

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

# トンネル微気圧波を予測する

トンネル坑口から放射される微気圧波は、衝撃音を発生させたり坑口近傍の家屋の建具をがたつかせたりするなど、環境問題となることがあります。そのため、新たに路線を建設したり列車の速度を向上させたりする場合には、その大きさを予測し、低減対策法を検討することが必要です。ここでは微気圧波の大きさを予測する方法について紹介します。

## トンネル坑口から放射される微気圧波

高速で走る列車の先頭部がトンネルに突入すると、トンネル内の空気は圧縮され、圧力が上昇します。この圧力上昇は、圧縮波（☞参照）となってトンネル内を反対側の坑口へ向かって伝わっていきます。圧縮波が反対側坑口に到達すると、大部分のエネルギーは反射し膨張波（☞参照）となってトンネル内を列車突入側の坑口へ戻っていきませんが、そのときエネルギーの一部がパルス状の圧力波となってトンネルの外へ放射されます。このパルス状の圧力波をトンネル微気圧波と呼びます。微気圧波の発生メカニズムを図1に示します。

図1からわかるように、微気圧波の現象は、

- (1) 列車がトンネルに突入したときに圧縮波がトンネル内にできる“圧縮波の形成”
- (2) 圧縮波がトンネル内を反対側坑口へ向かって伝わっていく“圧縮波の伝播”
- (3) 圧縮波がトンネル坑口に達し、坑口で反射したときに、微気圧波が坑口から周囲へ放射される“微気圧波の放射”

の三つの段階に分けて考えることができます。そして微気圧波の大きさ（☞参照）は坑口に到達した圧縮波の波面の傾き（図2）が急であるほど大きくなり、通常はこの傾きにほぼ比例します。



**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



**宮地 徳蔵**  
Tokuzo Miyachi  
前 環境工学研究部  
熱・空気流動研究室  
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



**中村 真也**  
Shinya Nakamura  
環境工学研究部  
熱・空気流動研究室  
研究員  
[専門分野] トンネル微気圧波、圧縮性流体力学

### ☞ 圧縮波と膨張波

空気中を波（圧力波）が伝わりある点を通過すると、その点の圧力や密度が変化します。そのとき圧力や密度が増加する波を圧縮波、逆に減少する波を膨張波といいます。列車先頭部がトンネルに突入すると圧縮波、後尾部が突入すると膨張波がトンネル内に形成されます。

### ☞ 微気圧波の波形と大きさの評価値

微気圧波の波形は継続的な圧力の振動波形ではなく、一つあるいは複数のピークを持つパルス状の圧力波形です。評価値としては騒音のようなレベル値（単位 dB）ではなく、圧力パルスの最大値（単位 Pa）がわが国では多く用いられています。

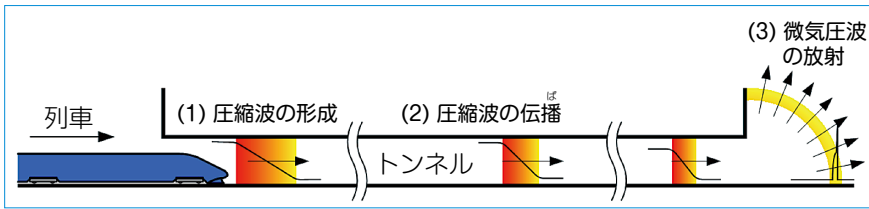


図1 トンネル微気圧波の発生メカニズム

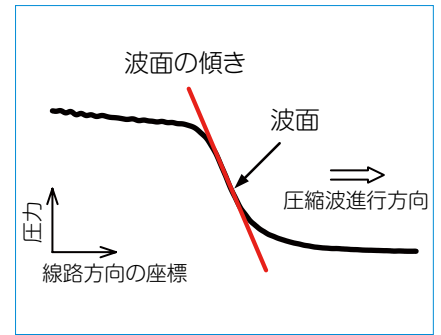


図2 トンネル内の圧縮波の波形と波面の傾き



図3 トンネル緩衝工の設置と列車先頭部の延伸・形状最適化による微気圧波対策の例

微気圧波が大きくなると、トンネル坑口で衝撃音が聞こえたり、家屋の窓枠や戸が急に振動したりして、環境問題となることがあります。微気圧波の原因となる圧縮波が伝わる速度はほぼ音速（約340m/s）であり、列車の走行速度（新幹線で約89m/s ≈ 320km/h）よりも大幅に速いことから、微気圧波は前触れ無く急に発生します。この点が、列車通過に伴う騒音や地盤振動などのほかの環境問題とは異なる特徴です。

