

平地上の乱流境界層を走行する 鉄道車両周りの流れの数値シミュレーション

中出 孝次*

**Numerical Simulation of Flow Around a Railway Vehicle
in a Turbulent Boundary Layer Over Flat Terrain**

Koji NAKADE

In order to investigate running effects on aerodynamic characteristics of a railway vehicle under strong cross winds, the author performed Large-Eddy Simulation of flow around a simple running train model. To simulate the cross winds which affect the running train, the author used inflow turbulence generation technique based on an unsteady flow simulation method in the frame of the train moving coordinate system. Pressure coefficient distribution on the surface of running train, in the case where the train speeds are 10m/s, 5.8m/s, 1.8m/s and 0m/s and the wind speed is 10m/s in the direction perpendicular to the train running direction, was obtained by the numerical simulation and compared with those from experimental studies. The detailed flow fields around the running train were also presented. Based on the comparison between the running train simulation and the stationary train one with the same relative wind angles to the train, the running effects on aerodynamic characteristics in the case of the simple train model were discussed.

キーワード：ラージ・エディ・シミュレーション，乱流境界層，鉄道車両，横風，走行車両

1. はじめに

横風に対する鉄道車両の空力特性に関し、地面に対する列車の走行が空力特性に与える影響についての知見は多くはない（研究例として文献¹⁾など）。その影響に着目した実験による最近の研究として、模型走行装置を用いた風洞実験²⁾があり、車体周りの詳細な圧力分布が測定された。一方、列車走行が空力特性に与える影響に関する数値シミュレーションによる研究として、流入乱れは省略しているが（ただし流入風の平均速度勾配は与えている）、横風を受ける走行車両周りの流れの計算³⁾が実施されている。ここでは、静止車両に対しては風洞実験結果との比較から計算結果の検証を行なったが、走行車両については当時利用できる実験結果がなかったため実験との比較はできなかつた。今回、模型走行装置を用いた風洞実験により平地上の走行車両の実験結果が得られたことを受けて、同一の条件で数値シミュレーションを実施した。さらに、今回の計算では流入乱れも考慮することにより、風洞実験の状況をより正確に再現できるように配慮した。

本報告では、走行車両周り流れの計算への流入乱れの

導入手法、風洞実験と同じ条件の数値シミュレーションの実施および実験結果との比較、さらに走行車両と静止車両の計算結果の比較について述べる。

2. 走行車両周り流れの計算への流入乱れの導入手法

2.1 計算モデル

計算対象は、列車進行方向から偏角 α の風 $\mathbf{W}=(W_x, W_y, W_z)$ の中を速度 $\mathbf{V}=(0, 0, -V)$ で走行する車両周りの流れである。非定常な風（乱流境界層）を受ける車両周りの流れの計算は、乱流境界層の計算と車両周りの流れの計算の二つを並列に実行し、乱流境界層の計算から得られる瞬時の速度場を車両周りの流れの流入境界に逐次導入することにより実現する。

乱流境界層と車両周り流れの計算モデルを図1に示す。車両形状は鉄道車両1両分に相当する形状を直方体で簡易的に表現し、車体高さを H としたとき、車体幅 $1.061H$ 、車体長さ $7.386H$ 、車体下面と地面との間隔 $0.398H$ とした。これらの寸法は文献²⁾に対応するように決めた。

