

トンネル突入時の圧力変動を低減する 在来線車両の先頭部上面对策

佐久間 豊* 福田 傑**

Development of a Deflector on the Top Edge of the Front End of a Bluff-Nose Train for
Reducing the Compression Wave Generated by the Train Entering a Tunnel

Yutaka SAKUMA Takashi FUKUDA

A deflector attached to the top edge of the front end of a bluff-nose train has been developed for reducing peak values of compression wave Δp and its pressure gradient $(dp/dt)_{\max}$ generated by the train entering a tunnel. Firstly, the approximate geometry of deflectors and their possibilities of reduction of Δp and $(dp/dt)_{\max}$ were investigated by model shooting experiment. Secondly, the precise geometry of deflectors for actual trains was determined by wind tunnel experiment. Finally, we examined the effects of the deflector on reduction of Δp and $(dp/dt)_{\max}$ and prevention of flow separation on the top side of the front end of the train through flow visualization using tufts by running tests with an actual train. It has been demonstrated that the deflectors attached to the top edge of the front end of the actual train can reduce the peak values of $(dp/dt)_{\max}$ by 26 percent.

キーワード：在来線，先頭部，はく離，圧力変動，トンネル，可視化，整流板

1. はじめに

在来線における先頭部端部が角張っていて丸みのほとんど無い切妻型車両の場合、丸みの大きい車両と比較して、列車の空気抵抗、トンネル突入時のトンネル内圧力変動、トンネル微小気圧波などが増大する傾向にある。この増大の主原因は、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である。過去の現地測定、風洞試験、模型実験等により、はく離抑制のための先頭部端部の丸み形状と先頭部端部へのフィン（湾曲板）の設置が提案された¹⁾²⁾。一部の新製車両の先頭部形状設計時において、丸み形状の検討結果が、先頭部の上面および側面の端部形状に反映されている。しかし、フィン設置について、フィン自体の形状や構成がやや複雑であるため、よりシンプルな形状での対策が求められている。ところで既存車両の先頭部形状改造について、車両限界等の観点から、車両の側面よりも上面を改造する方が有利である場合が多いと考えられる。そこで本研究では、在来線車両上面における流れのはく離抑制のための空力的付加物形状を検討した。ここでは空力的付加物として、シンプルな形状で、かつ、加工や設置が比較的容易な平板（以下、整流板）を用いた。

本研究では、先頭部端部からのはく離を抑えることにより、列車のトンネル突入時に形成される圧縮波の圧力

の振幅 Δp および圧力勾配最大値 $(dp/dt)_{\max}$ を低減することを主な目的とした。まず、列車模型発射装置による実験を行い、整流板設置による流れのはく離抑制、 Δp および $(dp/dt)_{\max}$ の低減可能性について検討した。それらの低減効果を確認後、大型風洞試験を実施し、現車（実物の車両）に設置可能な具体的な整流板形状を検討した。そして、大型風洞試験で得られたはく離抑制効果の高い形状の整流板を現車に仮設して走行試験を実施し、流れのはく離抑制、 Δp および $(dp/dt)_{\max}$ の低減効果を検証した。さらに、過去の現車試験²⁾において先頭部の上面および側面にはく離抑制効果のあったフィンについて、上面のみに設置した場合³⁾についても併せて比較を行った。

2. 列車模型発射実験

本研究ではまず、列車模型発射装置による実験を行い、流れのはく離抑制のための整流板の概形を検討した。流れのはく離現象はレイノルズ数（粘性に起因する物体周りの流れ状態を示す無次元数）に依存する場合があることが知られており、本試験のレイノルズ数は現車と約 10^2 のオーダー異なっている。切妻型先頭部からの流れのはく離を定性的に再現するため、列車模型先頭部は角柱形状とした。これらのことから、整流板を設置した模型先頭部周りの詳細な流れの状態は、現車の状態とは異なる可能性が考えられる。ゆえに模型実験では、整流板を車両限界内に納めることなど、現車に実際に設置する詳細

