列車が沿線近傍構造物を通過する際に発生する圧力波*

高 見 創^{*1}, 菊 地 勝 浩^{*1}
飯 田 雅 宣^{*1}, 前 川 博^{*2}

Pressure Waves Generated When a Train Passes a Nearby Structure

Hajime TAKAMI^{*3}, Katsuhiro KIKUCHI,
Masanobu IIDA and Hiroshi MAEKAWA^{*3} Railway Technical Research Institute, Environmental Engineering Division,
2-8-38 Hikari-cho, Kokubunji-shi, Tokyo, 185-8540 Japan

When a high-speed train enters or leaves a tunnel, impulsive pressure waves are radiated from the entrance/exit portal toward the outside of the tunnel. The waves are called a "micro-pressure wave," a "tunnel entry wave" and a "tunnel exit wave." A similar phenomenon occurs when a train passes a short structure in axial length in an open section (such as an over-bridge). We call it a "structure-passing wave." The length of the structure along the railway is several times or less the diameter of the structure cross-section. Although the structure-passing wave is weak at present, it could cause an environmental noise problem of a low-frequency (which has become public concern) as the train speed increases. This paper describes the characteristics of the structure-passing wave based on the results of model experiments and acoustic analyses. The results obtained from the acoustic analyses were in good agreement with the result of the experiment except for the very short length structures. This implies that the structure-passing wave can be modeled on a superposition of the pressure waves radiating from both sides of the structure.

Key Words: Pressure Wave, Low-frequency Noise, Over-bridge, Shinkansen, High-speed Railway

1. は じ め に

近年話題となっている低周波音⁽¹⁾(低周波空気振動)とは、周波数が1~100Hz程度の低い圧力変動を指し、音としては知覚されにくいものの、建具をガタつかせたり、場合によっては圧迫感や耳鳴りなどの心理的影響を及ぼしたりするものである。

鉄道線路の沿線で観測される低周波音としては、高速列車がトンネルへ突入した時に、出口側の坑口から外部へ放射されるパルス状の圧力波(トンネル微気圧波⁽²⁾)が代表的なものである。また、これ以外にもトンネルを通過する際には、トンネル突入時に入口側の坑口から発生するトンネル突入波⁽³⁾、トンネル内を走行中に継続的に発生するトンネル連続波⁽⁴⁾、トンネル

退出時に出口側の坑口から発生するトンネル退出波⁽⁵⁾など、様々な現象が発生する。これらトンネル通過に伴って発生する低周波音に関しては、現在までに多くの研究が実施されている。

一方、明かり区間(トンネル以外の区間)においては、線路方向に短い構造物(例えば跨(こ)線橋:構造物の軸方向長さが構造物断面直径の数倍程度以下)を高速列車が通過する際に、トンネルを通過する時と同様な現象を起こすことが分かっている⁽⁶⁾⁽⁷⁾。ここではこの現象を「構造物通過波」と呼ぶ。現在、このような構造物通過波が問題視されることはないが、近年、低周波音問題の関心が高まっており、さらに列車の高速化が進めば問題となる可能性がある。

構造物通過波に関する既往の研究としては、軸対称数値計算⁽⁸⁾により、500km/h域の超高速列車が円筒状の構造物を通過する際に構造物内で気柱共鳴が起こり、周期的な圧力波を放射すると予測している。一方、現地測定としては、新幹線が掘割区間に架かる跨線橋を通過する際に生じる圧力波について基本的な特性が調

* 原稿受付 2005年7月22日。

^{*1} 正員、鉄道総合技術研究所(☎185-8540 国分寺市光町2-8-38)。^{*2} 正員、広島大学大学院工学研究科(☎739-8527 東広島市鏡山1-4-1)。

E-mail: takami@rti.or.jp

Fig.1 Experimental setup.

