

数値解析による横風下の車両空力特性に関する研究

野口 雄平* 鈴木 実* 菊地 勝浩*

Large-eddy Simulation on the Aerodynamics of Simplified Train under Crosswind

Yuhei NOGUCHI Minoru SUZUKI Katsuhiro KIKUCHI

Aerodynamic forces acting on railway vehicles depend not only on the shapes of the vehicles but also on the types of the infrastructures. In this study, the leading car of a train is simplified as a finite-length square cylinder; and the middle car is simplified as an infinite-length square cylinder. We conducted large-eddy simulations (LES) of the flow around the simplified vehicle model on a flat ground, an embankment and viaducts. The LES results confirm that the side force coefficients of the vehicle models change depending on the types of the infrastructures. We investigate the reason why the types of the infrastructures affect the side force acting on the vehicle in terms of the flow field.

キーワード：数値シミュレーション，LES，CFD，空気力係数，地上構造物，角柱

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り、現車の縮尺模型を用いた風洞試験により、その評価が行われている¹⁾。日本では、1986年に山陰本線余部橋りょうにおいて発生した横風による列車脱線事故の原因究明の過程で、車両に働く空気力は車両形状のみならず、地上構造物形状にも依存することが明らかとなった²⁾。これ以降、横風下で車両が受ける空気力を風洞試験において評価する際には、車両と地上構造物を組み合わせて空気力の測定を行っている¹⁾。また、同様の空気力の測定は海外の研究グループでも実施されている^{3) 4)}。

横風下を走行する車両が受ける気流は、自然風と車両走行とのベクトル和となる(図1)。従って、自然風の風速および風向角 α が一定の場合でも、車両が受ける相対的な気流の風速および風向角 β は車両の走行速度によって変化することとなる。そのため風洞試験では、静止した車両模型に対し風向角 β を幅広い範囲に設定して、空気力の測定がなされている。また、風向角は、列車編成の中間車両と比べて先頭車両に加わる空気力に対して影響が大きいことが知られている^{5) 6)}。

以上のように、これまで国内外において数多くの風洞試験が実施され、風向角や地上構造物に応じて、横風下の車両には特徴的な空気力が生じることが見いだされて

きた。しかしながら、空気力の発生原因となる流れ場に着目した研究は少なく、研究対象も限られた風向角における平地上の車両に留まっており⁷⁾、地上構造物や風向角が車両周りの流れ場に及ぼす影響を系統的に調査し、流れ場と車両に発生する空気力を関連付けて考察した研究は筆者の知る限り存在しない。

本論文では、形状を簡略化した車両および地上構造物を組み合わせた系を対象に、一様流条件でLarge-eddy simulation (LES)に基づく数値流体解析を実施し、車両に働く特徴的な空気力に対して、車両周りの流れ場から解釈を行い、横風下の鉄道車両に加わる空気力と流れ場の関係を明らかにすることを目指した。なお、本論文は、文献8、文献9の内容を抜粋し、新たな内容を加え、再構成したものであり、解析手法の詳細や解析結果の妥当性の検証などは文献8、文献9を参照されたい。

2. 風向角 90 度における中間車両の空力特性

2.1 解析概要

風向角 $\beta = 90$ 度における横風下の中間車両の空力特性を調べるにあたり、本章では二次元形状を対象に解析を行った。車両モデルは、既往の研究結果が豊富な二次

