

横風を受ける車両周りの流れの数値シミュレーション

環境工学研究部 車両空力特性研究室
主任研究員 中出 孝次

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)。そこで、最近、模型走行装置を用いた風洞実験²⁾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、同一の条件での流れの数値シミュレーションを試みた。本報告では、走行車両周りの流れの計算への流入乱れの導入の試み、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. 計算方法

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の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。

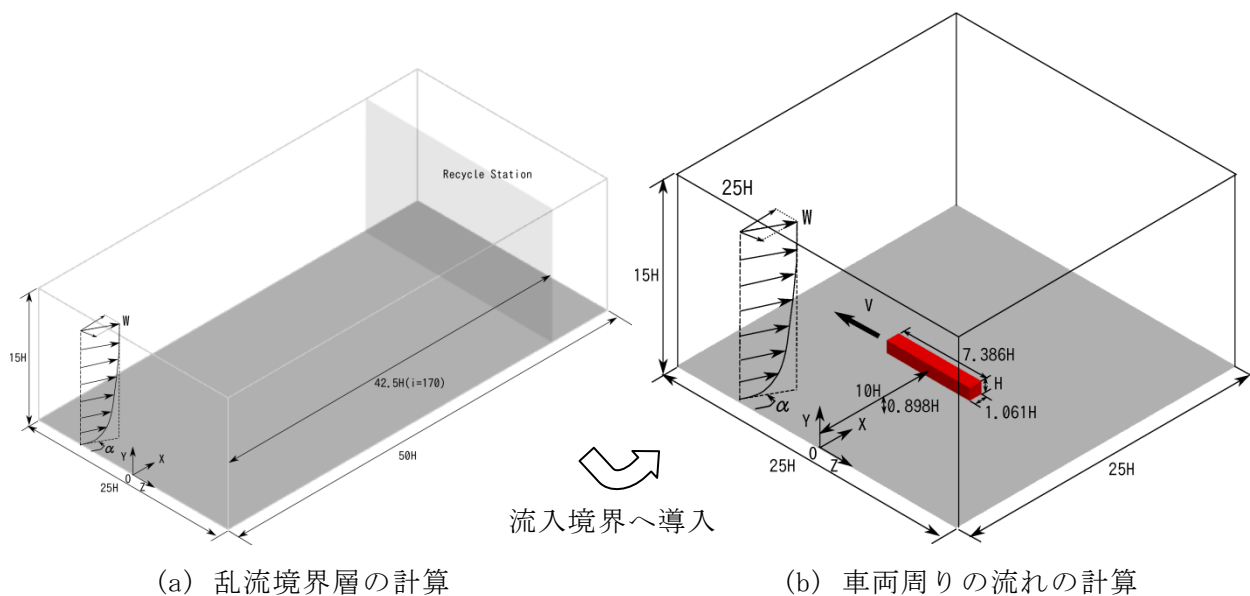


図1 計算モデル

乱流境界層および車両周りの流れは車両を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。

乱流境界層の計算格子は、 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)。車両周りの流れの計算格子は、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)。

2. 2 境界条件

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 3 節で述べる方法で与え、流出境界は対流流出条件、地面は速度を $-V$ で固定、上空は流入境界で既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。

車両周りの流れの計算の境界条件は次の通りである。流入境界は乱流境界層の瞬時の速度を与え、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. 3 数値解法

非圧縮性流体の LES 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。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($W_0 H / \nu$)を参考にする風洞実験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 $T=200 H/W_0$ 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、乱流境界層と車両周りの流れの並列計算の前に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. 4 計算条件

車体高さ $H=44\text{mm}$ 、風の境界層外部の一様流の大きさ $W_0=10\text{m/s}$ とする。走行車両の計算ケースでは、列車速度を 0m/s , 1.8m/s , 5.8m/s , 10m/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では、 α を 40.6° , 56.2° , 78.1° とする。これらは、走行車両の計算ケースの列車速度 10m/s , 5.8m/s , 1.8m/s とそれぞれ β が等しい条件になっている。

3. 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³⁾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 Recycle Station)を設定し、その面の速度変動成分を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、流入境界面で既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

することとした。流入境界面で既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。

4. 計算結果

4. 1 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 0m/s 、 1.8m/s 、 5.8m/s 、 10m/s と変化させた条件に対する数値シミュレーション結果について述べる。

計算結果の精度を確認するために実施した列車速度 0m/s のケースについて、乱流境界層の計算領域における $x=10H$ の位置(車両風上面と同じ位置)の W の平均風速分布を図2に示す。図2から平均風速分布は風洞実験を再現していることが確認できる。なお、車体中心高さの主流方向の乱れ度は約8%であり、風洞実験(約7%)とほぼ同様である。車体中心高さの相対風速 $(U_{xc}^2+U_{zc}^2)^{1/2}$ 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3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。

