

# トンネル内圧力変動に対する車両先頭部形状の影響

斉藤 実俊\* 福田 傑\*

Influence of Train Nose Shape on Pressure Variation in Tunnel

Sanetoshi SAITO Takashi FUKUDA

Pressure variations are generated during a train passage in a tunnel. Model experiments are effective in investigating the pressure variations. In the model experiments, axisymmetric train models are frequently used, because the train model is launched by friction drive consisting of vertically aligned wheels. However, train models similar to actual shape need to be used for estimating more accurately the pressure variations during a train passage. For this purpose, the launcher, which can shoot an actual shape train model by rotating wheels, has been developed. The pressure variations measured using the actual shape train and tunnel models agree well with the results of field measurements.

キーワード：高速列車，トンネル内圧力変動，通過時圧力変動，発射装置，先頭部形状

## 1. はじめに

列車がトンネル内を走行する際に発生する圧力変動はトンネル壁面やトンネル内設備，対向列車の車体や地下駅などの構造物に変動荷重として作用するため，これらの強度設計を行う際には圧力変動の大きさを正確に予測する必要がある。この圧力変動は，列車がトンネルに突入あるいは退出した時に発生し，トンネル坑口や列車端で反射することでトンネル内を往復する圧力波によるものと，列車周りの圧力場が移動することによって発生するものがある。

上述の圧力波の波長はトンネル直径より長く平面波であるため，圧力変動量はトンネル断面内ではほぼ一様となり，その大きさは列車・トンネル断面積比と列車速度によって決まる。この圧力変動の大きさを模型実験で再現するためには，トンネルとの断面積比を現車と等価にした列車模型を現車と同じ速度で走行させればよく，列車やトンネルの断面形状を現車と相似な複雑な形状にする必要はない。そのため発射装置による模型実験では，製作の容易な軸対称形状の列車模型とトンネル模型が使用されている。

一方，列車周りの圧力場の大きさは列車からの距離によって異なるためトンネル断面内で一様とはならず，また，列車近傍では先頭部・後尾部の形状の影響を強く受けることから，列車通過時の圧力変動については，上述の軸対称形状の列車模型による実験では正確に再現することができない。先頭部周りの圧力場の大きさは，車両

近接側のトンネル壁面で列車通過時の流路縮小効果による圧力変動（一次元的な現象）の20～30%程度と見積もられ<sup>1)</sup>，ホームドアや対向列車の車体など車両近傍の構造物への作用荷重を正確に予測するためには，列車先頭部形状の三次元性を考慮した模型実験が必要となる。

そこで，これまで軸対称形状の簡易な列車模型しか発射できなかった実験装置を，実際の車両と相似な複雑な形状を有する列車模型が発射できよう改良し，トンネル内の列車通過時圧力変動に対する先頭部形状の影響と車両からの距離依存性を調べた。さらに，現地試験結果と比較することで，実形状列車模型による実験方法の精度検証を行った。

## 2. 列車模型発射装置の改良

鉄道総研所有の列車模型発射装置は上下の回転輪で列車模型を挟み込み，摩擦によって加速する方式<sup>2)</sup>を採用しているため，基本的には列車模型は軸対称形状であることが要求される。実形状の模型を発射する装置は国内外にいくつか存在する<sup>3) 4)</sup>が，発射機構が総研所有の装置とは異なっている。現有の装置をそれらと同様の発射機構に変更することは大がかりな工事となるため，経費面から実施は困難である。そこで，発射機構を変更することなく複雑な実形状の列車模型による実験が可能ないように実験装置の改造を行った。

### 2.1 発射方式

回転輪方式によって実際の車両のような複雑な先頭形状で矩形断面の列車模型を発射するために，図1に示す

\* 環境工学研究部 熱・空気流動研究室

特集：沿線環境

ような方法を採用した。模型は回転輪で加速される軸対称形状の発射体と、トンネルに突入する供試体となる実形状列車模型で構成される。発射体は初期設置時に回転輪に接触しないよう、先端部分は細くしてある（以降、細い部分を接続棒と呼ぶ）。

