

# 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

宮地 徳蔵\*

## A Theoretical Model on Micro-pressure Wave Emission Considering the Effects of Geography around a Tunnel Portal

Tokuzo MIYACHI

In this paper, the author introduced a simple model of prediction for a micro-pressure wave. A theoretical analysis was made of a micro-pressure wave produced when a high-speed train enters a tunnel, considering the effects of geography around a tunnel portal. The analytical results indicated that the micro-pressure wave generated by interaction of a point monopole and a dipole with rigid walls is solvable by use of the Green's function. The prediction by the model was consistent with the model experiments in which the exact Green's function was determined by the mirror image method.

キーワード：トンネル微気圧波，音響解析，高速鉄道

### 1. はじめに

高速列車がトンネルに突入すると、トンネル内に圧縮波が形成される。この圧縮波がトンネル内を音速で伝播してトンネル出口に到達すると、坑口から外部にトンネル微気圧波<sup>1), 2)</sup> (以下単に微気圧波) と呼ばれるパルス状の圧力波が放射される。この微気圧波はトンネル坑口付近で騒音・振動などの問題を引き起こすことがあり、その低減対策が重要となる。

従来からよく用いられる微気圧波の予測式は、トンネル坑口まわりの立体角を用いた山本のモデル<sup>1), 2)</sup> (以下放射立体角モデル) である。この放射立体角モデルでは、微気圧波の大きさは、トンネル内圧縮波の大きさには無関係であり、その勾配に比例する。これにより、微気圧波低減のために、トンネル内圧縮波の勾配を低減する対策の研究開発が行われた。そして現在の新幹線においては、緩衝工の設置<sup>3)</sup>、新幹線先頭部の延伸と最適化<sup>3), 4)</sup> などの微気圧波低減対策がとられている。これらの対策は放射立体角モデルを一つの根拠にして、列車突入によるトンネル内圧縮波の勾配を低減することで微気圧波を低減するものである。

このように現在の新幹線では、微気圧波の低減対策を行っている。しかし、今後新幹線が更に速度向上すると、それに伴い微気圧波は大きくなり、その対策規模はより大規模になることが想定される。したがって、今後の速度向上に伴う新たな微気圧波対策を検討する上で、微気

圧波をより正確に予測する必要がある。

放射立体角モデルは解析が容易である反面、地形が微気圧波に及ぼす影響を単純化したモデルであり、例えば観測点距離 (トンネル坑口中心から測定点までの距離) が同じであれば、微気圧波の大きさは一定であることを仮定している。しかし実際には、微気圧波はトンネル坑口まわりの地形の影響を受けるため、微気圧波の大きさは観測点距離のみならず、トンネルの軸と観測点ベクトルのなす角にも依存すると考えられる。そのため微気圧波を精度よく予測するためには、地形の影響をより厳密に考慮しなければならない。

そこで本研究では、境界積分表示をもとに、放射立体角モデルを拡張した微気圧波放射の理論モデルを提案し、地形が比較的単純な場合について模型実験と比較することで、理論モデルの妥当性を検証する。

### 2. 地形の影響を考慮した微気圧波放射モデル

#### 2.1 モデルの導出

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、低周波遠方場近似の下で成り立ち、次式で与えられる<sup>1), 2)</sup>。

$$p_{MW}(r, t) = \frac{2S}{\Omega(r)cr} \cdot \frac{\partial p_{in}}{\partial t} \left( t - \frac{r}{c} \right) \quad (1)$$

ここで、 $t$ : 時間,  $p_{MW}$ : 微気圧波,  $p_{in}$ : トンネル坑口面でのトンネル内圧縮波,  $c$ : 大気条件下での音速,  $r$ : 観測点距離,  $\Omega$ : トンネル坑口まわりの立体角,  $S$ : トンネル坑口断面積 (緩衝工がある場合には緩衝工断面積) で

\* 環境工学研究部 (空気力学)

特集：環境技術

ある。なお本稿で圧力は全て音圧(大気圧からの変動分)で表わす。この放射立体角モデルは、トンネル坑口まわりの地形が比較的単純な場合に、観測点がトンネル坑口から遠方にあることを仮定しており、観測点が比較的近くにある場合には、誤差が生じる。

