

横風空力特性に関する風洞試験を模擬した 数値シミュレーション

野口 雄平* 中出 孝次**

Numerical Simulation of the Wind Tunnel Tests on the Aerodynamic Characteristics of Trains in Crosswind

Yuhei NOGUCHI Koji NAKADE

In order to evaluate the running safety of railway vehicles under strong wind, it is necessary to estimate the aerodynamic force acting on trains. In the past, numerous wind tunnel tests were conducted for this purpose. Meanwhile, computational simulations have been applied to the engineering problems through the use of high-performance computers in recent years. In this report, computational fluid dynamics simulations (RANS on unstructured grids and LES on a Cartesian mesh) were carried out to reproduce the wind tunnel tests, and the aerodynamic force coefficients obtained by the simulations were compared to those obtained by the wind tunnel tests.

キーワード：数値シミュレーション，横風，空力特性，RANS，LES，空気力係数

1. はじめに

強風時の鉄道車両の安全・安定輸送を担保するためには、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、現在まで、風洞試験により現車の縮尺模型を用いて、その評価が行われている¹⁾。一方、近年の飛躍的な計算機性能の向上によって数値流体解析（CFD）が普及し、研究用のツールとして使用されるだけに留まらず、近年は航空機や自動車の開発業務でも広く用いられ、設計プロセスの高速化、高度化に必須のツールとなっている²⁾。そのような状況の中、鉄道の横風問題においても CFD の適用を進めることが望まれ、その有用性について検討することが必要と考えられる。

CFD を実施する場合に一般的に用いられる手法として、レイノルズ平均（RANS）と呼ばれる手法およびラージエディシミュレーション（LES）と呼ばれる手法がある。RANS では時間平均場を得るために非定常計算が不要で計算負荷が小さいという利点があるが、乱流運動の影響についてモデル化される部分が多く、複雑な流れ場に対しては予測精度が悪化する場合がある。一方、LES はモデル化される部分が少なく、複雑な流れ場に対しても適用可能であるが、RANS と比較して多くの計算格子を必要とすることに加え、時間平均場を得るために非定常計算を行い、時間平均をとらなければならない、RANS と比べて遥かに計算負荷が高いという欠点を持つ。

CFD を実施する際に計算負荷と並んで問題となることとして計算格子の準備が挙げられる。図 1 に簡単な例として円の周りに生成された計算格子を示す。従来の

CFD では、図 1（左）のように物体形状に沿った計算格子（非構造格子）を生成する必要がある、格子生成のための専用のソフトウェアが必要である。また、解析対象とする物体の形状が複雑になればなるほど、計算格子の生成が難しくなり、時間を要することとなる。一方、図 1（右）のような直交した計算格子を用意し物体形状を表現する手法（直交格子法）が、近年の計算機性能の向上とともに、複雑な物体形状に対しても適用可能となりつつある。この手法は、物体形状の複雑さによらず容易に計算格子を生成可能であり、解析を容易に実行できる。しかしながら、物体形状を正確に表現するためには、物体周りに細かな計算格子を数多く配置する必要があるため、計算負荷の増大につながり易い。

本報告では、過去に鉄道総研が実施してきた横風風洞試験を対象に、それを模擬する CFD を実施し、風洞試験で得られた空気力係数と比較することで、その有用性について検討を行った。その際、非構造格子に基づく RANS および直交格子に基づく LES の二種類の流体解析手法を適用し、各々の予測精度について調査した。

2. 解析手法

2.1 解析対象

過去に実施された横風風洞試験の中で、典型的な地上構造物上に通勤型の先頭車両が設置された場合として、表 1 に示す 3 条件について、風洞試験を模擬する数値流体解析を実施した。本節では、数値流体解析の対象とした風洞試験の概要を述べる。風洞試験で用いた模型の縮尺は全て実物の 1/40 である。第一の条件は、北海道島牧で実施された実物大模型試験を再現した風洞試験³⁾で