まず、実形状列車模型をトンネル手前に、発射体の接続棒に接触させて設置する。実形状模型と回転輪の間には発射体を停止させる発射体用制動装置がある（図1(a)）。接続棒の直径は発射体より十分小さいため、発射体に接触するように調整されている回転輪や発射体用制動装置には接触しない。回転輪が発射速度に応じて定められた回転数に達すると、バネによって発射体を回転輪の位置まで送り出す。回転輪と接触した発射体は摩擦によって加速され、同時に実形状列車模型も発射体に押されることで加速される（図1(b)）。その後、発射体は発射体用制動装置によって停止させられるが、押されていた実形状列車模型は接続棒から離れ、慣性でそのまま走行、トンネル模型に突入し、列車模型用制動装置で停止させられる。

実形状列車模型は従来の軸対称列車模型と同様に一本のピアノ線によって装置終端部までガイドされる。軸対称列車模型では問題とならないが、実形状列車模型の場合、ピアノ線まわりに傾いて（ローリングして）走行する可能性がある。そこで、試験区間に進入する直前まで実形状列車模型の下部にガイド用ローラーを設置し、模型底面を接触させることで車両のローリングを防止した。模型装置の全景を図2に示す。

2.2 走行安定性評価

実形状列車模型を発射する場合、最も問題となるのは列車模型の姿勢、特にローリングの有無である。そこで、

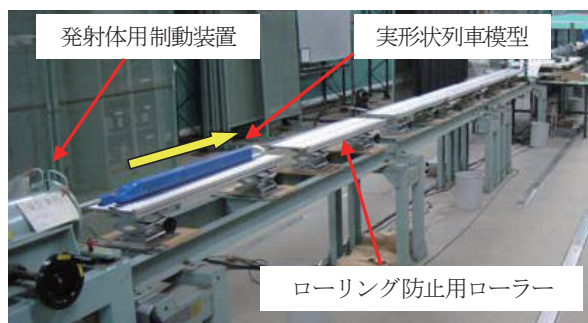


図2 実形状列車模型（発射前の状態）

トンネルがない明かり区間において、高速度デジタルカメラ（カシオ PRO-EX-E1、撮影コマ数は1200 frame/sec）によって列車模型の走行状態を撮影し、走行姿勢の確認を行った。

速度200 km/hで発射したときの走行姿勢の撮影結果を図3に示す。ピアノ線一本でガイドされているだけであるが、列車模型はローリングすることなく走行していることがわかる。今回の実験では、高速度カメラで監視し、列車模型がローリングした場合には測定をやり直した。今回の実験（250km/h）での発射回数は合計30回であったが、ローリングが観測され測定をやり直したのは2回であった。

