

在来線車両先頭部における流れのはく離抑制に関する風洞実験

佐久間 豊* 井門 敦志*

Wind Tunnel Experiments on Reducing Separated Flow Region around Front Ends of Cars of Narrow Gauge Railway Lines

Yutaka SAKUMA Atsushi IDO

Separated flow around the front end of a 1/5th model car is examined by tuft visualizations and measurement of surface pressure distribution and aerodynamic drag. The front edge of the car is changed variously in size and shape in the experiments. We confirmed from the results of the experiment that the shapes with the edges rounded by circular or elliptic arcs effectively reduce the separated flow and that they can be used as a design guide for the front ends of cars of narrow gauge railway lines. The advantage of the large-scale wind tunnel experiments on the separated flow is clearly shown by comparing the results with those previously obtained from the small-scale wind tunnel (1/20th model).

キーワード：風洞，はく離，在来線，切妻，可視化，圧力分布，空気抵抗

1. はじめに

在来線の切妻型先頭部^{1), 2)}で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，空気抵抗，通過時圧力変動，トンネル突入時の圧力変動（特に単線の狭小トンネル区間）などが増大する傾向にある。この増加の原因は，切妻型先頭部からの流れのはく離が大きく影響していると考えられる。

在来線車両のような箱形車体の端部からの流れのはく離については，バスやトラックなどの自動車を含めて，いままで多くの研究がなされてきた^{3)~8)}。これまでに，大きなはく離を抑制する箱形車体の端部の形状について，次の様なことが分かっている。(1) 成形部の大きさが，車体の幅または高さの約10%になると，大きなはく離が抑えられる。そして，レイノルズ数（物体周りの流れの状態を表す無次元数）が大きくなるに従い，はく離抑制に必要な成形部の大きさは数%程度まで減少する。(2) 成形部の形状は，丸み半径が上流側で小さく，下流側で大きくなるようなものはく離抑制に有効である。

これまでの車両に関する研究では，高レイノルズ数（実物の3分の1程度）条件下で，先頭部の上辺または側辺の成形部長さと形状を系統的に変化（図1，図2）させ，かつ車両表面の可視化を行い，圧力および空気抵抗を同時に測定した例はあまり見当たらないようである。そこ

で，本研究では，風洞実験を実施し，流れのはく離を効果的に抑制する先頭部形状の検討を行った。タフト（気流糸）法による空気流れの可視化，表面圧力分布，および，空気抵抗の測定により，1/5縮尺車両模型の先頭部周りのはく離の様子を調べた。模型では，先頭部の上辺および側辺の断面形状，成形部長さ等を変化させた。

2. 実験概要

2.1 風洞および模型

実験には大型低騒音風洞（密閉洞，測定部幅5m×高さ3m×長さ20m，鉄道総研風洞技術センター内）を使用した⁹⁾。測定項目は，タフト法による可視化，表面圧力分布，および，空気抵抗である。実験風速は模型の強度等を考慮して50m/s（一部10m/s）に設定した。車両模型の幅 $W=560$ mmを代表長さとしたレイノルズ数は $Re=1.9 \times 10^6$ （ $Re=UW/\nu$ ，風速 U ，模型幅 W ，空気の動粘性係数 ν ）である。この値は，現車（実物の車両）のレイノルズ数 $Re=6.2 \times 10^6$ （列車速度 $U=120$ km/h = 33.3 m/s，現車幅 $W=2.8$ m）の約3分の1の大きさである。閉塞率は約2.1%（ $A_{\text{車両}}/A_{\text{密閉洞}}=0.56 \times 0.56 / (5.0 \times 3.0)=0.021$ 。ここで， $A_{\text{車両}}$ ：車両模型の投影断面積， $A_{\text{密閉洞}}$ ：密閉洞の断面積）である。車両模型の上流側で発達する風洞床面境界層の実験への影響を少なくするため，境界層吸い込み装置（車両前面より350mm上流位置）を常に稼働させた。

