

トンネル内圧縮波と列車の交差時に発生する車内衝撃音

福田 傑* 宮地 徳蔵* 高見 創*
 斉藤 実俊* 菊池 淳**

Interior Explosive Sound Caused When a Train Encounters a Compression Wave Inside a Tunnel

Takashi FUKUDA Tokuzo MIYACHI Hajime TAKAMI
 Sanetoshi SAITO Jun KIKUCHI

When a high-speed train encounters a compression wave with steep wavefront inside a tunnel, an explosive sound can be caused within the train. In this study, on-track measurements of the interior explosive sound within the train and the compression wave propagating through the tunnel were performed on Shinkansen line, and also a numerical simulation was performed for investigating distortion of the compression wave. By the results of the on-track measurements and the numerical simulation, it has been clarified that the magnitude of the interior explosive sound becomes large with the increase of the pressure gradient of the compression wavefront. Furthermore, the results of the numerical simulation show that the countermeasures for reducing the pressure gradient of the compression wavefront generated by the opposite train entry are effective for reducing the magnitude of the interior explosive sound within the train.

キーワード：高速列車，衝撃音，圧縮波，スラブ軌道，トンネル

1. はじめに

新幹線において、列車が長大スラブ軌道トンネル内を走行中に、車内で「ドン」という衝撃音が聞こえるという現象が発生することがある。この現象に関して、小沢ら¹⁾はトンネル内の圧縮波の圧力および空気圧音を測定し、列車内で発生する衝撃音は、対向列車のトンネル突入により形成されトンネル内を伝播する過程で波面が急峻化した圧縮波と列車がトンネル内で交差するときに、波面に含まれている圧力変動の高周波成分が車内に透過することにより発生するとの結論を導いている（図1）。しかしながら、トンネル内の圧縮波と車内衝撃音の大きさとの関係は明らかにされておらず、衝撃音の低減対策に関する検討も十分には行われていない。

そこで本研究では、車内で観測される衝撃音に関して、車上側と地上側の同時測定を実際の列車とトンネルにお

いて実施し、列車内の衝撃音とトンネル内を伝播する圧縮波の関係を調べた。そしてこれらの結果をもとに、車内衝撃音の評価指標と低減対策法について検討を行った。

2. 現地測定

現地測定は、トンネル内を伝播する圧縮波の圧力波形の測定（地上側測定）と、トンネル内を走行中の列車内の圧力および音圧の測定（車上側測定）を同時に実施した。以降の本文中では、衝撃音が観測されることがある車上側測定を実施した列車を「自列車」、圧縮波を発生させた列車を「対向列車」と呼ぶことにする。

現地測定は、全長約15kmの新幹線スラブ軌道トンネルにおいて実施した。本トンネルには器材坑のほかに、立坑、迂回坑などの比較的断面積の大きい枝坑が埋め戻されずに多く設置されており、微気圧波対策として利用

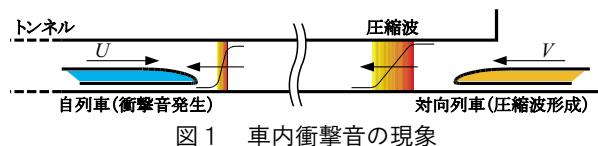


表1 現地測定を実施したトンネルを走行する車両の概要

形式	先頭部長 (m)	断面積 (m ²)	列車・トンネル断面積比	最高速度 (km/h)
A	5.5	12.2	0.19	240
B	9.4	14.1	0.22	240
C	12.0	14.1	0.22	240

