

特別研究費に係る論文・総説・速報

低周波音測定のための実形状列車模型射出実験装置の開発

増渕貴教^{*1}，土肥哲也^{*2}，小川隆申^{*3}

Development of an Experimental Apparatus for Measuring a Pressure Wave Generated by a Model Train of Actual Shape

Takanori MASUBUCHI^{*1}，Tetsuya DOI^{*2}，Takanobu OGAWA^{*3}

ABSTRACT: We developed an experimental apparatus for measuring a pressure wave generated by a train. A model train of an actual train shape is launched with compressed air. The air flow inside the apparatus is mathematically modeled, and this aerodynamic model provides the optimum configuration of the apparatus for a target launching speed. The apparatus was designed using this model to launch a model train at faster than 500 km/h. Several experimental results are presented. We measured a compression wave and an "entry wave" generated by a train moving into a tunnel. The experimental result of the compression wave agrees well with the field measurement data. The results also show the shape of a train and the position of a track to a tunnel have significant effect on the pressure waves. With the developed apparatus, a train and a tunnel with any shapes can be used. This enables accurate measurement of a pressure wave generated by a train.

Keywords: Model experiment, High-speed train, Pressure wave

(Received Sep 28, 2006)

1 序論

1960年代に時速210 kmの速度で開発された高速列車は、さらに高速化が進められており、日本の高速列車である新幹線は、最近では時速360 kmで営業運転する計画がある。また、中国のリニアモーターカーは時速430 kmで営業運転を始めており、日本のリニアモーターカーは時速500 kmの営業運転に向け実験を積み重ねている。このような著しい高速化により様々な空力的問題を引き起こすことが懸念される。その一つに低周波騒音問題がある。

列車がトンネルや建物などの地上構造物付近を通過すると、列車によって誘起された亜音速流れが構造物と干渉する。この干渉が圧力波を引き起こし、それは時に沿線環境に対して低周波問題となりうる。特に、列車がトンネルに突入する際、最も顕著な問題となる。列車によるトンネル内の空気の圧縮はトンネル内外の両方に圧力波を形成する。トンネル内では圧縮波が形成され、その圧縮波がトンネル出口に向かって伝播し、出口から出ると“微気圧波”と呼ばれるパルス状の圧力波となって放出される。微気圧波は60年代の新幹線開業当初からの問題であり、小沢^[1]は実験的、および理論的にこの問題を解明している。微気圧波は列車速度の三乗に比例するため、近年の更なる高速化に対する対策が必要となってきている。一方、トンネルの外では、圧力波は列車がトンネルに突入する際にトンネル入口から直接放出される。この圧力波は“突入波”と呼ばれ、近年の高速列

*1 工学研究科機械工学専攻博士前期課程
(dm063110@cc.seikei.ac.jp)

*2 (財)小林理学研究所研究員

*3 理工学部エレクトロメカニクス学科
助教授

車の高速化にともなって顕在化した^[2]。これらの圧力波の周波数は 10 Hz 以下であるのが一般的である。

列車によって引き起こされる圧力波の実験的研究では、トンネルや構造物を設置した軌道上に沿って列車模型を射出する装置が必要である。縮小した列車模型を使用したとしても、流れの相似則によって列車模型は実際の列車と同じマッハ数で走行しなければならない。それゆえ、そのような高速の列車模型を射出するための実験装置の開発は実験的研究において技術的な問題の一つであり、過去に様々な技術を用いて開発されている。斎藤ら^[3]、飯田ら^[4]は微気圧波を研究するためにダクト内に発射体を射出するため、回転円盤を用いた。発射体は 1/97 の縮尺で、時速 500 km で射出実験を行っている。他の射出方式では圧縮空気を用いるものがあるが、この方式は列車模型をより速く射出できると考えられる。高山ら^[5]は圧縮空気を利用し、1/300 の縮尺模型で時速 390 km を達成している。これら過去の研究においては、列車模型もしくは発射体は円錐や放物体のような幾何学的に単純化されているものがほとんどである。これは流れ場をよりよく理解するためであるが、一方で実験装置の制約のためでもある。