### 微気圧波の低減対策と予測法

高速鉄道の路線を新たに建設しようとする、あるいは既存の路線において列車の速度を向上させようとする場合には、トンネル坑口から放射される微気圧波の大きさをあらかじめ見積もり、

それが環境問題となるような値よりも大きい場合、微気圧波を小さくするための対策を検討する必要があります。

トンネル坑口から放射される微気圧波を小さくするためにトンネル坑口周囲に防音壁のようなものを設置しても、微気圧波は波長が長いためあまり有効ではありません。そのため、微気圧波の現象の最初の圧縮波の形成の段階で、圧縮波の波面の傾きを緩やかにするトンネル入口対策が最も多く用いられており、その方法にはトンネル緩衝工<sup>1),2)</sup>（<sup>1)</sup>参照）の設置と列車の断面積縮小および先頭部の延伸・形状の最適化<sup>1)</sup>があります（**図3**）。

微気圧波対策の実施前あるいは実施後の微気圧波の大きさの見積もりは、先ほど述べた微気圧波の現象の三段階に従い、(1) 列車がトンネルに突入し

たときにトンネル内に形成される圧縮波の波形を予測する、(2) 圧縮波が反対側の坑口まで伝わる間の波形の変形を予測する、(3) トンネル坑口に到達した圧縮波の波形によりトンネル外へ放射される微気圧波の波形を予測するという手順で行うことができます。

### 列車のトンネル突入による圧縮波の波形の予測

列車がトンネルに突入するとき形成される圧縮波の波形は、列車速度、車両とトンネルの断面積、車両先頭部の長さや形（断面積分布）、トンネル緩衝工の有無などにより決まります。鉄道総研では、これらの因子を考慮しながらも圧縮波の波形を少ない計算量と時間で効率的に求めることができる数値解析手法を、米国ボストン大学と共同で開発しました<sup>3)</sup>。鉄道総研ではこの数値解析手法を用いて、列車のトンネル突入時に形成される圧縮波の波形を予測しています（**図4(a)**）。

#### トンネル緩衝工

トンネル本坑の1.4倍程度の断面積を持つ覆いで、側面（あるいは天井面）には開口部を設けてあります。緩衝工は、長いほど列車突入時の圧縮波の波面の傾きを緩やかにできるため、長いほど反対側坑口の微気圧波を低減できます。

