

# 車両先頭部における流れのはく離を抑制する

佐久間 豊

環境工学研究部(車両空力特性研究室 主任研究員)



さくま ゆたか

## はじめに

鉄道車両の先頭部には、新幹線や多くの在来線特急のように先頭部全体が滑らかな局面で構成された“流線形”から、通勤形車両に良く見られる箱型に近い“切妻型”まで、様々な形があります。その切妻型のうち、先頭部端部が角張っていて丸みのほとんど無い車両の場合、丸みの大きい車両と比較して、列車の空気抵抗、列車先頭部がトンネルに突入する時のトンネル内圧力変動<sup>1)</sup>、また、列車が駅などを通過する際に発生する車両まわりの圧力変動などが増大する傾向にあります。この増加には、角張った先頭部端部からの空気流のはく離が大きく影響しています(図1 (a))。では、この流れのはく離を抑えるためにはどうしたらよいのでしょうか。例えば、切妻型の角部を丸くする(図1 (b))、または、フィンなどの突起物を付けて流れの向きを強制的に変える(図1 (c))などの方法が考えられます。では次の問題として、それらの具体的な形状や大きさをどのくらいにすれば、流れのはく離が効果的に抑えられるのでしょうか。そこで、鉄道総研の大型低騒音風洞を用いた試験を行い、流れのはく離を抑える先頭部端部の丸み形状およびフィン形状の効果を検討しました。さらに、風洞試験ではく離抑制効果のあったフィン形状を実物車両に設置して、営業線での走行試験で効果を調べました。これらについてご紹介します<sup>1)</sup>。

## 大型低騒音風洞を使うメリット

風洞試験を行う際には、実際の流れ状態を再現することが重要ですが、完全に再現することはなかなか困難です。そこで通常は、対象とする流れ現象を支配する無次元量を合わせるか、または、可能な限り近づけて試験が行われます。今回の風洞試験では、物体まわりの流体運動の相似性を示すレイノルズ数を近づけることが重要となります。レイノルズ数 $Re$ は、 $Re = UW/\nu$ で与えられます。ここで、 $U$ ：流速、 $W$ ：物体の代表長さ(ここでは車体幅とします)、 $\nu$ ：流体の動粘性係数です。風洞試験も走行試験も空気中で行われることから、動粘性係数 $\nu$ は両方の試験で同じです。そのため、流速 $U$ と物体の代表長さ $W$ の積 $UW$ を実物車両の試験の場合に近づけることが重要です。

まず流速 $U$ を比べてみましょう。ここで考えている在来線の最高速度は120km/hです。大型低騒音風洞(密閉型測定部)の最高風速は300km/hであることから、流速 $U$ は実物よりも高速にすることが可能です。

次に、代表長さ $W$ はどうでしょうか。大型低騒音風洞の密閉型測定部の断面積は、縦3m、横5mより15m<sup>2</sup>です。実物大の模型車両を考えた場合、その断面積は、例えば縦4m、横3mとすれば12m<sup>2</sup>となります。もし、これをそのまま密閉型測定部に設置した場合、測定部断面の80%(12/15=0.8)も占めることになります。このような場合は、密閉型測定部壁面の気流に及ぼす影響が現れ、模型車両まわりの流れは実物車両の場合とは大きく異なる状態となります。では、模型はどのくらいの大きさなら良いのでしょうか。過去の研究から、模型と風洞測定部の断面積比は5%以下が推奨されることが分かっています。本風洞試験でもこの5%以下を満たすように模型縮尺を1/5(実物車両の車体幅 $W$ と高さ $H$ が2.8mの時、断面積比は2.1%)としました。ところで模型縮尺を1/5とした場合、実物車両の試験とレイノルズ数を一致させるためには、流速を5倍の600km/hとすべきです。しかし、もし600km/hとした場