* 環境工学研究部 車両空力特性研究室

** 鉄道力学研究部 計算力学研究室

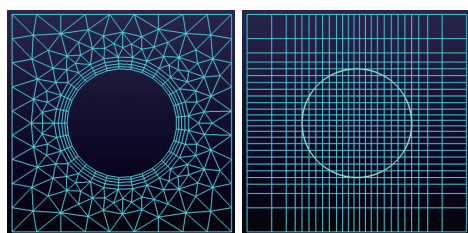


図1 円の周りの計算格子

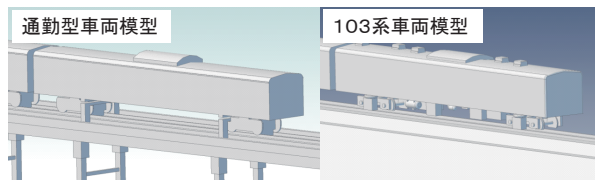


図2 車両模型の概観

ある。この風洞試験では、桁高 1m (実物) の単線高架橋上に台車形状を簡略化した通勤型車両が設置された。第二の条件は、高さ 8m (実物) の単線盛土の上に設置された 103 系車両¹⁾ である。第三の条件は複線高架橋上の風上側軌道に設置された 103 系車両¹⁾ であり、高架橋の桁高は 1m および 6m (実物) である。風洞試験で用いた車両模型を図 2 に示す。風洞試験は、風速 20, 25, 30m/s で実施されたが、その風速の範囲では空気力係数に大きな差は見られなかったため、本報告では風速 30m/s の試験結果を、数値流体解析で得られた空気力係数と比較した。

数値流体解析では、単線高架橋の条件のみ、気流条件を一樣流および乱流境界層として解析を実施し、単線盛土、複線高架橋については乱流境界層のみの解析を行った。なお、複線高架橋の条件では、非構造格子に基づく RANS のみ解析を実施した。

2.2 数値解法

2.2.1 非構造格子による RANS

基礎式はレイノルズ平均された非圧縮性流体のナビエ・ストークスの式である。有限体積法により基礎式を離散化した。乱流モデルには、航空機や自動車の空力解析において実績の豊富な $k\omega$ -SST モデル⁴⁾ を用いた。なおモデル定数の変更は行っていない。速度と圧力のカップリングは SIMPLE 法を用いた。対流項の空間離散化は、流速成分については二次精度風上差分法を、乱流エネルギー k と比散逸率 ω については、一次精度風上差分法を用いた。なお解析には、汎用流体解析ソルバである ANSYS Fluent ver. 15.0.7 を用いた。

2.2.2 直交格子による LES

基礎式は空間フィルタにより粗視化された非圧縮性流体のナビエ・ストークスの式である。差分法により基礎式を離散化した。サブグリッドスケールモデルにはコヒーレント構造スモグリンスキーモデルを用いた⁵⁾。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。時間進行には三次精度のアダムスバッシュフォース法を、空間差分には二次精度中心差分法を用いた。直交格子法における物体形状の表現方法は、風洞試験模型の三次元 CAD データを入力し、計算格子の各セルについて流体、固体を自動判定して流体解析を実行するボクセル型手法を用いた。なお解析には、鉄道総研で開発した内製ソルバを用いた⁶⁾。

2.3 解析条件

2.3.1 非構造格子による RANS

単線高架橋の条件では、計算領域は主流方向に 10m、高さ方向に 3m、幅方向には 5m とし、計算領域の高さおよび幅は風洞の密閉型測定部の寸法と一致させた。計算格子数は約 2300 万点とし、車体高さ 66mm、車体長さ 488mm の車両模型に対して、車両肩部や角部を除いて車両表面の格子間隔は 2mm から 5mm 程度とした。流れの剥離を精度よく捉えるために車両肩部における車両断面周方向の格子間隔は 0.7mm、車両壁面垂直方向の格子高さは 0.03mm とした。計算格子は主にヘキサ要素を用いて生成した。本解析では格子数を削減するため、高架橋の橋脚は省略した。

