

車両先頭部形状の三次元性を考慮した 微気圧波模型実験方法の開発

福田 傑* 齊藤 実俊*
宮地 徳蔵** 飯田 雅宣***

Development of Experimental Technique on the Micro-pressure Wave Phenomenon
Using a Train Model of Actual Shape

Takashi FUKUDA Sanetoshi SAITO Tokuzo MIYACHI Masanobu IIDA

Model experiments using reduced-scale models are useful for investigating the micro-pressure wave phenomenon. The model experiments using axisymmetric train models have been conducted frequently, and effectively for clarification of the micro-pressure wave phenomenon and the development of the countermeasures thereto. However, train models similar to actual shape need to be used to estimate more accurately the compression waveform generated by a train entering a tunnel. For this purpose, an experimental technique for launching a train model of actual shape at the maximum speed of 250 km/h has been developed. The experimental results indicate that the model experiments using the train model of actual shape can improve the accuracy of the estimation of the compression wave, whether the train nose is equipped with parts having sharp edges like a snowplow or not.

キーワード：トンネル微気圧波，圧縮波，模型実験，軸対称，実形状

1. はじめに

列車が高速でトンネルに突入すると、トンネル内に圧縮波が形成される。この圧縮波がトンネル内を伝播し、列車突入と反対側のトンネル坑口に到達すると、トンネル坑口から周囲へパルス状の圧力波が放射される。このパルス状の圧力波はトンネル微気圧波^{1)~3)}と呼ばれ、トンネル出口付近の騒音・低周波音・振動などの環境問題の原因となることがある。微気圧波の大きさ(ピーク値)はトンネル坑口に到達した圧縮波の波形に依存し、圧縮波の波面圧力の時間微分(以下、圧力勾配) $\partial p / \partial t$ の最大値にほぼ比例する。そのため、微気圧波の大きさの予測およびトンネル緩衝工の設置や車両先頭部の延伸・形状の最適化などの低減対策法の検討のためには、車両のトンネル突入時に形成される圧縮波を評価する必要がある。

車両のトンネル突入時に形成される圧縮波の評価手法のひとつに、縮尺模型を用いた模型実験がある。鉄道総研にある現行の模型実験装置は、上下に配置した回転輪に車両模型を挟み込んで発射するものであり⁴⁾、基本的には車両模型は軸対称(円形断面)であることが要求される。トンネルを円管、車両を三次元的な実形状ではなく回転体で模擬する軸対称模型を用いた模型実験は、車

両のトンネル突入時に形成される圧縮波の圧力が断面内で一様な平面波であり流れが一次元的であること、模型の製作が容易であること、さらに車両模型を繰り返し発射することが容易で効率的に実験を実施可能なことなどから、微気圧波の現象の解明や低減対策法の検討に多く用いられてきた^{3), 5)~7)}。さらには、車両に軸対称模型、トンネルやトンネル緩衝工に実形状模型を用い、現象の解明やトンネル緩衝工の効果に関する実験もこれまでに行われている⁸⁾。

しかしながら、軸対称模型を用いた実験と三次元の実形状模型を用いた実験の結果を比較し、その結果の差異や車両先頭部形状の三次元性の影響を詳細に調べたものはこれまでにほとんど報告されていない。そこで本研究では、発射機構は回転輪方式のまま実形状の車両模型が発射可能な実験方法を開発し、車両を軸対称模型および実形状模型で模擬したときの模型実験結果の比較から、圧縮波の形成に与える車両先頭部形状の三次元性の影響を調べた。さらに模型実験結果と現地測定結果の比較を行い、実形状模型を用いる実験の有効性を確認した。