* 環境工学研究部 車両空力特性研究室

** 環境工学研究部 熱・空気流動研究室

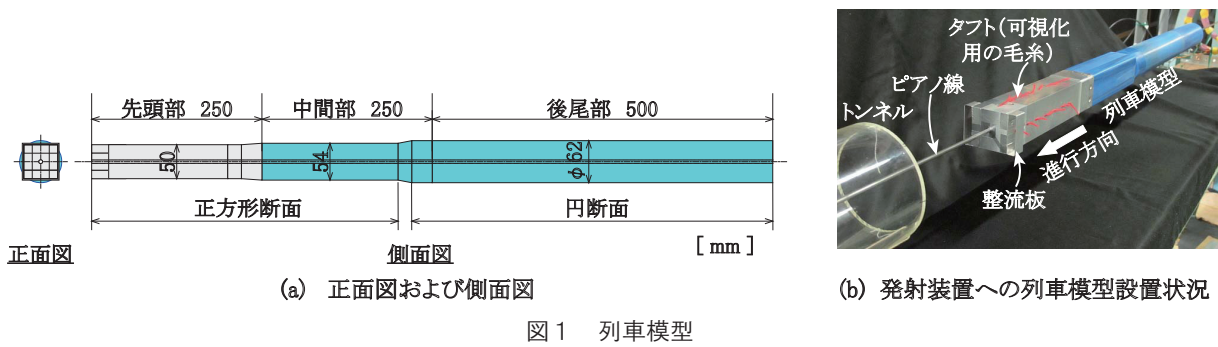


図1 列車模型

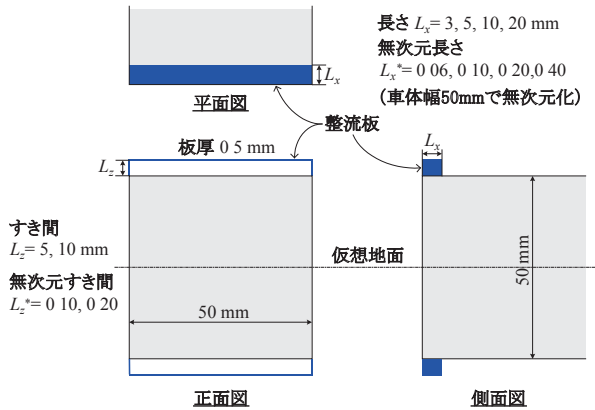


図2 模型先頭部および整流板の形状

形状を探すというよりも、むしろ整流板設置により流れのはく離抑制、 Δp および $(dp/dt)_{max}$ が低減されるかどうかの確認を主目的とした。それらの確認と共に、低減効果の高い整流板概形の検討を行った。現車に適用可能な整流板の具体的な形状とサイズについては、本章で得られた概形を基にして、次章で述べる大型風洞試験にて検討した。

2.1 実験概要

実験は、既報¹⁾ とほぼ同様の方法で実施した。実験ではピアノ線にガイドされた模型をピッチングマシンのような回転輪で挟み込んで発射する装置を用いた⁴⁾。トンネル模型には、内径 100mm、全長 8080mm の樹脂製の円管を用いた。トンネル模型入口から 970mm の位置に設置した圧力変換器 (Kulite 社製 XCS-190-5G) によりトンネル内に形成された圧縮波の波形を計測した。模型縮尺は、地面効果を模擬するための鏡像の考え方⁵⁾ を用い、トンネル断面等価直径 (同じ断面を持つ円の直径) を代表長さとする $1/69$ である。列車模型先頭部に整流板を設置した場合、整流板がトンネル壁面に接触するのを避けるため、列車とトンネルの断面積比は現車の 0.48 より小さくし、その $2/3$ 倍である 0.32 とした。列車模型は単線トンネルを想定してトンネル模型の中心に突入させた。列車模型のトンネル突入速度は 150km/h に設定し、各条件で数回ずつ測定した。

図1に列車模型および模型の発射装置への設置状況を示す。模型先頭部は角柱形状でアルミ製、中間部と後尾

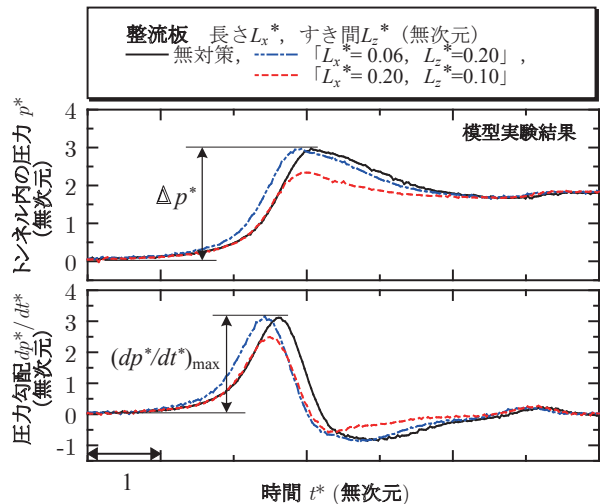


図3 圧力および圧力勾配の波形例 (模型発射実験)

