

在来線切妻車両の空力特性向上策

環境工学研究部 空気力学

主任研究員 佐久間 豊

1. はじめに

先頭部端部に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、トンネル突入時の圧力変動、空気抵抗などが増大する傾向にある。この増加の主な原因は、先頭部付近の大規模な流れのはく離により見かけの車両断面積が増大したためと考えられる(図1)。本研究は、流れの大きなはく離を抑制することによる切妻型車両の空力特性向上を目的としている。まず現地測定および模型発射実験により、先頭部形状の違いによるトンネル突入時の圧力変動、特に圧縮波(図2)について、その実態および基本特性を把握した。次に風洞実験により、はく離を効率良く抑制出来る先頭部端部の丸み形状および突起物形状を検討した。そして、風洞実験で効果を確認した突起物(フィン)を現車に仮設して走行試験を実施した。これらの結果について報告する。

2. 圧縮波の実態および基本特性の把握

2. 1 トンネル突入時に形成される圧縮波

トンネル突入時に形成される圧縮波の圧力上昇量 Δp (無次元量)(図2)は、 $\Delta p = \{1 - (1-R)^2\} / [(1-M)\{M + (1-R)^2\}]$ (式(1)とおく)で表される。ここで、 $R = A' / A$: トンネル断面積 A に対する列車の有効断面積 A' (“有効”とは列車周りの流れの影響を含む)の比(ブロックage比)、 M : 列車のマッハ数 $= U / c_0$ 、 U : 突入速度、 c_0 : 空気中の音速である。式(1)から Δp は M および R に依存することが分かる。はく離がある場合は、見かけの列車断面積、すなわち、有効断面積 A' が増大し R が増加するため、 Δp は大きくなると考えられる。一方、現地測定や模型実験において Δp (および U)を実測し、それらの値を式(1)に代入することにより各列車のブロックage比 R および有効断面積 A' を逆算することが出来る。

2. 2 現地試験

列車のトンネル突入時に形成される圧縮波の現地測定を行い、実態の把握、および、先頭部形状と圧縮波との関係を調べた。車体断面積はほぼ同じで先頭部の丸みの程度が異なる5種類の列車(A系~E系)について速度約90~120km/hで各数本ずつ測定した。坑口から内部70m点に圧力計を設置した。3種類の列車(図3)について、トンネル突入時に形成される圧力(圧縮波) p 、および、その波面の圧力勾配(圧力の時間変化) dp/dt の各無次元波形を図4に示す。 p について、D系、E系は、0(大気圧)付近からゆるやかに上昇するものの、A系は0付近から急激に上昇した後、やや減少し、波形がオーバーシュートする特徴が確認された。圧縮波の圧力上昇量 Δp より、式(1)を用いて各列車断面積を計算すると、A系がD系と比べて約20~30%増大したと見なせる。A系とD系の実際の列車断面積はほぼ同じであることから、A系先頭部周りには大きな流れのはく離領域が存在することが推測される(図1)。また図4から、圧力勾配の最大値 $(dp/dt)_{max}$ は、例えばA系はD系の約3倍になることが分かる。図5に、5種類の列車(A系~E系)につ

いて、トンネル突入速度と $(dp/dt)_{\max}$ との測定結果を示す。同じ速度で単線トンネルに突入する場合、車両の先頭部形状の丸みが小さくなる（E系→A系）ほど $(dp/dt)_{\max}$ は増大することが分かる。以上の結果より、先頭部端部で大きな流れのはく離がある場合は、見かけの列車断面積が増大し、圧力上昇量 Δp および圧力勾配の最大値 $(dp/dt)_{\max}$ が大きくなることが示された。

2. 3 模型実験

図6に発射装置の概略を、図7に模型先頭部形状を示す。列車模型は軸対称で縮尺1/89、発射速度は120km/hに設定した。圧力変換器により模型トンネル内に形成された圧縮波の波形を計測した。図8に、トンネル突入時に形成される圧力 p および圧力勾配 dp/dt の波形例を示す。図8のM1とM2の波形を、図4のA系とD系の波形と比較すると、両方の結果は定性的に良く一致していることが分かる。図4と図8の $(dp/dt)_{\max}$ の結果を、図9にまとめて示す。図9より、流れが大きくはく離する切妻型先頭部A系、M1は、はく離がほとんど無い先頭部D系、M2に比べて、 $(dp/dt)_{\max}$ は、それぞれ約2~3倍に増大することが確認出来る。これらの模型実験と現地試験の結果より、列車模型は軸対称であるものの、その先頭部端部の（角および丸み）形状を、ある程度現車と合わせることで、現地測定の結果を定性的に再現出来ることが示された。