単線盛土、複線高架橋の条件では、浅い風向角において地上構造物の長さが伸びるため、計算領域を主流方向に 13m とした。計算格子数は、単線盛土の場合に、風向角 90 度で約 1900 万点、風向角 30 度で約 2100 万点である。複線高架橋の場合には、風向角 90 度で約 2300 万点、風向角 30 度で約 2600 万点である。車両表面の格子間隔は最大 2mm とし、車両肩部については上記の単線高架橋の場合と同様の格子間隔とした。本解析では格子数を削減するため、車両模型の床下機器及び台車の形状を一部簡略化した。

境界条件は流入面で速度境界条件、流出面で圧力境界条件、車両および地上構造物の表面、計算領域床面は滑りなし境界条件、計算領域側面および天井は滑り境界条件とした。壁面における境界条件の取り扱いが異なるのは、側面および天井が車両周りの計算精度に及ぼす影響

表 1 数値流体解析の条件一覧 (表中の数値は車両に対する風向角)

番号	地上構造物	車両	非構造格子 RANS		直交格子 LES	
			一樣流	乱流境界層	一樣流	乱流境界層
①	単線高架橋	通勤型	90, 70, 50, 30 度	90, 70, 50, 30 度	90, 70, 50, 30 度	90, 70, 50, 30 度
②	単線盛土	103 系	×	90, 70, 50, 30 度	×	90, 70, 50, 30 度
③	複線高架橋 (桁高 1m, 6m)	103 系	×	90, 30 度	×	×

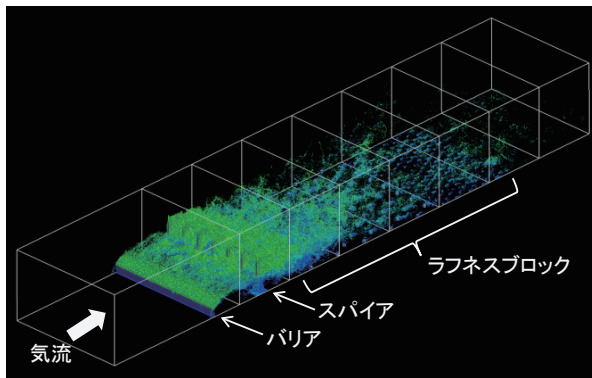


図3 乱流境界層の流れの様子

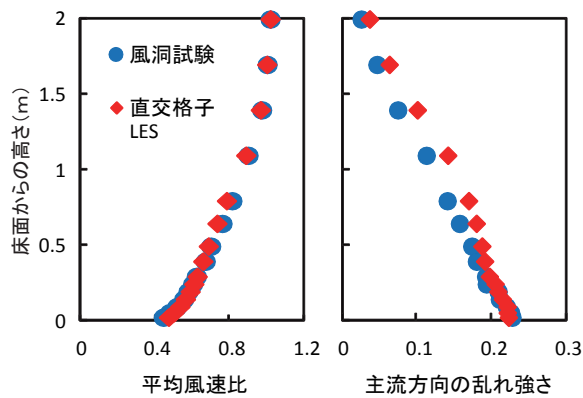


図4 乱流境界層のプロファイルの比較

は小さいと想定され、計算格子を粗くしたためである。流入面の速度境界条件は、一様流の解析においては流入面全体に速度 20m/s を与え、乱れ強さ 1% に相当する乱流エネルギーを与えた。乱流境界層の解析においては、車両および地上構造物が存在しない条件で、車両位置における速度分布および乱れ強さの分布が風洞実験の乱流境界層と一致するように、流入面において速度、乱流エネルギーおよび比散逸率を与えた。乱流境界層の主流速度は 20m/s とした。なお乱流境界層の場合には、風洞床面の境界条件は、表面粗さを加味した滑りなし境界条件とし、速度プロファイルを維持した。