* 環境工学研究部（空気力学）
 ** 東日本旅客鉄道株式会社 鉄道事業本部設備部

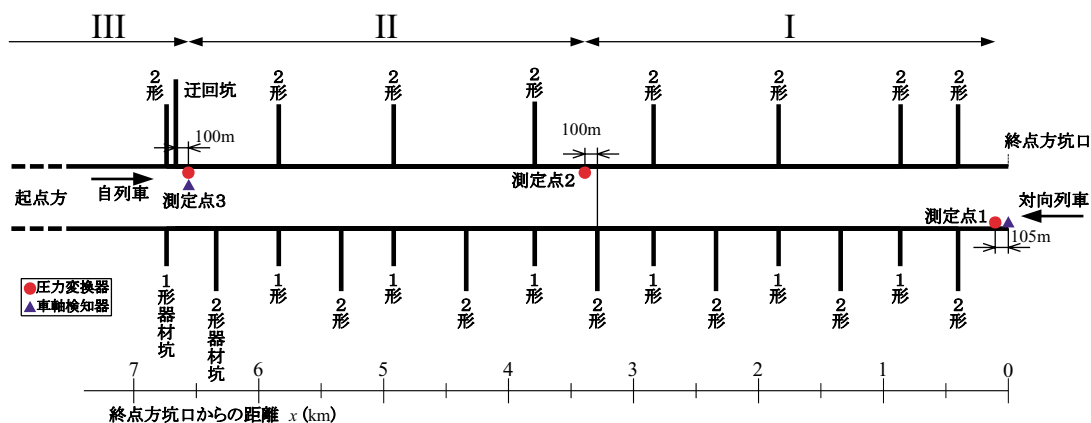


図2 地上側測定の概要

されている²⁾。また本トンネルの終点方坑口には、第4章で後述するように、トンネル覆工が明り部に突出している部分（明かり巻）に開口部が設けられている。現地測定を実施したトンネルには、三つの形式の車両が走行している。車両の概要を表1に示す。

2.1 地上側測定

2.1.1 測定方法

地上側測定の概要を図2に示す。トンネル内を伝播する圧縮波は、枝坑の設置部を通過すると、波面の圧力勾配が小さくなる。そこで本測定は、トンネルの終点方約7kmの区間で行った。この区間は約500mおきに設置されている1形、2形器材坑以外には、迂回坑や立坑などの断面積が比較的大きい枝坑が設置されていないので、圧縮波の波面が急峻化しやすいと考えられる。

本測定では、測定点1～3に設置した圧力変換器（三計エンジニアリング DP8H-01，測定周波数範囲：0～2.4kHz）を用いて、対向列車のトンネル突入により形成される圧縮波を測定した。またトンネル終点方坑口地点に設置した車軸検知器を用いて、対向列車のトンネル突入速度 V を測定した。

対向列車がトンネルに突入するときには自列車がすでにトンネル内を走行しており、トンネル内圧力変動の影響によりトンネル坑口付近の空気は静止していない。そこで対向列車の実効的なトンネル突入速度 V' については、測定点1に設置した超音波風速計（カイジョーソニック DA-600）で測定した風速 v （トンネル内から終点方へ向かう方向を正とする）を用いて、 $V' = V + v$ と補正した。

自列車が測定点3を通過する速度は、測定点3に設置した車軸検知器を用いて測定した。また自列車が測定点1および2を通過する速度については、各測定点における列車先頭部通過時の圧力変動と後尾部通過時の圧力変動の時間差より算出した。

なお、後述の測定結果の考察のため、図2に示すようにトンネルをI, II, IIIの三領域に分けておくこととする。

2.1.2 測定結果

自列車が対向列車による圧縮波とトンネル内で交差するときの、各測定点における圧力の変化の例を図3に示す。図3の各図において、時間軸は測定点1を圧縮波が通過したときを0としている。対向列車のトンネル突入により形成された圧縮波は、測定点1→2→3と伝播していく過程で波面が急峻化している。なお、図3の例の場合、測定点3では対向列車による圧縮波の波面圧力勾配最大値は100kPa/sを超える値にまで達している。また図3(c)より、測定点3においては対向列車による圧縮波が通過した後に自列車が通過していることから、自列車と圧縮波が測定点3よりも起点方（図2の領域III）で交差していることがわかる。

2.2 車上側測定

2.2.1 測定方法

車上側測定では、圧力変換器（三計エンジニアリング DP8H-01 絶対圧計，測定周波数範囲：0～2.4kHz）、精密騒音計（リオン NL-32，測定周波数範囲：20Hz～20kHz）、低周波音圧レベル計（リオン NA-18A，測定周波数範囲：1～500Hz）、データレコーダ（NF回路設計ブロック EZ7510，サンプリング周波数：50kHz）を用い、車内の圧力および音圧の変動を測定した。そして時系列データの収録のほかに、対向列車による圧縮波との交差時の衝撃音の有無などの体感について記録した。

