

列車のトンネル突入時に形成される圧縮波に関する三次元模型実験

○ 斎藤 英俊 (鉄道総研) 正 [機] 福田 傑 (鉄道総研)

Three-dimensional model experiment on the compression wave generated by a train entering a tunnel

Hidetoshi SAITO, Railway Technical Research Institute, 2-8-38, Hikari-cho, Kokubunji-shi, Tokyo

Takashi FUKUDA, Railway Technical Research Institute.

Compression waveform generated by a train entering a tunnel can be obtained by an efficient prediction method, which was verified by the results of model experiments using axisymmetric train models. However, the results of the prediction method and model experiment do not always agree with field measurements. In this study, the model experiments using a three-dimensional train model and axisymmetric model are conducted to clarify the differences between the prediction method and the field measurements. The result shows that the pressure and pressure gradient of the compression wavefront by the three-dimensional model are larger than those by the axisymmetric model.

Keywords: Compression Wave, Tunnel, Axisymmetric Model, Three-dimensional Model, High-speed Railway

1. はじめに

高速鉄道の沿線環境問題の一つにトンネル微気圧波^{1),2),3)}がある。微気圧波の現象解明および低減対策法の検討においては、列車のトンネル突入時にトンネル内に形成される圧縮波形を定量的に予測する必要がある、その手法の一つに模型実験がある。

鉄道総研ではこれまで、軸対称の列車模型および軸対称または三次元形状のトンネル模型を用い、列車の走行中心とトンネル模型の中心軸をずらすことにより、列車の偏心走行を模擬する模型実験を実施してきた^{4),5)}。本模型実験方法はこれまで、列車先頭部形状の検討やトンネル緩衝工の開口部の検討に用いられるなど、微気圧波の低減対策法の検討に有用なものである。また、本模型実験は、空力音響理論による圧縮波予測手法⁶⁾の検証にも用いられている。

しかしながら縮尺が 1/100 オーダーの軸対称の列車模型を用いる模型実験は、現地測定結果と比較すると誤差が大きい場合があり、その要因として列車周りの流れの三次元性の影響や縮尺模型を用いることによるレイノルズ数の違いが考えられる。そこで本研究では、流れの三次元性の影響を調べるため、三次元形状の列車およびトンネル模型（以下三次元形状模型と言う）を用いた実験を行い、軸対称形状の列車およびトンネル模型による実験結果との比較を行った。

2. 実験概要

2.1 想定した列車

本実験で想定した列車の先頭部形状（実スケール）を図 1 に示す。先頭部長さ、幅、高さは、一般的な新幹線電車の車両諸元と同じとした。先頭部形状は、二次元くさび型とし、流れのはく離を防ぐため、半径 0.5 m の丸みをつけた。この先頭部形状の断面積変化を図 2 に示す。

2.2 軸対称形状偏心模型

図 3 (a) に示す様に軸対称形状模型は、回転体の列車模型と円管のトンネル模型を用いるため、形状を単純化している。列車模型の先頭部の断面積変化は図 2 と相似である。地面の効果は、鏡像法を用いて模擬している⁵⁾。図 4 に示す様に、列車とその鏡像を合わせて回転体で置き換えているため、列車底面と地面の間の空間の流れは無視される。軸対称形状模型の縮尺は 1/125.5 とした。後尾車は切り落とされた形状としている。トンネル模型の半径は 50 mm、長さは 8 m としている。

2.3 三次元形状模型

図 3 (b) に示す様に三次元形状模型は、図 1 の列車をそのまま縮小したものである。模型の縮尺は、後述のトンネル模型と実トンネルの等価半径の比より、1/72.3 となる。列車模型の全長は 1000 mm で、先端から 400 mm

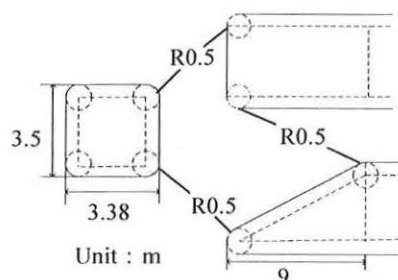


Fig.1 Train nose shape
(real scale)