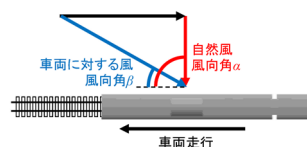


図1 車両に対する相対風

* 環境工学研究部 車両空力特性研究室

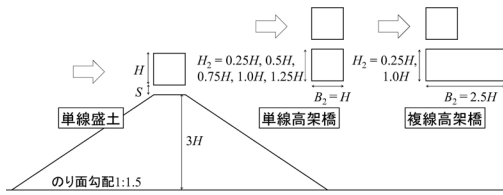


図2 車両，地上構造物の形状

元正方形角柱とした。但し，流れ場の解析は，LES によるため三次元で実施した。また，地上構造物は形状を簡略化した単線高架橋，複線高架橋，単線盛土である（図2）。また，盛土条件との比較のため，平地上の正方形角柱に対しても解析を行った。正方形角柱の一边の長さを H とし，高架橋の高さ（桁高に相当）を H_2 ，幅を B_2 とし，単線高架橋の場合には $H_2/H = 0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.25$ ， $B_2/H = 1.0$ とした。なお，単線高架橋の場合で $H_2/H = 1.0$ の条件では並列正方形角柱と同じ系となる。複線高架橋の場合には， $H_2/H = 0.25, 1.0$ ， $B_2/H = 2.5$ とし，車両モデルの位置は風上側とした。盛土の高さは $3H$ とし，のり面勾配は $1:1.5$ とした。実際には，車体と地上構造物との間には床下機器や台車が存在し，床下の閉塞具合は車両によってまちまちである。そのため，解析では正方形角柱と地上構造物との隙間 S をパラメータとして解析を実施した。 $S/H = 0.09, 0.18, 0.36$ とし， $S/H = 0.36$ が現車におけるレール上面から車体底面までの距離におおよそ相当する。

基礎式は非圧縮性流体の連続の式および Navier-Stokes 方程式であり，圧力と速度のカップリングには SIMPLE 法を用いた。対流項に二次精度中心差分を用い，時間進展は二次精度陰解法により行った。LES のサブグリッドスケールモデルには標準スマゴリンスキーモデルを用い，スマゴリンスキー定数は，ブラフボディ周りの流れ場で一般的に使われる値と同程度の 0.1 とした。本章では流体解析のソルバーとして Ansys Fluent ver. 17.1 を用いた。

解析領域は，主流方向，鉛直方向に十分に大きく取り，閉塞率は全条件で 5% 以下とした。スパン方向（レール方向）長さは全条件で $6.4H$ とした。境界条件に関しては，流入面で速度 U 固定（一様流），流出面で自由流出境界とした。レイノルズ数 UH/ν (ν は動粘性係数) は約 1.5×10^4 とした。物体壁面では，線形則と対数則とをブレンドする一般化壁関数を用いた。解析領域の側面および上面は対称境界とした。床面については，高架橋の場合に対称境界，平地，盛土の場合には，床面での境界層の発達を防ぐため，正方形角柱の近傍まで床面を対称境界とし，それ以降は物体壁面に与えた境界と同じとした。また，高架橋の場合，床面の影響がないよう，高架橋は床面から十分に離れた。解析格子は全てヘキサ要素で作成し，角柱隅角部の

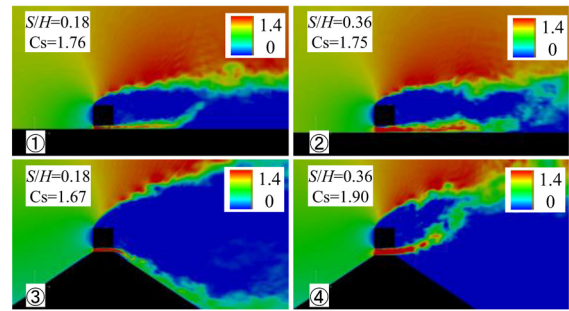


図3 平地，単線盛土における主流方向瞬時流速

格子サイズおよび角柱表面の格子高さは $H/200$ とした。スパン方向分割幅は約 $0.034H$ とした。総格子数は，平地の場合で約 500 万，高架橋の場合で約 1000 万から約 1600 万，盛土の場合で約 1000 万である。無次元の時間刻み tU/H は 0.002 とし，無次元時間で最低でも 100 経過した後に統計量を算出した。流れの統計量を算出する時間は，平地の場合で 100 ，高架橋，盛土の場合に $170 \sim 250$ とした。

2.2 解析結果

2.2.1 平地，単線盛土の場合

本論文では，車両転覆への影響が大きい横力（まくらぎ方向の空気力）に着目する。時間平均した横力を，速度圧 $0.5\rho U^2$ と見付面積で無次元化した横力係数 C_s により結果を示す。なお ρ は空気密度である。

