

# 車両断面形状が 横風空力特性に及ぼす影響の基礎検討

中出 孝次\* 乙部 達志\* 野口 雄平\*

Fundamental Study on the Effect of Cross-sectional Shape  
of Railway Vehicle on Its Side Aerodynamic Force

Koji NAKADE Tatsushi OTOBE Yuhei NOGUCHI

This report presents the basic experimental and numerical examination of the influence of cross-sectional shape of railway vehicles on the side aerodynamic forces with the use of the two-dimensional vehicle models. Side force coefficients were measured in the wind tunnel tests with 1/40<sup>th</sup> scale vehicle models whose roof and shoulder parts have various radii of curvature. In addition, the numerical simulation (large eddy simulation) of the airflow around the vehicle model was conducted to reproduce and investigate the detailed airflow field of the wind tunnel tests.

キーワード：鉄道車両，横風，空力特性，横力，風洞実験，流れの数値シミュレーション

## 1. はじめに

強風時の鉄道車両の安全・安定輸送を実現するためには、横風に対する鉄道車両の空力特性を把握することが重要である。そして、横風を受ける車両に対する空気力の低減対策としては、ハード面からとソフト面からの対策があり、ハード面からは車両形状による対策や防風柵の設置などが考えられ、ソフト面からは運転規制などが考えられる。鉄道車両には様々な種類があることから、横風を受けた時に鉄道車両が受ける空気力の大きさも様々である。また、車両が受ける空気力は、車両の前後、左右、上下の各軸方向の力と各軸周りのモーメントの合計6分力となるが、車両の転覆に影響を与える空気力としては横力の役割が大きい。そこで、ハード面から車両形状による対策として、車両断面形状の違いによる横力の違いを考察する事が本研究の目的である。

本報告では、車両断面形状における屋根部と肩部の曲率半径を系統的に変更したときの横力を調べた風洞実験、そして、風洞実験において特徴的な横力特性が観察された車両断面形状に対して車両周りの流れの様子を考察するために実施した流れの数値シミュレーションについて述べる。

## 2. 風洞実験

### 2.1 実験方法

#### 2.1.1 概要

実験は、鉄道総合技術研究所の小型低騒音風洞の密閉型測定部（高さ 600mm，横幅 720mm，長さ 3800mm）を用いて、屋根部と肩部（屋根部と側面を滑らかにつなぐ曲面部分）の曲率半径が異なる縮尺 1/40 相当の単純な形状の車両形模型に対し、一様流の条件下で行った。また、車両形模型の下部から鉛直方向下側 25mm の位置に地面を模擬した板（以下、地面板とよぶ）を設置した条件（以下、地面板ありの条件とよぶ）と地面板なしの条件で実験を行った。図 1 に設置図を示す。車両形模型の風上側側面から地面板のリーディングエッジまでの距離は 250mm である。ピトー管は、静圧孔の位置がノズル出口から下流方向 31mm となる位置に設置し、ピトー管静圧孔から地面板のリーディングエッジまでの距離は 2362mm である。

車両形模型は、測定車両 1 つと測定車両と同じ 2 次元断面形状を持つダミー車両 2 つからなる。車両形模型の両方の長手方向に密閉型測定部外側までダミー車両を設置し、密閉型測定部外側でダミー車両を支持した。また、測定車両を密閉型測定部外側から 3 分力検出器（日章電機株式会社製、LMC-3891）2 台を用いて支持した。ダミー車両が受ける風は、3 分力検出器に作用せず、測定車両にかかる横力のみ測定出来るようにした。風洞実験の様子を図 2 に示す。

試験風速は 10m/s，20m/s であり、代表長さを車両形模型の鉛直方向高さ 75mm とすると、レイノルズ数は  $5.0 \times 10^4$ ， $1.0 \times 10^5$  である。なお現車のレイノルズ数は、代表長さ 3m，風速 20m/s とすると、 $4.0 \times 10^6$  である。