そこで本節では、音圧の境界積分表示を基礎式とし、地形の影響をより厳密に考慮した微気圧波放射モデルを提案する。まず、トンネル内圧縮波および微気圧波は、周波数領域で以下の Helmholtz 方程式に従うとする。

$$(\nabla^2 + k^2)\hat{p} = -\hat{q} \quad (2)$$

ここで、 $\hat{f}$ : 関数  $f$  のフーリエ変換、 $\hat{p}$ : 音圧、 $\hat{q}$ : 音源項、 $k$ : 波数である。このとき、解析領域内部の音圧についての Kirchhoff の積分表示は、

$$\hat{p}(\mathbf{x}) = \int_{\Gamma} \hat{G}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \hat{q}(\mathbf{y}) d^3\mathbf{y} + \int_{\Gamma} (\hat{G}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \nabla_{\mathbf{y}} \hat{p}(\mathbf{y}) + \hat{p}(\mathbf{y}) \nabla_{\mathbf{y}} \hat{G}(\mathbf{x}, \mathbf{y})) \cdot \mathbf{n} dS_{\mathbf{y}} \quad (3)$$

となる。ここで、 $\hat{G}$ : グリーン関数、 $\mathbf{n}$ : 境界上での外向き法線ベクトル、 $\mathbf{x}$ : 観測点位置ベクトル、 $\mathbf{y}$ : 音源位置ベクトル、 $\Gamma$ : 解析領域の境界、 $\nabla_{\mathbf{y}}$ :  $\mathbf{y}$  についての微分演算子、 $dS_{\mathbf{y}}$ :  $\mathbf{y}$  についての面積分である。なお観測点位置ベクトルは、ここでは解析領域内部にあるとする。

次に、トンネル坑口まわりの地形が図1のような場合を考える。解析領域をトンネルの外側にとり、その境界  $\Gamma$  を  $\Gamma = \Gamma_T + \Gamma_W + \Gamma_M + \Gamma_{\infty}$  とする。ここで、 $\Gamma_T$ : トンネル坑口面、 $\Gamma_W$ : トンネルあるいは緩衝工(開口部なし)の外壁、 $\Gamma_{\infty}$ : 無限遠方境界、 $\Gamma_M$ : それ以外の物体境界(坑口まわりの地面あるいは山や高架橋など)である。ただし、無限遠方境界での音圧は0であるとする。また  $\mathbf{x}, \mathbf{y}$  の座標原点をトンネル坑口中心(図1中の点  $\mathbf{o}$ ) とし、トンネル中心軸を  $x_1$  軸にとり、トンネル内から外の向きを  $x_1$  軸の正の方向とする。

境界条件として、境界  $\Gamma_W, \Gamma_M$  は剛体壁であるとして

$$\nabla_{\mathbf{y}} \hat{p}(\mathbf{y}) \cdot \mathbf{n} = 0 \quad \mathbf{y} \in \Gamma_W, \Gamma_M \quad (4)$$

を与える。グリーン関数の境界条件は、解析領域の境界  $\Gamma$  上あるいは自由空間として与えるのが一般的であるが、ここでは解析領域の外部にある境界  $S_J$  を用いて、以下のように境界条件を与える。

$$\nabla_{\mathbf{y}} \hat{G}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \cdot \mathbf{n} = 0 \quad \mathbf{y} \in \Gamma_M, S_J \quad (5)$$

ここで、 $S_J$ : トンネルあるいは緩衝工と山との接続面である。音源項が存在しない場合、式(4)、式(5)を式(3)に用いると、式(3)は以下のように変形できる。

$$\hat{p}(\mathbf{x}) = \int_{\Gamma_T} \hat{G}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \nabla_{\mathbf{y}} \hat{p}(\mathbf{y}) \cdot \mathbf{n} dS_{\mathbf{y}} - \int_{\Gamma_T + \Gamma_W} \hat{p}(\mathbf{y}) \nabla_{\mathbf{y}} \hat{G}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \cdot \mathbf{n} dS_{\mathbf{y}} \quad (6)$$