べられた⁶⁾。その報告においては、構造物通過波は10Hz以下に主要な成分を持つパルス状の圧力波とされ、数値計算⁹⁾から予測される周期的な圧力波とは異なっていた。ただし、現地の状況や列車速度が異なるため十分に検証されたとは言えず、構造物通過波については未だ不明な点が多い。

本論文では、主に跨線橋を想定した構造物通過波の特性を、模型発射装置を用いて実験的に調べるとともに、構造物を円筒でモデル化した音響学的な解析を行い、構造物通過波の基本的な発生メカニズムを調べた。

2. 模型実験

2・1 実験方法 実験装置は図1に示すように、ピアノ線でガイドされた列車模型を構造物模型へ高速で打ち込み、放射される圧力波をマイクロホンにより計測するものである。この試験装置は、以前より当研究所でトンネル微気圧波の研究に用いられており、十分な精度で現地の現象を模擬可能なことが確認されている¹⁰⁾。

模型実験の寸法関係を表1に示す。座標系は右手系にとり、原点を構造物中心におく。地面は鏡像法で模擬し、模型の縮尺は現地の1/127、列車速度は現地と同程度とする。したがって、現地と同じ速度条件において発生する圧力波は、振幅が現地と等しく、周波数は現地の127倍相当となる。走行軸は構造物模型の中心軸にそろえるケースと、複線走行を模擬し左右に偏心させるケースを行う。

列車模型の先頭部は、現車の断面積分布と相似形である。先頭部は二種類用意し、基本列車 Train-α に対し比較列車 Train-β は先頭部長さ L_n が約2.5倍である。列車先頭部の断面積分布および変化率を図2に示す。ここで、左縦軸は列車先端からの位置 x' における列車断面積 $A_t(x')$ であり、右縦軸は列車断面積の変化率である。構造物模型は現地の跨線橋と相似形の長方形断面で、

Table 1 Specifications of train and structure model.

Train model	Train length = 922mm	
	Train-α	Nose length $L_n = 47\text{mm}$ Diameter = 42mm Blockage(train/structure) = 0.14
	Train-β	Nose length $L_n = 118\text{mm}$ Diameter = 40mm Blockage(train/structure) = 0.13
Structure model	Cross section: rectangular 92.9×103.9mm Diameter of a circle having the same cross sectional area: $d = 110.9\text{mm}$	
	Structure-A	Length $L = 23.6\text{mm}$, $L/d = 0.21$
	Structure-B	Length $L = 47.2\text{mm}$, $L/d = 0.43$
	Structure-C	Length $L = 94.5\text{mm}$, $L/d = 0.85$
	Structure-D	Length $L = 189\text{mm}$, $L/d = 1.70$
Circular pipe	Cross section: circular, Diameter $d = 100\text{mm}$ Length $L = 100\text{mm}$, $L/d = 1.00$ Length $L = 200\text{mm}$, $L/d = 2.00$

Fig.2 Distribution of model cross-sectional area.

軸方向長さは最も短い Structure-A から倍ずつの長さで Structure-D までの四種類である。また、3章における解析結果と比較を行うため、断面が円形の円筒を構造物とみなした実験も行った。

2・2 データ解析方法 音圧は裃りオン製の普通騒音計 NL-20 (有効周波数 20~8,000Hz) を同時に 4 台用いて計測し, 必要な箇所の物理量を得るため, これらの騒音計は適宜移動した。計測データは, A/D 変換器を介してサンプリング周波数 25kHz で PC へ記録した。得られた音圧データには, 主眼とする構造物通過波に加え, 列車が観測点の近傍を通過することによる非常に低い周波数の圧力変動⁹⁾が重畳している。ただし, この圧力変動は主眼とする構造物通過波とは周波数が離れているため, 本論文ではカットオフ周波数 500-5000Hz のバンドパスフィルタにより除去し, 構造物通過波のみを抽出した。

抽出した構造物通過波には, 正負のピークが複数現れる。一般に, トンネルから放射される圧力波は片振幅で評価されるが, 構造物通過波は構造物の長さや列車速度によって符号の異なる複数の圧力波が現れるため, 沿線環境への影響を調べる場合には両振幅での評価が適当と考えられる。このため本論文では, 列車が構造物を通過する全時間において観測される圧力波のピーク・ピーク値を, 構造物通過波の最大値として評価する。

2・3 実験結果 代表的な観察波形を図 3 に示す。ただし, 前述したように列車周りに生じる圧力場の影響は, フィルタ処理により除いている。観測点は走行軸と直角方向に構造物中心から 400mm (現地換算約 50m) 離れた位置であり, 偏心走行は列車が観測点に近づく場合である。

