

## トンネル微気圧波の放射における地形条件の影響

環境工学研究部 熱・空気流動研究室  
主任研究員 宮地 徳蔵

### 1. はじめに

高速列車がトンネルに突入すると、トンネル出口から外部にトンネル微気圧波<sup>1)</sup>とよばれるパルス状の圧力波が放射される。微気圧波は高速列車において騒音や振動といった環境問題の原因となるため、営業列車では、微気圧波対策が講じられている。近年の新幹線列車の高速化に伴う微気圧波ピーク値増大を抑制するため、これまで以上に微気圧波低減対策の重要性が増している。そのため、微気圧波対策の効果をより正確に予測する必要が生じており、より高精度な微気圧波予測モデルが求められている。

トンネル微気圧波の放射段階では、(a)“微気圧波の音源”と(b)“地形による散乱効果”の両者のモデル化が必要となる。山本<sup>1)</sup>は、微気圧波の主要音源の強さがトンネル出口に到達したトンネル内圧縮波の時間変化率に比例することを示し、トンネル坑口からみた広義の開き角(放射立体角)を用いて微気圧波に対する地形の影響を定式化した。本報告では、これを放射立体角モデルとよぶ。しかし、放射立体角モデルでは、地形の影響は極限的な低周波・遠方場を仮定して簡略化されており、地形の影響による微気圧波ピーク値の空間分布の変化を考慮することはできない。

本研究では、トンネル微気圧波の放射に対する地形条件の影響を把握するため、超高速列車模型発射装置を用いた模型実験を行った。そして、実験結果にもとづき、低周波・遠方場近似の微気圧波ピーク値予測モデルを修正した。

### 2. 模型実験による検証

#### 2.1 実験概要

微気圧波の放射に対する地形条件の影響を明らかにするため、模型実験を行った。トンネル内圧縮波を発生させるジェネレータとして、鉄道総研が所有する超高速列車模型発射装置<sup>2)</sup>を用いた。地形は、平地、片側が崖(片側切土)、両側が崖(両側掘割)、高架橋の4種類とした。図1に片側切土、高架橋の地形模型を示す。



(a) 片側切土



(b) 高架橋

図 1 地形の模型

## 2.2 実験結果

本研究では、トンネル内圧縮波を入力、微気圧波を応答とした場合の伝達関数を実験結果から求めた。得られた伝達関数を用い、トンネル内圧縮波の基準波形が入力された場合の微気圧波の波形とピーク値を計算した<sup>3)</sup>。基準波形は  $p=1+\tanh(10t)$  (kPa) (現地スケール)、基準音速は 340 m/s とした。実験で得られた伝達関数を用いて計算した微気圧波波形の例を図 2 に示す。ここで、 $\theta$  は坑口中心からみた観測点位置ベクトルと線路のなす角 (方位角)、 $h$  は掘割や高架橋の高さである (図 3 も参照)。また、地形条件は両側掘割、観測点距離は 20 m、 $\theta=0^\circ$  である。地形の影響によって、微気圧波の波形や最大ピーク値が変化していることがわかる。

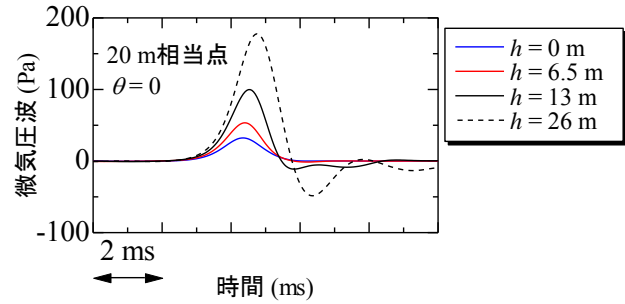


図 2 実験結果 波形例 (両側掘割)