2. 模型実験の概要

2.1 実験装置

鉄道総研にあるトンネル微気圧波模型実験装置⁴⁾における軸対称模型を用いた実験の概要を図1(a)、発射

* 環境工学研究部 熱・空気流動研究室
** 環境工学研究部 車両空力特性研究室
*** 環境工学研究部

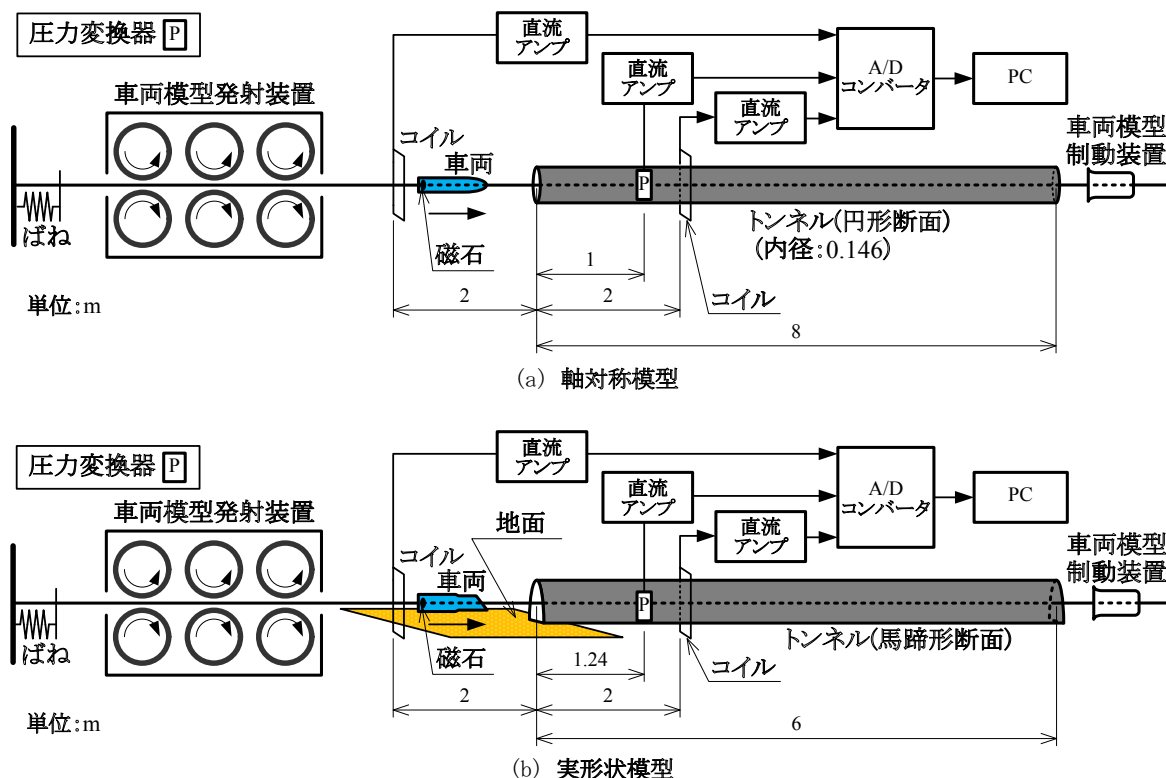


図1 模型実験の概要

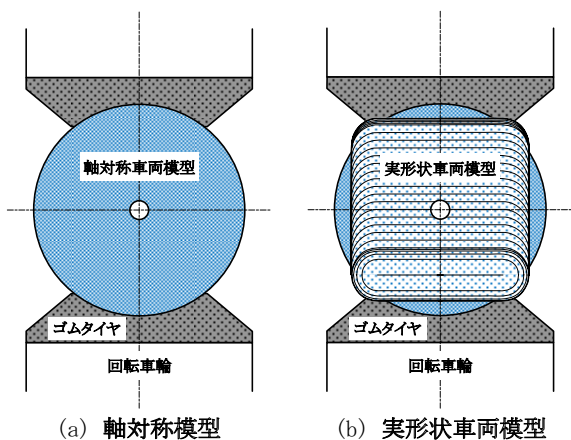


図2 ゴム付発射輪と車両模型の断面形状

装置の回転輪と軸対称模型の断面形状を図2 (a)、軸対称車両・トンネル模型の概要を図3 (a) に示す。なお、図1 (a) 中の各寸法は測定器の配置や模型の一例であり、後述の模型実験における設定である。図1、図2 に示すように、本模型実験装置の車両模型発射装置は上下三対の回転車輪を有しており、車輪間に車両模型を挟んで通すことにより車両模型を射出させる。車輪の外周には、車両模型との間の摩擦力を大きくするためにゴムが装着されている。この車輪のゴムタイヤ部の断面は回転体の車両模型に合わせて凹形状 (図2) となっている。車両模型の発射速度は、車輪の回転数により制御することができる。また車両模型は緊張した直径5mmのピアノ線により案内される。