\* 環境工学研究部 車両空力特性研究室

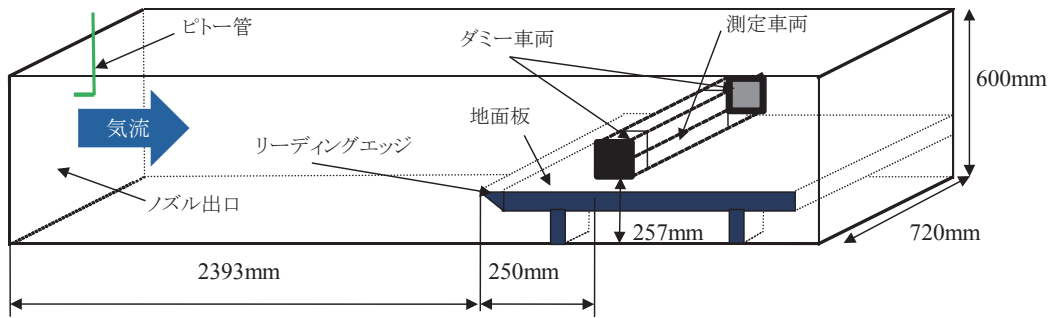


図1 風洞密閉型測定部（高さ 600mm，横幅 720mm，長さ 3800mm）への供試体設置状況

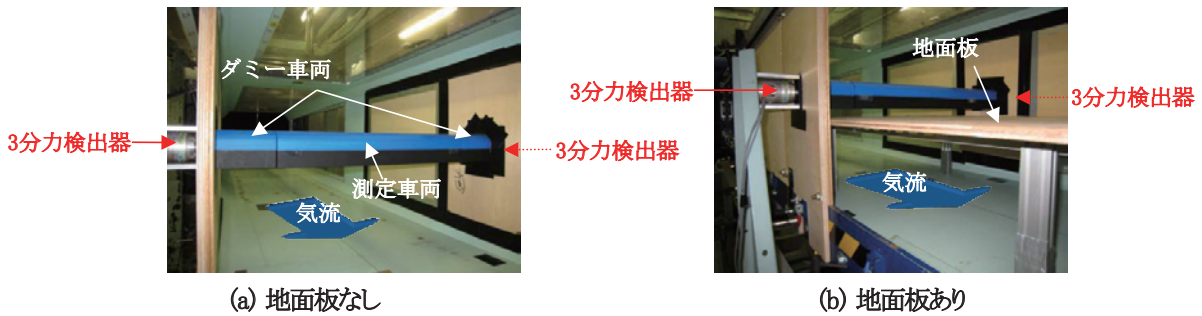


図2 風洞実験の様子

2.1.2 車両形模型

車両形模型の例として、図3に R46s18.9 の車両横断面形状を示す。車両形模型は 11 種類で、肩部がない模型とある模型に大別される。肩部がない車両形模型は、屋根部の曲率半径  $R$  が 35mm（以下 R35 と記す）と角柱模型（以下  $R\infty$  と記す）の 2 種類である。また、肩部がある車両形模型は、屋根部の曲率半径  $R$  が 46mm, 125mm, 200mm の 3 種類と肩部の曲率半径  $s$  が 6.3mm, 12.6mm, 18.9mm の 3 種類を組み合わせた合計  $3 \times 3 = 9$  種類である（以下、R46s6.3, R46s12.6, R46s18.9, R125s6.3, R125s12.6, R125s18.9, R200s6.3,

R200s12.6, R200s18.9 と記す）。以下、肩部の曲率半径  $s$  や屋根部の曲率半径  $R$  のいずれかのみ注目することもあるので、例えば屋根部の曲率半径  $R$  が 46mm の車両形模型（R46s6.3, R46s12.6, R46s18.9）を R46, 肩部の曲率半径  $s$  が 6.3mm の車両形模型（R46s6.3, R125s6.3, R200s6.3）を s6.3 等と記すことにする。

11 種類の車両形模型は全て縮尺 1/40 相当で、測定車両の寸法は鉛直方向高さ 75mm, 横幅 70mm, 長さ 487.5mm であり、ダミー車両の寸法は鉛直方向高さ 75mm, 横幅 70mm, 長さ 133.5mm である。