部は角柱および円柱形状で樹脂製である。なお、角柱先頭部の発射装置回転輪への接触による破損を避けるため、模型先頭部断面を模型後部よりも小さくした。先頭部付近には、流れのはく離の有無を確認するため、可視化用のタフト(毛糸)を貼り付け、高速度ビデオカメラで撮影した。

図2に、列車模型の先頭部形状と空力的付加物である整流板形状を示す。整流板は厚さ 0.5mm のアルミ板をコの字型に折り曲げて車体にアルミテープで取り付けた (図1)。整流板はその長さとしき間 (高さ) を図2に示すように変化させた。ここで、図中のアスタリスク (*) の添え字は無次元量を表す。なお図2中に示すように、仮想地面を考えて、整流板は模型の上下面の両方に取り付けた。

2.2 結果と考察

図3に整流板の長さ L_x^* と車体上面とのしき間 L_z^* を変化させた時の、トンネル突入時に形成される圧縮波の圧力 p および圧力勾配 dp/dt の無次元波形例を示す。なお、列車がトンネルに突入した際にトンネル内に形成される圧縮波の大きさは突入速度の2乗にほぼ比例し、圧力上昇に要する時間は突入速度にほぼ反比例するため、圧縮波の波面の圧力勾配は、突入速度の3乗にほぼ比例する⁶⁾。これらの考え方に基づき、時間 t は (d/U) で、圧力 p は $(\rho U^2/2)$ で、圧力勾配 dp/dt は $(\rho U^3/2d)$ で除することにより各波形を無次元化した。ここで、 ρ : 空気密度、 U :

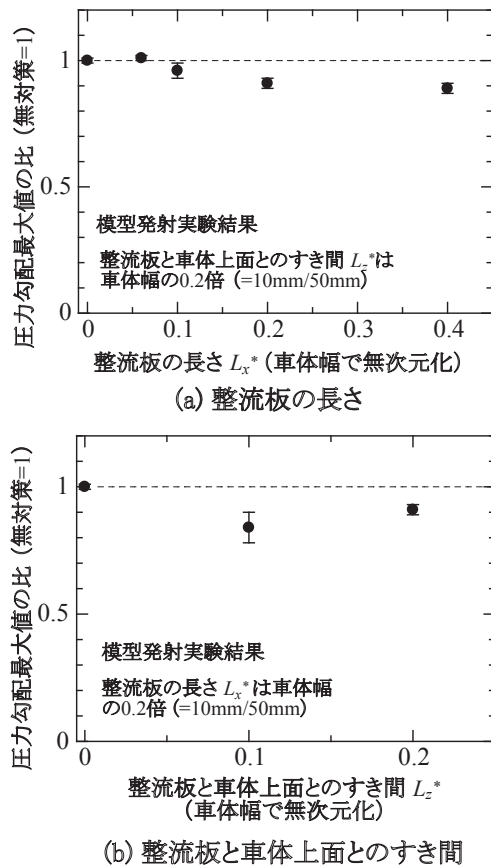


図4 圧力勾配最大値の比（模型縮尺 1/69）

列車速度， d ：トンネル断面等価直径である。図3より，整流板の長さ L_x^* とすき間 L_z^* の組み合わせにより，無対策時と比べて，圧縮波の圧力の振幅 Δp および圧力勾配最大値 $(dp/dt)_{max}$ を低減させることが可能であることが分かる。