2.3.2 直交格子による LES

計算領域は、主流方向に 4m、高さ方向に 3m、幅方向に 5m とした。なお、単線盛土上の車両の計算においては、車両後流の大剥離の影響が下流境界に影響したため、主流方向計算領域の下流側を 2.5m 延長した。また、盛土を計算領域内に収めるために風向角 30 度の計算については、さらに主流方向計算領域の上流側を 3m 延長した。計算格子数は約 10 億点（盛土上車両の風向角 30 度の条件のみ約 12 億点）とし、計算格子は最小格子間隔が 1mm である直交不等間隔格子とした。単線高架橋、一様流の条件のみ計算格子数は約 20 億点、最小格子間隔は 0.7mm とした。なお、計算実行準備の効率性を重視して、風向角によらず共通の計算格子を用いている。

そのため、計算格子の生成の際には風向角が変化した場合にも、車両近傍に細かな格子が配置されるよう留意した。ただし、風向角 30 度の盛土上の車両の計算のみ、前述のように、上流側に計算格子を延長した。

境界条件は、流入面は速度境界条件とし、一様流の場合には 30m/s に固定した。乱流境界層の場合には後述する方法により生成した流入変動風を速度境界の流入条件として用いた。流出面は対流流出境界条件、計算領域床面と車両および地上構造物の表面は速度ゼロに固定、計算領域側面および天井は滑り境界条件とした。

乱流境界層を用いた横風風洞試験を模擬する LES を実施するためには、車両周りの流体解析に対して非定常の乱流場が流入するという状況の模擬が必要である。そこで、まず乱流境界層のみの解析を実施した。流入面を速度 30m/s に固定し、計算領域内に風洞試験を模擬したバリア、スパイア、ラフネスブロックを設置することで非定常の乱流場を生成し、車両周りの流体解析を行う計算領域の入口に相当する位置における非定常流れ場のデータを計算して、ファイルに保存した。次にファイル保存した非定常流れ場を時間および空間方向に線形補間し、流入境界条件として用いて、車両周りの流れの解析を実施した。乱流境界層の計算領域は、主流方向に 21.8m、高さ方向に 3m、幅方向に 5m とした。計算格子数は約 8100 万点とし、計算格子は最小格子間隔が 10mm である直交不等間隔格子とした。

時間刻みは、車両周りの流れの解析では 1.67×10^{-6} 秒とした。この時間刻みは、車体高さ 0.066m と流速 30m/s とし無次元化すると 7.58×10^{-4} に相当する。ただし、時間進展に陽解法を採用している関係で、一部の風向角の条件で上記の時間刻みではクーラン条件を満たさなかったため、その場合は時間刻みを 1.00×10^{-6} 秒または 0.67×10^{-6} 秒として解析を実施した。乱流境界層の流れの解析では、車両周りの流れの解析と比べ格子間隔を大きくしたため、時間刻みは 3.33×10^{-5} 秒とした。

乱流境界層の流れの様子（速度勾配テンソルの第二不変量の等値面を速度の大きさにより色付け）を図 3 に示す。また、車両が設置される位置における乱流境界層の平均速度分布および乱れ強さの分布を図 4 に示す。乱流境界層生成装置を対象とした LES の計算結果は、風洞試験結果とよく一致しており、本解析は風洞試験の乱流境界層を良好に再現している。

次章において、流体解析により求めた横力係数および揚力係数を実験値と比較するが、各空気力係数は (1) 式により求めた。

$$C_i = F_i / (0.5\rho U^2 A) \quad (1)$$

C_i は横力係数および揚力係数、 F_i は横力および揚力の時間平均値、 ρ は空気密度、 U は車体中心高さにおける接近流の時間平均風速、 A は車体側面積である。なお直