図4に全ての車両形模型の横断面概形を示す。

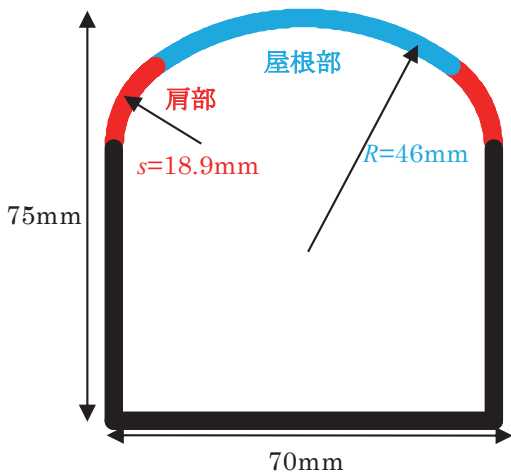


図3 車両形状 R46s18.9

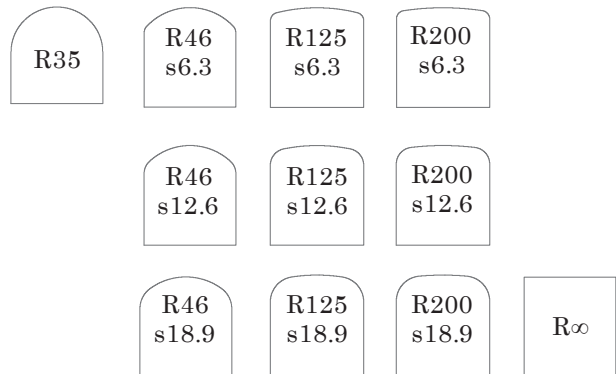


図4 全車両形状

2.1.3 横力係数の算出

横力係数を算出するために用いる横力と動圧は時間平均値とし、平均化時間は30秒である。3分力検出器で測定した横力を $F$ 、動圧を $Q$ 、車両形模型の風上側面積を $A$ とすると、横力係数は式(1)で与えられる。ここで、 $\rho$ は空気密度、 $u$ は気流速度である。

$$C_s = F/(QA) (= F/(\rho u^2 A/2)) \quad (1)$$

2.2 横力係数の測定結果

今回の実験の閉塞率は、地面板なしの条件で12.5%（地面板ありの条件で16.4%）と大きい。そこで、閉塞率の影響を確認するため、既往の実験結果が豊富な角柱形状である $R\infty$ を供試体として横力係数を測定し、既往の実験結果<sup>1)</sup>と比較した。その結果、地面板なしの条件下での $R\infty$ の横力係数は2.37となり、既往の実験結果の値(2.2~2.3程度)と比較して0.1(5%)大きい程度であり、閉塞率の影響は小さいと考えられる。

以下に、地面板なしと地面板ありの場合の結果をそれぞれまとめる(図5、また地面板なしの図5(a)と同じ内容を別の表現で表わしたものを図6に示す)。試験風速(10m/s, 20m/s)による差は小さかったので、ここでは試験風速のより高い20m/sの時の結果を述べる。

2.2.1 地面板なしの結果

肩部の曲率半径 $s$ が同じ車両形模型では、屋根部の曲率半径 $R$ が小さくなるほど横力係数は小さくなった。

R125, R200に対して、屋根部の曲率半径 $R$ が同じ車両形模型では、肩部の曲率半径 $s$ が大きくなるほど横力係数は小さくなった。

また、R46については、肩部の曲率半径 $s$ に依らず横力係数はほぼ同じ値であった。

2.2.2 地面板ありの結果

地面板ありの条件では、地面板なしの条件と比較して、全ての車両形模型で横力係数が小さくなった。肩部の曲率半径 $s$ が同じ車両形模型では、屋根部の曲率半径 $R$ が小さくなるほど横力係数は小さくなり、地面板なしの結果と同じ傾向であった。

R125, R200に対して、屋根部の曲率半径 $R$ が同じ車両形模型では、肩部の曲率半径 $s$ が大きくなるほど横力係数は小さくなり、地面板なしの結果と同じ傾向であった。