圧力勾配最大値 $(dp/dt)_{max}$ と整流板の長さ（すき間は一定）との関係を図4 (a) に，また，すき間（長さは一定）との関係を (b) に，無対策時を基準としてそれぞれ示す。図4 (a) より，整流板長さがある一定値（ここでは，車体幅 W の0.1倍程度）よりも短い場合は，流れのはく離は抑制されず， $(dp/dt)_{max}$ が無対策時とほぼ同じか，やや増加する傾向にある。一方，その長さがある一定値以上の長さになると，はく離が効果的に抑制され，無対策の場合よりも $(dp/dt)_{max}$ が減少する（なお，タフトの可視化により，はく離が抑制される傾向にあることを確認している）。図4(b) より，整流板と車体上面とのすき間を0から広くするにつれ $(dp/dt)_{max}$ が減少傾向にあることが示唆される。そして，整流板の無次元長さが0.2，すき間が0.1の場合で最小値をとり約15%減となる。さらにすき間を広くすると $(dp/dt)_{max}$ の比が増加に転じ1に戻っていく傾向にある。

以上の模型発射実験結果より，整流板の長さとしき間を適切に選ぶことにより，角柱先頭部周りの流れのはく離抑制が可能であること，また，整流板設置により列車模型の実断面積は増加するにも関わらず，本実験条件下

では，圧力勾配最大値が無対策時の約10～15%減になることが示された。

3. 風洞試験

本研究では，次に風洞試験を実施し，模型発射実験で得られた概形を基にして，現車に適用可能な具体的な整流板形状とサイズについて検討した。

3.1 試験概要

風洞試験は，既報と同様の方法で実施した²⁾。試験には大型低騒音風洞（密閉型測定部幅5m×高さ3m×長さ20m）を使用し，タフト法による流れの可視化を行った（なお，車体の圧力分布および空気抵抗の測定も実施したが，紙面の都合上，主に可視化結果について述べる）。車両模型（図5）は幅 W と高さ H を実物の約1/5の560mmに，また，その長さは $7W$ （実物車両1両分に相当）に設定した。全長 $7W$ のうち，先頭から長さ $0.5W$ の部分は交換可能な構造， $0.5W \sim 6.5W$ の部分は角柱形状であり天秤に固定する構造，後尾部の $6.5W \sim 7W$ は角部の丸み $r = 0.107W$ (r ：円弧半径) とした。屋根面および側面について，タフトは約100mm間隔で計385点を設置した。

先頭部は，図5に示すように (a) 矩形断面と，(b) B系断面の2種類を用いた。なお過去の研究¹⁾²⁾において現車試験に用いた営業列車の名称をB系としていたことから，本報でもB系と呼ぶことにする。図5 (a) 矩形断面では，現車試験で実際に使用する現車の先頭部形状を簡略化し，前面部および端部の曲率のみをほぼ現車に合わせた。一方，図5 (b) B系断面では，先頭から長さ $0.25W$ の部分をスカート部も含めて現車の形状を再現した。

試験順序として，最初に矩形断面先頭部において，整流板のはく離抑制効果有無の確認および概形を検討後，B系断面先頭部で現車B系に実際に設置可能な詳細形状を検討した。整流板は，その長さ（現車換算で200mm～1200mm），車体上面とのすき間の高さ（同，150mm～500mm），およびすき間の幅，整流板の車体部分への（レール方向）取り付け位置などを様々に変化させた。そして，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検討した。なお図5に示す整流板は，本試験条件下で車体からの突き出し量が最少，かつ，はく離抑制効果が最も大きい形状例である。

試験風速は模型の強度等を考慮して50m/sに設定した。閉塞率（密閉型測定部の断面積に対する車両模型の投影断面積の比率）は約2.1%である。この値が5%以上では閉塞効果の修正が必要とされているが，ここではその値を下回っている。車両模型の幅 $W = 560\text{mm}$ を代表長さとしたレイノルズ数 $Re = 1.9 \times 10^6$ ($Re = UW/\nu$ ，ここで， ν ：空気の動粘性係数) である。この値は，現車の

