

鉄道一般
車両
施設
電気
運転・輸送
防災
環境
人間科学
浮上式鉄道

高速列車の先頭形状を多段化してトンネル微気圧波を低減する

ここでは、高速列車の先頭部の空気抵抗低減と微気圧波低減という二つの役割と開発の歴史について述べます。まず、列車先頭部の長大化は微気圧波低減を目的としていることを示し、次に、音響理論を用いて多段型先頭部の微気圧波低減メカニズムを説明します。最後に、従来形状よりもさらに微気圧波低減に有効な多段型先頭部形状の例を紹介し、15m程度先頭部について最適化された形状は、3段型先頭部となり、従来の先頭部形状よりも微気圧波低減効果が高いことを示します。



宮地 徳蔵
Tokuzo Miyachi
環境工学研究部
熱・空気流動研究室
主任研究員



菊地 勝浩
Katsuhiko Kikuchi
前 環境工学研究部
車両空力特性研究室長
(現 情報管理部
知的財産課長)



大久保 秀彦
Hidehiko Okubo
環境工学研究部
熱・空気流動研究室
研究員

はじめに

現在の新幹線の列車先頭部の特徴は、その美しい流線形のみならず、昔のものに比べると非常に長いことがあげられます。新幹線などの高速列車の先頭部には、空気抵抗の低減と微気圧波の低減という二つの役割があります。ここでは、高速列車の先頭部の役割、開発の歴史と最新の研究成果について紹介します。

である旧国鉄・鉄道技術研究所において高速鉄道用の先頭部形状が研究され、その成果として誕生した0系の先頭部形状は記憶に残る特徴的なものとなりました。その後も、1990年頃までおにも空気抵抗のさらなる低減を実現するため、先頭部形状の改良が続けられました。その研究²⁾の中から、空気抵抗低減のためには、列車先頭部の長さは列車の幅の1~2倍程度で十分であることがわかりました。

高速列車の先頭部の長大化

列車の高速化において、先頭部形状改良による空気抵抗の低減はつねに空気力学的に重要な課題でした¹⁾。最初の新幹線車両0系の開発においても、重要な検討項目として鉄道総研の前身

高速列車先頭部のもう一つの役割が微気圧波低減です。高速列車がトンネルに突入する際、トンネル入口付近の空気が列車先頭部に圧縮されることで圧縮波が生じ、この圧縮波の一部がトンネル外部に放射されます。トンネル