2.2 実形状車両模型の発射方法

実形状車両模型を発射できる実験装置は国内外にいくつかあるが^{9)~12)}、それらは圧縮空気やゴムの牽引により車両模型を発射するもので、鉄道総研の現有の実験装置とは機構が大きく異なる。そこで本研究では、発射機構は回転車輪のままで実形状の車両模型が発射可能な方法を検討した。

実験の概要を図1 (b)、発射装置の回転輪と実形状車両模型の断面形状を図2 (b)、実形状車両・トンネル模型の概要を図3 (b) に示す。実形状車両模型の前半部分 (三次元部) はアルミニウム合金製で、その先頭部および断面形状は実車と相似な形状とする。ただし台車部は省略している。また車両の実形状模型の後半部分 (円筒部) はナイロン樹脂製で、円筒形状となっている。図2 (b) に示すように、車両の実形状模型の三次元部が発射装置の回転車輪に挟まれることにより、車両模型のピアノ線周りのロール方向のずれが修正され、ピアノ線周りの回転が抑えられる。次に車両模型の円筒部が発射装置の回転車輪に挟まれ、車両模型と回転輪が広い面積で接触することによって回転車輪と車両模型の間の滑りを抑えることができ、車両模型を高速で発射することが可能となる^{13), 14)}。実形状車両模型の発射状況を図4 に示す。車両模型を案内するピアノ線周りにほとんど回転することなく、車両模型が発射されている様子が見える。実形状車両模型の発射最高速度は約250km/hである (軸対称形状車両模型の場合の発射最高速度は約450km/hであるが、実形状模型は軸対称