乱流境界層および車両周りの流れは車両に固定した座標系で計算する（図1は地面固定座標系で示している

* 環境工学研究部 車両空力特性研究室

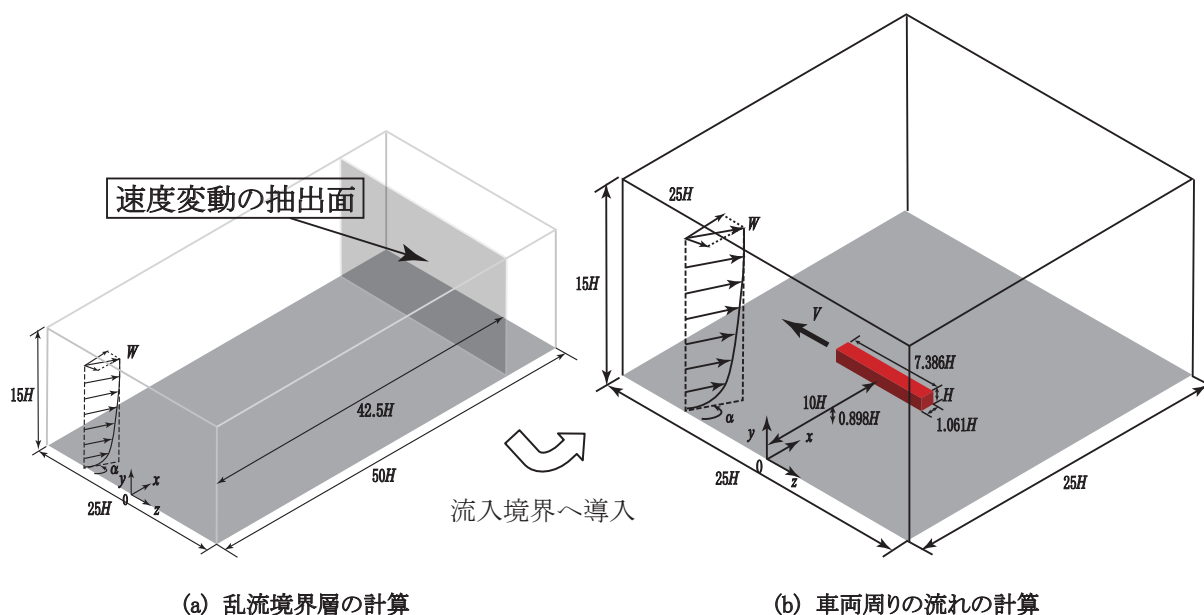


図1 計算モデル

が、計算実行時には、計算領域全体が列車速度 V で移動する。つまり、乱流境界層の計算では、風 W (偏角 α) ではなく、車両に対する風 $U=W-V$ (偏角 β) を計算することになる。ここで、 W は地表面からの高さによって変化するため、車両に対する風速の大きさ U および偏角 β も高さによって変化することになる (図2)。

図1 (a) 乱流境界層の計算用の格子は、 x 方向、 z 方向を等間隔 ($\Delta x=\Delta z=0.25H$)、 y 方向を不等間隔 ($\Delta y=0.01 \sim 1H$) にした直交不等間隔格子を用いた (計算格子数: 100万セル)。図1 (b) 車両周り流れの計算用の格子は、最小格子間隔を $0.01H$ (地面および車体表面の垂直方向) とした直交不等間隔格子を用いた (計算格子数: 約1300万セル)。

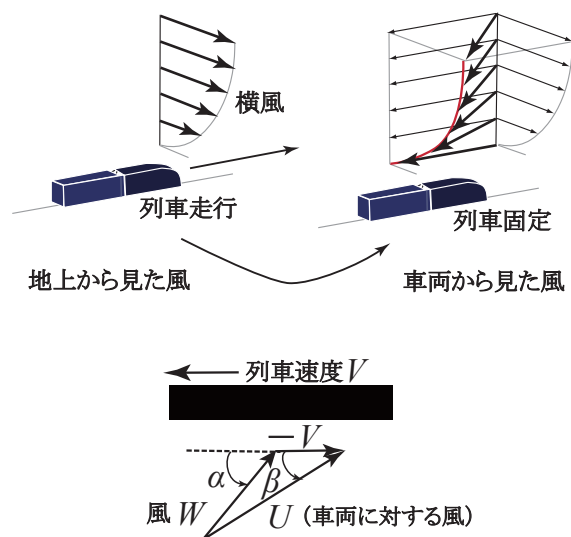


図2 車両から見た風

2.2 乱流境界層の計算方法

乱流境界層の計算方法は、片岡らの方法⁵⁾を築堤上の流れに適用した計算方法⁴⁾と同様である。この方法では、乱流境界層の空間発展は近似的に小さいとし、主流方向の下流に抽出面 (図1の速度変動の抽出面) を設定し、その面の速度変動成分を図1 (a) の流入境界面に再流入させる。