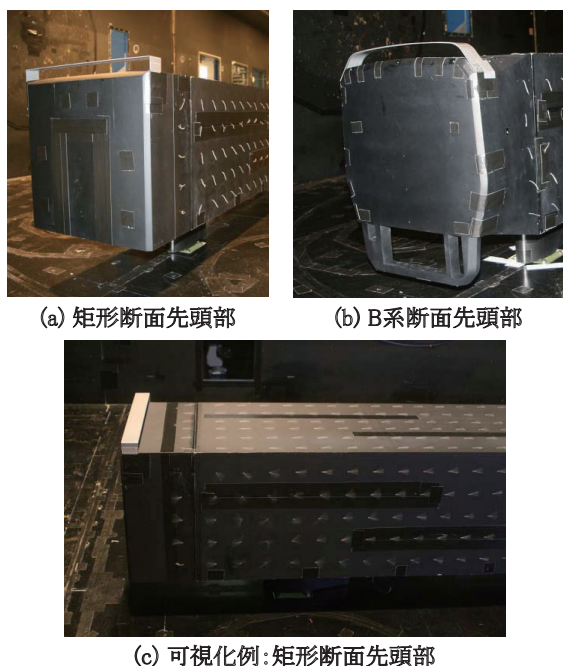


図5 車両模型および可視化例（模型縮尺 1/5）

$Re = 6.2 \times 10^6$ （列車速度 $U=120\text{km/h}$ ，車体幅 $W=2.8\text{m}$ ）の約 1/3 の大きさである。

3.2 結果と考察

流れのはく離の有無は、車両表面のタフトの動きから判定した。本試験では、タフトが主流方向を向いている場合をはく離無しの領域、タフトが主流と逆方向または主流方向以外を向いている領域をはく離領域とそれぞれ見なす。

図 5 (c) に可視化結果例を示す。図 5 (c) は (a) の整流板と同じものであり、前述のように整流効果が最も高い形状例である。図 5 (c) より、上面のタフトは流れ方向にほぼ沿って真直ぐに並んでおり、整流板の長さとしき間を適切に設定すると、車両上面のはく離を効果的に抑制できることが確認できる。ちなみに、無対策である側面部分のタフトは、約 5 列目 ($1.18W$) 付近まで大きく乱れていることから、はく離領域が車体幅程度まで広がっていると推定される。なお、空気抵抗係数 C_d ($=D/(\rho U^2 A_d^2/2)$ ，ここで、 D : 空気抵抗、 A_d : 車両断面積) は、整流板有りと無し（無対策）の場合で高々 1～2% の差であり、 C_d の変化はほとんど認められなかった。一方、フィンを上面に設置した場合、無対策と比較して C_d は 9% 減であり低減効果が認められた。この差から、整流板とフィンによる流れ場のはく離抑制のメカニズムは異なることが示唆される。これについては次章で考察を行う。

本風洞試験の結果、整流板を車両上面に追加設置することにより、車両上面の流れのはく離が効果的に抑制可能であること、また、その場合の整流板形状は、実物換算のすき間 $L_2=200\text{mm}$ で、長さは $L_x=300 \sim 500\text{mm}$ の範囲にあることが確認された。

4. 現車試験

4.1 試験概要

現車と風洞模型では、先頭部の詳細形状や、レイノルズ数など様々な条件が異なる。そこで、現車の先頭部上面に整流板を仮設して走行試験を実施し、流れのはく離抑制、圧縮波の圧力の振幅 Δp および圧力勾配最大値 $(dp/dt)_{\max}$ の低減効果を検証した。試験条件は、既報¹⁾ とほぼ同じである。試験に用いた車両は B 系 2 両編成で、図面から読み取った投影断面積 $A_d^2=8.9\text{m}^2$ （床下機器部分および上面のクーラー部分を含む）である。

整流板の形状は図 6、図 7 に示すように、I および II の 2 種類とし、整流板 I は、長さ $L_x=300, 400, 500\text{mm}$ の 3 種類、整流板 II は、長さ $L_x=440\text{mm}$ の 1 種類の合計 4 種類について試験を行った。整流板 I および II のすき間は $L_2=200\text{mm}$ に固定した。なお車体幅 2.8m を基準とした場合、200mm～500mm の無次元長さは 0.07～0.18 となる。整流板 I は、図 6 (a) および図 7 (b) に示すように、その長さが均一で、かつ、取付位置が車両側面の面取り（斜め）部分に接続している。一方、整流板 II は、図 6 (b) および図 7 (c) に示すように、車両正面から上面へ向かう流れを、整流板と車体とのすき間に整流板 I よりも多く取り込むため、整流板の先端部を車両前面と同一面まで前方へ伸ばし、かつ、すき間の幅（まくらぎ方向の長さ）を車両限界一杯まで広げ、車両側面とほぼ連続に接続するように車体に取り付けた。

