

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—

土肥哲也*¹, 上村聡史*², 小川隆申*³

Experimental study on the pressure wave caused by a high speed train
—Development of a train projection experimental device—

Tetsuya DOI*¹, Satoshi KAMIMURA*², Takanobu OGAWA*³

ABSTRACT: A high-speed train generates a pressure wave which may cause environmental problems at the tunnel portal and the railside such as window vibration. Thus, it is important to investigate the phenomenon and to develop countermeasures. In this paper, a train projection experimental device is developed to investigate the pressure wave generation. The scale ratio is 1/30 and a train model is projected at 300km/h (Mach number=0.25). The experimental result is validated with the field measurement data and the comparison shows good agreement with each other. The effect of a soundproof wall and the train shape on the pressure wave is also investigated. The results shows the experimental device is effective for development of countermeasures in which the precise geometry should be taken into account.

KEYWORDS: Low-frequency noise, High-speed train, Experiment

(Received Aug 6, 2003)

1 序論

近年、更なる移動時間の短縮、航空機との競争などの理由から、列車の速度向上が世界的に進められている。日本の新幹線は開通当初は時速210kmであったのが、現在では時速300kmに近い速度で運転が行われている。また、現在開発中のリニアモーターカーに至っては時速500kmでの営業運転を目標としている。このような速度で列車が人や民家のすぐ脇を走行すると、列車が誘起する空気の流れによって様々な空気学的問題が生じる。中でも、低周波騒音問題は列車高速化を図る上で大きな課題となっている。

その代表例がトンネル出口微気圧波と呼ばれる現象で、次のようなメカニズムで発生する。まず、新幹線等の高速列車がトンネルに突入するとトンネル内で圧力が上昇し、圧縮波が生成される。この圧縮波がトンネル内を伝播し反対側坑口に達すると、微気圧波^[1]と呼ばれる発破

音を伴ったパルス状の圧力波となってトンネル坑口から周囲に放射される。この圧力波は、騒音として人間に知覚されたり、沿線民家の窓ガラスを揺らすなどの社会問題を引き起こす可能性がある。また最近になって、トンネル出口だけでなく入口周辺にも入口波と呼ばれる圧力波が発生する事や、オーバブリッジなどの橋状構造物を通過した場合にも同様の圧力波が観測されることが明らかになっている。

列車がトンネルなどの構造物を通過する場合以外にも、単に列車が走行するだけで沿線民家に空気学的な振動が生じる可能性もある。これは、列車が走行することによって列車先頭部には高圧部、列車先頭部と胴体部分とのつなぎ目には低圧部といった圧力分布、すなわち近傍圧力場が形成され、これが列車と同じ速度で移動するため、沿線付近では圧力時間変動として観測されるためである。

これらの圧力波や近傍圧力場を低減するため、これまで主に実測^[1]、模型実験^[2]、および、数値シミュレーション^[3]が行われてきた。実測による方法は計測結果の信頼性が最も高いが、計測回数や条件、測定位置が限られ、また、新しい騒音低減手法の効果を確認するには実物大

*1 (財) 小林理学研究所研究員

*2 機械工学専攻博士前期課程

*3 機械工学科助教授 (ogawa@me.seikei.ac.jp)

Assoc. Professor, Dept. of Mechanical Engineering

の装置が必要となるなどの制約がある。一方、数値シミュレーションは任意の条件を設定でき、全時空間の物理データを知ることができるが、新しい騒音低減手法を試す場合などは必ず実験や実測による検証が必要となるのが現状である。模型実験はその両者の間を埋める役割を果たす。ところが、従来のほとんどの模型実験^{[2]、[4]}では、実験装置の構造上の制約から列車やトンネルなどを軸対称形状として簡略化しており、流れの三次元性が現象に影響を与えることが明らかになっている^[3]にもかかわらず実際の形状を考慮できる実験装置は過去に例がなかった。

そこで本研究では、構造を工夫することにより実際の形状を再現できる実験装置を開発し、これにより高速列車走行時に発生する様々な低周波騒音現象について調べると共にその低減方法について検討する。