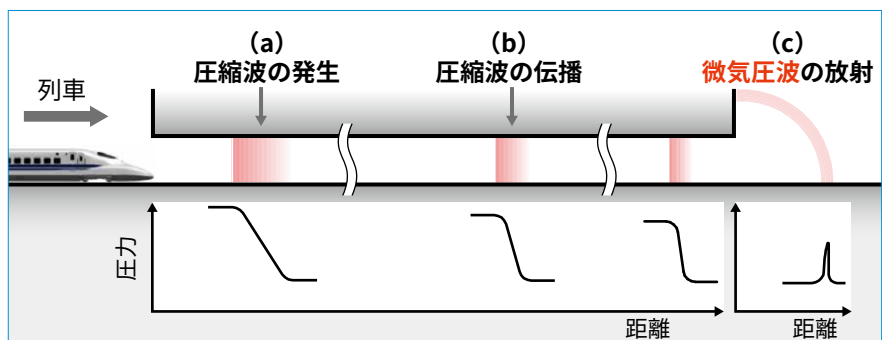


図1 微気圧波のメカニズム

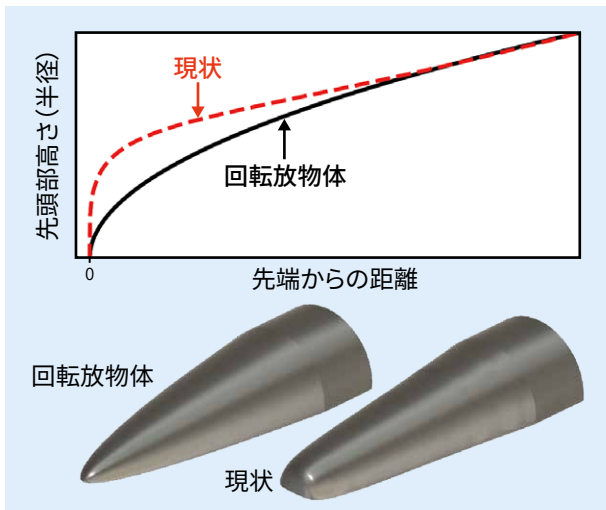


図2 微気圧波対策に有効な軸対称列車先頭部形状の例

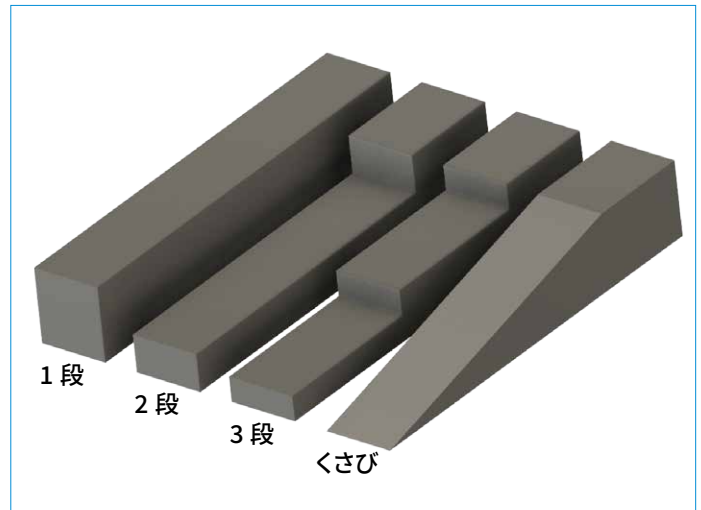


図3 多段型先頭部の例

外部に放射された圧力波を微気圧波といいますが(図1)

1990年代中頃になると、新幹線車両の高速化あるいは大型化(2階建て)において、列車がトンネルに突入した際に生じる微気圧波の低減が重要な課題となりました。それまで、微気圧波対策は緩衝工などの地上側対策による低減が実施されてきましたが、この時期から車両側にも対策を講じる研究が実施されました。

微気圧波の大きさは、列車先頭部がトンネルに突入した時に生じたトンネル内空気の体積変化に要する時間に反比例します。したがって、列車先頭部を長くすることによって、空気の体積変化に要する時間を延長し、微気圧波を低減することができます。

このような知見をもとに、1990年代に初の300km/h営業を実現した500系の先頭部は15mという「長い」流線形先頭部になりました。その後登場した列車先頭部も、700系やE7

系、W7系が列車の幅の2倍よりやや長い程度、N700系やE5系ではそれ以上となっています。このように近年の新幹線列車は、列車の幅の2倍よりも長い先頭部を有しており、それぞれの最高速度や地上側対策の条件に応じて、微気圧波対策が考慮されていることがわかります。

一方で、列車先頭部の長大化は、乗客の座席数の低減につながります。微気圧波低減と乗客の利便性を両立するため、実現できる先頭部長さには制約があります。そこで、列車先頭部の長さをより有効に利用できる「形状最適化」に研究がシフトし、先頭部長さの営業上の制約の中でより効果的に微気圧波を低減できる先頭部形状の開発がはじめられました。

列車先頭部形状最適化

列車先頭部形状の研究の初期の成果として、列車の各断面が半円形状の場合(軸対称形状という)、微気圧波対策に有効な先頭部形状としてもっとも単純な形状が「回転放物体」(図2)であることが明らかになりました。さらに微気圧波を低減するため、模型実験とシミュレーションによる研究が続けられ、1990年代中頃、回転放物体先端を切り落として先端の角を適度に丸

めたような形状がより効果的であることが証明されました³⁾。このとき示された「列車の先端を除き、先頭部の断面積変化率(変化の割合)を一定にする」という指針は現在の新幹線列車先頭部にも反映されています。この指針に従った先頭部形状の例を図2(現状)に示します。先頭部全体において断面積変化率が一定となる回転放物体に比べると、列車先端が丸められ、先頭部長手方向中央部では断面積変化率がほぼ一定となり、後端部において変化率がわずかに大きくなっていく形状となっています。先頭部の先端が鋭くとなった流線形先頭部は、近未来的で改良の余地のない列車先頭部の最終形態のように感じますが、このような理由により、現在の多くの新幹線の列車先頭部先端は、鳥のくちばしなどにも例えられる丸みを帯びた独特の形状になっています。