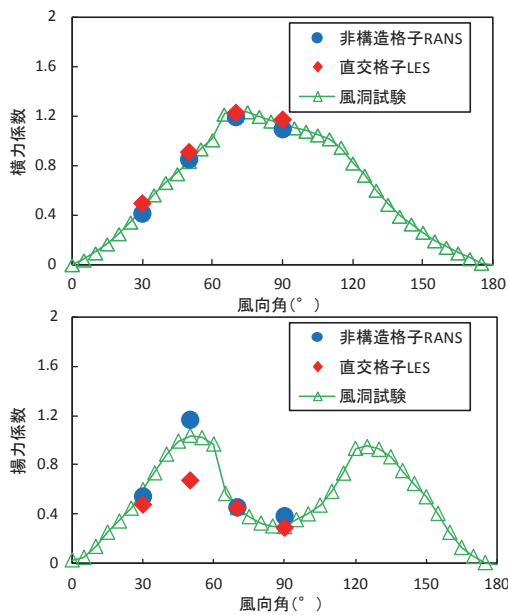


図5 空気力係数の比較
(単線高架橋上の先頭車両，一樣流)

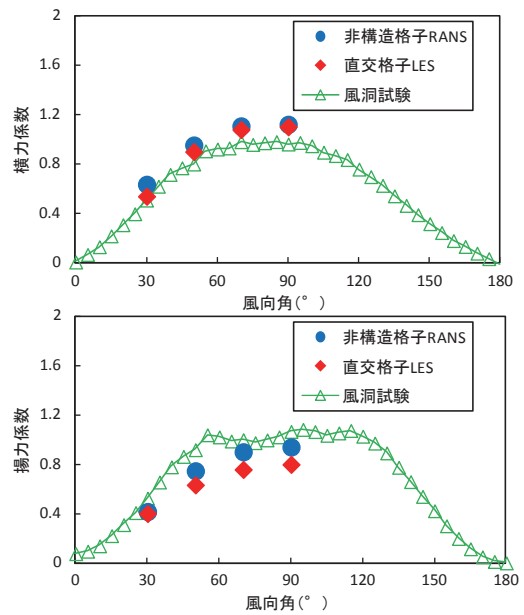


図6 空気力係数の比較
(単線高架橋上の先頭車両，乱流境界層)

交格子による LES では、平均量を算出するために時間平均を行う必要がある。初期の流れ場から十分時間進展させた後、一樣流の解析では、約 0.17 秒間、乱流境界層の解析では、約 1 秒間の平均空気力を算出した。車体高さ (0.066m) と流速 (30m/s) に基づく無次元時間は、各々 75 および 450 となる。気流が乱流境界層の場合には、気流の乱れの時間スケールと比較して空気力を平均化する時間が短い、本解析では以下のように空気力係数を算出した。

本解析では、前述したように事前に乱流境界層のみの解析を実行し、その時系列データを保存し、車両周りの流れの解析に用いた。そのため車両周りの流れの解析で車両に作用する気流は、事前に計算した乱流境界層の気流と平均的な性質のみならず、時々刻々の値も全く同一であるとみなせる。従って本解析では、乱流境界層の解析において車体中心位置に相当する地点における流速を、車両周りの流れの解析において空気力を平均化する時間と同一の時間で平均し、その時間平均流速を用いて空気力係数を算出した。なお本方法の妥当性については文献 7) を参照されたい。

次章で数値流体解析の結果を述べるが、以下では非構造格子による RANS を RANS と、直交格子による LES を LES と略記する。

3. 解析結果

3.1 単線高架橋上の車両

単線高架橋上の車両の横力係数および揚力係数を図 5 および図 6 に示す。図 5 が一樣流の結果、図 6 が乱流境界層の結果である。車両転覆に最も影響を及ぼす横力係数については、一樣流では、両手法ともに概ね実験値と一

致している。しかし、乱流境界層の場合には、実験値より計算値はやや過大であり、RANS では LES よりも実験値との差が大きくなった。また、両手法ともに横力係数と比べて揚力係数においては、実験値とのかい離が大きくなった。横力係数の実験値との誤差 (横力係数の計算値と実験値との差の絶対値) は、一樣流の場合、RANS では 4 風向角の最大で 0.05、平均で 0.03 であり、LES では 4 風向角の最大で 0.08、平均で 0.05 であった。乱流境界層の場合、RANS では 4 風向角の最大で 0.16、平均で 0.14 であり、LES では 4 風向角の最大で 0.14、平均で 0.09 であった。