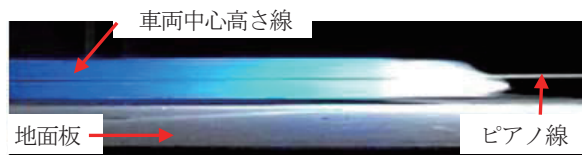


図3 列車模型の走行状態（高速度カメラ撮影）

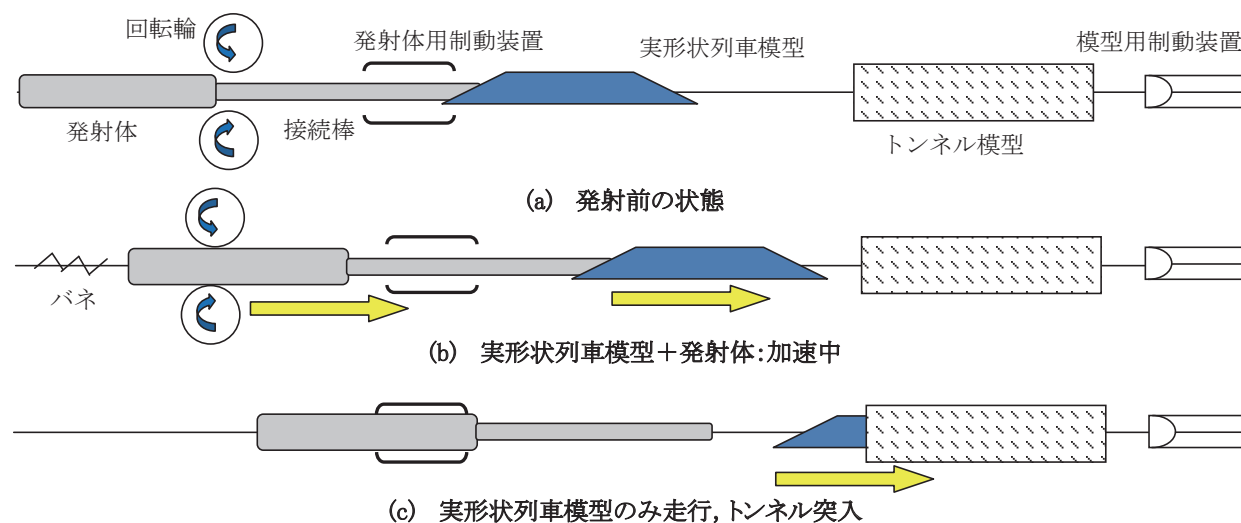


図1 列車模型の発射方法の概略図

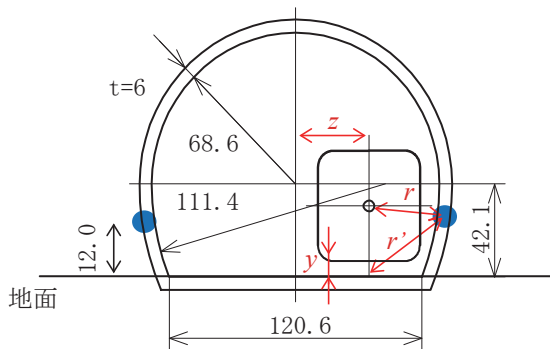
### 3. 模型実験によるトンネル内圧力変動測定

#### 3.1 模型概要

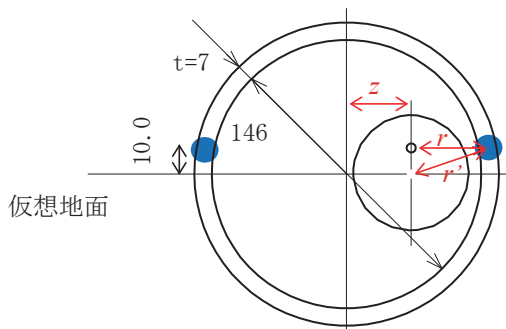
トンネル内圧力変動に対する列車先頭部形状の影響を評価するために、今回開発した装置によって実形状模型と軸対称模型による比較実験を行った。列車模型とトンネル模型の断面図を図4に、列車模型とトンネル模型の主要諸元を表1, 2に、実車両と実トンネルの主要諸元を表3に示す。

実形状列車模型に対しては実際の新幹線複線トンネルと相似な断面形状を有するトンネル模型を、軸対称列車模型に対しては円断面のトンネル模型を使用した。模型の縮尺は実形状模型の場合で約1/70、軸対称模型の場合で約1/87であり、いずれの列車模型も先頭部長さは実寸で約9mに相当する（新幹線営業車の先頭部とほぼ同じ）。また、両列車模型の先頭部の断面積分布は同じである。