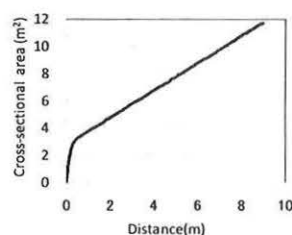


Fig.2 Cross-sectional area of train nose
(real scale)

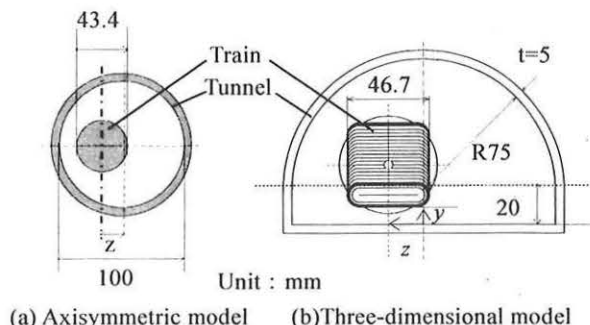


Fig.3 Train and tunnel model

Tab.1 Experimental Conditions

Tunnel	Model shape	Axisymmetric model	Three-dimensional model
	Radius : R	Circular 50 mm	Horseshoe type 86.8 mm(Mirror image)
Train	Model shape	Circle type	Wedge type
	Radius	21.7 mm	26.7 mm
	Blokage	0.19	
	Entry speed : U	160, 180, 200, 220, 240, 260 km/h	
	Offset ratio : z/R	0, 0.12, 0.24, 0.30, 0.34	
	Ratio of distance to train-bottom and ground : y/R	0.09, 0.12, 0.14, 0.23, 0.27, 0.31	
Model scale		1/125.5	1/72.3
Method for simulating the ground		Mirror image method	Ground Plate

