

Fig.4.13 から、この実験に用いる音源として 15kHz の音を出力するのに問題のない出力特性であると考えられる。

4.5.2. 音源の指向特性に関する検討—周方向の開口率の検討

音源は、なるべく点音源の特性に近く均一に広がる特性を有していることが望ましい。そこで、最適なスリット幅を検討するために、車両模型の後部に付ける音源部の外径と同じ径の音源の検証実験装置を用いて検討を行った。装置の概略図を Fig.4.15 に示す。

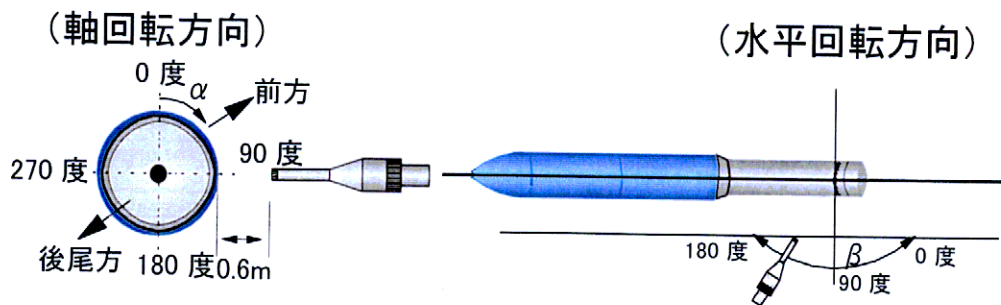


音源周波数: 15kHz (正弦波 波長23.1mm)

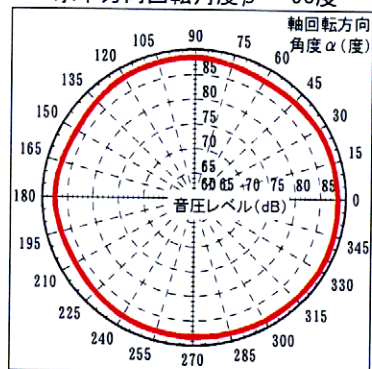
Fig.4.15 音源の検証実験装置の概略図

音源のスリットの幅は、音源周波数 15kHz の波長が 23.1mm (25℃) であることから、波長よりも十分小さい幅である必要がある。そこで、スリット幅を 3, 4, 5mm の各条件に加えて、スピーカーと相對している反射板の位置をスリットより後方に 0, 1, 3mm ずらした場合の指向性及び音圧分布を測定した。その結果、スリットは幅を広くすると、スリット通過による音圧の損失は小さいがスリット部の前後方側に強い放射を持ち、スリット幅を狭くすると指向性は均一になるものの放射される音圧が小さくなる傾向が認められた。この実験により、スリット幅が 4mm の場合で反射面を後方にずらさない条件 (0mm) が最も指向分布が安定し、なおかつ放射する音圧が高いことが分かった。そこで、音源部の側面の円周上に直径 4mm の穴を 23 個 (開口率 50%) 開け、その穴から音を放射することによる音源にした。

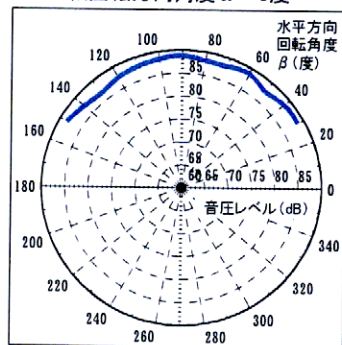
音源として車両模型の全周方向及び前後方向に対して指向性が均一に分布しているかを確認するため、無響室において放射される音の全周方向及び前後方向に対して実測した。その結果の一例を Fig.4.16 に示す。



