

# 横風を受ける鉄道車両周りの流れの数値シミュレーション

## プロジェクト責任者

鈴木 昌弘 財団法人鉄道総合技術研究所 環境工学研究部 空気力学研究室

## 著者

中出 孝次<sup>\*1</sup>、鈴木 昌弘<sup>\*1</sup>、廣川 雄一<sup>\*2</sup>、西川 憲明<sup>\*2</sup>

\*1 財団法人鉄道総合技術研究所 環境工学研究部 空気力学研究室

\*2 独立行政法人海洋研究開発機構 シミュレーション応用研究グループ

利用施設： 独立行政法人海洋研究開発機構 地球シミュレータ

利用期間： 平成 21 年 4 月 1 日～平成 22 年 3 月 31 日

## アブストラクト

強風時の鉄道の安全・安定輸送を実現するためには、車両の横風に対する空力特性を把握することが必要である。この空力特性は一般的に線路構造物の影響を受けることが知られており、その詳細を調べるためには、まず線路構造物により変化を受ける横風の風速分布を把握することが重要である。ここでは、線路構造物として盛土を選択し、その周りの流れの数値シミュレーションを実施した。本プロジェクトでは盛土上の流れの解析を、地球シミュレータ上での大規模シミュレーションを用いて行い、従来の数値計算結果との比較について報告する。

キーワード： 鉄道、横風、大規模数値シミュレーション、LES、盛土、乱流境界層

## 1. はじめに

強風時の鉄道の安全・安定輸送を実現するためには、車両の横風に対する空力特性を把握することが必要である。現在までに、風洞実験により横風の空力特性の評価が行われているが、空力特性の予測精度のさらなる向上と現象に対する詳細な知見が求められている。ところで、近年の計算機性能向上および計算方法の発展によって研究開発ツールとして数値シミュレーションの有効性が高まっている。数値シミュレーションは、風洞実験では困難な状況の模擬や非定常 3 次元流れ場の詳細なデータを取得するための手段として将来的に有効な手法になると期待される。そこで、鉄道の横風問題においても数値シミュレーションの適用を進めることが望まれる。

鉄道車両の横風に対する空力特性は一般的に線路構造物の影響を受けることが知られているが（例えば文献<sup>1)</sup>）、その詳細を調べるためには、まず線路構造物により変化を受ける横風の風速分布を把握することが重要である。代表的な鉄道の線路構造物として盛土、橋梁、高架橋などが挙げられるが、まず、ここでは形状が最も単純なため計算が容易になること、また、接近流としての乱流境界層の影響が顕著になると考えられることから、盛土を本研究の解析対象とした。現在までに、盛土上の流れは風洞実験による風速測定が行われているが（例えば文献<sup>2)</sup>）、実験に対する時間的制約のみならず測定治具の設置などの制約により、詳細な分布が把握できるほどの測定を実施することは難しい。一方、

最近、盛土上の流れの数値シミュレーションを実施し、風洞実験結果を用いた検証において概ね良好な結果が得られている<sup>3)</sup>。しかし、数値計算結果の信頼性をさらに向上するために、また、計算条件を風洞実験相当の縮尺スケールモデルから実現象のスケールモデルへと拡大させるために、現在の数値シミュレーションよりもさらに大規模な計算を進めていく必要がある。そこで、本プロジェクトでは、鉄道総研の計算機では実施できない規模の計算対象について、地球シミュレータを用いた数値シミュレーションを試みた。

## 2. 目的

本プロジェクトの目的は、鉄道車両の横風空力特性を調べるための数値シミュレーションの第一段階として、盛土上の風速分布を調べるための数値シミュレーションを実施することである。特に、今までに経験したことのない規模（計算格子1億点規模）の計算を地球シミュレータによって実現することが、本プロジェクトの目的である。

## 3. 2009年度の成果の概要

### 3.1 流体解析コードを地球シミュレータに移植

本プロジェクトで利用する流体解析コードは有限差分法の自作コードである。一般曲線座標系の非圧縮性流体のナビエ・ストークス方程式（NS式）を基礎式とし、マルチブロック構造格子を用いて流れ場（基本変数：速度・圧力）を計算する。乱流解析の方法はラージ・エディ・シミュレーションである。並列計算への対応は、MPIライブラリを用いたフラットMPIにより行い、1000万セル規模の計算を鉄道総研のXT4(Cray製)の1000並列で実行したときの並列化率は99%以上である。

