

## 側面開口部付き緩衝工から放射される微気圧波

渥美 浩和\* 福田 傑\* 宮地 徳蔵\*

## Micro-pressure Wave Emitted from a Tunnel Hood with Side Openings

Hirokazu ATSUMI Takashi FUKUDA Tokuzo MIYACHI

An impulsive pressure wave emitting from a tunnel portal, called a micro-pressure wave, is one of important wayside environmental problems in high-speed railways. A hood with side openings on its side wall installed at the tunnel portal of the train *entry* side is the principal ground-side countermeasure for reducing the micro-pressure wave. However, the micro-pressure wave tends to have a large peak value near side openings of the hood when the micro-pressure wave is emitted from the tunnel *exit* portal with the hood. In this study, a model experiment focused on the effects of the hood at the tunnel *exit* portal with side openings was carried out. In addition, a simple theoretical model was developed and the analytical results obtained by this model were found out to agree well with those of the model experiment.

キーワード：トンネル微気圧波，圧縮波，トンネル緩衝工，側面開口部，模型実験，音響解析

## 1. はじめに

列車が高速でトンネルに突入すると、トンネル内に圧縮波が形成され、退出側の坑口に向かって音速で伝播する。この圧縮波がトンネル内を伝播し、列車突入と反対側のトンネル坑口に到達すると、トンネル坑口から周囲へパルス状の圧力波が放射される。このパルス状の圧力波はトンネル微気圧波<sup>1) 2)</sup>と呼ばれ、トンネル坑口付近における騒音や振動等の環境問題の原因となる場合がある。微気圧波の最大値は退出側坑口に到達した圧縮波の圧力勾配（圧力の時間微分） $\partial p/\partial t$ の最大値にほぼ比例する。したがって、微気圧波の対策のためには圧力勾配最大値を低減することが重要である。地上側の微気圧波対策としては、列車突入側における側面開口部（以下、開口部）付きトンネル緩衝工の設置が代表的である。これによって、列車のトンネル突入時に形成される圧縮波の圧力勾配最大値が低減され、退出側坑口から放射される微気圧波を低減することができる。しかし、日本における鉄道トンネルは一般的に上下線で共用されるため、当該線における突入側での緩衝工の設置は、反対線に対しては退出側坑口に設置することになってしまう。

退出側坑口に設置された緩衝工（以下、退出側緩衝工）から放射される微気圧波に関する既往の研究<sup>2) 3)</sup>では、列車が退出する緩衝工口からの距離がトンネル直径程度の測定点の場合に、開口部から放射される微気圧波の影響により微気圧波最大値の増大する箇所があることを報告している。開口部付近に家屋が存在する場合もあるた

\* 環境工学研究部 熱・空気流動研究室

め、その影響を定量的に評価する方法が必要とされる。

微気圧波の既往の評価方法として、トンネル坑口から放射される微気圧波に対して、地形の影響をトンネル坑口まわりの立体角<sup>1) 2)</sup>や境界積分方程式<sup>4)</sup>で表現する解析モデルがある。さらに開口部のない退出側緩衝工から放射される微気圧波については、入射波成分（圧縮波）に対する緩衝工の断面積変化の影響や緩衝工内での多重反射を考慮した音源モデルが提案されている<sup>5)</sup>。しかし、ある測定点における微気圧波に対する緩衝工口や各側面開口部による寄与については明らかではない。

そこで本研究では、側面開口部を有する退出側緩衝工から放射される微気圧波の特性を模型実験により確認した。さらに、微気圧波の簡易解析モデルを構築し、模型実験の結果との比較により、モデルの有用性について検証を行った。

## 2. 模型実験による微気圧波特性の把握

## 2.1 模型実験の概要

退出側緩衝工から放射される微気圧波の特性を把握するために模型実験を行った。トンネル内圧縮波の形成方法として列車模型発射装置<sup>6)</sup>を使用した。トンネル模型の外に配置するマイクロホンと退出列車模型との干渉を避けるために、トンネル模型を枝坑に分岐して、枝坑出口を退出側トンネル坑口とみなして実験を行った。本研究では緩衝工口および開口部という複数箇所から放射される微気圧波の「音源」のモデル化を目的としている。そのためには、地形条件の影響を排除した実験を行