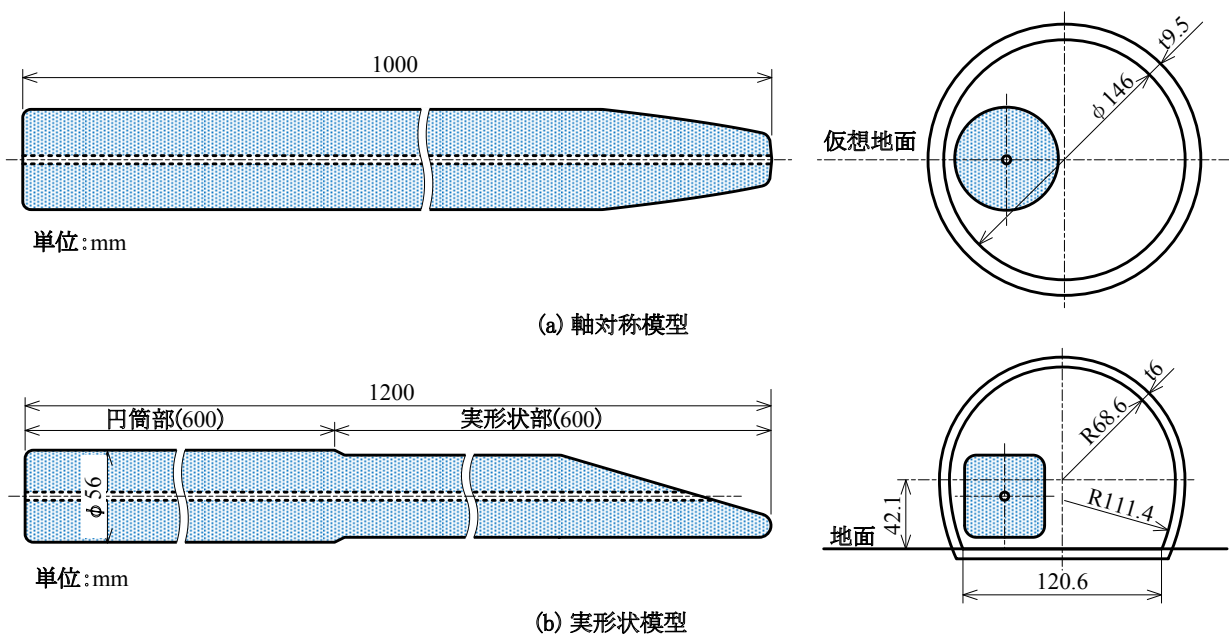


図3 車両・トンネル模型の概要

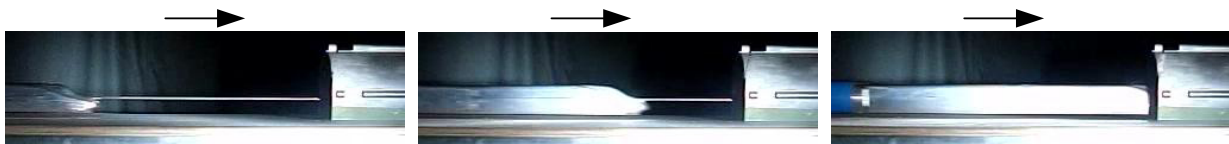


図4 実形状車両模型発射状況

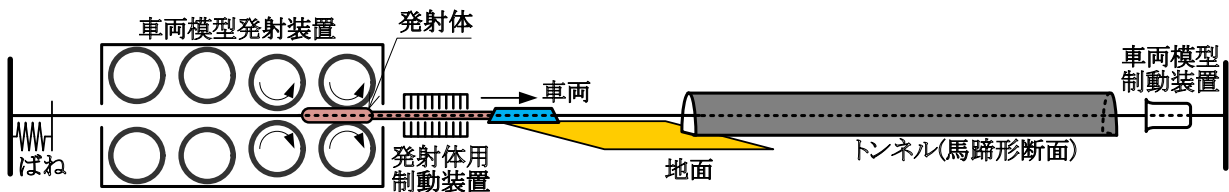


図5 押し出し方式による実形状車両模型発射実験の概要¹⁵⁾

模型よりも重いため遅くなる)。

なお、トンネル微気圧波は車両先頭部のトンネル突入により形成される圧縮波によって発生するため、その現象を模型実験で再現するには、本研究で用いた車両模型のように車両模型先頭部先端からある程度の長さの断面積一定部までを実車と相似にすれば十分である。しかしながら車両後尾部周りの流れに起因する空気力学的現象を模擬することは本模型実験方法では不可能なため、別の発射方法が必要となる。そこで鉄道総研では、押し出し方式による実形状車両模型発射実験も別途実施している(図5)。押し出し方式の詳細については文献¹⁵⁾を参照されたい。



(a) スノープラウあり



(b) スノープラウなし

図6 車両模型先頭部

2.3 実験方法

本研究では、車両として新幹線営業電車を想定する。先頭部長は9.1 m、車体幅および車体高さはそれぞれ3.4 m、3.5 mである。図6に先頭部形状(実形状車両模型の写真)を示す。車両先頭部下面にある鋭い端部が圧縮波の形成

