

車両の影響等を考慮したトンネル坑口周辺部の騒音予測

小方 幸恵* 北川 敏樹*

Railway Noise Prediction Model around Tunnel Portal Including the Screening Effect due to Vehicles

Yukie OGATA Toshiki KITAGAWA

In order to estimate the Shinkansen wayside noise around tunnel portals, a prediction model is proposed. In the model, the noise from tunnel section is composed of two sound sources, i.e. noise directly emitted from a vehicle, and multiple-reflected noises in the tunnel. Both a field test and an acoustic model test were carried out to understand noises around tunnel portal. On the basis of these results, both the screening effect due to vehicles and the directional characteristics of the multiple-reflected noises are introduced in the model.

キーワード：沿線騒音，トンネル坑口音，騒音予測手法，音響模型試験

1. はじめに

鉄道沿線における環境保全は、重要な課題のひとつである。鉄道車両の走行に伴って発生する音は沿線に伝搬し、沿線の評価点に対する騒音低減策はその騒音の特性に合わせて進められてきた。トンネル周辺部も例外ではなく、沿線騒音の予測手法および対策の検討が行われてきた^{1) 2) 3)}。これらの検討から、列車がトンネル坑口付近を走行するとき、音源となる車両がトンネル内外ともに存在する場合に、通常のみり区間の場合と比較して沿線騒音が大きき場合があることが示された^{1) 2) 3)}。これは、トンネル外のみり区間の車両から発生した音（のみり部音）に、トンネル内の車両から発生してトンネル坑口から放射される音（トンネル坑口音）が加わるためである。このことから、トンネル坑口周辺部における沿線騒音の予測を行うためには、のみり部音とトンネル坑口音のそれぞれについて評価する必要がある。

文献1では、トンネル坑口周辺部における沿線騒音を、のみり部音とトンネル坑口音の和とする手法（以下、既存の手法）が提案された。既存の手法では、トンネル坑口音は、トンネル内壁で反射しない成分である直達音とトンネル内壁で反射する成分であるトンネル反射音の和としている。これを踏まえ、トンネル坑口周辺部における沿線騒音の予測精度を既存の手法^{1) 3)}より向上させることを目的として、現地試験および音響模型試験を実施した。本稿では、それらの試験結果、および試験結果に基づいて検討したトンネル坑口周辺部の騒音の予測手法について述べる。このうちトンネル反射音について、車体による音の遮蔽の影響とトンネル反射音の指向特性を考慮したモデルを提案する。加えて、予測結果を現地

試験結果と比較することにより、予測手法の妥当性を評価する。

2. トンネル坑口周辺部の沿線騒音の評価

2.1 現地試験による評価

2.1.1 現地試験の概要

トンネル坑口周辺部の沿線騒音に対するトンネル坑口音による影響を評価するため、現車試験による騒音測定を実施した。軌道条件や構造物条件等を以下に示す。

軌道条件：スラブ軌道

構造物条件：コンクリート高架橋

（高さ：G.L. ～ R.L.+8.7m）

防音壁条件：上り線側 直型 R.L.+2.0m

下り線側 直型 R.L.+2.23m

車両条件：新幹線車両 10両（250m），270km/h

トンネル坑口にはトンネル緩衝工（鋼製）が設置されている。緩衝工の開口部スリットは下り線側にはなく、上り線側に10箇所ある。

騒音測定は、柵外の上り線側と下り線側それぞれ30点程度の測定点を設置して実施した。主な測定範囲はまくらぎ方向に軌道中心から0～50m、線路長手方向にトンネル緩衝工口（以下、トンネル坑口）から0～+100mである。また、マイクロホン（RION社製UC-30）の高さはすべて地上1.2mである。列車速度と列車位置は、上下線のレールに設置された車軸検知器から求めた。また、各測定点における結果では、同程度の速度（基準速度に対して ± 2.5 km/h）で走行する3本以上の列車に対応する結果を算術平均した。

