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*1、乙部 達志*1、鈴木 昌弘*1、廣川 雄一*2、西川 憲明*2

*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

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 22 年 4 月 1 日~平成 23 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、地球シミュレータを用いた大規模シミュレーションにより行い、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¹⁾)、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²⁾)、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³⁾。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。本報告では、平成 21 年度に実施した計算プログラムの移植作業・チューニング作業・ モデル作成作業・本計算のテストを含め、平成 22 年度に実施した計算プログラムのチューニング作業・ 本計算実施の概要について報告する。

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. 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 圧縮性流体のナヴィエ・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。

ベクトル化および MPI 並列化のチューニングを 行い、約1億点の計算規模に対する性能評価を行い、 以下のような結果が得られた。なお、並列化率の算 出は 2cpu と 8cpu の計算の比較により行った。

ベクトル化率:99.5%、並列化率:94.5%

性能値:17.95GFLOPS/cpu (ピーク性能比率:18%)

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)

以上の計算効率に対する地球シミュレータの利用制限は、利用可能プロセッサ数19、利用可能ノー ド数2となった(平成22年度のチューニング結果)。

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²⁾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(地上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。

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))



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500 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4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⁴⁾ 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

前節の計算方法では、盛土上流れの計算領域の流入境界面に逐次非定常な乱流境界層の速度場を流 入させる方法を示したが、今回の地球シミュレータを用いた計算では、計算結果の解析により判明し たことだが、計算の途中から乱流境界層の更新が止まっていた。つまり、盛土上流れの流入境界条件 について、ある瞬時の乱流境界層の速度場が時間的に固定されたまま流入境界に与えるという計算条 件となった。この条件は、一様流の流入でもなく乱流境界層の流入でもないため、従来の計算結果お よび風洞実験結果との比較はできない。そこで、計算格子数による計算結果の違いを調べるために、 地球シミュレータの計算で使われた流入境界の速度場と同一の条件の計算を鉄道総研の XT4 で再計算 することによって、それらの比較を行った結果を以下に示す。

計算格子 500 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)の結果のうち、瞬時の流れの渦構造を可視化した結果を図7に示す。500 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。次に、 速度場を時間平均およびスパン方向空間平均した平均速度場の結果を示す。速度ベクトル・速度の大 きさの等値線を図8に示す。計算格子 500 万点と1億点を比較すると、盛土周りの流れについて、概 ね同様な様子が観察される。さらに、盛土中心位置における平均速度および速度の標準偏差の高さ方 向分布を図9に示す。平均速度は 500 万格子と1億格子でほぼ同様だが、変動量については、1億格 子の方が大きくなっている様子が分かる。







(b) 計算格子 1 億点規模の計算

図8 時間平均・スパン方向平均の速度場(速度ベクトル、速度の等値線)



図9 時間平均・スパン方向平均した盛土中心位置の高さ方向の速度分布

4. 今後の方針および計画

本プロジェクトでは、鉄道の横風問題に関する盛土上の流れについて、地球シミュレータを用いて 計算格子点数1億点規模の数値シミュレーションを試み、従来実施している 500 万点規模の計算との 比較を行った。今回の計算条件では実現象に相当する乱流境界層の流入が再現されていないため、実 現象に相当する計算条件についてのさらなる検討も望まれる。

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。

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.