3. 流れのはく離を抑制する先頭部形状の検討

3. 1 風洞実験

風洞実験を行って、先頭部端部からの流れのはく離抑制のための「丸み」形状および突起物の「フィン」形状を検討した。実験には鉄道総研の大型低騒音風洞を使用した。タフト（気流糸）法により流れを可視化して車体周りの流れのはく離の様子を調べた。模型縮尺は1/5、実験風速は50m/sに設定した。レイノルズ数（物体周りの流れの状態を表す無次元数）は実物の約3分の1である。図10に車両模型、先頭部形状および可視化の例を示す。丸み形状では、図10(b)の様に、先頭部の上辺および側辺の断面形状、成形部長さ等を様々に変化させた。その結果、今回検討した先頭部の中で、大きなはく離を抑制する先頭部端部の断面形状は楕円弧または円弧であること、そして、それらのレール垂直方向の成形部長さ b は、車体幅 W を基準として7%程度（例えば $W=3\text{m}$ で約20cm）以上が必要であることが確認された（佐久間、井門：鉄道総研報告、Vol. 22、No. 5、pp. 5-10、2008）。フィン形状では、幅の異なる数種類のフィンを1枚のみ、または、2枚重ね（フィン間に隙間有り）でレール方向またはレール垂直方向に上辺と側辺で独立に変位させた。そして、はく離を効果的に抑制し、かつ、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検討した。その結果、図11に示すようなフィン形状（2枚重ね）が得られた。

3. 2 現地試験（フィンによる低減効果の確認）

風洞実験ではく離抑制効果を確認したフィンを、B系2両編成のうち一方の車両の先頭部に仮設し、営業線で走行試験を実施した。その様子を図11に示す。測定項目は、タフト（糸）による先頭部周りの流れの可視化、トンネル内圧力（坑口から内部100m点）、走行抵抗（惰行法による）である。図11の可視化結果より、フィン無しの場合、先頭からの距離3m程度、すなわち車体幅よりやや長い程度の範囲までに貼られたタフトの多くが流れ方向（レール方向）とは異なる方向を向いている。このことから、先頭部端部から車体幅よりやや長い程度の範囲にかけて流れが大きくはく離していることが分かる。一方、フィン有りの場合、ほとんどのタフトが流れ方向

を向いており、大きなはく離は存在しない。図 12(a) に先頭部のフィン有無におけるトンネル内の圧縮波の波形例を示す。フィンを付けることにより、トンネル突入時に圧力が一旦大きく上昇する現象が無くなることから、トンネル突入時に圧力が一旦大きく上昇する現象が無くなること分かる。図 12(b) に先頭部のフィン有無における走行抵抗の比較を示す。例えば 120km/h 時、B 系 2 両編成の明かり区間の走行抵抗は、「先頭部フィン有」の場合、「先頭部フィン無」と比べて約 20% 減になる。この走行抵抗の低減は、フィン有無による先頭部形状の変更のみが原因であることから、全て空気抵抗の低減によるものと考えられる。

4. おわりに

在来線切妻型車両の空力特性を改善するために、はく離を効率良く抑制する車両の先頭部端部の丸み形状とフィン形状を検討した結果、以下のことが明らかになった。(1) 先頭部形状の丸みの程度が小さいほど圧力勾配最大値 $(dp/dt)_{max}$ は大きくなる傾向がある。(2) はく離を効果的に抑える先頭部端部の断面形状は楕円弧または圆弧で、その成形部長さは、車体幅を基準として 7% 程度以上が必要である。(3) フィン設置により流れのはく離が抑制され、その結果、トンネル突入時に圧力が一旦大きく上昇する現象が無くなり、走行抵抗も低減する。