2.1.2 トンネル坑口周辺部の騒音レベル分布

図1に、2.1.1項の条件での列車位置に対応した騒音レベル分布を示す。

* 環境工学研究部 騒音解析研究室

この図からわかることを以下にまとめる。

- ・列車全体がトンネル内にある場合（図1(a)(b)）、トンネル坑口に対して45°程度の方向にトンネル坑口音が強く放射される。列車先頭部がトンネル坑口に近づくと、下り測線側でトンネル坑口から離れが20～30m程度、近接軌道中心から距離が20～30m程度の範囲（X区域）を中心に騒音レベルが大きくなる傾向にある。列車先頭部がトンネル坑口に近づくと、このX区域を中心に騒音レベルが大きくなる。
- ・列車先頭部がトンネルから退出した後（図1(c)）では、X区域における騒音レベルは先頭部が退出した時より大きくなる。また、トンネルから退出する車両数が増えると、レール長手方向に騒音レベルが大きくなる領域が広がる傾向にある。これは、明かり部音による影

響と考えられる。

- ・列車全体がトンネルから退出した場合（図1(d)）、トンネル坑口音による影響は小さくなり、列車が在線する部分に対応した位置で騒音レベルが大きくなる。

2.2 音響模型試験による評価

2.2.1 音響模型試験の手法

鉄道総研内無響室での音響模型試験により、トンネル坑口周辺部における騒音分布の評価を行った⁴⁾。この試験では、トンネルを含む鉄道構造物、車両、音源およびマイクロホンを無響室内に設置し、音源から発生した音を1/4インチマイクロホン（B&K製、4939-L-002）を用いて測定する。以下、表示寸法および周波数は特に明示しない限り現車換算値とする。車両下部音は音源の

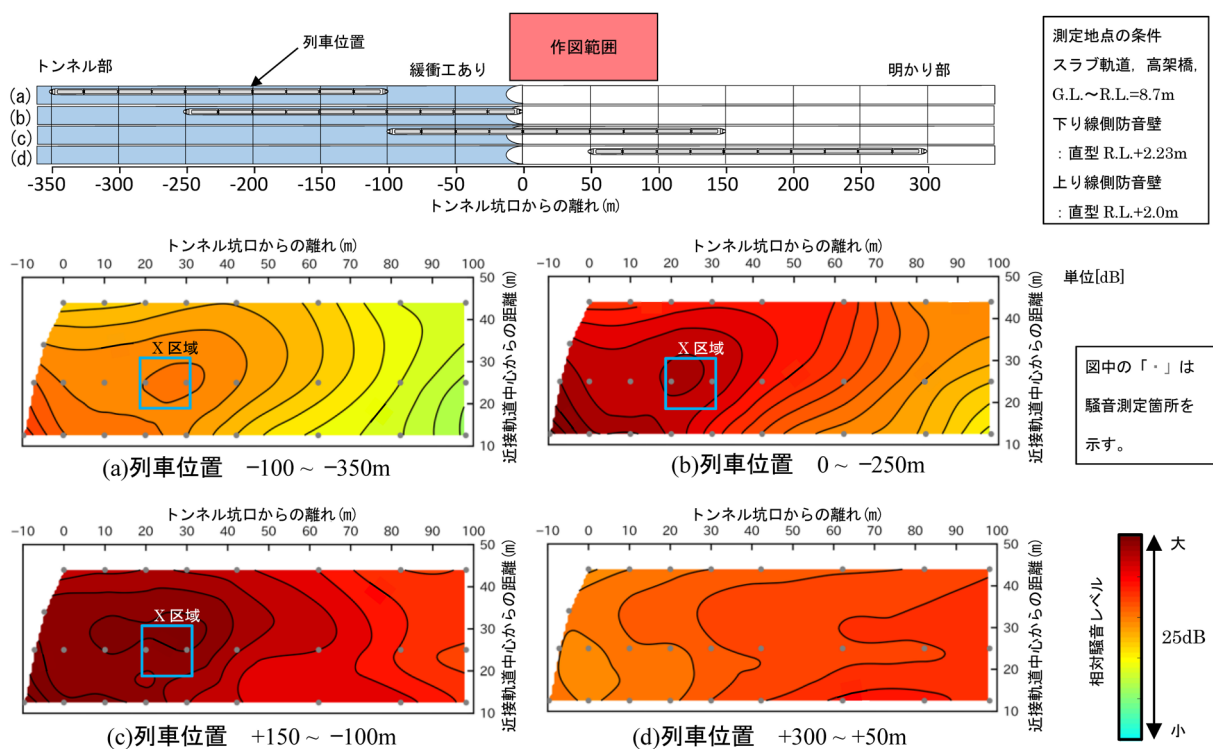


図1 トンネル坑口周辺部の相対騒音レベル分布

(下り列車, 10両 250m, 270km/h, 下り線側測定点, 時間重み付け特性 F, 単位 [dB])

