

鉄道一般

車両

軌道

構造物

防災

電力

信号通信  
情報

材料

環境

人間科学

浮上式鉄道

# トンネル坑口周りの地形が 微気圧波に与える影響を探る

列車が高速でトンネルに突入すると、反対側の坑口でパーンという衝撃音が発生したり、民家の建具が突然振動して音をたてたりすることがあります。この音や振動は微気圧波とよばれる現象が原因となっています。新幹線のトンネル坑口付近は堀割・切土や高架橋など複雑な形状をしており、トンネル坑口から放射される微気圧波は、このような地形において反射・回折しながら観測点へ到達するため、その空間的な分布は複雑になります。ここでは、トンネル坑口周りの地形が微気圧波に与える影響を調べるための研究について紹介します。



**宮地 徳蔵**  
Tokuzo Miyachi  
環境工学研究部  
車両空力特性研究室  
副主任研究員  
【専門分野】トンネル微気圧波、圧縮性流体力学



**福田 傑**  
Takashi Fukuda  
環境工学研究部  
熱・空気流動研究室  
主任研究員  
【専門分野】トンネル微気圧波、圧縮性流体力学



**飯田 雅宣**  
Masanobu Iida  
環境工学研究部  
部長  
【専門分野】鉄道の空気力学

## 微気圧波とは？

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(図1(a))、トンネル内を入口から出口までおよそ音速で伝播します(図1(b))。そして、この圧縮波がトンネル出口に到達すると、圧縮波は坑口で開口端反射し、膨張波となってトンネル内を入口に向かって伝播します。この際、トンネルの外にはパルス状の圧力波が放射されますが(図1(c))、この圧力波(音波)のことを微気圧波<sup>1),2)</sup>とよんでいます。微気圧波は、そのピーク値(微気圧波の大きさ)が大きくなると発破音を生じたり、家屋の建具などを揺らしてガタンと音をさせたりするなど環境問題の原因となります。

## 従来予測モデル

微気圧波の正体はトンネル出口から放射される音波です。新幹線の高速化や整備新幹線などの高速鉄道の建設の際には、この微気圧波のピーク値を予測し、沿線での環境問題とならないように、低減対策を検討する必要があります。

従来用いられている微気圧波の放

射(図1(c))に関するモデル(山本のモデル<sup>1)</sup>)では、指向性をもたない音源のみを考慮し、微気圧波のピーク値は、トンネル坑口からみた方向によらず、坑口からの距離(観測点距離)に反比例して減衰すると仮定しています(球対称近似)。また、トンネル坑口まわりの地形の効果は、トンネル坑口中心から放射される微気圧波の立体的な広がりを表す立体角を用いて表されません。このことから、本稿では山本のモデルを、以後、放射立体角モデルとよぶことにします。

放射立体角モデルでは、微気圧波のピーク値は放射立体角に反比例します。放射立体角は、平地など開けた空間では大きくなり、逆に谷や堀割などでは小さくなります。したがって、開けた空間では微気圧波は小さくなり、狭い空間では大きくなります。

世界で初めて正体不明の現象として微気圧波が観測されたとき、山本<sup>1)</sup>は放射立体角モデルによって、その正体と低減の指針を示しました。このモデルをもとに、トンネル緩衝工の設置・延伸・開口部の最適化や列車の先頭部形状の延伸・最適化といった低減対策