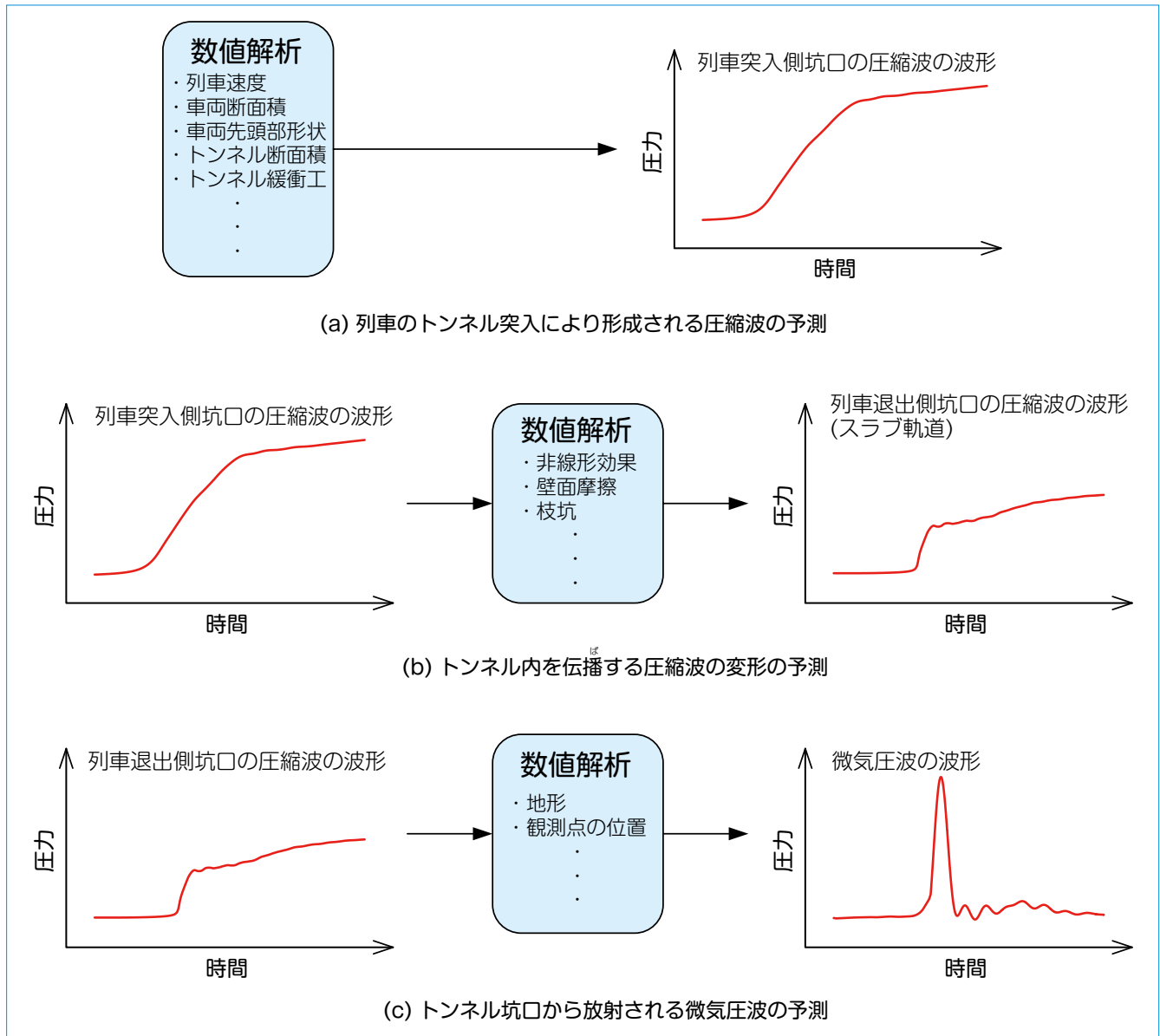


図4 微気圧波の波形予測の流れ

### トンネル内の圧縮波の伝播<sup>ば</sup>

トンネル内に形成された圧縮波の波形が得られたら、次はその圧縮波がトンネルの中を反対側の坑口に伝わる間に、波形がどの程度変わるのかを予測する必要があります。トンネル内を伝わる圧縮波は、トンネル壁面との摩擦などにより減衰しますが、波面の傾きは非線形効果(☞参照)によって切り立とうとします。トンネル内を伝わる圧縮波は、この減衰と非線形効果の影響

を受け、バラスト軌道が敷設されているトンネルでは圧縮波の波面は徐々に緩やかになります。スラブ軌道が敷設されているトンネルでは逆に切り立っていきます。

また、新幹線のトンネルには約500mおきに器材坑という奥行の短い枝坑が設置されており、さらに長大トンネルの建設時に用いられた斜坑、立坑などの奥行が長い枝坑が微気圧波対策などのために残されている場合があ

ります<sup>2)</sup>。この枝坑設置部を圧縮波が通過するとき、圧縮波の一部がトンネル本坑から分岐されるため、圧縮波は変形します。鉄道総研では、これらの

#### ☞ 非線形効果

圧力波の伝わる速さは、圧力の高い部分が高いという性質があります。そのため長いスラブ軌道トンネルでは、伝わる間に圧力が高い部分が低い部分に追いついていくため、圧縮波の波面は徐々に切り立っていきます。

効果を考慮に入れることができる数値解析手法<sup>4)</sup>を用いることにより、トンネルの中を伝わる間の圧縮波の変形を予測しています(図4(b))。

### トンネル坑口における微気圧波の放射

トンネルの坑口まで到達した圧縮波の波形が得られたら、坑口から周囲へ放射される微気圧波の波形を予測し、その最大値を求めます。トンネル坑口から放射される微気圧波の波形は、トンネル内の圧縮波の波形、微気圧波の観測点位置、そして坑口周囲の地形などの影響を受けます<sup>5)</sup>。

鉄道総研では、坑口周囲の複雑な地形に対しても適用可能な、任意の観測点における微気圧波の波形を求めることができる数値解析手法を開発しました(図4(c))。トンネル軸方向に非対称な地形のときの数値解析結果を図5に示します。この結果では、トンネル坑口からの距離が同じでも、場所によって微気圧波の大きさが異なっています。

### 予測法の検証

これまで述べてきた方法を、微気圧波を予測しその低減対策の検討に適用するにあたっては、その正確さを検証しておくことが必要です。その方法として、実際のトンネルにおいて圧力を測定する現地試験のほか、縮尺模型を用いる模型実験があります。

