

トンネル坑口から放射される連続圧力波の特性評価

環境工学研究部 空気力学
主任研究員 菊地勝浩

1. はじめに

新幹線沿線では、新幹線の走行に伴い様々な低周波音が観測される。例えばトンネル坑口付近では、低周波音の代表的な現象として「トンネル微気圧波」があり、これは継続時間が短い衝撃性の低周波音である。一方、振幅は小さいが比較的長い時間、トンネル坑口から連続的に放射される圧力波、いわゆる「トンネル連続圧力波」がある。本発表では、トンネル連続圧力波の特性に関して検討を行い、得られた速度依存性や周波数分布等を報告する。また、トンネル連続圧力波の分析のために開発したトンネル内入射波分離法についても紹介する。

2. トンネル連続圧力波の特性

トンネル連続圧力波（以下、連続波と呼ぶ）は、列車がトンネル内を走行中に進行方向前後の両坑口から放射される。空力音響理論¹⁾を用いて検討すると、図1に示すような前方坑口から放射される連続波 P_f と、後方坑口から放射される連続波 P_r はそれぞれ、

$$\left. \begin{aligned} P_f(|\mathbf{x}|, t) &= -\frac{1}{4\pi c_0 |\mathbf{x}|} \frac{1}{1-M} \dot{f}_1 \left(\frac{1}{1-M} \left(t - \frac{|\mathbf{x}|}{c_0} \right) \right) \\ P_r(|\mathbf{x}|, t) &= \frac{1}{4\pi c_0 |\mathbf{x}|} \frac{1}{1+M} \dot{f}_1 \left(\frac{1}{1+M} \left(t - \frac{|\mathbf{x}|}{c_0} \right) \right) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

となる。ここで、 $f_1(t)$ は列車がトンネル内空気に及ぼす力を時間で微分したもの、 U は列車速度、 $M(=U/c_0)$ は列車速度のマッハ数、 c_0 は音速、 \mathbf{x} は連続波が放射される坑口中心から観測点までの距離、 t は時間である。 f_1 と時間微分 $(\partial/\partial t)$ をそれぞれ、列車断面積 A_0 、空気の密度 ρ_0 、列車から見た列車側面の流速 u_2 、代表長さ l_c から、 $f_1(t) \propto A_0 \rho_0 u_2^2$ 、 $\partial/\partial t \propto u_2/l_c$ と仮定すると、連続波 P_f 、 P_r は列車の側面流速 u_2 の3乗に比例することが分かる。また、 f_1 の時間依存性を $e^{-i\omega t}$ と仮定すると、 P_f と P_r の比は、振幅の大きさおよび周波数ともに約 $1+2M$ となることが分かる。

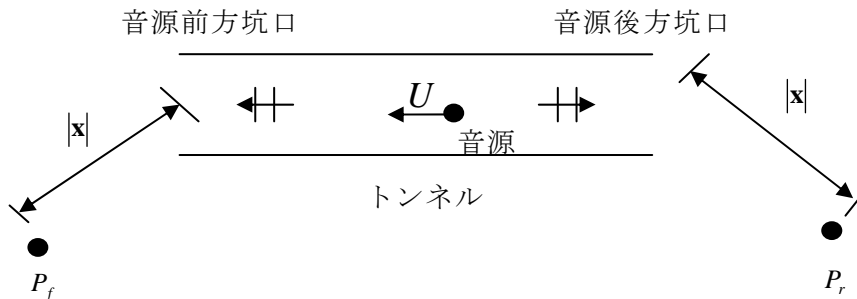


図1 音源の前方と後方の坑口から放射される圧力波（連続波）

3. トンネル連続圧力波（連続波）の実際

連続波の特性を把握するため現地試験を実施した。測定対象となったトンネル諸元等は以下の

通りである。トンネル延長：3683m、軌道構造：スラブ軌道、測定点：トンネル内及び東口付近。
 なお、トンネル内で測定されたデータは3章で述べる分離法を適用する。

図2にトンネル外の東口付近で観測された圧力波形を示す。図2は上り列車が測定点に接近し連続波が列車の前方に放射される場合である。波形はまず列車のトンネル突入による微気圧波が最初に観測され、続いて列車のトンネル内走行中に数 Pa 程度の微小な圧力波が連続的に坑口から放射される。これが連続波である。その後、トンネルを退出した列車の先頭・後尾が観測点を通過するとき、それらに付随する圧力変動の影響が観測される。