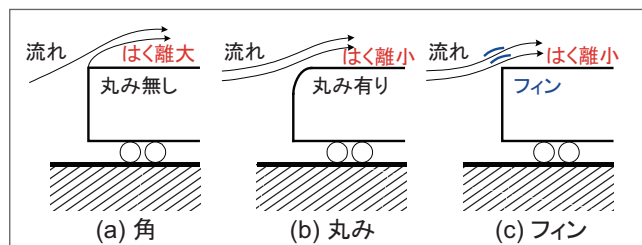


図1 丸み有無とはく離の大小

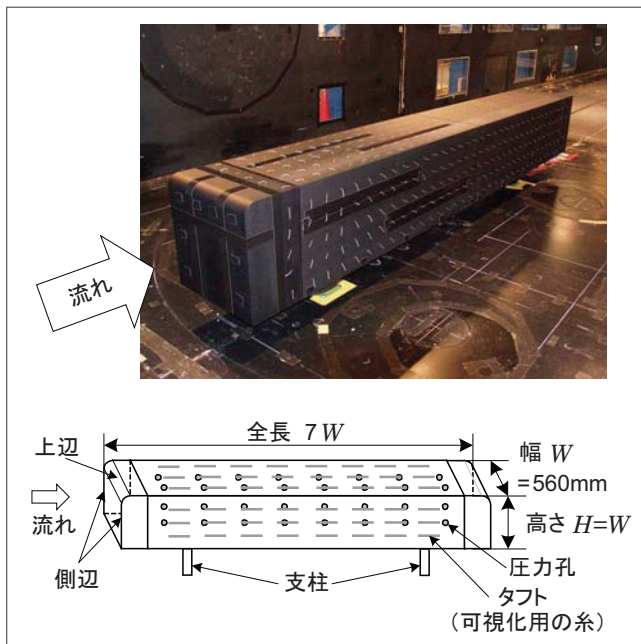


図2 風洞試験用車両模型

合、流れの圧縮性の影響が大きくなりすぎることや、模型の設置強度などに問題が出てきます。そこで、本風洞試験での流速は、これらのことを考慮して $U = 180\text{km/h}$ に設定しました。

以上の様に、大型低騒音風洞の特長として、大型模型の設置が可能なこと、また、最高風速が高いことが上げられます。この特長を生かし、模型縮尺を1/5に最高風速を $180\text{km/h}$ に設定したことで、本風洞試験のレイノルズ数( $Re = 1.9 \times 10^6$ )は、実物車両の走行試験時の約1/3の大きさにすることが出来ました。なお、レイノルズ数の差異が試験結果に及ぼす影響について、後半で実例を挙げて説明します。

### 風洞試験で用いる模型車両の形状

図2に車両模型の写真とその概要を示します。車体断面形状は、車体幅 $W$ と高さ $H$ が同じ矩形断面としました( $W = H = 560\text{mm}$ )。全長は、実物車両の1両分の長さに対応する $7W$ とし、そのうち、先頭部分と後尾部分の長さ $0.5W$ は交換可能な構造としました。そして先頭部の上辺および側辺(図2)の断面形状とその大きさを様々に変化させ、流れのはく離への影響について調べました。

図3に先頭部の断面形状一覧を示します。先頭部は丸みおよびフィンの2形状に関して試験しました。丸み形状は図3(a)に示すような、円弧、楕円弧、直線(平面)としました。図3(b)に示すように、上辺および側辺の成形した部分の長さを、レール(車体長手)方向は $a$ 、レールと垂直(車体幅または高さ)方向は $b$ と置くと、車体幅 $W$ を基準

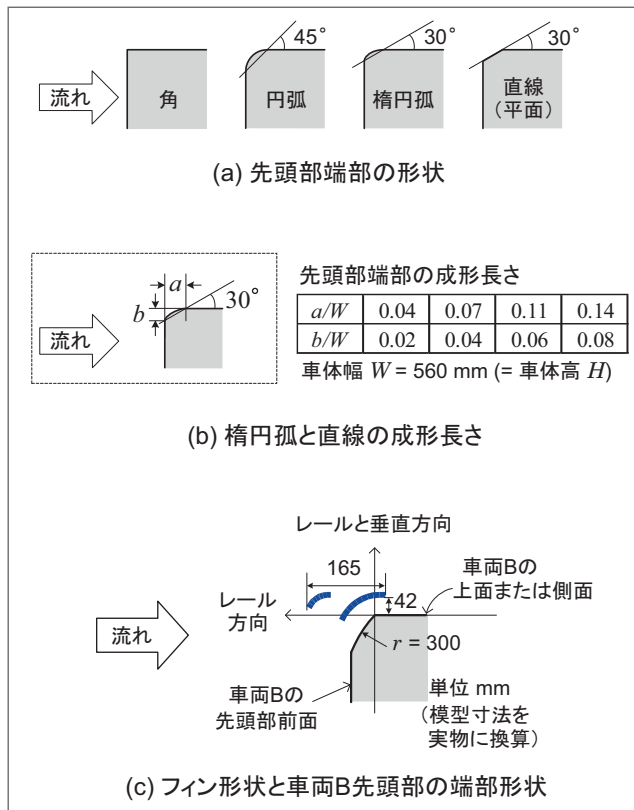


図3 先頭部の断面形状

として無次元化した成形長さはそれぞれ $a/W$ 、 $b/W$ となります。なお、円弧の場合は $b$ を $a$ と一致( $b = a$ )させました。なお、後尾部についてはその端部を1種類の円弧形状( $a/W = b/W = 0.11$ )に固定して試験しました。