2 実験装置

流れに関連する実験は通常、風洞実験装置が用いられる。しかし、列車がトンネルなどに突入するような状況を再現する場合、物体壁面の位置が時々刻々と変化するため、通常の風洞実験ではこの流れ場を再現することはできない。そのため、列車に見立てた模型をトンネルに見立てたダクトなどに射出する実験装置が必要となる。

一般に流れ現象を実験で再現するには、模型実験と実際の現象の間で流れが互いに相似となることが必要となる。ここで問題としている現象では流体の粘性と圧縮性について考慮しなければならないが、模型実験において粘性と圧縮性の両方について実際の現象と相似にすることは不可能である。本研究では圧力波の再現に着目しているため、流れの圧縮性すなわち列車走行速度のマッハ数を実際の現象と一致させる。すると、実際の現象と同じ空気を媒質とする場合、列車模型は実際の列車速度と同じ速度で射出させなければならない。

以上のことから本研究で開発する実験装置には、実際と同じ形状の列車模型を実際の列車と同じ速度で射出することができる装置が求められる。従来の実験装置では列車模型を高速、かつ、安定に走行させるために軸対称形状としているものと思われるが、本実験装置では射出部分を実際の列車形状に近い矩形とし、さらに列車模型走行部分に工夫を施すことによって実際の列車形状で高速に射出することを可能にした。

開発した実験装置の全体図を図1に示す。実験装置の縮尺は1/30で、これまでに開発された射出実験装置の中でもかなり大きなものである。実験装置は、列車模型を圧縮空気によって加速させるための加速部、発生する圧力波を計測する計測区間、列車模型が破損しないよう

徐々に停止させる停止部の3つの区間からなる。

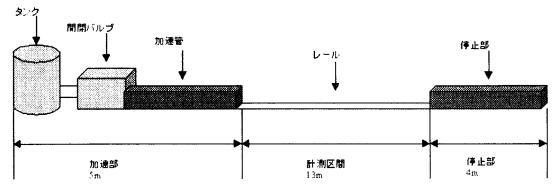


図1 実験装置全体図

列車を加速させる加速部は、圧縮空気を貯めておくタンク、開閉バルブ（図2）、加速管から構成されている。タンクに貯められた圧縮空気を開閉バルブにより加速管内に解放し、それにより加速管内に設置した列車模型を加速させる。圧縮空気の力を効率よく列車模型に伝えるため、加速管の内径断面積と列車模型の断面積は図3に示すようにほぼ同じになるようにした。開閉バルブは瞬時に圧縮空気を解放する必要があるために、空気圧を用いて直径5cmのタンクの出口を金属板で塞いでおき、電気信号で開くことができるバルブを製作した。

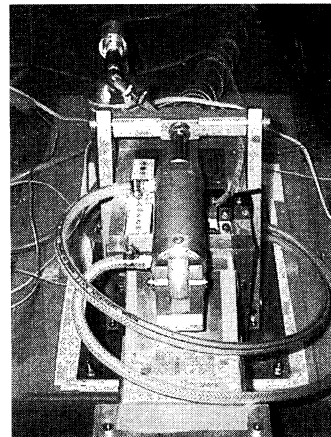


図2 開閉バルブ

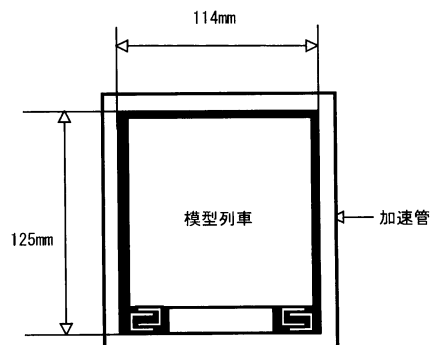


図3 加速管断面図

加速管に続いて長さ 13m のデータ計測区間があり、ここに設置したトンネルや緩衝工などを列車模型が通過する際に発生する圧力波をマイクロフォンで観測する。データの計測には低周波マイクロフォン(RION NA-17)を使用した。この計測区間では列車模型を安定に走行させる必要があるため、図 3 のようにコの字型の金具を地面と模型の両方に取り付け、それらをかみ合わせることで列車模型を高速でも安定に走行させることができたようにした。