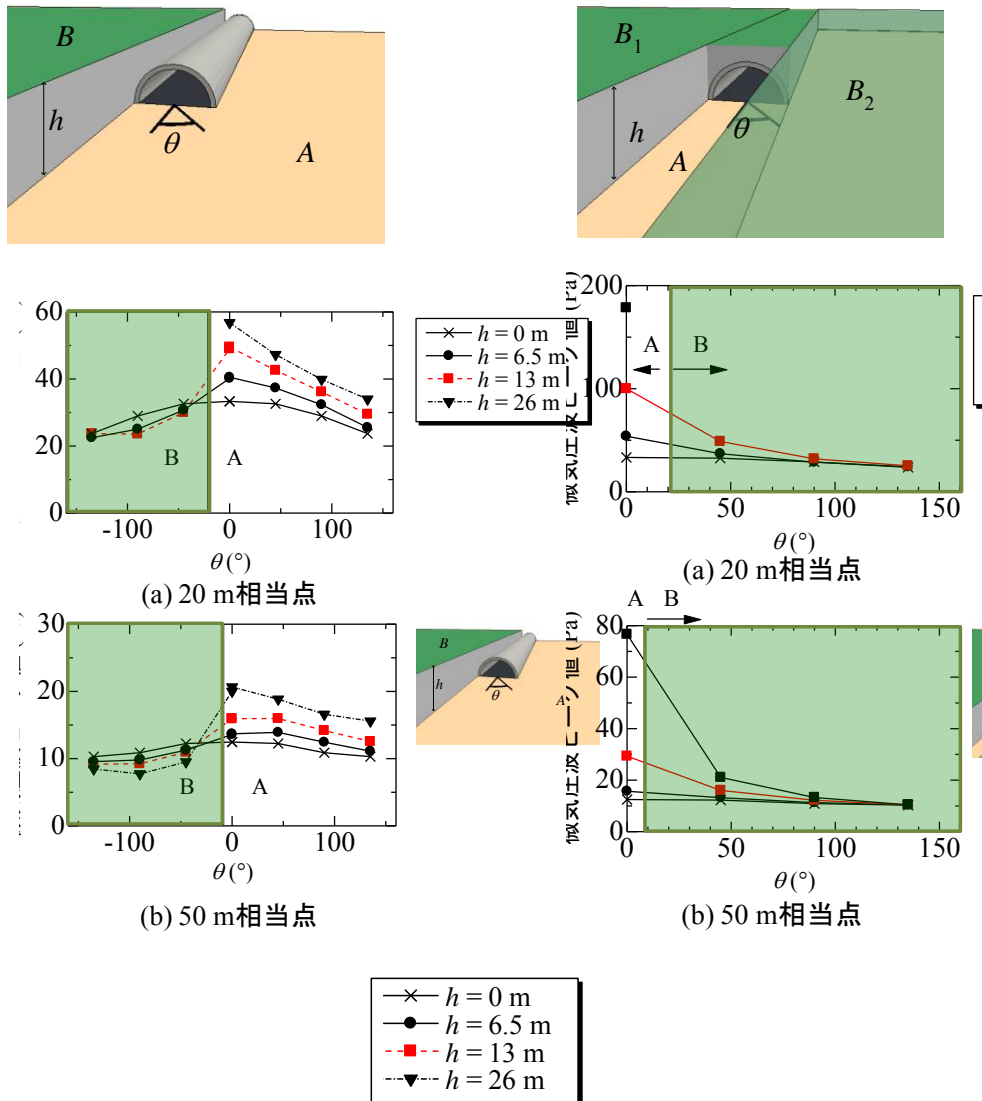


図 3 実験結果 片側切土条件、両側掘割条件 微気圧波ピーク値分布

本稿において、これ以降、実験結果とは上記の手順で実験結果から基準波形に対する微気圧波の応答を計算したものである。

微気圧波ピーク値の実験結果例を図 3, 図 4 に示す。また、観測点の位置について、地面側を A, 掘割上や高架橋の橋桁上を B と表記する。図 3, 図 4 から、微気圧波ピーク値の空間分布は地形とともに変化する。また、本実験では、高架橋 50 m 相当点をのぞくすべての実験結果において、微気圧波ピーク値はトンネル正面 ( $\theta = 0^\circ$ ) において最大となっている。

### 3. 地形の影響を考慮した放射立体角モデル

低周波遠方場近似の微気圧波放射モデルとしてよく用いられる放射立体角モデルは、次式で与えられる<sup>1)</sup>。

$$P_{MW} = \frac{2S}{\Omega cr} \frac{\partial p}{\partial t} \left( t - \frac{r}{c} \right) \quad (1)$$

ここで、 $t$ : 時間,  $P_{MW}$ : 微気圧波の音圧,  $p$ : トンネル坑口面でのトンネル内圧縮波の音圧,  $c$ : 大気条件下での音速,  $r$ : 観測点距離,  $\Omega$ : 放射立体角,  $S$ : トンネル坑口断面積である。

式(1)による予測結果と実験結果の比較を図 5 に示す。この例では、 $\theta = 0^\circ$  および、 $\theta = -90^\circ$  (切土の上, B 側) における微気圧波ピーク値の予測誤差が大きいことがわかる。

トンネル坑口正面では、地形の影響にくわえ、微気圧波の音源がもつ指向性の影響があらわれる。二重極子音源によって微気圧波音源の指向性を考慮した平地 ( $\Omega = 2\pi$ ) における微気圧波の予測モデル<sup>3)</sup>に低周波近似を課すと次式が得られる。

$$P_{MW} = \left( 1 + \frac{\ell}{r} \cos\theta \right) \frac{2S}{2\pi cr} \frac{\partial p}{\partial t} \left( t - \frac{r}{c} \right) \quad (2)$$

ここで、 $\ell$  は開口端補正量である。式(2)中の  $(\ell \cos\theta)/r$  が二重極子音源による補正を表わす。式(2)と実験結果の比較を図 4 に示す。図 4 において、高架橋高さ  $h = 0$ , 防音壁なしは平地の実験結果を表わしており、式(2)と実験結果はよく一致している。