新しい列車先頭部形状 多段型先頭部

近年、さらなる微気圧波低減を実現するため、音響理論(☞参照)⁴⁾⁵⁾を駆使した研究が進められました。その結果、図3に3段型として示すような列車先頭部がより効果的であることがわかってきました。

音響理論

ここで用いられている音響理論では、列車先頭部と微気圧波の関係を簡単な式で表すことができます。理論自体は複雑ですが、理論を簡略することで、本研究のような物理的にわかりやすい指針を得ることができます。

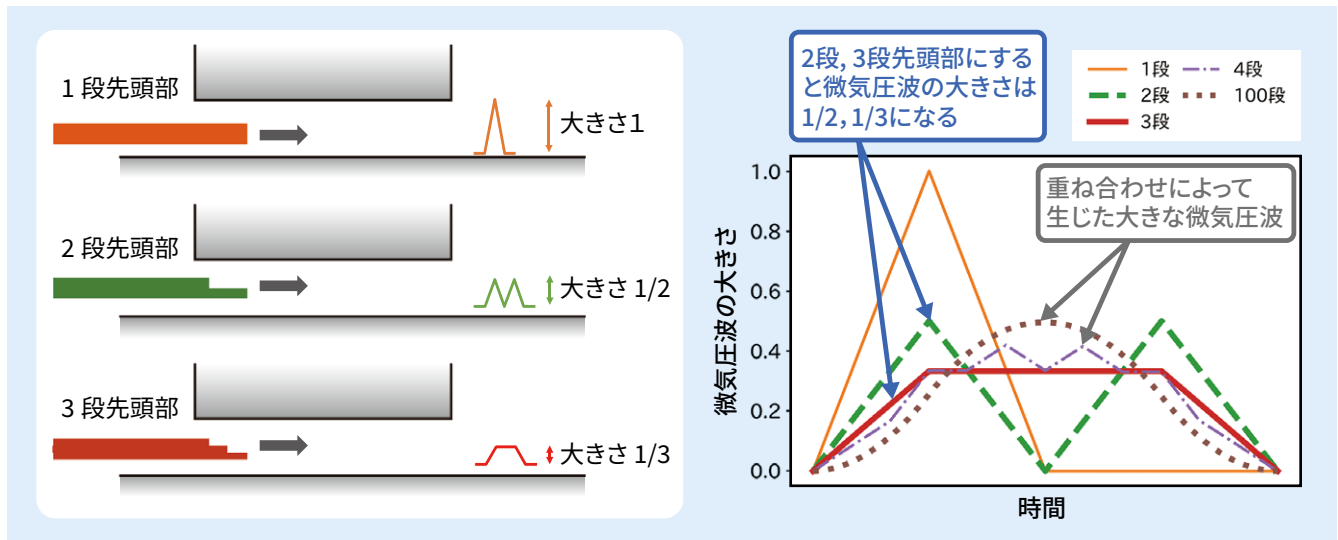


図4 多段型先頭部による微気圧波の簡易解析

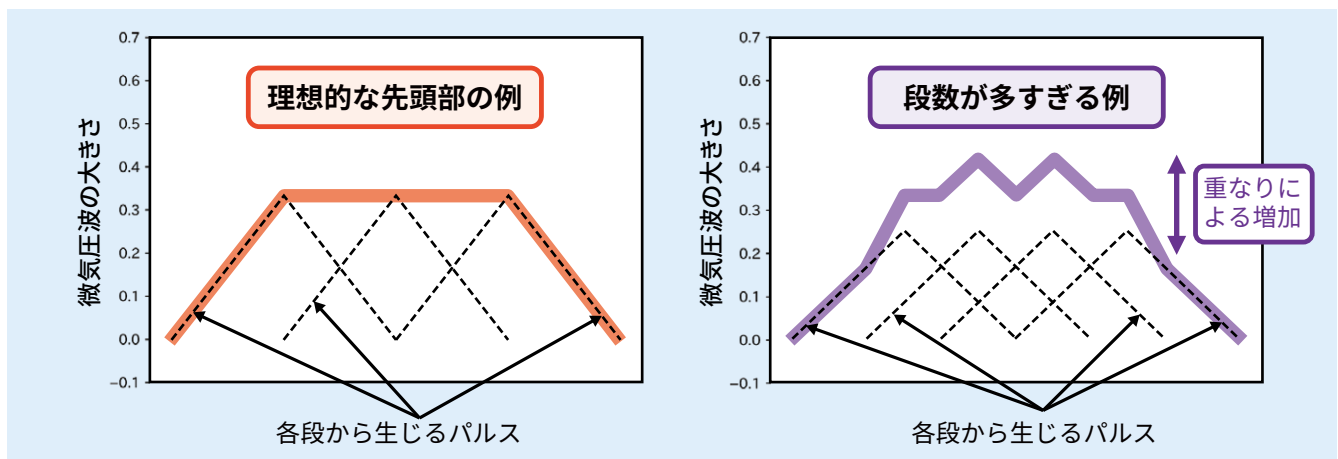


図5 パルスの重なりによる微気圧波の増加

このような3段型の先頭部による微気圧波低減メカニズムを音響理論⁵⁾に基づいて簡易的に説明します。列車の先頭部について、通勤列車のように角張った先頭部である場合を1段型、 n 個の階段状になっている先頭部を n 段型、これらをまとめて多段型先頭部とよぶことにします(図3)。段数が多くなると(例えば100段程度)、多段型先頭部はくさび型先頭部と同等となります。くさび型先頭部を断面積変化率が等しい軸対称形状に変換すると、図2の回転放物体になります。実際の空気の流れでは、階段状に変化する多段型先頭部のまわりに大きな渦が発生しますが、ここではその影響は無視し、さらに簡単化のため1段型先頭部では一