解析領域の外部にある境界  $S_J$  を用いて、境界条件を式

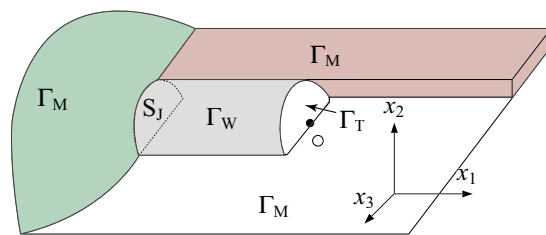


図1 トンネル坑口まわりの地形の概念図

(5)のように  $\Gamma_T, \Gamma_W$  を用いずに与えたグリーン関数を使用すると、微気圧波の音源に二重極が含まれることが明示され、微気圧波の特性がわかりやすくなる。

ここで以下の仮定のもと、微気圧波放射の問題をモデル化する。(a) トンネル内圧縮波は十分低周波であり、平面波として境界  $\Gamma_T$  に到達し、どのような地形であっても、トンネル内圧縮波は自由空間と同じように開口端反射する、(b) トンネル坑口面での反射係数は1である、(c) 坑口面では物理量が一樣である、(d) 観測点は遠方である、(e) 境界  $\Gamma_W$  の影響は小さく無視できる。

まず、これらの仮定 (a), (b), (c) が近似的に成立するとすれば、自由空間での開口端補正量  $l = 0.61\sqrt{2S/\pi}$  を用いて、式(6)中の圧力に関する因子は

$$\hat{p}(\mathbf{y})|_{\mathbf{y} \in \Gamma_T} \approx ik2l\hat{p}_m \equiv f_d \quad (7)$$

$$\nabla_{\mathbf{y}} \hat{p}(\mathbf{y}) \cdot \mathbf{n}|_{\mathbf{y} \in \Gamma_T} = -\frac{\partial \hat{p}(\mathbf{y})}{\partial y_1}|_{\mathbf{y} \in \Gamma_T} \approx \hat{p}_m \cdot ik[1 + \exp(-ik2l)] \equiv f_m \quad (8)$$

となる。ここで  $i$ : 虚数単位である。式(7)では  $kl$  が小さいとみなした低周波近似を用いた。

次に式(7)、式(8)および仮定 (d), (e) を式(6)に用いると

$$\hat{p}(\mathbf{x}) \approx f_m S \hat{G}(\mathbf{x}, \mathbf{0}) + f_d S \frac{\partial \hat{G}(\mathbf{x}, \mathbf{0})}{\partial y_1} \quad (9)$$

となる。ここで仮定 (d) より、式(6)の面積分において多重極展開の初項のみを考慮している。式(9)が本報で提案する微気圧波予測モデルである。式(9)が表わす音場は、境界として剛体壁の  $\Gamma_M, \Gamma_J$  のみが存在し、かつ音源として以下の2個の点音源が存在する音場と等しい。

$$\hat{q}(\mathbf{y}) = f_m S \delta(\mathbf{y}) - f_d S \frac{\partial \delta(\mathbf{y})}{\partial y_1} \quad (10)$$

ここで、 $\delta$ : 三次元のデルタ関数である。式(10)の右辺第一項は単極子音源(monopole)を表わし、右辺第二項は  $x_1$  軸正の方向に軸を持つ二重極子音源(dipole)を表わす。また式(5)を満たすグリーン関数には、微気圧波がトンネル外壁以外の地形の影響によって反射・回折する効果が含まれている。なお本報では式(9)の導出で、多重極展開の初項のみをとっているが、さらに高次の極ま

で考慮してモデル化することも可能である。このように本稿で提案するモデルは、微気圧波の音源を多重極で表わすものであるから、以下では式(9)を多重極音源モデルと呼ぶことにする。