本研究では、実列車の縮尺模型を射出する実験装置を開発する。列車の三次元形状が圧力波に影響を与えることが明らかになっている。例えば、Bellenoue ら^[6]は列車がたとえ同じ断面積分布をしていても、列車形状によって圧力波のピーク値に影響を及ぼすことを報告している。このことから、本研究で開発する実験装置によって列車形状が圧力波発生に与える影響をより詳細に把握することができるかと期待できる。

列車模型の駆動には圧縮空気を用い、現時点の列車としての最高速度である時速 500 km を目標とする。圧縮ガスによって列車を効率的に加速さ

せるために、列車模型の加速装置内の流れをモデル化し、最適な列車模型射出装置を設計する。実験装置内の圧力時間履歴や列車模型変位を測定することにより、このモデルの妥当性を検証する。開発した装置を用い、列車がトンネル内に突入する際の圧縮波や突入波の実験結果についても示す。

2 実験装置

2.1 実験装置概要

図 1 に開発した実験装置を示す。装置は縮尺が 1/30 で、主に貯気槽、加速管、走行区間、そして停止管の 4 つの部分から構成されている。直径 0.13 m の加速管に接続されている貯気槽内に圧縮空気を貯め、列車模型を加速管内に設置したのち、貯気槽からの圧縮空気によって列車模型を押し出す。列車模型は金属製のレールで作られた軌道上の走行区間を走行した後、停止管に突入し、停止管内の空気を列車自身によって圧縮することによって徐々に減速し停止する。走行区間にトンネル模型などの模型構造物を設置することにより、列車まわりの流れと構造物との干渉による圧力波を計測することができる。

加速管、停止管ともに正方形の断面積となっており、列車模型も圧縮空気から推進力を得るために正方形の断面積となっているが、列車模型先頭部分は実列車の形状となっている。この部分は硬質発泡スチロールでできており、CAD データを用いコンピュータのモデリングマシンによって正確に実列車形状を再現することができる。

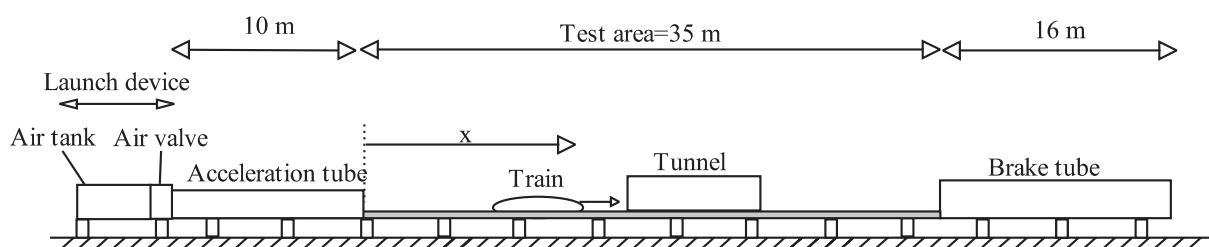


Fig. 1: The experimental apparatus

2.2 空気力学モデル

実験装置において、列車模型の速度に影響を及ぼすパラメータがいくつか存在する。貯気槽の圧力と容量、加速管の長さ、そして列車模型の質量である。これらのパラメータを決定する上で加速管内の空気の流量を知ることは重要であり、それにより射出性能を向上することができる。よって貯気槽から加速管に至る空気の流れをモデル化し、貯気槽に必要な圧力と容量、加速管の最適長さを決定する。

はじめに、列車模型の質量を決定する。列車模型は加速管から射出された後、軌道上に生じる摩擦力和空気抵抗によって減速しながら走行区間を走行する。列車模型が重くなればより大きな慣性が働き減速しにくくなる。一方で、列車が重くなると目標速度まで加速するために貯気槽に必要な圧力が大きくなる。よって、列車模型の走行区間における減速を運動方程式を解くことによって計算し、列車模型の最適な質量を見つける。図2は走行区間における初速度と終端速度の比を、質量0.01 kgから5 kgまでの列車模型について求めた結果である。この比率は走行区間内での列車の減速率を示している。列車模型の空気抵抗係数 $C_D = 0.3$ 、また列車模型と軌道間の摩擦係数 $\mu = 0.4$ は実験的に求めた。列車質量が増えるにつれて、列車速度は列車の慣性が大きくなるために減速しにくくなっていることがわかる。この計算から列車模型