に与える影響を調べるため、実車同様にスノープラウ(排雪器)が設置されているもの(図6(a))と、スノープラウを滑らかに切り落としたもの(図6(b))について実験

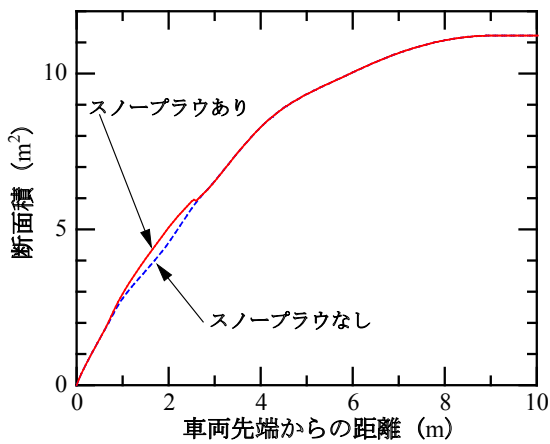


図7 車両先頭部断面積分布

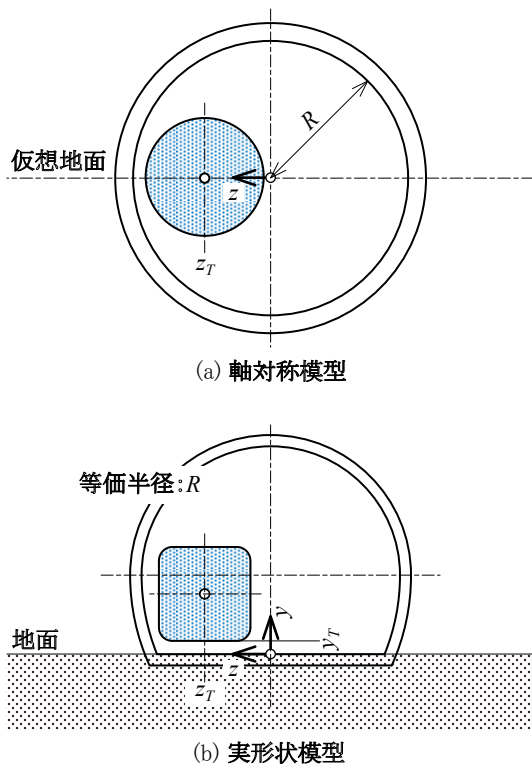


図8 トンネル断面内における車両走行位置の座標系

を実施した。図7に車両先頭部の断面積分布を示す。図7より、実車形状ではスノープラウの有無による断面積分布の違いはわずかなものであることがわかる。

本研究では、トンネルとして新幹線の標準的なスラブ軌道トンネル（断面積約 63.4 m²）を想定する。ここで、トンネル坑口には、車両のトンネル突入時の圧縮波の形成の段階で圧縮波の波面圧力勾配を低減するためのトンネル緩衝工³⁾は設置されていないものとする。本研究では、これら車両とトンネルを(1)実形状模型(縮尺 1/70)、(2)軸対称模型(縮尺 1/87)の二種類の方法で模型化した。ここで、軸対称車両模型は実車の実像と鏡像を合わせたものと断面積分布が相似となっている。こ

こで、軸対称模型では地面の効果を鏡像法¹⁶⁾で模擬し(図1(a))、実形状模型では坑口周りの地面を合板製の地面板で模擬している(図1(b))。

図8にトンネル断面内の車両位置の座標系を示す。ただし、 z_T ：車両の水平方向の偏心量、 y_T ：車両の垂直方向の偏心量(車両底面と地面の間隔)、 R ：トンネル等価半径(= $d/2$)、 d ：トンネル等価直径(鏡像を考慮し $d = 2\sqrt{2A_{tm}/\pi}$ 、ただし A_{tm} ：実像のみのトンネル断面積)である。軸対称模型を用いた実験においては、複線トンネルを走行する車両を車両模型の中心軸とトンネル模型の中心軸をずらすことにより模擬し^{7)、16)}、その量は実物の水平方向の偏心量と同等の $z_T/R = 0.34$ とした。また、実形状模型を用いた実験においては、車両底面と地面の間隔 y_T と水平方向の偏心量 z_T をそれぞれ、実物と同等の値である $y_T/R = 0.07$ 、 $z_T/R = 0.34$ とした。

本模型実験では、トンネル入口から $6.85d$ (軸対称模型の場合は 1 m 、実形状模型の場合は 1.24 m) 離れた点のトンネル壁面に設置した圧力変換器(Kulite XCS-190-5G)を用い、トンネル内の圧力を測定した。得られた圧力の時系列データは、次式を用いて無次元化した。

$$p^* = \frac{p}{p_c}, \quad p_c = \frac{1}{2}\rho U^2 \frac{1 - (1 - R_T)^2}{(1 - M)\{(1 - R_T)^2 + M\}} \quad (1)$$

$$t^* = \frac{t}{t_c}, \quad t_c = \frac{d}{U} \quad (2)$$

ただし、 p ：圧力(ゲージ圧)、 p^* ：無次元圧力、 p_c ：原の式^{17)、18)}による圧縮波の波面の圧力、 t ：時間、 t^* ：無次元時間、 t_c ：圧縮波の波面の圧力上昇に関する特性時間、 ρ ：静止空気密度、 U ：車両のトンネル突入速度、 M ：車両のトンネル突入マッハ数、 R_T ：車両の断面積一定部分とトンネルの断面積比(ブロックage比、= A_v/A_{tm})、 A_v ：車両断面積である。