本研究で提示した先頭部端部の丸み形状は、在来線の一部の新造車両に反映されている。また、既存の切妻型車両の先頭部角部に空力特性を改善することの出来る丸みを持たせる改造には、多くの費用を要する必要があるが、本研究で開発したフィンにより、丸みを持たせる改造の数分の 1 程度の費用で空力特性を改善出来ると見込まれる。今後は、流れのはく離をより効果的に抑制する新フィン形状およびフィン以外の形状について検討を実施する予定である。

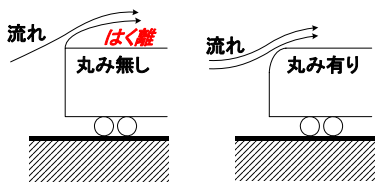


図 1 丸み有無とはく離の大小

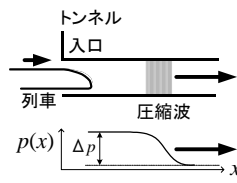


図 2 突入時の圧縮波

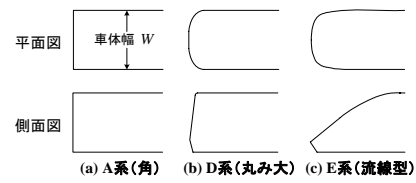


図 3 現車先頭部の概形

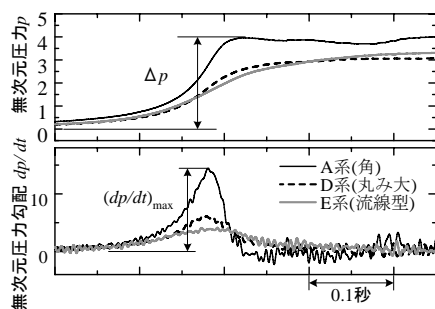


図 4 圧力および圧力勾配 (現地試験)

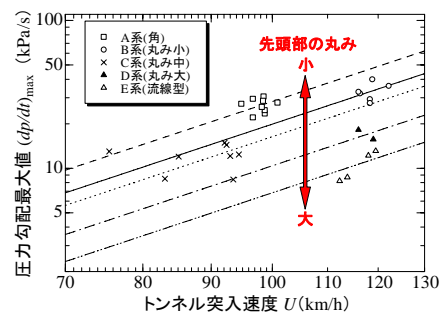


図 5 圧力勾配最大値 (現地試験)

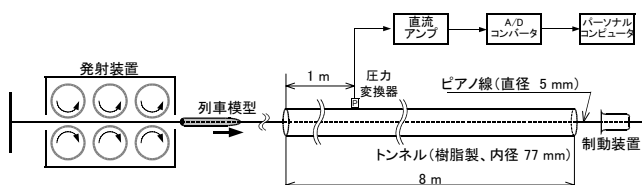


図 6 模型発射装置の概略

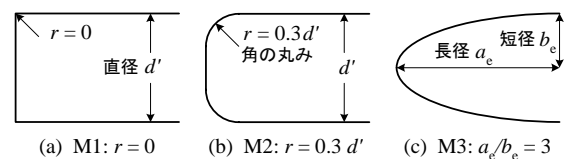


図 7 模型先頭部形状 (軸対称模型)

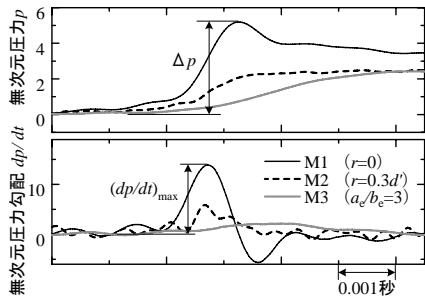


図 8 圧力および圧力勾配 (模型実験)