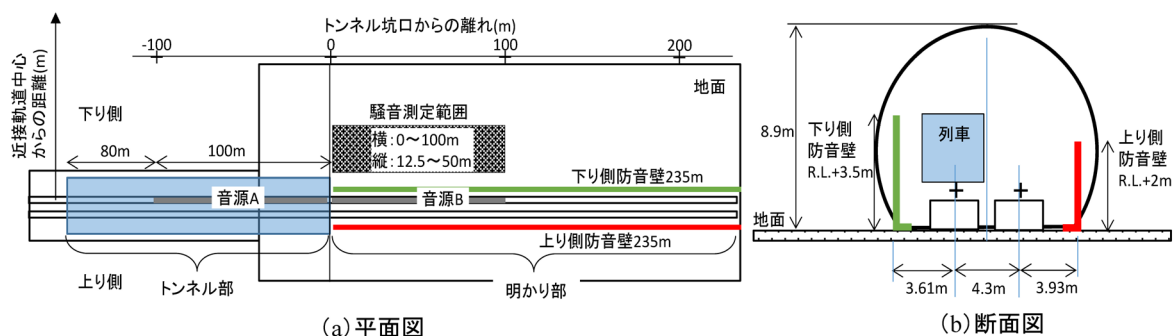


図2 音響模型試験における模型設置位置および騒音測定範囲

表1 音響模型試験の条件の概要

縮尺	1/25
音源	エアジェット一様有限長線音源 (1回の測定では100m分使用) 近接側車両の車両下部音の位置 (R.L., 軌道中心) に設置
構造物条件	複線平地(素地) 区間, スラブ軌道, R.L.=G.L.+0.9m相当
防音壁条件	直型防音壁: 下り側(高さR.L.+3.5m) 上り側(高さR.L.+2m)
測定点	トンネル坑口端から線路長手方向に 0~100mに12.5mピッチの9列, 近接軌道中心からまくらぎ方向に 12.5,25,50mの3列, 9×3=27点 高さ: G.L.から1.2m(マイクロホン水平・まくらぎ方向に車両に向けて測定)

ワーレベルが大きい⁵⁾ため、トンネル坑口周辺部の騒音に対して支配的である。そのため、本試験の評価対象の音源は車両下部音とした。図2に模型設置位置および騒音測定範囲を、表1に本試験の条件の概要を示す。模型条件の簡単化のため、素地(平地)を対象とする。音源は図2の音源A(線路長手方向にトンネル坑口端から-100mから0mまでトンネル内100m分)、音源B(同上0mから100mまで明かり部100m分、騒音測定範囲の正面)に別々に設置し、各々の設置条件で騒音を測定した。車両は線路長手方向に軌道全体を覆うように配置し、受音点に対して近接側(下り側)にあるものとする。

音響模型試験での測定データは、次の手順で現車換算する。①測定されたデータの1/3オクターブバンド周波数を1/25倍する。②実測値から空気吸収の影響を考慮した補正⁶⁾を行う。③模型試験に用いた音源と現車(列車速度は260km/h)におけるレール近傍点での騒音の周波数スペクトルの差を考慮することにより、各測定点における現車に対応したレベルを求める。④上記③の63~4000Hzの各バンドのパワー和(O.A.値)を求める。

2.2.2 音響模型試験の結果

前項により得られた結果を図3に示す。音源長さは、トンネル内100m、明かり部100mで合計200m(8両分)である。評価結果は、明かり部のみに音源(100m分)を置いたときの基準点(トンネル坑口端から50m、近接軌道中心から25m)の値を0dBとした。図3からわかることを次に挙げる。

