

### 第13回

# 高速車両の先頭形状

## はじめに

自然界の鳥や魚、人工物の飛行機やレーシングカー、潜水艦など、空気や水などの流体中を高速で移動する物体は、必然的にその形状が流線形になります。流線形の物体(streamline body)は、そうでない物体(流体力学では「鈍い物体(bluff body)」と呼びます)と比べて、物体が受ける流体抵抗がきわめて小さくなるからです。鉄道車両も例外ではなく、現代の高速列車の先頭部は、程度の差こそあれ、いずれも流線形をしています。

流線形とは、流体力学的には「流れが剥離しない(しにくい)形状」のことです。流れが剥離すると、流体中に渦が形成され、この渦が、抵抗、加振力、空力音などの原因となります。流れが剥離しにくい形状とするためには、(1)流れの方向が急激に変わる箇所を少なくする、特に鋭いエッジを避ける、(2)流れが急激に拡大する箇所を少なくする、(3)圧力の急上昇が起こらないようにする、などの配慮が必要になります。大まかには、進行方向に沿ったなめらかな曲面で構成されたスムーズな形が流線形と言えます。

ただし、高速列車の先頭部は流線形でさえあればよいというわけではありません。運転士が十分な視界を確保できること、線路上の石などの障害物を排除できること、積雪地帯では雪掻きが可能なことなど、多くの機能上の要件を満たす

必要があります。構体外板や窓ガラスの曲面加工の難易度やコストも問題になります。車両の空気力学的な特性という観点からは、空気抵抗が小さいということ以外に、横風に対して倒れにくいこと、すれ違い時の対向列車への影響が小さいこと、空力音(風切り音)やトンネル微気圧波などの沿線環境への影響が小さいことなどが要求されます。もちろん、お客様に乗ってみたいと感じさせる優れた意匠デザインの車両とすることが重要であることは言うまでもありません。

200年近い鉄道の歴史の中で、車両の先頭形状も様々な変遷を遂げてきました。本稿では、走行速度の向上とともに重要度が増す車両の空気力学的な特性の観点から、これらの変遷の過程を見ていくこととします。

## 空気抵抗を低減する流線形車両(第2次世界大戦以前)

鉄道車両の流線形化の試みは19世紀後半に始まり、第2次大戦前の1930年代には最盛期を迎え、世界中で多数の流線形列車が走っていました<sup>1)</sup>。この時代は、各種乗り物はもちろん、一般工業製品、建築、衣装など、多くの分野で「流線形」のデザインが流行しました。鉄道車両の設計もその影響を強く受けたという面もありますが、主なねらいは、もちろん高速化に対応するための空気抵抗の低減でした。以下では戦前の流線形列車の実例を見ていきますが、飛行

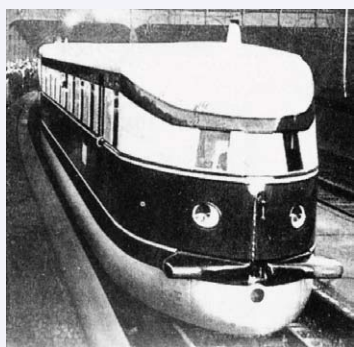


図1 ドイツ ディーゼル動車SVT877  
出典：流体抵抗と流線形<sup>1)</sup>



図2 イギリス LNER A4型蒸気機関車  
出典：By PTG Dudva [CC-BY-SA-3.0], via Wikimedia Commons



図3 アメリカ ディーゼル動車ゼファー号  
出典：流体抵抗と流線形<sup>1)</sup>

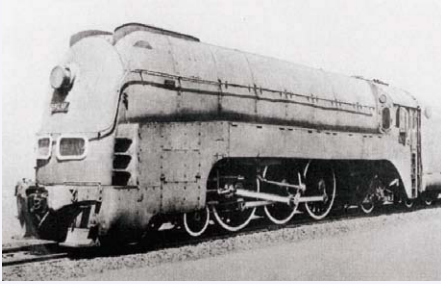


図4 満鉄 パシナ型蒸気機関車  
出典：流体抵抗と流線形<sup>1)</sup>



図5 小田急デハ3000形(SE車)  
所蔵：小田急電鉄機



図6 0系新幹線電車  
提供：東海旅客鉄道機

機と同様、事前に模型を使った風洞試験による空力的検討を経てから、形状が決定された車両も少なくありません。

図1はドイツ国鉄のディーゼル動車SVT877(1932)です。特急フリーゲンダー・ハンブルガーとして、最高速度160km/hを誇りました。ドイツ国鉄では、他に流線形蒸気機関車05型(1934)、61型(1935)なども製造されました。いずれの車両も全体が丸みを帯びた比較的単純な流線形で、前面下部のすそを丸めるなどしてエッジや角部を極力排しています。流れの剥離を可能な限り抑制するという流体力学の合理性を徹底する意図を感じさせます。この傾向は、戦後の高速鉄道車両ICE(後出)でも顕著です。