実形状模型による実験ではトンネル入口付近に地面板を設置し、軸対称模型による実験では鏡像法<sup>5)</sup>によって地面を模擬した。



(a) 実形状の列車模型とトンネル模型



(b) 軸対称形状の列車模型とトンネル模型

図4 列車模型・トンネル模型の断面図（単位 mm）

表1 実形状模型の主要諸元

実形状 トンネル 模型	断面積 $A$ (mm <sup>2</sup> )	12900
	等価直径 $d = 2\sqrt{A/\pi}$ (mm)	128
	全長 $L$ (m)	8.0
実形状 列車模型	断面積 $a$ (mm <sup>2</sup> )	2290
	縦×横 $h \times b$ (mm)	50.8 × 48.3
	全長 $l$ (m)	1.0
	等価直径 $d' = 2\sqrt{a/\pi}$ (mm)	54.0
	先頭・後尾長さ $l_h$ (mm) アスペクト比 $l_h/(d'/2)$	130 4.815
列車・トンネル本坑断面積比 $R=a/A$		0.178
縮尺		1/70

表2 軸対称模型の主要諸元

軸対称 形状 トンネル 模型	断面積 $A$ (mm <sup>2</sup> )	16700
	等価直径 * $d = 2\sqrt{(A/2)/\pi}$ (mm)	103
	全長 $L$ (m)	8.0
軸対称 形状 列車模型	断面積 $a$ (mm <sup>2</sup> )	2960
	全長 $l$ (m)	1.0
	等価直径 * $d' = 2\sqrt{(a/2)/\pi}$ (mm)	43.4
	先頭・後尾長さ $l_h$ (mm) アスペクト比 $l_h/(d'/2)$	104.5 4.815
列車・トンネル本坑断面積比 $R=a/A$		0.177
縮尺		1/87

\*地面効果を鏡像法で考慮

表3 実物の主要諸元

実トンネル	断面積 $A$ (m <sup>2</sup> )	63.4
	等価直径 $d = 2\sqrt{A/\pi}$ (m)	8.99
実車両	断面積 $a$ (m <sup>2</sup> )	11.2
	全長 $l$ (m)	250
	等価直径 $d' = 2\sqrt{a/\pi}$ (m)	3.78
	先頭・後尾長さ $l_h$ (m) アスペクト比 $l_h/(d'/2)$	9.1 4.815
列車・トンネル本坑断面積比 $R=a/A$		0.177

特集：沿線環境

3.2 測定概要

測定に使用した計測機器を表4に、測定位置を図5に示す。圧力計の設置高さは実寸換算で0.8m、トンネル入口から圧力計までの距離は実寸換算で43m、列車模型の速度は250km/h（ばらつき±1km/h以内、マッハ数約0.2）である。

圧力測定点と車両中心間の距離を変化させるために、列車模型の走行位置を水平方向に偏心させて（図4のzを変化させて）実験を行った。実験条件を表5に示す。実形状模型のz=31mm、軸対称模型のz=25mmが実際の新幹線複線トンネルにおける偏心量2.15mに相当する。また、現車における車体底面とスラブ面（平板スラブ、新幹線60kgレール）間の距離は約400～420mmであり、実形状模型の約5.7～6.0mmに相当するが、地面板への衝突を避けるためと走行時に3～5mm程度沈み込むことを考慮して、初期設定高さ（静止時の高さ）を10mmとした。データのサンプリング周波数は50kHzである。

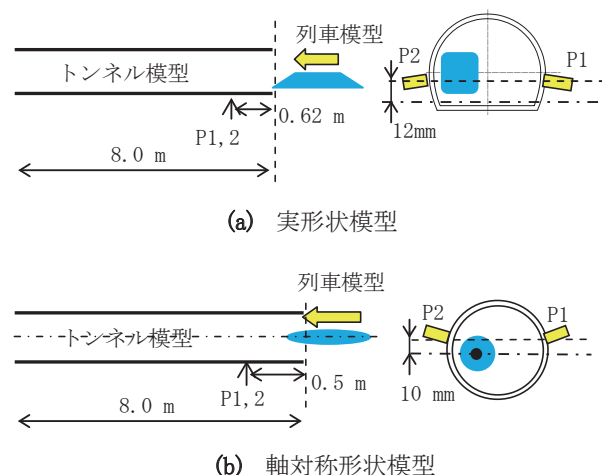


図5 トンネル内圧力の測定位置

表4 使用計測器

項目	センサー	設定
圧力	差圧計 Kulite XCS-190-5G	GAIN 200 10kHz ローパスフィルタ

表5 実験条件表（y, z：図4参照）

項目	実形状模型	軸対称形状模型
水平方向 偏心量 (mm)	z=0, 10, 20, 31	z=0, 8, 16, 25
上下方向 偏心量 (mm)	y=10	トンネル中心高さ