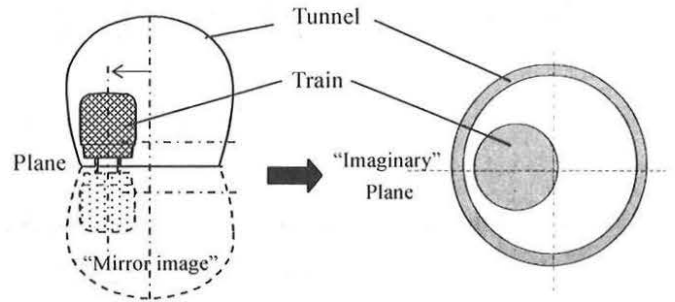


Fig.4 Representation of the ground plane by the mirror image method

(a)Axisymmetric Model

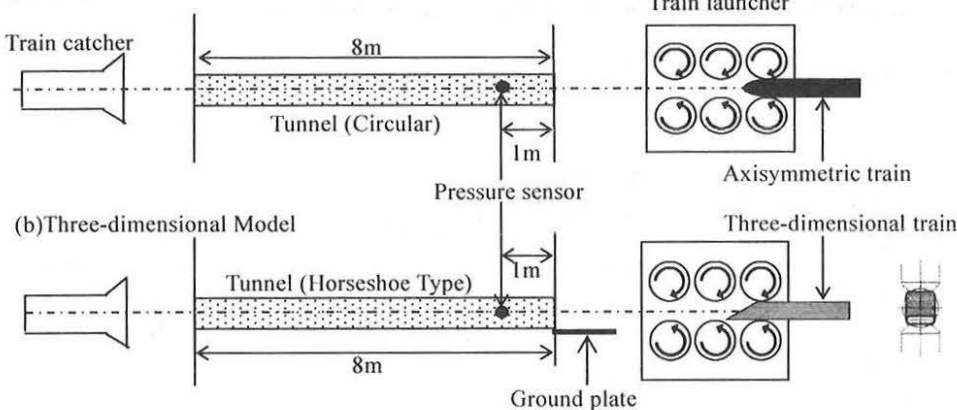


Fig.5 Schematic of model experiments

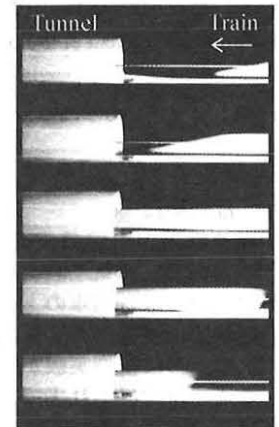


Fig.6 Photograph of three-dimensional train model entering a tunnel model ($U=260\text{km/h}$, 600f/s)

は断面が矩形の三次元形状とし、残り 600 mm を円筒形状としてある。このように列車模型の断面形状を矩形部と円筒形状部の組み合わせとしたのは、列車模型をロール方向に回転させずに高速発射させるためである。矩形部が第 2.4 節で述べる回転車輪に挟み込まれ、接触する際に、模型のロール方向のずれが自動的に修正され列車模型のロール方向への回転防止ともなる。また、円筒形状部が回転車輪と広い面積で接することにより、列車模型と回転車輪の間の滑りを抑え、列車模型の高速発射が可能になる。トンネル模型の断面形状は馬蹄形とし、長さは 8 m としている。明かり区間の地面は地面板を用いて模擬している。

2.4 実験方法

実験は、鉄道総研のトンネル微気圧波模型実験装置⁷⁾を使用して行った。実験の概要を図 5 に示す。緊張したピアノ線で案内された軸対称および三次元列車模型を、高速回転する 3 対 (6 個) の車輪の摩擦駆動によって打ち出し、トンネル模型内に突入させ、トンネル内で発生する圧縮波を突入坑口から約 1 m 離れた箇所に設置された圧力変換器により測定する。

鉄道総研では、回転車輪方式による三次元列車模型の発射は今回の実験が初めてであり、列車模型をロール方向に回転させずに、所定の速度で打ち出すことが重要な課題であった。そこでトンネル模型の突入坑口手前に設

置された高速デジタルカメラにより突入の様子を撮影し、走行安定性を確認した。発射速度は三次元および軸対称列車模型ともに 160, 180, 200, 220, 240, 260 km/h とした。トンネル模型内における軸対称および三次元形状模型の座標系を図 3 に示す。 z は各々の列車模型の中心軸とトンネル模型断面中心軸との距離で列車偏心量を表し、 y は三次元列車模型底面と地面までの間隔を表している。地面が圧縮波の形成に及ぼす影響を調べるために y を変化した実験を三次元形状模型で実施した。また、列車の水平方向の偏心が圧縮波の形成に及ぼす影響を調べるために z を変化した実験を軸対称形状模型と三次元形状模型の両方で実施した。

3. 実験結果と考察

3.1 三次元列車模型の発射状況

三次元列車模型が 260 km/h でトンネル模型に突入する様子を図 6 に示す。高速デジタルカメラで確認した結果、実験を行った全ての速度で三次元列車模型はロール方向に大きな回転を生じず、ほぼ水平に、所定の速度でトンネル模型内に突入することが確認できた。

3.2 トンネル内で発生する圧縮波

両模型の現象を比較する為に、得られた圧縮波のデータを以下の様に無次元化した。列車のトンネル突入時に形成される圧縮波の圧力上昇量の式⁸⁾は

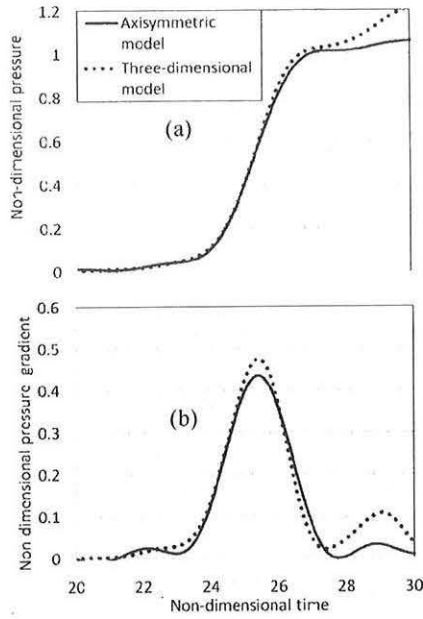


Fig.7 (a) Pressure and (b) pressure gradient of the compression wave at train nose entry obtained from three-dimensional model and axisymmetric model ($U=260\text{km/h}$, $z/R=0$)