* 環境工学研究部（空気力学）

特集：環境技術

図1に模型の概要を示す。縮尺は1/5である。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、 $0.5W \sim 6.5W$ の部分は天秤上に固定する構造である。 $6.5W \sim 7W$ の部分は後端で、角部の丸み $r = 0.107W$ (r : 円弧半径) の後尾部とした。図2に先頭部の断面形状一覧を示す。先頭部は、上辺および側辺の断面形状、成形部長さを様々に変化させた。角部の形状は、角、1/4円弧、1/4楕円弧 30° 、直線 30° とする(なお、角度を 30° としたのは、過去の研究^{4)~8)}より 30° 程度ではく離が少ないことが分かっているからである)。成形部の車体長方向の長さを a 、車体幅方向の長さを b 、また、車体幅 W を基準とした無次元成形部長さをそれぞれ a/W 、 b/W とおく。円弧の場合は、 $a = b = r$ となる。さらに、突起物を先頭部前面に取り付ける方法も検討した。突起物の断面形状は上記と同じ1/4楕円弧 30° と直線 30° (三角形断面) の2種類とした。

2.2 測定項目

車両に働く空気抵抗は、ピラミッド天秤(島津製作所製ピラミッド形ロードセル式六分力天秤)で測定した。図3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、密閉胴床面に装備された天秤部に固定した。空気抵抗係数 C_D は、 $C_D = D / (0.5 \rho U^2 A_{車両})$ で定義する。ここで、 D : 抗力 (N)、 ρ : 空気密度 (kg/m^3) である。抗力の測定では、サンプリング周波数は10Hzで、1回の収録で10秒間のデータを収録した。なお、空気抵抗は、支柱の空気抵抗分も含んでいる。

車体表面の圧力分布測定のため、図3に示すように、圧力孔を車体の前面および後面に各3点、上面(屋根面)および側面に各40点、合計86点設置した。圧力孔は内径1.0mmの真ちゅう製パイプを車体表面に埋め込み、ウレタンチューブで多点圧力計(PSI社製ESP-16BP)に接続した。圧力係数 C_p は、 $C_p = (p - p_0) / (0.5 \rho U^2)$ で定義する。ここで、 p : 圧力 (Pa)、 p_0 : 大気圧 (Pa) である。圧力の測定では、サンプリング周波数は1.25kHzで、1回の収録で10.24秒間のデータを収録した。

タフト(綿糸30番を使用)により車体表面の流れを可視化した。タフトは、車体表面(屋根面および側面)に小さな穴を開けてタフトを差し込みボンドで固定した。流れの様子は、デジタルカメラおよびデジタルビデオカメラで記録した。タフトの動きを捉えるため、カメラのシャッター速度は1/20秒に設定した。

本実験では、タフトの動きに応じてはく離領域を次のように定義する。タフトが流れと逆方向を向いている領域をはく離領域、タフトが流れ方向(順方向)を向いている場合ははく離無し領域、その間にあるタフト位置を再付着領域として、それぞれ定義する。なお、タフトが設置されていない先頭部端部近傍で微小なはく離領域