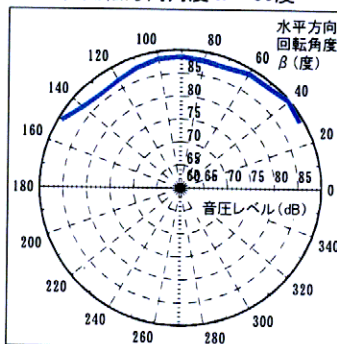
水平方向回転角度 $\beta = 90$ 度



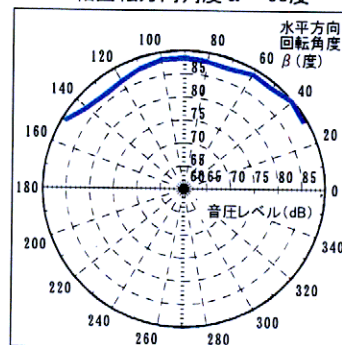
軸回転方向角度 $\alpha = 0$ 度



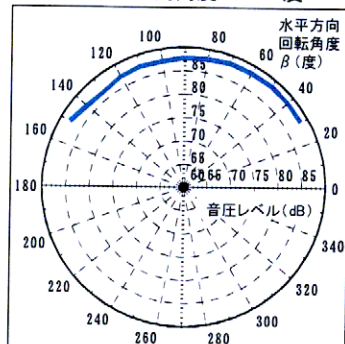
軸回転方向角度 $\alpha = 30$ 度



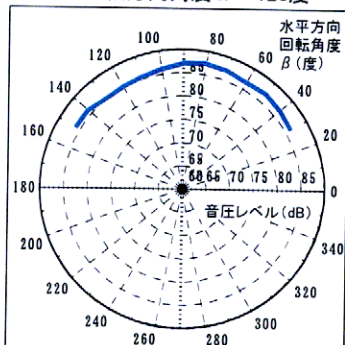
軸回転方向角度 $\alpha = 60$ 度



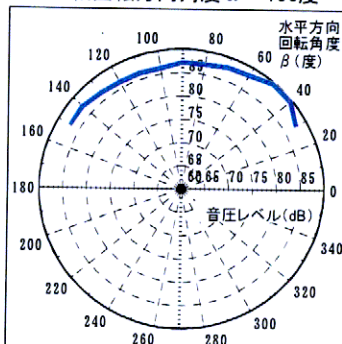
軸回転方向角度 $\alpha = 90$ 度



軸回転方向角度 $\alpha = 120$ 度



軸回転方向角度 $\alpha = 150$ 度



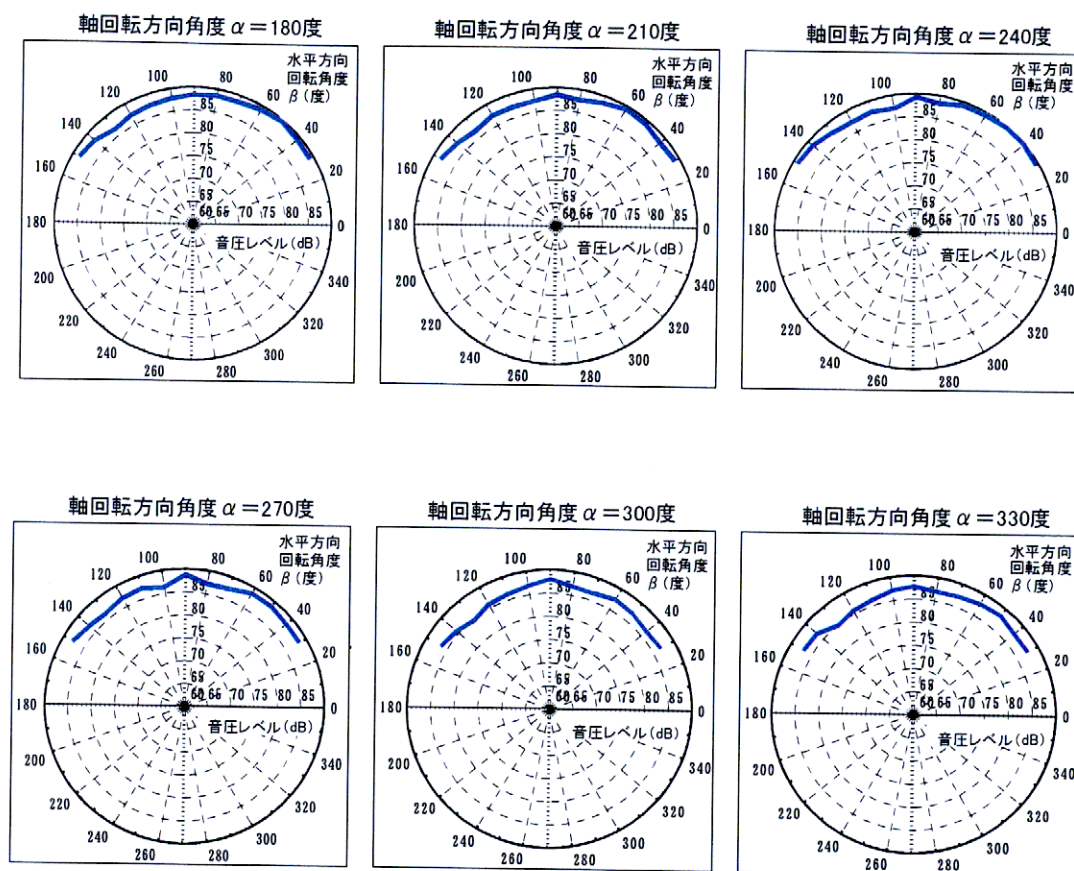


Fig.4.16 音源指向性実験結果（無響室内）

Fig.4.16 より、この実測の結果、音源は軸回転方向及び水平回転方向に対してわずかに 1～2 dB の凹凸は持つものの、比較的滑らかな無指向性に近い特性を有していることが確認できた。4.3.章で確認したように、音源の移動装置では、車両模型は加速装置で打ち出される際には回転することなく、加速装置に充填した時の姿勢を保ったままで減速装置まで移動する。そこで、軸回転方向の指向性が比較的安定している 330 度を受音点 2 に向けて打ち出すことにより、誤差の少ない計測が可能であると考えられる。

4.5.3. 音源の指向特性に関する風洞試験

高速移動音源の実験に際してスピーカーによる音源を用いるにあたり、音源が空气中を移動している状況では、空気の密度変化の影響によるスピーカーの音圧低下やスリット部で発生する空力的騒音の有無などにより、音源の放射特性

が変わることや周波数の変動を起こすことが懸念される。そこで空気の流れ場における音源の基礎的な特性を把握するために、(財)鉄道総合技術研究所の低騒音風洞を用いて、風速（音源の移動速度に相当）が 150～300km/h (50km/h ステップ)の場合の周波数及び音圧レベルの変動を計測することにより、軸回転方向放射指向性、水平回転方向放射指向性について検討した。

実測の結果の例として、250km/h における水平方向回転角 (β) が 90 度の場合の軸回転方向放射指向特性と、軸回転方向回転角 (α) が 330 度の場合の水平回転方向の放射指向特性を Fig.4.17 に示す。

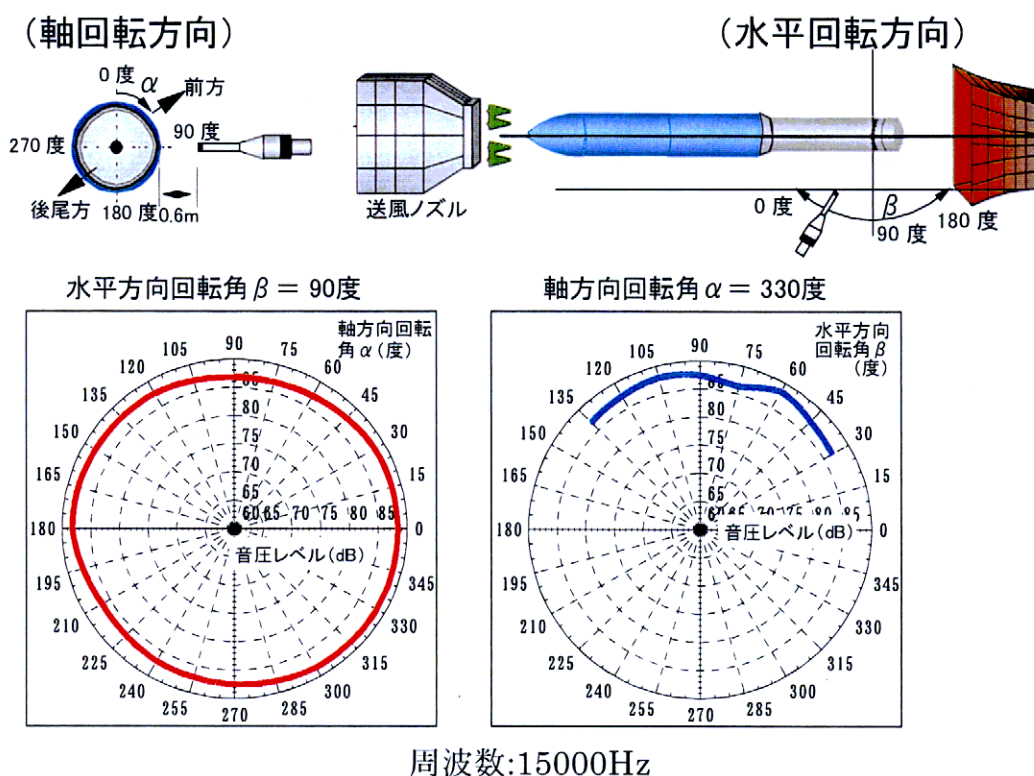


Fig.4.17 音源指向性風洞実験結果 (250 km/h)