波形を見ると, 短い構造物 (Structure-A,B) では, 先頭部の突入時に負・正・負と続くパルス状の圧力波が放射され, 後尾部では反転して放射されている。また, 先頭部と比較した後尾部では, 流れの剥離の影響等から圧力波が若干小さい。このような波形の形状は, 現地 (Structure-B 相当) の実測結果⁶⁾とほぼ一致しており, 実験の妥当性が確認できる。一方, 比較的長い構造物 (Structure-C,D) では, 圧力波の振幅および波数がともに増加している。これに対応するような現地の実測結果はないが, (振動的な圧力波は) 軸対称数値計算による結果⁵⁾ (Structure-C) と近い。また, 中心走行と偏心走行を比較すると, 偏心走行の方が正負のピークは大きくなっている。これは, 列車が偏心走行することでトンネル突入波・退出波に相当する圧力波が列車偏心側の観測点で大きくなるとともに¹⁰⁾, 偏心走行により構造物内に形成される圧縮波 (の圧力勾配) が大きくなり⁸⁾, 構造物の開口端から放射される圧力波も大きくなったためと考えられる。

次に, 列車種別による比較を行う。ここでは紙面の

Fig.3 Pressure waves measured at train passage through structure.
[Train- α , $U=350$ km/h, $(x,y,z)=(0,0,400$ mm)]

Table 2 Comparison between Train- α and Train- β .
[Structure-B, $U=350$ km/h]

	Ratio $\frac{\text{Train-}\beta}{\text{Train-}\alpha}$
Average of pressure magnitude	0.3
Center running, $(x,y,z)=(0,0,400)$ mm	0.34
$(x,y,z)=(0,231,400)$ mm	0.36
Offset-near, $(x,y,z)=(0,0,400)$ mm	0.25
Offset-far, $(x,y,z)=(0,0,400)$ mm	0.35
Max. cross-sectional area	0.91
Max. change of cross-sectional area	0.38

都合から波形は示さないが, 基本車両 Train- α と比較車両 Train- β (先頭部が長い) で発生する圧力波を比べると, その波形形状は似ているが振幅は Train- β が小さくなる。構造物 Structure-B・速度 350km/h における結果をまとめると (表 2), 圧力波の振幅比はおおむね Train- β /Train- $\alpha=0.3$ 程度となる。一方, 車両形状を比較すると, 断面積比は 0.9 程度とほとんど変わらないが, 断面積の変化率比は 0.3 程度と圧力波の低減比に近い。

Fig. 4 Analytical model.

トンネル微気圧波の対策⁽¹¹⁾から類推すれば、構造物通過波を低減するには、列車断面積よりも断面積変化率を抑える対策が有効と考えられる。

なお、構造物通過波の速度乗則、距離減衰および構造物の長さとの関係については、後述する解析結果と合わせて4章に示す。

3. 音 響 学 的 な 解 析

構造物が比較的に長い場合は、構造物通過波はトンネル坑口からの放射波に類似した現象と考えられるので、トンネルに対して用いられている解析モデルの適用を試みる。図4に、構造物を円筒でモデル化し、中心走行を行った場合の解析モデルを示す。先頭部の突入・退出の現象に注目し、列車は半無限長とする。座標系は右手系にとり、原点を構造物中心におく。まず始めに、列車が円筒状の構造物へ突入する時に構造物内部に形成される圧縮波を、Howeらの音響学的予測手法⁽¹²⁾により求める。この解析では、以下の条件を前提としている。

- ① 形成される圧縮波波面の空間幅が、構造物断面のスケールよりも数倍以上大きいこと。すなわち、構造物断面が音響学的にコンパクトであること。
- ② 構造物の列車退出側端部（図4における左端部）付近で評価したときに、圧縮波の波面がほぼ平面波とみなせること。
- ③ 圧縮波の先頭波面が開口端反射により突入側に戻った時点で、圧縮波の形成が完了していること。

ここで、条件①については、マッハ数0.4以下の鉄道では、極端に大きな断面を持つ構造物でなければ満たされる。条件②については、理論解析⁽¹³⁾やCFD⁽¹¹⁾結果から、構造物の長さが構造物断面直径の1.5倍程度以上あれば（ $L/d > 1.5$ ）、退出側端部の圧縮波はほぼ平