まず、本プロジェクトを開始するにあたって、XT4で動かしていた流体解析コードを地球シミュレータに移植し、計算実行および計算結果に問題がないことを確認した。

### 3.2 流体解析コードのチューニング（ベクトル化およびMPI並列化）

乱流解析のベンチマーク問題である平行平板間乱流（図1）を計算対象とし、地球シミュレータ用に流体解析コードのチューニングを行った。ただし、ここで実施された計算対象はプログラムのチューニングの例題としてであり、乱流の統計量を算出できるほどの長時間の計算は行っていない。

ベクトル化チューニングを行い、計算格子点数：約1600万点（Case1）と約1億点（Case2）の2ケースについて性能評価を行い、以下のような結果が得られた。

- ・（Case1）ベクトル化率：98.6%、並列化率：94.8%
- ・（Case2）ベクトル化率：99.5%、並列化率：95.1%

性能値：13.7GFLOPS/cpu（ピーク性能比率：13%）

以上より、ベクトル化の性能については概ね良好だと考えられるが、並列化の性能については引き続きチューニングを検討する必要がある。

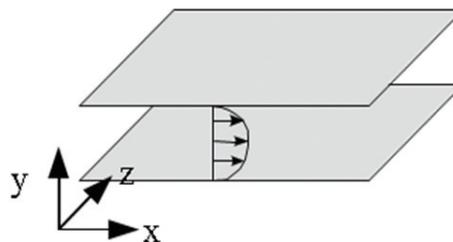


図1 平行平板間乱流（計算コードのチューニングにおける計算対象）

### 3.3 本計算の実施

#### 3.3.1 計算対象

計算対象は、「盛土上の流れ」である。計算対象の風洞実験<sup>2)</sup>の様子を図2に示す。この流れ場の特徴は、盛土に接近する風として自然風（地表面近傍の乱流境界層）が模擬されているところにある。盛土の上流側にバリア・スパイア・ラフネスブロックを設置することによって、乱流境界層が生成される。風速測定は熱線流速計（X型）を用いて行い、この測定結果を計算結果の検証に利用する。風洞の気流風速は30 m/s、盛土高さHは0.2 m(実物の1/40縮尺スケール)で、それらを基準としたレイノルズ数は400,000である。



図2 盛土上の流れの風洞実験の様子  
(大型低騒音風洞(鉄道総研))

盛土上の流れの数値シミュレーションにおいても、風洞実験と同様に、盛土付近への乱流境界層の流入を模擬する必要がある。流入する乱流境界層の生成法は3.3.3節に示す。計算領域および座標系を図3に、盛土の断面形状を図4に示す。

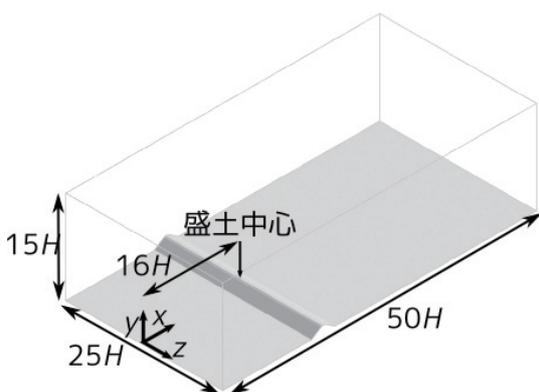


図3 計算領域

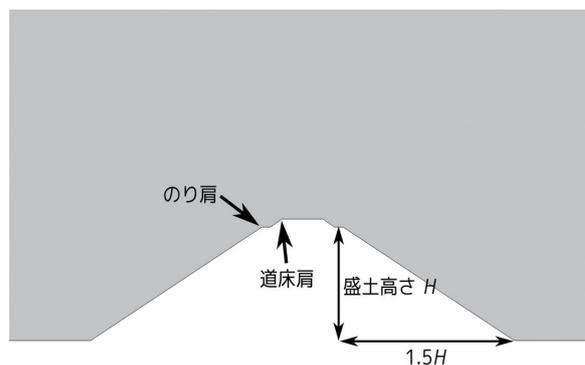


図4 単線盛土の断面形状

#### 3.3.2 計算格子

本プロジェクトで実施する数値シミュレーションの計算規模は、格子点数で1億点規模を目標にしている。従来の計算（計算規模：計算格子約1000万点）では、計算格子の作成はGridgen（格子生成ソフトウェア）により行っていたが、今回の規模の計算格子では計算規模が大きいため、格子生成ソフトウェアで直接計算格子を作成することが難しいと考えられた。そこで、まず大まかな格子をGridgenで生成し、次にその計算格子を細分化するという2段階の手順により計算格子を作成した。なお、今回は、計算格子の細分化は単純な線形補間により行った。具体的な手順は、Gridgenで400万点規模の計算格子を生成し、その格子を線形補間で細分化し（格子をy方向に5分割、z方向に5分割）、最終的に1億点規模の計算格子にした（図5）。