流れのはく離抑制効果を確認するためタフトによる流れの可視化を行った。タフトは毛糸（並太、アクリル 100%、赤色）を利用した。両先頭部周辺の上面、約 6m の範囲に 50cm 間隔、5 行×12 列＝60 点で、毛糸の可動長さが約 25cm となるようにアルミテープで毛糸を貼りつけた。図 7 (c) 整流板 II の場合のみ整流板上にもタフトを貼りつけた。そして、車両上面が見渡せる車外位置から静止画および動画を撮影した。

試験を実施したトンネルは単線バラスト軌道トンネルで両坑口とも新幹線のようなトンネル緩衝工は設置されていない。トンネル長は約 190m、断面積 A は約 18.5m^2 であり、図面の投影断面積から求めた列車・トンネル断面積比 R_d ($=A_d^2/A=8.9/18.5$) は 0.48 である。トンネル内の圧力について、トンネル突入側の坑口から 96m のトンネル内に圧力計（ST 研究所製 PD80HA）を設置した。測定では各形状条件にて、トンネル突入速度 $U=110\text{km/h}$ と 95km/h で各 3 本ずつ、計 6 本のデータを取得した。

過去の現車試験²⁾ において上面および側面の両方にはく離抑制効果のあったフィンについて、上面のみに設置した場合（図 6 (c)）の結果も図 7 (d) に併せて示す³⁾。