図 5、図 6 を比較すると風向角 90 度において一樣流と比べて乱流境界層の条件で揚力係数が大きい。図 7 に RANS により得られた風向角 90 度での車両先頭部付近の主流方向に平行な断面における圧力係数の分布を示す。また図 8 に同じ断面における主流方向流速分布を示す。なお圧力係数は車体中心高さにおける接近流の流速に基づく速度圧で圧力を無次元化した値である。また流速は、車体中心高さにおける接近流の流速により無次元化した。一樣流と比べて乱流境界層では車両風上側屋根部において負圧が大きい。また流速分布から屋根部における剥離の様子が気流条件により異なることが分かる。即ち、一樣流では車両の風上側屋根部で流れの剥離が見られるが、乱流境界層の条件では気流の乱れの影響により剥離が遅れ、流れが屋根に沿うため、屋根部の大きな負圧の発生につながった。また、それに伴い車両後流域における逆流領域も一樣流と比べて小さくなった。

図 5、図 6 の風向角 70 度における横力係数に着目すると、一樣流では風向角 90 度と比べ増加するのに対し、乱流境界層ではそのような増加は見られない。図 9 に

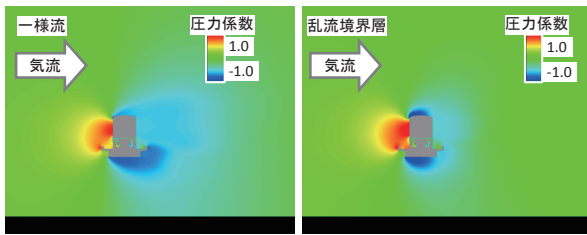


図7 単線高架橋の車両周りの圧力分布(風向角 90 度)

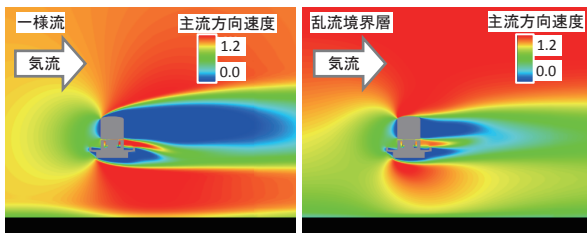


図8 単線高架橋の車両周りの流速分布(風向角 90 度)

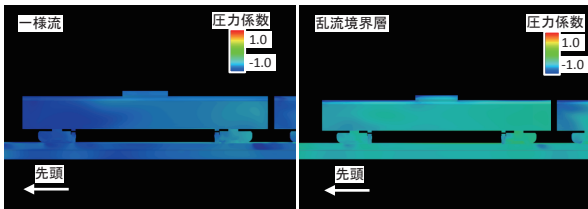


図9 単線高架橋の車両表面の圧力分布(風向角 70 度)

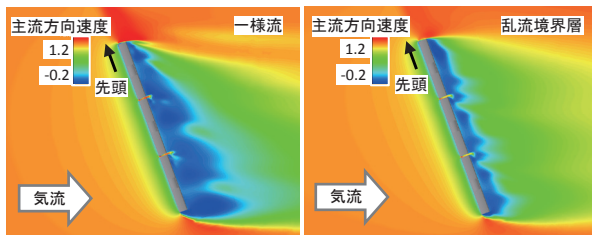


図10 単線高架橋の車両周りの流速分布(風向角 70 度)

RANSにより得られた風向角70度における車両表面の風下側の圧力係数分布を示す。一樣流では先頭部付近に大きな負圧が発生するのに対し、乱流境界層では先頭部にそのような負圧は見られず、車体長手方向における圧力係数の変化が小さい。図10に車体中心高さにおける断面の主流方向流速分布を示す。車両風下側の逆流域に着目すると、一樣流の場合には、先頭部に近いほど逆流域が小さく、先頭部から車両風下側に巻き込む流れが強く、三次元的な流れが現れている。一方、乱流境界層の場合には、逆流域が小さく、車両長手方向に対しても逆流域の大きさはあまり変化せず、三次元的な流れが一樣流と比較して弱い。従って一樣流における先頭部の三次元的な流れが、先頭部の負圧の発生につながったと考えられる。