Fig. 5 Compression wave and pressure gradient obtained by analysis. [circular pipe, center running, Train- α , $U \approx 350 \text{ km/h}$]

面波とみなせる。条件③については、先頭波面が構造物を往復する時間と圧縮波の形成にかかる時間との間に、以下の関係が必要である。

$$\frac{2L}{c_0} > \Delta t, \quad \text{すなわち} \quad \frac{L}{d} > \frac{c_0 \Delta t}{2d} \quad (1)$$

ここで、 L ：構造物の軸方向長さ、 c_0 ：音速、 Δt ：圧縮波の特性的な時間幅⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾である。

以上の適用条件を満たす場合、列車の突入により構造物内部に形成される圧縮波は次式で示される。

$$p_{en}(t) = \frac{\rho_0 U^2}{A(1-M^2)} \left(1 + \frac{A_0}{A} \right) \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial A_0}{\partial x'} (x' + U[t]) \frac{\partial \varphi^*}{\partial x'} (x', 0, 0) dx' \quad (2)$$

ここで、 p_{en} ：突入時の構造物内圧力、 $[t] = t - d/c_0$ ：遅延時間、 t ：時間、 ρ_0 ：空気密度、 A ：構造物断面積、 M ：突入マッハ数、 x' ：列車の先頭から後尾へ向かう座標、 U ：列車速度、 φ^* ：構造物の形状から決まる速度ポテンシャル（ここでは構造物をフランジの無い薄肉円筒と仮定し解析解を用いるが、任意形状の構造物に対しては数値計算により求められる）である。式(2)により求めた圧縮波形および圧力勾配の一例を図5に示す。なお、圧縮波の特性的な時間幅 Δt は、図5に示すように圧縮波の最大圧力と見なせる Δp と圧力勾配の最大値から、 $\Delta t = \Delta p / (\partial p / \partial t)_{\max}$ として求められる⁽¹⁵⁾。

次に、構造物から外部へ放射する圧力波を求める。構造物の端部にフランジがなく、地面の影響を鏡像で表現すると、構造物外部空間を無限領域と見なすことができる。列車は構造物の中心軸に沿って突入するものとし、観測点は遠方場とする。以上の条件の場合、先頭部の突入によって放射される突入波 p_{en}' は、式(2)

の圧縮波と音響解析の結果⁽¹⁶⁾を使って、次式で示される。

$$P_{en}' = -\frac{A}{4\pi c_0} \frac{1}{r_1} (1 - \cos \theta_1) \frac{\partial p_{en}}{\partial t} \quad (3)$$

ここで、 r_1 ：構造物入口から観測点までの距離、 θ_1 ：列車の先頭から後尾へ向かう方向と構造物入口から観測点に向かう方向がなす角度である。

さらに式(2)の圧縮波が構造物内を伝播し、両端で放射・反射を繰り返す際の現象が微気圧波である。この微気圧波についても音響解析⁽²⁾を行い、式(3)と重畳させることで、列車の突入により構造物から外部へ放射される圧力波 P_{en} を次式で表す。

$$P_{en}(t) = -\frac{1}{r_1} (1 - \cos \theta_1) \frac{A}{4\pi c_0} \frac{\partial p_{en}}{\partial t} \left(t - \frac{r_1}{c_0} \right) + \frac{2}{r^*} \sum_{n=1}^{\infty} (-\gamma)^{n-1} \frac{A}{4\pi c_0} \frac{\partial p_{en}}{\partial t} \left(t - \frac{r^*}{c_0} - n \frac{2a}{c_0} \right) \quad (4)$$

$$r^* = \begin{cases} r_1, & n = \text{偶数} \\ r_2, & n = \text{奇数} \end{cases}$$

ここで、 r_2 ：構造物出口から観測点までの距離、 γ ：開口端反射に伴う減衰係数、 $2a$ ：開口端補正を含む構造物の長さ、 n ：反射回数である。なお、開口端反射に伴う減衰係数 γ は、開口部の形状や圧力波に含まれる周波数成分に影響を受け、さらに列車が構造物を通過中（串刺し状態）の反射となるので、本稿では実験から推定する。