また、R46に対してはR125, R200とは逆に、肩部の曲率半径 $s$ が大きくなるほど、横力係数は大きくなった。しかしながら、R125s6.3とR125s12.6の横力係数の差は0.12, R125s12.6とR125s18.9の横力係数の差は0.08, R200s6.3とR200s12.6の横力係数の差は0.15, R200s12.6とR200s18.9の横力係数の差は0.1であるのに対し、R46s6.3とR46s12.6の横力係数の差は0.03, R46s12.6とR46s18.9の横力係数の差は0.01となり、肩部の曲率半径 $s$ の違いによるR46の横力係数の変化量はR125, R200に比べて小さいと言える。

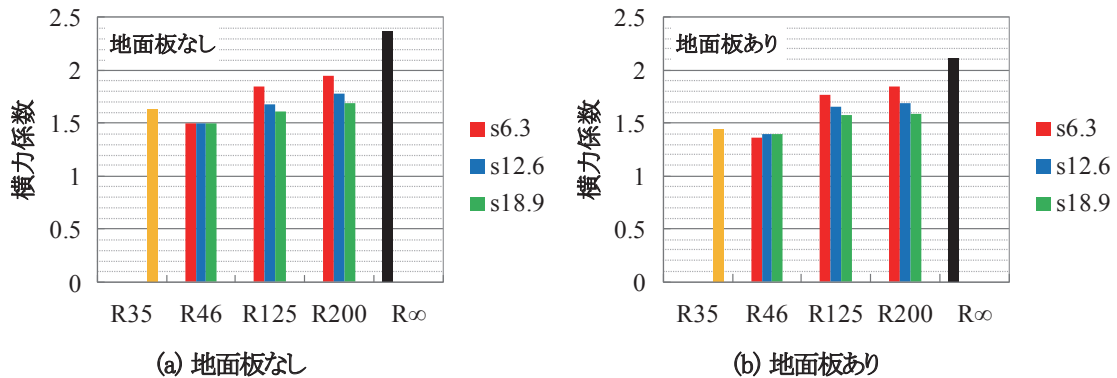


図5 横力係数(風速20m/s)

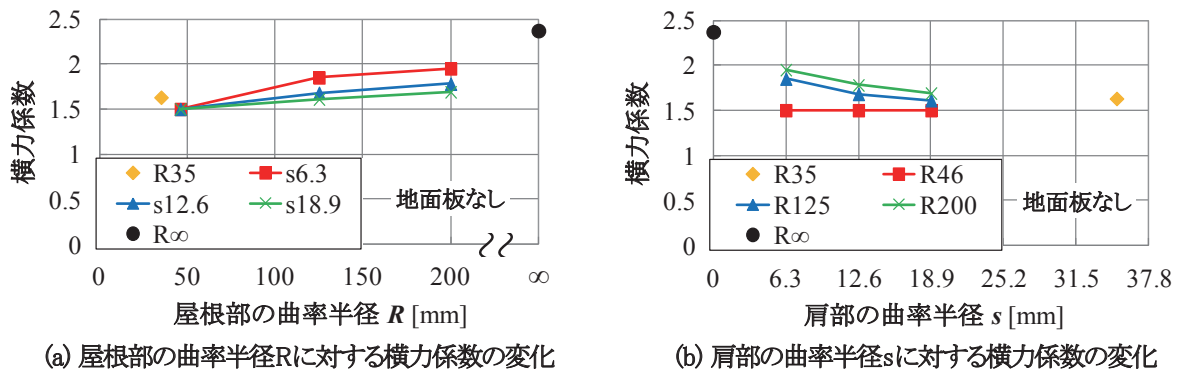


図6 横力係数(風速20m/s, 地面板なし)

### 3. 流れの数値シミュレーション

本章では、前章の風洞実験から得られた知見である車両形状を変化させたときの横力係数の差異について、流れの数値シミュレーションにより車両周りの流れ場を調べた結果を示す。

