

Fig.4 高速移動音源模型実験概要図

2.2. 受音点

音源と受音点の位置関係を Fig.4 に示す。

音源から防音壁のエッジを回折する角度が 30 度となる受音点を受音点 1 とし、防音壁のエッジから音源と受音点が等距離で回折角度が 67.4 度となる点を受音点 2、回折角度が 90 度の条件を受音点 3 とした。

2.3. 音源

音源は、列車車両を模擬した弾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。また本実験は、1/10 の縮尺を想定しており、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[1]。

音源は、なるべく点音源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、弾と同じ径の点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.5 に示す。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。

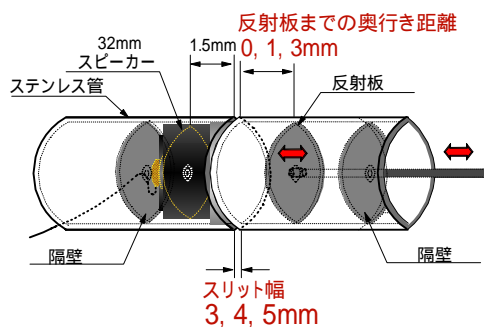


Fig.5 点音源検証実験装置概略図

そこで、スリット幅を 3, 4, 5mm の各条件に加えて、スピーカーと相対している反射板の位置をスリットより後方に 0, 1, 3mm ずらした条件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音源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、弾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とすることにした。

音源として軸回転方向及び水平回転方向に対して指向性がどの程度であるかを確認するため、無響室において放射される音の軸回転方向及び水平回転方向に対して実測した。その結果の一例を Fig.6 に示す。この実測の結果、音源は弾の全周方向及び前後方向に対してわずか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された。

2.4. 空気の流れ場における音源の指向特性に関する検討

高速移動音源の実験に際してスピーカーによる点音源を用いるにあたり、音源が空気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

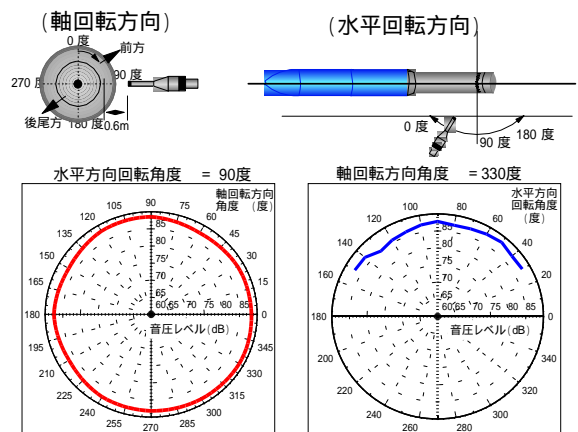


Fig.6 音源指向性実験結果 (無響室内)

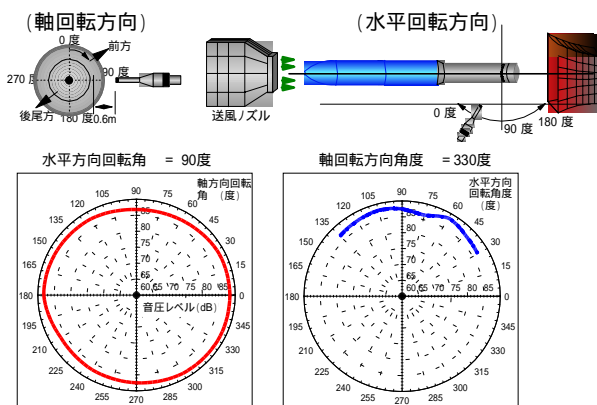


Fig.7 音源指向性風洞実験結果 (250 km/h)

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()が90度の場合の軸回転方向放射指向特性と、軸方向回転角()が330度の場合の水平方向放射指向特性を Fig.7 に示す。

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.6 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。

2.5 高周波マイクロホンの指向性に関する検討

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。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。対象となる音源の周波数は、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