フィン形状は、先頭部端部の各辺にフィン1枚ないし2枚をそれぞれ取り付ける方法を検討しました。図3(c)にフィンを設置した先頭部の端部形状を示します。この先頭部端部は、後述する走行試験で用いる実物車両(ここでは、車両Bと呼びます)の面取り成形を再現した形状としました。図中の長さは実物相当に換算した寸法で表示しています。フィンは60度分の円弧形状で、その半径を $0.02W$ 、 $0.04W$ 、 $0.08W$ 、 $0.12W$ の4種類を準備しました。そしてフィン位置を、レール方向またはレールと垂直方向に上辺と側辺で独立に変位させて、なるべく車体からの突き出し量が少なく車両限界内に納まるような形状を探しました。なお図3(c)に示すフィンの組合せは、本試験条件下において、流れのはく離を効果的に抑制する形状の中で、車体からの突き出し量が最少である“最適形状”を示しています。

### 先頭部まわりの流れの可視化

風洞試験では、タフト(可視化用の糸)による流れの可視化および空気抵抗の測定を主に実施しました。

流れの可視化では、タフトとして綿糸を使用し、上面(屋

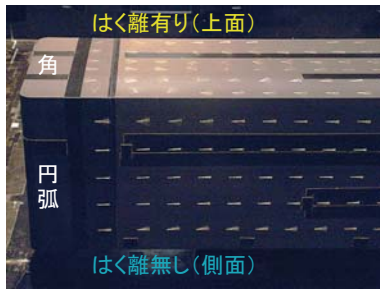


図4 可視化の例

根面) および片側側面について、約100mm間隔で計385点の位置にタフトを設置しました。流れの様子は、デジタルカメラで記録しました。通常、流れのはく離領域内ではタフトは激しく振動し乱れた動きをします。そこで、タフトが流れ方向を向いている場合ははく離無しの領域、タフトの動きが乱れるか、または、流れと逆方向を向いている領域をはく離領域と、それぞれ見なすこととします。

タフトの動きから、はく離の有無など、車体まわりの流れの様子を判定してみましょう。図4に可視化結果の代表例を示します。先頭部形状が「上辺=角、側辺=円弧」の場合です。側面のタフトは、流れ方向に沿って真直ぐに並んでいることから、はく離は存在しないと判断されます。一方、上面のタフトは、側面とは異なり先頭から約6列目まで逆方向を向いているか、または乱れています。このタフトの動きから、先頭部上面の角部から流れがはく離しており、タフトの6列目付近で再付着していると判断出来ます。このようにして、他の先頭部形状でも可視化写真から流れの様子を調べることが出来ます。

### 先頭部形状変化が空気抵抗およびはく離に及ぼす影響

車両に働く空気抵抗は、図2に示すように、車体の下面から2.5m間隔で支柱を2本伸ばし、測定部床面に装備された天秤部に模型を固定して測定しました。

図5に、先頭部形状が空気抵抗係数 $C_D$ およびはく離に及ぼす影響を示します。横軸は、車体幅 $W$ を基準とした無次元成形長さ $b/W$ です。車両B先頭部のフィン有無の場合については、丸み形状の結果と比較しやすくするため直線で示します。流れのはく離状態と空気抵抗の関係を見るため、図5中に、上面および側面のはく離の有無を示す概念図をいくつかの場合について付記しました。これらの