#### 3.1 計算方法

##### 3.1.1 計算モデル

計算対象は、地面なしの R46s6.3, R125s6.3, R $\infty$  の3種類である。前章の風洞実験結果より、車両形状変更に対する横力係数変化の相対的傾向は、地面の有無にはほとんど関係がなかったことより、地面なしのケースのみを計算対象とした。そして、今回は車両屋根部の曲率半径の変更に着目する計算ケースとした。

気流条件は一様流とし、風速は、前章の風洞実験で 10m/s と 20m/s で横力係数の違いがほとんどなかったことより、計算機負荷のより小さな条件である 10m/s とした。

計算領域は、主流方向に 1500mm、高さ方向に 600mm、幅方向に 150mm とした。風路に対する車両の閉塞率を風洞実験と等しくなるように、計算領域の高さ方向の寸法を風洞風路高さと同しくした。計算領域全体および計算格子間隔を図 7 に示す。計算格子間隔は、流れ方向 0.375mm、高さ方向 0.375mm、幅方向 0.938mm とした。以上の計算領域と計算格子間隔で等間隔直交格子の計算格子を作成した。計算格子数は約 10 億点である。

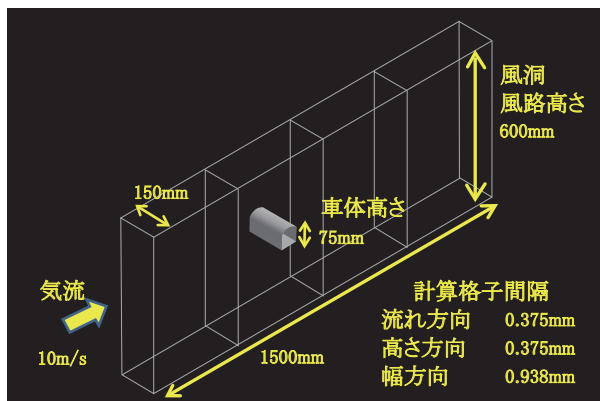


図 7 計算モデル

##### 3.1.2 数値解法

基礎式は非圧縮性流体に対するナビエ・ストークスの式である。乱流解析はラージ・エディ・シミュレーション (LES) により実施した。サブグリッドスケールモデルはコヒーレント構造スマゴリンスキーモデル<sup>2)</sup>を用いた。

基礎式を差分法で離散化することにより数値計算を行った。速度と圧力のカップリングはフラクショナル・ステップ法を用いた。時間進行は三次精度のアダムス・バッシュフォース法を、空間差分は二次精度中心差分法を用いた。

境界条件は、流入面で速度 10m/s に固定、流出面ですべての速度境界条件、高さ方向垂直面ですべての速度境界条件、幅方向を周期境界条件、車両表面はすべてなし速度境界条件 (速度ゼロに固定) とした。なお、直交格子における車両表面境界条件の設定方法の概要は次節に述べる。

時間進行における時間刻みは  $\Delta t = 0.0005L/U$  とし、車両に生じる空気力係数の平均及び分散の変化がほぼなくなるまで計算をすすめた。平均流れ場の算出は、時間 60 ~ 150  $L/U$  の流れを時間平均した。この時間長さは、例えばストローハル数 0.2 の変動現象について、その変動周期の 18 周期分に相当し、概ね十分な時間長さと推定される。計算の実行は鉄道総研のスーパーコンピュータ (CRAY 製, XC30) で 2400 並列計算により実施し、計算実行時間 (実際にかかった経過時間) は 1 ケースあたり約 44 時間である。

##### 3.1.3 直交格子における車両形状表現方法

曲面形状を有する物体は直交系の計算格子だけで正確に表現することは出来ない。そのため、計算格子を物体形状に沿わせる計算格子を用いる従来の方法と比較して、直交格子法は一般的に計算精度については不利である。しかし、直交格子法における曲面形状表現の近似精度を向上する手法として埋め込み境界法<sup>3)</sup>などが近年盛んに研究されており、本研究で使用する流体解析コードにその手法の一つを実装した。採用した手法<sup>4)</sup>の概要は以下である。