同様の考え方で、列車の退出により構造物内に生じる圧縮波 p_{ex} から、構造物から外部へ放射される圧力波 P_{ex} を求める。

$$P_{ex}(t) = -\frac{\alpha}{r_2} (1 + \cos \theta_2) \frac{A}{4\pi c_0} \frac{\partial p_{ex}}{\partial t} \left(t - \frac{r_2}{c_0} - \frac{2a}{U} \right) + \frac{2\alpha}{r^*} \sum_{n=1}^{\infty} (-\gamma)^{n-1} \frac{A}{4\pi c_0} \frac{\partial p_{ex}}{\partial t} \left(t - \frac{r^*}{c_0} - n \frac{2a}{c_0} - \frac{2a}{U} \right) \quad (5)$$

$$r^* = \begin{cases} r_1, & n = \text{奇数} \\ r_2, & n = \text{偶数} \end{cases}$$

ここで、 α ：以下で述べる退出時圧縮波の係数、 θ_2 ：列車の先頭から後尾へ向かう方向と構造物出口から観測点に向かう方向がなす角度、 p_{ex} ：退出時の構造物内圧力である。列車の退出により構造物内に形成される圧縮波 p_{ex} は、列車の突入により形成される圧縮波 p_{en} と一般には異なるため、本稿では突入時の圧縮波 p_{en} に係数 α を掛けたもので近似する。この係数 α は、トンネルのように十分長く列車周りの圧力分布がほぼ定常と

Fig.6 Comparison of pressure waves between experiment for a circular cross-section and analysis. [center running, Train- α , $U=350\text{km/h}$, $(x,y,z)=(0,0,400\text{mm})$]

なった状態では、一定値に近づくと考えられる。しかし、構造物が短い場合、列車周りの流れは遷移状態にあり、構造物の長さや列車速度により係数 α は異なるため、本稿では実験から推定する。以上により、列車の突入・退出にともない構造物から外部へ放射される圧力波 P_{en} および P_{ex} を式(4)(5)から求め、それらを重畳させることで構造物通過波を表す。

ここで、解析モデルの断面形状は跨線橋と異なり円形のため、まず始めに、円筒による模型実験と解析結果の比較を図6に示す。係数は $\alpha=0.5$, $\gamma=0.75$ である。この結果から、上段に示す円筒 ($L/d=2$) では、実験と解析結果は良く一致する一方、下段に示すようなより短い円筒 ($L/d=1$) では、解析の誤差が大きい。この理由として、構造物が極端に短い場合、解析の適用条件③における式(1) (圧縮波の時間幅 Δt を図5より 0.94ms 程度と見積もれば $L/d > 1.6$) を満たさないことが考えられる。一方、式(1)を含む適用条件が全て成り立つ $L/d=2$ の円筒では、実験結果と解析結果が良く一致することから、解析モデルの妥当性が確認できる。

このため以降では、 $L/d=1.7$ の比較的長い構造物 Structure-D (断面形状は長方形) について詳細に解析を実施した。実験結果と解析結果の比較を図7に示す。ここで、上段の図は解析における式(4)および式(5)の各項を分けてプロットしたものであり、それらを重畳させたものが下段の解析波形である。なお、解析モデルは図4に示したように円筒のまま、長方形断面の構造物を等価な断面面積を持つ円筒とみなした。図7の結果から、断面形状が長方形であっても解析と実験結果は

Fig.7 Comparison of pressure waves between experiment for a rectangular cross-section and analysis. [center running, Train- α , $U=350\text{km/h}$, $(x,y,z)=(0,0,400\text{mm})$]

良く一致し、円筒モデルによる音響学的な解析が模型実験の結果を説明できること分かる。すなわち、比較的長い構造物における構造物通過波は、構造物の両端から放射される圧力波の重畳として表せる。

式(4)(5)に基づく音響学的な解析により求めた x - z 断面 (ただし $y=0, z \geq 0$) の圧力分布を図8に示す。列車は図の右から左に向かって走行し (時系列は上から下の順)、 $(x,y,z)=(0,0,0)$ に中心をおく Structure-D を通過する。ただし、この図は流体数値シミュレーションの結果ではないので、列車近傍の流体力学的な圧力分布は含まれていないことに注意されたい。列車の走行にともない、構造物の両端から突入波、退出波、微気圧波および反射による微気圧波が放射し重畳することで、構造物通過波は観測点によって複雑な変動を示すことが図から分かる。