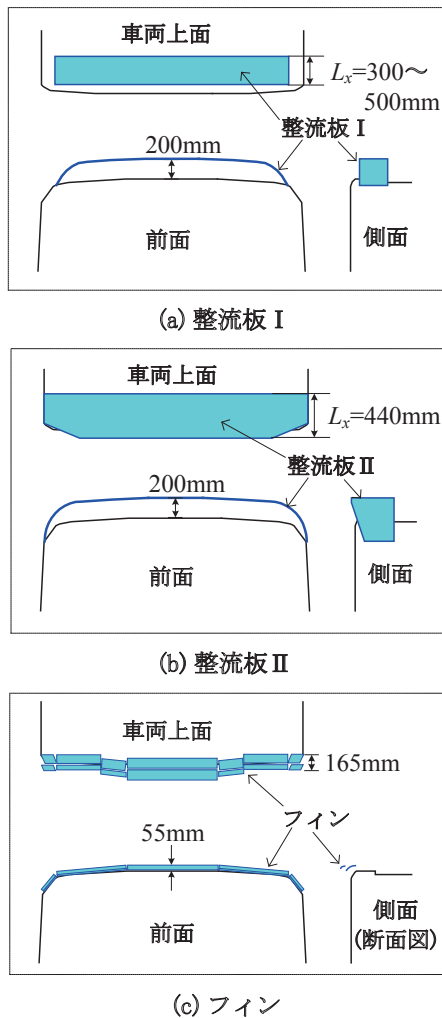


図6 現車試験の整流板とフィンの概形

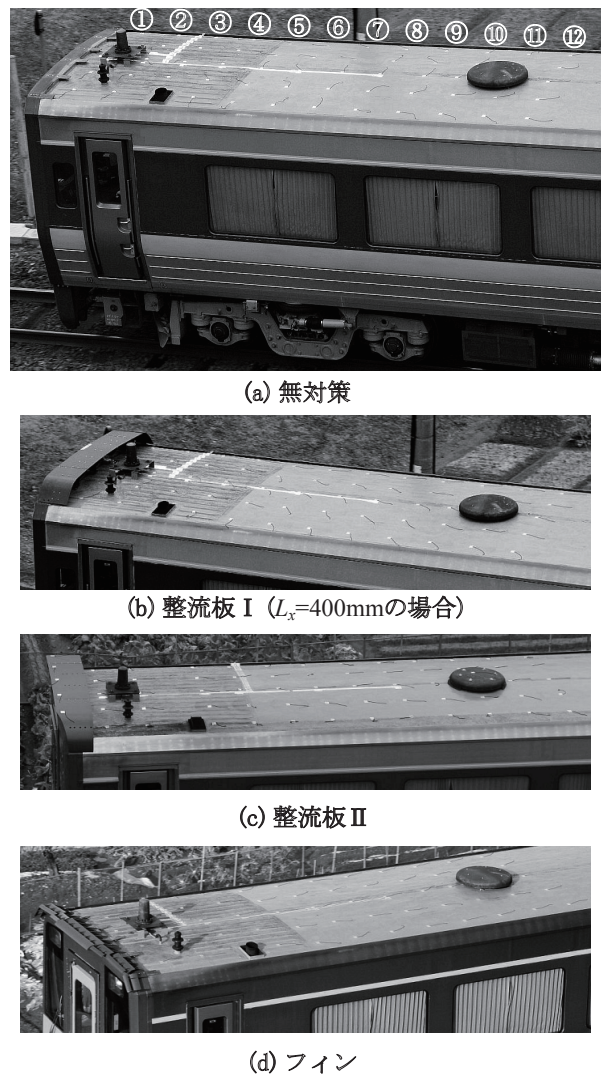


図7 タフトによる可視化結果例（現車試験）

4.2 結果

4.2.1 流れの可視化

図7 (a) ~ (d) に可視化結果例を示す。可視化写真のタフトの動きから、流れのはく離の大きさを見積る。図7 (a) 中の数字①~⑫はタフトの列番号を示す。

無対策の場合、図7 (a) よりタフトの9列目、すなわち先頭からの距離4.5m（車体幅 W の1.5倍）程度の範囲までに貼られたタフトの多くが、列車への接近流方向以外を向いている。このことから、列車先端から $1.5W$ 程度の範囲にかけて流れが大きくはく離していると考えられる。このはく離の（定常的な）大きさについては、前述の風洞試験の可視化結果とほぼ一致していることを確認している。

整流板 I または II を設置した場合、図7 (b), (c) より、部分的に6列目（ $1.07W$ ）程度まで接近流とは異なる方向のタフトが存在することから、先頭部上面のある範囲において流れのはく離が存在すると推定される。また、整流板 II 上のタフトが横方向を向いており、整流板先端部から流れのはく離していることが示唆される。この整流板上のはく離は整流板 I の場合でも発生していると考えられる（なお、整流板 II（図7 (c)）の試験時、降雨

によりタフトや車両上面が水に濡れたため、タフトが流れに十分に追従していない可能性がある）。

フィンを設置した場合、図7 (d) の全てのタフトが接近流とはほぼ同じ方向を向いていることから、大きなはく離は存在しないと考えられる。

4.2.2 トンネル内の圧縮波の圧力勾配

図8に、測定データを平均して算出した圧力勾配最大値 $(dp/dt)_{max}$ の無対策を基準とした比を示す。整流板 I ($L_x=400mm$)、II ではそれぞれ8%増および8%減、フィンでは26%減となる。以上から、整流板 II またはフィンをB系先頭部上面に設置することにより、 $(dp/dt)_{max}$ の低減が可能であることが確認される。

4.3 考察

4.3.1 現車試験と風洞試験における整流板のはく離抑制効果比較

現車試験における整流板の可視化結果（図7 (b), (c)）より、整流板 I、II 共に流れのはく離抑制効果はある程

特集：環境技術

度認められるものの、依然として一定の大きさのはく離が車両上面および整流板上の両方に存在するように見える。これは大きなはく離が車両上面に存在しないとする風洞試験（図5）とは異なった結果となっている。現車の可視化結果より、特に整流板Ⅰについて、1～2列目のタフトが列車への接近流と異なる方向を向いており、整流板Ⅰと屋根とのすき間へ接近流がスムーズに流れ込んでいないことが確認される。この流れが滞っている原因は、風洞模型と現車の詳細形状の違いや、レイノルズ数の違いなどによる可能性が考えられる。この現車試験と風洞試験の差異は今後の研究課題である。

4.3.2 整流板ⅠとⅡの比較

圧力勾配最大値は、整流板Ⅰでは増加し、整流板Ⅱでは減少する（図8）。この差は、整流板Ⅰ、Ⅱの流れのはく離抑制効果の差に起因すると考えられる。1～2列目のタフトの向きは、接近流の方向と整流板Ⅰでは異なるが、整流板Ⅱではほぼ同方向である。ゆえに、整流板ⅠよりもⅡの方が、接近流が屋根とのすき間へスムーズに流れていることが確認される。整流板ⅠとⅡの形状の主な違いは、前述のように、整流板Ⅱは、整流板Ⅰと比べて、整流板の先端部を車両前面と同一面まで前方へ伸ばし、かつ、すき間の車体幅方向の幅を車両限界一杯まで広げている。この違いにより、整流板ⅠよりもⅡの方が、車両正面から上面へ向かう流れを整流板と車体とのすき間により多く取り込むことで、無対策時よりもはく離領域の大きさが小さくなる、すなわち見かけの断面積が減り、その結果、圧力勾配最大値が減少したと推定される。