図6は、列車のトンネル突入時に形成される圧縮波の模型実験の実施状況です。この模型実験では、実物と相似な車両、トンネル、トンネル緩衝工の模型を用い、車両模型をトンネル模型へ突入させてトンネル模型内に形成される圧縮波の波形を測定します。そして数値解析結果と模型実験結果を比較し、数値解析による予測結果の精度を

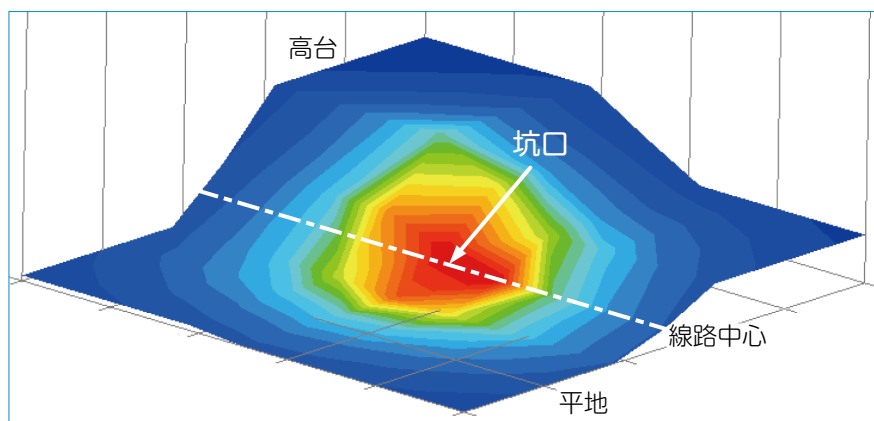


図5 数値解析によって得られたトンネル坑口周囲の地上における微気圧波最大値の分布

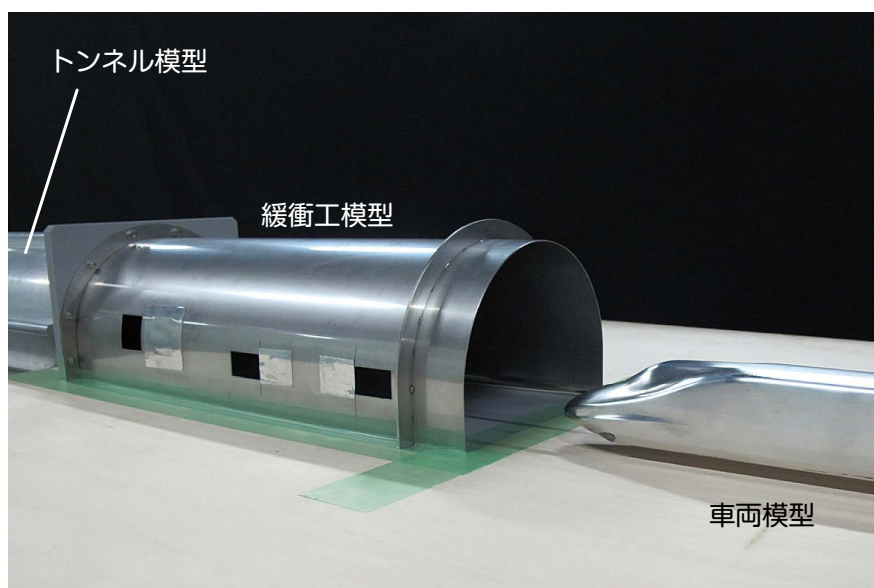


図6 列車のトンネル突入による圧縮波形成の模型実験(縮尺:1/70)

検証しています。

### おわりに

本稿では、高速鉄道における空気力学的な沿線環境問題の一つであるトンネル微気圧波について、その予測法をご紹介いたしました。鉄道総研では今後も予測法の精度向上を図り、新線建設時や速度向上時の微気圧波対策の検討に貢献していきたいと考えています。

**RRR**

### 文献

- 1) 飯田：入口緩衝工と先頭部形状によるトンネル微気圧波対策, RRR, Vol.62, No.5, pp.8-11, 2005
- 2) 福田・ほか2名：微気圧波を小さくする地上設備, RRR, Vol.66, No.8, pp.10-13, 2009
- 3) Howe, M. S., et al.: Rapid calculation of the compression wave generated by a train entering a tunnel with a vented hood, Journal of Sound and Vibration, Vol.311, pp.254-268, 2008
- 4) 宮地・ほか4名：新幹線スラブ軌道トンネル内を伝播する圧縮波の変形の基礎方程式, 日本機械学会論文集(B編), Vol.78, No.785, pp.60-73, 2012
- 5) 宮地・ほか2名：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, RRR, Vol.69, No.9, pp.16-19, 2012