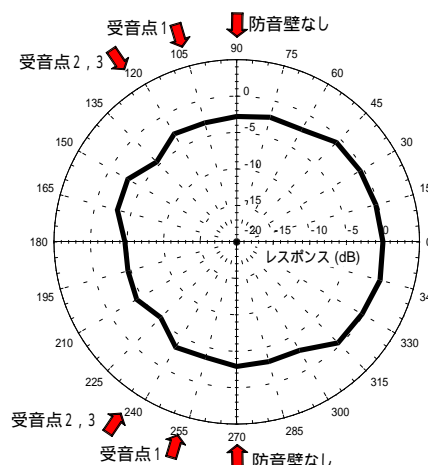


Fig.8 高周波マイクロホンの指向特性 (15000 Hz、グリッド外し)

マイクロホン：1/4 インチコンデンサ型

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。15kHz におけるマイクロホン膜面の垂直方向(正面)に対する平面内の回転角度における感度特性を Fig.8 に示す。軸回転方向の指向性は、マイクロホンの構造から考えて、無指向性であるとみなした。

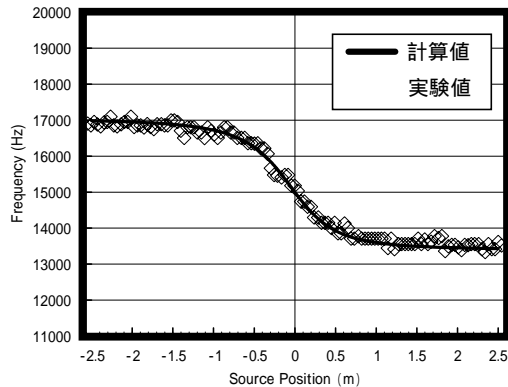
その結果、正面から外れて入射する音波に対する感度は、正面からの角度が大きくなるに従い下がる傾向がある。正面の感度に対して、90度の角度では、感度が 3.0dB 低下している。今回の移動音源の実験では、移動している音源に対して固定した受音点で計測を行うために、音源に対してマイクロホンの正面を向けて常に正対した状態で使うことができない。従って、移動する音源がどの位置にある時でもマイクロホンに対する角度が一定となるように、音源が移動する線と計測点を含む平面に対してマイクロホンを向きが90度の角度になるように設置することにした。この状態では防音壁が無く受音点から音源が見通せる条件でマイクロホンの向きが音源に対して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。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した。

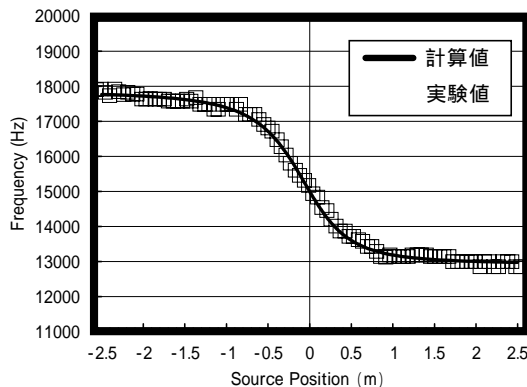
3. 実験結果

3.1. 解析の概要

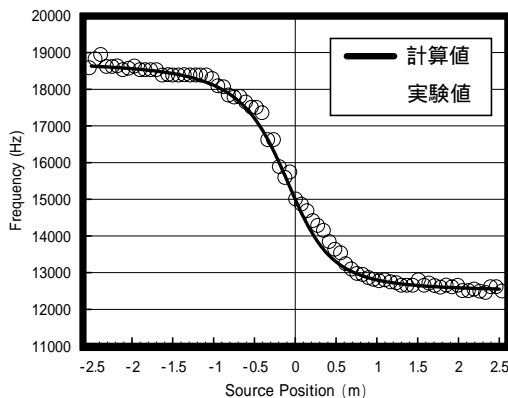
データのサンプリング周波数は、50kHzである。FFT長は2048点であり、周波数分解能は、24.4Hzである。データ解析ウィンド長は256点とし、オーバーラップ長は220点とした。