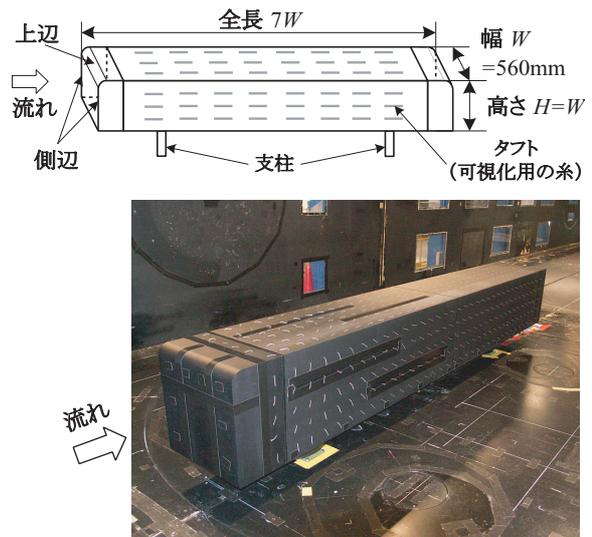


図1 風洞実験用車両模型

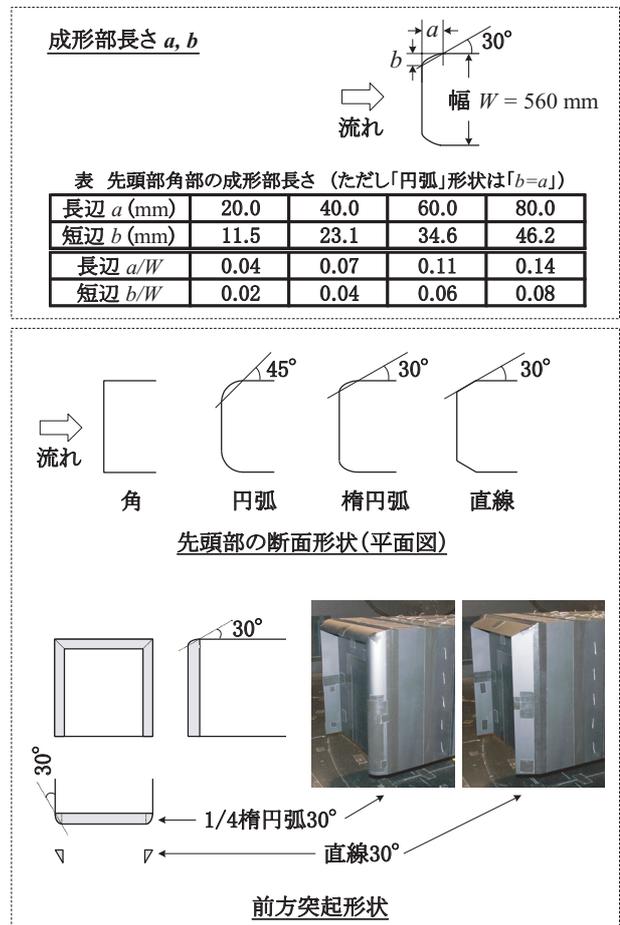


図2 模型先頭部形状

が存在する場合や、また、3次元はく離の場合、必ずしもはく離領域で逆流しているとは限らない。しかし、本実験では、そのようなはく離領域を捉えることは困難であるので、本報告内では、タフトが順方向の場合は「はく離無し」と記述している。

3. 実験結果

3.1 タフト法による可視化と圧力分布

3.1.1 タフト法による可視化

タフトの動きから、はく離の有無等、車体周りの流れの様子を判定する。図4(a)に、先頭部の上辺が円弧半径 $r = 40 \text{ mm}$ ($= a = b$)、側辺が角の場合の可視化写真を示す（以下、先頭部形状を「上辺=円、側辺=角、 $b/W = 0.07$ 」または「円、角、 $b/W = 0.07$ 」のように表す）。この可視化写真を例に先頭部周りの流れの様子を説明する。上面のタフトは、流れ方向（順方向）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ことが分かる。一方、側面のタフトは、上面とは異なり、乱れている。側面のタフトの向きは、屋根付近、中央部、床下付近でばらつきがあるものの、概ね次のようになっている。先頭から1～3列目（先頭部からの距離 $0.41 \sim 0.82W$ 、以下同様）では流れと逆方向に、4～6列目（ $1.0 \sim 1.36W$ ）では逆方向から順方向へ変化し、そして、7列目（ $1.54W$ ）以降は順方向に、それぞれ向いている。これらのタフトの変化より、先頭部側面の角部から流れがはく離しており、タフトの6列目（ $1.36W$ ）付近で再付着していると判断出来る。以上のようにして、他の先頭部形状でもタフトの可視化写真から流れの様子を調べることが出来る。図5に可視化結果の代表例を示す。図5(a)～(f)の先頭部形状の違いによる流れの相違については4.1節で考察する。

3.1.2 圧力分布

図4(b)および(c)に圧力係数 C_p の分布の例を示す。図4(b)に、全ての圧力孔の C_p を、図4(c)に上面および側

面の C_p の分布を、先頭部からの距離により示す。図より車両全体の圧力変化の様子を説明する。先頭部前面は流れがせき止められるため前面にある3つの圧力孔の C_p は約 1.0 を示す。上面および側面の先頭部付近は、はく離の有無に関わらず、先頭部周りで空気の流れの向きが変化するため、流れ方向の各列の圧力孔の先頭側1番目（ $0.36W$ ）から4番目（ $1.0W$ ）にかけて、 C_p は負圧（ $C_p \leq -0.5$ ）から0付近へ増加する。そして、中間部から後尾部にかけて流れは車体表面に沿って流れるため、圧力孔6番目（ $1.89W$ ）から20番目（ $6.64W$ ）までほぼ $C_p = 0$ のまま推移する。後面の3つの圧力孔の C_p は負の値（約 $-0.1 \sim -0.2$ ）であることから、流れが後尾部に達すると後尾部の角部（丸み $r = 0.107W$ 有り）からはく離していると推測される（なお、「上面中心」19番目の圧力孔のデータは欠損）。