地形の効果をさらに精度よく予測するため、式(2)をもとにして、低周波近似が成り立つ場合の地形の影響を表わす予測式として次式を提案する。

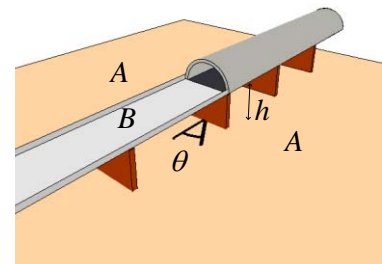
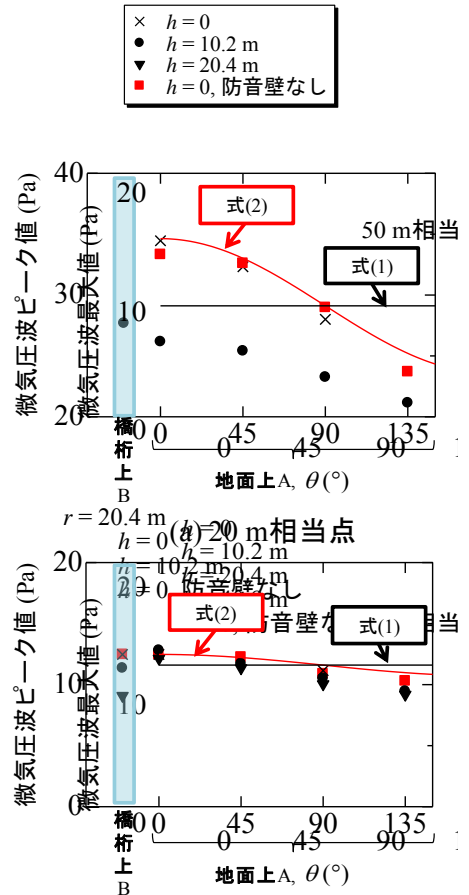
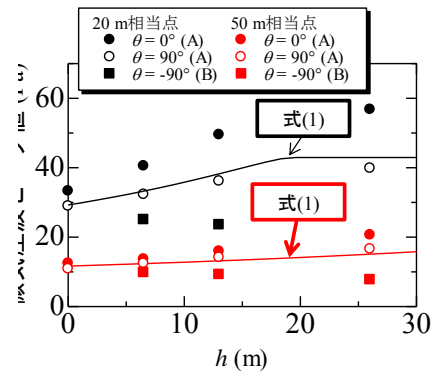


図 4 実験結果 高架橋条件 微気圧波ピーク値分布



$$[P_{MW}]_{\max} = \left(1 + \frac{\ell}{r} \cos \theta\right) \frac{2S}{2\pi kcr} \left[\frac{\partial p}{\partial t}\right]_{\max} \quad (3)$$

ここで、補正係数  $k$  は、平地での放射立体角  $2\pi$  に対する補正係数である。

各実験条件における補正係数  $k$  の計算例を表 1～表 3 に示す<sup>4)</sup>。補正係数は、 $k=1$  の場合は微気圧波ピーク値が平地で観測されるものと等しいことを意味し、 $k>1$  は微気圧波ピーク値が平地より小さくなることを表わす。片側切土や両側掘割の場合、それらの上側（地山上、B）で方位角が大きい場合では、 $k \approx 1$  であり、微気圧波ピーク値は平地で観測されるものとほぼ等しい。また、A 側では  $k < 1$  で、微気圧波ピーク値は、これらの地形によって平地に比べて大きくなる。高架橋の場合には、本実験条件では、すべての場合において  $k > 1$  である。

#### 4. まとめ

本研究では、トンネル微気圧波の放射に対する地形条件の影響を調べるため、鉄道トンネル坑口周辺の代表的な地形を模擬した実験を行い、微気圧波ピーク値の空間分布を明らかにした。また、実験結果を簡単な表にまとめ、微気圧波の予測モデルの修正を提案した。式(3)および表 1～表 3 を用いて、鉄道の代表的な地形の微気圧波に対する影響を概算することができる。

表 1 有効放射立体角補正係数  $k$ （片側切土 20 m 相当点）

方位角 $\theta$ (°)	切土高さ (m)			
	0	6.5	13	26
-135	1.1	1.1	1.1	
-90	1.0	1.2	1.2	
-45	1.0	1.1	1.1	
0	1.0	0.9	0.7	0.6
45	1.0	0.9	0.8	0.7
90	1.0	0.9	0.8	0.7
135	1.1	1.0	0.9	0.7

表 2 有効放射立体角補正係数  $k$ （両側掘割 20 m 相当点）

方位角 $\theta$ (°)	掘割高さ (m)			
	0	6.5	13	26
0	1.0	0.6	0.3	0.2
45	1.0	0.9	0.7	
90	1.0	1.0	0.9	
135	1.1	1.0	1.0	

表 3 有効放射立体角補正係数  $k$ （高架橋 20 m 相当点）

方位角 $\theta$ (°)	高架橋高さ (m)	
	0	10.2
橋桁上	1.0	1.3
0	1.0	1.3
45	1.0	1.3
90	1.0	1.3
135		1.2

#### 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) 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
- 3) 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
- 4) 宮地徳蔵，福田傑：トンネル微気圧波の放射に対する地形条件の影響，鉄道総研報告，Vol. 28, No. 3, pp. 23-28, 2014