図3に平地および単線盛土における主流方向流速の瞬時値のコンター (U により無次元化，コンターのレンジは図が判別しやすいよう適宜調整) を示す。地上構造物と正方形角柱底面の隙間 S/H は $0.18, 0.36$ とし，図中には併せて解析で得られた C_s も示した。盛土，平地ともに角柱上側の風上隅角部で流れの剥離が生じるとともに，正方形角柱と地上構造物との隙間には高速の噴き出し流れが生じる。平地の場合には $S/H = 0.18, 0.36$ (①②) で隙間を抜ける流れに大きな変化はない。それに対して，盛土の場合には，隙間を抜ける流れが， $S/H = 0.18, 0.36$ で大きく異なる。 $S/H = 0.18$ (③) の場合には，隙間を通る流れは下向きに曲げられ，角柱上面から生じるはく離せん断層と隙間を通る流れとの相互干渉は見られない。一方， $S/H = 0.36$ (④) の場合には，隙間を通る流れは，風下側盛土のり面に沿うことなく吹き出し，角柱上面から生じるはく離せん断層と相互に干渉する。盛土の条件では，隙間を通る流れの違いにより，隙間が広い場合 (④ $S/H = 0.36$) には，車両の背圧が低下することにより C_s が増加し，同じ隙間幅の平地上の正方形角柱よりも C_s がやや大きくなるが，隙間が小さい場合 (③ $S/H = 0.18$) には平地上の正方形角柱より C_s がやや小さくなり，盛土条件では平地条件と比べ必ずしも C_s が増

加する結果は得られない。

2.2.2 単線高架橋、複線高架橋の場合

図4に並列正方形角柱 ($H_2/H = 1.0$, $B_2/H = 1.0$) における主流方向流速の瞬時値のコンターを示す。角柱間の隙間 S/H は 0.09, 0.18 である。先行研究¹⁰⁾で述べられているように、並列正方形角柱では、隙間がごく小さい場合 (① $S/H=0.09$) には、カルマン渦列により時間平均流れ場は上下対称となり、上下の正方形角柱の C_s が一致し、2つの角柱が一体となった場合 ($S/H=0$) に似た空力特性を示すが、隙間が広がると (② $S/H=0.18$)、流れの偏りが生じ、流れが上下非対称となり、二つの正方形角柱の C_s は異なる値を示す。図5に単線高架橋 ($S/H=0.36$) における主流方向流速の瞬時値のコンターを示す。単線高架橋の桁高は $H_2/H = 0.5, 0.75, 1.0, 1.25$ である。桁高が相対的に小さい $H_2/H = 0.5, 0.75$ (①②) の場合には、隙間を抜ける流れは単線高架橋側に偏り、桁高が相対的に大きい $H_2/H = 1.25$ (④) の場合には正方形角柱側 (車両側) へと流れが偏っている。その結果、流れの偏った方の角柱の背圧が低下し、 C_s が大きくなるため、桁高が小さい $H_2/H = 0.5, 0.75$ の条件 (①②) では車両 (正方形角柱) の C_s は小さくなり、桁高が大きい $H_2/H = 1.25$ の条件 (④) では車両の C_s が大きくなる。

図6に複線高架橋 ($B_2/H = 2.5$, $S/H=0.09, 0.36$) における主流方向流速の時間平均値のコンターを示す。複線高架橋の桁高は $H_2/H = 0.25, 1.0$ である。また、比較のため並列正方形角柱 ($H_2/H = 1.0$, $B_2/H = 1.0$) の結果も示す。隙間幅が狭い $S/H = 0.09$ (①③⑤) では隙間を抜ける流れが風下側に広がる死水域を分断するほどの運動量を持たず、車両と高架橋が一体となった形状に対して渦放出がなされるため、風下側の圧力場はおおむね一様となり、車両と高架橋の C_s はそれぞれ同程度となる。従って、渦放出を伴う流れである $S/H = 0.09$ では車両と高架橋を一体とみなした形状に近い空力特性を示すため、一体とみなした形状のアスペクト比 ($B_2/(H+H_2)$) により車両の C_s が変化する。そのため、並列正方形角柱 (⑤) と $H_2/H = 1.0$ の複線高架橋 (③) では、高架橋の見付幅は同じであるが、一体とみなした形状のアスペクト比が異なるため、複線高架橋と比較して並列正方形角柱の場合に C_s が増大する。 $S/H = 0.36$ では、単線高架橋の場合と同様に複線高架橋でも流れの偏りが生じている。 $H_2/H = 1.0$ の複線高架橋の場合 (④) には隙間を抜ける流れが車両側に偏っており、車両の C_s は高架橋を上回る。また、時間平均流れ場は並列正方形角柱の場合 (⑥) と似通っており、隙間が広い場合には狭い場合と比べて、車両と高架橋を一体とみなした形状のアスペクト比が流れ場に及ぼす影響は小さい。一方で $H_2/H = 0.25$ の場合 (②) には、車両よりも高架橋の C_s が増大する。隙間を抜ける流れは車両側に偏らないため、 $H_2/H = 1.0$

