

第73回

列車模型発射装置

はじめに

近年の速度向上により新幹線の営業最高速度は、旅客機の離陸速度を超える320km/hに達しています。さらに、これを超える速度向上も計画されています。物体が空気中をこのような高速で移動すると、空気力学的な現象が顕著になります。鉄道の空気力学的な特徴には、列車が(1)非常に細長いこと、(2)地面上を走行すること、(3)対向列車と近接してすれ違うこと、(4)明かり区間(トンネル以外の区間)だけでなくトンネル区間を走行することなどがあり、それらによって、ほかの乗り物と異なる鉄道固有の空気力学的問題が生じます。とくに山岳部の多いわが国において高速鉄道を建設する場合にはトンネルが多くなるため、列車・トンネル系の空気力学的現象が重要となります。

空気力学的な現象を調べる方法の代表的なものに、縮尺模型を用いた実験があります。そして、移動する物体周りの空気の流れを再現する実験装置には

風洞があります。風洞は、静止した物体に空気の流れを当てる実験装置で、航空の分野では多く活用されていますが、一般の風洞では列車と地面およびトンネルの相對運動を模擬することは困難です。そこで、列車がトンネルに突入するときの空気力学的現象を調べるために、それらの相對運動を模擬できる列車模型発射装置が開発されました。

列車がトンネルに突入することによる空気力学的現象

列車の先頭部がトンネルに突入するときの流れの様子を図1に示します。列車先頭部がトンネルに突入すると、空気は列車に排除され、列車側面とトンネル壁面の間では列車進行方向と逆向きに空気が流れ、トンネルの列車突入側坑口から噴き出す流れが生じます。また同時に列車前方のトンネル内の空気は圧縮され圧力が上昇します。そしてこの圧力の上昇により、トンネル内には圧縮波(通過するとその点の圧力が増加する波)が形成されます。この

圧縮波がトンネル内を伝わることにより、トンネル内に流れが引き起こされます。

この圧縮波が反対側のトンネル坑口に到達すると、大部分のエネルギーは反射し、膨張波(通過するとその点の圧力が減少する波)となって列車突入側の坑口へ戻っていきませんが、エネルギーの一部はパルス状の圧力波として坑口からトンネルの外へ放射されます。このパルス状の圧力波を微気圧波(図2)とよびます。微気圧波の大きさはトンネル内の圧縮波の大きさ(圧力上昇量)ではなくその傾きに比例します。微気圧波が大きくなるとトンネル坑口付近で衝撃音が聞こえたり、家屋の窓枠や戸が急に振動したりして、音を立てることがあります。微気圧波の原因となる圧縮波が伝わる速度はほぼ音速(約1,200km/h)であり、列車の走行速度よりも大幅に速いことから、長いトンネルでは微気圧波は前触れなく急に発生します。この点が、列車通過にともなう騒音や地盤振動などのほかの沿線環境問題とは異なる特徴です。

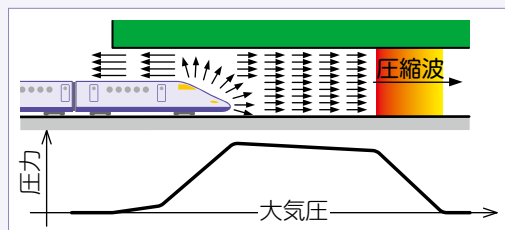


図1 列車先頭部がトンネルに突入するときの流れと圧力の変化

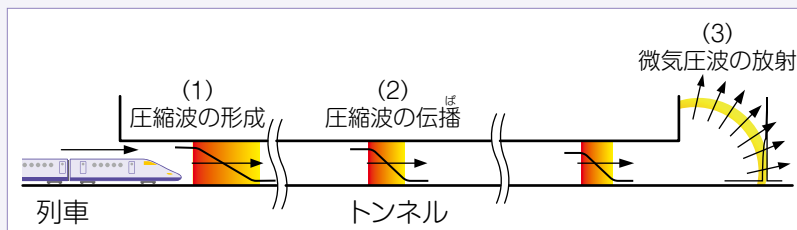


図2 トンネル微気圧波の現象

表1 鉄道技研・鉄道総研の列車模型発射装置¹⁾

No.	製作年	発射方式	最高速度 (km/h)
1	1958	ゴムばね	50
2	1975	ゴムばね	130
3	1981	圧縮空気	200
4	1988	二対車輪	260
5	1993	二対車輪	320
6	1999	三対車輪	450
7	2004	四対車輪	550