## 2.2 バッフル板と地面に囲まれた地形への適用

ここでは、式(5)を満たすグリーン関数が解析的に得られる場合として、図2(a)のように $\Gamma_M$ が無限バッフル板と無限平板の地面のみで構成された場合を考える。図2(a)のような地形を前節で示した多重極音源モデルでモデル化すると図2(b)のような音場を解くことになる。この場合には式(5)を満たすグリーン関数は、無限バッフル板、および地面の鏡像をとることで以下のように与えられる。

$$\hat{G}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{\exp(-ik|\mathbf{x}-\mathbf{y}|)}{|\mathbf{x}-\mathbf{y}|} + \frac{\exp(-ik|\mathbf{x}-\mathbf{y}^*|)}{|\mathbf{x}-\mathbf{y}^*|} \right] \quad (11)$$

ここで、 $L$ ：トンネル坑口中心からバッフル板までの距離、 $\mathbf{y}^* = (-2L - y_1, y_2, y_3)$  である。式(11)を式(9)に代入し逆フーリエ変換すると、時間領域での微気圧波 $p_{MW}$ として

$$p_{MW}(\mathbf{x}, t) = p_{m,R} + p_{m,l} + p_{d,R} + p_{d,l} \quad (12)$$

$$p_{m,R} = \frac{S}{2\pi cr} \left[ \frac{\partial p_m}{\partial t} \left( t - \frac{r}{c} \right) + \frac{\partial p_m}{\partial t} \left( t - \frac{2l}{c} - \frac{r}{c} \right) \right] \quad (13)$$

$$p_{m,l} = \frac{S}{2\pi cr^*} \left[ \frac{\partial p_m}{\partial t} \left( t - \frac{r^*}{c} \right) + \frac{\partial p_m}{\partial t} \left( t - \frac{2l}{c} - \frac{r^*}{c} \right) \right] \quad (14)$$

$$p_{d,R} = \frac{S \cos \theta}{2\pi cr} \left( \frac{2l}{r} + \frac{2l}{c} \cdot \frac{\partial}{\partial t} \right) \frac{\partial p_m}{\partial t} \left( t - \frac{r}{c} \right) \quad (15)$$

$$p_{d,l} = -\frac{S \cos \theta^*}{2\pi cr^*} \left( \frac{2l}{r^*} + \frac{2l}{c} \cdot \frac{\partial}{\partial t} \right) \frac{\partial p_m}{\partial t} \left( t - \frac{r^*}{c} \right) \quad (16)$$

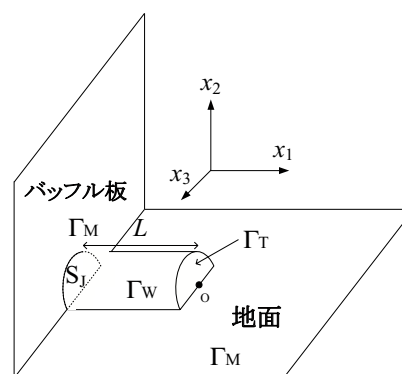
を得る。式(12)～式(16)において、 $\cos \theta = x_1/r$  (観測点位置ベクトルと $x_1$ 軸正の方向のなす角の余弦)、 $r^* = \sqrt{(x_1 + 2L)^2 + x_2^2 + x_3^2}$ 、 $\cos \theta^* = (x_1 + 2L)/r^*$  である。式(15)、式(16)は二重極子音源による寄与であり、 $\cos$ の影響により微気圧波がわずかながら指向性を持つことを表わす。

一方放射立体角モデル(1)の立体角 $\Omega$ は、図2(a)の地形の場合にトンネル外壁の影響を無視すると

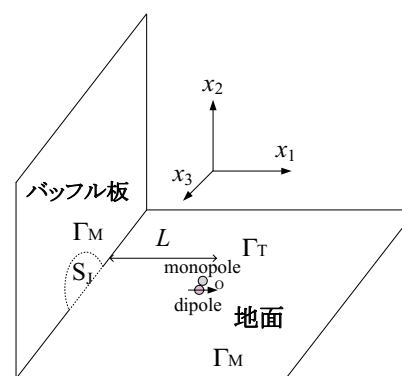
$$\Omega(r) \approx \begin{cases} \pi \left( 1 + \frac{L}{r} \right) & r \geq L \\ 2\pi & r \leq L \end{cases} \quad (17)$$