3.1.3 タフト法による可視化と圧力分布との関係¹⁰⁾

ここでは図4(a)の可視化結果と図4(b), (c)の C_p 分布結果とを比較することにより、車体周りの流れの様子と C_p 分布との関係を検討する。図4(a)のタフトの可視化写真より、車体の上面は、はく離無し、側面は、はく離有りであることが分かった。はく離が存在しない上面と、はく離が存在する側面の C_p 分布を比較すると、先頭側1～6番目の圧力孔位置の C_p に差が認められる。先頭部近傍の圧力孔1～3番目の C_p は、はく離が無い上面よりも、はく離の有る側面の方がより大きな負圧を示す（なお、先頭部端部にもっと近い、圧力孔が設置されていない部分は、負圧のピークがより大きい可能性が高い）。そして、はく離の有る側面では、圧力孔3番目から4番目にかけて、 $C_p = 0$ 付近へ急激に増加して、圧力孔5番

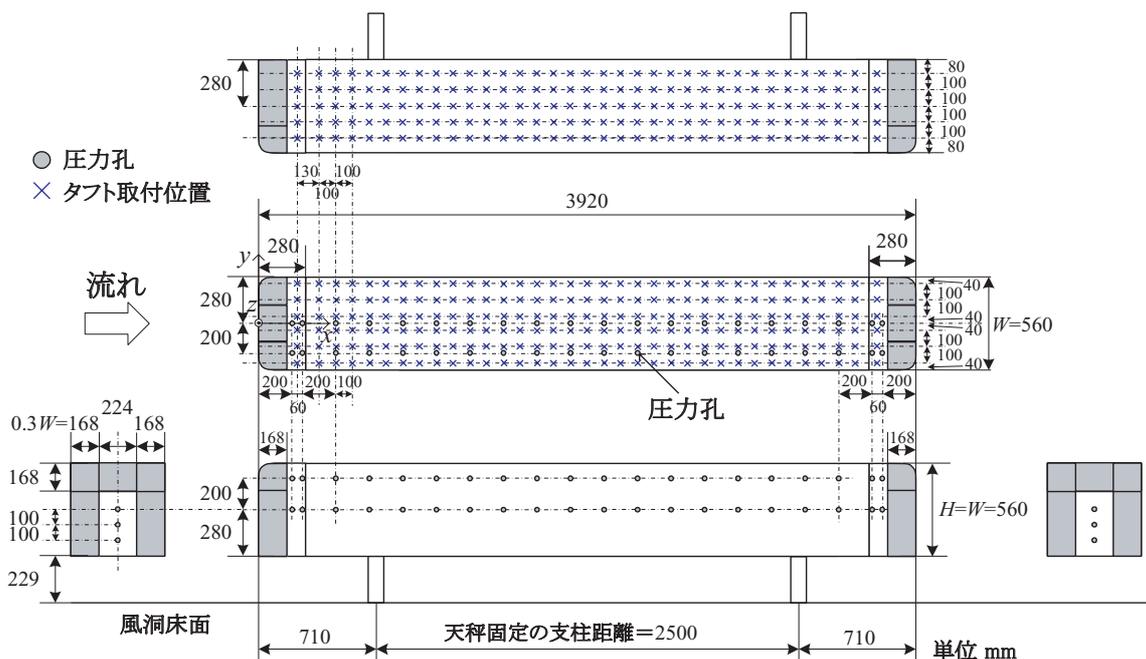


図3 圧力孔とタフト取付の位置

特集：環境技術

目では C_p は正の値になる。圧力孔5番目の位置は、タフトの7列目に相当する(図3)。ところで、前述のタフトの可視化結果より、6列目付近で流れが再付着すると判定出来た。ゆえに可視化結果と C_p 結果の比較より、本実験条件下においては、このように C_p が急激な変化を示す範囲(上記の場合、圧力孔5番目付近)までの距離がはく離の流れ方向の大きさ(長さ)の目安になると考えられる。他の試番でも同様の検討が可能である。