3. 実験結果と考察

3.1 軸対称および実形状模型の実験結果の比較

模型実験により得られた圧縮波の無次元圧力 p^* および無次元圧力勾配 $\partial p^*/\partial t^*$ の波形例を図9に示す。図9より、軸対称模型では圧縮波の波面の圧力上昇量と圧力勾配の最大値にスノープラウの有無による差がほとんどないことがわかる。これは、軸対称模型ではスノープラウの有無を断面積の変化のみで表わしており、その違いが図7に示すようにわずかなものであるためと考えられる。また、車両先頭部からスノープラウを滑らかに切り落とした場合、実形状模型と軸対称模型による圧縮波の無次元圧力 p^* および無次元圧力勾配 $\partial p^*/\partial t^*$ の波形の違いはわずかであることがわかる。ここで、実形状模型と軸対称模型の圧縮波の波面の無次元圧力勾配最大値 $(\partial p^*/\partial t^*)_{\max}$ の差は4%程度である。

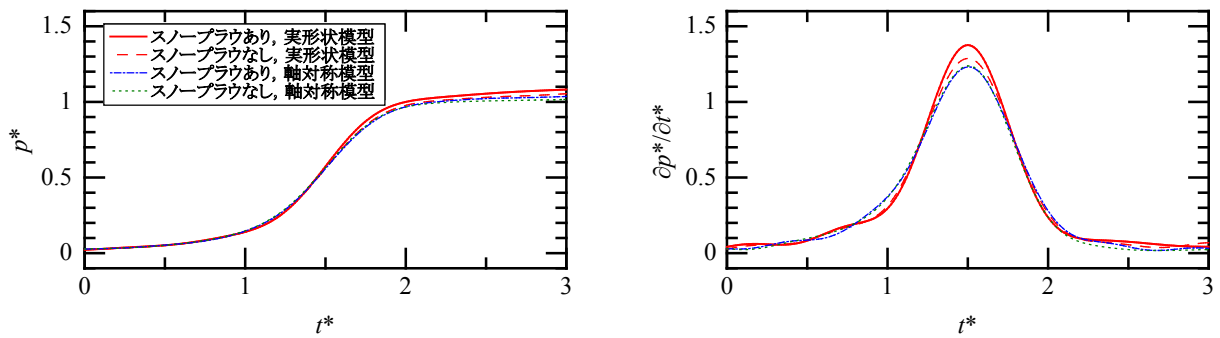


図9 軸対称模型と実形状模型で得られた圧縮波の圧力・圧力勾配波形の比較

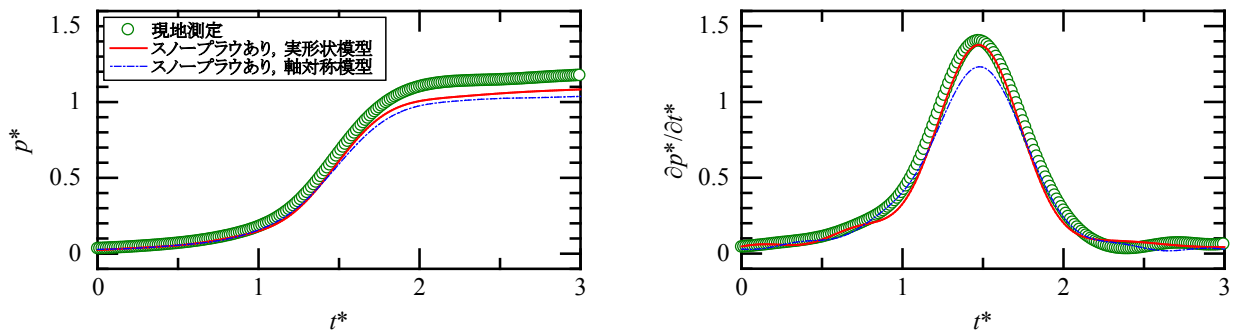


図10 模型実験と現地測定で得られた圧縮波の圧力・圧力勾配波形の比較

さらに、スノーブラウがある車両先頭部の場合、実形状模型と軸対称模型による圧縮波の無次元圧力 p^* および無次元圧力勾配 $\partial p^*/\partial t^*$ の波形を比較すると、無次元圧力 p^* および無次元圧力勾配 $\partial p^*/\partial t^*$ とも実形状模型のものの方が軸対称模型によるものよりも大きいことがわかる。ここで、実形状模型と軸対称模型の圧縮波の波面の無次元圧力勾配最大値 $(\partial p^*/\partial t^*)_{\max}$ の差は12%程度である。そして実形状模型による圧縮波の無次元圧力勾配 $\partial p^*/\partial t^*$ の波形を比較すると、車両先頭部がスノーブラウのある実車形状のものの方が実車形状からスノーブラウを滑らかに切り落としたものよりも大きいことがわかる。ここでスノーブラウの有無による圧縮波の波面の無次元圧力勾配最大値 $(\partial p^*/\partial t^*)_{\max}$ の差は7%程度である。これは、スノーブラウの鋭い端部において流れがはく離して車両の断面積が見かけ上増加し、それにより圧縮波の圧力上昇量が増加することによるものと考えられる。