つの大きな三角型の微気圧波(パルス)が発生すると仮定します。この1段の先頭部から生じる微気圧波の大きさを1とし、以後これを基準とします。この基準に対して、多段型先頭部の段数を増やしていった場合の解析結果を図4に示します。ここで、先頭部は十分に長いもの(15m程度)とします。先頭部が2段になると、基準の半分の大きさの微気圧波が2回生じます。以後、段数を増やすほど、パルスの大きさは小さくなります。では段数を無限に大きく(ここでは100段)すると微気圧波は無限に小さくなるでしょうか? 図4をみますと、この例の場合、3段の場合に微気圧波が一番小さく、4段になると、微気圧波は大きく

なっていることがわかります。100段先頭部による微気圧波の最大値は2段の場合と同じになっています。残念ながら、段数を無限に増やしても、微気圧波がなくなることはありません。

これは、各段で生じた微気圧波のパルスの重なり合いが生じるためです(図5)。段数を増やすと、各パルスの大きさは基準に対して非常に小さくなりますが、パルスの個数が増えるため、隣り合うパルスが重なり合って大きな微気圧波が形成されてしまいます。そのため、各パルスが重なり合わない程度まで段数を増やすことが微気圧波を最小化するために重要となります。微気圧波を最小化する段数は先頭部長さによって異なります。現在の15m程