3.3 測定結果

気温や大気圧による密度変化の影響を補正するために、以下に示すトンネル内圧縮波の圧力上昇量の理論式<sup>6)</sup>

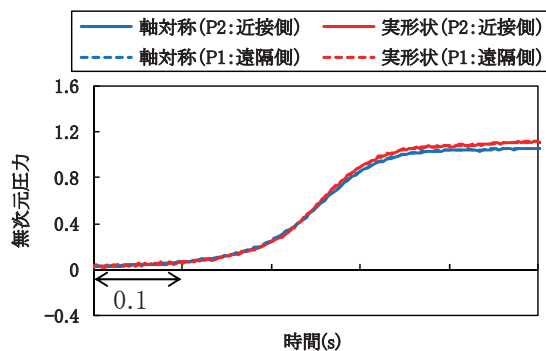
によって無次元化した。

$$\Delta p = \frac{1 - (1 - R)^2}{(1 - M)\{M + (1 - R)^2\}} \frac{1}{2} \rho U^2 \quad (1)$$

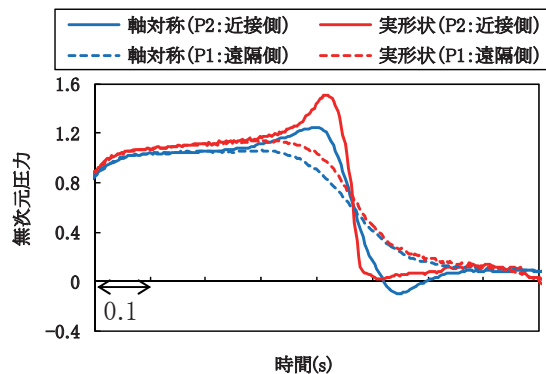
ここで、 $\rho$ ：空気密度、 $U$ ：列車速度、 $M$ ：マッハ数（=列車速度/音速）、 $R$ ：列車・トンネル断面積比（列車断面積/トンネル断面積）であり、各実験における気温および大気圧、列車模型速度から式(1)により $\Delta p$ を求めた。

3.3.1 圧力測定結果

トンネル側面に作用する圧力の測定結果（実形状模型z=31mm、軸対称模型z=25mmの場合）を図6に示す。図6(a)は列車先頭部がトンネルに突入した際に発生した圧縮波による圧力変動、図6(b)は列車先頭部が通過したことによる圧力変動である。両図とも時間軸は実スケールに換算してある。既述のとおり、前者は平面波であるため車両の近接側と遠隔側で同じ変化を示しており、さらに、実形状模型と軸対称模型による差もほとんどない（厳密には車両底面と地面間の流れ等の影響により圧力勾配および圧力上昇量に若干の差がある<sup>7)</sup>）。一方、列車先頭部通過時の圧力変動をみると、実形状模型、軸対称模型とも、先頭部通過による流路縮小のために大きく圧力が減少しているが、車両近接側では、先頭部周りの圧力場による影響を受け、遠隔側に比べて変動幅が大きいことがわかる。また、先頭部の断面積分布が同じであるにもかかわらず、その変動幅の大きさは実形