2.2.2 測定結果

トンネル走行時の自列車内の圧力および音圧の時間変化の例を図4(a)に示す。圧力変換器で測定された圧力をみると、車内の圧力は対向列車やトンネル内を往復する圧力波との交差により変化していること、特に対向列車のトンネル突入により形成された圧縮波との交差時に大きく上昇していることがわかる。さらに精密騒音計および低周波音圧レベル計による音圧の時間変化にも、対向列車による圧縮波と自列車が交差したとき、鋭いピークが生じていることがわかる。

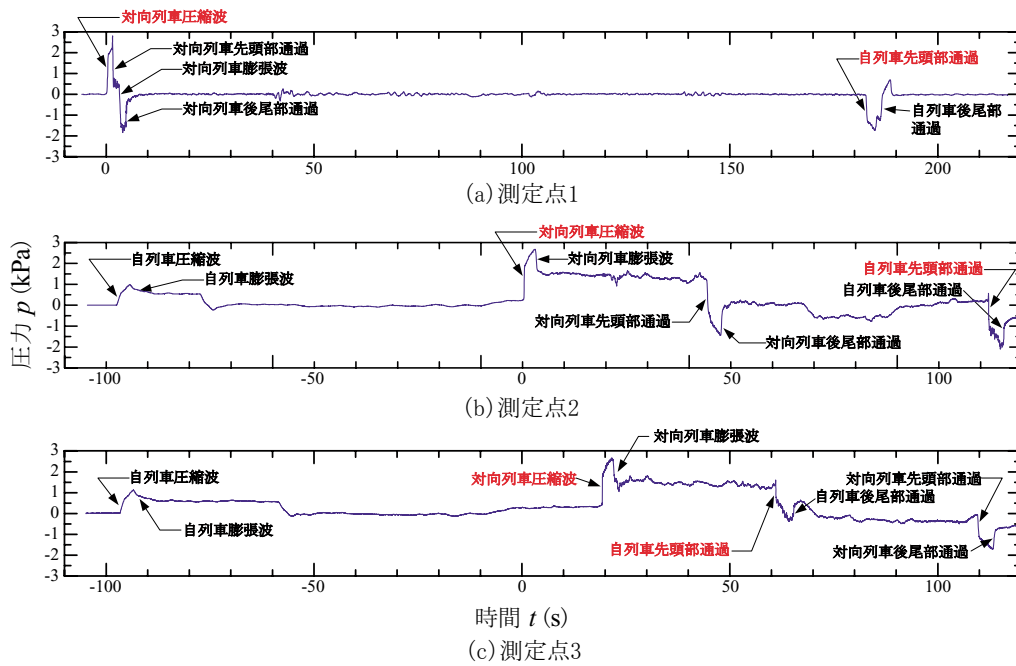


図3 トンネル内圧力の測定例（自列車形式：C，自列車通過速度 測定点3：171km/h，測定点2：199km/h，測定点1：204km/h，対向列車形式：C，対向列車トンネル突入補正速度 V' ：243km/h）