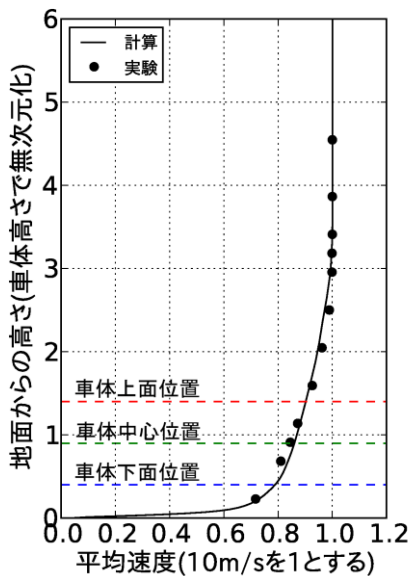
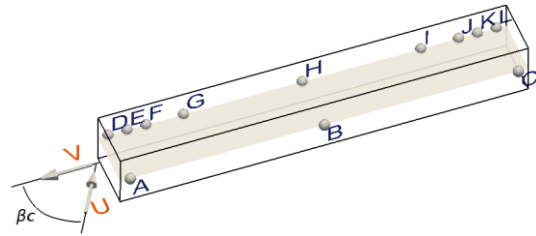


図2 平均風速($x=10H$)

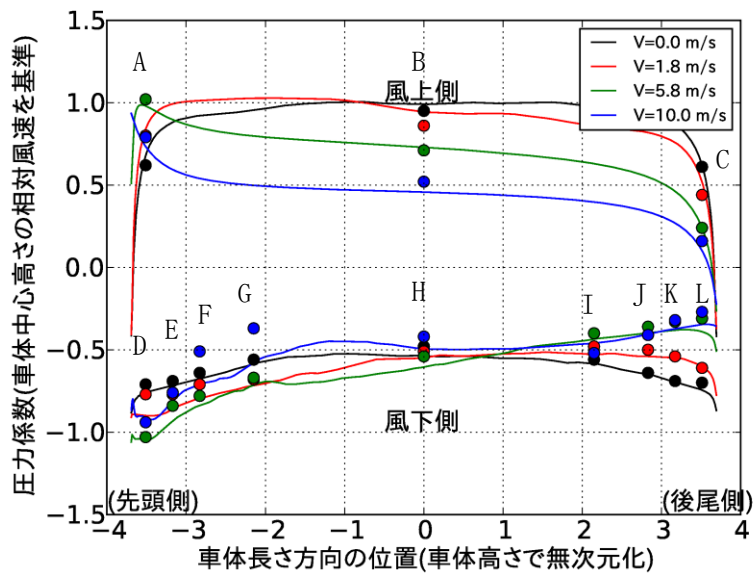


図3 車体周りの圧力係数分布
(実線：計算，シンボル：実験²⁾)

4. 2 走行車両と静止車両の比較

多くの風洞実験では、車両走行の状況を車両に対する相対風の偏角 β を等しくした静止車両により模擬している。本節では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、車両走行の影響を調べる。静止車両の計算は、走行車両の

計算結果より算出した β に等しくなるように風向角 α を決定し、実行した。

平均横力係数および平均揚力係数(代表速度: $(U_{xc}^2 + U_{zc}^2)^{1/2}$, 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 4 に示す。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: $(U_{xc}^2 + U_{zc}^2)^{1/2}$)について, 走行車両と静止車両とを比較した結果を図 5 に示す。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。

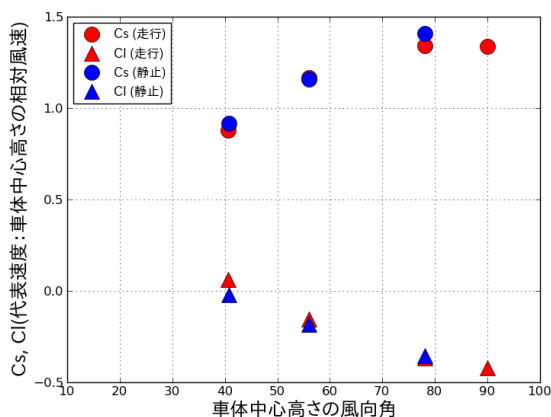


図 4 横力係数 C_S と揚力係数 C_L

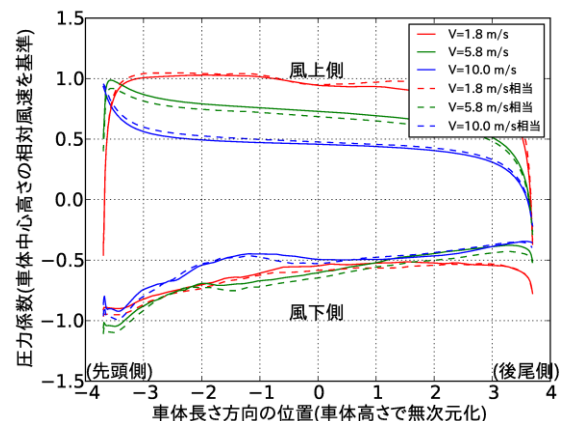


図 5 車体周りの圧力係数分布
(実線: 走行車両, 破線: 静止車両)

5. まとめ

乱れを含む風が流入する平地上の走行車両周りの流れの数値シミュレーションを実施した。乱れを含む風の生成法は, 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, 走行模型装置を用いた風洞実験結果と比較し, 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の車両については, 列車走行の影響は大きくないことが計算からも示された。今後、築堤上の列車走行の影響についての検討を進める予定である。

文献

- 1) C. J. Baker : Train aerodynamic forces and moments from moving model experiments, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 24(1986), pp. 227-251.
- 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) (2011), pp. 258-263.
- 3) 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(1999), pp. 71-77.
- 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, Sep. (2010), pp. 51-56.