以上の結果から、車体下部の機器類やスカート、スノーブラウなどの流れのはく離が生じるような部品がない場合は車両先頭部形状の三次元性が圧縮波の形成に与える影響は小さいが、流れのはく離が生じるような部品がある場合には車両先頭部形状の三次元性が圧縮波の形成に大きな影響を与えるものと考えられる。

3.2 模型実験結果と現地測定結果の比較

車両のトンネル突入時に形成される圧縮波の模型実験による評価の有用性を調べるため、模型実験結果と現地

測定結果の比較を行った。ここで、実際に走行している新幹線電車と同様、模型の車両先頭部はスノーブラウのある実車形状のもの(図6(a))である。図10に、模型実験(実形状および軸対称)および新幹線の坑口に緩衝工のない実トンネルでの現地測定¹⁹⁾で得られた圧縮波の無次元圧力および圧力勾配波形を示す。実形状模型実験および軸対称模型実験で得られた圧縮波の波面の圧力上昇量を比較すると、上述のように実形状模型実験によるものの方が大きくなっている。さらに実形状模型実験結果と現地測定結果を比較すると、圧力 p^* の上昇量は現地測定のものの方がさらに大きくなっていることがわかる。これは実形状車両模型が台車などを省略し車体のみを模型化しているのに対し、実際の車両には台車などがありその影響により車両断面積が全体にわたって見かけ上増加していることによるものと考えられる。しかしながら圧縮波の無次元圧力勾配 $\partial p^*/\partial t^*$ の波形をみると、軸対称模型のものより実形状模型で得られたものの方が現地測定結果により近いことがわかる。これは、軸対称模型と異なり、実形状模型により先頭部のスノーブラウ端部による流れのはく離の影響を模擬できていることによるものと考えられる。図10の場合、圧縮波の無次元圧力勾配最大値 $(\partial p^*/\partial t^*)_{\max}$ の差は、軸対称模型と現地測定で12%程度であるのに対し、実形状模型と現地測定で2%程度である。

以上のことから、車両のトンネル突入時に形成される圧縮波を模型実験により評価するとき、車両先頭部周り

特集：環境技術

で大きな流れのはく離が生じていないときには軸対称模型を用いた模型実験でも十分な精度を有しているが、スノープラウやスカートのように鋭い端部を持つ部品が車両先頭部に設置されておりそこで大きな流れのはく離が生じているような場合には、車両先頭部の三次元的な実際の形状を模擬した実形状模型を用いることにより模型実験による評価の精度向上を図れると考えられる。

4. まとめ

本研究では、車両模型の発射装置は回転輪方式のまま実形状の車両模型が発射可能な方法を開発した。その結果、最高速度約 250 km/h で、実形状車両模型を用いる実験が可能となった。