(a) 圧縮波通過時の圧力変動



(b) 列車先頭部通過時の圧力変動

図6 圧力の時間波形：実形状z=31mm、軸対称z=25mm（250km/h、時間軸：実スケール）

状模型の方が軸対称模型より大きく、先頭部形状の影響が現れている。

列車先頭部の三次元形状の影響が顕著に表れる通過時圧力変動について、模型実験の再現精度を検証するために現地試験結果と比較を行った。比較結果を図7に示す。なお、縮尺模型の実験結果に対しては時間軸を実スケールに変換してある。また、列車模型の全長が実スケールの3両編成程度と短いことや、圧力測定点のトンネル入口からの距離の差違のために、模型実験と現地試験では列車側面およびトンネル壁面との摩擦による圧力上昇量に差異が生じる。そこで両者を比較しやすいように、列車先頭部または後尾部通過前の模型実験の圧力測定値を現地試験結果に一致するよう上下にシフト(ゼロシフト)している。

図7(a)より、先頭部通過時の圧力変動を比較すると、車両遠隔側(模型実験のP1)においては軸対称模型、実形状模型とも現地試験結果と良く一致しているが、車両近接側(模型実験のP2)では軸対称模型の結果は現地試験結果より圧力最大値を過小評価している。一方、実形状模型の結果は良く一致しており、先頭部形状の影響が大きい車両近傍における圧力変動を正確に再現するためには断面積分布のみ等価にした軸対称模型では精度が低く、実形状模型を使用した実験が必要であるといえる。また、今回使用した新幹線のように流線型先頭部

では、流れのはく離がほとんどないため縮尺(すなわちレイノルズ数)の影響は小さく、ほぼ正確に現車の圧力変動を再現できている。なお、今回の軸対称模型による実験結果は現地試験結果より過小評価となったが、この傾向は先頭部形状や測定位置によって異なり、たとえばくさび形のように二次元的な先頭部形状の場合、軸対称模型の結果は車両側方のトンネル壁面では過大評価、車両上面側のトンネル壁面では過小評価の傾向が見られる。

つぎに、図7(b)より、後尾部通過時の圧力変動を比較すると、車両遠隔側においては軸対称模型、実形状模型とも現地試験結果と良く一致しているが、車両近接側においては軸対称模型、実形状模型とも圧力上昇に要する時間が現地試験結果より短いことがわかる。これは列車後尾部付近での流れのはく離による影響と考えられ、はく離の状況がレイノルズ数(縮尺)や編成長(模型は実車より短い)の影響を受けるために圧力波形が一致しなかったものと推定される。また、実形状列車模型の後尾部通過直後に正の圧力が発生しているが、再現性がある(測定回数3回)ことからノイズなど計測上の問題ではなく、実現象と考えられる。 $z=31\text{mm}$ の実形状模型による実験では圧力測定点から車両側面までの隙間が9mm程度と非常に小さく、はく離領域の差異の影響を受けたものと推定される。