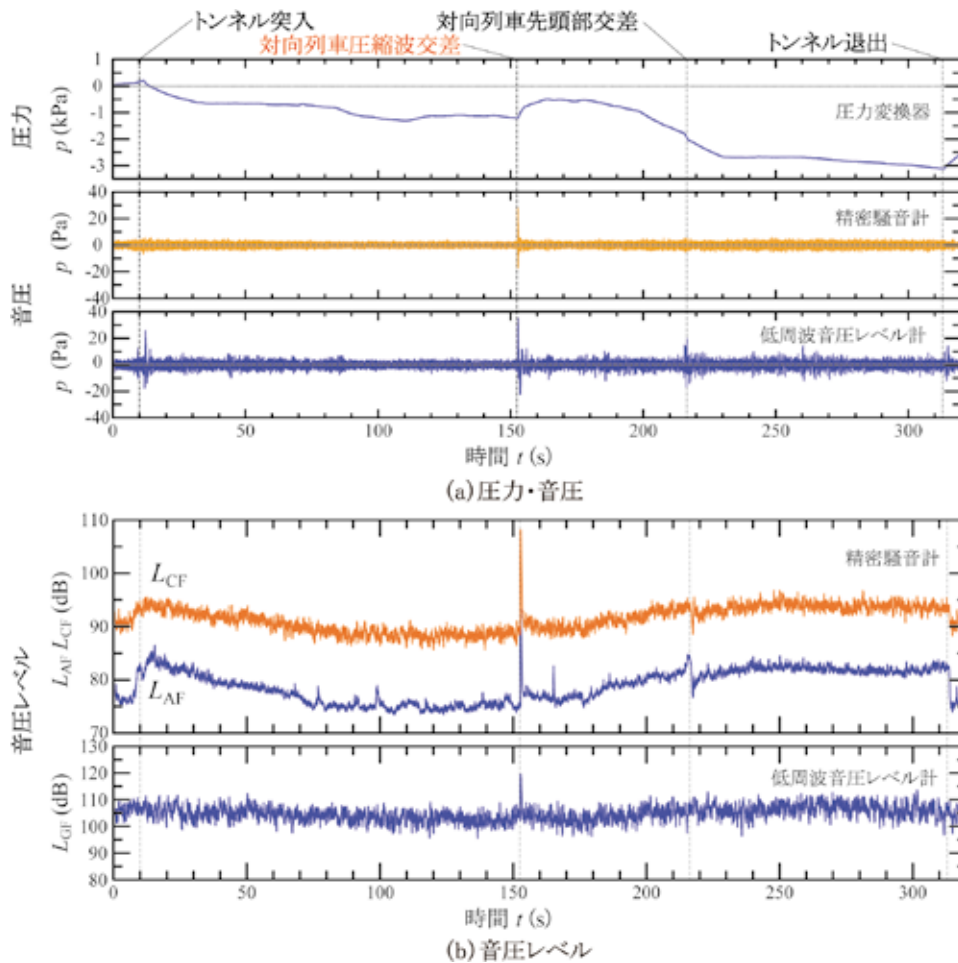


図4 自列車内の圧力および音圧レベルの測定例（測定条件：図3と同じ）

時間重み付け特性をF（時定数：125ms）として，後処理により精密騒音計による音圧の変化から求めた騒音レ

ベル（A特性³⁾音圧レベル L_{AF} ，C特性³⁾音圧レベル L_{CF} ，および低周波音圧レベル計の音圧の変化から求め

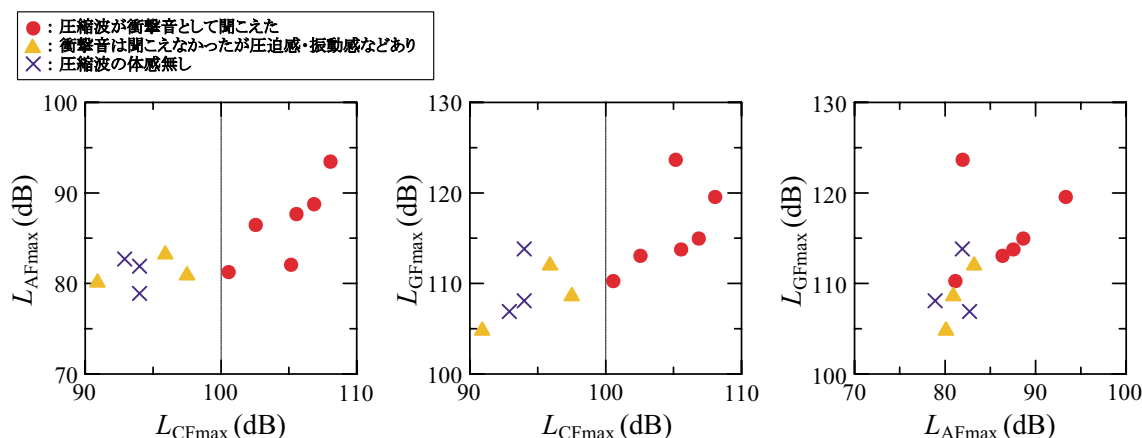


図5 各音圧レベルピーク値の関係と圧縮波の体感

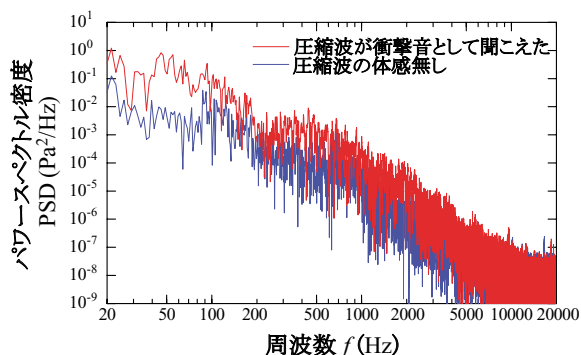


図6 圧縮波と交差時における自列車内音圧のパワースペクトル密度 PSD の例（精密騒音計）

たG特性⁴⁾音圧レベル L_{GF} の時間変化を図4 (b) に示す。対向列車による圧縮波と自列車が交差したとき、各音圧レベルに鋭いピークが生じていることがわかる。

自列車が圧縮波と交差したときの各音圧レベルピーク値を図5に示す。また図5中のプロットは、測定者による圧縮波の体感を三段階で示してある。図5より圧縮波の体感はC特性音圧レベルのピーク値 L_{CFmax} の値との間に相関が高いことから、 L_{CFmax} を車内衝撃音の評価に用いることが妥当であると考えられる。そして図5より、 L_{CFmax} の値が100dBより大きくなると、騒音レベルピーク値 L_{AFmax} やG特性音圧レベルピーク値 L_{GFmax} によらず圧縮波が衝撃音として聞こえてくることになる。

自列車が対向列車による圧縮波と交差したときの音圧の周波数分析結果（パワースペクトル密度 PSD，サンプリング周波数：50kHz，サンプル数：2¹⁵点，周波数分解能 $\Delta f \approx 1.5\text{Hz}$ ）の例を図6に示す。