(a) 音源がトンネル内のみである場合に

は、トンネル坑口からトンネルの外の斜め前方へ等音圧レベル線の尾根を形成して音が強く放射される。その尾根よりトンネルから遠くなるにつれて騒音は緩やかに小さくなるが、尾根よりトンネルに近くなると急激に小さくなる。

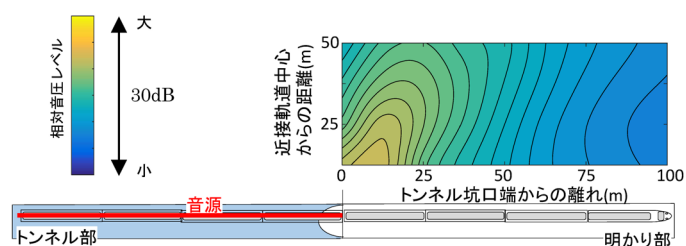
(b) 音源が明かり部にある場合には、まくらぎ方向の軌道からの距離が遠いほど騒音は小さい。

2.1節の現車試験と本音響模型試験では地面からレールまでの高さ、防音壁高さ等条件は異なるが、(a)と(b)に示す騒音分布の形状はほぼ同様である。

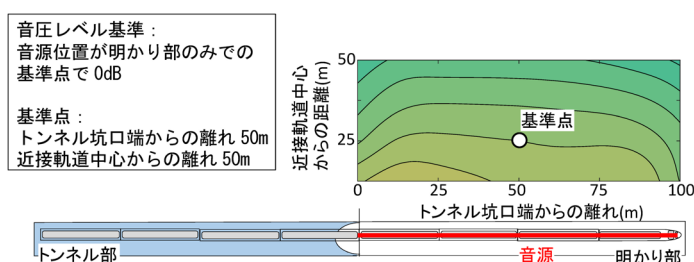
3. 沿線騒音の予測手法の検討

3.1 トンネル坑口音の予測手法の概要

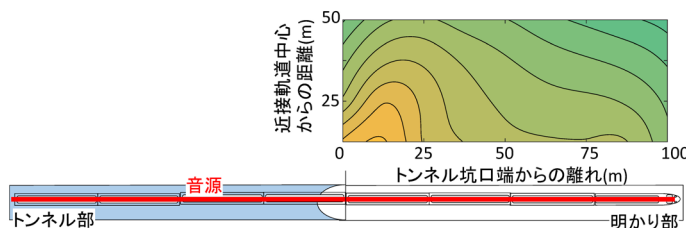
2章から、トンネル坑口周辺部では音源位置により騒音分布が異なること、トンネル坑口音は明かり方向の斜め前方へ強く放射されること等がわかった。そこで、これらを再現する沿線騒音の予測手法を検討する。ここでは既存の手法を踏襲し、トンネル坑口周辺部の沿線騒音は、明かり部音(トンネル外の音源からの音)とトンネル坑口音(トンネル内の音源からの音)の和とする。ト



(a)音源位置:トンネル部のみ



(b)音源位置:明かり部のみ



(c)音源位置:トンネル部および明かり部

図3 音響模型試験によるトンネル坑口周辺部の音圧レベル分布(近接側列車, O.A. 値, 単位 [dB])

ンネル坑口音は、直達音とトンネル反射音の和とする。トンネル反射音の伝搬の予測については、明かり部に存在する車体による音の遮蔽の影響を考慮したモデルを採用する³⁾。また文献7に示されたトンネル反射音の音源の指向特性を考慮した手法を導入する。この指向特性は、道路交通騒音の分野において行われた実験に基づくものである。以下では、これら2点を組み合わせた新たなトンネル坑口音の予測手法を提案する。