今回の計算対象は、風に偏角をつけ、さらに列車速度で移動する移動座標系で風の計算をする必要がある。ここでは、流入境界面で設定する平均速度分布に偏角をつける、つまり、 $\alpha=90^\circ$ について提案された片岡らの方法を任意の α に拡張するとともに、移動座標系でこの計算を実施するとした点が、新規に開発した部分である。流入境界面で設定する平均速度分布は、風洞実験結果²⁾を参考に、 $1/7$ べき乗則の分布、境界層厚さ $\delta=2.9H$ とした。

2.3 境界条件

図1 (a) 乱流境界層の計算の境界条件は次の通りである。流入境界条件は2.2節で述べた方法で与え、流出境界は対流流出条件、地面は速度を $-V$ で固定、上空は流入境界で設定する一様流速度で固定、スパン方向 (z 方向) は周期境界条件とした。

図1 (b) 車両周り流れの計算の境界条件は次の通りである。流入境界は図1 (a) の抽出面における乱流境界層の瞬時の速度、流出境界は対流流出条件、地面は速度を $-V$ で固定、上空はスリップ境界条件、スパン方向 (z 方向) は周期境界条件とした。

2.4 数値解法

非圧縮性流体のLES（ラージ・エディ・シミュレーション）の基礎式に対して、一般座標系コロケート格子の高次精度差分法を用いた⁶⁾。空間方向を4次精度中心差分、時間方向を3次のアダムス・バッシュフォース法により離散化した。乱流解析方法は、ダイナミック・スマゴリンスキーモデル^{7) 8)}を用いた。なお、数値振動による計算不安定を除去するため、4階数値粘性も併用した。

風 W の境界層外部の一様流の大きさ W_0 と車体高さ H で無次元化したときのレイノルズ数 W_0H/ν （ここで ν は動粘性係数）を参考にした風洞実験²⁾と同じ29,000（実物のレイノルズ数 10^6 のオーダーに対しては低い）、時間刻み ΔT を $0.001H/W_0$ （クーラン数で0.1～0.2程度）とした。計算は $T=200H/W_0$ まで実施し、平均量の算出は、 $T=50 \sim 200H/W_0$ のデータを用いた ($W_0=10\text{m/s}$, $H=0.044\text{m}$ (1/60縮尺模型) のとき、0.66秒間に相当)。なお、図1(a)乱流境界層と図1(b)車両周り流れの並列計算の前に図1(a)乱流境界層のみの計算を行い、その速度場が統計的に定常状態になっていることを確認している。

2.5 計算条件

車体高さ $H=0.044\text{m}$ 、風の境界層外部の一様流の大きさ $W_0=10\text{m/s}$ とする。偏角を有する乱流境界層の計算ケース(2.6節)では、偏角 $\alpha=90^\circ, 70^\circ, 45^\circ$ とした計算を実施した。走行車両の計算ケース(3節)では、列車速度を $0\text{m/s}, 1.8\text{m/s}, 5.8\text{m/s}, 10\text{m/s}$ とする。走行の影響を比較検討するために別途実施した静止車両の計算ケース(4節)では、 α を $40.6^\circ, 56.2^\circ, 78.1^\circ$ とする。これらは、走行車両の計算ケースの列車速度 $10\text{m/s}, 5.8\text{m/s}, 1.8\text{m/s}$ とそれぞれ車体中心高さの β が等しい条件になっている。