図6より，対向列車による圧縮波を衝撃音の体感が無かった場合と衝撃音として聞こえた場合を比較すると，衝撃音として聞こえた場合のパワースペクトル密度 PSD は，低周波の領域，特に約40～100Hzの周波数域において，衝撃音の体感が無かった場合に比べて大きくなっていることがわかる。このことから，A特性による騒音レベル L_A は低周波域で

相対レスポンスが小さくなるので，車内衝撃音の評価指標として適当ではないと考えられる。またG特性音圧レベル L_G についても，20Hz以上の周波数域で相対レスポンスが小さくなるものであることから，やはり車内衝撃音の評価指標としては適当ではないと考えられる。一方，C特性音圧レベル L_C は，可聴音域で周波数特性がほぼ一定であることから，車内衝撃音の評価指標として妥当なものであると考えられる。

なお，衝撃性低周波音をC特性音圧レベル L_C で評価することについては，ドイツ⁵⁾，⁶⁾ やアメリカ⁵⁾，⁷⁾ などでも行われている。また車内衝撃音に類似した現象であるトンネル微気圧波について，小沢ら⁸⁾ が直接音をC特性音圧レベル L_C で評価した結果をみると，衝撃音の有無は明記されていないものの圧力のピーク値から衝撃音が発生していると推測される時，やはり100dB以上のピーク値が測定されている。これらのことから，車内衝撃音の評価にC特性音圧レベル（時間重み付け特性：F）のピーク値 L_{CFmax} を用い，車内衝撃音の目安を100dBとすることは妥当なものであると考えられる。

3. 車内衝撃音と圧縮波の関係

本章では，自列車が対向列車による圧縮波と交差したときの，自列車内C特性音圧レベルピーク値 L_{CFmax} と圧縮波の関係について述べる。ここで，対向列車による圧縮波と自列車との交差位置における圧縮波の波形は，地上側測定で得られた圧縮波形を初期波形に用いた圧縮波の伝播の数値計算⁹⁾により推定した。