3.2 トンネル坑口音の計算方法

トンネル坑口音 L_A は、トンネル内に存在する点音源から放射される直達音の寄与 $L_{A,TD}$ と、それ以外のトンネル内壁における反射に関わる音（トンネル反射音）の寄与 $L_{A,TR}$ のパワー和として式(1)にて求める。図4にトンネル坑口音の伝搬モデルを示す。直達音は基本式(2)にて計算する。

$$L_A = 10 \log_{10} \left(10^{\frac{L_{A,TD}}{10}} + 10^{\frac{L_{A,TR}}{10}} \right) \quad (1)$$

$$L_{A,TD} = L_{WA} - 8 - 20 \log_{10} r_D + \Delta L_{dif} + \Delta L_{gmd} \quad (2)$$

ここで、 L_{WA} は直達音の音響パワーレベル [dB]、 r_D は直達音の仮想点音源（後述(8)式参照）から受音点までの距離 [m]、 ΔL_{dif} は坑口および防音壁における遮蔽に伴

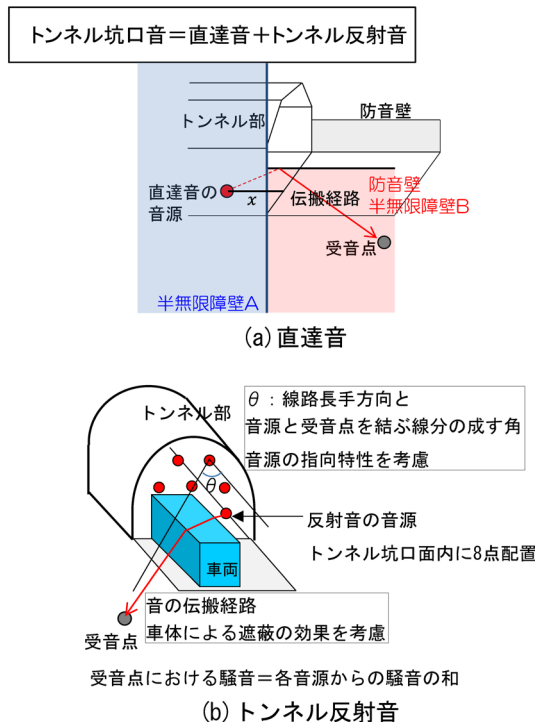


図4 トンネル坑口音の伝搬モデル

う減衰に関する補正量 [dB]、 ΔL_{gmd} は地表面効果による減衰に関する補正量 [dB] である。 L_{WA} は明かり部音のパワーレベルと等しい。 ΔL_{dif} は、図4(a)に示す3/4障壁を仮定して、トンネル坑口の端部を表す半無限障壁Aと防音壁を表す半無限障壁Bによる遮蔽に関する補正量の和とする。

トンネル反射音は、トンネル坑口面上の仮想面音源を8個の点音源に置換し、各点音源からの寄与の合成として式(3)～(7)で求める。トンネル反射音の予測モデルは図4(b)の通りである。図5にトンネル反射音に対する車体による遮蔽効果の算定方法を示す。ここでは車両と防音壁の3重壁とし、文献7の三重遮音壁の回折補正量の計算方法に従って遮蔽補正量を算出する。

$$L_{A,TR} = 10 \log_{10} \left(\sum_{i=1}^N 10^{\frac{L_{A,TR,i}}{10}} \right) \quad (3)$$

$$L_{A,TR,i} = L'_{WA,R} - 8 - 20 \log_{10} r_i + \Delta L_{dif,i} + \Delta L_{gm,i} + n * 10 \log_{10} (\cos \theta_i) \quad (4)$$

$$n = n_a (1 - e^{-n_b x}) \quad (5)$$

$$L'_{WA,R} = L_{WA,R} - 10 \log_{10} N \quad (6)$$

$$L_{WA,R} = L_{WA} - 3 + 10 \log_{10} \left\{ \frac{x}{\sqrt{h^2 + x^2}} - \frac{ax}{\sqrt{h^2 + (ax)^2}} \right\} \quad (7)$$

ここで r_i は i 番目の点音源から受音点までの距離 [m]、 θ_i は i 番目の点音源から受音点を結ぶ直線と線路長手方向が成す角 [rad]、 n は点音源の指向係数である。 n_a および n_b は指向性に関するパラメータで、トンネル内壁面に吸音対策がないとき、 $n_a = 1.6$ 、 $n_b = 0.1$ である⁷⁾。 x はトンネル内の点音源からトンネル坑口端までの距離 [m]、 $L'_{WA,R}$ は分割された面音源を点音源とみなした場合の音響パワーレベル [dB]、 $L_{WA,R}$ は面音源の音響パワーレベル [dB]、 N は面音源の分割数で、ここでは $N = 8$