3.2 空気抵抗

図6に、先頭部形状変化が空気抵抗係数 C_D およびはく離に及ぼす影響を示す。横軸は、車体幅 W を基準とした無次元成形部長さ b/W である。図6中に、図4、図5の上面および側面のはく離の有無を示す概念図を付記した。「上辺=角、側辺=角、 $b/W=0$ 」の場合(図5(a))、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ており、 C_D は約0.97と最大値をとる。成形部長さが長くなるにつれて、はく離領域は小さくなり、 C_D は減少する。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 はほぼ一定値になる。特に、 C_D が0.4程度のとき、図5(c)、(e)のタフトの動きから判定出来るように、はく離領域が無くなっていることが分かる。これらの結果から、各車両の C_D を比較することで、タフトの可視化の結果を利用しなくても、各先頭部のはく離領域の大小が把握可能であることが確認出来る。ところで、冒頭で述べたように、はく離により見かけの車両断面積が増大すると、トンネル突入時の圧力変動の大きさなども増大すると考えられる。以上を考え合わせると、可視化などによりはく離等の流れの状態を把握しなくとも、実物の車両の C_D を比較することで、トンネル突入時の圧力変動の大きさなどの増大を各先頭部ごとに関連付け出来る可能性があることが分かる。

4. 考察

4.1 先頭部形状変化がはく離と空気抵抗に及ぼす影響
先頭部形状変化がはく離有無および空気抵抗に及ぼす

影響について図4、図5、図6より考察する。

最初に、上辺および側辺の断面形状が「円」の場合と比較する。図6において、◎○●マークが「円」に対応する。図6より、◎○●マークは、 $b/W=0.07$ 程度以上でどの場合も C_D がほぼ一定値となる。上辺および側辺の断面形状がともに円の場合(図6◎、図5(c))が最も小さい $C_D=0.43$ 程度をとり、次が側辺のみ成形部がある場合(図6○、図5(b))で $C_D=0.55$ 程度、そして、上辺のみ成形部がある場合(●、図4)の $C_D=0.75$ 程度の順で大きくなる。これらの結果より、上辺および側辺のすべての辺に成形部を持つことが C_D 低減に最も効果的であること、また、上辺だけの成形部よりも、側辺に成形部を持つことのほうが C_D 低減に効果があることが分かる。これは、図4、図5より、はく離領域が上辺は一面のみであるが側辺は左右二面であり、はく離領域の大きさが異なるためである。

断面形状が「円」と「楕円」の場合、図5の(c)「上辺=円、側辺=円、 $b/W=0.07$ 」と(e)「上辺=楕円、側辺=楕円、 $b/W=0.04$ 」を比較する。図6より両方ともほぼ同じ $C_D \approx 0.4$ である。車体長方向 a は(c)、(e)ともに同じ長さ $a/W=0.07$ であるが、車体幅方向 b は、楕円である(e)の方が短い。このことから、円または楕円の丸みがある場合、車体長方向に一定の長さを確保しておけば、車体幅方向の形状長さを短く出来ることが分かる。これは、車両の設計時に、運転室内に若干の余裕が生まれることを意味する。

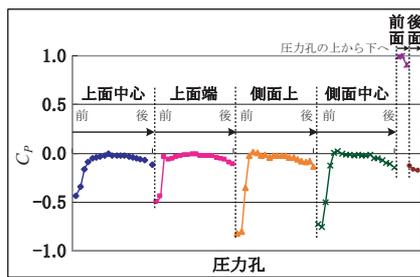
断面形状が「直線」と「楕円」の場合、図5の(d)「上辺=直線、側辺=直線、 $b/W=0.04$ 」と図5(e)「上辺=楕円、側辺=楕円、 $b/W=0.04$ 」を比較する。この2ケースは $(a/W, b/W) = (0.07, 0.04)$ でともに同じ長さであり、形状のみが「直線と楕円」で異なる。図5より、(d)ではく離有り、(e)ではく離無しである。また、図6より、図5(d)、(e)に対応する C_D は、それぞれ0.76、0.42である。このことから、「直線」よりも「楕円」形状の方がはく離抑制効果が高いことが分かる。