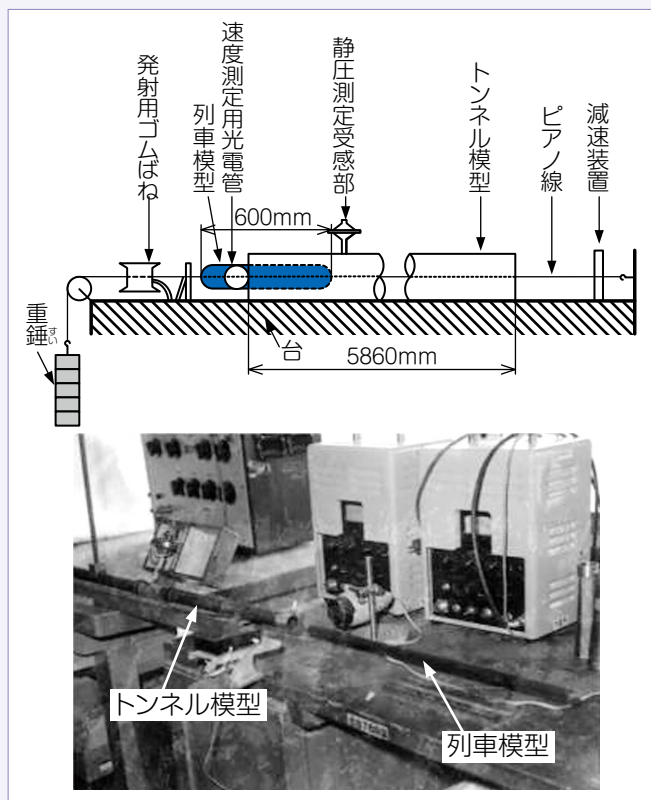


図3 最初に製作された模型実験装置(1958年製作)¹⁾

列車模型発射装置とは

列車模型発射装置とは、列車模型を射出して、トンネル内外の圧力の変化などを測定し、空気力学的現象を調べる実験装置です。トンネル内に形成される圧縮波を縮尺模型を用いた実験で調べるとき、列車の先頭部が流線型で、空気が車体表面に沿ってはがれずに流れていく場合には、列車の模型は実物の詳細な形状を模擬する必要はないと考えられます。ただし、列車先頭部の軸方向の断面積変化は、列車による空気の排除に大きな影響を及ぼすので、

正確に再現する必要があります。このような考え方にもとづいて列車とトンネルは軸対称の形状をしています。軸対称形状模型では、列車模型には先頭部の断面積の変化を相似にした回転体、トンネルとして円管を用います。

列車模型発射装置の変遷と研究開発成果

旧鉄道技術研究所および鉄道総合技術研究所でこれまで製作された列車模型発射装置の概要を表1¹⁾に示します。最初の装置は、トンネル内圧力変動などの東海道新幹線の技術的検討のため、1958年に製作されました(表1中No.1、