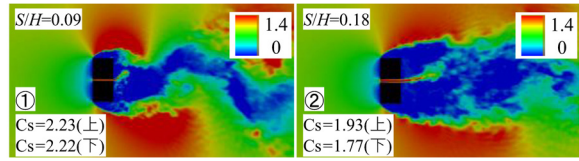


図4 並列正方形角柱における主流方向瞬時流速

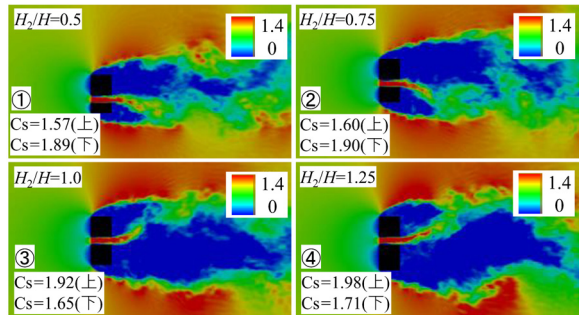


図5 単線高架橋における主流方向瞬時流速

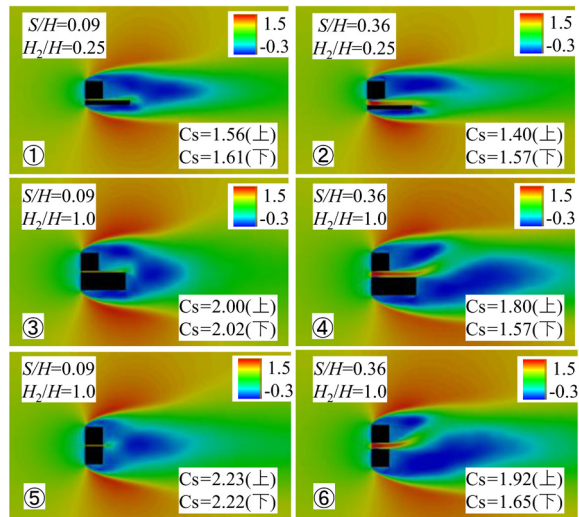


図6 複線高架橋における主流方向平均流速

の複線高架橋の場合 (④) と比較して、車両風下側では死水域が大きく広がり、背圧が上昇し、車両の C_s は低下する。

高架橋や橋りょうでは、桁高が小さい場合と比べ、大きい場合に車両の C_s が増大する結果が、気流性状によらず風洞試験により得られている^{1) 6)}。本数値解析で得た知見をまとめると、隙間がごく小さい場合には、車両と高架橋を一体とみなした形状のアスペクト比に応じて流れ場が変化して、車両の C_s が変化する。一方で隙間が広がると、偏り流れの影響が大きくなり、車両の C_s は流れの偏る方向に依存する。流れの偏る方向は高架橋の桁高 (H_2/H) により決定されるため、車両の C_s は高架橋の桁高に依存することとなる。

3. 幅広い風向角における先頭車両の空力特性

3.1 解析概要

前章で対象とした中間車両の場合には風向角が変化した場合にも $C_s(\beta)/C_s(90^\circ)$ の値はおおむね $\sin^2\beta$ と一致する結果が風洞試験で得られており、風向角が90度から変化した場合でも、まくらぎ方向流速で規格化された流れ場は風向角90度とおおむね同様になると考えられる。一方、先頭車両の場合には $C_s(\beta)/C_s(90^\circ)$ の値は $\sin^2\beta$ を上回り、先頭車両の場合には風向角90度とそれ以外の風向角では流れ場が大きく異なることが予期できる。そこで本章では、先頭車両を簡略化して有限長正方形角柱とし、形状を簡略化した地上構造物と有限長正方形角柱を組み合わせた系において、風向角を変化させたLESを行った。