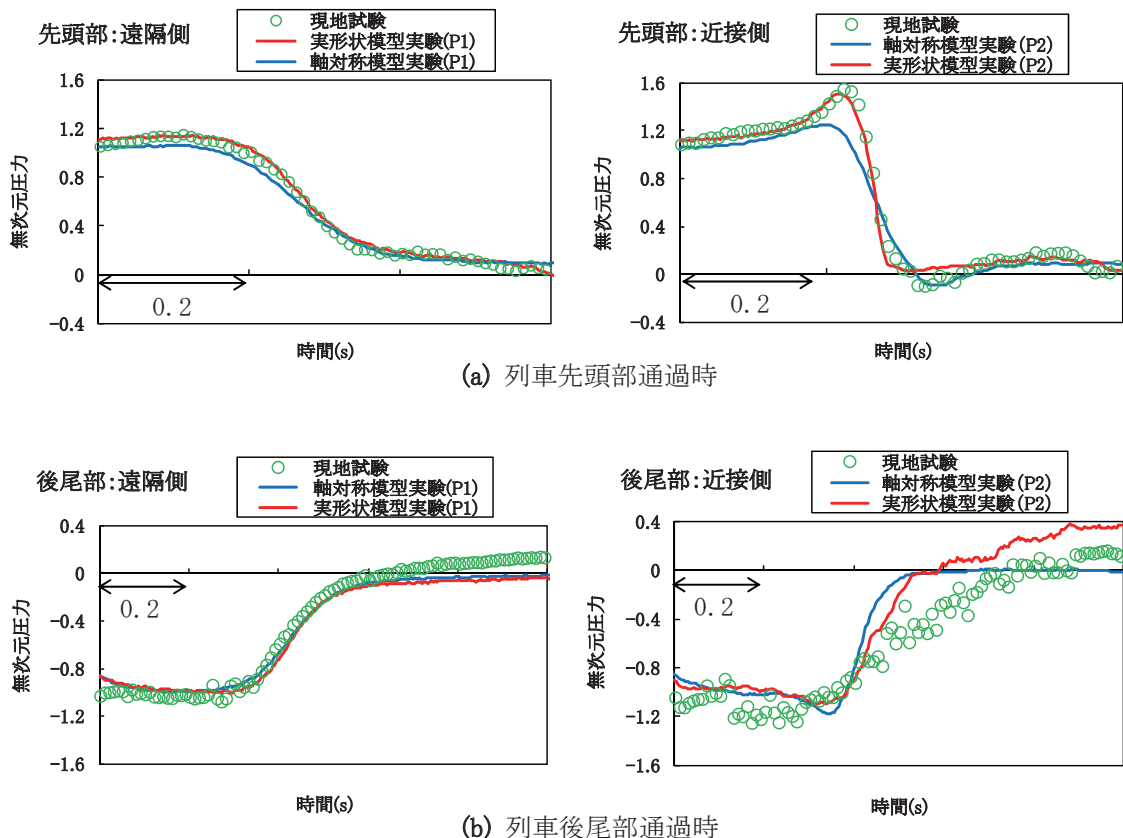


図7 模型実験と現地試験結果の比較 (250km/h)

特集：沿線環境

3.3.2 列車通過時圧力変動の距離特性

図7より、トンネル内で列車先頭部および後尾部が通過した時に発生する圧力の変動幅（P-P値、最大値－最小値、以下、圧力変動幅）は、車両に近い方が大きいことがわかる。この圧力変動幅には、通過車両からの距離に依存せずトンネル断面内で一様である流路断面積変化によるもの（一次元的な圧力変動）と、車両に近いほど大きくなる三次元的な圧力場によるものがあり、圧力変動の距離依存性を調べるためには両者を分離する必要がある。そこで、最も測定点距離が長い条件（実形状で $r=31$ 、軸対称で $r=25$ のときのP1点、以下、最遠隔点）での圧力変動の三次元的な成分は十分小さいと仮定し、各点での測定波形から最遠隔点での測定波形を差し引くことで三次元的な圧力変動波形を求めた（実際、最遠隔点と次に遠い測定点の圧力波形にはほとんど差はなく、距離に依存する三次元的成分は十分小さいと考えられる）。

図7の列車通過時のP1、P2点の圧力変動測定波形から一次元的な圧力変動分を差し引いて求めた三次元的な圧力変動の大きさ（圧力変動幅）と鏡像を考慮した車両中心からの距離（図4の $r'$ ）との関係を図8に示す。図8より、はく離の影響を受けている後尾部通過時の実形状モデルではばらつきが大きいものの、鏡像を含めた車両中心からの距離の二乗にほぼ反比例していることがわかる。この傾向は明かり区間における列車先頭部・後尾部通過時の圧力変動幅と同じ距離特性であり<sup>8)</sup>、トンネル断面内における任意の点の通過時圧力変動を予測する際に活用できる。