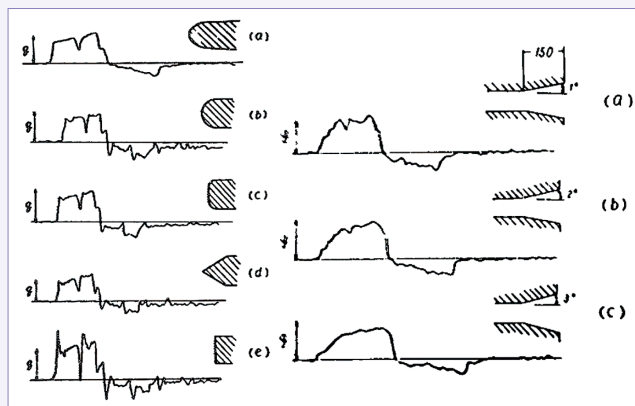


図4 トンネル内圧力変動に関する模型実験結果²⁾

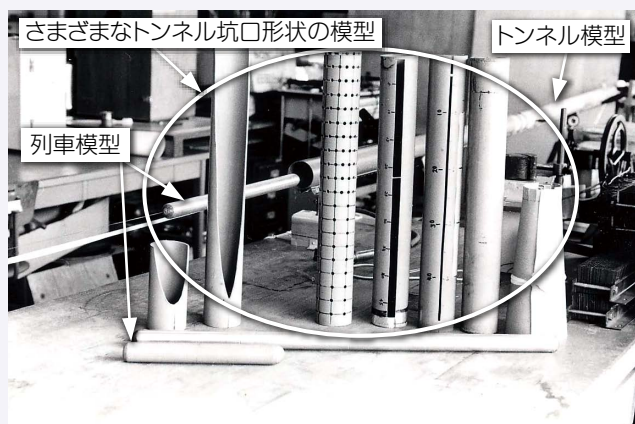


図5 トンネル微気圧波の現象解明および低減対策法の開発のために製作された模型実験装置(1975年製作)

図3)。この装置はトンネル模型(円管)の内部の軸方向にピアノ線を張り、これに沿って軸対称形状の列車模型が滑り動くようになっています。この基本的な構成は、その後の装置にも踏襲されています。列車模型はゴムひものばねで射出され、最高速度は50km/h程度でした。この装置を用い、トンネル内圧力変動に対する列車先頭部形状とトンネル坑口形状の影響が調べられました。その結果、トンネル内圧力変動の大きさは、列車の先頭部が流線型で流れがはがれなければ先頭部形状にはよらず、トンネル坑口形状にもよらないということが明らかになりました(図4)²⁾。

次の装置は、トンネル坑口から外部へ放射される微気圧波の現象解明および低減対策法の開発のため、1975年に製作されました(表1中No.2、図5)。

列車模型の発射はゴムひものばねによるものでしたが、最高速度は130km/hまで向上しました。最初の装置での実験ではトンネル内の圧力上昇量に注目していましたが、本装置ではそれだけでなく圧力上昇の傾きに注目し、トンネル坑口にスリットを設けたときや坑口形状をラッパ型にしたとき、坑口にフード(緩衝工)を設けたときの微気圧波低減効果が調べられました³⁾。

列車模型の発射速度を向上させるため、圧縮空気により列車模型を射出する模型実験装置が1981年に製作されました(表1中No.3)。この発射方式の採用により、列車模型の発射速度は、当時の新幹線の営業最高速度に近い200km/hまで向上しました。発射速度の向上に対応するため、列車模型の制動装置として、受台の上に空気ダンパー構造の制動筒を置き、列車模型が制動筒に衝突した後、列車模型と一体となって滑走する構造のものが採用されました。この制動方法は、以降の全ての模型実験装置において採用されています。この装置を用い、列車先頭部延長による微気圧波低減効果⁴⁾などが調べられました(図6)。今日の新幹線

車両の先頭部は微気圧波の低減を考慮してその長さを決定していますが、この実験結果はその礎となったものといえます。

上述の圧縮空気による発射装置には、列車模型発射時の空気圧の変動が測定波形に混入するという問題がありました。そこで、1988年および1993年に、列車模型を機械的に発射する装置が製作されました(表1中No.4, 5)。これらの装置は、モーターにより二対の車輪を回転させ、その間に列車模型を挟んで通すことにより列車模型を射出させるものでした。この車輪の外周には、列車模型との間の摩擦を大きくするためにゴムが装着されており、列車模型の最高速度はそれぞれ260, 320km/hで、現在の新幹線の速度域での実験が可能となりました。これらの装置を用い、新幹線の速度向上に対応した微気圧波低減対策のための緩衝工や、列車先頭部形状の最適化⁵⁾の検討が行われました。