車両形状は、高さ H 、幅 H 、長さ $7H$ の有限長正方形角柱とした。本解析では、列車編成のうち先頭車両周りの流れを考察の対象としたため、アスペクト比7の有限長正方形角柱を長手方向に二つ配置して解析を行い（2両編成相当）、先頭車両に相当する有限長正方形角柱に着目した。なお、二つの有限長正方形角柱の間隔は $H/5$ とした。形状を簡略化した単線高架橋（2種類、 $H_2/H = 0.25$ （桁高小）、 1.0 （桁高大）、 $B_2/H = 1.0$ ）、複線高架橋（1種類、 $H_2/H = 1.0$ 、 $B_2/H = 2.5$ ）、平地、単線盛土（1種類、高さ $3H$ 、のり面勾配 1:1.5）の上に車両を設置した。また、上記に加えて地面や地上構造物の影響を受けない「地面なし」の有限長正方形角柱の解析も行った。地上構造物は全て二次元形状として、スパン方向（レール方向）全域にわたって存在する。車両と地上構造物との隙間を S とし、 $S/H = 0.09, 0.36$ とした。

本章では流体解析のソルバーとして Advance/ Front Flow/ red ver. 5.3 を用いた。圧力と速度のカップリングには SIMPLEC 法を、対流項の空間離散化には二次精度中心差分法に5%の一次精度風上差分法をブレンドしたスキームを用い、時間進展には二次精度 Crank-Nicolson 法を用いた。LES のサブグリッドスケールモデルには標準スマゴリンスキーモデルを用い、スマゴリンスキー定数を 0.1 とした。解析領域は、まくらぎ方向、鉛直方向、スパン方向に十分に大きく取り、閉塞率は最大でも 5.7% である。スパン方向長さは盛土の場合に $300H$ 、その他の場合に $100H$ とした。風向角は全ての条件で、90、60、50、40度として、同一の解析格子で風向角を変化させた解析を行うために、入口境界で与える一様流の速度の向きを変化させ、スパン方向に周期境界を課した。その他の境界条件は2章とおおむね同じであるが、物体壁面には壁関数は用いず速度0の non-slip 境界を課した。解析格子は全てヘキサ要素で作成し、角柱隅角部の格子サイズおよび角柱表面の格子高さは $H/200$ とし

た。先頭車両のスパン方向の格子幅は最小で $H/100$ 、最大で $H/15$ とした。

3.2 解析結果

3.2.1 横力係数の風向角特性

図7に解析で得られた C_s と風向角との関係を示す。 $S/H = 0.36, 0.09$ とともに単線高架橋（桁高大、 $H_2/H = 1.0$ ）および複線高架橋（ $H_2/H = 1.0$ ）の場合に C_s が大きくなり、単線高架橋（桁高小、 $H_2/H = 0.25$ ）の場合に C_s が小さくなった。単線高架橋（桁高小）の場合の C_s は、地面なしの有限長正方形角柱の C_s と全風向角で同程度となった。平地の場合には、 $S/H = 0.36, 0.09$ とともに風向角90度では、単線高架橋（桁高大）および複線高架橋の C_s より小さいが、 $S/H = 0.36$ では風向角50度以下、 $S/H = 0.09$ では風向角60度以下で複線高架橋の C_s と同程度となった。盛土条件では、高架橋と比べて隙間 S/H が C_s に及ぼす影響が大きい。 $S/H = 0.36$ の場合には、風向角90度から風向角が小さくなるにつれて単調に C_s が減少するが、 $S/H = 0.09$ の場合には、 $S/H = 0.36$ と比べて風向角の変化に伴う C_s の変化が緩やかであり、特に風向角50度では他の条件では見られないピークが発生した。また、高架橋と比較しても、 $S/H = 0.09$ の盛土の場合には風向角減少に伴う C_s の減少度合いが緩やかである。上述した高架橋（ $S/H = 0.36, 0.09$ ）や盛土（ $S/H = 0.09$ ）が C_s に与える影響は、風洞試験¹⁾で得られている通勤型車両の C_s の傾向と同様であり、横風下の非流線形鉄道車両の空力特性を考えるにあたり、有限長正方形角柱によるモデル化はおおむね妥当なものだと考えられる。