4. 構造物通過波の特性

構造物通過波の最大値 (ピーク・ピーク値, 2.2 節参照) と列車速度の関係を図9に、観測距離との関係を図10にそれぞれ示す。観測点は構造物の中心線上 ($x,y)=(0,0)$ である。まず始めに、解析結果と対応する中心走行・Structure-D について述べる。図9の速度特性を見ると、列車速度が高いほど構造物通過波も大きくなり、その乗率は実験および解析結果はともに4乗程度でほぼ一致する。次に、図10の距離減衰を見ると、実験および解析結果はともに -0.9 乗程度で一致し、点音

Fig.8 Instantaneous acoustic pressure distribution obtained by analysis.

[Structure-D, center running, Train- α , $U=350\text{km/h}$]

Fig.9 Relation between velocity and pressure magnitude.

Fig.10 Relation between distance and pressure magnitude.

Fig.11 Relation between structure length and pressure magnitude. $[(x,y,z)=(0,0,400\text{mm})]$

源からの音波の距離減衰にほぼ合致する。一方、図9,10で構造物の長さが変わっても速度乗則・距離減衰に違いはないが、中心走行と偏心走行では速度乗則に違いが見られる。図3の圧力波形を見ると、構造物通過波の最大値は中心走行では第2波(正)と第3波(負)で決まるのに対し、偏心走行では第1波(負)と第2波(正)で決まっている。これらの圧力波は、図7上段の解析結果から、中心走行では微気圧波とその反射による微気圧波が支配的であることを示し、偏心走行では突入波と微気圧波が支配的であることを示している。すなわち、中心走行と偏心走行では構造物通過波の最大値を決める現象が異なるため、速度乗則に差が現れたと考えられる。なお、偏心走行における速度乗則・距離減衰は、現地(Structure-B相当、偏心走行)の実測結果⁶⁾とほぼ等しい。

次に、構造物通過波の最大値と構造物の長さとの関係を図11に示す。観測点は構造物の中心線上の $(x,y,z)=(0,0,400\text{mm})$ である。ここで、プロットは実験結果を、破線は解析の適用条件③における式(1)を満たさない解析結果(以降 Case1: 解析適用外のため誤差が大きい)を、実線は式(1)を満たす解析結果(以降 Case2)を示す。図11の結果から、構造物が長くなるにしたがい構造物通過波は大きくなるが、ある程度の長さで最大値をとる傾向が分かる。この傾向は、それぞれのCaseで次のように説明できる。

Case1 の範囲では、構造物が長くなるにしたがい列車の突入・退出により構造物内に生じる圧縮波そのものが大きくなる。一方、構造物通過波の大きさは、構造物の両端から放射される圧力波の重ね合わせで決まるが、それらの圧力波は常に符号が異なるため打ち消しあう傾向にある(図7参照)。例えば、第1波は先頭部突入時の突入波で負、第2波は出口側からの微気圧波で正、第3波は反射による入口側からの微気圧波で負である。しかしながら、構造物が長くなると圧力波を放射する時間間隔は離れ、打ち消しあいが少なくなる。このような理由により、Case1 では構造物が長くなると、構造物通過波は急激に大きくなる。構造物の長さがCase2に達すると、構造物内に生じる圧縮波は飽和するが、引き続き圧力波の打ち消しあいは少なくなり、構造物通過波は緩やかに大きくなる。一方で、構造物が長くなると構造物の開口部と観測点は離れ、圧力波は距離減衰により小さくなる。このため、ある程度の構造物長さで最大値をとると考えられる。

5. ま と め

主に跨線橋を想定した構造物通過波を、模型実験および音響学的な解析により調べ、その特性を明らかにした。

- (1) 列車が構造物を通過する際には、構造物が長く、列車速度が高くなるにしたがい、ピークが大きく比較的周期性を持つ圧力波（構造物通過波）が放射されるようになる。
- (2) 圧力波の大きさは中心走行において列車速度の4乗程度、観測距離の-0.9乗程度、偏心走行において速度の3乗程度、観測距離の-0.9乗程度に比例する。
- (3) 解析の適用条件を満たす構造物においては、構造物を円筒でモデル化した音響学的な解析により現象を予測できる。すなわち、構造物通過波は、構造物の両端部から放射される圧力波（突入波、退出波、微気圧波、反射による微気圧波）の重畳として表せる。