3.2 単線盛土上の車両

単線盛土上の車両の横力係数および揚力係数を図11に示す。気流条件は乱流境界層である。単線高架橋の場合

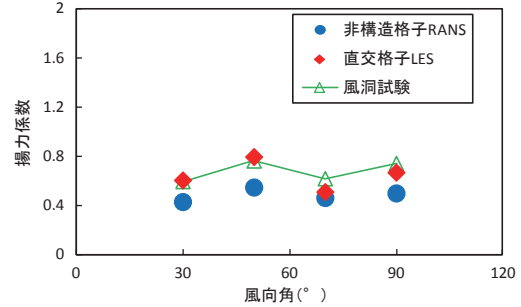
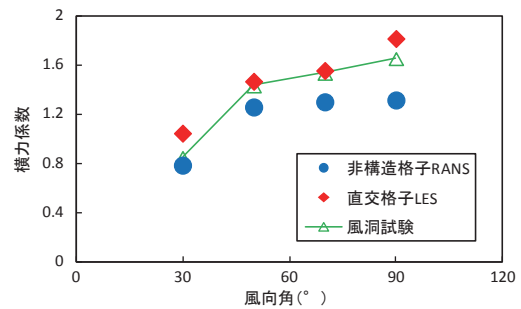


図11 空気力係数の比較
(単線盛土上の先頭車両, 乱流境界層)

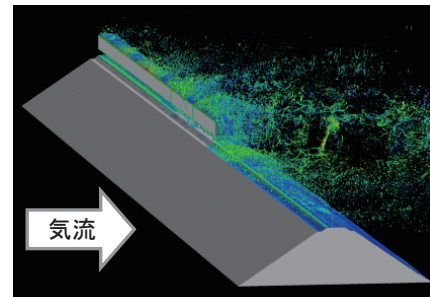


図12 単線盛土上車両周りの流れの様子(風向角 90 度)

合と比較して盛土の条件では、LESに比べ、RANSでは風向角が90度に近い条件で予測精度が悪化することが分かる。図12にLESによって得られた風向角90度における流れの様子を示す。車体後流領域において細かな渦構造が現れるのに加えて、盛土後流にも大きな渦構造が現れることが分かる。1章でも述べたように定常解析であるRANSは、非定常解析であるLESと比べてモデル化する部分が多く、複雑な流れ場に対しては予測精度が悪化する場合がある。盛土上車両周りの流れの解析では、盛土の存在により流れの大剥離が生じ、車両周りの流れの構造に影響を及ぼす。このため定常解析であるRANSでは、非定常性の強い盛土上の車両周りの流れ場の解析における予測精度が低下したと考えられる。横力係数の実験値との誤差は、RANSでは4風向角の最大で0.34、平均で0.20であり、LESでは4風向角の最大で0.20、平均で0.11であった。

3.3 複線高架橋上の車両

複線高架橋上の車両の横力係数および揚力係数を図13に示す。気流条件は乱流境界層であり、解析は

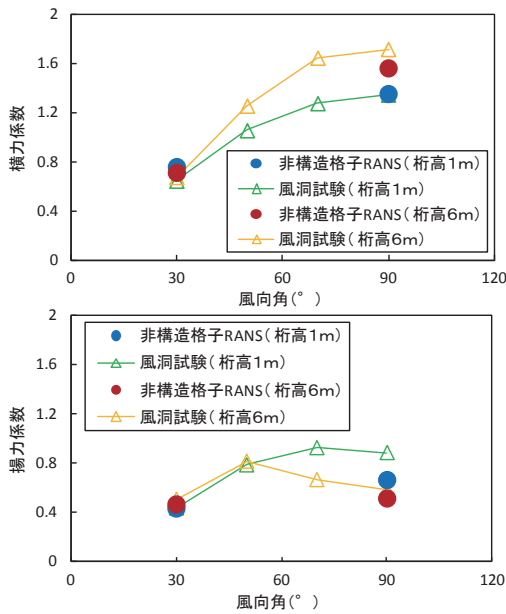


図 13 空気力係数の比較
(複線高架橋上の先頭車両, 乱流境界層)