直交格子法における物体形状表現として符号付き距離関数 (Signed Distance Function, 以下 SDF) を用いる。SDF は、物体境界面からの距離関数としての性質に加えて、界面で区切られた領域の内外に対応して正負の符号が付けられたものである。この SDF のゼロ等値面として任意形状物体の表面が得られ、符号によって流体と固体の判別が可能となる。また、物体表面の法線ベクトルは SDF の勾配により得られる。具体的には、SDF から得られる距離と法線ベクトルを用いて、格子と一致しない境界における境界条件を満たすように境界近傍の定義点における速度および圧力を外挿することにより、物体表面の境界条件が与えられる。

#### 3.2 計算結果と考察

##### 3.2.1 風洞実験結果との比較

地面なしの R46s6.3, R125s6.3, R $\infty$  の3種類の車両形状について、流れの数値シミュレーションより算出した平均横力係数と風洞実験結果の比較を図 8 に示す。実験と計算の横力係数の差は、R46s6.3 で 3%, R125s6.3 で 1%, R $\infty$  で 6% となり、本数値シミュレーションは十分な計算精度を有していることが確認できた。つまり、本数値シミュレーションは風洞実験の時間平均空力特性を良好に再現できていると考えられる。

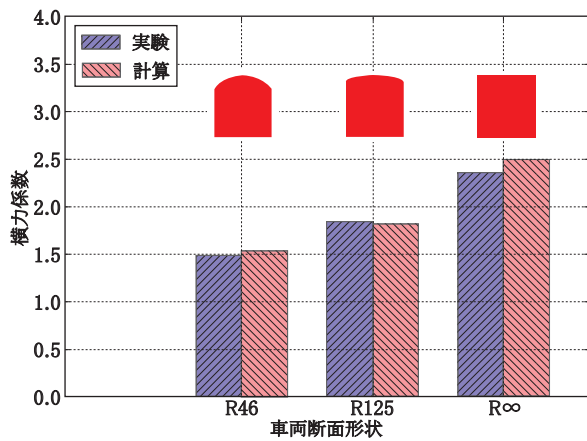


図8 実験と計算の平均横力係数の比較

### 3.2.2 車両周りの流れ場

車両周りの平均速度ベクトルの大きさの分布を図9に示す。色は青から赤に速度が大きくなることを示している。R46s6.3とR125s6.3を比較すると、車両風上側面、車両風下側面、車両底面付近の様子に大きな違いはなく、車両屋根付近に大きな差異が生じていることが分かる。車両屋根付近の低速領域と高速領域の境界は、流れの剥離線を示していると考えられる。R46s6.3では車両屋根の流れ方向中心位置付近で流れが剥離しているのに対して、R125s6.3では上流端で流れが剥離していると考えられる。

車両周りの平均圧力係数の分布を図10に示す。色は青から赤に圧力が大きくなることを示している。横力係数は車両の風上側面と風下側面（直線部分だけでなく、肩部と屋根部の曲線部分を含む）の圧力係数差で見積ることができる。風下側面の圧力係数分布を観察すると、ほぼ様な分布になっている。風下側面の車体中心高さ