この結果、空気の流れの場における音の放射特性は、音圧が軸回転方向及び水平回転方向に対して 86～88dB の範囲であり、Fig.4.16 で示した空気が静止している状態とほぼ一致した分布をしており、空気の流れの影響を受けず比較的滑らかな無指向性に近い特性を有していることが確認された。防音壁の挿入損失の検討では、防音壁のない状態とある状態との差を取るため、軸回転方向の

音圧レベルに対して差がない必要がある。軸回転角度が 300 度から 15 度の範囲では、0.2dB 以内の差であり、この部分を受音点に向けて音源を移動させることにより、誤差の生じない測定が可能であると考えられる。また、空気の流れがスピーカー振動膜面に当たることで周波数の変調を起こす現象もなく、流れがスリット部に当たることで起こる空力的騒音も観測されなかった。

4.5.4. スピーカー音源を用いた遮音量に関する実験

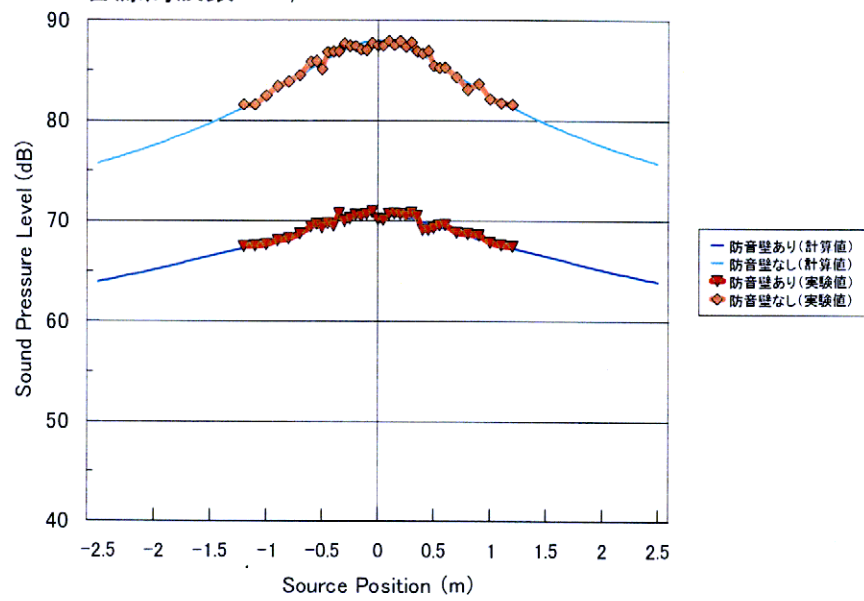
4.5.4.1. 解析の概要

データのサンプリング周波数は、50kHzである。FFT長は2048点であり、周波数分解能は、24.4Hzである。データ解析ウインド長は256点とし、オーバーラップ長は220点とした。

4.5.4.2. 音源が静止している場合の防音壁遮音量の実験結果

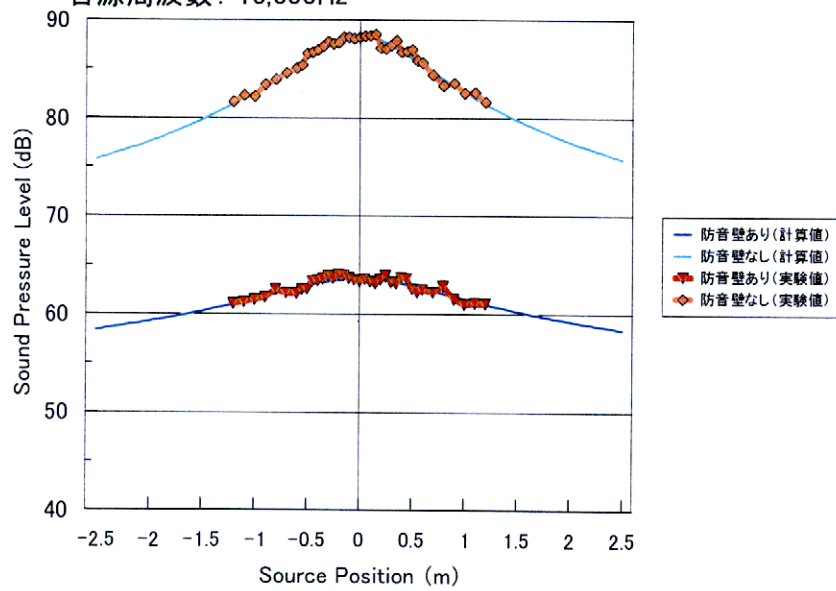
音源が静止している条件において、防音壁がある場合と無い条件において、各受音点における音圧の変化を Fig.4.18 に示す。音源は、受音点正面から手前側、後方側とも 1200mm の範囲において 50mm 間隔に音源を移動することにより測定を行った。計算値は、音源から受音点の距離に応じた距離減衰と防音壁がある場合には回折減衰量は前川チャートを用いて算出している。

受信点1 (高さ1219, 離れ600) 回折角度30度
音源周波数: 15,000Hz

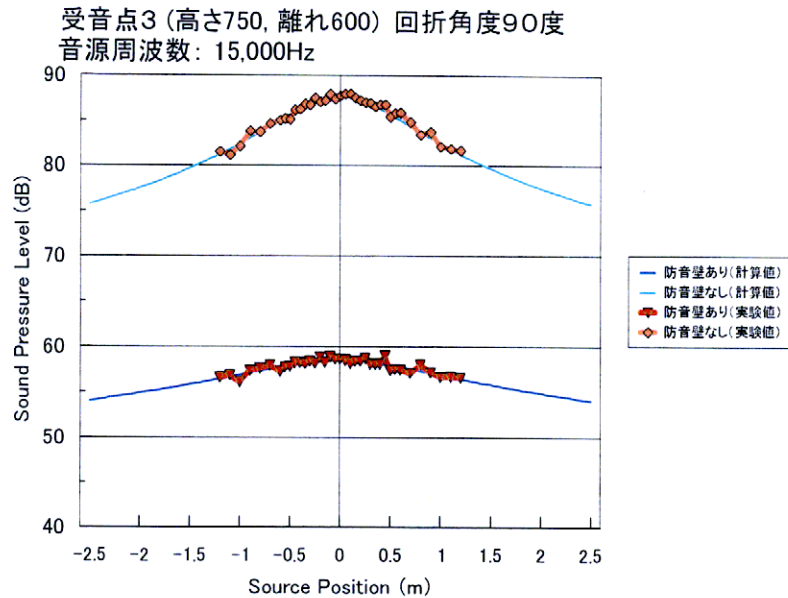


(a) 受信点1 (回折角度 30 度)