4.3.3 整流板とフィンの比較

可視化結果などから、整流板またはフィンが設置された車両前面周りの流れは、それぞれ次のようになっていると考えられる。整流板は、車両前面に当たった流れが前面端部からはく離した直後を板でせき止めて、整流板と屋根面とのすき間に流れを導き、はく離がそれ以上大きくならないように整流する。しかし、整流板先端部から新たに流れのはく離が発生する（図7(c)）。一方、フィンは、車両前面からフィン本体を若干前方向に突き出す（実物で100mm程度）ことで、車両前面に当たった流れを前面端部で捕らえ、フィンの湾曲により強制的に流れを屋根と平行に向きを変える。この流れの向きが変わるときフィンの上面が負圧になると考えられ、この負圧が、前章で述べた車両の空気抵抗低減の主原因と推測される。以上のことから、フィンの方が整流板よりも流れのはく離抑制効果が高く、そのため、圧力勾配最大値および空気抵抗がより減少したと考えられる。

5. まとめ

本研究では、列車のトンネル突入時に形成される圧縮

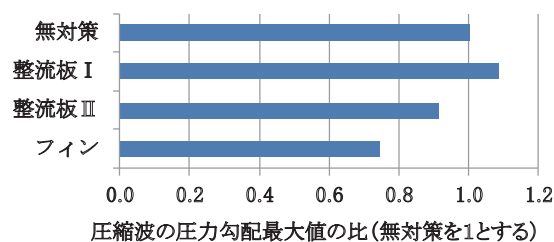


図8 圧縮波の圧力勾配最大値の比

波の圧力の振幅 Δp および圧力勾配最大値 $(dp/dt)_{max}$ を低減することを主な目的として、切妻型車両上面における流れのはく離抑制のための整流板形状を検討した。まず、模型発射実験を行い整流板の Δp および $(dp/dt)_{max}$ の低減可能性および整流板の概形について検討した。その後、大型風洞試験を実施し、現車に設置可能な具体的な整流板形状を検討した。そして、大型風洞試験で得られたはく離抑制効果の高い整流板（形状Ⅰ、Ⅱ）を現車に仮設して走行試験を実施し、流れのはく離抑制、 Δp および $(dp/dt)_{max}$ の低減効果を検証した。さらに、過去の現車試験²⁾において先頭部の上面のみにフィンを設置した場合³⁾との比較を行った。その結果、本実験条件下において、整流板よりもフィンの方がはく離抑制効果は高いこと、また、 $(dp/dt)_{max}$ は無対策時を基準として、整流板（形状Ⅱ）では8%減、フィンでは26%減になることを確認した。

謝辞

現車試験実施およびデータの提供にご協力いただいた西日本旅客鉄道株式会社に感謝の意を表します。

文献

- 1) 佐久間豊, 宮地徳蔵, 福田傑, 鷹崎徹: 切妻型車両のトンネル突入時に発生する圧縮波 (第1報, 圧縮波の性状と地上側低減対策法), 日本機械学会論文集C編, Vol.76, No.770, pp.2472-2479, 2010
- 2) 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), 日本機械学会論文集C編, Vol.76, No.770, pp.2480-2486, 2010
- 3) 佐久間豊: 在来線車両先頭部の空力特性向上策, JREA, Vol.54, No.11, pp.36385-36388, 2011
- 4) 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
- 5) 田中靖幸, 飯田雅宣, 菊地勝浩: 単純な形状の模型を用いてトンネル突入時の圧縮波形成を模擬する方法: 列車中心軸の偏心と地面の影響, 日本機械学会論文集B編, Vol.69, No.683, pp.1607-1614, 2003
- 6) 小沢智: トンネル出口微気圧波の研究, 鉄道技術研究報告, No.1121, 1979