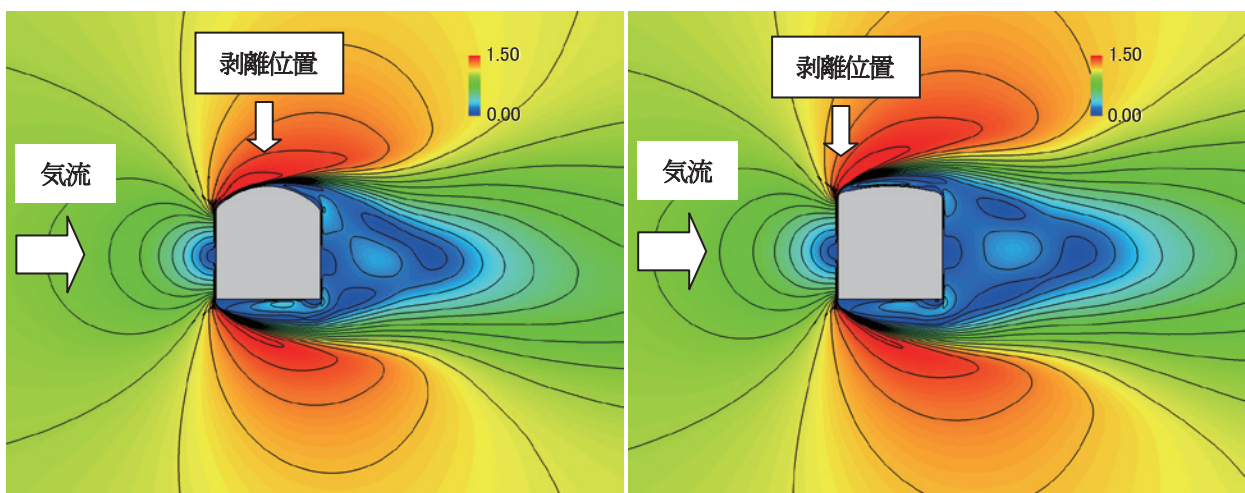
の圧力係数は、R46s6.3で-1.36、R125s6.3で-1.39となり、その差は2%程度である。一方、横力係数の値の差は20%程度ある(図8)。つまり、横力の差異の原因は、風下側面の圧力がほぼ等しいことから、風上側面の圧力(特に正圧領域の大きさ)によると考えられる。

車両周りの瞬時流れ場の渦構造の可視化結果を図11に示す。色は速度の大きさを示し、青から赤になるに従って値が大きくなる。渦構造の可視化方法は、速度勾配テンソルの第二不変量の等値面の表示により行った。平均速度の大きさの分布(図9)で示したように、車両形状により剥離位置に違いが観察される。R46s6.3は、車両肩部でわずかに流れが剥離するが、すぐに車両屋根部に再付着し、車両屋根部の中央あたりから流れが剥離する様子が観察される。一方、R125s6.3は、車両肩部で流れが剥離している様子が観察される。

## 4. まとめ

本研究では、横風を受ける鉄道車両に生じる空気力についての基礎検討として、車両断面形状の違いによる横力の差異を考察する事を目的に、風洞実験および流れの数値シミュレーションを実施した。車両断面形状のパラメータとして車両の屋根部と肩部の曲率半径に注目し、それらを系統的に変更したときの一様流流入に対する横力係数を風洞実験により測定し、整理した。そして、特徴的な横力係数を示す車両断面形状について、流れの数値シミュレーションを適用し、風洞実験の流れ場を再現するとともに、車両周りの流れの様子を調べた。