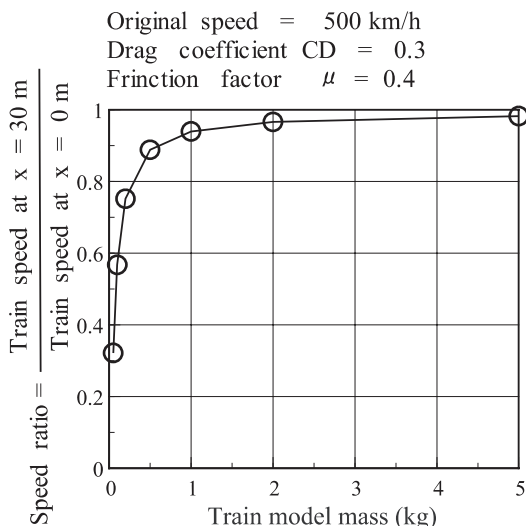


Fig. 2: The calculated reduction of the train speed in test section for model trains with different mass

は列車質量が1 kg以上になると30 mの区間では減速はほとんど見られない。それゆえ、今回の研究における列車模型の質量は1 kgとした。

次に、貯気槽から加速管に至るまでの流れ場を図3に示す。この流れ場を4つの領域に分ける。領域1は貯気槽内を示し、領域4は加速管内における流れを示す。その2つの領域の間には、貯気槽からの空気を開放するための弁があり、領域2は貯気槽と弁の間の流れを示す。領域3は弁の隣のチャンバーの流れで、このチャンバーは弁を開放するためのものである。弁を開放すると、圧縮

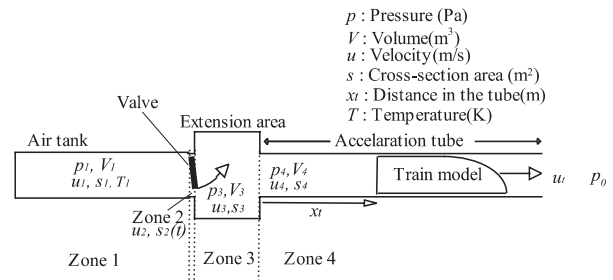


Fig. 3: The aerodynamic model of the flow from the air tank to the acceleration tube

空気が貯気槽から弁を通して流れる。はじめの段階では、弁において choked flow となり、貯気槽内の質量流量は次式で求められる。

$$\dot{m} = \frac{dm}{dt} = \frac{s_2(t)p_1}{\sqrt{T_1}} \sqrt{\frac{\lambda}{R}} \left(\frac{\lambda+1}{2}\right)^{-\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} \quad (1)$$

貯気槽内の圧力は圧縮空気が貯気槽から流出するにつれて下がり、最終的に弁での空気の流速は亜音速になる。すると、質量流量は流れの断面積変化による圧力損失に依存する。この圧力損失は以下のように求められる。

$$p_1 - p_3 = (\xi_1 + \xi_2) \frac{\rho}{2} u_2^2 \quad (2)$$

ここで ξ_1 と ξ_2 は圧力損失係数で ρ は空気の密度であり、添え字は領域の番号を示している。領域2における空気の流速は、

$$u_2 = \sqrt{\frac{p_1 - p_3}{(\xi_1 + \xi_2) \frac{\rho}{2}}} \quad (3)$$

となるため、微小時間 dt に流れる流量 Q は

$$Q = u_2 s_2(t) dt \quad (4)$$

となる．弁を完全に開放するためかかる時間 T_v は 0.06 秒であり，領域 2 の断面積 $s_2(t)$ は開放時間に比例すると仮定して，以下のように求める．