受信点2 (高さ1000, 離れ600) 回折角度67.4度
音源周波数: 15,000Hz



(b) 受信点2 (回折角度 67.4 度)



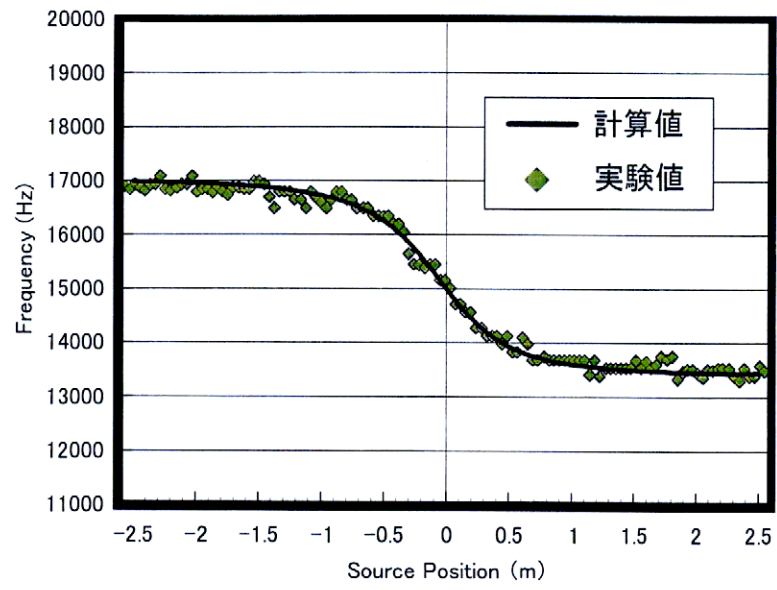
(c) 受音点3 (回折角度 90 度)

Fig.4.18 音源が静止している条件における各受音点での音圧の変化

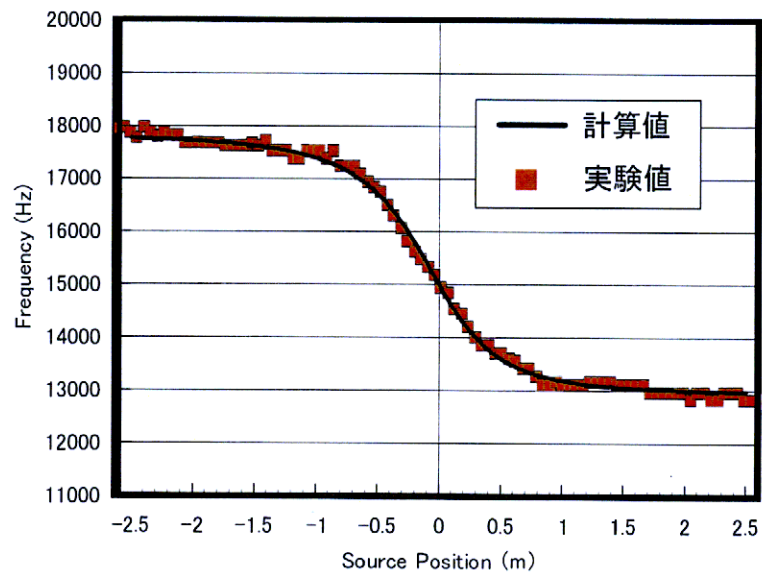
Fig.4.18 により、何れの回折角度においても実験値は多少の凹凸はあるもののほぼ計算値と一致しており、受音点正面に対して前後で対称になっている。これは、Fig.4.16 の音源指向性実験結果で示したような均一に広がる指向性に対して、減衰は音源から受音点の距離に応じた距離減衰と防音壁の回折減衰によるものであるため、受音点正面を中心として対称となる音圧の変化になったものと考えられる。

4.5.4.3. 高速移動音源を用いた防音壁遮音量の実験結果

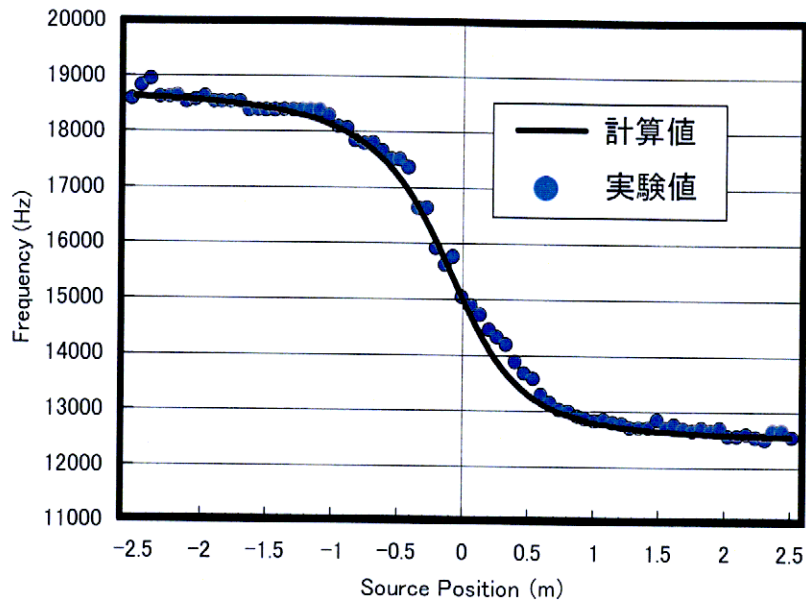
音源の速度が150, 200, 250km/hで防音壁が無い条件において、受音点2で観測された音圧レベルが最大になる際の周波数について実験値と計算値を比較した結果をFig.4.19(a)~(c)に示す。