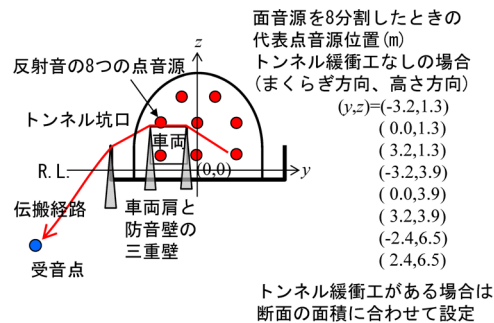


図5 トンネル反射音に対する車体による遮蔽効果の算定方法

である。 h はトンネル断面の面積と等しい半円の半径[m]である。指向特性を示す項(式(4)右辺第6項)は負の値で、 θ_i が大きいほどその値が小さく、まくらぎ方向への音の放射がより弱いことを表している。また、指向特性を決定するもう一つの変数 x については、音源の位置がトンネル坑口から遠くなると、まくらぎ方向への音の放射は小さくなる。ただし、2.2節の音響模型試験結果から、トンネル坑口から明かり方向に10m以内の領域、すなわち θ が 90° に近い領域でもトンネル反射音の影響が確認された。このことから、この領域における音源の指向特性はトンネル坑口から10mの場合と同等とする。

直達音の仮想点音源からトンネル坑口端までの距離 x [m]およびトンネル内の吸音に関するパラメータ a は式(8)および式(9)で与える。

$$x' = ax \tag{8}$$

$$1 - a = (1 - \alpha)^{0.48} \approx \sqrt{1 - \alpha} \tag{9}$$

α はトンネル内壁の吸音率である。トンネル内の吸音に関するパラメータ a は、スラブ軌道の条件では、トンネル内壁がコンクリートである場合は $a = 0.04$ 、全周吸音

対策の場合は $a = 0.6$ とする¹⁾。ただしバラスト軌道の場合、 a はバラストの吸音率と面積を別途考慮する必要がある。トンネル内の吸音特性が区間により異なる場合は、各区間のトンネル内吸音に関するパラメータを a_i 、各区間の長さを l_i として式(10)により計算する。

$$a = \sum_{i=1} (a_i l_i) / \sum_{i=1} l_i \tag{10}$$

3.3 トンネル坑口音の予測結果

3.2節の手法を用いたトンネル坑口周辺部の騒音の予測結果を図6に示す。音源長さは、トンネル内100m、明かり部100mで合計200m(8両分)である。図6(a)トンネル坑口音は直達音とトンネル反射音の和、図6(b)は明かり部音、図6(c)の全体音はトンネル坑口音と明かり部音の和である。音響模型試験の結果と比較するため、予測では模型結果の特性(音源およびマイクロホンの指向特性等)を考慮している。図6(a)(b)(c)はそれぞれ、図3(a)(b)(c)に対応する。これらの比較から、この予測結果は音響模型試験での結果をほぼ再現できていることがわかる。トンネル反射音に対する音源の指向特性による影響は、受音点の位置がトンネル坑口に近い場合に大きい傾向にある。

4. 騒音の予測手法の妥当性

前章に示したトンネル坑口音の予測手法を用いてトンネル坑口周辺部の沿線騒音の相対騒音レベルを予測し、現地試験の実測値(騒音レベル、時間重み付け特性F)との比較により予測手法の妥当性を評価する。図7に列車の位置と現車試験および予測による沿線騒音の関係を評価点ごとに示す。評価点の位置は、長手方向に坑口から20m、42.2m、および98.2mで、まくらぎ方向に近接軌道中心から25mである。騒音レベルの基準は、ほぼトンネル坑口音の影響がない条件(図7(d)で列車の先頭部の位置がトンネル坑口端から250m)での値を0dBとする。各評価点における騒音レベルが最大となる列車位置で、実測値と提案手法による予測値の差は1dB以内である。図7の3例とトンネル坑口端から62.2m、および82.2mの場合も併せて、各列車位置での提案手法の予測値と実測値の差の平均は0.4dB、標準偏差は1.9dBであった。図7で既存の手法による予測値と比較して、提案手法による予測値は実測値に近く、前節の改良により予測精度を向上させることがで