先頭部形状の最適化は数値計算(CFD)を用いて行い、その検証が模型実験で行われました。これにより得られた先頭部形状(図7)は、先端付近

の断面積が小さい部分ではその変化率が大きい鈍頭な形状となっています。先端を鈍頭な形状にすることにより、先頭部がトンネルに突入するときの圧力上昇時間が長くなります。その結果、圧縮波の圧力上昇の傾きが緩やかになり、トンネル坑口から放射される微気圧波を小さくすることができます。この先頭部形状の設計の考え方は、最近の新幹線車両の設計に取り入れられています。

ここまで述べた装置はすでに撤去されており、現在は二基の装置が鉄道総研内にあります。車輪の数を三対(表1中No.6)または四対(表1中No.7, 図8, 9)と増やしたことにより列車模型の発射速度を向上させました。四対の発射輪を持つトンネル空気力学模型実験装置は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金を得て実施したテーマの中で製作され、500km/h以上の最高速度を実現しています。これらの装置を用いて、微気圧波だけでなく、列車のトンネル突入・退出時に直接坑口から放射される突入波・退出波の現象解明および低減対策法の検討、立坑を有するトンネル内の圧力変動などの実験が

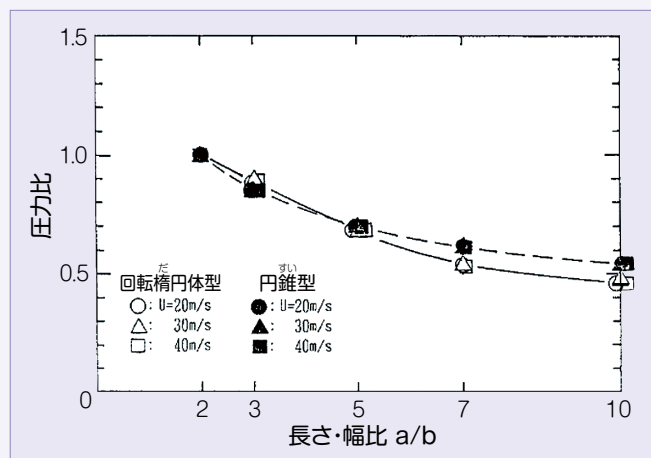


図6 列車先頭部延長の微気圧波低減効果に関する模型実験結果⁴⁾

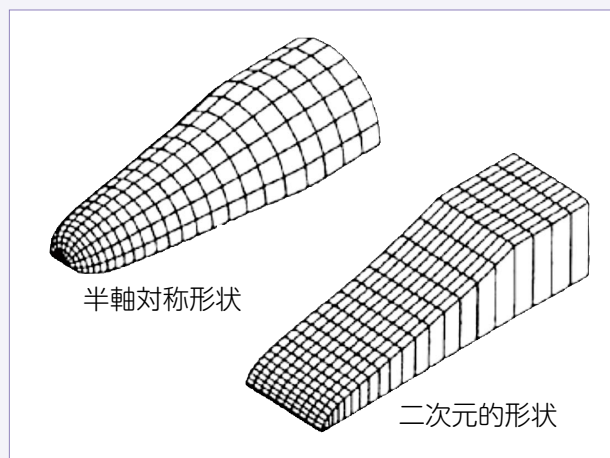


図7 微気圧波低減のための最適化により得られた列車先頭部形状の例⁵⁾

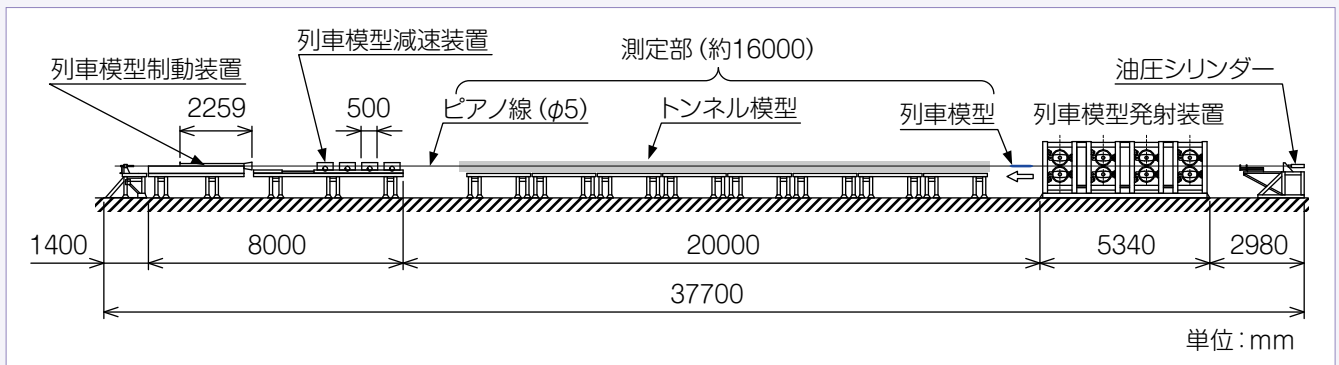


図8 四対の車輪による列車模型発射装置を有する模型実験装置の構成

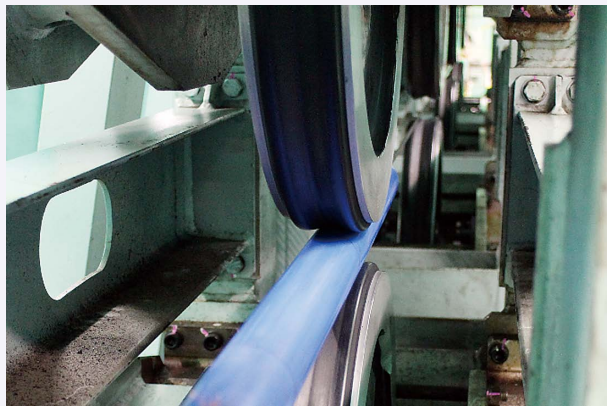


図9 車輪による列車模型発射装置



図10 実形状模型を用いた実験

縮尺1/100前後の模型を用いて行われました。