特集：沿線環境



図1 自由空間における模型実験状況

表1 退出側緩衝工の側面開口部の条件

	側面の開口状況と寸法(mm) 〔□：開口部〕	開口面積(mm <sup>2</sup> )				
		S <sub>w1</sub>	S <sub>w2</sub>	S <sub>w3</sub>	S <sub>w4</sub>	合計 S <sub>w,all</sub>
Case1		495	495	564	564	2,118
Case2		495	495	363	564	1,917
Case3		495	-	363	363	1,220

う必要があり、放射された微気圧波と実験室の壁面や床面、天井による反射波が重畳しないようにしなければならない。本研究では緩衝工口中心から実験室の壁面等までの距離が微気圧波の波長程度になるようにした。本研究ではこの条件を自由空間とみなす。模型実験状況を図1に示す。

本実験の概要図を図2に示す。トンネル模型として、本坑、枝坑ともに内径100mmの塩化ビニル製のパイプを用いた。枝坑の全長は約2mであり、本坑は分岐部の上流側、下流側共に枝坑の全長より十分に長いものを用いた。緩衝工模型は、1辺が104.8mmの正方形断面で全長は333.7mmである。緩衝工・トンネル断面積比 $n$ は実在のものと同じ1.4とした。開口部は緩衝工側面の片側のみに配置し、位置や寸法は実際の緩衝工をもとに決定した。なお、突入側坑口に緩衝工は設置していない。トンネル模型の断面積を新幹線の実トンネル坑口断面積63.4m<sup>2</sup>に対応させると、本実験の縮尺は1/90である。列車模型は先頭部長さ67.1mm、直径44.7mmの回転楕円体を用い、発射速度は230～270km/hとした。本稿では発生する微気圧波最大値が最も大きくなる270km/hの結果について述べる。なお、本実験は上述のようにトンネル模型を分岐しているため、実際の列車走行速度と鉄道トンネルにおける微気圧波最大値との関係には対応しない。

本実験における縮尺を考慮して、微気圧波の測定には精密騒音計(RION NL-32, 周波数範囲: 20Hz～20kHz)を使用した。マイクロホンは高さを緩衝工口床面に合わせ、緩衝工口床面中心からの距離を222mm(実スケールで20mに相当する。以下、20m相当)に設置することを

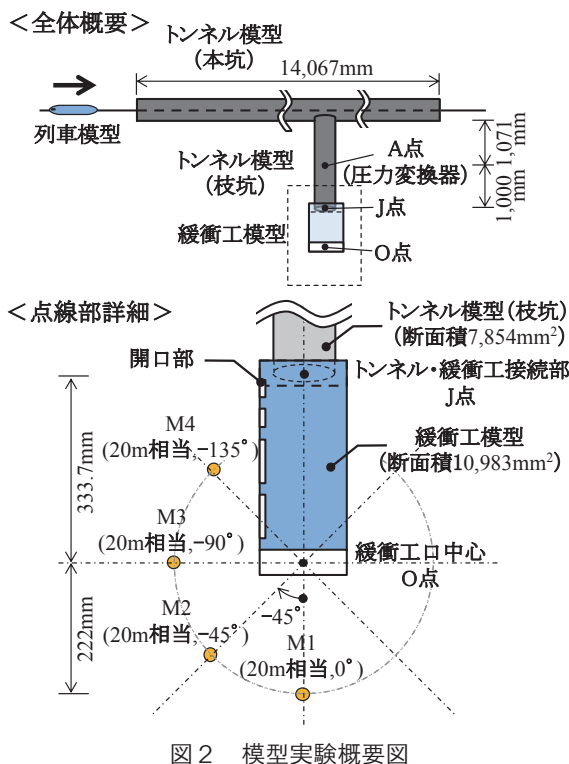


図2 模型実験概要図

基本とした。マイクロホンの位置は、緩衝工模型の床面高さの平面において緩衝工の線路方向中心軸と測定点の位置ベクトルのなす角 $\theta$ が0°から-135°の範囲とし、0°の測定点M1から時計周りに45°間隔で-135°の測定点M4まで、4測定点を配置した。なお、この範囲は緩衝工の線路方向中心軸に対して、開口部がある側面側にあたる。以下、各測定点をM1(20m, 0°)のように表記する。

また、退出側坑口に到達した圧縮波の圧力勾配を把握するために、退出側坑口から本坑側に1mの位置(A点)に圧力変換器(Kulite XCS-190-5G)を設置した。データのサンプリング間隔は0.05msとした。なお、微気圧波の評価時間は列車模型のトンネル本坑模型突入によって形成された圧縮波がA点に到達してから、枝坑出口での反射および分岐部での反射の後に再びA点に到達するまでの間とした。