ここまでは「角部を丸めた」形状について比較した。次に「前方突起」形状(図2)について比較する。

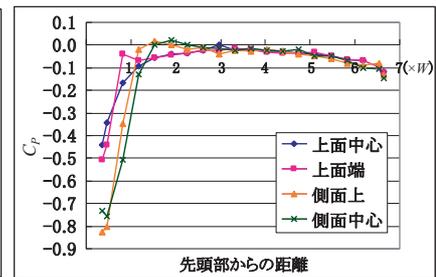
前方突起の二つの形状、「直線」(図6中、◆)と「楕円」



(a) タフトによる可視化



(b) 圧力係数 C_p 分布



(c) 圧力係数 C_p 分布(上面と側面)

図4 タフトによる可視化および圧力係数 C_p 分布の例：「上辺=円、側辺=角、 $b/W=0.07$ 」の場合

(▲)を比べると、同じ成形部長さ b/W では、「直線」(◆)よりも「楕円」(▲)の方が C_D が小さく、「楕円」のはく離抑制効果は「直線」よりも高いことが分る。

「前方突起」形状(◆,▲)と「角部を丸めた」形状(◆,▲)とを比較する。同じ成形部長さ b/W では、「前方突起」形状(◆,▲)の方が「角部を丸めた」形状(◆,▲)よりも C_D が大きく、「前方突起」のはく離抑制効果は、「角部を丸めた」場合よりも低いことが分る。なお、可視化結果より、本実験の前方突起形状のうち、楕円(▲)で成形部長さ $b/W=0.083$ 程度の条件の時のみ、上辺および側辺ともにはく離による逆流領域が存在しないことを確認した。このときの C_D は約0.5であり、角部を丸めて「はく離無し」とした場合(▲)の様に $C_D=0.4$ までは減少しない。

以上より、今回検討した先頭部の中で、はく離を最も効果的に抑える先頭部角部の断面形状は楕円弧(▲)であり、その成形部長さは、車体幅 W を基準として、車体幅方向に $b/W=0.04(=23.1\text{mm}/560\text{mm})$ 程度、車体長方向に $a/W=0.07(=40\text{mm}/560\text{mm})$ 程度以上が必要であることが確認出来る。

4.2 大型風洞実験の特長

4.2.1 風速変化によるレイノルズ数変化の影響

図5の(e)「上辺＝楕円，側辺＝楕円， $b/W=0.04$ ， $V=50\text{m/s}$ 」と(f)「上辺＝楕円，側辺＝楕円， $b/W=0.04$ ， $V=10\text{m/s}$ 」を比較する。流れが 10m/s から 50m/s へ変化

すると、タフトの動きの乱れが少なくなり、はく離領域が消滅することが確認出来る。この理由は、流速が $10\text{m/s}(Re=3.7\times 10^5)$ から $50\text{m/s}(Re=1.9\times 10^6)$ へ大きくなるとレイノルズ数が5倍大きくなり、先頭部の丸みを持つ端部での流れの状態が変化するためである。このことから、本実験条件においては、 $Re=3.7\times 10^5\sim 1.9\times 10^6$ の範囲でのレイノルズ数変化が、流れの状態に重要な影響を及ぼすことが分かる。ところで、冒頭で述べたように、レイノルズ数は物体周りの流れの状態を表す無次元数であり、風速 U と代表長さ W に比例する($Re=UW/\nu$ ，風速 U ，模型幅 W ，空気の動粘性係数 ν)。そこで次に、風速だけでなく模型寸法も異なる場合のレイノルズ数の影響について検討する。

4.2.2 過去の小型風洞による実験結果⁴⁾との比較

過去に実施した小型風洞(密閉洞，測定部幅 $0.72\text{m}\times$ 高さ $0.6\text{m}\times$ 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実験結果を図7に比較して示す。小型風洞実験において、模型縮尺は $1/20$ ，実験風速は 40m/s である(小型風洞実験では流れの可視化は実施していない。また、図中に示すように、車体の先頭部分のみの空気抵抗を測定した)。車両模型幅を代表長さとしたレイノルズ数は、4.2.1項の「 $V=10\text{m/s}$ 」の場合と同じく $Re=3.7\times 10^5$ であり、今回の大型風洞実験のレイノルズ数($Re=1.9\times 10^6$)の約5分の1である。両実験では、先頭部両側辺の断面形状を楕円弧とし、その大きさを変化させて車体幅方向の成形部の長さ b と抵抗係数 C_D の関