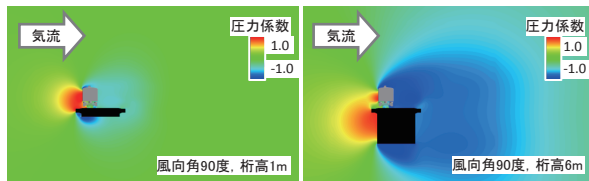


図 14 複線高架橋の車両周りの圧力分布の比較
(風向角 90 度)

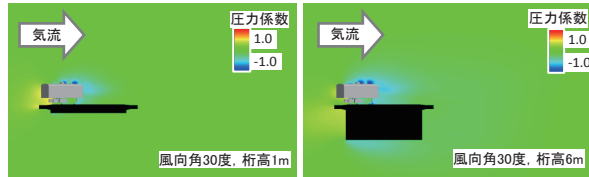


図 15 複線高架橋の車両周りの圧力分布の比較
(風向角 30 度)

RANSのみである。4条件における横力係数の実験値との誤差は、最大で0.15、平均で0.08であった。風向角90度においては桁高により横力係数が大きく異なるのに対し、風向角30度ではそのような傾向は見られず、RANSにより、その傾向を捉えることができた。図14、図15に風向角90度、風向角30度における車両先頭部付近の主流方向に平行な断面における圧力係数の比較を示す。風向角90度では、桁高6mの場合に、高架橋後流域に大きな負圧場が生じ、それに伴い車両風下側にも桁高1mの場合と比較して強い負圧場が生じ、横力係数の増大につながった。一方、風向角30度では高架橋後流域の圧力場に桁高による変化は見られず、車両風下側の圧力分布にも差が現れないため、横力係数は桁高によらず同程度となった。

4. おわりに

本研究では、過去に実施した代表的な横風風洞試験を模擬した数値流体解析を実施し、非構造格子によるRANSおよび直交格子によるLESを適用し、その予測精度を示した。以下に得られた知見を示す。

- (1) 単線高架橋の条件では、非構造格子によるRANS、直交格子によるLESともに同程度の予測精度を有したが、単線盛土の条件では、直交格子によるLESと比べて非構造格子によるRANSの予測精度が悪化した。
- (2) 直交格子によるLESを適用した場合に、本報告で示した計算例では、横力係数の実験値との誤差は最大で0.2となり、今回用いた格子解像度で、横力係数においては風洞試験を概ね再現可能であった。

今後は、異なる形状を持つ車両に対しても適用を進め、計算例を増やし、その予測精度についてさらなる検討を行う必要がある。

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) 坪倉誠: 京からポスト京へ 大規模CFDが拓く新たな応用空力シミュレーション, ながれ, Vol.35, No.2, pp.77-85, 2016
- 3) 鈴木実, 種本勝二: 横風に対する車両の空力特性に関する実物大試験と風洞試験, 第14回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2007) 講演論文集, pp.231-234, 2007
- 4) Menter, F. R., Kuntz, M., and Langtry, R., "Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model," Proceedings of 4th International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer, Antalya, Turkey, October 12-17, 2003, pp. 625-632.
- 5) Kobayashi, H., "The subgrid-scale models based on coherent structures for rotating homogeneous turbulence and turbulent channel flow," Physics of Fluids, Vol.17, pp.045104-1-12, 2005.
- 6) 中出孝次, 黒岩奈保, 野口雄平: LESによる鉄道車両の横風空力特性シミュレーション, 第28回数値流体力学シンポジウム, F06-1, 2014
- 7) Nakade, K., Noguchi, Y., and Kikuchi, K., "Fluctuating aerodynamic force on railway vehicle under crosswind using large-eddy simulation," 8th International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics and Applications, Massachusetts, USA, June 7-11, 2016.