3.2.2 風向角および地上構造物が及ぼす影響

地面なしの条件での平均圧力係数（静圧を速度圧で無次元化）の等値面を図8に示す。紙面手前側が風下側である。等値面の値は、風向角90度で $C_p = -0.5$ 、60度で $C_p = -1.7$ 、50度で $C_p = -1.7$ 、40度で $C_p = -0.9$ とした。また図中には各条件での C_s を $\sin^2\beta$ で除した値も示した。風向角90度では車両端部に近い箇所を除き、車両長手方向に流れの変化が小さい。風向角60度以下では流れの三次元性が強く、特に風下面の先頭寄りの位置に二対の強い負圧領域が形成されている。前述のように、中間車両の場合には $C_s/\sin^2\beta$ は風向角によらず同程度となる

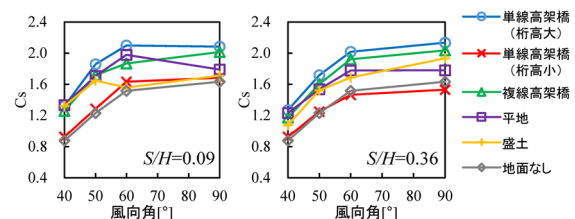


図7 風向角と横力係数の関係（先頭車両）

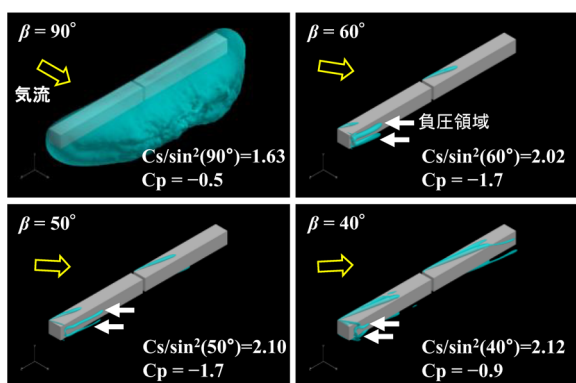


図8 平均圧力係数の等値面（地面なし条件）

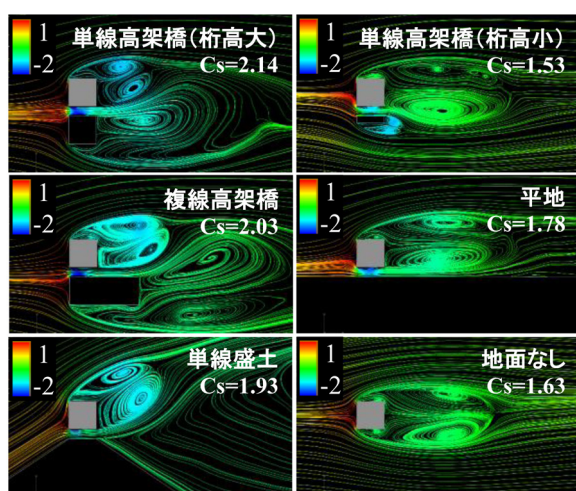


図9 時間平均流線（風向角 90 度， $S/H = 0.36$ ）

が、先頭車両を対象とした本解析では、風向角 60 度以下の $C_s/\sin^2\beta$ は、90 度の値を大きく上回っており、上記の負圧領域の影響で風向角 60 度以下では C_s が増大することが分かる。

次に地上構造物が流れ場に及ぼす影響を述べる。図 9 に風向角 90 度， $S/H = 0.36$ における時間平均流線を示す。先頭車両中央断面におけるまくらぎ方向および鉛直方向の平均流速による流線を示した。なお流線は平均圧力係数により色付けした。三種類の高架橋では、前章で示した偏り流れが生じており、車両風下側の死水域の大きさは高架橋の形状によって異なる。単線高架橋（桁高大）と複線高架橋の場合に、単線高架橋（桁高小）の場合と比べ、車両風下側の死水域が縮小し、車両の背圧が低下する。そのため、単線高架橋（桁高大）と複線高架橋の条件では車両の C_s が増加した。単線高架橋（桁高小）の場合には、高架橋が車両周りの流れに及ぼす影響が小さく、車両風下側の流線の様子は地面なしの条件と比較的近い。盛土の場合には、前章でも示したように平地の場合とは異なった循環流が車両背後に形成された。以上より、風向角 90 度においては中間車両、先頭車両とも