数値計算においては，測定事例ごとの自列車と対向列車による圧縮波の交差領域の始点（交差領域がIの場合には測定点1，交差領域がIIの場合には測定点2，交差領域がIIIの場合には測定点3）の圧縮波形を初期波形とした。そして，図7に示すような $x-t$ ダイアグラムにより自列車と対向列車の交差位置を推定し，交差領域の始点

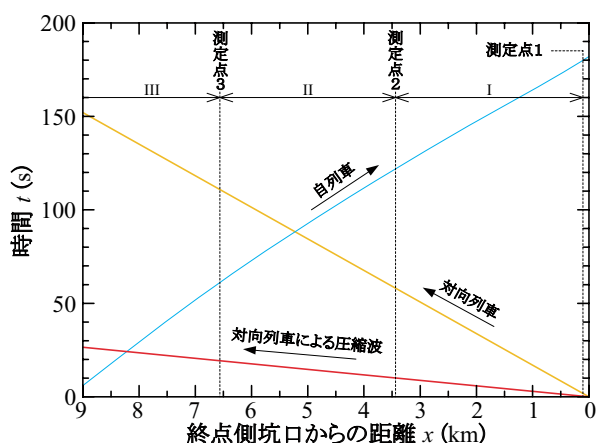


図7 自列車が対向列車による圧縮波と交差するときの $x-t$ ダイアグラムの例 (図3および図4に示した測定例の場合)

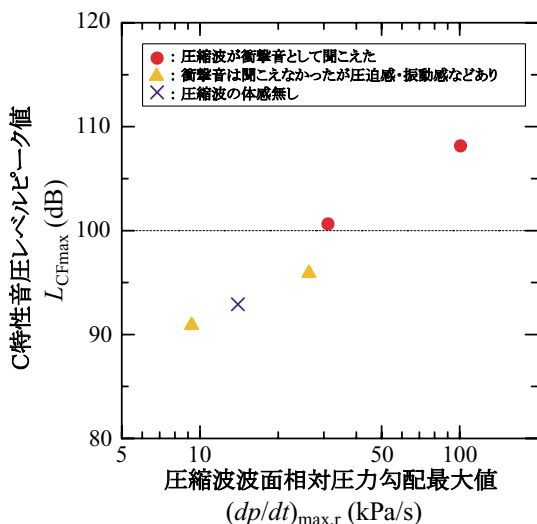


図8 列車からみた車外の圧縮波の波面相対圧力勾配最大値 $(dp/dt)_{max,r}$ と車内衝撃音のC特性音圧レベルピーク値 L_{CFmax} の関係

から交差位置まで伝播する間の圧縮波の変形を求めた。自列車が対向列車による圧縮波と交差するとき、自列車から相対的にみた車外の圧縮波の波面圧力勾配最大値は、ドップラー効果により $(U+c)/c$ 倍 (U : 自列車の速度, c : 音速) になる¹⁾。このドップラー効果を考慮に入れた車外の圧縮波の波面の相対圧力勾配最大値 $(dp/dt)_{max,r}$ と車内のC特性音圧レベルのピーク値 L_{CFmax} の関係を図8に示す。図8より、 $(dp/dt)_{max,r}$ が大きいほど L_{CFmax} が大きくなること、 $(dp/dt)_{max,r}$ が約 25kPa/s を超えると L_{CFmax} が車内で衝撃音が発生する目安である 100dB を超えるようになることがわかる。

以上のことから、車内で衝撃音が発生しないようにするためには、対向列車による圧縮波の波面相対圧力勾配最大値 $(dp/dt)_{max,r}$ が 25kPa/s を超える箇所で圧縮波と列車が交差しないようにダイヤや自列車のランカーブを調