ところで、スノープラウ（排雪器）のような鋭い端部を持つ部品が車両先頭部にある場合、そこで流れが先頭部表面からはがれることが考えられますが、それがトンネル内の圧力変動や圧縮波の形成に与える影響を軸対称形状の模型で調べることは困難です。また、車両底面と地面の間の流れを調べることも、軸対称形状の模型では困難です。そこで、回転車輪の発射装置の機構をそのまま用いて実形状の列車模型（縮尺1/70）を発射する方法が開発され、実験が行われました（図10）⁶⁾⁷⁾。ただし現在の装置では、実形状の列車模型の発射速度は、最高250km/hにとどまっています。

列車模型発射装置の今後

現在の鉄道総研の列車模型発射装置では、実形状の列車模型を軸対称形状の列車模型のように300km/hを超える速度域で発射できません。そのため、高速域で車両先頭部周りの流れのはがれや列車底面と地面の間の流れを模擬することができないという課題があります。

環境問題に対する意識の高まりや新幹線の高速化などに対応するためには、空気力学的現象を再現するための実験技術を発展させる必要があると考えられます。今後も、実験装置の改良、新設や計測技術の改善を進め、現象の解明や緩和・低減対策の開発を行う予定です。

（福田傑／環境工学研究部
熱・空気流動研究室）

文献

- 1) 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
- 2) 原朝茂, 大櫛淳: 列車が高速ですい道に突入する場合の流体力学的諸問題(続), 鉄道技術研究報告, No. 288, 1962
- 3) 小沢智, 塚本京一, 前田達夫: トンネル微気圧波低減対策に関する模型実験, 鉄道技術研究報告, No. 990, 1976
- 4) 梶山博司, 木下真夫, 前田達夫, 種本勝二: 列車先頭部形状の延長によるトンネル微気圧波低減効果に関する模型実験, 鉄道技術研究所速報, No. A-87-119, 1987
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 齊藤実俊, 福田傑: トンネル内圧力変動に対する車両先頭部形状の影響, 鉄道総研報告, Vol. 28, No. 3, pp. 35-40, 2014