本報告における研究では、研究の第一段階として一様流流入に対する基礎検討を実施したが、実現象の気流状況は乱流である。また、車両に生じる横力は線路構造物



(a) R46s6.3

(b) R125s6.3

図9 平均速度の大きさの分布

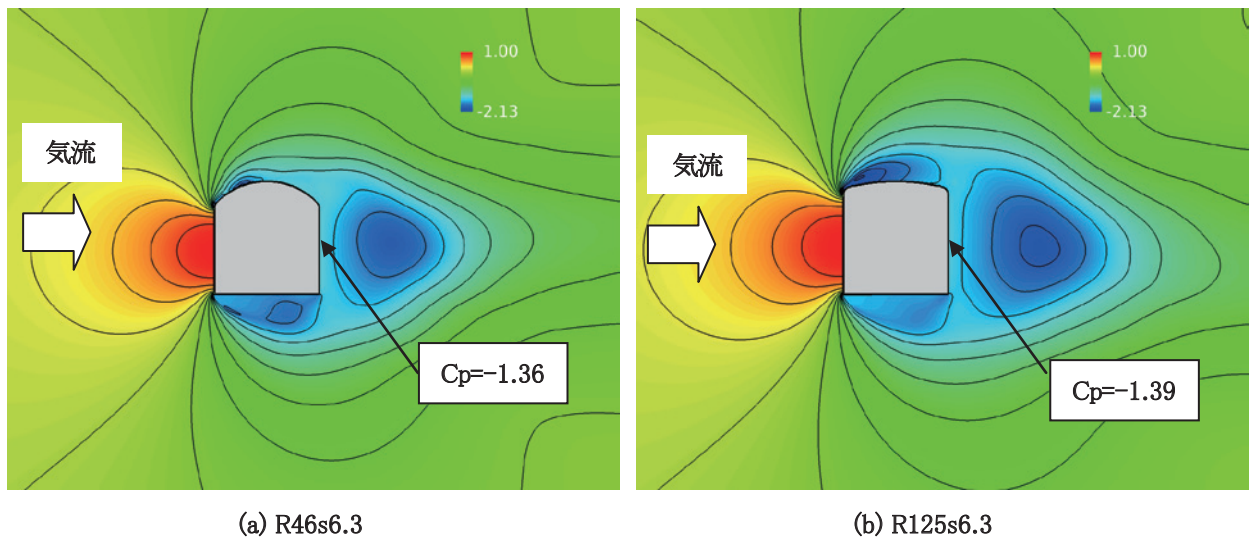


図 10 平均圧力係数分布

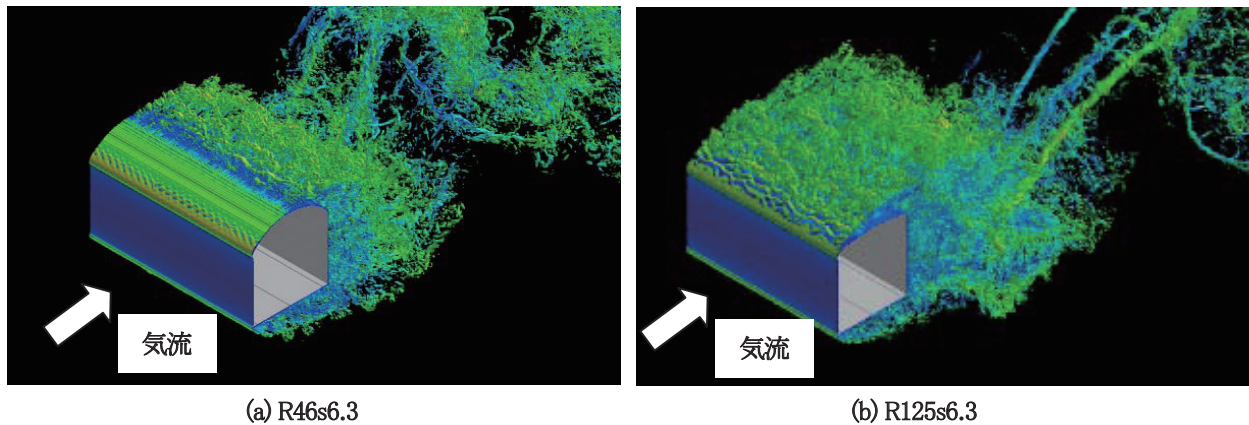


図 11 瞬時流れ場の渦構造の可視化

(盛土、高架橋、橋梁など)との組み合わせにより一般的に異なることが知られている。今後、今回の基礎検討の手法をより複雑な実現象に近い状況へと適用・発展させ、横風に対して、より安全な車両の形状の特徴を明らかにしていく予定である。

文 献

- 1) 中口博, 橋本貴久裕, 武藤真理: 矩形断面の柱の抗力に関する一実験, 日本航空学会誌, Vol. 16, No. 168, pp.1-5, 1968
- 2) H. Kobayashi, "The subgrid-scale models based on coherent structures for rotating homogeneous turbulence and turbulent channel flow," *Physics of Fluids*, 17, 045104, pp.045104-1-12, 2005.
- 3) R. Mittal and G. Iaccarino, "Immersed boundary methods," *Annual Review of Fluid Mechanics*, 37, pp.239-261, 2005.
- 4) 沖田浩平, 小野謙二: 符号付き距離関数を形状表現に用いた流体ソルバーの精度 (距離と法線情報を利用した界面近傍における差分と補間の提案), 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 77, No. 781, pp.1813-1825, 2011