さらに、模型実験によって実車両・トンネルにおける圧縮波を評価するとき、車両先頭部周りで大きな流れのはく離が生じていないときには軸対称模型を用いた模型実験が十分な精度を有していること、一方、スノープラウやスカートのように鋭い端部を持つ部品により車両先頭部周りで大きな流れのはく離が生じているような場合には、実形状模型を用いることにより模型実験による評価の精度向上を図れることが確認された。

謝辞

本論文の現地測定データは、東日本旅客鉄道株式会社の提供によるものである。ここに記し感謝の意を表す。

文献

- 1) 山本彬也：列車とトンネルの空気力学，第 11 回鉄道技術研究所講演会講演前刷集，pp. 13-16, 1975
- 2) 山本彬也：トンネル出口からの微気圧波，日本物理学会春の分科会 応用数学，力学，流体物理予稿集，p. 137, 1977
- 3) 小沢智：トンネル出口微気圧波の研究，鉄道技術研究報告，No. 1121, 1979
- 4) 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，日本音響学会誌，Vol. 63, No. 9, pp. 543-548, 2007
- 5) Ozawa, S. and Maeda, T., "Model experiment on reduction of micro-pressure wave radiated from tunnel exit," *Proceedings of the International Symposium on Scale Modeling*, pp. 33-37, 1988.
- 6) 飯田雅宣，松村豪，福田傑，中谷浩二，前田達夫：トンネル微気圧波低減のための列車先頭部形状の最適化，日本機械学会論文集 B 編，Vol. 62, No. 596, pp. 1428-1435, 1996
- 7) Howe, M. S., Iida, M. and Fukuda, T., "Theoretical and experimental investigation of the compression wave generated by a train entering a tunnel with a flared portal," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 425, pp. 111-132, 2000.
- 8) Iida, M. and Howe, M. S., "Compression wave generated by a high-speed train entering a tunnel fitted with a hood with a long slit window," *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, Vol. 26, No. 4, pp. 227-247, 2007.
- 9) Bellenoue, M. and Kageyama, T., "Reduced scale simulation of the compression wave generated by the entry of a high-speed train into tunnel," *TRANSAERO - A European Initiative on Transient Aerodynamics for Railway System Optimisation, Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multi-disciplinary Design*, Vol. 79, pp. 206-216, 2002.
- 10) Costa, P. D. and Willaime, A., "Model rig measurements for SNCF new tunnel portal designs," *Proceedings of the 11th International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*, pp. 795-807, 2006.
- 11) 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," *Proceedings of the INTER-NOISE*, 2006.
- 12) Morita, K., Abe, Y. and Takano, Y., "Micro-pressure wave calculation using three dimensional compression fluid analysis," *Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems, Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design*, Vol. 118, pp. 405-210, 2012.
- 13) 斎藤英俊，福田傑：列車のトンネル突入時に形成される圧縮波に関する模型実験，第 16 回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集，No. 09-05, pp. 367-370, 2009
- 14) Fukuda, T., Saito, H., Miyachi, T., Kikuchi, K. and Iida, M. "Model experiments on the compression wave using an axisymmetric and three-dimensional train model," *Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems, Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design*, Vol. 118, pp. 397-404, 2012.
- 15) 斎藤英俊，福田傑：トンネル内圧力変動に関する三次元形状車両模型発射装置の開発，日本機械学会 2012 年度年次大会講演論文集，2012
- 16) 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（列車中心軸の偏心と地面の影響），日本機械学会論文集 B 編，Vol. 69, No. 683, pp. 111-116, 2003
- 17) 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
- 18) 宮地徳蔵，小澤智，新井隆景，“列車のトンネル突入により生じる圧縮波の波形予測に関する理論解析 —高ブロッケージ比問題への音響理論の適用—”，*ながれ*，Vol. 31, No. 1, pp. 45-59, 2012
- 19) 栗田健，水島文夫：新幹線高速試験電車 FASTECH360 における沿線環境対策，*JR East Technical Review*，No. 31, pp. 47-55, 2010