図2はイギリスのロンドン・アンド・ノース・イースタン鉄道(LNER)A4型蒸気機関車(1935)で、SLの世界記録203km/hを達成した有名なマラード号はこの型の車両です。走行性能だけでなく、格好良さでも随一のSLです。また、SLでは空気抵抗もさることながら、煙突からの煙をどのように流すかという点が大きな問題で、煙突そのものやその周辺の車体形状に工夫が見られます。なお、A4型にはありませんが、多くのSLには除煙板が装備されています。

図3はアメリカのバーリントン鉄道のディーゼル動車ゼファー号(1934)で、最高速度は181km/hです。先頭部は、前後に傾斜したスラントノーズと呼ばれる特徴的な形で、地面上を走行する物体としては、最も空気抵抗が小さい部類の形状です。複雑な凹凸やエッジ部がない単純なスラントノーズ形状は流れの剥離抑制に効果的であり、戦後の日本の新幹線300系(後出)の先頭形状とも相通ずるところがあります。なお、スラントノーズと一体化した前面下部のスカートは、先頭部の頭上げを防ぐ効果があると同時に、線路上の障害物を跳ね飛ばす排障器の役割も果たします。

アジアに目を転ずると、図4の南満州鉄道(満鉄)の蒸気機関車パシナ形(1934)が代表的な流線形車両で、最高速度は130km/hです。日本の国内では、流線形列車の例は少ないですが、C53形を改造した流線形蒸気機関車(1934)やC55形の一部(1936)、電気機関車EF55形(1936)などの例があります。

## 東海道新幹線の開業

第2次世界大戦の後も、ヨーロッパでは、ドイツのディーゼル動車VT11.5(1965)やイタリアの高速電車ETR300セッテペロ(1953)などの流線形車両が登場しましたが、アメリカでは自動車に押されて鉄道は衰退していきます。

一方、日本では、戦後も鉄道が主要な交通手段であり続け、経済の復興とともに輸送力の増強が求められるようになっていました。そんな中、旧海軍の研究所から国鉄の鉄道技術研究所に移った技術者を中心に、航空技術を応用することで鉄道の高速度を実現する研究が始まりました。その成果を具体化したのが、図5の小田急デハ3000形(1957)、いわゆるSE車で、この車両は速度145km/hの当時の狭軌鉄道世界最高速度記録を達成しました。SE車の先頭部は、数次に渡る風洞試験を経て決定されたものですが、ほぼ完全な流線形の車体先頭部にスカートと二重屋根を組み合わせた形状となっています。また、車体側面は垂直ではなくやや内側に傾けてありますが、横風を受けた際の転倒モーメントを低減する効果があります。これらの空力設計に加えて、連接台車、軽量化、低重心化など、SE車には多くの革新的技術が導入されました<sup>2)</sup>。

このSE車の成果も踏まえて開発されたのが、図6の東海道新幹線の0系電車(1964)です。営業最高速度210km/hの東海道新幹線の開業は、当時の世界の鉄道の常識を覆す革命的な出来事でした。これだけの高速になると、考慮すべき空力問題は多く、(1)空気抵抗の低減、(2)すれ違いおよびトンネル突入時の衝撃的圧力、(3)横風に対する車両の安定限界、(4)列車風などに対する検討が行われました<sup>3)</sup>。

## 沿線環境への適合

東海道新幹線は大きな成功を収め、現在に至る高速鉄道時代の先駆けとなりました。ただ、いくつかの問題にも直面しました。代表的な問題が沿線騒音です。1970年代に訴訟にまで発展した新幹線の騒音問題は、国が環境基準を