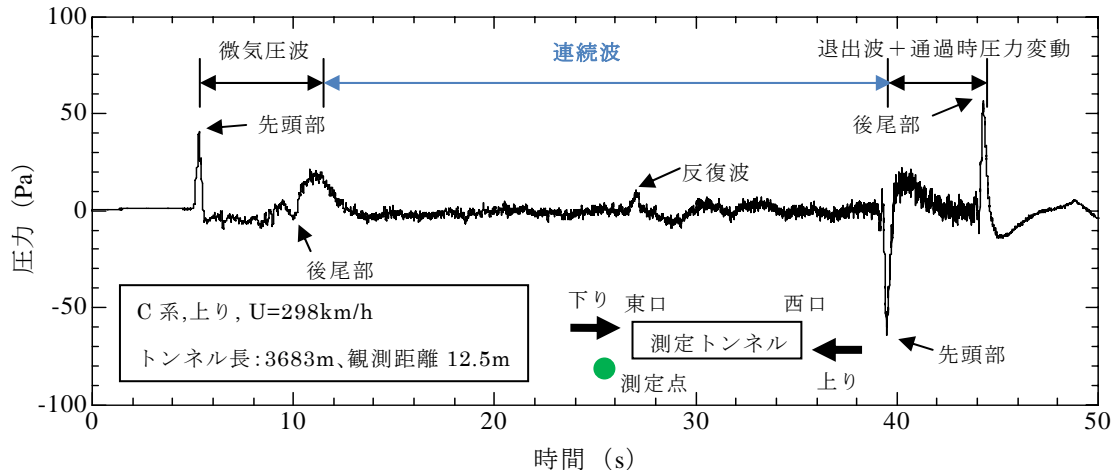


図2 トンネル坑口で観測される圧力波形の実測例

上り列車が退出する直前約5秒間（退出直前）、下り列車が突入した直後約5秒間（突入直後）の波形の実効値を求め、連続波の速度依存性を図3に示す。図3の横軸は机上計算から推定した列車側面流速 u_2 である。図3から連続波は列車速度ではなく列車側面流速のほぼ3乗に比例するという、これまでに得られている特性³⁾がこの結果からも確認される。また、列車の前方（退出直前）と後方（突入直後）に放射される連続波の振幅を比較すると、前方に放射される連続波が大きく、その比は約1.6であり、2で述べた理論値の $1+2M$ （ $U=300\text{km/h}$ とすると $M=0.25$ ）とほぼ同じ大きさである。

上り列車が退出する直前約5秒間、下り列車が突入した直後約5秒間の波形のパワースペクトル分布を図4に示す。図4を見ると、約2、6Hzにピークが見られる。ただし、パワースペクトルの細かな分布は列車種別や列車速度によって異なる。列車の前方と後方に放射される連続波の周波数を比較すると、前方に放射されるトンネル連続波の周波数が高く、その比は約1.2であり、理論値の $1+2M$ （約1.4）とほぼ同じオーダーであるが、実測値は理論値よりやや小さい。