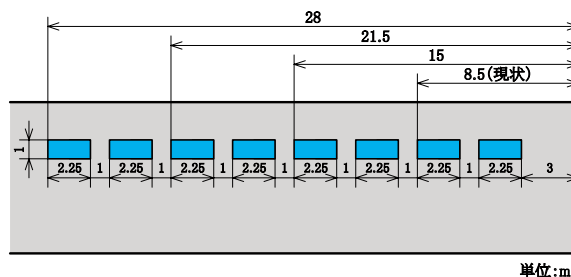


図9 トンネルの終点側坑口の明かり巻開口部案

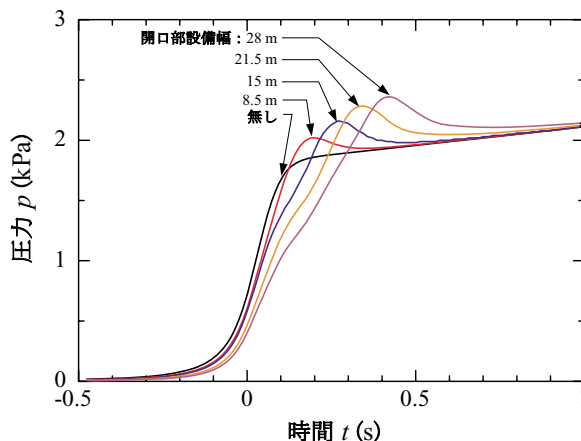


図10 明かり巻開口部の設置幅を変えたときの圧縮波初期波形 (対向列車形式：B, 数値計算結果)

整するということが考えられる。また、トンネル内のあらゆる箇所で圧縮波の相対圧力勾配最大値 $(dp/dt)_{max,r}$ を 25kPa/s 以下にすることにより、ダイヤや自列車のランカーブの条件によらず自列車内で衝撃音が発生しないようにすることが可能であると考えられる。

4. 低減対策法の検討

トンネル内を伝播する圧縮波の波面圧力勾配を緩やかにするためには、トンネル微気圧波の低減対策と同様に、列車がトンネルに突入して圧縮波を形成する段階で、トンネル緩衝工などにより圧縮波の波面圧力勾配を緩やかにする列車突入時対策が有効であると考えられる。そこで本研究では、現地測定を実施したトンネルを対象として、対向列車のトンネル突入時対策の効果について検討を行った。

現在、現地測定を実施したトンネルの終点方坑口の明かり巻には開口部が坑口から 8.5m まで設けられている。しかし現状では車内で衝撃音が発生することがあることから、図9のように、開口部の設置幅を $15, 21.5, 28\text{m}$ まで広げた場合の効果を数値計算によって調べた。また比較のため、開口部が無い場合についても数値計算を行った。

対向列車がトンネルに突入したときの圧縮波初期波形については、圧縮波高速計算法¹⁰⁾により求めた波形の圧力に、現地測定結果に合うように経験的な乗数 1.2 を

特集：環境技術

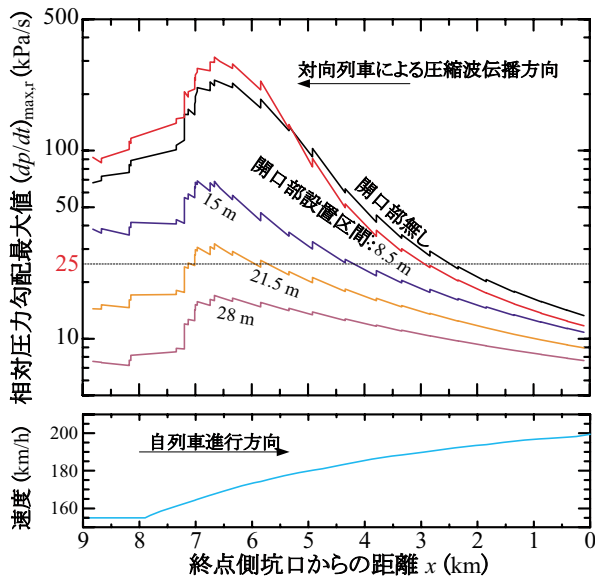


図11 明かり巻開口部設置区間延長時の対向列車からみた圧縮波の相対圧力勾配最大値の計算結果（自列車形式：C，対向列車形式：B）

用いて計算結果を補正したものを用いた。このとき、対向列車速度は現地測定を実施したトンネルのある路線の最高速度である240km/hとし、開口部の全ての開閉パターンについて計算を行ったうえで、列車形式Cに対して突入側坑口において最も波面圧力勾配が小さくなるように開口パターンを設定した。得られた初期波形を図10に示す。開口部設置幅を広げるほど、圧縮波の波面が緩やかになることがわかる。