実験条件は退出側緩衝工の有無および開口部の開口条件による微気圧波の変化を比較するために、Case0:退出側緩衝工なし、Case1～3:退出側緩衝工ありとした。緩衝工の各開口条件を表1に示す。なお、開口部の番号はトンネル枝坑側から順に付けた。開口条件は列車突入に対する微気圧波対策として実際に想定される条件とした。ここで $S_{wk}$ : $k$ 番目の開口部の面積である。また、トンネル模型の内円下端と緩衝工模型の床面は同じ高さであり、Case0ではトンネル模型の内円下端から各測定点までの距離が20m相当になるようにマイクロホンを設置した。したがって、トンネル模型中心と緩衝工口中心には上下方向に約2mmのずれがある。

2.2 模型実験結果

2.2.1 微気圧波波形の比較

各測定点における微気圧波波形の一例を図3に示す。なお、条件ごとの波形の重ね合わせは、M1 (20m,0°)の微気圧波が最大値となる時間  $t_{P_{max},M1}$  を基準とした。

緩衝工がある場合、微気圧波が最大値となった後に負圧を示している。これは退出側緩衝工内で圧縮波（または膨張波。以下、2つ合わせて圧力波と表現する）が多重反射すること起因するが<sup>5)</sup>、負圧の大きさは開口部に近い測定点ほど、または開口部の総面積  $S_{w,all}$  が大きい条件ほど大きい傾向がみられた。

その他の特徴として、開口部付近の測定点では微気圧波の時間幅が大きくなっていることが挙げられる。これは測定点までの距離が異なる複数の音源から放射された微気圧波が重なって一つの大きな波を形成しているためであると考えられる。さらに、この時間幅の大きさは同一の測定点であれば微気圧波最大値および  $S_{w,all}$  によらず、各条件でほぼ一定であることが分かる。したがって、退出側緩衝工から放射される微気圧波の波長は開口部と測定点との位置関係による影響が大きいと考えられる。以上の結果より、解析モデルの構築には、退出側緩衝工内における圧力波の多重反射や、複数の音源の位置および測定点との距離等を適切にモデル化することが重要であると考えられる。

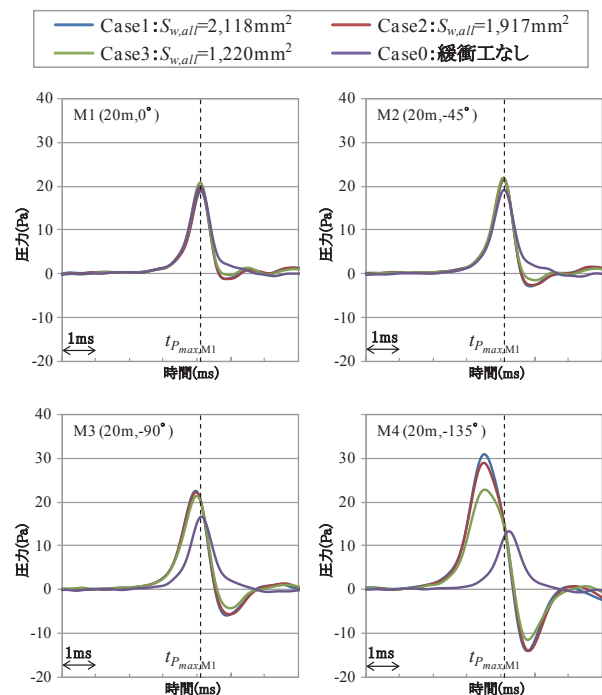


図3 模型実験における微気圧波波形の比較

2.2.2 微気圧波最大値の比較

各条件に対する20m相当点での微気圧波最大値を図4、開口部の総面積と微気圧波最大値の関係を図5に示

す。M1 (20m,0°) では緩衝工がある場合、 $S_{w,all}$  が大きいほど微気圧波最大値は小さくなる傾向がみられた。ただし、緩衝工がない場合を含め、いずれの条件においても微気圧波最大値は20Pa前後であり、顕著な差はみられなかった。他の測定点を比較すると、緩衝工がない場合は、 $|\theta|$  が大きくなると、微気圧波最大値が小さくなる傾向がみられた。それに対して緩衝工がある場合は、 $S_{w,all}$  が大きいCase1およびCase2において、 $|\theta|$  が大きくなると、微気圧波最大値も大きくなる傾向がみられた。これは測定点が側面開口部に近づくために、そこから放射される微気圧波の影響を強く受けているためと考えられる。ただし、 $S_{w,all}$  が小さいCase3ではM2～M4における顕著な差はみられなかった。また、今回の実験において最も顕著な差がみられたM4 (20m, -135°)の微気圧波最大値を比較すると、緩衝工がないCase0に対して  $S_{w,all}$  が最も大きいCase1では約2.3倍となった。