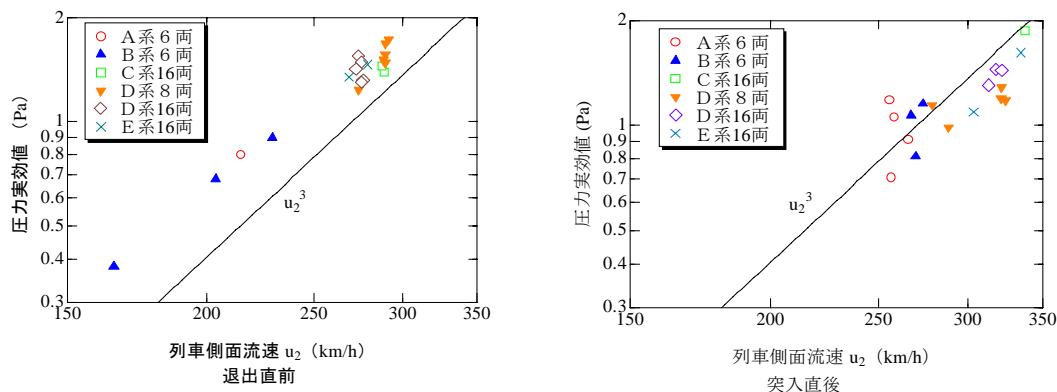


図3 連続波の速度依存性

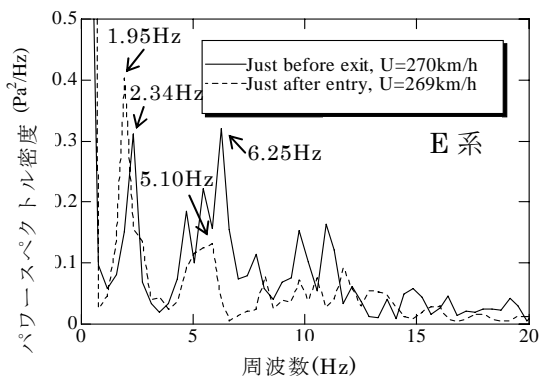


図4 連続波のスペクトル分布

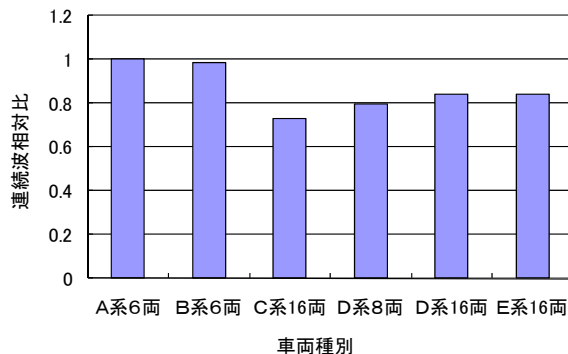


図5 車両種別に対する連続波の相対比較
(同一列車側面流速、退出直前、観測距離 12.5m)

連続波圧力を列車側面流速で無次元化し、車両種別に対する相対比較（A系6両を基準）した結果を図5に示す。図5のD系の結果を見ると列車長が長くなると連続波が大きくなることが分かる。また列車長が同じC系16両、D系16両、E系16両の結果を見るとC系<D系≒E系の関係が読み取れる。また列車長が長くなると連続波は大きくなることを考慮し、A系、B系の結果を16両のデータに換算したとすると、C系<D系≒E系<B系<A系の関係が得られる。これは、空気抵抗の大小関係と同様の傾向である。これより、連続波を低減する指針として、列車側面流速を小さくする、空気抵抗を小さくすることが考えられる。これらを実現するためには、車両断面積を小さくする、車両周長を小さくする、列車長を短くする、車体表面を滑らかにする、先頭・後尾部の形状を適切にする等が考えられる。

4. 入射波分離法と現車試験結果への適用

連続波の原因となるトンネル内部の圧力波は、トンネル内部からトンネル坑口に向かう圧力波（以後、入射波と呼ぶ）と考えられる。しかし、トンネル内部の定点で測定される圧力波は入射波と坑口で反射してトンネル内に戻る圧力波（以後、反射波と呼ぶ）が重なった状態で測定されるため、連続波と入射波との関係を調べるためには、トンネル内部で測定される圧力波から入射波（及び反射波）を分離する必要がある。

図6に示すように入射波を $f(t-x/c_0)$ 、反射波を $g(t+x/c_0)$ で表す。トンネル内で測定される圧力波 $F(x,t)$ はこれらを加え合わせたものとなる。測点 $x=x_1$ と測点 $x=x_2$ の2箇所で圧力を測定すると、距離 $L=x_1-x_2$ を圧力波が伝播する時間 τ は $\tau=L/c_0$ となる。測点 x_1 のデータを時間 $(-\tau/2)$ 、測点 x_2 のデータを時間 $\tau/2$ だけシフトさせ少し式を変形すると、入射波 f_{sep} は次式で求められる。

$$f_{sep}\left(t-\frac{x_m}{c_0}\right) \cong \frac{1}{2\tau} \int' \left\{ F\left(x_2, s+\frac{\tau}{2}\right) - F\left(x_1, s-\frac{\tau}{2}\right) \right\} ds + C \quad (2)$$

ただし、 $x_m=(x_1+x_2)/2$ 、 C は任意定数である。

式(2)を用いる分離法を現地試験に適用した。測定を行ったトンネルは2章で述べた箇所と同じである。トンネル内に取り付けたマイクロホンの様子を図7に示す。マイクロホン位置は坑口から約100mであり、マイクロホン間隔は1mである。