に類似の流れ場によって C_s が特徴付けられることが分かる。

次に風向角 60 度において地上構造物が流れ場に及ぼす影響について述べる。図 10 に風向角 60 度， $S/H = 0.36$ の条件における車両先端からレール方向後方に $0.5H$ および $1.5H$ 離れた断面での平均速度ベクトルを示す。ベクトルは平均圧力係数により色付けした。地面なしでは図 8 で述べたように車両背後に二対の渦が見られ、渦の中心で圧力が低下する。単線高架橋（桁高大）、複線高架橋の場合にも、地面なしの場合と同様に車両背後に二対の渦が生じるが、先端から $0.5H$ 離れた断面では地上構造物の影響により渦中心の圧力低下が地面なしと比べて大きい。また、先端から $1.5H$ 離れた断面では車両背後の渦が地面なしと比べて大きく、車両風下側全体に大きな負圧が生じている。このように、流れの三次元性が強まる風向角が 60 度以下の流れにおいても、車両風下側の渦構造に対して地上構造物が影響を及ぼし、地面なしの場合と比べて、単線高架橋（桁高大）、複線高架橋の場合には車両風下側の圧力が低下し、 C_s の増加につながった。

次に地上構造物が盛土の場合について述べる。図 7 に示したように、 $S/H = 0.09$ における盛土の条件でのみ、風向角 50 度の C_s が風向角 60 度を上回った。図 11 に盛土の条件（ $S/H = 0.09$ ）における風向角 60 度、50 度での平均速度ベクトル（平均圧力係数により色付け）を示す。図示した断面は図 10 と同じである。盛土の場合には接近流が盛土斜面を駆け上がるため、車両に作用する気流が、車両に対して迎角を持つ。そのため、車両風下側の流れの構造が図 8、図 10 に示した条件とは異なり、盛土条件の風向角 60 度では、車両背後に二対の渦が現れず、先頭寄りの風下面での圧力低下が生じない。風向角 50 度になると、先端から $0.5H$ 離れた断面では風下側に強い負圧を持つ渦が生じ、 C_s の増加につながった。しかしながら、先端から $1.5H$ 離れた断面では、強い負圧を持つ渦は車両風下面から離れる。このように、盛土の場合には図 10 に示した高架橋の場合とは大きく異なる流れの構造を持つことが確認できる。すなわち $S/H = 0.09$ 、盛土の条件では、風向角 60 度と 50 度で車両風下側の流れの構造が大きく異なるため、他の地上構造物とは異なる C_s の傾向を示すことが分かった。

4. まとめ

本論文では、横風下の鉄道車両に加わる空気力と流れ場との関係を明らかにすることを目標に、形状を簡略化した車両と地上構造物を組み合わせた系を対象に LES を実施し、地上構造物により車両に加わる空気力が変化する原因を流れ場の観点から考察した。

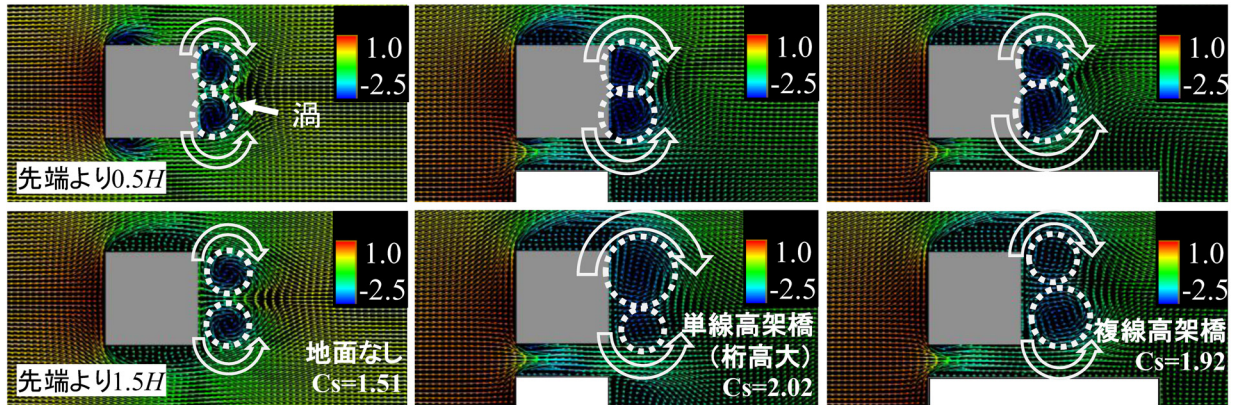


図 10 風向角 60 度, $S/H = 0.36$ における平均速度ベクトル (平均圧力係数により色付け)
(上：車両先端より $0.5H$ 後方, 下：車両先端より $1.5H$ 後方)