$$s_2(t) = \frac{t}{T_v} s_1 \quad (0 < t < T_v) \quad (5)$$

$$s_2(t) = s_1 \quad (T_v \leq t) \quad (6)$$

領域 3 と 4 ではタンクから流れ込んだ流量により圧力が増加する．弁の開放から列車模型を押し出すためにかかる時間は熱移動に要する時間より短い．それゆえ，断熱条件を適用することができ，時間 dt 経過後の領域 3 の圧力が得られる．その式は

$$p_3(t + dt) = p_3(t) \frac{(V_3 + Q - u_4 s_4 dt)^\gamma}{V_3^\gamma} \quad (7)$$

である．領域 1 の圧力は圧縮空気の開放によって減少する．

列車模型の後部における圧力を求めるために，管内摩擦による圧力損失や領域 3 と 4 の間の断面積変化による圧力損失を考える．

$$p_t = p_3 - (\gamma_3 + \lambda \frac{x_t}{d}) \frac{1}{2} \rho u_4^2 \quad (8)$$

ここで d は加速管の直径で， λ はムーディ線図から得られる管摩擦係数である．この圧力 p_t は列車模型を加速し，それと同時に列車には空気抵抗や列車と軌道との摩擦も作用する．よって列車模型の運動方程式は

$$m \frac{d^2 x_t}{dt^2} = (P_t - P_0) S_4 - C_D \frac{1}{2} \rho \left(\frac{dx_t}{dt} \right)^2 S_4 - \mu mg \quad (9)$$

となる．ここで x_t は列車模型の変位である．この式から列車模型の変位と速度が求まる．

列車模型の目標速度の達成に必要な貯気槽圧力と貯気槽容量を計算するため，前記の式を数值的に解く．図 4 は列車質量 1 kg のときの計算結果で，貯気槽圧力が 1 atm から 10 atm のときの貯気槽容量に対する射出速度を示している．貯気槽容量が大きくなるとともに速度は速くなる．貯気槽容量の増加による射出速度の向上は，低い圧力のとき緩やかになっていることがわかる．本実験で使用する開放弁は 10 atm の貯気槽圧力で設計されており，この貯気槽圧力に関して図 4 を見ると，時速 500 km の目標速度の達成に必要な貯気槽容量は 0.05 m^3 (50L) である．しかし，将来のスピードアップの可能性を考慮し， 0.1 m^3 (100 L) の貯気槽容量で装置を製作した．

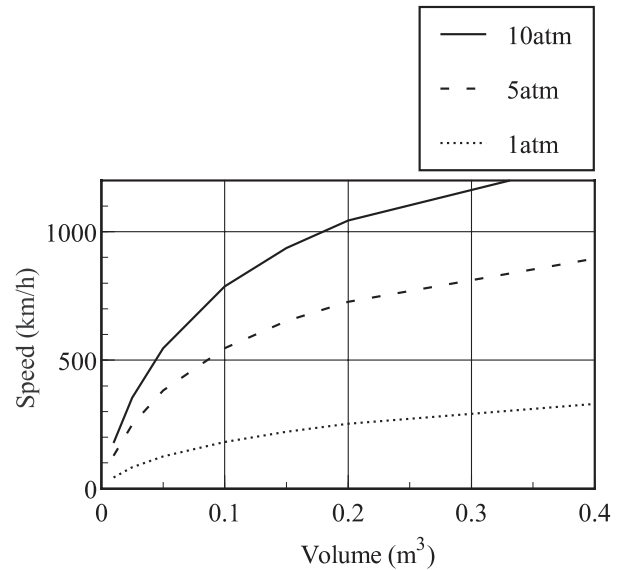


Fig. 4: Ejection speed of the model train against the volume of the tank

3 実験結果

3.1 空気力学モデルの検証

はじめに，加速管内の圧力と加速管出口における列車模型の速度を計測し，空気力学モデルの検証を行う．図 5 は計測器の位置を示している．加速管内には，圧力計 (SSK P210-10) をチャンバーの近くに設置した．加速管出口には列車模型に取り付けた磁石を関知するためのコイルを設置し，列車が出口を通過する速度を計測した．