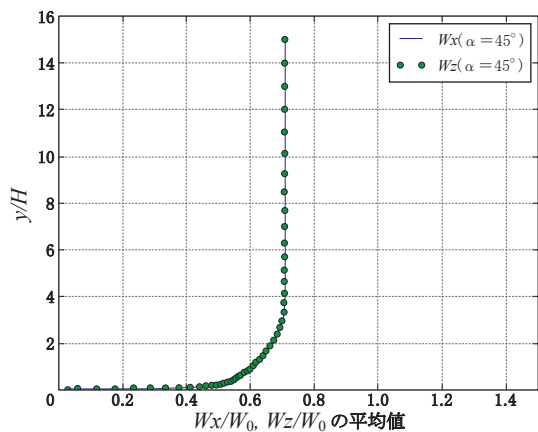
2.6 偏角を有する乱流境界層の計算

図1(a)の乱流境界層計算の妥当性を確認するために、偏角を有する乱流境界層の計算を実施した。乱流境界層の計算領域における位置 $x=10H$ の平均風速分布とその標準偏差を図3に示す。なお、 $x=10H$ は車両周り流れ計算における車体風上面の位置に対応しており、この位置の風速分布は車両がないときの車体風上面位置の風速分布を示すものである。図3(a)より、平均風速分布について、偏角 $\alpha=45^\circ$ で $W_x=W_z$ となり、偏角 α に対応して適切に W_x, W_z が生成されていることが確認できる。乱流境界層の標準偏差については、一般的に主流方向はスパン方向よりも大きくなることが知られているが、偏角 $\alpha=90^\circ$ の結果もその傾向を示している。また、偏角 $\alpha=45^\circ$ で、 W_x と W_z の標準偏差がほぼ等しくなり、偏角 $\alpha=70^\circ$ では、偏角 $\alpha=90^\circ$ と偏角 $\alpha=45^\circ$ の間の傾向を示していることが確認できる(図3(b))。以上より、平均速度および速度の標準偏差については、本計算方法による偏角を有する乱流境界層の生成は妥当であると考えられる。

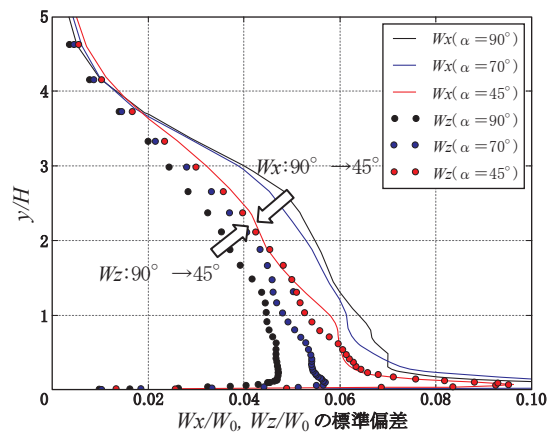
3. 走行車両の計算結果と風洞実験結果の比較

境界層外部の一様流速度 $W_0=10\text{m/s}$ および偏角 $\alpha=90^\circ$ を固定し、列車速度を $0\text{m/s}, 1.8\text{m/s}, 5.8\text{m/s}, 10\text{m/s}$ と変化させた条件の数値シミュレーション結果について述べる。

乱流境界層を走行する鉄道車両周りの流れの数値シミュレーションの例として、列車速度 5.8m/s の計算における瞬時の速度場を図4に示す。図4(a)は、(i)車体中心高さの水平断面上、(ii)車体の先頭付近・(iii)中央・(iv)後尾付近の垂直断面上の速度ベクトルをそれぞれ示している。図4から線路に対して真横の風が吹