以上の結果より、退出側緩衝工から放射される微気圧波は、開口部付近において  $S_{w,all}$  が大きいほど増大することが確認できた。これは既報<sup>2) 3)</sup>の傾向と同じである。

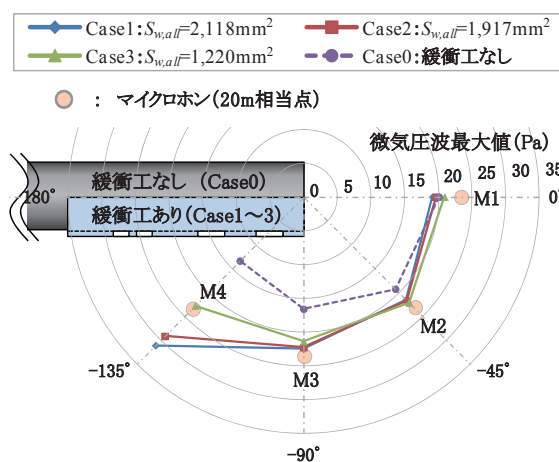


図4 模型実験における微気圧波最大値の比較

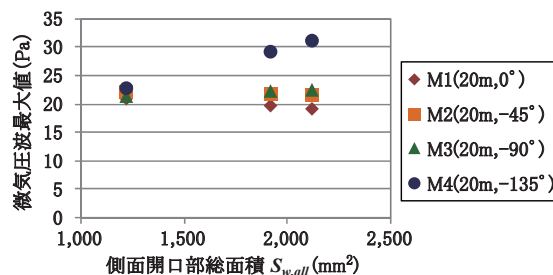


図5 側面開口部の総面積と微気圧波最大値

3. 数値解析

3.1 数値解析方法

模型実験における圧縮波によるトンネル内圧力変動を入力波形として、退出側坑口における開口部付き緩衝工

特集：沿線環境

から放射される微気圧波を解析する簡易モデルを構築した。この微気圧波を解析するためには、緩衝工内を伝播する圧力波を理論的に求める必要がある。類似する現象の解析手法として、列車が開口部付き緩衝工に突入する際に発生する圧縮波に関する空力音響理論<sup>7)</sup>や、開口のある全覆い上屋における列車通過時の圧力変動<sup>8)</sup>、スリット付シェルターから放射される微気圧波の数値解析手法<sup>9)</sup>が挙げられる。本研究における解析モデルの構築には、これらの知見を参考とした。

圧力波がトンネル内のみを伝播する場合と違い、緩衝工がある場合はトンネルから伝わった圧力波が緩衝工内を多重反射するためにモデルが複雑化する。そこで本研究では、トンネルと緩衝工の接続部 (J 点) における反射係数  $R (= (n-1)/(n+1))$ 、 $n$  : 緩衝工・トンネル断面積比 ( $= S_H/S_T$ )、 $S_H$  : 緩衝工断面積、 $S_T$  : トンネル本坑断面積) と  $k$  番目の開口部・緩衝工断面積比  $\alpha_{wk} (= S_{wk}/S_H$ 、 $S_{wk}$  :  $k$  番目の開口部面積) との積、あるいは  $\alpha_{wk}$  の高次項は小さいと仮定し、圧力波が伝播する際の複数の開口部間における相互干渉は無視した。

本研究では、考慮すべき微気圧波成分を以下の3種類とした。微気圧波成分の概要を図6に示す。

(a) 開口部がないとみなした退出側緩衝工の内部を圧力波が伝播して緩衝工口 (O 点) から放射される微気圧波の圧力  $P_{Mh}$

$$P_{Mh}(t) = \left(1 + \frac{\ell_H}{r_o} \cos \theta\right) \frac{2S_H}{\Omega c_0 r_o} \left(\frac{2}{n+1}\right) \times \sum_{m=0}^{\infty} (-R)^m \frac{dh}{dt}(t - t_A - t_m - t_{r_o}) \quad (1)$$

$$\left(t_{r_o} \equiv \frac{r_o}{c_0}, t_A \equiv \frac{L_A}{c_0}, t_m \equiv 2m \left(\frac{L_H + \ell_H}{c_0}\right)\right)$$