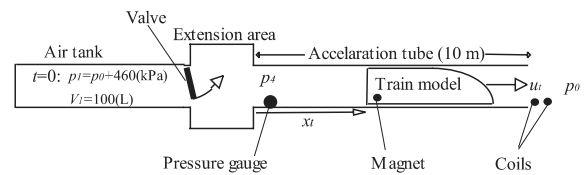


Fig. 5: Experimental setup to measure the pressure in the acceleration tube and the train velocity

図 6(a) は質量 0.93 kg の列車模型が貯気槽圧力 4.6 atm で射出されたときの加速管内の圧力時間変化を示している．図 6(a) と図 6(b) を見ると， $t = 0$ で弁が開放した後，加速管内の圧力が増加し列車が加速し始めていることがわかる．

列車が移動するにつれて，列車後部の空気の体積が増加し，それと同時に加速管内に空気が流出することによって貯気槽内の圧力が減少する．そ

して約 0.025 秒後に貯気槽は圧縮空気を失い，加速管内の圧力は減少しはじめる。

列車模型の速度と変位を図 6(b) と図 6(c) に示す。空気力学モデルによる計算結果では，列車模型が加速管内を約 8 m 進んだときに時速 536 km まで加速するということが示されている。そして，列車後部の圧力が大気圧になった後で列車は減速する。よって，今回開発した実験装置では加速管の最適長さは 8 m であることがわかる。

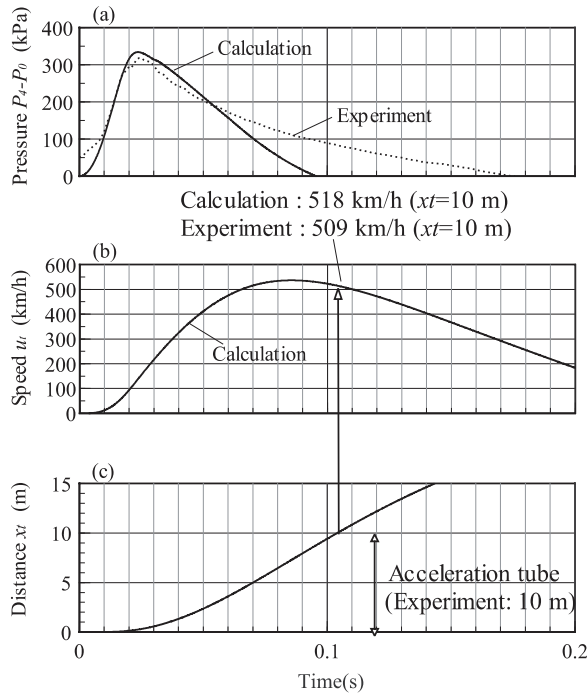


Fig. 6: (a) Pressure history in the acceleration tube (b) velocity of the model train (c) displacement of the model train

長さ 10 m の加速管を使用したとき，列車の射出速度は時速 518 km の予測値に近い時速 509 km を計測した。空気力学モデルによる計算結果は，列車速度も圧力波形も実験結果とほぼ一致した。図 6(a) を見ると， $t = 0.06$ 秒後に圧力波形に不一致が見られる。この実験では長さ 10 m の加速管を使い，また管内の圧力は列車模型が管から出た後は大気圧になる。しかしながら，空気力学モデルでは加速管は無限に長く，また加速管内の圧力も列車模型が停止するまで減少し続ける。これが $t = 0.06$ 秒後に空気力学モデルによる圧力の計算値が実験値より低くなった原因である。しかし，この不一致は列車模型が加速管から出た後に生じているので，与えられた加速管の長さに対す

る最大速度に影響を与えるわけではない。そのため，製作した実験装置は空気力学モデルによる設計通りの性能が得られている。モデルによる推定では，列車模型の最大速度は 10 atm の貯気槽圧力で時速 780 km を出すことが可能である。また，貯気槽圧力を調節することにより，列車模型を任意の速度で射出できる。