(a) 150km/h



(b) 200km/h



(c) 250km/h

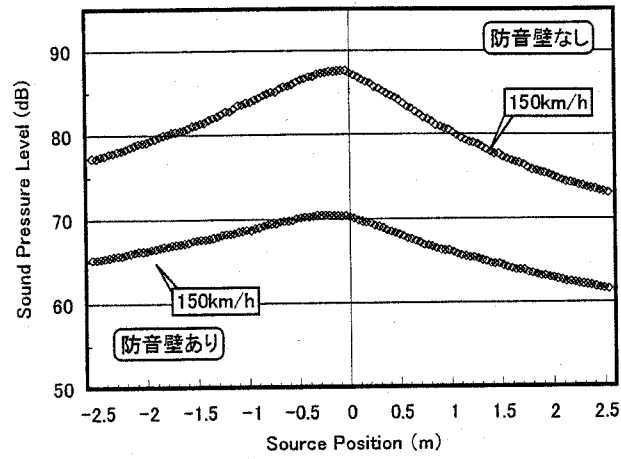
Fig.4.19 周波数変調について実験値と計算値を比較した結果

移動音源のドップラー効果による周波数変調の計算は、周波数 ν の音源が ν_s の速度で移動している時、音源移動方向と θ_s をなす角にある静止した受音点で観測される音の周波数 ν_i は次式で表せるので、この式を用いている。

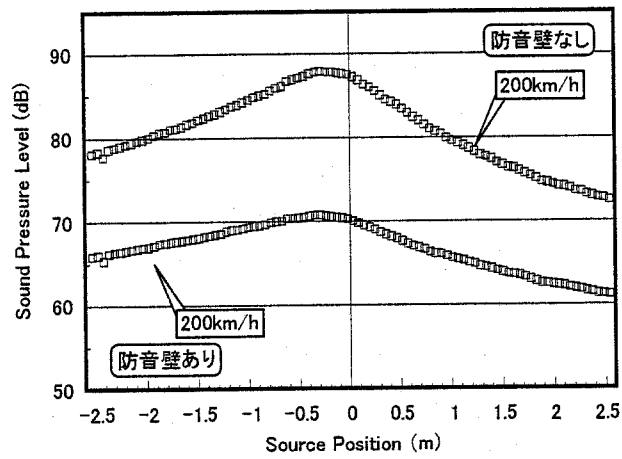
$$\nu_i = \nu \frac{c}{c - \nu_s \cos \theta_s} \quad (4.1)$$

Fig.4.19(a)～(c)により、受音点で観測される音の周波数は、計算で求めた周波数と概ね一致しており、どの速度においても周波数はマイクロホン正面の手前 1m から通過後 1m の範囲で大きく変調していることが分かる。

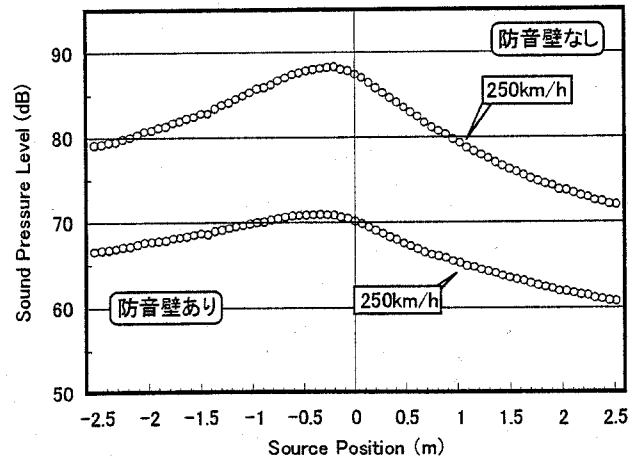
各受音点で観測された音圧レベルの変化を Fig.4.20(a)～(c)に示す。グラフ中の上の段が防音壁なしの条件、下の段が防音壁がある条件である。また、各速度条件、受音点において、音圧レベルが最大となる時の最大値とその時の音源の位置を Table4.1 に示す。



(a-1) 受音点1 150km/h

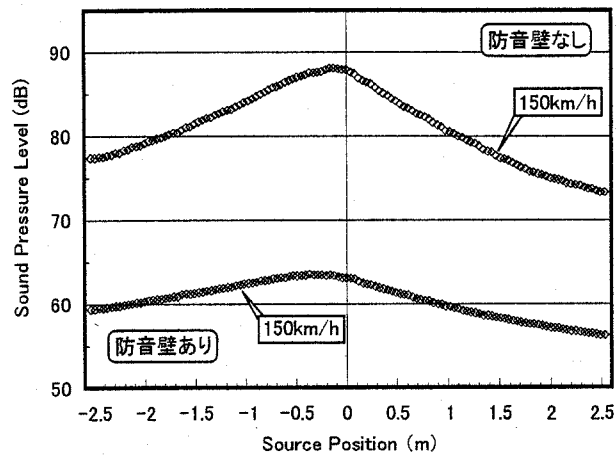


(a-2) 受音点1 200km/h

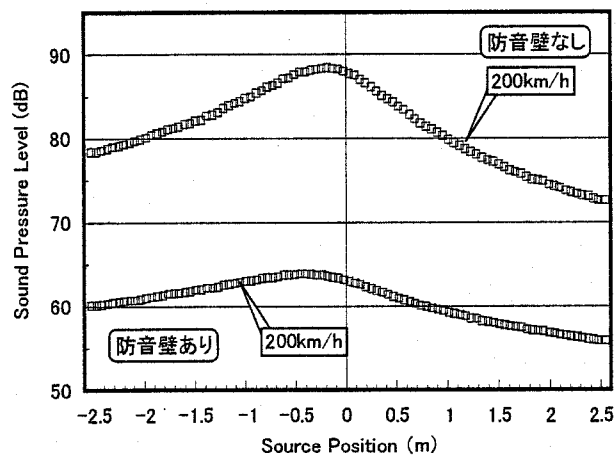


(a-3) 受音点1 250km/h

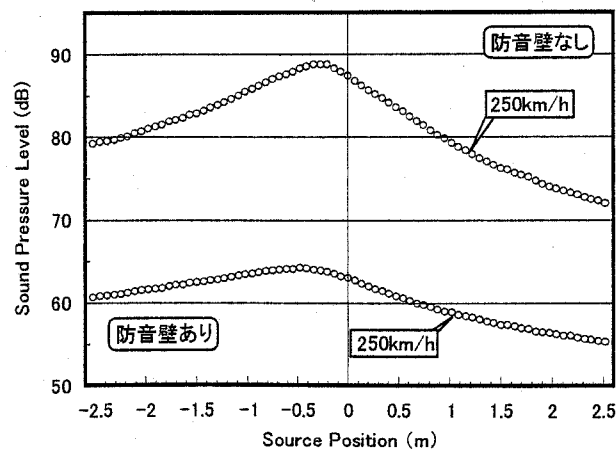
Fig.4.20(a) 各受音点の音圧レベルの変化 (受音点1, 回折角度 30 度)