列車模型は最終的に模型停止部で受け止められる。時速 300km で射出される列車模型を破損しないように安全に受け止めるため、停止管の内径断面積と列車の断面積との比率を調節することにより、空気を圧縮する力を利用して長さ 4 m の区間で列車模型を停止できるようにした。

前述の通り、列車模型は実際と同じ形状を用いる。図 4 に模型形状の一例を示す。列車形状は実際の列車形状 CAD データから三次元モデリングマシンを利用して形成しているため、形状再現性は非常に高いものとなっている。

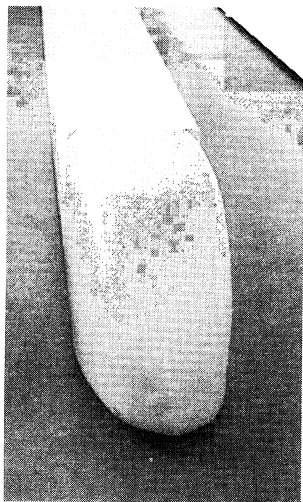


図 4 実際の列車形状を縮小した列車模型の一例

列車の走行速度はタンク内の圧縮空気の圧力により変化する。製作した実験装置において、圧力と列車速度の関係を調べた結果を図 5 に示す。図から明らかなように、タンクに 5 気圧加圧して模型を射出した時、列車速度が 300km/h に達しており、実際の列車と同じ速度で走行できることが確認できた。

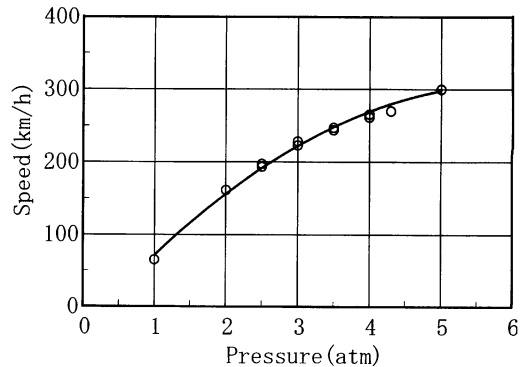


図 5 圧力と列車速度の関係

3 実験結果

3.1 列車近傍圧力場

まず、実際の列車まわりの流れ場が本実験装置によって再現できているかを、列車まわりの近傍圧力場を測定することによって検証を行った。列車近傍圧力場は図 6 に示すように、沿線近傍の一点で圧力の時間変化を測定することによって計測することができる。

図 7 に測定した結果を示す。時刻 0 は観測点を列車先頭部が通過した時刻を示している。図から、よどみ点により圧力が高くなっている列車先頭部が観測点を通過する $t=0$ 付近で圧力が上昇し、その後、列車先頭と胴体部分の接続部が通過する際、圧力が下がって負圧となっていることがわかる。このように、観測点では列車先頭部が通過する 0.1 秒足らずの間に正圧から負圧へ圧力が変動し、これが窓枠などを揺らす原因となる。

また、図 7 には実測で測定した結果^[6] もプロットした。実験結果は実測結果と非常によく一致しており、本実験装置が実際の現象を再現できていることが確認できた。

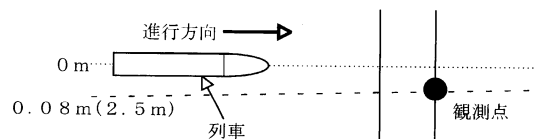


図 6 列車まわりの圧力場に関する実験の観測点配置

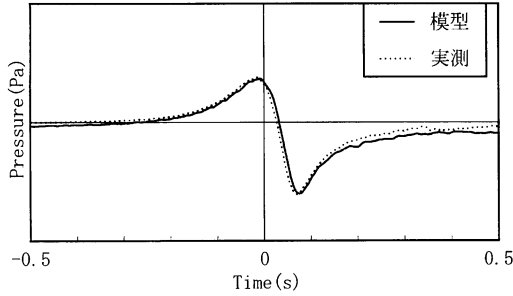


図7 列車近傍圧力場の測定結果(実験と実測との比較)