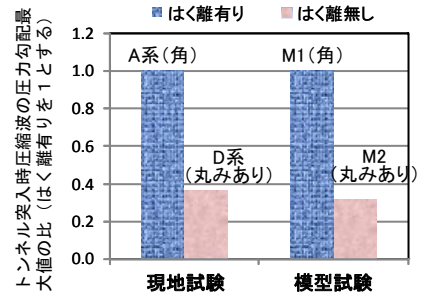
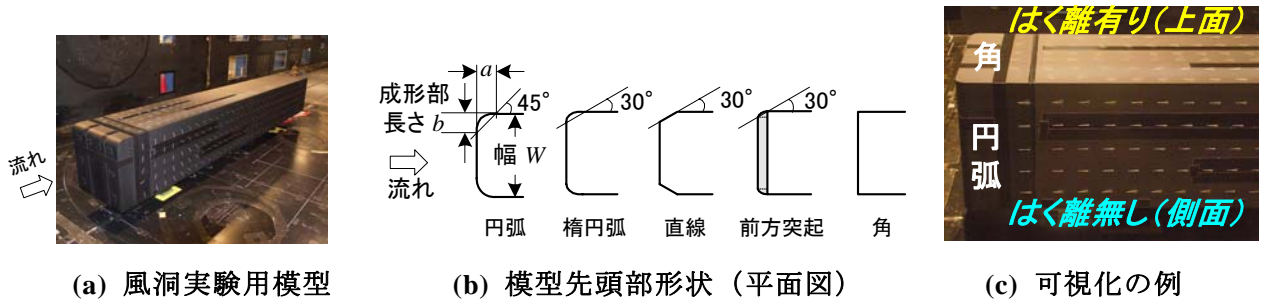


図 9 先頭部の丸みによるはく離抑制効果



(a) 風洞実験用模型

(b) 模型先頭部形状 (平面図)

(c) 可視化の例

図 10 風洞実験の様子

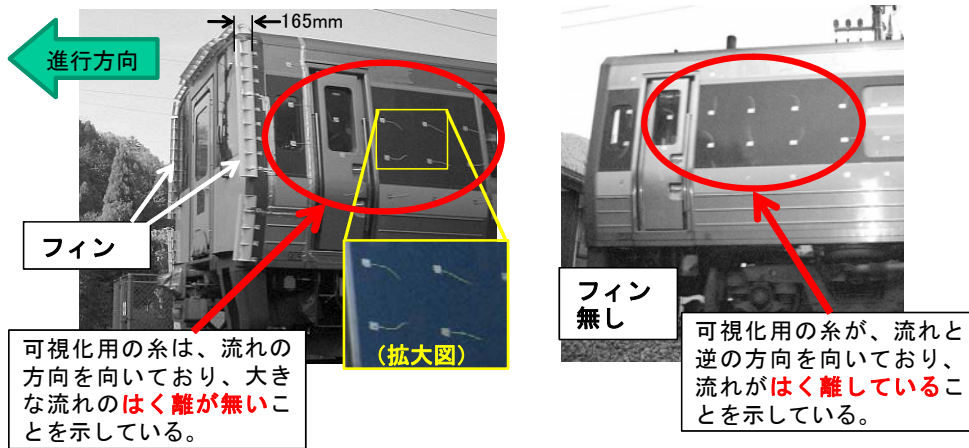
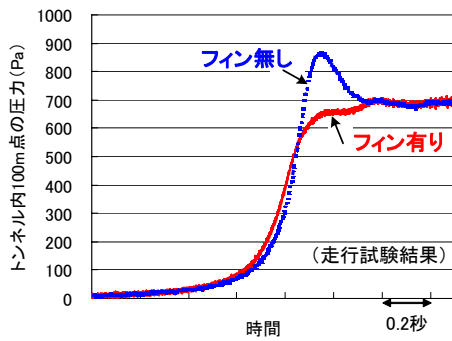
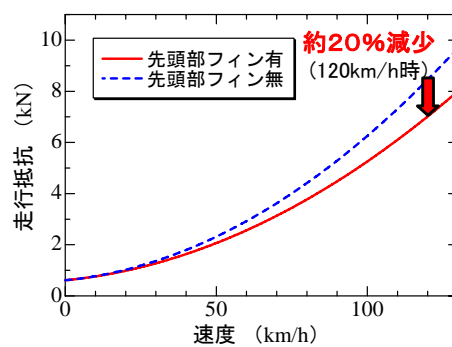


図 11 フィン設置によるはく離抑制効果 (B系、営業線試験)



(a) トンネル内の圧縮波の波形例



(b) 走行抵抗 (明かり区間、2両編成)

図 12 フィン設置の効果 (営業線試験、B系、2両編成)