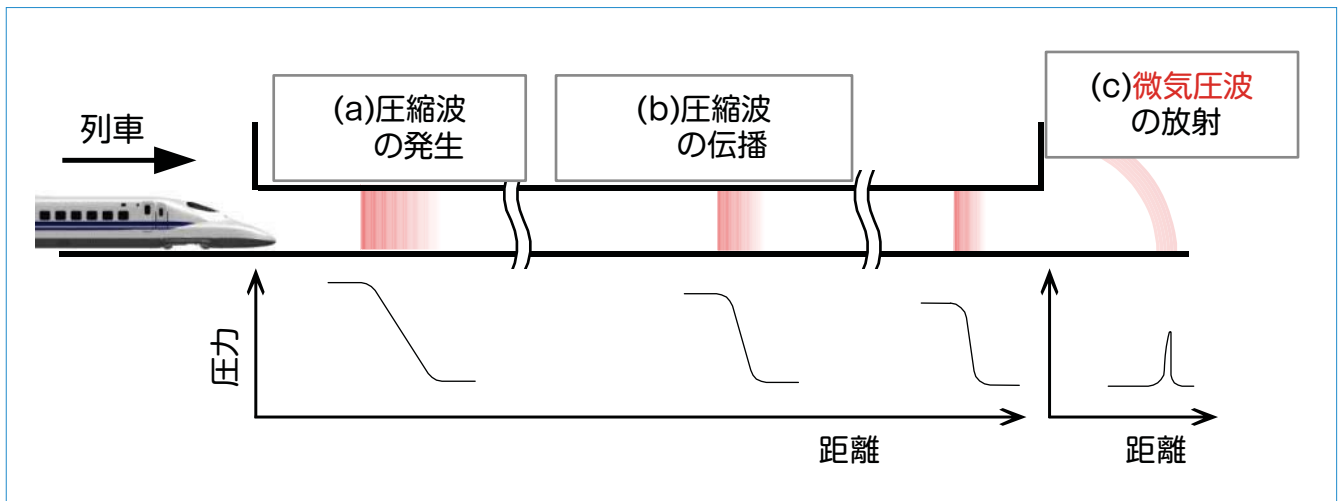


図1 トンネル微気圧波

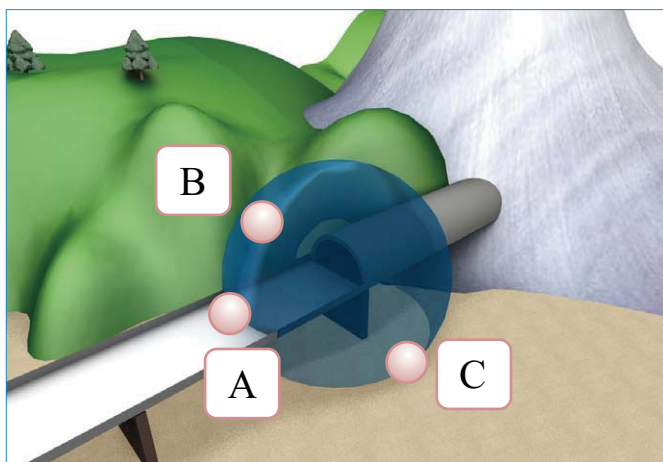


図2 トンネル坑口

が開発されてきました。そして、これまでの微気圧波の現地測定では、この放射立体角モデルをもとに、観測点距離と放射立体角を指標として測定結果を整理してきました。

### 放射立体角モデルの問題点 ～微気圧波の空間分布～

ところが、新幹線の高速化が進むにつれ、微気圧波の予測はより高精度なものが求められるようになってきました。例えば、図2の青い球面上の点A(高架橋上)で測定した結果から、近隣民家のある点B(山)や点C(地上)で観測される微気圧波を精度よく予測しなければならない場合があります。

放射立体角モデルでは、図2に示すような新幹線のトンネル坑口付近での

微気圧波(のピーク値)の空間分布は、同心球面上(点A, B, C)で等しいとしています。このように仮定することで、微気圧波を簡便に予測することができますが、実際には、高架橋、山、地上では、それぞれ付近の地形の影響の表れ方が異なるため、微気圧波(のピーク値)も異なる値となります。したがって、このような地形の影響を考慮するためには、さらなる理論の拡張と高精度化が必要となりました。