3.2 トンネル突入時に生じる圧力波

次に、列車がトンネルに突入する状況を再現する実験を行い、発生する圧力波を測定した。列車と観測点との位置関係を図8に示す。トンネル長さは2m、すなわち実寸で60m相当とし、トンネル入口部分には実際のトンネルと同様、緩衝工と呼ばれる微気圧波低減用のフードも模擬した。測定点は微気圧波を観測するために出口側の一つと、突入波を観測するために入口側で列車進行方向に対して垂直方向に離れた場所の一つ設けた。

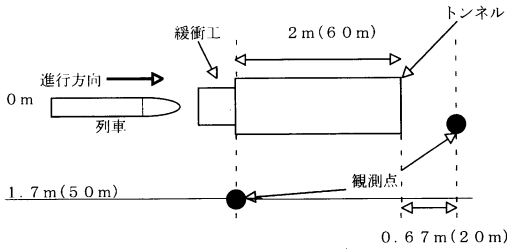


図8 圧力波に関する実験の観測点配置

列車がトンネルに突入した際に、トンネル入口付近で観測した圧力波の圧力波形を図9に、トンネル出口で観測したトンネル微気圧波の圧力波形を図10に示す。時刻0は、列車先端がトンネル坑口に到達した時刻を表す。

トンネル入口において、図9に示すようなマイナスのパルスが観測されている。このパルス波が列車トンネル突入時にトンネル入口から外に向けて伝播する突入波で、先端突入時に負の、後端突入時に正のパルス波が発生することが知られている。本実験でもこの現象を再現できていることが確認できた。一方、トンネル出口では図10のように正のパルス波、すなわち微気圧波が観測されている。以上のことから、列車トンネル突入時に発生する諸現象は本実験装置で再現できることが明らかになった。

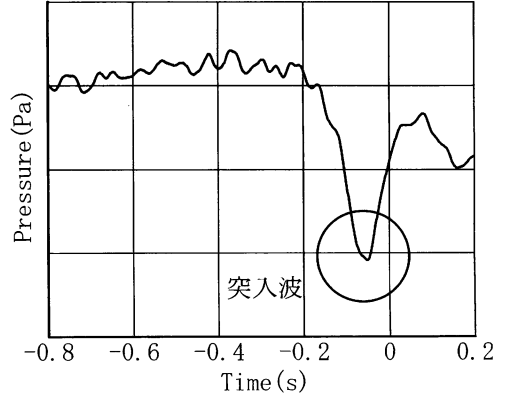


図9 突入波圧力波形

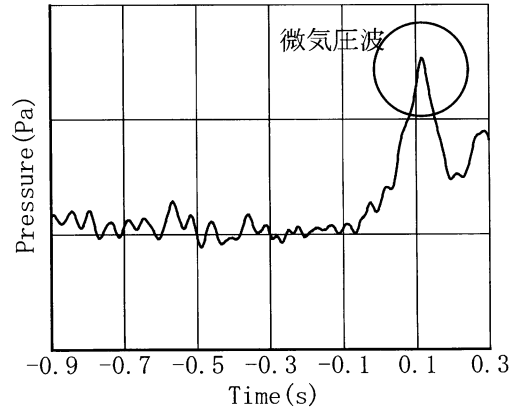


図10 トンネル出口微気圧波圧力波形

3.3 オーバーブリッジ通過時に生じる圧力波

全長が30m相当の非常に短いトンネルを列車が通過するときに発生する圧力波を観測する。このトンネルはオーバーブリッジと呼ばれる沿線を跨ぐ橋に見立てたものである。図11に構造物形状と測定点の位置を示す。圧力の観測点は構造物中心から列車進行方向に垂直な方向に位置する。