最後に、本研究の模型実験にあたっては、(株)テス鈴木孝康氏にお世話になった。ここに記し感謝の意を表する。

文 献

- (1) Ministry of the Environment, Manual of Low-frequency noise problem (in Japanese), (2004).
- (2) Ozawa, S., Studies of Micro-pressure Wave Radiated from a Tunnel Exit, Tetsudo Gijutu Kenkyu Hokoku (Railway Technical Research Report), **1121** (1979).
- (3) Iida, T. et al, Numerical Analysis of the Pressure Wave Radiated from the Entrance when a Train Enters a Tunnel, Nihon Kikai Gakkai Ronbunshu, B (Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B), **66-651** (2000), 2861-2868.
- (4) Nakatani, K. et al, Continuous Pressure Waves Radiated from Shinkansen Tunnels, Nihon Kikai Gakkai Dai73ki Tsujosokai Koen Ronbunshu, III (Proceedings of the 73rd JSME Spring Annual Meeting, III), **96-1** (1996), 333-334.
- (5) Ogawa, T. and Nishida, T., Numerical Investigation of a Pressure Wave Generated by a High-Speed Train Passing Through a Structure, Forum Acusticum, (2002)
- (6) Kikuchi, K. et al, Field Measurement of Pressure Waves Observed When a Train Passes an Over-Bridge, Nihon Kikai Gakkai Ronbunshu, B (Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B), **70-691** (2004), 672-677.
- (7) Takami, H. et al, Experimental Measurement of Pressure Waves Generated When a Train Passes Through a Structure, Dai13kai Kotsu Butsuryu Bumon Taikai (The 13th Transportation and Logistics Conference 2004), **04-53** (2004), 285-288.
- (8) Tanaka, Y. et al, Method to Simulate Generation of Compression Wave Inside a Tunnel at Train Entry with a Simple Geometry Model. (Influence of the Offset of Train Axis and the Ground Place), Nihon Kikai Gakkai Ronbunshu, B (Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B), **69-683** (2003), 1607-1614.
- (9) Kikuchi, K. et al, Numerical Analysis of Pressure Variation under Train Passage using the Boundary Element Method, Tetsudo Soken Hokoku (RTRI Report), **10-2** (1996), 47-52.
- (10) Tanaka, Y. et al, Model Experiment of Countermeasures to Reduce Pressure Waves Generated Outside a Tunnel by an Entering Train, Ryutai Kogaku Bumon Koen Ronbunshu (Fluids Engineering Conference), **01-3** (2001).
- (11) Iida, M. et al, Optimization of Train Nose Shape for Reducing Impulsive Pressure Wave from Tunnel Exit, Nihon Kikai Gakkai Ronbunshu, B (Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B), **62-596** (1996), 1428-1435.
- (12) Howe, M.S. et al, Theoretical and Experimental Investigation of the Compression Wave Generated by a Train Entering a Tunnel with a Flared Portal, Journal of Fluid Mechanics (2000), **425**, 111-132.
- (13) Sugimoto, N. and Ogawa, T., Acoustic Analysis of the Pressure Field in a Tunnel, Generated by Entry of a Train, Proc. R. Soc. Lond. A (1998), **454**, 2083-2112.
- (14) Yamamoto, A., Micro-pressure Wave Radiated from a Tunnel Exit, Nihon Butsuri Gakkai Haru Bunkakai (The Physical Society of Japan Spring Meeting), (1977)
- (15) Iida, M. et al, Estimation of the Necessary Length of a Tunnel Entrance Hood Entered into by Different Kinds of Trains, Tetsudo Soken Hokoku (RTRI Report), **16-12** (2002), 35-40.
- (16) Howe, M. S., Vorticity and the Theory of Aerodynamic Sound, Third Lighthill Memorial Paper, Journal of Engineering Mathematics (2001), **41**, 367-400.