(b-1) 受音点 2 150km/h

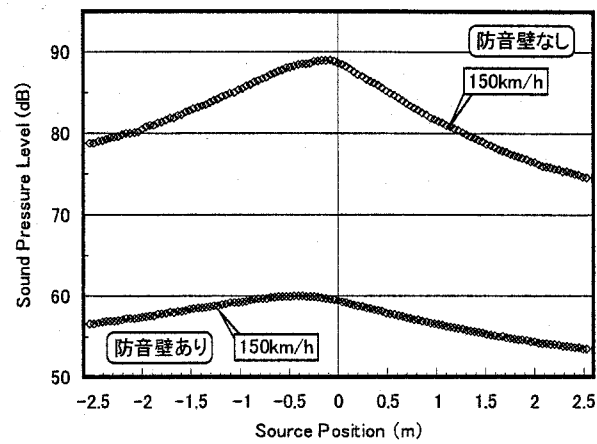


(b-2) 受音点 2 200km/h

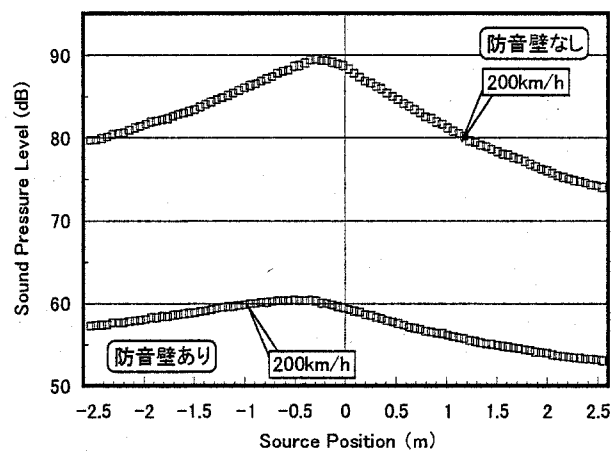


(b-3) 受音点 2 250km/h

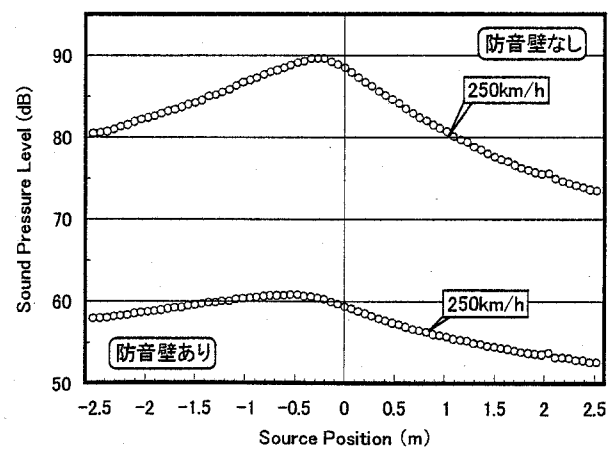
Fig.4.20(b) 各受音点の音圧レベルの変化 (受音点 2, 回折角度 67.2 度)



(c-1) 受音点3 150km/h



(c-2) 受音点3 200km/h



(c-3) 受音点3 250km/h

Fig.4.20(c) 各受音点の音圧レベルの変化 (受音点3, 回折角度 90 度)

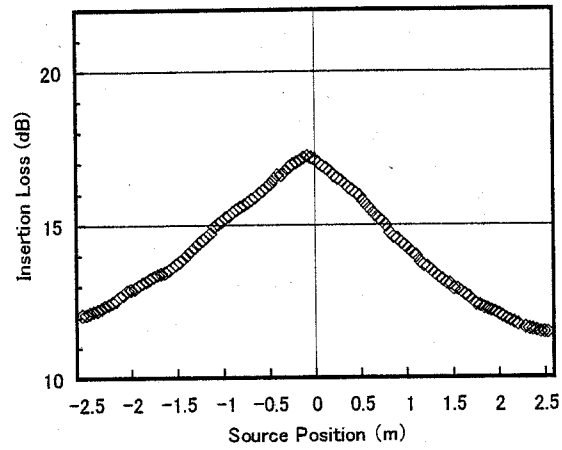
Table4.1 音圧レベルが最大となる時の最大値と音源の位置

		防音壁なし		防音壁あり	
		位 置 (m)	最大値 (dB)	位 置 (m)	最大値 (dB)
受音点1 (回折角度30度)	150km/h	-0.04	87.6	-0.25	70.5
	200km/h	-0.19	87.9	-0.29	70.8
	250km/h	-0.20	88.3	-0.33	70.9
受音点2 (回折角度67.4度)	150km/h	-0.16	88.1	-0.37	63.5
	200km/h	-0.18	88.4	-0.45	63.9
	250km/h	-0.27	88.8	-0.47	64.2
受音点3 (回折角度90度)	150km/h	-0.08	89.0	-0.45	60.0
	200km/h	-0.29	89.5	-0.45	60.4
	250km/h	-0.29	89.6	-0.54	60.8

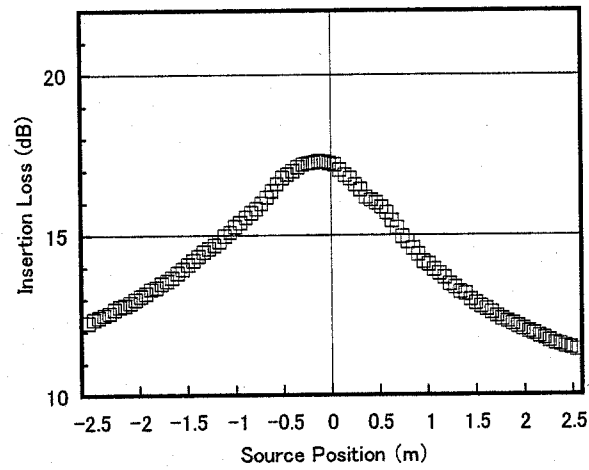
実験値は、各速度条件、防音壁の有無条件とも各 10 回の計測を行い、音源がそれぞれの位置にある時の音圧レベルを算術平均して求めた。各計測における速度の誤差は、目標速度に対して+0.8~-0.4km/h であり、各音圧レベルのばらつきは、0.5dB 以内であった。