(a) 平均風速分布



(b) 風速変動の標準偏差

図3 偏角を有する乱流境界層 ($\alpha=90^\circ, 70^\circ, 45^\circ$) の計算結果

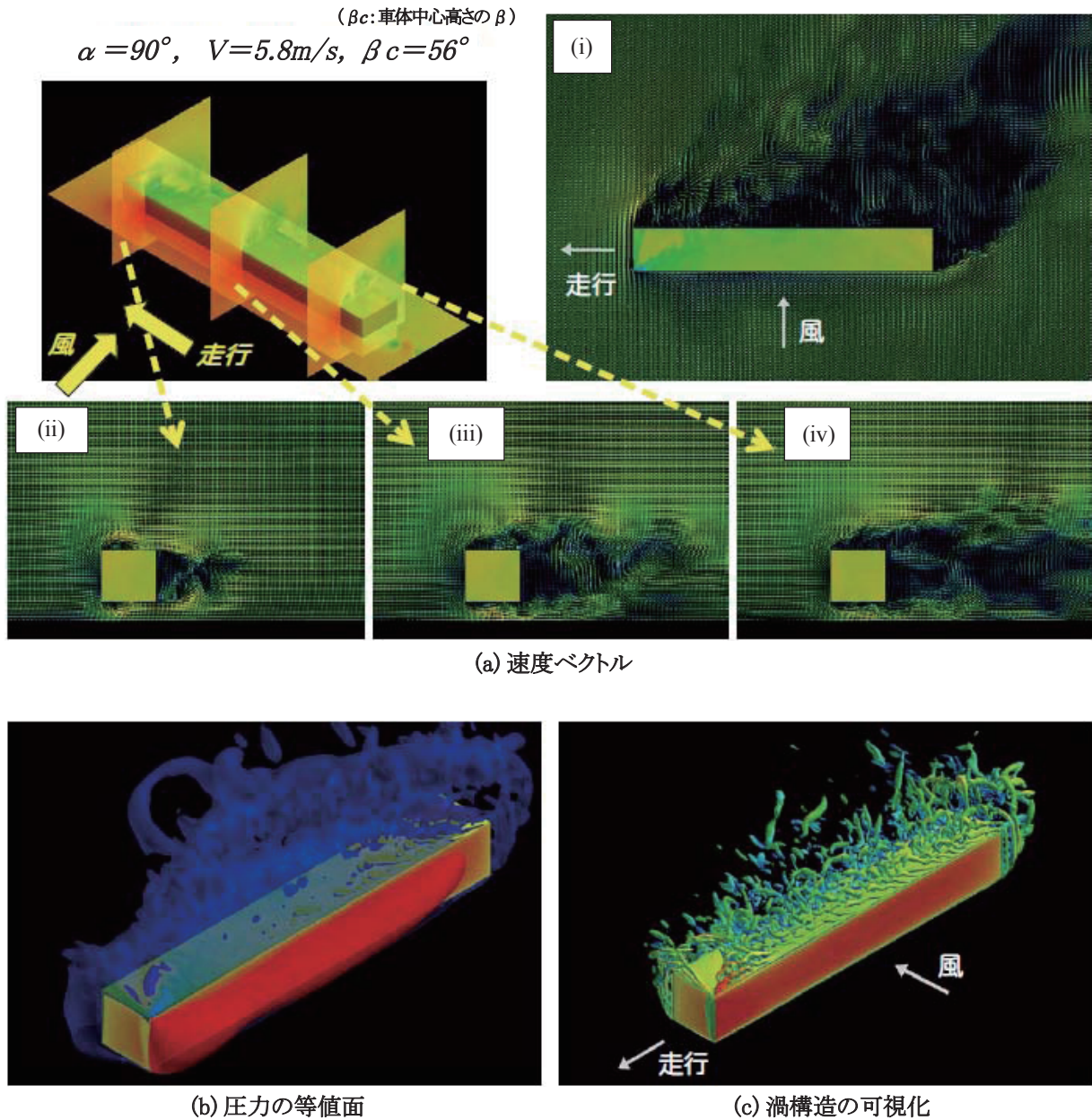


図4 乱流境界層中を走行する鉄道車両周りの流れの数値シミュレーション例（瞬時流れ場）

く中を車両が走行することにより、車両には相対的に斜め前方から風が作用する様子、車両から流れが剥離する様子、車両の風下側では乱れの大きな流れとなる様子などが観察される。図4 (b) は圧力の等値面を示している。赤色は高い圧力、青色は低い圧力の等値面である。図4 (b) から車両の風上面に生じる高圧力の様子、流れの剥離領域の低圧力が複雑に変動する様子が観察される。図4 (c) は速度勾配テンソルの第二不変量による渦構造の可視化を示している。図4 (c) から複雑な形状をした管状の渦構造が観察される。また、車両の先頭部の屋根上付近では、1対の円錐状の渦構造が観察される。

計算結果の精度を確認するため、列車速度 0 m/s のケー

スに対して、乱流境界層の計算領域における位置 $x=10H$ (車両風上面と同じ位置) の平均風速と乱れ度の分布の計算結果を風洞実験結果と合わせて図5に示す。なお、図5で示す乱れ度分布は風速変動の標準偏差をその位置の平均風速で無次元化しており、境界層外部の一樣流速で無次元化した図3 (b) とは基準風速が異なることに注意する。図5から平均風速と乱れ度の分布は風洞実験を良好に再現していることが確認できる。車体中心高さの相対風速を基準とした車体中心高さの水平断面における平均圧力係数分布について、計算結果と風洞実験結果との比較を図6に示す。計算結果と風洞実験結果についての良好な一致が確認出来る。