と表わせる。したがって、 $L=0$ のとき $\Omega = \pi$ 、 $L \rightarrow \infty$ のとき $\Omega \rightarrow 2\pi$ である。

多重極音源モデル式(12)～式(16)において、 $l \rightarrow 0$ の極限を考えると、 $L=0$ 、 $L \rightarrow \infty$ のときには放射立体角モデルと完全に一致する。



(a) 無限バッフル板と地面に囲まれた地形



(b) 多重極音源モデルによるモデル化

図2 無限バッフル板と地面に囲まれた地形とそのモデル化

と完全に一致する。このように、本報で提案する多重極音源モデルは、特別な場合には放射立体角モデルと一致しており、放射立体角モデルの自然な拡張となっていることがわかる。

## 3. 模型実験による検証

### 3.1 実験概要

多重極音源モデルを検証するため、トンネル出口におけるトンネル内圧縮波 $p_{in}$ と微気圧波の関係を調べる模型実験を行った。地形の条件は、2.2節で解析した音場(図2(a))とした。ただし、地面の影響は鏡像法によって模擬した。ま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高速模型発射装置<sup>5)</sup>、<sup>6)</sup>を用いた。トンネル軸上での微気圧波を測定する場合には、測定器と列車模型の干渉を避けるため、トンネル模型を枝坑に分岐して、枝坑出口をトンネル出口とみなして実験を行った。

トンネル模型は本坑、枝坑ともに直径100mmの塩化ビニル製のパイプを用いた。地面による鏡像を考慮すると実際の新幹線トンネル(実像のトンネル坑口断面積63.4m<sup>2</sup>)とのスケール比は1/127となる。トンネル模型全体の概要を図3、列車模型の諸元を表1に示す。枝坑

特集：環境技術

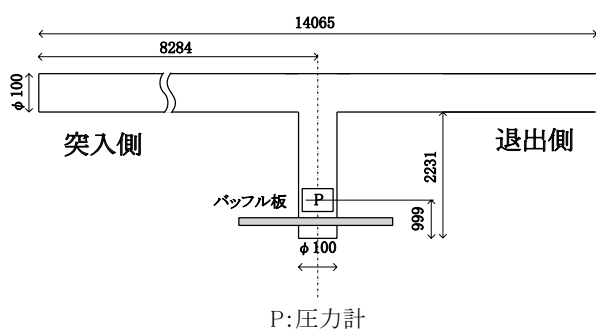


図3 トンネル模型概要 (単位: mm)

表1 列車模型諸元

全長 (mm)	1240
直径 (mm)	44.7
先頭部形状	回転楕円
先頭部長さ (mm)	67.1
模型発射速度 (km/h)	230, 250, 270

坑口から約 1m の位置に圧力計 (Kulite, XCS-190-5G) を設置し、バッフル板には約 1800mm × 1800mm, 厚み 9mm のベニヤ板を使用した。

微気圧波測定位置を図4に示す。微気圧波測定には精密騒音計のマイクロホン (Rion, NL-32, F特性) 4台を用いた。レイアウトの都合上、 $\theta$  が正の位置にマイクロホンを設置することが困難な場合には、対称性を考慮して  $\theta$  が負の位置にマイクを設置した。なお図4における  $r=157\text{mm}$ ,  $394\text{mm}$  は、それぞれ現地スケールにおいて、観測点距離  $r=20\text{m}$ ,  $50\text{m}$  (以下 20m 点, 50m 点) に相当する。実験状況の例を図5, 図6に示す。

### 3.2 微気圧波最大値整理方法

図3における圧力計で測定される圧力波の時間波形を  $p_{t,ex}$  とすると、 $p_{t,ex}$  は列車の突入速度によって異なる波形となり、測定される微気圧波の波形 ( $p_{MW,ex}$ ) も異なる。そこで本稿では、 $p_{t,ex}$  (入力) と  $p_{MW,ex}$  (出力) の関係が線形であるとして、実験結果から伝達関数を求め、その伝達関数を用いて、以下で定義する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を求めた。なお本実験の条件下では、トンネル内圧力測定位置から枝坑出口まで圧縮波が伝搬する間に、圧縮波が非線形効果によって切り立つ効果はほぼ無視できることを確認しており、この仮定は妥当なものであると考えられる。

