

鉄道一般

車両

軌道

構造物

防災

電力

信号通信  
情報

材料

環境

人間科学

浮上式鉄道

# 走行する車両周りの風の流れを再現する

風が吹いている中を走行する鉄道車両周りの空気の流れを調べるための数値シミュレーション方法を開発しました。風の数値シミュレーションと走行車両周りの流れの数値シミュレーションの二つを組み合わせる手法を用いることにより、走行車両模型を用いた風洞実験結果を良好に再現できることを確認しました。また、流れの数値シミュレーションの実現により、車両周りの詳細な非定常流れの知見が得られるようになりました。



中出 孝次

Koji Nakade

環境工学研究部  
車両空力特性研究室  
主任研究員  
[専門分野] 流体力学

## はじめに

横風に対する鉄道車両の空力特性を把握することは、強風時の鉄道の安全・安定輸送の実現において重要となります。現在、その空力特性の評価は風洞実験により行われています。通常、風洞実験では車両模型は風洞内に固定した状態で行われ、列車の走行速度を考慮した風を車両模型に作用させます。そこで、空力特性評価のさらなる精度向上を目標として、走行する車両が受ける風について、実現象の模擬をより進め、それが空力特性に与える影響を調べるための研究開発を行っています。現在、風洞実験による研究開発<sup>1)</sup>と数値シミュレーションによる研究開発<sup>2)</sup>を並行して進めています。本稿では、数値シミュレーションによる研究開発について紹介します。

## 走行する車両が受ける風

一般に自然風は、境界層と呼ばれるものであり、地表面で風速ゼロ、地面からの高さとともに風速が速くなる流れとなっています。この境界層の中を車両が走行する時に、この風を車両から見るとどのようなようになるでしょうか。

地面固定の視点から車両固定の視点に変換します(図1)。車両から見た風について、地上高さの低いところから順に考えてみます。まず地面は車両の走行方向と逆向きに列車速度で動き、線路方向の速度を持ちます。そして地面から高くなると風速の増加とともに風の影響が強くなり、車両は横方向からの風を徐々に受けるようになります。つまり、走行する車両が受ける風は、風の向きが高さ方向に変化する「ねじれた風」を受けることになります。この「ねじれた風」は通常、風洞実験では模擬できません。この「ねじれた風」が車両空力特性に及ぼす影響を調べるために数値シミュレーションを実施しました。

## 風を受ける走行車両周りの流れの数値シミュレーション方法

走行車両周りの流れの数値シミュレーションは、計算機負荷が過大とならないように計算領域を車両付近に限定し、車両の走行とともに計算領域を移動する手法を用いました。車両に作用する風は自然風を模擬する必要がありますが、この時間変動する風は決