(a) 150km/h



(b) 200km/h



(c) 250km/h

Fig.9 受音点で観測される周波数変調について計算値と実験値の比較(受音点2)

3.2. 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における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.9(a)~(c)に示す。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。

$$\nu_i = \nu \frac{c}{c - \nu_s \cos \theta_s} \quad (1)$$

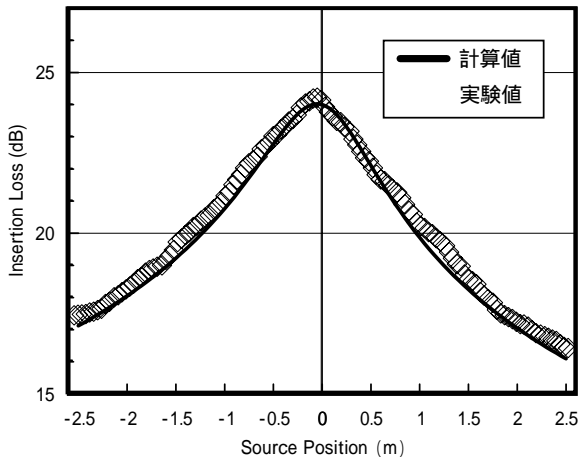
Fig.9(a)~(c)により、受音点で観測される音の周波数は、計算で求めた周波数と概ね一致しており、どの速度においても周波数はマイクロホン正面の手前1mから通過後1mの範囲で大きく変調していることが分かる。

また、受音点2における防音壁の挿入損失について、実験値と計算により求めた値とを比較した結果を Fig.10(a)~(c)に示す。その中で、挿入損失が最大になる位置と最大値を Table1 に示す。この計算では、既報[2]に示した前川の実験式にドップラー効果による周波数の変調及び音源の指向性を考慮して挿入損失を求めた。その音源の指向特性として、点音源がマツ八数 M_0 で移動する場合の観測点での音圧 p は、次式で与えられる。

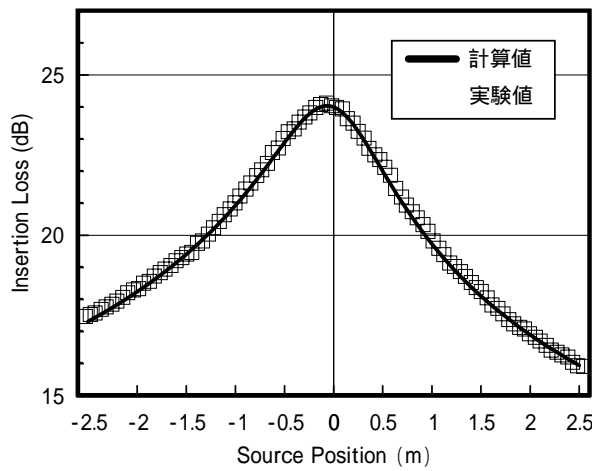
$$p = \rho_0 \left[\frac{q'(t - R/c)}{4\pi R(1 - M_0 \cos \theta)^2} + \frac{(\cos \theta - M_0)V_0 q(t - R/c)}{4\pi R^2(1 - M_0 \cos \theta)^3} \right] \quad (2)$$

ここで、 R は音が放射された時点での音源と受音点との距離[m]、 θ は音源と受音点を結ぶ線と音源の速度ベクトルのなす角度、 c は音速[m/s]、 ρ_0 は密度、 q は体積速度[m³/s]、 q' は体積速度 q を微分したものの[m³/s²]であるので、これを用いて各速度における音源の指向特性を計算する手法を用いている。