4. まとめ

トンネル内における列車通過時圧力変動について、列車先頭部形状の影響ならびに車両からの距離依存性について模型実験により調べた。結果を以下にまとめる。

①車両近傍の圧力変動は列車先頭部の三次元的な形状の影響を強く受けるため、模型実験で精度良く再現するためには実物に類似の先頭部形状を有する列車模型に

よる実験が必要となる。

②トンネル内における列車通過時圧力変動のうち、車両周りの圧力場による圧力変動幅は鏡像を含めた車両中心～測点間のトンネル断面内における距離の二乗にほぼ反比例する。

③縮尺や列車長の影響によってははく離の状況が異なるため、列車後尾部通過時の圧力変動は実形状模型でも誤差がある。

文献

- 1) 飯田雅宣, 吉田康夫, 前田達夫, 和田安弘, 小川哲: 高速鉄道に係わる空力問題の数値シミュレーション (その3), 第13回NALシンポジウム, 1996
- 2) 福田傑, 飯田雅宣: 列車・トンネル系の空気力学に関する模型実験, 日本音響学会, Vol.63, No.9, pp.543-548, 2007
- 3) Doi, T., Kaku, J., Masubuchi, T., and Ogawa, T., "Development of an experimental apparatus for measuring a pressure wave generated by a model train of actual shape," *Inter Noise 2006*, 2006.
- 4) Pope, C. W., "The simulation of flows in railway tunnels using a 1/25th scale moving model facility," *Proceeding 7th International Symposium Aerodynamics Ventilation of Vehicle Tunnel*, pp.709-737, 2003.
- 5) 田中靖幸, 飯田雅宣, 菊地勝浩: 単純な形状の模型を用いてトンネル突入時の圧縮波形成を模擬する方法, 日本機械学会論文集B編, Vol. 69, No. 683, pp.1607-1614, 2003
- 6) 原朝茂: 列車が高速で隧道に突入する場合の流体力学的諸問題, 鉄道技術研究報告, No.153, 1960
- 7) 福田傑, 宮地徳蔵, 齊藤実俊, 飯田雅宣, 栗田健, 菊池善基: 列車のトンネル突入時に形成される圧縮波の三次元・軸対称列車模型を用いた実験, 日本機械学会論文集B編, Vol. 78, No. 793, pp.1521-1533, 2012
- 8) 菊地勝浩, 内田一男, 中谷浩二, 吉田康夫, 前田達夫, 柳澤三憲: 三次元境界要素法による列車通過時の圧力変動解析, 鉄道総研報告, Vol. 10, No. 3, pp.47-52, 1996

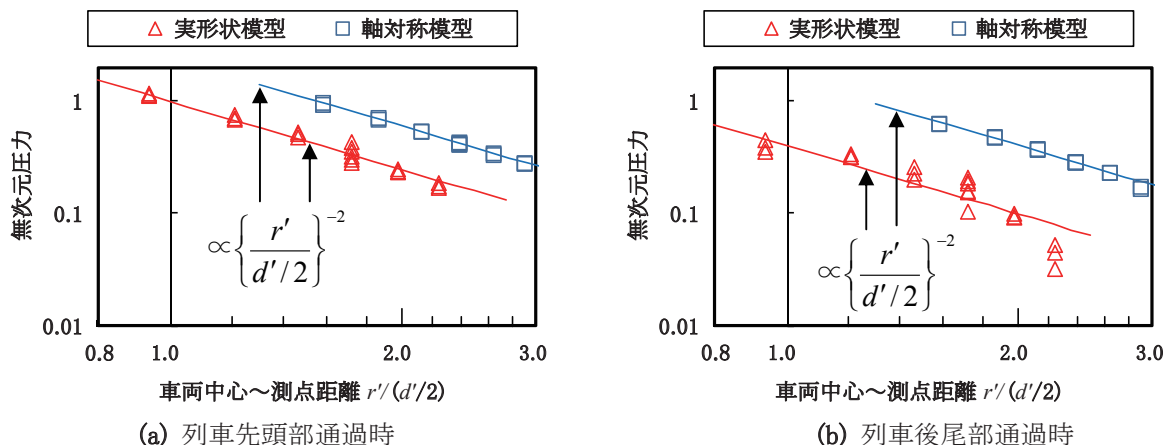


図8 車両周りの圧力場による圧力変動幅の距離特性