定めるとともに、鉄道側では防音壁の設置、転動音対策、スパーク音対策などを行い、騒音を大幅に低下させることで解決に向かいました。

しかし他の交通機関に対する競争力を維持、向上させるためには、スピードアップの努力を怠ることはできません。そこで、民営化後のJRにより、**図7**の最高速度270km/hの車両300系新幹線電車(1992)が開発されました。この車両は、従来の220km/hからの大幅な速度向上を、沿線騒音を悪化させることなく実現するため、徹底した騒音対策が施されました。特に、高速域で問題となる空力音対策が重視され、最大の音源であるパンタグラフの空力音だけでなく、先頭部空力音の低減も図っています。空力音は、空気抵抗と同様、流れの剥離による渦が原因となるので、先頭部を流線形にするのが基本です。ただし、空力音の場合、空気抵抗では大きな問題とならないような、運転台の窓枠の角ばった部分などからの小規模の剥離であっても対策が必要になることがあります。0系と300系の運転台の窓や出入りドア部などの凹凸の処理を比較すると、300系での空力音対策の工夫の跡が伺われます。

新幹線のさらなる速度向上は、**図8**の最高速度300km/hの500系電車(1997)によって達成されました。先頭部に関係するところでは、まず空力音対策として、300系同様、徹底的な流線形化と平滑化を行っています。もうひとつの大きな環境問題はトンネル微気圧波です。これは列車がトンネルに突入したときに反対側の坑口で大きな音や空気振動が発生する現象で、トンネルの多い日本の新幹線では避けて通ることのできない課題です。従来は主としてトンネル入口に緩衝工と呼ばれる設備を設けることにより対策していましたが、速度向上とともに車両側での対策も必要となってきていました。500系の電車史上最長とも言える長い先頭部は、微気圧波対策にも大変有効でした。このように細長く断面を絞った先頭部で、十分なスペースと視界を確保するために、飛行機の操縦席の風防のようなキャノピー型の運転台が採用されています。

ところで車両側でのトンネル微気圧波対策は、先頭部分

を長くすることだけではなく、長手方向の断面積の分布を工夫することによっても可能です。先端が比較的太く、途中は一定の変化率で断面積を増加させる形が効果的で、このような断面積分布とすることにより、より長い先頭部と同等の効果が得られます<sup>4)</sup>。この考え方を部分的にですが最初に取り入れたのが東北新幹線のE1系(1994)、E2系(1997)です。以降の新幹線車両では、より積極的に断面積分布の最適化が図られており、E4系(1997)、700系(1999)、800系(2004)、N700系(2007)、E5系(2011、**図9**)、E6系(2013)など、いずれも微気圧波対策を考慮した先頭部形状となっています。最高速度320km/hを想定したE5系、E6系では、500系なみの長さの先頭部とした上で、さらに断面積分布を最適化しています。

### 新幹線以降の海外高速鉄道

東海道新幹線の成功に触発されて、欧州でも本格的な高速鉄道の開発が進みました。フランス国鉄は、1981年、当時の日本の新幹線を上回る最高速度260km/h(のちに270km/h)での営業運転をTGVによって開始しました。最初のTGV車両の先頭部は、**図10**のようにエッジのあるシャープなイメージになっています。エッジ部では流れが剥離しますが、ラインが前後にかなり傾斜しているため、剥離の程度としては小さく、空気抵抗の増加量はそれほど大きくないと考えられます。このようにあえてエッジを強調して鋭さを演出する手法は、自動車のデザインでもよく見られます。一方、2007年に鉄輪式における世界最高速度574.8km/hを打ち立てた試験車両のベースとなった車両は、TGV-POS(2006、最高速度320km/h、**図11**)で、こちらの先頭部はなめらかな曲面を主体としたオーソドックスな流線形となっています。

欧州では、ドイツ国鉄(現DB AG)も、**図12**のICE 1(1991、最高速度250km/h)により高速鉄道を開業させ、その後、ICE 2(1995、最高速度250km/h)、ICE 3(2000、最高速度330km/h)などの車両を開発しました。ICEの先



図7 300系新幹線電車  
提供：東海旅客鉄道㈱



図8 500系新幹線電車  
提供：西日本旅客鉄道㈱



図9 E5系新幹線電車  
提供：東日本旅客鉄道㈱



図10 フランス TGV Sud-Est (初代車両)  
出典: By Phillip Capper [CC-BY-2.0], via Wikimedia Commons