(b)  $k$  番目の開口部の影響で退出側緩衝工内に発生する圧力波が伝播して緩衝工口 (O 点) で放射される微気圧波の圧力  $P_{Muk}$

$$P_{Muk}(t) = - \left(1 + \frac{\ell_H}{r_o} \cos \theta\right) \times \frac{\rho_0 S_H \alpha_{wk}}{\Omega r_o} \frac{dv_k}{dt}(t - t_{wk} - t_{r_o}) \quad (2)$$

$$\left(t_{wk} \equiv \frac{L_{wk}}{c_0}\right)$$

(c)  $k$  番目の開口部から放射される微気圧波の圧力  $P_{Mvk}$

$$P_{Mvk}(t) = \frac{\rho_0 S_H \alpha_{wk}}{\Omega r_{wk}} \frac{dv_k(t - t_{rk})}{dt} \quad (3)$$

$$\left(t_{rk} \equiv \frac{r_{wk}}{c_0}\right)$$

ここで、 $t$  : 時間、 $\rho_0$  : 空気密度、 $c_0$  : 音速、 $\Omega$  : 放射立体角<sup>6)</sup>、 $L_A$  : トンネル内圧力測定点から緩衝工口までの距離、 $L_H$  : 緩衝工長さ、 $L_{wk}$  :  $k$  番目の開口部中心 ( $W_k$  点) から緩衝工口中心までの距離、 $r_o$  : 緩衝工口中心 (O 点)

から測定点までの距離、 $r_{wk}$  :  $k$  番目の開口部中心から測定点までの距離、 $m$  : J 点における反射回数、 $\ell_H$  : 緩衝工口面での開口端補正量 ( $= 0.61a_H$ )、 $a_H$  : 緩衝工等価半径 ( $= \sqrt{S_H/\pi}$ )、 $h$  : トンネル内圧縮波 (入射波) による圧力変動、 $v_k$  :  $k$  番目の開口部における流出速度である。非定常ベルヌーイの式を開口部に対して緩衝工内外で適用すると  $v_k$  は以下のように表される。

$$\rho_0 \ell_c \frac{dv_k(t)}{dt} = p_h(t) - \frac{\rho_0 c_0 \alpha_{wk} v_k(t)}{2} - \xi \frac{1}{2} \rho_0 v_k(t) |v_k(t)| \quad (4)$$

$$p_h(t) = \frac{2}{n+1} \{h(t - t_{hf}) - h(t - t_{hb})\} \quad (5)$$

$$\left(t_{hf} \equiv \frac{L_A - L_{wk}}{c_0}, t_{hb} \equiv \frac{L_A + 2\ell_H + L_{wk}}{c_0}\right)$$

ここで、 $\xi$  : 開口部における損失係数、 $\ell_c$  : 特性長さ (本研究では  $k$  番目の開口部の等価直径と近似)、 $p_h$  : 緩衝工内における圧力変動である。本研究では、式 (4) の  $v_k$  を陽解法で求めた。なお、鏡像法で地面の影響を考慮する場合は  $S_H$  や  $\alpha_{wk}$  等の定義が変わるため、注意を要する。

(a) ~ (c) の微気圧波成分をすべて足し合わせることで、任意の測定点における微気圧波  $P_M$  を求めることができる。

$$P_M(t) = P_{Mh}(t) + \sum_k \{P_{Muk}(t) + P_{Mvk}(t)\} \quad (6)$$

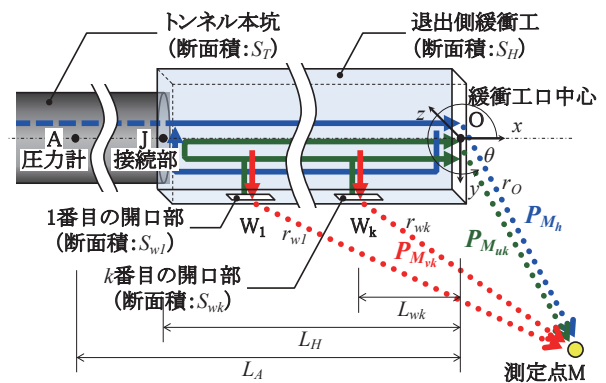


図6 考慮すべき微気圧波成分の概要

### 3.2 数値解析結果

前節で示したモデルにより、緩衝工模型から放射される微気圧波の数値解析を行う。解析に用いるパラメータとして、模型の寸法や各種距離、気温や大気圧等は実験時の値を用いた (図2参照)。本実験は自由空間で行ったため放射立体角  $\Omega=4\pi$ 、J 点における反射回数  $m$  は3回、開口部における損失係数  $\xi$  は文献8) を参考に  $\xi \approx 2.0$  とした。トンネル内圧縮波 (入射波) による圧力変動  $h(t)$  (入力波形) には A 点におけるトンネル内圧力データを用いた。解析はすべての実験に対して実施し、同条件における微気圧波最大値の平均を解析結果とした。