ここでは、トンネル内圧縮波の基準波形を

$$p_{t,ref}(t) = 1 + \tanh(127 \times 10t) \quad (\text{kPa}) \quad (18)$$

とした。式(18)で表わされる圧縮波を図7に示す。この圧縮波は圧力上昇量が 2kPa, 圧力勾配最大値が 1.27MPa/s (現地スケールでは 10kPa/s), 圧力上昇量を圧力勾配最大値で除して得られる代表空間波長は約

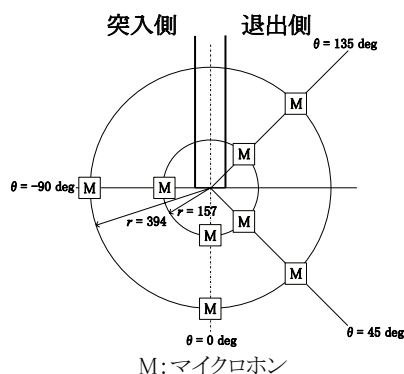


図4 微気圧波測定位置 (単位: mm)



図5 バッフル板がない場合の実験状況 ( $L = \infty$ )



図6 バッフル板がある場合の実験状況 ( $L = 315 \text{ mm}$ )

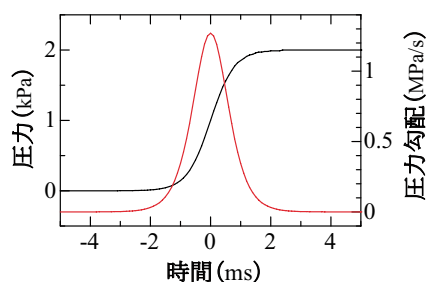


図7 トンネル内圧縮波の基準波形

540mm (同約 70m) である。

実験から得られる微気圧波最大値として、式(18)のトンネル内圧縮波が入力された場合の微気圧波最大値 ( $p_{MW,ref,max}$ ) の平均値を求めた。つまり

$$\text{Ave}[p_{MW,ref,max}] = \text{Ave}\left[F^{-1}\left[\hat{p}_{t,ref} \cdot \hat{Z}\right]_{\max}\right] \quad (19)$$

とした。ここで  $F^{-1}$ : 逆フーリエ変換,  $\hat{Z}$ : 伝達関数であ

る。以上の実験結果整理方法の概念図を図8に示す。

### 3.3 実験結果との比較

ここでは、実験結果と多重極音源モデルによる微気圧波最大値の比較についてのみ述べる。なお、上述の伝達関数について、実験結果と多重極音源モデルでよく一致していることを確認している。まずバツフル板がない場合 ( $L=\infty$ ) の微気圧波の指向性について、実験結果と多重極音源モデルによる微気圧波最大値の比較を図9に示す。なおこれ以降は、長さについては現地スケールに変換して表示する。実験結果から、20m点において、微気圧波は小さいながらも指向性を有していることがわかる。多重極音源モデルでは、この微気圧波の指向性を表現するために二重極子音源項を考慮している。図9より、多重極音源モデルと実験結果はよく一致しているのがわかる。測定点が50m点になると、二重極の影響は小さくなるため、微気圧波の指向性はほぼ無視できる。放射立体角モデルは指向性を持たないモデルであるため、 $\theta=90\text{deg}$  の場合に実験結果とよく一致する。

次にバツフル板が微気圧波最大値に与える影響を図10に示す。20m点の場合、坑口中心とバツフル板との距離  $L=20\text{m}$  を境に、微気圧波が一番大きくなる  $\theta$  が入れ替わる。多重極音源モデルはこの傾向をよく捉えていることがわかる。一方、放射立体角モデルは、各測定点で計測される微気圧波の下包絡線に近い傾向を示す。