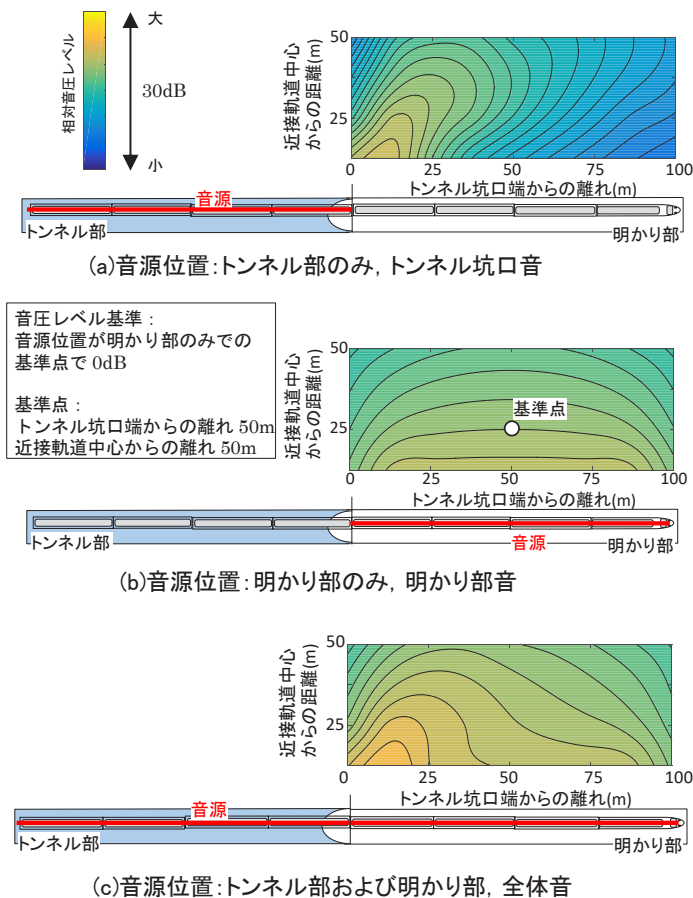


図6 予測計算によるトンネル坑口周辺部の音圧レベル分布(近接側列車, O.A. 値, 単位 [dB])