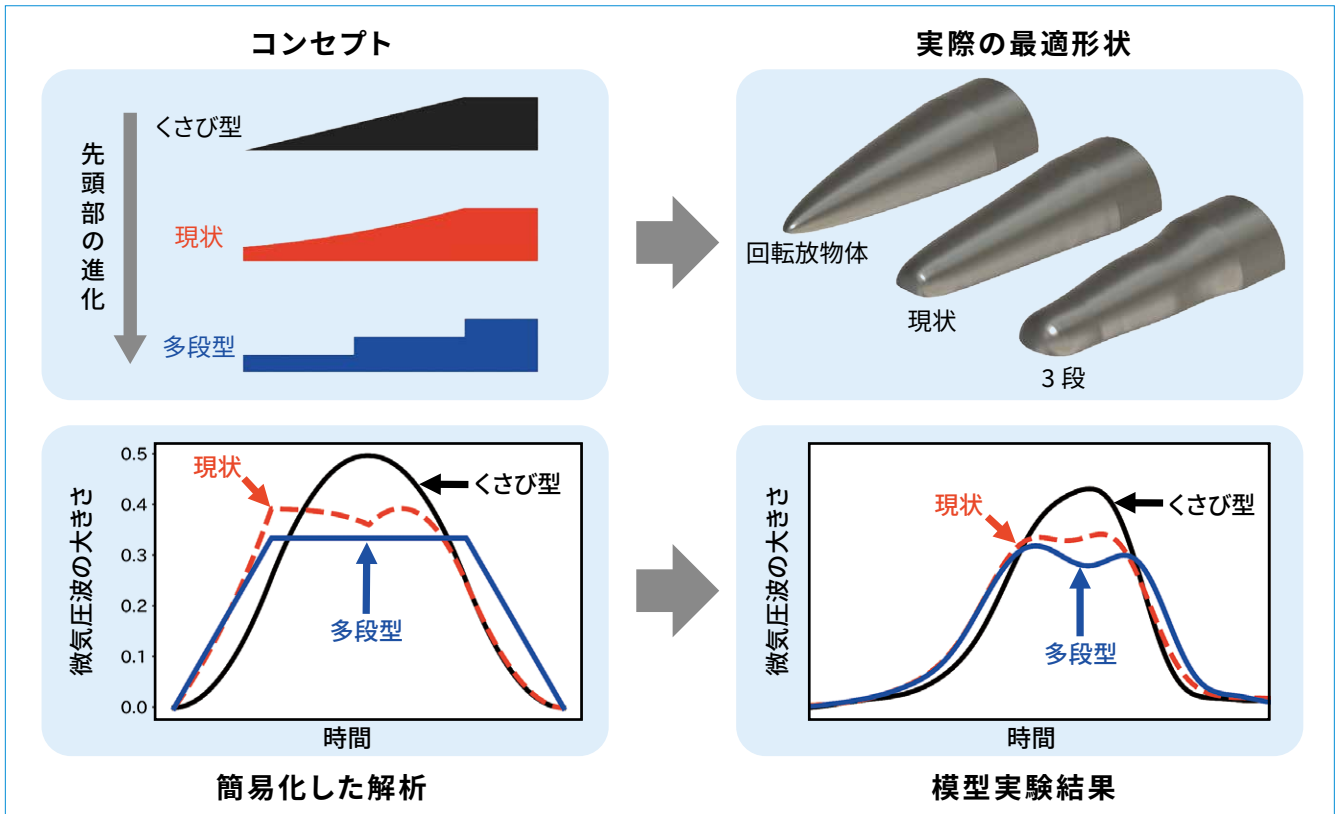


図6 最適列車先頭部形状と発生する微気圧波の関係

度の列車先頭部であれば3段、将来例えば20m程度の列車先頭部を採用するのであれば4段程度が理想的であると予想されています。

模型実験による検証

上で述べたような簡易化したモデル、次に音響理論に基づく詳細な検討から、多段型先頭部の有用性(ここでの例では3段型)がわかってきました。次に先頭部周りの流れにより生じる渦の影響を考慮できるCFD(数値流体力学)や模型実験で多段型先頭部をほどよく丸めた形状について研究しました。各先頭部の断面を半円で近似した模型を用いた実験を行い、3段型先頭部の効果を検証しました。得られた結果の例を図6に示します。図6上段左にあるのが最適化における各先頭部のコンセプトになります。図6上段右にあるのがCFDで得られた最適先頭部形状になります。図6下段に示す簡易化した解析、模型実験のいずれの結果でも、

多段型先頭部は現状の列車先頭部形状よりも微気圧波低減効果が高いことがわかります。

なお、新幹線の列車先頭部は運転席があるため、横方向から見ると高さの分布は3段形状になっているように見えます。ところが、上方向(あるいは前)から見ると運転席付近の幅の増加は抑えられており、断面積の分布が図6現状に似た形状になるように設計されています。したがって、列車先頭部には、まだ改良の余地が残されている可能性があると考えています。

おわりに

ここでは、列車先頭部の重要な役割である微気圧波低減機能について紹介し、最新の研究成果から提案されている多段型先頭部形状の微気圧波低減メカニズムについて述べました。今後は、より実際の列車に近い条件で多段型先頭部の有用性を検証していく予定です。

RRR

文献

- 1) 飯田雅宣：高速車両の先頭形状，RRR，Vol.70，No.4，pp.28-31，2013
- 2) 井門敦志，飯田雅宣，前田達夫：列車先頭部・後尾部形状最適化のための風洞試験，鉄道総研報告，Vol.7，No.7，pp.59-66，1993
- 3) 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，Vol.62，No.596，pp.1428-1435，1996
- 4) M. S. Howe：The compression wave produced by a high-speed train entering a tunnel，Proc. R. Soc. Lond. A.，Vol.454，pp.1523-1534，1998
- 5) Tokuzo Miyachi，Masanobu Iida，Takashi Fukuda，Takakage Arai：Nondimensional maximum pressure gradient of tunnel compression waves generated by offset running axisymmetric trains，Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics，Vol.157，pp.23-35，2016