3.2 列車突入によるトンネル内圧縮波

次に，列車模型がトンネル内に突入したときの圧縮波について検証する。流れ場は Shimbo ら [7] による実測と同じで，図 7 に測定状況を示した。トンネルに新幹線が時速 270 km で突入する際のトンネル内圧力変動を，トンネルから 30 m の地点で測定する。列車模型とトンネルの断面積の比率は 0.18 である。

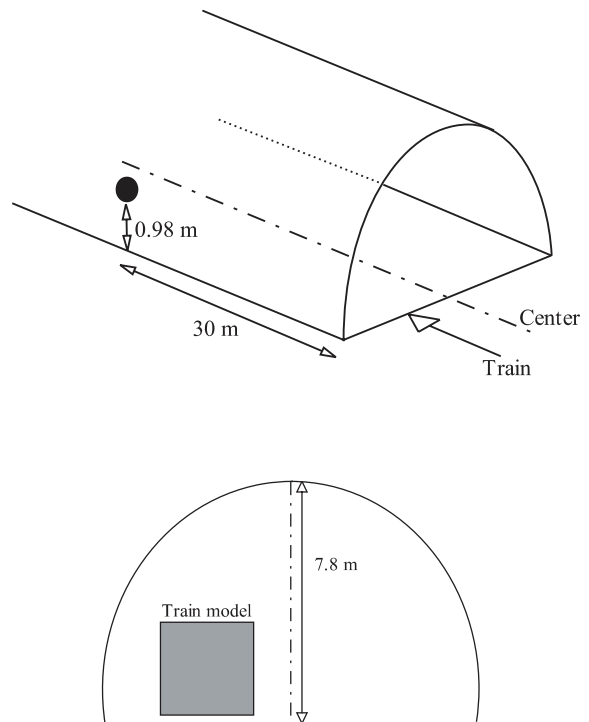


Fig. 7: The experimental configuration for a compression wave in the tunnel

図8はトンネル入口から30 mの点で計測した圧力波形を示している。Shimbo らにならって以下のように定義される無次元時間を用いる。

$$\tau = \frac{t}{L_{\text{nose}}/u_t} \quad (10)$$

ここで L_{nose} は列車先頭部の長さである。

圧力は列車先頭がトンネル入口に到達する $t=0$ から上がり始め、 $t=0$ から $t=2$ までの圧力波形は列車の突入による圧縮波の波面に相当する。 $t=5$ でのピークは列車先頭部の正圧によるものである。そして、列車の肩部が計測点を通過する際には圧力が急激に低下する。この圧力変動は列車胴体部分での負圧領域を観測した結果である。この装置を用いて観測された圧力変動は実測データとほぼ一致していることがわかる。しかしながら $t=6$ 以降には不一致が生じている。この不一致は列車の肩部分における剥離領域で生じたものである。実測と模型実験とではレイノルズ効果によって剥離領域の大きさが異なっているはずで、これが不一致の原因となっている。ただし、このことは圧縮波の波形にはほとんど影響がない。

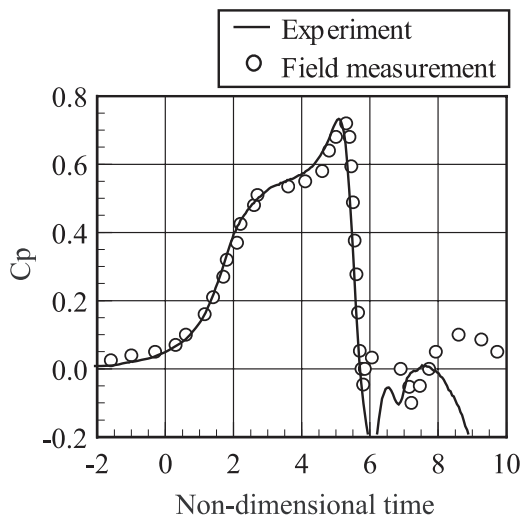


Fig. 8: Pressure history in the tunnel at 30m from the portal

3.3 突入波

次に、列車形状が突入波に与える影響を調べる。この実験では2種類の列車模型を使用する。一つは新幹線の縮尺模型で、もうひとつは図9に示されている放物形模型である。どちらの列車模型も同じ断面積分布を持つ。図10は圧力時間履歴の測定点を示している。圧力波形はマイクロフォンで水平面上の56点で計測した。