列車通過時に観測された圧力波形を図12に示す。前節の結果と異なり、パルス波が複数回観測されている様子がわかる。これは、図13に示すように、まず、トンネル内に発生した圧縮波が出口側の坑口で正圧のパルス波を放射して反射し、今度は膨張波となって入口側の坑口に向かって伝播する。そして、膨張波が入口側の坑口に達すると、マイナスのパルスを放射して反射する。この一連の現象が繰り返されるため、図12のように複数のパルス波が観測されることになる。

オーバーブリッジ通過時にこの現象が発生することは数値シミュレーションでも確認されており⁶⁾、今後、数

値解析結果との定量的な比較を行う予定である。

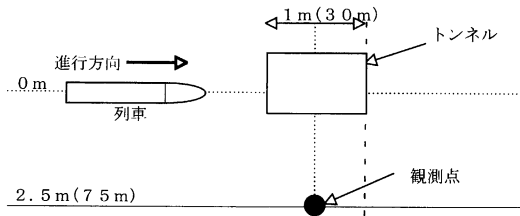


図11 短いトンネルで発生する圧力波に関する実験の観測点位置

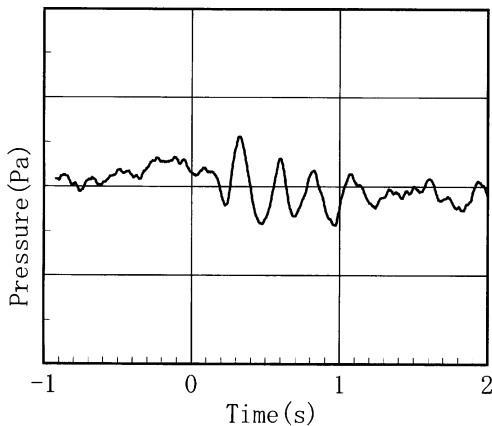


図12 観測された圧力波形

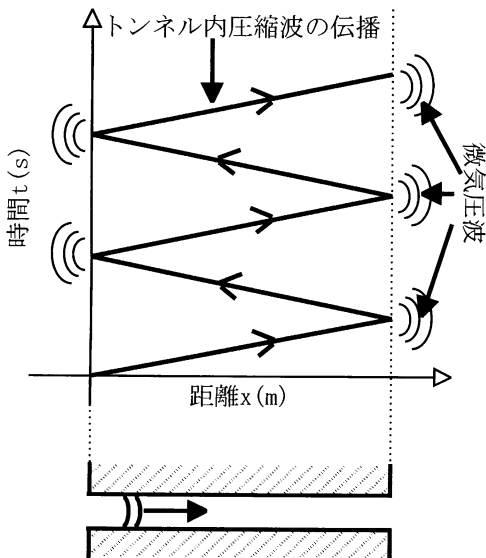


図13 トンネル内での圧力波のX-T ダイアグラム

3.4 入口遮蔽壁による圧力波低減効果

前節までの結果から本実験装置で様々な圧力波発生現象を再現できていることが確認できたので、次に圧力波を低減するための対策方法について検討する。対策方法の一つとして、緩衝工の先端に図14に示すような三角形の遮蔽壁を設置した場合について実験を行い、その効果を調べた。圧力の観測点は図8の場合と同様、トンネル入口と出口にそれぞれ一つずつ設置した。

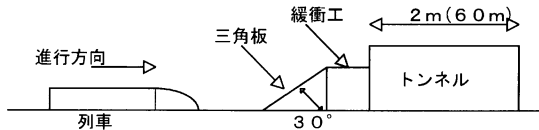


図14 三角形遮蔽壁の概要図(立面図)

図15に遮蔽壁設置前後の突入波波形をプロットした。破線は図9と同様、遮蔽壁がない場合の突入波波形で、実線が遮蔽壁設置後の波形である。遮蔽壁が設置されたことで、 $t=0.05$ 付近で観測されていた突入波が半減できていることが確認できる。また、全体的な波形もなだらかになっており、このことは窓ガラスを揺らすという現象の低減にも効果的である。