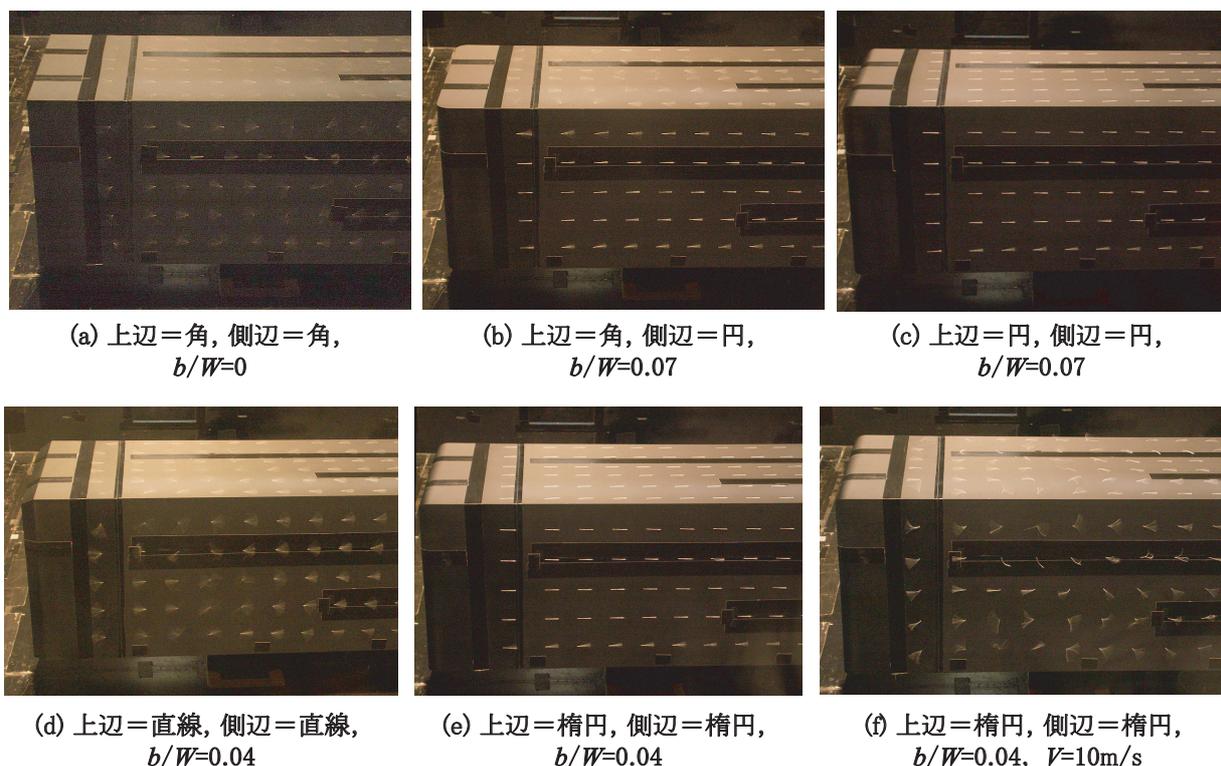


図5 可視化結果 ((a)～(e)は全て $V=50\text{m/s}$ ，(b)～(f)は全て $a/W=0.07$)