図11は $x=0$ m, $y=25$ m の点で計測された圧力波形である。 $t=0$ のとき列車はトンネル入口に到達する。入口波は $t=0.1$ 秒における急な圧力低下として計測されている。突入波の主な周波数は20 Hzより低く、窓や窓枠のがたつきを引き起こす要因となる。圧力ピーク値 ΔP は実列車形状が放物形よりも約20%ほど小さくなった。この結果により列車細部形状が圧力波生成に影響を及ぼす可能性があるということがわかる。よって、正確な形状の列車模型を使用することは圧力波を評価することが大切であるが、とりわけ列車形状の設計においては重要である。

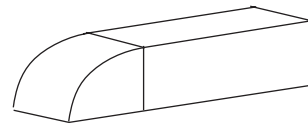


Fig. 9: The model train with parabolic shape

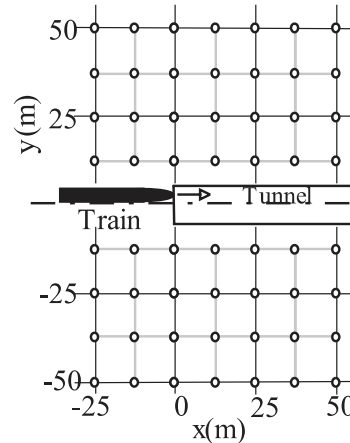


Fig. 10: The experimental configuration for an entry wave

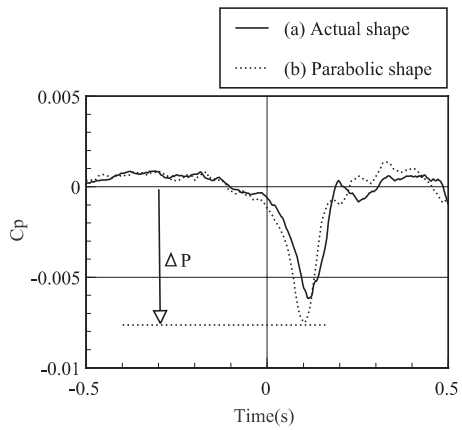


Fig. 11: The time histories of the entry wave

またトンネルに対する列車の走行位置が突入波に与える影響も調べた。図 12 と図 13 は列車がトンネルに対して左側走行したときと中央走行したときの突入波のピーク値 ΔP の分布を示しており、図 12 は左側走行、図 13 は中央走行のときの分布である。列車が左側走行したときはトンネルの左側に強い圧力変動が生じる。一方で、中央走行した場合には、ピーク値の分布はほとんど左右同じとなり、最大値は左側走行したときの約半分ほどである。これもまた流れ場の幾何形状が圧力波に与える影響を示している。

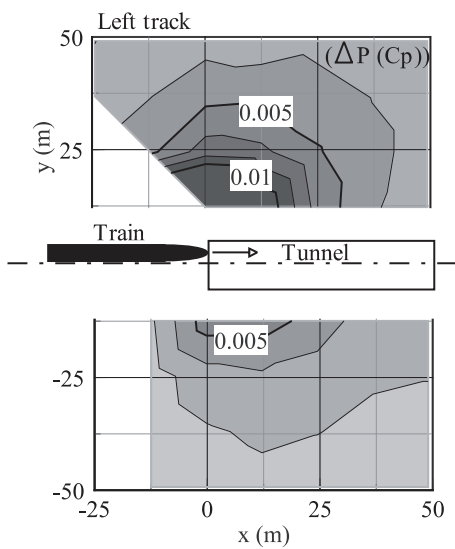


Fig. 12: Distributions of the peak values of the entry wave generated by a train running on the left track