Fig.4.20(a)~(c)及び Table4.1 より、各受音点ともに音圧レベルが最大となる位置は、速度が速くなるに従い、手前側に移動する傾向がある。また、防音壁がある場合は、防音壁がない場合に比べて、音圧レベルが最大となる位置は、さらに手前側に移動している。防音壁がある条件における回折角度による違いは、250km/h の条件において、受音点 1（回折角度 30 度）の時-0.33m 手前であり、受音点 3（回折角度 90 度）の時、-0.54m 手前になっており、回折角度が大きくなるに従い、音圧レベルが最大となる点は、手前側に移動している。音圧レベルの最大値は、速度が速くなるに応じて、わずかながら上昇する傾向がある。

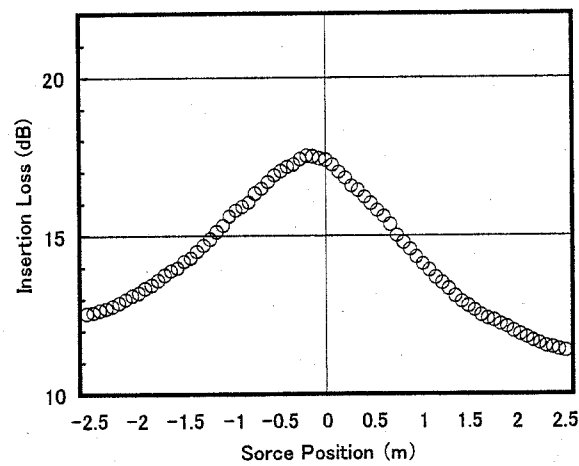
また、各受音点における防音壁の挿入損失について、防音壁のない条件から防音壁がある条件を差し引くことにより求めた値を Fig.4.21(a)~(c)に示す。その中で、各受音点において挿入損失が最大になる位置と最大値を Table4.2 に示す。



(a-1) 150km/h (受音点 1, 回折角度 30 度)

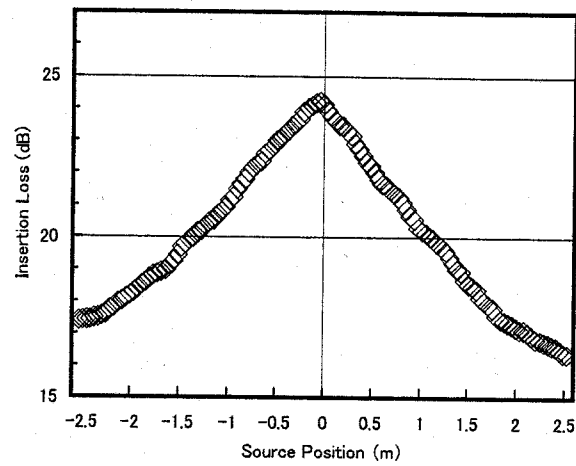


(a-2) 200km/h (受音点 1, 回折角度 30 度)

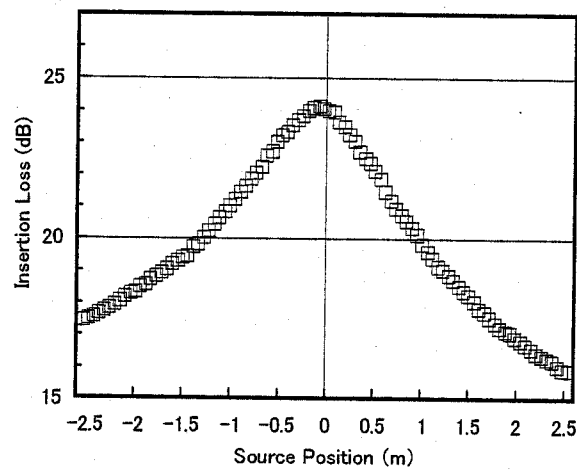


(a-3) 250km/h (受音点 1, 回折角度 30 度)

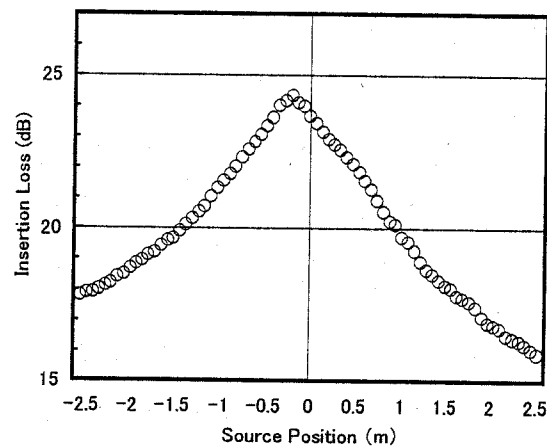
Fig.4.21(a) 受音点 1 における防音壁の挿入損失



(b-1) 150km/h (受音点 2, 回折角度 67.4 度)

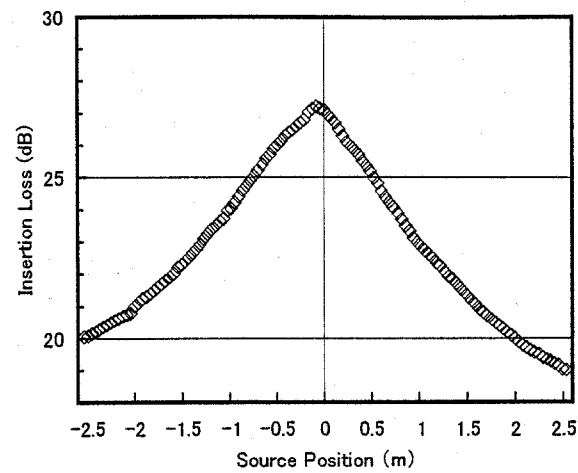


(b-2) 200km/h (受音点 2, 回折角度 67.4 度)