特集：環境技術

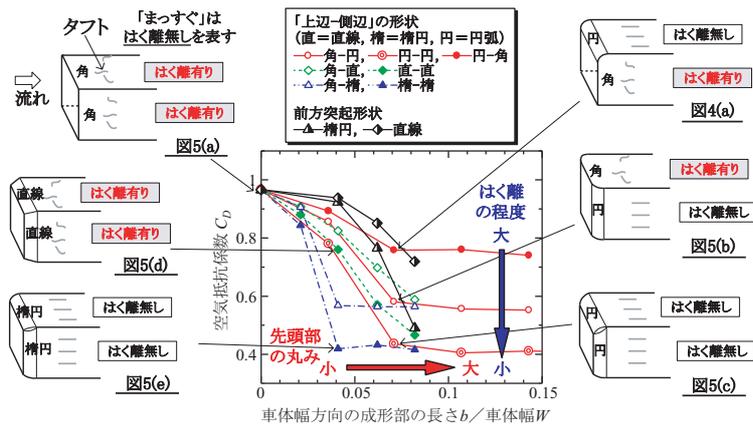


図6 先頭部形状変化が空気抵抗係数およびはく離に及ぼす影響

係を求めた。車体幅 W で無次元化した成形部長さ 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る。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車体幅方向の成形部長さ b_{\min} は、小型風洞実験では 90 cm 程度、大型風洞実験では 15 cm 程度（ただし、車体長方向には $a_{\min} = 0.07 \times 3 = 21 \text{ cm}$ 程度）と換算される。実際先頭部設計・改良を考えた場合、これは大きな差であると考えられる。このように、レイノルズ数により b_{\min} / W の結果が大きく異なることから、滑らかな表面からのはく離現象把握に関する大型風洞実験の優位性が確認出来る。なお、現車と大型風洞実験のレイノルズ数を比較すると、現車の方が 3 倍大きいことから、上述の考察より、現車の C_D を最小にするのに必要な成形部長さ b_{\min} および a_{\min} は大型風洞実験の結果よりも小さくなる可能性がある。

5. まとめ

本実験では、流れのはく離を効果的に抑制する車両先頭部形状の検討を行った。タフト法による可視化、表面圧力分布および空気抵抗の測定により、1/5 縮尺車両模型の先頭部周りのはく離の様子を調べた。模型は、先頭部の上辺および側辺の断面形状、成形部長さ等を変化させた。実験の結果、次のことが確認された。

- (1) はく離を最も良く抑える先頭部角部の断面形状は楕円弧で、その成形部長さは、車体幅 W を基準として車体幅方向に $b/W = 0.04$ 程度、車体長方向に $a/W = 0.07$ 程度以上が必要である。
- (2) 本結果と過去の小型風洞による実験結果とを比較することにより、滑らかな表面からのはく離現象把握に関する大型風洞実験の優位性が示された。これらの結果は過去の研究^{6)~8)}で得られた知見とも

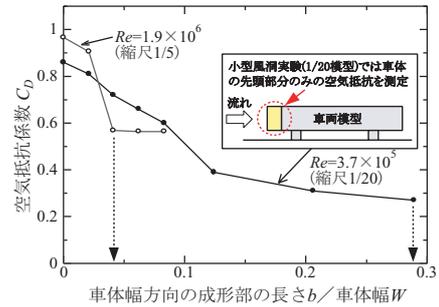


図7 車体前面の車体幅方向の成形部の長さ
と抵抗係数の関係

合致する。今後は、はく離を抑制するために、先頭部にフィンなどの突起物等を設置する対策の検討、はく離領域の大きさと空気抵抗係数との関係の検討、また、先頭部周りのはく離構造の詳細な調査を実施していく予定である。

文献

- 1) 伊原一夫他：鉄道車両と工業デザイン（特集・通勤形車両のデザイン）、電気車の科学、Vol. 38, No. 5, pp.13-33, 1985.5
- 2) 南井建治：鉄道車両デザインの話（5）、鉄道ファン、Vol. 29, No. 11, pp.106-109, 1990.4
- 3) 三木忠直：高速鉄道車両の空気力学的諸問題（1）、機械の研究、Vol. 12, No. 7, pp.17-24, 1960
- 4) 井門敦志：鉄道車両の空気抵抗低減に関する研究、東北大学学位論文、第5章、2003
- 5) Hoerner, S. F., Fluid-Dynamic Drag. Published by the Author, 1958.
- 6) Hucho, W. H., Janssen, L. J., and Emmelmann, H. J., "The Optimization of Body Details-A Method for Reducing the Aerodynamic Drag of Road Vehicles," SAE Paper No. 760185, 1976.
- 7) 農沢隆秀, 佐藤浩：自動車形状を持つにふい物体の空気抵抗低減に関する形状パラメータの研究、日本機械学会論文集（B編）Vol. 58, No. 556, pp.64-75, 1992
- 8) 小林敏雄, 農沢隆秀編, 自動車技術会：自動車のデザインと空力技術（自動車技術シリーズ10）、朝倉書店、1998
- 9) 井門敦志, 善田康雄, 近藤善彦, 松村豪, 鈴木実, 北川敏樹：大型低騒音風洞の基本性能、鉄道総研報告、Vol. 13, No. 12, 1999
- 10) 谷一郎編：流体力学の進歩、乱流、丸善、1980