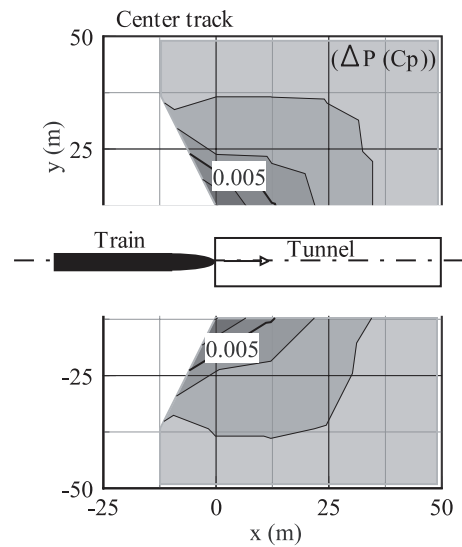


Fig. 13: Distributions of the peak values of the entry wave generated by a train running on the center track

4 結論

列車走行に伴う圧力波の実験的研究をおこなうため、圧縮空気による列車模型射出実験装置を開発した。列車模型は実形状列車の縮尺模型で、時速 500 km 以上での射出が可能である。装置の縮尺は 1/30 で、列車模型射出実験装置としては最大のものとなる。

列車模型を効率よく目標速度まで加速するため、実験装置内の圧縮空気の流れをモデル化し、最適な加速管長さ、貯気槽の圧力と体積を求めた。装置内の列車速度や圧力波形を計測したところ空気力学モデルで予測した結果と一致し、製作した実験装置がモデルによる設計通りの性能が得られていることが確認できた。

本実験装置を用い、列車トンネル突入によって発生するトンネル内圧縮波を計測したところ、圧縮波だけでなく列車先頭部や肩部によって生じる圧力変動も観測でき、実測値と一致する結果が得られた。また、異なる形状の模型列車をトンネルに突入させ、突入波がどのように変化するかを調べた。その結果、列車の断面積分布が同じであっても列車形状が異なれば突入波のピーク値に影響し、またトンネルへの列車の走行位置によって突入波の強さと指向性に影響を与えるということが観測できた。このように、圧力波には列車の詳細な形状が大きく影響するため、特に列車先頭形状の設計では忠実に実車形状を再現した実験を行うことが重要である。本研究で開発した実験装置はこのような実験を可能にし、圧力波対策のための列車形状設計のみならずトンネルなど軌道構造物の設計にも非常に有効な手段となる。

参考文献

- [1] 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).
- [2] 田中靖幸, 飯田雅宣, 福田傑, 菊池勝浩, “列車のトンネル突入時に突入側坑口から放射される圧力波の低減対策に関する模型実験”, 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集, pp.807-810, (2001).
- [3] 斎藤実俊, 飯田雅宣, 梶山博司, “大深度地下トンネル内圧力変動シミュレーションの開発と検証”, 鉄道総研報告, 20 巻 1 号, pp.29-34, (2006).
- [4] 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), 62 巻 596 号, pp.1428-1435, (1996).
- [5] 佐宗章弘, 小野寺収, 高山和喜, 金子良一, 松井良博, “トンネル微気圧波”, 静粛工学, pp.180-190, (1995).
- [6] M.Bellenoue, V.Moriniere and T.Kageyama, “Experimental 3-D Simulation of the Compression Wave, due to Train-Tunnel Entry”, *Journal of Fluids and Structures*, Vol.16, No.5, pp.581-595, (2002).
- [7] Shimbo, Y.and Hosaka, S., “Steady and Unsteady Pressure Measurement on High Speed Train”, *International Conference on Speed Up Technology for Railway and Maglev Vehicles*, Nov., (1993).
- [8] 田中正一, 後藤賢光, 瀬林伝, “新幹線のトンネル突入により発生する低周波音の測定例”, 日本騒音制御工学会講演論文集, pp.45-48, (1995).
- [9] 土肥哲也, 上村聡史, 小川隆申, “高速列車走行時の低周波騒音に関する実験的研究 -列車高速射出実験装置の開発-", 成蹊大学工学研究報告, 40 巻 2 号, pp.1-7, (2003).