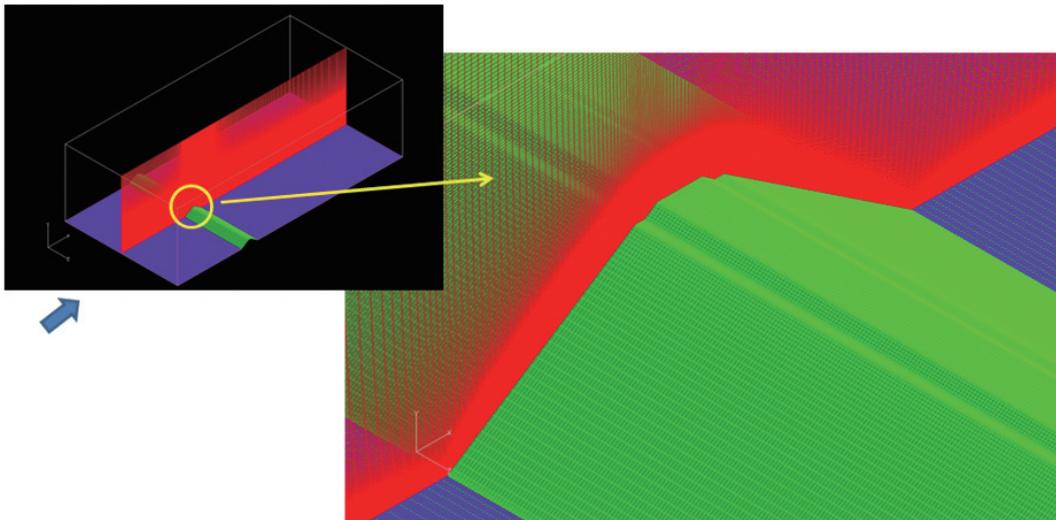


図5 計算領域全体と盛土付近の計算格子

### 3.3.3 計算方法

数値解法の概略を以下にまとめる。

- 基礎式：一般曲線座標系の非圧縮性 NS 式
- 空間離散化法：4 次精度中心差分（計算安定化のために 4 階数値粘性を付加）
- 時間進行法：対流項を 3 次アダムス・バッシュフォース法  
粘性項をクランク・ニコルソン法
- 速度と圧力のカップリング：フラクショナル・ステップ法
- 乱流解析法：ラージ・エディ・シミュレーション
- 乱流モデル：ダイナミック・スマゴリンスキーモデル

横風の数値シミュレーションにおいては、より現実に近い流れ場を再現するために流入風として自然風を模擬する必要がある。本研究では図 6 に示す方法によって自然風（乱流境界層）が流入する状況を模擬した。つまり、盛土上流れの計算と乱流境界層の計算を並行に実施して、乱流境界層のデータを逐次盛土上流れの計算の流入境界条件に利用する方法である。ここで、乱流境界層の計算は文献<sup>4)</sup>で提案された計算負荷の小さい簡易的な方法を参考にした。つまり、図 6 に示す抽出面の速度変動成分を取り出し、それを流入面に再流入させるという方法を基本とし、これらの手順を繰り返すことによって乱流境界層を発達させた。

乱流境界層の計算領域は、盛土上流れの計算領域と同じ、x 方向に 50H、y 方向に 15H、z 方向に 25H とした。計算格子点数は、x 方向に 200 セル、y 方向に 50 セル、z 方向に 100 セルとし、地面付近の格子間隔を密にした構造格子を用いた（合計で 100 万セル）。