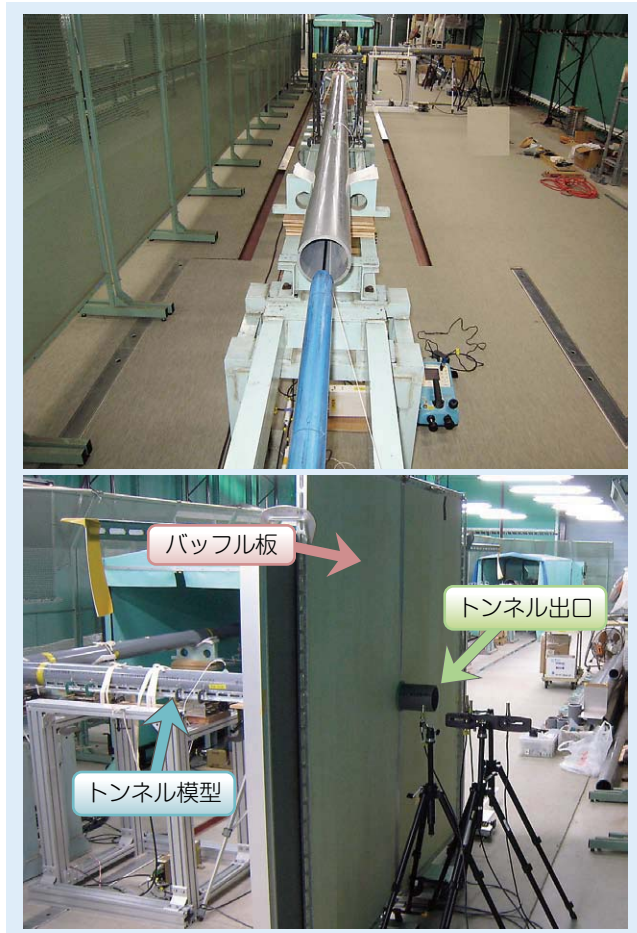


図3 模型実験風景

### 模型実験による検証

そこで、まず、放射立体角モデルの予測精度を検証する模型実験を行いました。模型実験には、超高速模型発射装置を使用しました。図3に示すトンネルを模擬したパイプの出口付近に模