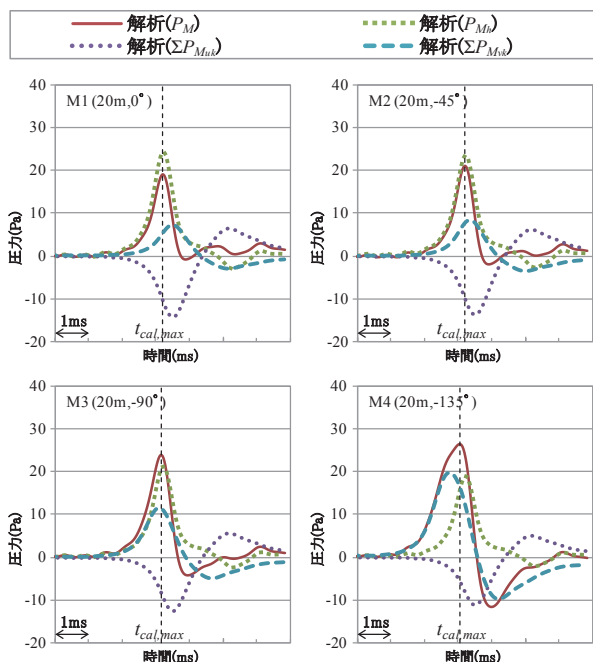


図7 Case1における微気圧波成分の比較（数値解析）

3.2.1 数値解析における各微気圧波成分

開口部の総面積  $S_{w,all}$  が最も大きい Case1 に着目して、数値解析における任意の測定点での微気圧波最大値  $P_{M,max}$  と各微気圧波成分を比較する。各微気圧波成分の波形を図7に示す。なお、図中の黒い点線は数値解析において微気圧波が最大値となる時間  $t_{cal,max}$  を示している。また、 $t_{cal,max}$  における  $P_M$  (つまり  $P_{M,max}$ ) に対する各微気圧波成分値との比（以下、成分比）を表2に示す。

M1 (20m, 0°) および M2 (20m, -45°) では  $P_{Mh}$  の成分比がいずれも1以上であり、 $P_{M,max}$  は  $P_{Mh}$  の寄与が大きいと判断できる。M3 (20m, -90°) においても M1 および M2 と同様に  $P_{Mh}$  の寄与が大きいと判断できるが、M1 および M2 と比較して  $\Sigma P_{Mvk}$  の影響も受けていることが分かる。一方、M4 (20m, -135°) では  $\Sigma P_{Mvk}$  の成分比が最も大きい。ただし、 $P_{Mh}$  の成分比も大きいことが分かる。

さらに、M4の  $\Sigma P_{Mvk}$  における開口部ごとの微気圧波波形を図8に示す。なお、凡例に  $S_{wk}$  および  $r_{wk}$  をあわせて示す。トンネル側から3番目にある開口部から放射される微気圧波が最も大きいことが分かる。微気圧波が大きくなった要因として、 $S_{wk}$  が大きいことおよび  $r_{wk}$  が小さいことが考えられる。ただし、 $r_{wk}$  が同程度で  $S_{wk}$  が異なる2番目および4番目の開口部から放射される微気圧波  $P_{Mv2}$ 、 $P_{Mv4}$  を比較すると、 $P_{Mv2}$  の方が最大値は大きい。式(3)より  $P_{Mvk}$  は  $S_{wk}/r_{wk}$  に比例するため、これが大きい  $P_{Mv4}$  の方が微気圧波最大値は大きくなると思われる。しかし、ここでは  $P_{Mv2} > P_{Mv4}$  となった。この要因として  $v_k(t)$  の影響が考えられる。 $v_k(t)$  は時間と位置によって変わ