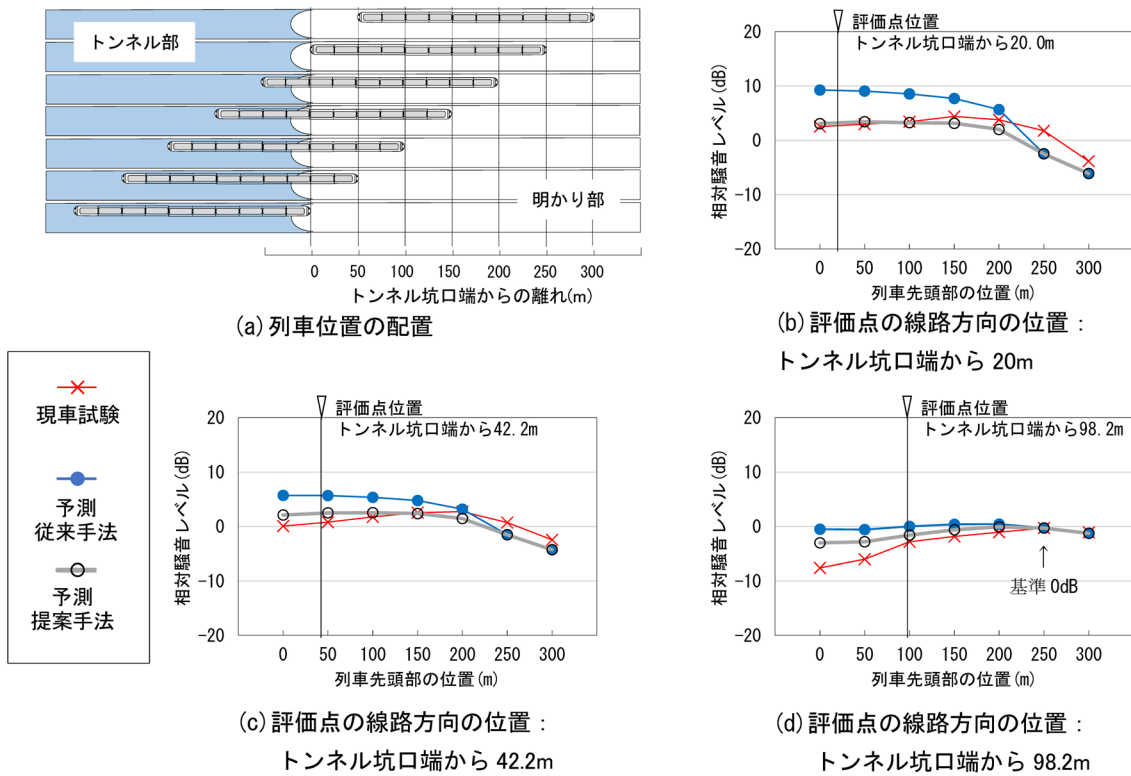


図7 車両の位置と現車試験および予測による沿線騒音の関係

(車両数：10両 250m，列車速度：270km/h，現車試験での車両の進行方向：トンネルから退出
近接軌道中心から評価点までのまくらぎ方向の距離：25m)

きた。ただし、評価点がトンネル坑口端から 100m 程度離れた位置 (図 7(d)) では、先頭部の位置が 0m および 50m のときに実測値と提案手法の予測値の差が 4dB 程度となり、トンネル坑口音をやや過大に評価している。トンネル坑口から遠い受音点におけるトンネル坑口音の予測精度の向上は、今後の課題である。

5. まとめ

トンネル坑口周辺部における沿線騒音の予測精度を既存の手法より更に向上させることを目的として、現車試験および音響模型試験を実施し、そこで得られた沿線騒音の分布を示した。次いで、それらの試験結果に基づき、トンネル坑口周辺部における沿線騒音の予測手法として、トンネル坑口音を構成するトンネル反射音に関して、車体による音の遮蔽の影響と音源の指向特性を考慮したトンネル坑口音の予測モデルを提案した。また、このモデルによる騒音の予測値と現車試験の実測値は概ね一致することを確認した。

トンネル坑口周辺部は、切取区間である場合、明かり区間が非常に短く 1 編成の列車が 2 つのトンネルにまたがる場合、谷間である場合等、地形条件が複雑である場合が多い。本稿ではトンネル坑口周辺部の地形が単純な

条件での沿線騒音の予測手法について検討したが、今後は複雑な地形条件においても検討を進める予定である。

文献

- 1) 長倉清：トンネル坑口騒音の予測と対策，鉄道総研報告，Vol.17, No.11, pp.13-18, 2003
- 2) 川口二俊，長倉清，松井精一：トンネル緩衝工内の吸音化による坑口騒音の低減効果，鉄道総研報告，Vol.28, No.3, pp.11-16, 2014
- 3) 小方幸恵，村田香，北川敏樹：新幹線のトンネル周辺における騒音予測手法の検討，第 28 回環境工学総合シンポジウム 2018 講演論文集，pp.40-43, 2018
- 4) 小方幸恵，北川敏樹：トンネル坑口周辺部の沿線騒音に対する対策効果の評価，第 26 回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2019) 講演論文集，2019
- 5) 長倉清，善田康雄：新幹線沿線騒音予測手法，鉄道総研報告，Vol.14, No.9, pp.5-10, 2000
- 6) JIS Z 8738: 屋外の音の伝搬における空気吸収の計算
- 7) 日本音響学会道路交通騒音調査委員会：道路交通騒音の予測モデル“ASJ RTN-Model 2018”，日本音響学会誌，Vol.75, No.4, pp.188-250, 2019