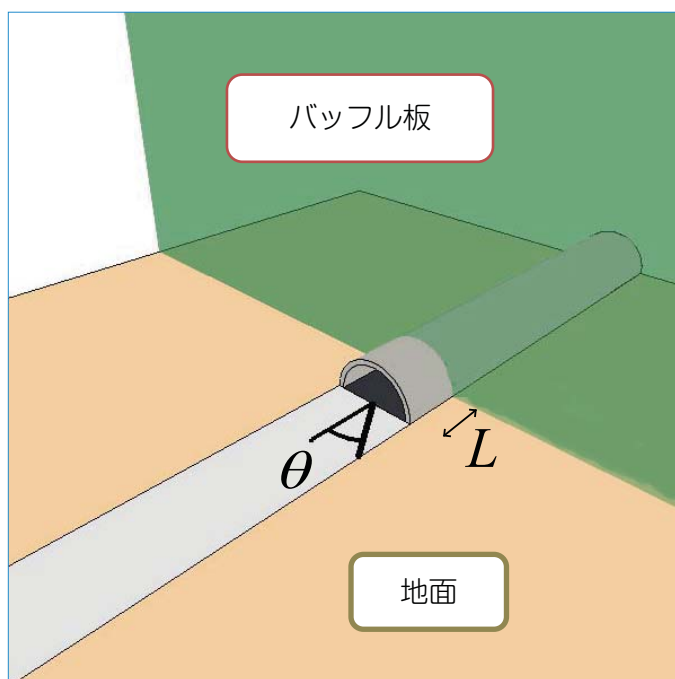


図4 検証した地形の条件

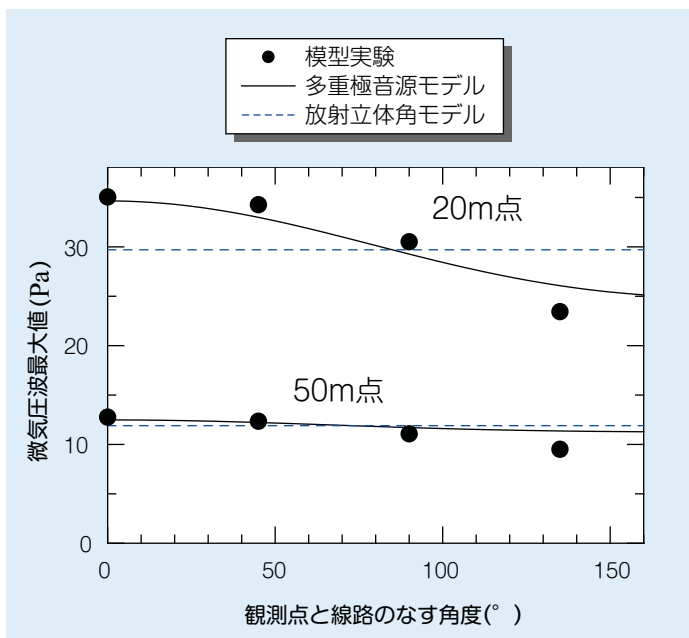


図5 自由空間における微気圧波最大値の分布例

型を設置し、トンネル坑口まわりの地形を模擬しました。ここでは、無限に大きい地面とそれに垂直に設置されたバッフル板(地山を極端にモデル化したもの)で構成された単純な地形の条件(図4)の結果について述べます。

まず平地で発生する微気圧波について調べました(図5)。ここで平地とは、

図4では $L$ が無限大の極限に相当します。図5をみると、トンネル坑口の比較的近傍の観測点(20m点)では微気圧波の音源の指向特性が顕著となり、トンネルの正面とその背面では、微気圧波の大きさが4割程度異なることがわかります。このような微気圧波の指向性は、坑口からもう少し遠方(50m

点)になると、ほとんど無視できるといえます。50m点の場合、放射立体角モデルと模型実験の結果はよく一致していることが分かります。

次に、図4のバッフル板と坑口の距離 $L$ を変化させてみました(図6)。すると、大きい微気圧波が観測される位置が、地形(距離 $L$ )によって変化することがわかりました。距離 $L$ が小さくバッフル板が坑口付近にある場合には、トンネル正面より側面のほうが微気圧波は大きくなります。これは、バッフル板付近では微気圧波が反射し、入射波と反射波が重畳することで、大きな微気圧波が観測されることになるからです。一方、距離 $L$ が大きくなるとバッフル板の影響は小さくなり、図5にあるような音源の指向性の影響が支配的となるため、トンネル正面での微気圧波が相対的に大きくなります。

放射立体角モデルでは、このような微気圧波の詳細な空間分布まで予測することはできませんが、実験結果の下限値を示す包絡線にほぼ一致しており、この条件での最大予測誤差は20%程度となっています。したがって、実用性を考慮すると、放射立体角モデルによる予測は、概算としては十分な精度を有していることが分かります。

### 新しいモデル

これらの実験をもとに、放射立体角モデルを拡張する理論解析を行いました。その結果、周波数や距離の影響をより高い精度で考慮できるようになりました<sup>3)</sup>。これを多重極音源モデルとよんでいます。

多重極音源モデルによる予測値と模型実験を比較した結果を図5、図6に、微気圧波最大値の空間分布について数値シミュレーションと多重極音源モデルによる予測結果を比較したものを図7に示します。多重極音源モデル