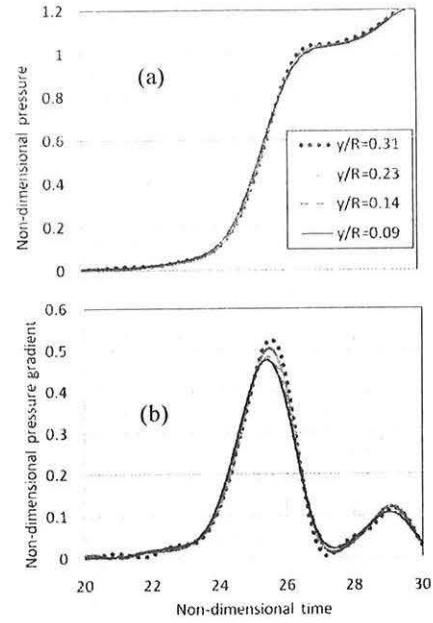


Fig.8 (a) Pressure and (b) pressure gradient of the compression wave at train nose entry obtained from three-dimensional model ($U=260\text{km/h}$, $z/R=0$)

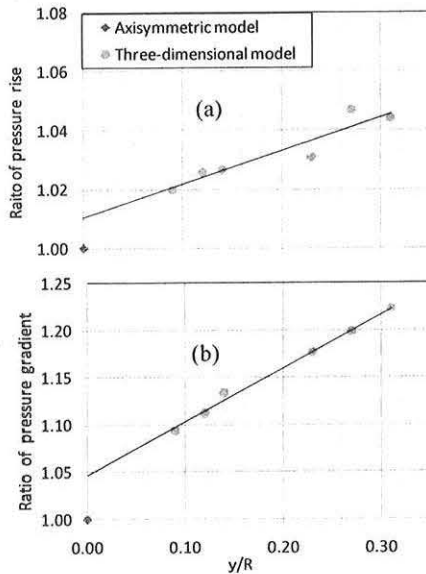


Fig.9 Ratio of (a) pressure rise and (b) pressure gradient of three-dimensional model when y is changed (Reference value : Axisymmetric model)

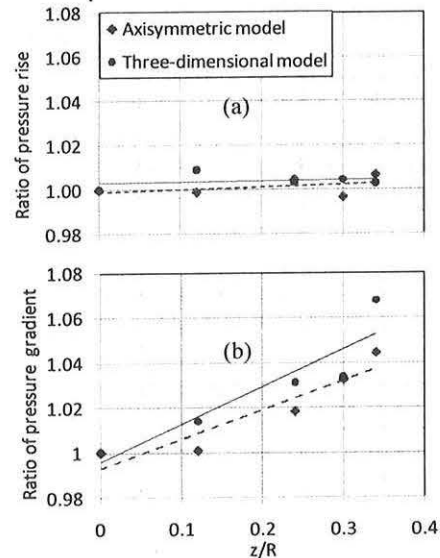


Fig.10 Ratio of (a) pressure rise and (b) pressure gradient of three-dimensional model when z is changed (Reference value : the values when $z/R=0$)

$$P = \frac{\rho U^2}{2} \frac{1 - (1 - R_T)^2}{(1 - M) \{M + (1 - R_T)^2\}} \quad (1)$$