図11 フランス TGV POS  
出典: By denisparis [CC-BY-2.0], via Wikimedia Commons



図12 ドイツ ICE 1



図13 スペイン AVE Talgo 350  
出典: By Peter Christener (Pechristener) [CC-BY-SA-3.0], via Wikimedia Commons

頭部はいずれも表面の凹凸やエッジを極力避けるとともに、先頭台車前方のスカートを最小限の大きさに抑えた、流線形の見本のような形状です。また、ICE 1の先頭形状はいわゆる「2次元的な形状」で、上から見ると先端へ向かって左右の絞りが小さい長方形に近い形状、横から見ると下面が水平な、くさび型の形状になっています。列車先頭部は前方の空気をかき分けながら進行しますが、このような2次元的な形状の先頭部では、列車前方の空気の多くが上方へ跳ね上げられて、その分、左右の横方向へ押し出される空気が少なくなります。その結果、すれ違い時の対向列車や、線路脇の防音壁等の側方の近接構造物への影響が緩和されるという効果が得られます<sup>5),6)</sup>。

海外では、TGV、ICEの他にも、イタリアのETR500、NTV ITALO、スペインAVEの各種車両、スウェーデンのX2000、ユーロスター、アメリカのアセラなどの高速車両が次々と開発されました。21世紀に入る頃からは、特にアジアでの高速鉄道の発展が目覚ましく、韓国のKTX-I、II、台湾の700T系、中国のCRH各種車両など、新たに誕生した高速車両の数は、枚挙にいとまがありません。紙面の関係で個々に説明することはできませんが、ユニークな先頭形状の例として、スペインAVE用のTalgo350(2008、最高速度300km/h、**図13**)を挙げておきます<sup>7)</sup>。

することによる空力特性の改善の効果は延長した割合に比例せず、だんだん頭打ちになる傾向がありますが、一方で先頭部を長くしたことによるデメリット(電車では客室、機関車では機器のためのスペースが減ることなど)は、直接マイナスの結果として現れるからです。今後は、先頭部の延伸以外の車両側対策や地上側対策の強化によって高速化が図られることになると考えられます。

ところで本文では省略しましたが、高速列車の先頭部では後尾側になったときのことも考えなければなりません。例えば車体を加振する変動空気力などの空力特性です。先頭側で空力的に最適な形が、後尾側でも最適というわけではありません。したがって、もしも可変形状の車体構造が実現すれば、走行方向に応じ、先頭側と後尾側でそれぞれ最適な形状にでき、大変好都合です。形状を可変とするには、表面を構成する部材を動かす直接的な方法もあれば、表面に通気性を持たせて、空気の出し入れを行うことにより、流体力学的な見かけの形状を変化させる間接的な方法も考えられます。他にも、筆者には思いも寄らないようなブレイクスルーのタネが転がっていることでしょう。若い研究者・技術者の新鮮な発想に大いに期待したいものです。

(飯田雅宣/環境工学研究部 部長)

### 今後の展望

ここまで1930年代から始めて、現在までの高速車両の先頭形状の変遷を見てきました。最後に、将来の高速車両の先頭形状はどのようになっていくのか、少し想像を膨らませてみたいと思います。

まず、先頭部の長さについて考えてみます。優に10mを超える長い先頭部の車両として、500系以後もE5系や中国のCRH380などが開発されています。それでは、今後高速化とともに、どんどん先頭部は伸びていくのでしょうか? 筆者の予想は否定的です。一般に先頭部を長く

### 文献

- 1) 牧野光雄: 流体抵抗と流線形, 産業図書, 1991
- 2) 三木忠直: 小田急3000形SEの追憶, 鉄道ファン, 1992.7
- 3) 日本国有鉄道 鉄道技術研究所監修: 高速鉄道の研究—主として東海道新幹線について—, 研友社, 1967
- 4) 飯田雅宣: 入口緩衝工と先頭部形状によるトンネル微気圧波対策, RRR, 2005.5
- 5) J-L Peters: Aerodynamics of very high speed trains and maglev vehicles: State of the art and future potential, Int. J. of Vehicle Design, SP3, 1983
- 6) 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, 7巻7号, 1993.7
- 7) J-L Peters: Tunnel optimized train nose shape, 10th Int. Symp. on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, Boston, USA, 1-3 November 2000