表2 数値解析における各微気圧波成分の比率

微気圧波成分	比較項目	測定点			
		M4	M3	M2	M1
		実スケールで $r_o=20m$ 相当			
		-135°	-90°	-45°	0°
$P_{Mh}$	成分比	0.55	0.84	1.10	1.26
$\Sigma P_{Mvk}$	成分比	-0.19	-0.32	-0.45	-0.53
$\Sigma P_{Mv4}$	成分比	0.64	0.48	0.36	0.27

※■：当該測定点において成分比が最も大きい微気圧波成分

$\Sigma P_{Mvk}$ ( - , - )	$S_{wk}$ , $r_{wk}$	$\Sigma P_{Mv1}$ (495mm <sup>2</sup> , 157mm)	$S_{wk}$ , $r_{wk}$
$\Sigma P_{Mv2}$ (495mm <sup>2</sup> , 135mm)		$\Sigma P_{Mv3}$ (564mm <sup>2</sup> , 109mm)	
$\Sigma P_{Mv4}$ (564mm <sup>2</sup> , 143mm)			

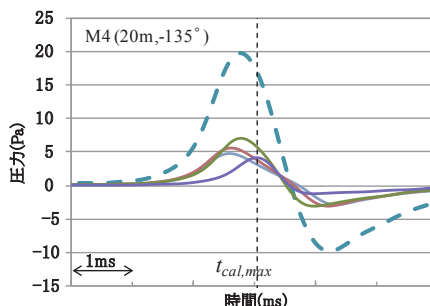


図8 各側面開口部から放射される微気圧波（数値解析）

る。よって、各開口部における微気圧波最大値の大小は  $S_{wk}$  および  $r_{wk}$  の大きさだけでは一概に判断ができない。

3.2.2 数値解析結果と模型実験結果の比較

模型実験と数値解析の微気圧波波形の比較例として、開口部の総面積  $S_{w,all}$  が最も大きい Case1 の結果を図9に示す。また、計算で得られた各条件における微気圧波最大値を図10に示す。図9より、測定点 M1 ~ M3 では模型実験と数値解析がよく一致していることがわかる。しかし、測定点 M4 (20m, -135°) では微気圧波最大値を過小評価していることが分かる。また、微気圧波が最大値となる時間にずれがみられる。これらを各条件、各測定点について以下の2指標で評価する。結果を表3に示す。

- (a) 模型実験に対する数値解析の微気圧波最大値  $P_{M,max}$  の比（以下、最大値比）
- (b) 数値解析において微気圧波が最大となる時間と模型実験において微気圧波が最大となる時間の差に対する、本実験における圧縮波の圧力上昇に要する時間 ( $\approx 1.2ms$ ) の比（以下、時間比）

なお、最大値比が1に近いほど解析精度が高いと判断できる。また、時間比の絶対値が小さいほど、模型実験と数値解析における微気圧波最大値となる時間のずれは小さいと判断できる。

$|\theta|$  が 90° 以下の測定点ではいずれの条件においても最大値比は  $1 \pm 0.1$  以内であり、良好な解析精度が得られた。M4 (20m, -135°) では、Case1 ( $S_{w,all}=2,118mm^2$ ) および Case2 ( $S_{w,all}=1,917mm^2$ ) の場合、他の測定点と比較して微気圧波最大値が大きくなる傾向がみられた。

特集：沿線環境

これは模型実験と同じ傾向である。しかし、最大値比が0.85前後であり、他の測定点と比較して解析精度の低下がみられた。また、時間比も0.4程度と時間のずれが大きくなっていることが分かる。Case3 ( $S_{wall}=1,220\text{mm}^2$ )の場合、最大値比は1.0であるが、時間比はCase1およびCase2と同程度であった。