で与えられる。ただし、 ρ : 空気密度、 U : 列車速度、 R : トンネル等価半径、 M : マッハ数 (=列車速度/音速)、 R_T : 列車・トンネル断面積比 (=列車断面積/トンネル断面積) である。各無次元量に関して、圧力 p は式 (1) で、時間 t は R/U で、圧力勾配 dp/dt は

$$\frac{\rho U^3}{2R} \frac{1 - (1 - R_T)^2}{(1 - M) \{M + (1 - R_T)^2\}}$$

で除することにより求めた。図 7 に軸対称列車模型 ($z/R=0$) および三次元列車模型 ($y/R=0.09$, $z/R=0$) がトンネルに突入した際の圧力および圧力波形を示す。ここで、 $y/R=0.09$ は地面までの間隔が実際に走行している新幹線と同程度である。また、軸対称形状模型は鏡像法により地面を模擬しているので車両床下と地面の間には全く間隔が無い。図 7 を見ると、圧力および圧力勾配ともに三次元形状模型の方が軸対称形状模型よりも若干大きいことが認められる。図 8 に三次元形状模型において、鉛直方向に y を変化させたときの代表例として、 $y/R = 0.09, 0.14, 0.23, 0.31$ の圧力および圧力勾配波形

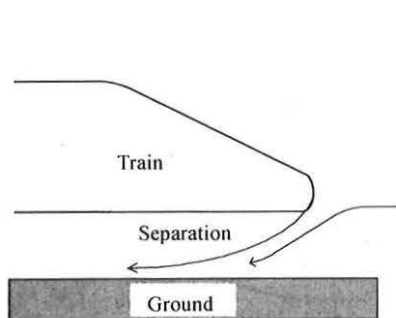


Fig.11 Flow separation under train nose

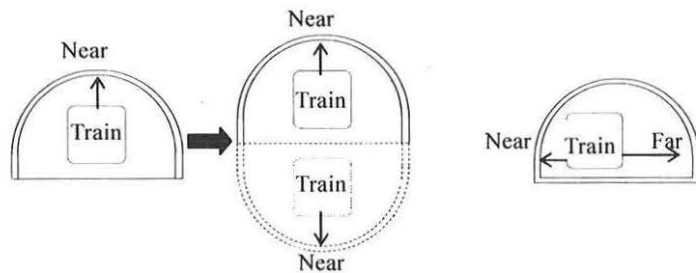
($U=260\text{km/h}$, $z/R=0$) を、図9に実験を実施した全速度域の圧力上昇量および圧力勾配最大値の平均値と y/R の関係を示す。グラフの縦軸は、軸対称形状模型の結果を1としたときの比を示している。図8、図9より y/R が大きくなる、つまり列車底面が地面から離れるにつれ、圧力および圧力勾配最大値が一定の割合で増加していくことがわかる。地面との間隔が実車と同程度 ($y/R=0.09$) である三次元形状模型の場合では、軸対称形状模型と比べ、圧力上昇量で約2%、圧力勾配最大値で約10%大きくなっている。

以下に圧力上昇量が軸対称形状模型よりも大きくなったことに対する考察を述べる。三次元形状模型 ($y/R=0.09$) が軸対称形状模型よりも圧力上昇量が約2%増加したことの理由の一つに、流れのはく離により列車断面積が見かけ上増加したことが考えられる。三次元列車模型では、軸対称列車模型とは異なり車両床下と地面の間に隙間があり、この床下の流れが圧力上昇量の増加に影響していることが考えられる。また、図9(a)より、三次元列車模型の車両床下と地面までの間隔を離していくと圧力上昇量が増加していく傾向が見られる。しかしながら、仮に、図11のように車両床下の流れが大きくはく離し、地面まで達していると考え、圧力の増加は式(1)より16.1%にもなることから、流れのはく離したとしても図11のような状況よりも小規模なものであると考えられる。