入射波の原波形が既知であれば、原入射波と分離入射波を比較することで、分離が正しく行われているか否かの判定ができるが、現地試験では原入射波は不明である。そこで、坑口から外に放射された連続波と比較することで入射波の分離が正しく行われているか否かを見る。

低周波遠方場近似が成り立つとすると、トンネル内入射波 p と坑口から外部へ放射される圧力波 P は微気圧波の場合と同様に以下の関係が成り立つ 4), 5).

$$P(r,t) \cong \frac{2A_T}{\Omega r c_0} \frac{\partial p}{\partial t} \left(t - \frac{r-x_m}{c_0} \right) \quad (3)$$

ここで、 A_T はトンネル断面積、 Ω は放射端付近の放射立体角、 r は放射端中心から測定点までの距離、 x_m は分離波が求まる位置である。

式(3)から推定される放射波（推定放射波と呼ぶ）と実測された放射波（実測放射波と呼ぶ）を図 8 に示す。ただし、推定放射波を求めるときに用いた諸数値は以下の通りである。 $A_T = 63.4\text{m}^2$ 、 $\Omega = 3$ 、 $c_0 = 340\text{m/s}$ 、 $r = 12.5\text{m}$ 、 $x_m = 100.312\text{m}$ 。実測放射波の測定にはリオン製低周波音圧レベル計 NA-18A を用いた。推定放射波と実測放射波を比較すると、両者はほぼ一致している。このことから、トンネル内圧力波からの入射波の分離も正しく行われていると言える。

今後は、ここで報告した連続波の放射特性や入射波分離法を活用し、速度向上時の沿線環境に対する影響を推定する予定である。

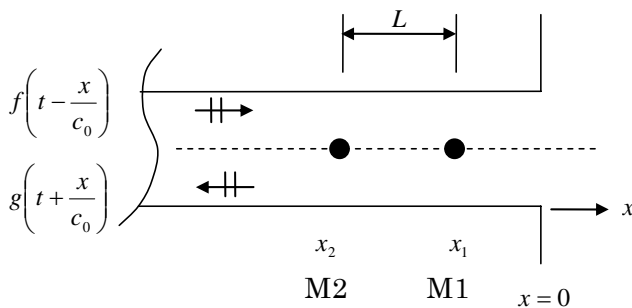


図 6 坑口付近のトンネル内圧力

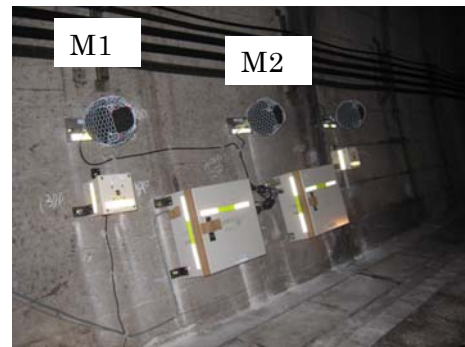


図 7 トンネル内に設置したマイク

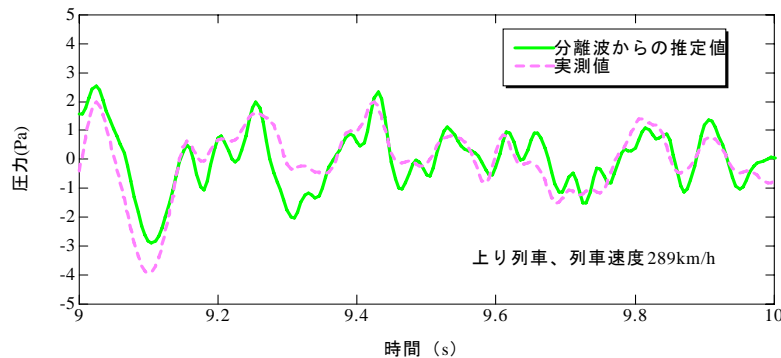


図 8 放射圧力波の推定値と実測値

参考文献

- 1) M. S. Howe, *Acoustics of Fluid-Structure Interactions*, 1998, pp. 167 - 176
- 2) 山本彬也、鉄道技術研究報告、No. 871、1973、pp. 60 - 74
- 3) 中谷浩二、他 5 名、日本機械学会第 73 期通常総会講演会(III)、No. 96-1、1994、pp.333-334
- 4) 山本彬也、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
- 5) 小澤智、鉄道技術研究報告、No. 1121、1979、pp. 21 - 44