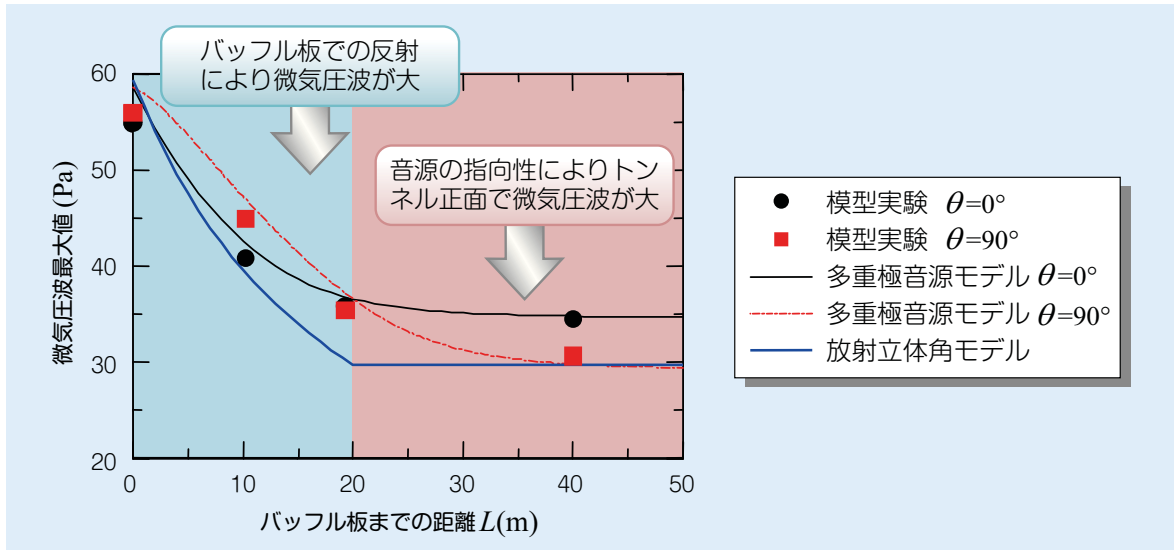


図6 バッフル板までの距離が微気圧波に与える影響 (20m点)

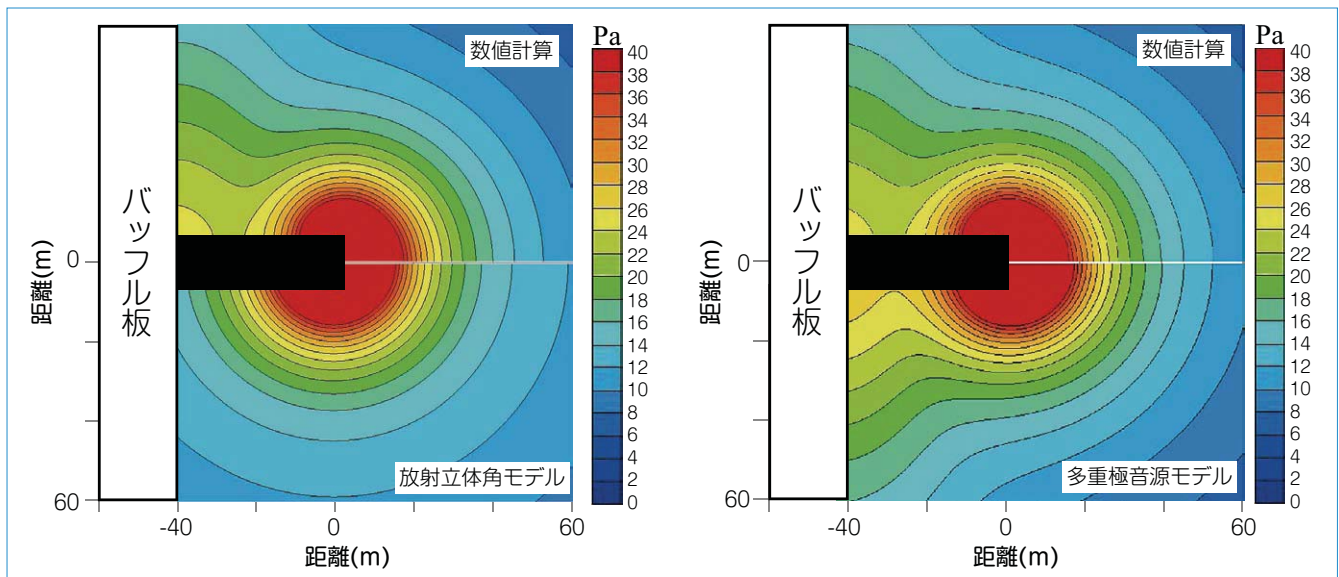


図7 微気圧波最大値の分布

の予測結果は、模型実験結果やシミュレーションとよく一致しており、微気圧波を精度よく予測できることがわかります。

本研究より、音源の指向性、バッフル板上での反射といった微気圧波の音響学的な特性が卓越する場合には、放射立体角モデルによる予測精度が低下することがわかりました。放射立体角モデルでは、微気圧波に対する周波数の影響の一部のみを考慮していますが、

多重極音源モデルでは、考慮する周波数帯をさらに拡張することで、このような特性を表すことができるようになりました。ただし、多重極音源モデルによる微気圧波予測のためには、コンピュータでの計算が必要でありやや汎用性に欠けます。そのため、要求される予測精度に応じて、新旧のモデルを使い分ける必要があります。[RRR]

#### 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，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，1121，1979
- 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