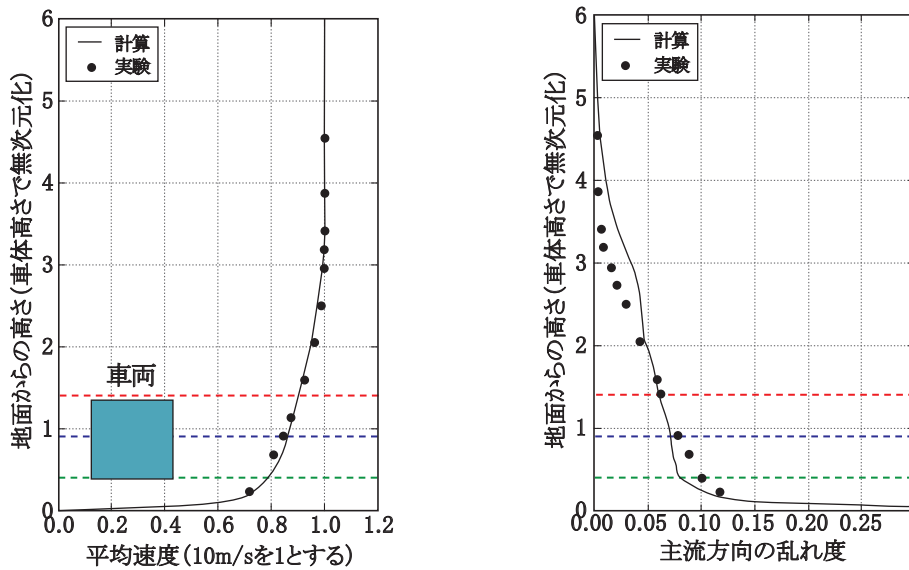


図5 車両位置の主流方向平均風速と乱れ度の分布

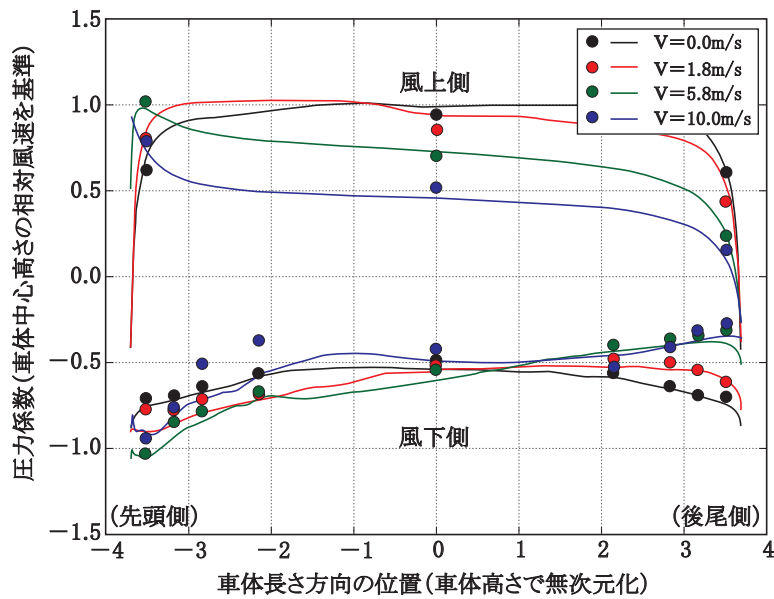


図6 車体周りの圧力係数分布
(実線：計算，シンボル：実験)

4. 走行車両と静止車両の比較

横風時の車両空力特性を評価する多くの風洞実験では、車両の走行状況を車両に対する相対風の偏角 β_c （車体中心高さの β ）を等しくした静止車両により模擬している。本節ではその模擬する手法を数値シミュレーションにより検証する。車両に対する相対風の偏角 β が等しい条件で、走行車両（前節の計算）と静止車両の計算結果の比較を行い、車両走行が流れ場に及ぼす影響を調べる。なお、静止車両の計算の際の α は、走行車両の β

に等しくなるように決定した。

平均横力係数および平均揚力係数（代表速度：車体中心高さの相対風速，代表面積：車体側面積）について、走行車両と静止車両とを比較した結果を図7に示す。図7から平均横力係数，平均揚力係数ともに、走行車両と静止車両とでほとんど差がないことが分かる。車体中心高さの平均圧力係数分布（代表速度：車体中心高さの相対風速）について、走行車両と静止車両とを比較した結果を図8に示す。図8から車体中心高さの平均圧力係数の風上側，風下側の両方において、走行車両と静止車両