同様に、遮蔽壁設置前後の微気圧波圧力波形を図16にプロットした。突入波同様、 $t=0.1$ で観測されていた微気圧波がほぼ半減していることがわかる。

以上のことから、対策方法の一つとして三角形の遮蔽壁が有効であることが実験によって確認できた。ただ、遮蔽壁による圧力波低減効果のメカニズムがまだ明確になっていないので、今後数値シミュレーションも利用して明らかにし、その上で最適な遮蔽壁形状の設計方法を確立する必要がある。

3.5 列車形状の三次元性の影響

次に、列車先頭形状の三次元性が圧力波に及ぼす影響について検討した。前述のように従来の実験は軸対称形状のものがほとんどであったが、流れ場の三次元性が微気圧波に影響を与えることが明らかにされ¹⁰⁾、これを実験的に調べることは列車形状や遮蔽壁などの対策を設計する上で非常に重要となる。

本実験ではまず、図17に示す放物線型の列車を図18に示すように進行方向に対して90°ずつ回転させてトンネルに突入させ、列車とトンネルとの相対的な位置関係の違いが圧力波に対してどのような影響

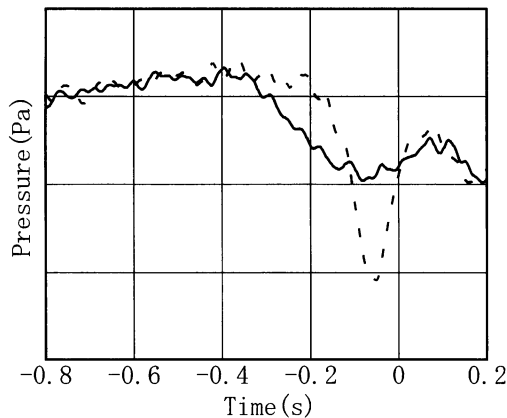


図15 突入波圧力波形の比較 (破線：遮蔽壁なし，実線：遮蔽壁あり)

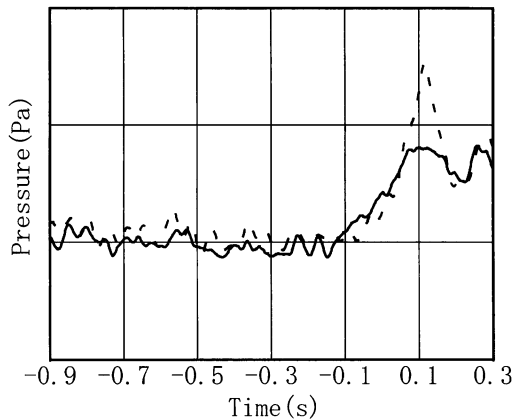


図16 微気圧波圧力波形の比較 (破線：遮蔽壁なし，実線：遮蔽壁あり)

を与えるかを調べた。

トンネル入口付近で観測したそれぞれの圧力時間履歴を図19に示す。波形から明らかなように、同じ断面積変化を持つ先頭形状でも、その三次元的な先頭形状の差により突入波の大きさが最大3割程度異なり、また発生タイミングもずれていることがわかる。詳しく見ると、放物錘状の列車形状の先端部分が「右」すなわちトンネル壁面から離れている場合に突入波が強くなり、「左」すなわち先端がトンネル壁面に近いと弱くなっている。一方、通常の列車形状とそれを上下反転させた「逆」の場合、列車先端部分はトンネル壁面から同じ距離となり、突入波強さもほぼ同程度となっていることがわかる。この結果は今後の列車形状設計にとって重要な情報となる。