対向列車により形成されトンネル内を伝播する圧縮波の波面の、交差する自列車からみた相対圧力勾配最大値 $(dp/dt)_{max,r}$ の変化の例（対向列車の形式Bの場合）を図11に示す。ここで自列車の速度については、図11下図に示す計画ランカーブとした。図11より、明かり巻開口部設置区間が28mのとき、トンネル内のあらゆる場所で相対圧力勾配最大値が自列車内衝撃音の有無の目安である25kPa/sを超えないことがわかる。このことから、明かり巻開口部やトンネル緩衝工などにより対向列車のトンネル突入時対策を適切に行うことにより、自列車内で衝撃音を発生させないようにすることができると考えられる。

5. まとめ

長大スラブ軌道トンネルにおいて走行中の列車の車内で発生する衝撃音の評価指標および低減対策法の検討のため、現地測定を実施した。現地測定は、車両側と地上側の測定を同時に実施し、自列車の車両内の圧力および音圧、対向列車のトンネル突入による圧縮波を測定した。結果を以下にまとめる。

(1) 車内衝撃音の評価指標としては、C特性音圧レベル

のピーク値が適当であると考えられる。

- (2) C特性音圧レベルのピーク値が100dBより大きくなると車内衝撃音が聞こえることから、この値が低減対策の目安値となる。
- (3) 列車と交差する圧縮波波面の相対圧力勾配最大値が25kPa/sを超えると、車内のC特性音圧レベルのピーク値が100dBを超え、車内で衝撃音が発生する。
- (4) ランカーブおよびダイヤによらず、車内で衝撃音が発生しないようにするためには、トンネル内のあらゆる箇所で、交差する列車からみた圧縮波の相対圧力勾配最大値を約25kPa/s以下にすればよいと考えられる。
- (5) 車内衝撃音の低減対策には、トンネル緩衝工の設置などによる対向列車突入時対策が有効であると考えられる。

謝辞

本研究の実施にあたりご協力いただいたJR東日本研究開発センター フロンティアサービス研究所および高崎支社の関係各位に感謝の意を表する。

文献

- 1) 小沢智, 前田達夫, 種本勝二, 木下真夫: トンネル内圧縮波の前面に付随する空気圧音, 鉄道技術研究所速報, No.A-84-3, 1984
- 2) 山本彬也, 小沢智, 前田達夫, 木下真夫, 種本勝二: トンネル内の枝坑を利用した微気圧波低減対策の効果, 鉄道技術研究報告, No.1250, 1983
- 3) JIS Z8731: 環境騒音の表示・測定方法, 1999
- 4) ISO7196: Acoustics-frequency weighting characteristic for infrasound measurements, 1995.
- 5) 山田伸志: 低周波音のガイドラインの国際動向, 「騒音・振動評価の国内外規格最新動向」講習会, 工業技術会, pp. 2-1-2-10, 2004
- 6) DIN 45680, Deutsche Norm: Messung und bewertung tieffrequenter geräuschmissionen in der Nachbarschaft, 1997.
- 7) ANSI S12.9-Part 4, Quantities and procedures for description and measurement of environmental sound - Part 4: Noise assessment and prediction of long-term community response, 1996.
- 8) 小沢智, 森藤良夫, 前田達夫, 木下真夫: トンネル出口微気圧波の実態, 鉄道技術研究報告, No.1023, 1976
- 9) 宮地徳蔵, 小澤智: トンネル内を伝播する圧縮波の伝播特性, 日本機械学会第85期流体工学部門講演論文集, 2007
- 10) Howe, M. S., Iida, M., Maeda, T. and 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.