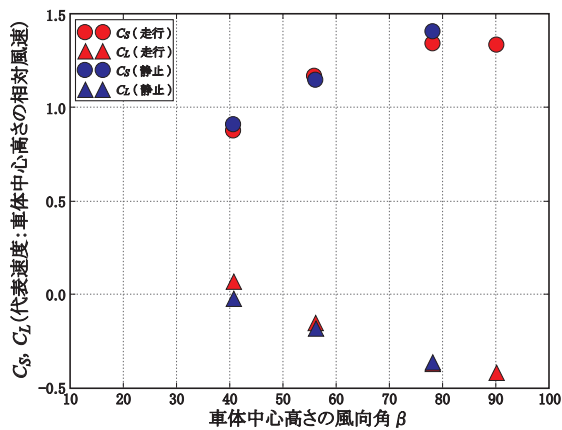


図7 横力係数 C_S と揚力係数 C_L

とでほとんど差はないことが分かる。これは、風洞実験²⁾と同じ傾向である。

5. まとめ

平地上の乱流境界層を走行する鉄道車両周りの流れの数値シミュレーションを実施した。乱れを含む風の生法は、過去に実施した築堤上の流れの数値シミュレーションで用いた方法を列車速度で移動する移動座標系に拡張することにより実現し、走行と乱流流入の2つの影響を同時に模擬することが出来るようになった。走行車両周りの流れの数値シミュレーションについては、鉄道総研の大型低騒音風洞で実施された走行模型装置を用いた実験結果と比較し、車体周りの平均圧力係数分布について概ね良好な一致が確認出来た。車両に対する相対風の偏角を等しくした条件で、走行車両と静止車両の数値シミュレーションを比較したところ、平均圧力係数分布、平均横力係数、平均揚力係数について顕著な差は見られなかった。つまり、横風を受ける平地上の単純形状車両については、列車走行の影響は大きくないことが計算から示された。

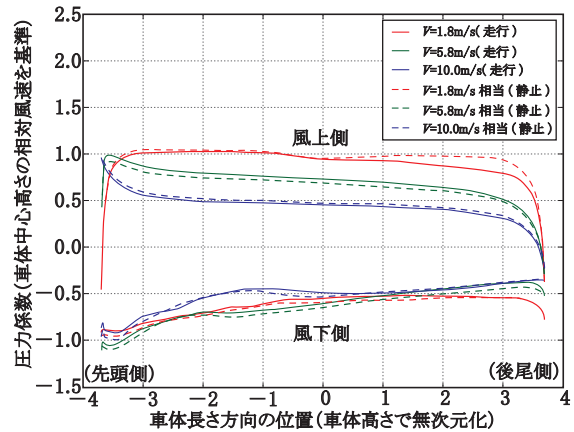


図8 車体周りの圧力係数分布
(実線：走行車両，破線：静止車両)

文献

- 1) Baker, C.J., "Train aerodynamic forces and moments from moving model experiments," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol.24, pp.227-251, 1986.
- 2) 鈴木実：模型走行装置を用いた横風に対する鉄道車両の風洞試験，日本風工学会誌，Vol.36, No.3 (No.128), pp.258-263, 2011
- 3) 中出孝次，鈴木昌弘：横風を受ける走行列車周りの流れの数値シミュレーション，日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集，pp.599-600, 2009
- 4) 中出孝次，鈴木昌弘：横風を受ける盛土上の流れの数値シミュレーション，鉄道総研報告，Vol.24, No.9, pp.51-56, 2010
- 5) 片岡浩人，水野稔：流入変動風を用いた三次元角柱周りの気流解析，日本建築学会計画系論文集，523, pp.71-77, 1999
- 6) 梶島岳夫，太田貴士，岡崎和彦，三宅裕：コロケート格子による非圧縮流れの高次差分解析，日本機械学会論文集B編，63-614, pp.3247-3254, 1997
- 7) M. Germano, U. Piomelli, and P. Moin, W.H. Cabot, "A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model," *Physics of Fluids*, A3-7, pp.1760-1765, 1991.
- 8) D.K. Lilly, "A proposed modification of the Germano subgrid-scale closure model," *Physics of Fluids*, A4-4, pp.633-635, 1992.