最後に二重極音源項の効果を図11に示す。測定点は20m点に固定している。多重極音源モデルにおいて二重極音源項を無視すると、 $L$  が大きい場合ほど誤差が大きくなるがわかる。

以上の結果から、多重極音源モデルは、簡単な地形の場合に、実験結果と比較的によく一致する微気圧波放射モデルであるといえる。

### 3.4 考察

微気圧波の指向性については、文献7)でも指摘されている。今回の模型実験においても、微気圧波には小さいながらも指向性があることが確認された。この指向性は図9より、二重極子によってモデル化できることがわかる。この二重極子の影響を無視した単極子のみによるモデルでは、図9、図11にあるように、誤差が大きくなる場合がある。

図9において、 $\theta=0\text{deg}$  とは、トンネル軸上の測定点を表わしており、鉄道トンネルにおいては、軌道上の測定点に対応する。図9より、トンネル坑口のまわりがほぼ平地とみなせる場合においては、軌道上における微気圧波測定結果は、線路外の測定点より大きい値(安全側)となりやすいことがわかる。ところが、図10からわかるように、バツフル板が存在する場合には、微気圧波が最大

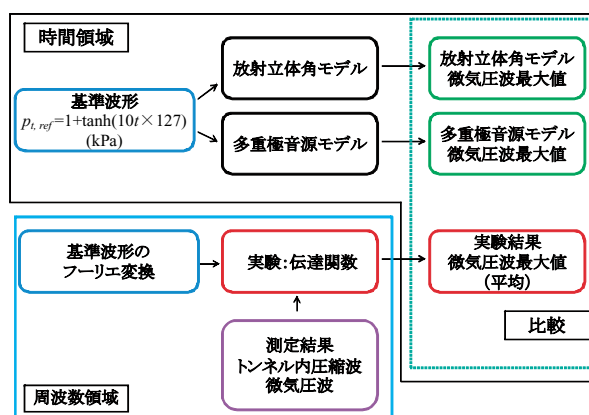


図8 実験結果の整理方法 概念図

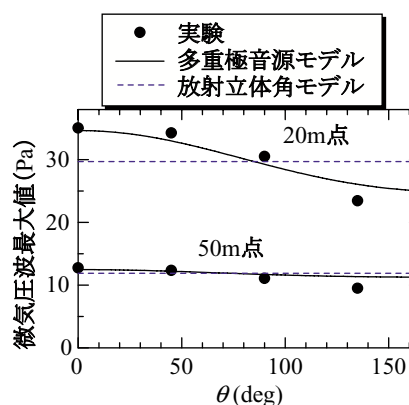


図9 バツフル板がない場合の微気圧波の指向性 ( $L = \infty$ )

となる測定点の位置は坑口中心とバツフル板との距離  $L$  (厳密にはトンネル内圧縮波の波長  $\lambda$  との比  $L/\lambda$ ) に依存し、微気圧波は地形の影響を強く受ける。図10の場合には、微気圧波はバツフル板で全反射するため、バツフル板近傍では微気圧波が大きくなる。そのため  $L$  が小さい場合には、よりバツフル板に近い測定点、すなわち  $\theta$  の大きい測定点で微気圧波は最大となる。一方、 $L$  が大きい場合には、バツフル板の影響よりも二重極の影響が支配的になり、 $\theta$  の小さい測定点で微気圧波が最大となる。また50m点の場合、二重極の影響が小さいため、ほとんど  $L$  によらずバツフル板の影響が支配的であり、 $\theta$  の大きい測定点で微気圧波が最大となっていると考えられる。このように微気圧波は、音源の指向性と坑口まわりの地形の影響によって、同じ距離の測定点でも  $\theta$  によって異なる値となる。

放射立体角モデルで使用する立体角は、比較的簡単な解析あるいは数値計算によって得られるのに対し、式(5)を満たすグリーン関数は、ごく限られた場合にのみ解析的に得られる。鉄道トンネルまわりの一般的な地形の場合に、グリーン関数を解析的に求めることは困難であり、境界要素法や差分法などによって数値的に求める必要がある。したがって式(19)を用いた微気圧波予測