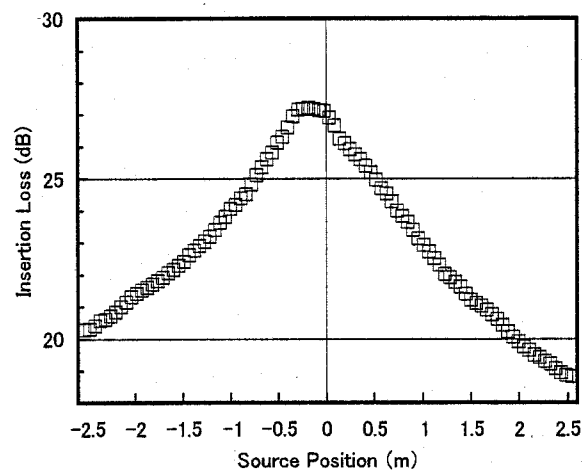


(b-3) 250km/h (受音点 2, 回折角度 67.4 度)

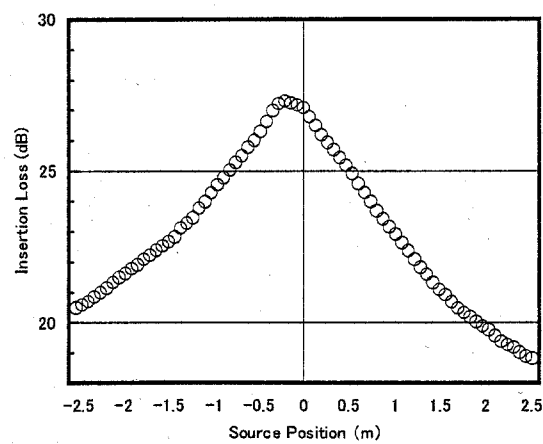
Fig.4.21(b) 受音点 2 における防音壁の挿入損失



(c-1) 150km/h (受音点 3, 回折角度 90 度)



(c-2) 200km/h (受音点 3, 回折角度 90 度)



(c-3) 250km/h (受音点 3, 回折角度 90 度)

Fig.4.21(c) 受音点 3 における防音壁の挿入損失

Table4.2 挿入損失が最大になる位置と最大値

		実験値	
		位置 (m)	最大値 (dB)
受音点1 (回折角度30度)	0(静止)	0	16.4
	150km/h	-0.09	17.2
	200km/h	-0.13	17.3
	250km/h	-0.13	17.5
受音点2 (回折角度67.4度)	0(静止)	0	23.5
	150km/h	-0.08	24.1
	200km/h	-0.13	24.1
	250km/h	-0.20	24.3
受音点3 (回折角度90度)	0(静止)	0	26.5
	150km/h	-0.12	27.2
	200km/h	-0.18	27.2
	250km/h	-0.20	27.5

Fig.4.21(a)～(c)及び Table4.2 によれば、挿入損失が最大となる位置と最大値は、例えば受音点2の150km/hでは-0.08mであり、250km/hでは-0.20m手前側であり、音源の速度が速くなるに従い、挿入損失の最大となる位置は手前側になる傾向がある。また、挿入損失の最大値は、受音点2の150km/hでは24.1dBであり、250km/hでは24.3dBであり、速度が上昇するに従い、速度とともにわずかながら最大値が大きくなる傾向も見られる。

従って、本実験により、音源が高速で移動する場合には、防音壁の挿入損失は速度に応じて大きくなり、挿入損失が最大となる位置は、速度に応じて手前側に移動することが実験的に明らかにすることができた。

4.6. まとめ

防音壁の遮音性能について音源が高速で移動する場合にはどのように速度が影響するのかについて、実験により音源が高速移動する際の防音壁の挿入損失を求めて検討を行った。

先ず、移動音源に対するドップラー効果などの現象を計測するにあたり、音源は固定された受音点の前を移動するため音源の位置が変化しマイクロホンに入射する方向が異なるので、音波が到来する角度に対する感度を把握しておく必要がある。そこで、高周波用マイクロホンに入射する音波の伝達方向に対する感度及び軸回りの回転による感度の影響を把握するために、音源にTSP信号を用いたインパルス・レスポンスの計測を行い、音源の移動速度に応じた周波数に対するマイクロホン感度の指向特性を求めた。マイクロホンの音波入射方向の角度における感度特性の測定結果から、正面から外れて入射する音波に対する感度は、正面からの角度が大きくなるに従い下がる傾向がある。このため、各受音点からエッジ方向の角度における感度（受音点1では-3.5dB、受音点2, 3では-3.6dB）と90度における感度（-3.0dB）のレベル差について測定値を補正することにした。

高速移動音源に対する防音壁の遮音性能について、実験による検討として、（財）鉄道総合技術研究所が所有するトンネル微気圧波低減対策列車トンネル模型実験装置を用いて、音源を高速で移動させ、防音壁がある場合とない場合の受音点での音圧を測定することにより、防音壁の挿入損失を検討することにした。まず音源として、車両を模擬した車両模型の先頭部分に周方向に溝を彫り込み、車両模型が高速で移動する際にキャビティ部から空力的に発生する音を音源とすることにした。キャビティ音源風洞実験の結果から、音源の周波数は、音源の軸回転方向に対して測定位置により大きく変動することが分かった。また、風速（音源の移動速度に相当）が250km/hの場合の音圧は87～98dBの範囲であり、軸回転角度が90度の場合には大きなディップが見られる。いずれの回転角度でも水平方向の放射特性は、前後に对称ではなく、車両模型の後方向に強く放射される傾向がある。トンネル微気圧波低減対策列車トンネル模型実験装置を用いて空力的音源を移動し、防音壁が無い条件と防音壁を設置し

た条件について音圧の計測を行った結果、超高速移動音源の防音壁の遮音性能に関して、音源にキャビティから発生する空力的な音を用いると音源の移動速度に応じた後方への放射指向性を持つことや水平回転方向に応じて指向性が異なるため、挿入損失を求めることができないことから、この空力的な音源を用いて防音壁の遮音量の検討を行うのは困難であることが分かった。

次に、音源が静止した状態でも移動した状態でも音が均等に放射される音源で、なおかつ防音壁により遮音された状態でも十分な S/N が確保できる音源を用いた実験を行うことにした。そこで、高加速・高減速に耐えるスピーカーによる無指向性の音源を製作し、音源が高速移動する場合の防音壁の挿入損失について実測することにした。音源が高速で移動する場合の防音壁の挿入損失の検討にあたり、トンネル微気圧波低減対策列車トンネル模型実験装置を用いて音源を移動し、防音壁が無い条件と防音壁を設置した条件について受音点での音圧変化の測定を行った。その結果から、音源が高速で移動する場合には、挿入損失は速度に応じてわずかではあるが大きくなり、挿入損失が最大となる位置は、速度に応じて手前側に移動することが実験的に確認された。