従来の射出装置においては、列車先頭部の断面積変化が一致していれば、三次元的な形状の違いは圧力波に対

して無視できるとされてきた。しかし、この結果から、三次元性が比較的強い影響を持つことがわかり、本装置が実際の列車形状を再現できることの重要性が確認できた。

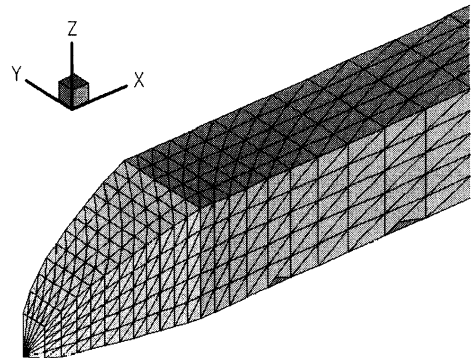


図17 列車模型先頭形状

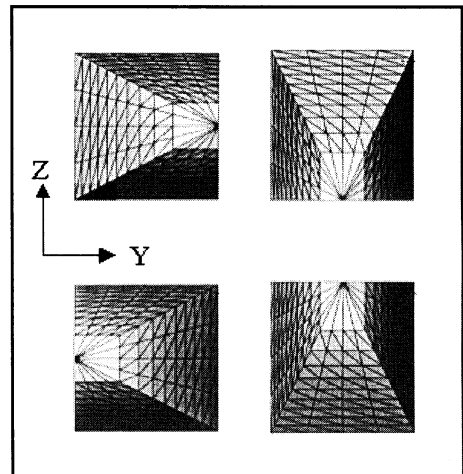


図18 90°ずつ回転させた列車先頭形状

4 結論

列車高速走行時に発生する様々な低周波騒音現象を再現できる列車模型射出実験装置を開発した。列車模型加速方法や走行時の模型固定方法を工夫することにより、従来の実験装置とは異なり、実際の列車や構造物形状を縮尺1/30で正確に再現できるようになった。列車近傍圧力場について実測結果と比較したところ、ほぼ一致した圧力波形が得られ、本実験装置が実際の現象を正確に再現できていることを検証した。また、トンネルやオーバブリッジのような構造物に列車が突入するような状況を再現して、実際に観測されているトンネル出口微気圧波、突入波、そして、繰り返し放射される圧力波などの現象を再現することも確認した。

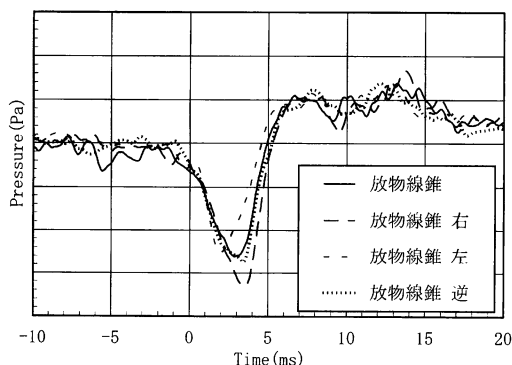


図19 列車先頭部の3次元的な違いが突入波に与える影響

さらに、トンネル入口に遮蔽壁を設けて突入波が実際にどれくらい低減されるか、トンネル壁面に対して列車形状が変化した場合に突入波波形がどのように変化するかについて調べた。これらの影響は本実験装置のように三次元的な形状を再現できなければ明らかにすることはできない現象である。

今後は、三次元形状を再現できるという特性を活かし、本実験装置により様々な圧力波低減対策方法や最適な列車先頭形状を考案、設計してゆく予定である。また、列車模型加速部を改良することにより、時速 500km 以上の射出も可能にする予定である。

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] 山内伸亮, 飯田雅宣, 中西正利, 小野昭久, “トンネル入口緩衝工の開口部形状に関する模型実験”, 日本学会第7回交通・物流部門大会講演論文集, No.98-37, pp.413-414, (1998).
- [3] Ogawa, T. and Fujii, K “Numerical Investigation of Three-dimensional Compressible Flows Induced by a Train Moving into a Tunnel,” Computers and Fluids, Vol.26, No.6, pp.565-585, (1997).
- [4] 高山和喜, 佐宗章弘, 小野寺収, 金子良一, 松井良博, “トンネル微気圧波”, 静粛工学, pp.180-190, (1995)
- [5] Saito, O. Doi, T. and Kaku, J. “Measurement of the pressure distribution formed around a high-speed train”, Proceeding of Inter-noise 2002, (2002).

- [6] Ogawa, T. and Nishida, T., “Numerical Investigation of a Pressure Wave Generated by a High-Speed Train Passing Through a Structure,” Forum Acusticum Sevilla 2002, (2002).