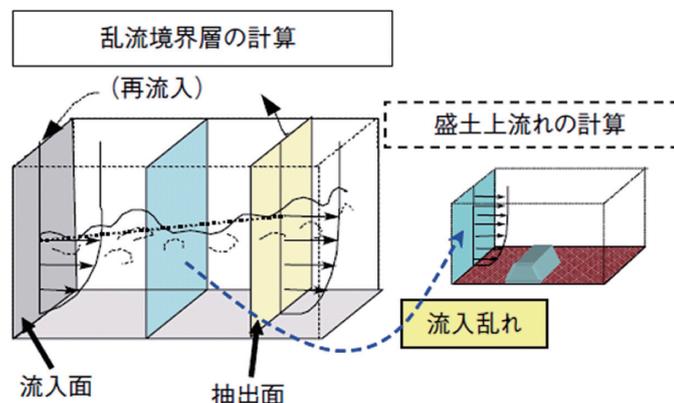


図6 乱流境界層の流入を模擬する方法

### 3.3.4 計算結果

計算格子 400 万点規模の計算（鉄道総研の XT4 で実施）と 1 億点規模の計算（地球シミュレータで実施）の結果を示す。瞬時の流れの渦構造を可視化した結果を図 7 に示す。400 万点規模の計算結果と比較して、1 億点規模の計算結果では小さな渦構造まで解像されている様子が観察される。なお、現時点において、1 億点規模の計算結果の流れ場については統計量を算出できるほどの計算が進められておらず、ここでは、瞬時の流れ場のみを示した（瞬時の流れ場についても統計的定常状態に達しているかどうかは未確認であるが、連続の式の残差は十分小さな値に収束している）。

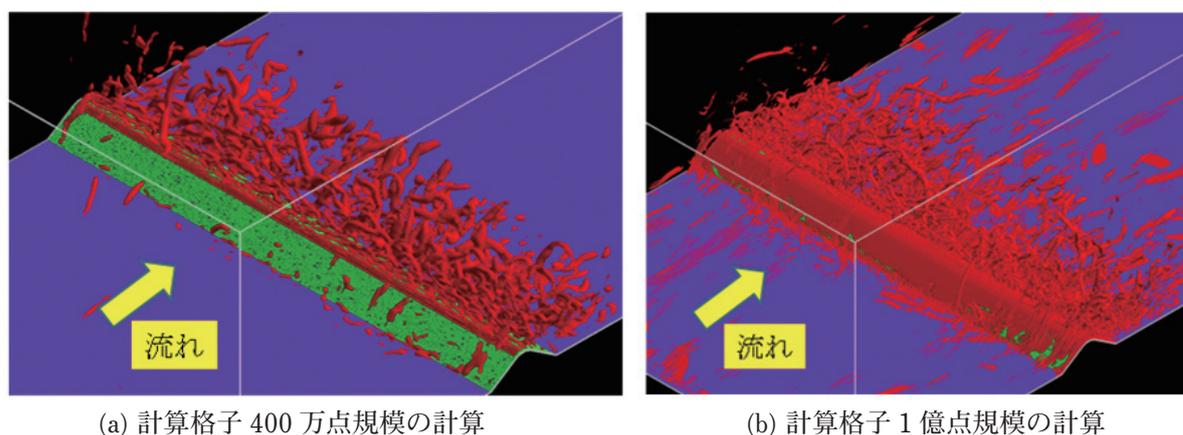


図 7 瞬時の流れの渦構造の可視化  
 $\nabla^2 p$  (の等値面、(a) と (b) の等値面のレベルは同一)

## 4. 今後の方針および計画

本プロジェクトでは、地球シミュレータ上で鉄道の横風問題に関する盛土上の流れについて計算格子点数 1 億点規模の数値シミュレーションを実施した。今後は、流体解析コードの並列化チューニングを進め、流れの統計量の算出を行い、既存の計算格子点数 400 万点規模の計算結果および風洞実験結果との比較を行う計画である。また、盛土上に鉄道車両を設置し、横風を受ける車両の空力特性を調べるための数値シミュレーションへと発展させる予定である（図 8）。

なお、本プロジェクトの社会・経済への波及効果に関しては、鉄道の横風空力特性の詳細を明らかにすることによって、公共交通機関である鉄道のさらなる安全性向上に貢献できることが期待される。引き続き、大規模数値シミュレーションによる詳細な現象解明への研究を続けていく計画である。

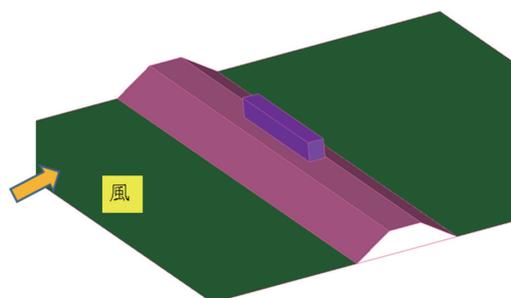


図 8 盛土上の車両周りの流れの計算モデル

## 参考文献

- 1) 前田達夫：列車の空気力学的特性およびトンネル微気圧波低減対策法に関する研究，鉄道総研報告，特別第 20 号，pp.85-183, 1998.
- 2) 斎藤寛之，井門敦志，種本勝二，鈴木実：風洞試験による乱流境界層下の盛土上の風速分布特性，鉄道総研報告，Vol.22, No.5, pp.51-56, 2008.
- 3) 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.
- 4) 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.