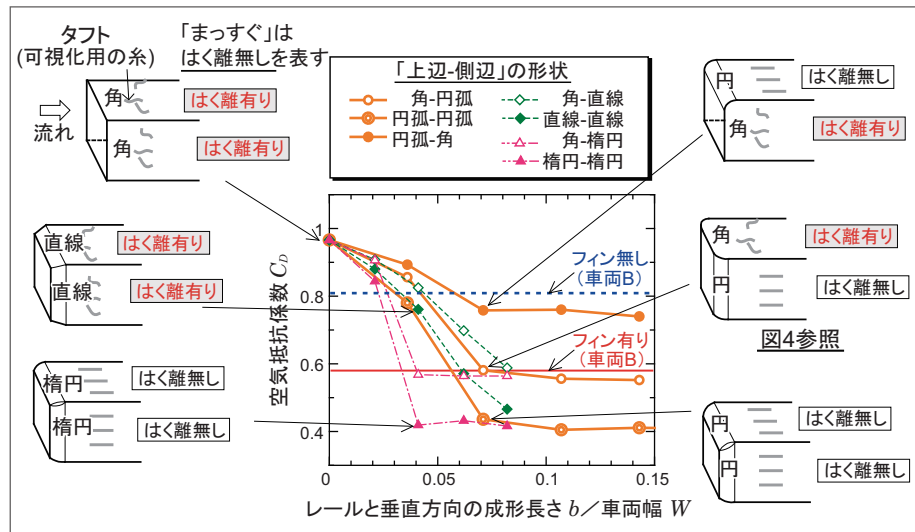


図5 先頭部形状が空気抵抗係数およびはく離に及ぼす影響

概念図は、前述の可視化試験により確認された $b/W$ と流れのはく離領域との関係に基づいています。

先頭部が角(上辺=角、側辺=角)の場合は、図5中で $b/W=0$ にある1点データのみに対応します。このとき先頭部端部に丸みがないため、上辺および側辺ともに他の場合よりも流れが大きくはく離し、 $C_D$ は0.97と図中の最大値をとります。無次元成形長さ $b/W$ が長くなるにつれて、全ての丸み形状で $C_D$ は減少していき、それと共に、はく離領域は小さくなります。そして、成形部がある長さ以上になると、はく離領域が無くなる、もしくは一定の状態になり、 $C_D$ はほぼ一定値に落ち着くことが確認出来ます。

図5より、今回の試験条件下で、最小の成形長さで流れのはく離を最も良く抑える先頭部端部の断面形状は楕円弧であり、その成形長さは、車体幅 $W$ を基準として、レールと垂直方向に $b/W=0.04$ 程度以上かつレール方向に $a/W=0.07$ 程度以上が必要であることが確認されました。

次に車両B先頭部のフィン有無の結果について、図5に示すようにフィン無しでは $C_D=0.82$ 、フィン有りでは $C_D=0.58$ です。この結果から、車両B先頭部にフィンを設置することによって $C_D$ は約30%減となること分かりました。

### 大型風洞試験のメリット(レイノルズ数の影響)

レイノルズ数が異なると、どのように風洞試験結果が異なるのか、その一例を示します。ここでは過去に実施された小型風洞(密閉型測定部、幅0.72m×高さ0.6m×長さ3.8m、鉄道総研国立研究所内)および今回の大型風洞の各試験結果を図6に比較して示します。小型風洞試験において、模型縮尺は1/20、試験風速は40m/sです。車両模型

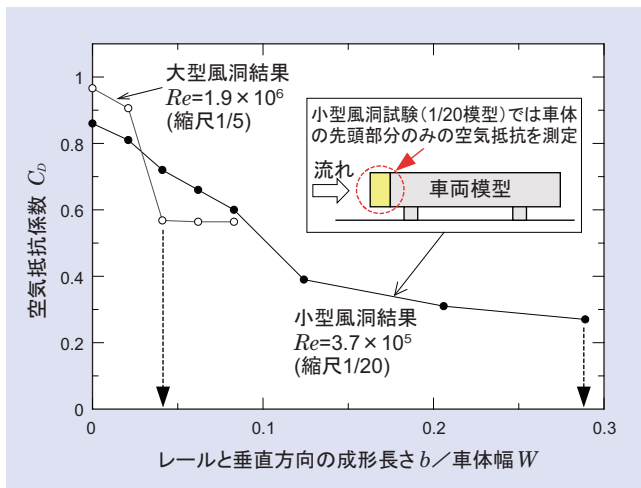


図6 車体前面の成形長さ と抵抗係数の関係(風洞試験)