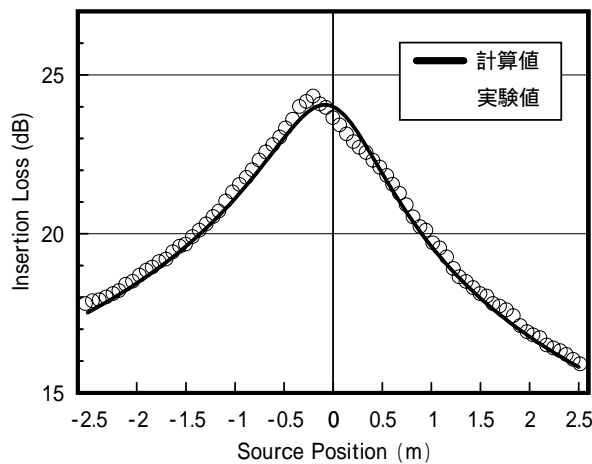
実験値は、各速度条件、防音壁の有無条件とも10回の計測を行い、各音圧レベルを算術平均して求め



(a) 150km/h



(b) 200km/h



(c) 250km/h

Fig.10 防音壁の挿入損失について実験値と計算値と比較
(受音点2 回折角度67.4度)

Table1 挿入損失が最大となる位置と最大値

		計算値		実験値	
		位置 (m)	最大値 (dB)	位置 (m)	最大値 (dB)
受音点1 (回折角度30度)	0km/h	0	16.8	0	16.4
	150km/h	-0.09	17.5	-0.09	17.2
	200km/h	-0.12	17.5	-0.13	17.3
	250km/h	-0.15	17.6	-0.13	17.5
受音点2 (回折角度67.4度)	0km/h	0	23.2	0	23.5
	150km/h	-0.03	24.0	-0.08	24.1
	200km/h	-0.07	24.0	-0.13	24.1
	250km/h	-0.09	24.1	-0.20	24.3
受音点3 (回折角度90度)	0km/h	0	26.0	0	26.5
	150km/h	-0.06	27.0	-0.12	27.2
	200km/h	-0.07	27.1	-0.18	27.2
	250km/h	-0.10	27.3	-0.20	27.5

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.10(a) ~ (c)によれば、挿入損失の計算値と実験結果とは概ね一致している。速度が上昇するに従い、挿入損失の最大となる点が、手前側に移動する傾向があり、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。この結果は、既報[2]で示したシミュレーションにより高速移動音源の場合の防音壁挿入損失を検討した傾向と一致している。従って、本実験により、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大きくなり、その最大となる点は、速度に応じて手前側に移動することが実験的にも明らかとなり、前報における理論的検討の結果を裏付けることができた。

4.まとめ

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点音源を移動し、防音壁が無い条件と防音壁を設置した条件についての実験を行った結果、音源が移動する場合には、挿入損失は速度に応じてわずかではあるが大きくなり、その最大となる点は、速度に応じて手前側に移動することが実験的にも確認された。この傾向は数値シミュレーションにより、高速移動音源の場合の防音壁挿入損失を検討した傾向と一致することが明らかとなった。

本報告では、音源が移動する場合の防音壁の挿入損失を求める際に、これまでは音源が静止しているものとして扱っていたが、ドップラー効果や音源の指向特性の変化などを考慮することが必要であることを実

験結果から提示したことになる。今後は、さらに詳細な検討を行う予定である。

<参考文献>

[1] Masanobu IIDA, Yasuyuki TANAKA, Katsuhiko KIKUCHI, Takashi FUKUDA, “Characteristics of the Pressure Wave Radiated from an Entrance Portal When a Train Enters a Tunnel “ , Proc. 50th Japan National Congress on Theoretical and Applied Mechanics, pp371-377, (2001.9)

[2] Seigo OGATA, Hideo TSURU, Hirofumi NAKAJIMA, Kyoji FUJIWARA, “Investigation for Insertion Loss of Noise Barrier for Sound Source Moving at High Speed”, Acoustical Science and Technology, Vol.24, No.3, pp.148-150, (2003.5)