以上の結果から、一部で解析精度の低下がみられるも

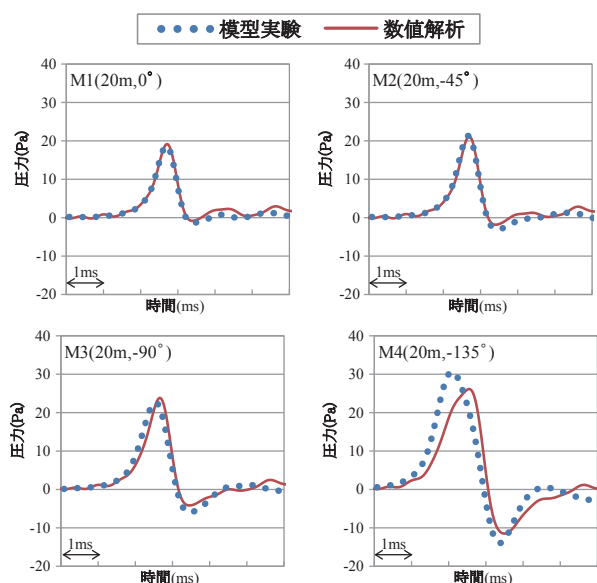


図9 Case1における微気圧波波形の比較

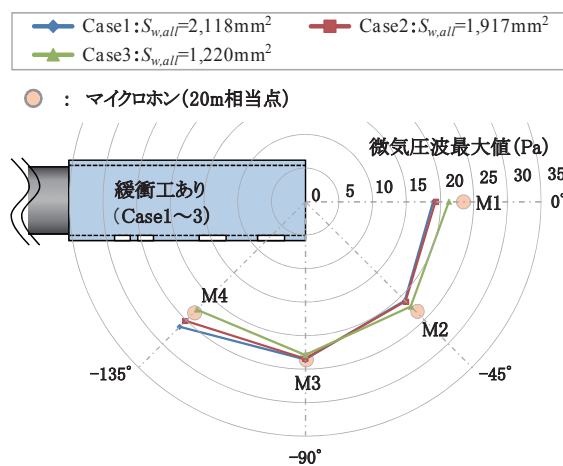


図10 数値解析における微気圧波最大値の比較

表3 実験結果と解析結果の比較

条件 ※ ( ) 内は $S_{wall}$	比較項目	測定点			
		M4	M3	M2	M1
		-135°	-90°	-45°	0°
Case1 (2,118mm <sup>2</sup> )	最大値比	0.85	1.05	0.97	0.99
	時間比	0.36	0.08	0.02	0.01
Case2 (1,917mm <sup>2</sup> )	最大値比	0.86	1.05	0.97	0.98
	時間比	0.39	0.08	0.03	0.00
Case3 (1,220mm <sup>2</sup> )	最大値比	1.00	1.07	1.00	1.02
	時間比	0.39	0.04	0.04	0.00

の、本モデルにより退出側緩衝工の開口部周辺における微気圧波の増大や、各条件の各測定点における微気圧波最大値の大小関係は再現できることが確認できた。

4. まとめ

本研究では、模型実験により退出側緩衝工から放射される微気圧波の特性として、側面開口部の総面積  $S_{wall}$  が大きいほど開口部付近における微気圧波最大値は増大することが確認できた。

また、本研究で構築した退出側緩衝工から放射される微気圧波の解析モデルは、緩衝工側面開口部の近傍で解析精度の低下がみられるものの、本モデルにより開口部周辺における微気圧波最大値の増大や、各条件の各測定点における大小関係は再現できることが確認できた。

文献

- 1) 山本彬也：トンネル出口からの微気圧波，日本物理学会春の分科会 応用数学，力学，流体物理予稿集，p.137, 1977
- 2) 小沢智：トンネル出口微気圧波の研究，鉄道技術研究報告，No.1121, 1979
- 3) 永井聡，藤田肇，飯田雅宣，菊地勝浩：緩衝工の付いたトンネル出口から放射される微気圧波の研究，日本機械学会関東支部総会講演会講演論文集，pp.425-426, 2003
- 4) 宮地徳蔵：トンネル坑口周りの地形を考慮した微気圧波放射モデル，鉄道総研報告，Vol.24, No.9, pp.23-28, 2010
- 5) 宮地徳蔵：トンネル微気圧波に関する理論的および実験的研究，大阪府立大学博士論文，2012
- 6) 福田傑，飯田雅宣：列車・トンネル系の空気力学に関する模型実験，日本音響学会誌，Vol.63, No.9, pp.543-548, 2007
- 7) Howe, M. S., Iida, M., Maeda, T., Sakuma, Y.: Rapid calculation of the compression wave generated by a train entering a tunnel with a vented hood, Journal of Sound and Vibration, Vol.297, pp.267-292, 2006.
- 8) 菊地勝浩，小澤智，武居泰，吉田康夫，梶山博司：全覆い上屋開口部の流れが準定常流と見なせるための圧力条件に関する研究，日本機械学会論文集B編，Vol.76, No.766, pp.933-943, 2010
- 9) 福田傑，斎藤実俊，飯田雅宣，栗田健，小澤智：隣接したトンネルを接続するシェルターのスリットから放射される微気圧波，日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集，1117, (USB), 2013