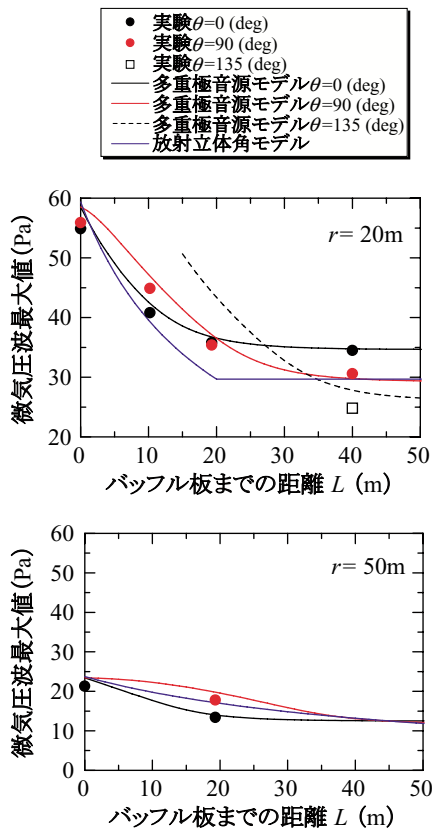


図 10 バッフル板が微気圧波に与える影響

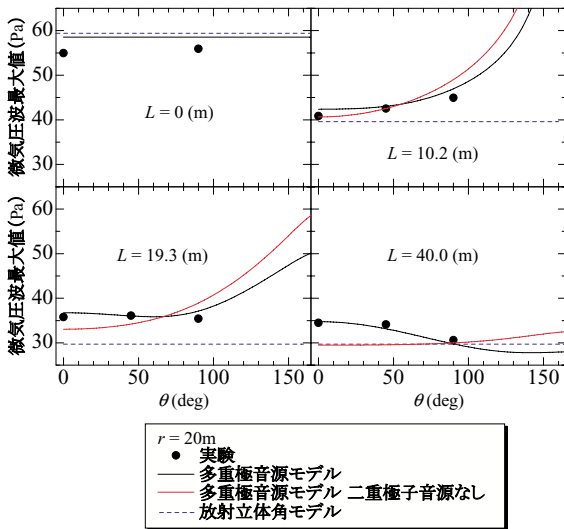


図 11 二重極子音源の効果

は、厳密なグリーン関数を用いるため高精度であることが期待できる反面、グリーン関数を求めるための数値計算が必要であり、放射立体角モデルに比べると、簡便性を欠くことになる。

#### 4. まとめ

地形の影響を考慮した微気圧波放射の予測モデルを提案し、模型実験結果と比較することで、モデルの検証を行った。模型実験結果と予測値は比較的よく一致し、今回提案したモデルにより、微気圧波の指向性や、バッフル板が微気圧波に与える影響を予測することが可能であることが確認された。本報では、グリーン関数が解析的に得られる場合のみモデルの検証を行った。今後は高架橋や掘割など、鉄道で一般的な地形の場合について模型実験を行い、多重極音源モデルの精度を検証していく予定である。

本稿の理論モデルについては、東京工科大学 小澤智名誉教授、大阪府立大学 新井隆景教授、同 坂上昇史助教にご指導いただいた。ここに記して感謝の意を表す。

#### 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 応用力学, 力学, 流体物理予稿集, 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) 飯田雅宣ほか: トンネル微気圧波低減のための列車先頭部形状の最適化, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.62, No.596, pp.148-155, 1996
- 4) 前田達夫: 列車の空気力学的特性およびトンネル微気圧波低減法に関する研究, 鉄道総研報告, 特別 20 号, 1998
- 5) 斉藤実俊ほか: 立坑を有するトンネルを高速列車が走行した際のトンネル内圧力変動の予測, 日本機械学会講演論文集, 05-32, 2005
- 6) 福田傑ほか: 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) 永井聡ほか: 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, 日本機械学会講演論文集, 03-09, 2003