幅を代表長さとしたレイノルズ数は、 $Re = 3.7 \times 10^5$ であり、今回の大型風洞試験のレイノルズ数 ( $Re = 1.9 \times 10^6$ ) の約5分の1です。両試験では、先頭部両側面の断面形状を楕円弧とし、その大きさを変化させてレールと垂直方向の成形長さ  $b$  と抵抗係数  $C_d$  の関係を求めました。車体幅  $W$  で無次元化した成形長さ  $b/W$  は、小型風洞では0.3程度、大型風洞では0.05程度でそれぞれ抵抗係数がほぼ一定になることが分かります。この結果を実物で考えた場合、例えば車体幅  $W = 3\text{m}$  の場合、 $C_d$  を最小にするのに必要なレールと垂直方向の成形長さ  $b_{\min}$  は、小型風洞試験では90cm程度、大型風洞試験では15cm程度と換算されます。実際の先頭部設計・改良を考えた場合、これは大きな差であると考えられます。このように、レイノルズ数により  $b_{\min}$  の結果が大きく異なることから、丸みを持つ表面からはく離現象把握に関し、実物のレイノルズ数により近い条件の設定が可能な大型風洞試験のメリットが確認出来ました。

## 実物車両による走行試験

風洞試験ではく離抑制効果を確認したフィン形状(図3(c))を実物車両に仮設し、走行試験でその抑制効果などを調べました(図7)。その結果、先頭部へのフィン設置により、流れのはく離が効果的に抑制されました。そして、トンネル突入時にトンネル内の圧力が一旦大きく上昇する現象が無くなること、また、2両編成、120km/hの場合に走行抵抗が約20%低減される等の効果があることを確認しました(なお本走行試験はJR西日本のご協力により実施されました)。

## おわりに

ここで提示した先頭部端部の丸み形状の検討結果は、在来線切妻型車両の空力特性を改善するために一部の新造車両の設計に反映されています。一方で、既存の切妻型車両の先頭部角部に対して、はく離を効果的に抑制する丸みを持たせる改造には多くの時間や費用を要する場合があります。しかし、本研究で開発したフィンにより、丸みを持たせる改造よりも短期間で安価に空力特性を改善出来ると見込まれます。

ここでご紹介したように、実物車両に実際に設置する前にフィン形状などを決定できることは、大型低騒音風洞の大きなメリットです。今後も、このような風洞試験を実施し、車両空力特性の向上を進めていきたいと考えております。**RRR**

## 文献

- 1) 佐久間豊, 井門敦志, 林太郎: 切妻型車両のトンネル突入時に発生する圧縮波(第2報, 車両側低減対策法), 機械学会論文集C編, 第76巻, 第770号, pp.2480-2486, 2010

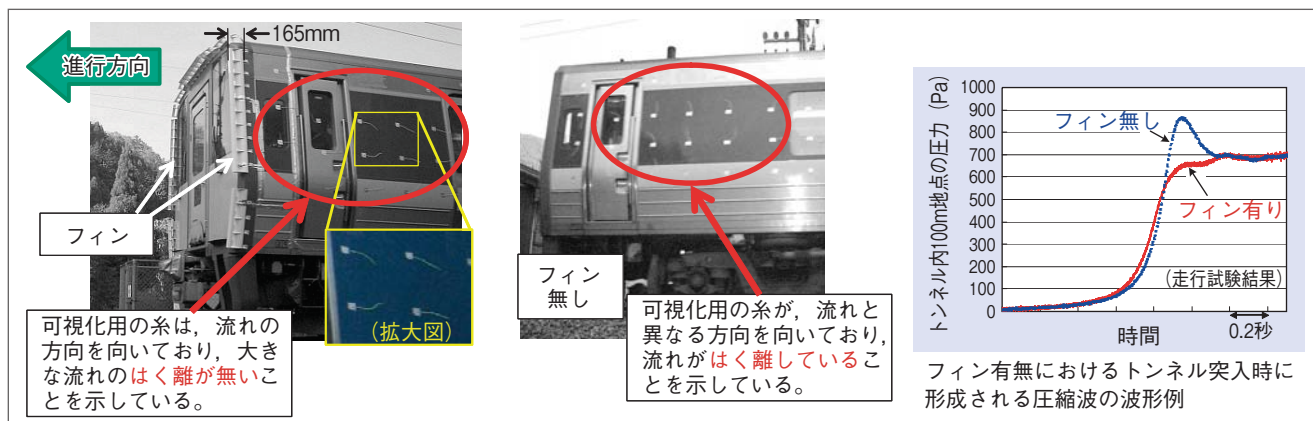


図7 はく離抑制用フィン(営業線試験)