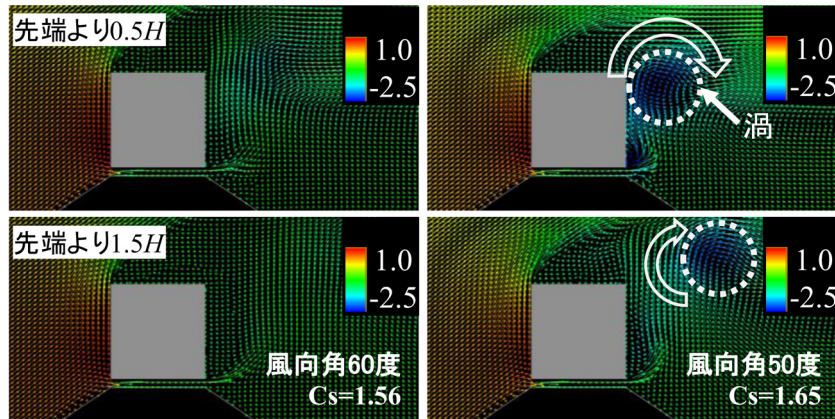


図 11 単線盛土, $S/H = 0.09$ における平均速度ベクトル (平均圧力係数により色付け)
(左：風向角 60 度, 右：風向角 50 度, 上：車両先端より $0.5H$ 後方, 下：車両先端より $1.5H$ 後方)

過去半世紀にわたり、横風下の鉄道車両の空力特性に関する研究は世界中で連綿と続いてきたが、本研究のように、地上構造物により空気力が変化する原因を系統的に追究した研究はこれまで存在しなかった。今後、横風下の車両に作用する風荷重を低減させる方策を考える際に、本研究で得られた知見を役立てていきたい。

文 献

- 1) 種本勝二, 鈴木実, 斎藤寛之, 井門敦志: 在来線車両の空気力係数に関する風洞試験結果, 鉄道総研報告, Vol.27, No.1, pp.47-50, 2013
- 2) 余部事故技術調査委員会: 余部事故調査委員会報告書, 1988
- 3) Baker, C.J., "Ground vehicles in high cross winds part I. Steady aerodynamic forces," *Journal of Fluids and Structures*, Vol.5, pp.69-90, 1991.
- 4) Cheli, F., Corradi, R., Rocchi, D., Tomasini, G., Maestrini, E., Wind tunnel tests on train scale models to investigate the effect of infrastructure scenario, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol.98, pp.353-362, 2010.
- 5) Cooper, R.K., "The Effect of Cross Winds on Trains," *ASME. Journal of Fluids Engineering*, Vol.103, pp.170-178, 1981.
- 6) 種本勝二, 鈴木実, 斎藤寛之, 今井俊昭: 強風下での車両に働く空気力と低減対策に関する風洞試験, 鉄道総研報告, Vol.18, No.9, pp.17-22, 2004
- 7) Hemida, H., Krajnović, S., "LES study of the influence of the nose shape and yaw angles on flow structures around trains," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol.98, pp.34-46, 2010.
- 8) 野口雄平, 菊地勝浩, 鈴木実: 横風下の簡略化した鉄道車両に加わる空気力に関する数値解析的研究, 第 25 回風工学シンポジウム論文集, Vol.25, pp.325-330, 2018
- 9) 野口雄平, 中野高志, 菊地勝浩: 形状を簡略化した鉄道車両の横風下における空力特性に関する数値解析的研究, 構造工学論文集, Vol.65A, pp.329-341, 2019
- 10) 岡島厚, 杉谷賢一郎, 溝田武人: 並列 2 長方形断面柱まわりの流れ, *日本機械学会論文集 B 編*, Vol.51, No.472, pp.3877-3886, 1985