次に三次元形状模型が軸対称形状模型よりも圧力勾配最大値が増加したことに対する考察を述べる。図9(b)より、三次元列車模型の車両床下と地面までの間隔を離していくと、圧力勾配最大値が増加していく傾向が見られる。ここで、文献5)等によると、列車先頭部突入時にトンネル内部に形成される圧縮波は、列車が偏心してトンネル壁面に近づくにつれて、圧力勾配のピーク値は増加する。よって、三次元形状模型の車両床下と地面までの間隔を離すことは、図12(a)のように列車を鉛直方向に偏心させ、トンネル上部壁面に近づけることと同じであるため、縦方向の偏心がない軸対称形状模型よりも圧力勾配が増加したと考えられる。

次に、水平方向に列車模型を偏心させた場合の結果について述べる。なお、三次元形状模型の列車と地面までの間隔は、 $y/R=0.09$ に設定している。実験を実施した全速度域の圧力上昇量および圧力勾配最大値の平均値と偏心量 z/R の関係を図10に示す。ここで、グラフの縦軸は、 $z/R=0$ の結果を1としたときの比を表している。図10より水平方向の偏心による圧力上昇量の変化は鉛直方向に比べて小さいこと、水平方向への偏心によって圧力勾配最大値が大きくなること、三次元形状模型の方が軸対称形状模型よりも偏心の影響が大きいことがわかる。

また、図9(b)と図10(b)を比較すると、鉛直方向



(a) Vertical direction

(b) Horizontal direction

Fig.12 Offset of three-dimension train model

の偏心 y/R の方が水平方向の偏心 z/R よりも圧力勾配最大値の増加の割合が大きいことがわかる。この理由として、鉛直方向の偏心の場合に鏡像を考えると、図12(a)の様に、列車は上下2箇所でも上部壁面に近づくため圧力勾配の増加が大きくなるが、水平方向の偏心の場合では、図12(b)に示す様に、一方では壁に近づくが片方では壁から遠ざかるため圧力勾配の増加量は小さくなると考えられる。この現象の理論的な説明は今後の課題である。

4. まとめ

実車と軸対称列車模型を用いた模型実験での圧縮波の形成の誤差要因は、車体形状の三次元性の違い、スカートや台車等の細かい形状の違いによる流れの違い、レイノルズ数の違い(100倍程度異なる)によるはく離や境界層等の車体まわりの流れの違い、などが考えられる。本研究では、三次元性の違いについて確認を行うため、従来の軸対称形状模型と現車を想定した三次元形状模型による模型実験を実施した。

三次元列車模型は、断面形状を矩形部と円筒形状の組み合わせとすることにより、ロール方向に大きな回転を生じさせることなく、ほぼ水平に高速で発射することが可能になった。

模型実験の結果、列車の形状など本実験で想定した条件の基では、三次元形状模型の方が軸対称形状模型よりも、圧力上昇量で約2%、圧力勾配最大値で約10%大きく評価することがわかった。この理由として、流れのはく離や鉛直方向の偏心が影響しているものと考えられる。

実験結果の考察に当たっては、鉄道総研環境工学研究部 飯田雅宣 部長の助言を頂いた。ここに記し、感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 小沢智, ほか3名: 鉄道技術研究報告, No.1023, 1976.
- 2) 小沢智, ほか2名: 鉄道技術研究報告, No.1054, 1977.
- 3) 小沢智: 鉄道技術研究報告, No.1121, 1979.
- 4) M.Iida and M.S.Howe: Journal of Frequency Noise, Vibration and Active Control., Vol. 26, pp.227-247, 2007.
- 5) 田中靖幸, ほか2名: 日本機械学会論文集(B編), 69巻683号, pp.1607-1614, 2003.
- 6) M.S.Howe, ほか3名: Journal of Sound and Vibration., Vol. 297, pp.267-292, 2006.
- 7) 福田傑, 飯田雅宣: 日本音響学会誌, 63巻9号, pp.543-548, 2007.
- 8) 原朝茂, 山本杉也: トンネル内空気圧変動, 高速鉄道の研究, 鉄道技術研究所監修, 1967.
- 9) 佐久間豊, ほか3名: 日本機械学会年次大会講演論文集 2006(2), pp.349-350, 2006.