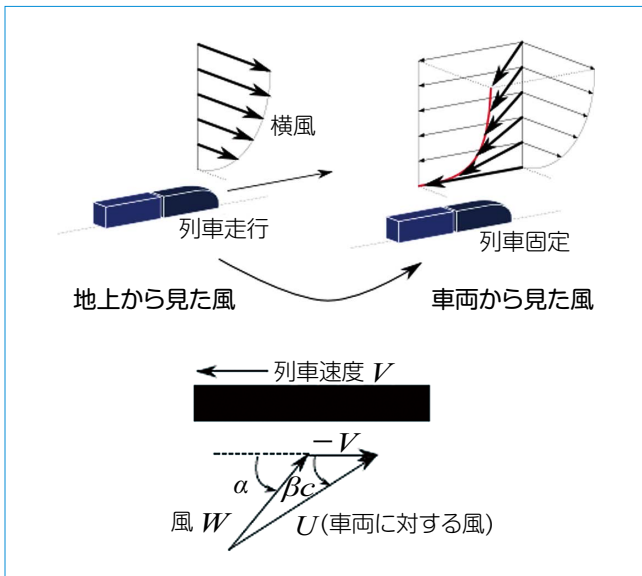


図1 車両から見た風

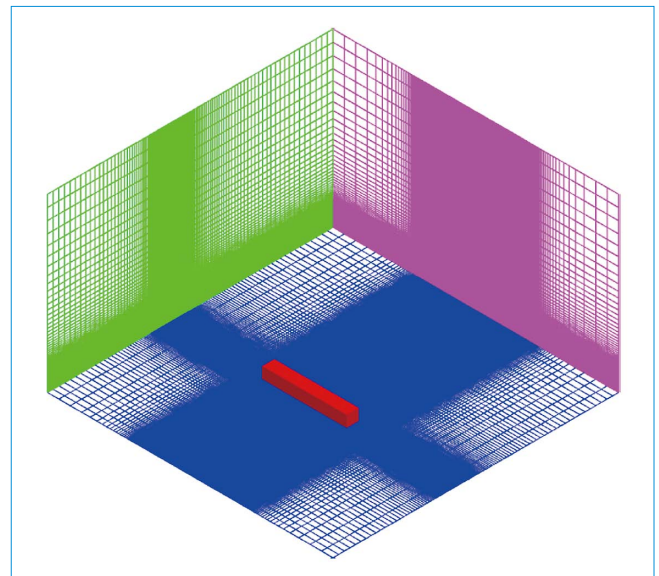


図2 車両周りの計算領域・計算格子

まった式の形であらかじめ与えることはできません。そこで風についても流れの数値シミュレーションを行うこととなります<sup>23)</sup>。つまり、風の数値シミュレーションと走行車両周りの流れの数値シミュレーションの2つを並列に実行し、風の数値シミュレーションの結果を、逐次、走行車両周りの流れの数値シミュレーションに使用します。この手法を用いることによって、風を受ける走行車両周りの流れの数値シミュレーションが実現できました。

### 実験との比較による計算精度検証

鉄道総研の大型低騒音風洞で実施された走行車両模型を用いた風洞実験結果<sup>1)</sup>を用いて、実験との比較による計算精度の検証を行いました。

### 計算対象

風洞測定部床面に自然発達する境界層内の平地上を走行する単純形状車両周りの流れを計算対象としました。風洞気流の風速は10m/s(境界層上方の

速度)、風向は線路に対して垂直、車両の縮尺比は1/60、車両速度は0, 1.8, 5.8, 10m/sの4ケースとしました。

### 計算領域と計算格子

走行車両周りの流れの数値シミュレーションの計算領域と計算格子を図2に示します。また、ここには示していませんが、風の数値シミュレーションの計算領域・計算格子も別途設定しています。車両周りの流れと風の数値シミュレーションの計算格子数の合計は、約1400万点になります。鉄道総研にあるスーパーコンピュータCray製XT4で512プロセッサの並列計算を行ったところ、1ケース当たりの計算実行時間は約52時間でした。

### 数値計算法

計算は鉄道総研の内製流体解析コードを用いました。非圧縮性流体の基礎方程式を差分法で数値計算します。通常の差分法では、物理量の勾配や補間を隣接する計算格子2点で計算する2次精度差分が使われることが多いのですが、本流体解析コードでは計算格

子4点を利用する4次精度差分を用い、高精度化を実現しています。また、計算対象に曲面が存在する場合には、曲面に沿う計算格子を用いて計算できるように、一般曲線座標系の基礎方程式に基づく流体解析コードとしています。

車両周りの流れは時間・空間的に変動する流れである乱流になります。乱流では大小さまざまなスケールの渦が存在し、通常、計算格子で全てのスケールの渦を表現することは計算機負荷が過大となるためにできません。そこで、数値計算で計算しない渦が流れ場に及ぼす影響を乱流モデルによりモデル化し計算を行います。ここでは、ラージ・エディ・シミュレーション(参照)により、乱流の非定常計算を行いました。

### ラージ・エディ・シミュレーション (LES)

計算格子で解像できない小スケールの渦のみをモデル化する乱流解析方法。小スケール渦には普遍性が期待できるため、一般的な流れへの適用性に優れ、高精度な結果が期待できます。

## 車両にあたる風

まず、車両にあたる風について計算と実験を比較しました。車両が走行する地点の風について、平均風速と主流方向の乱れ度の高さ方向分布を図3に示します。参考のため、車両が位置する高さを図中に示しています。今回の計算対象では、車両は境界層の中に埋没している状況となります。そして、平均風速の高さ方向の分布は、地面の高さの約1/7乗で変化し、風速が一様流になる高さである境界層高さは車体高さの約2.9倍となっています。図3で計算結果と実験結果を比較したところ、平均風速、乱れ度ともに良好に再現していることが確認できました。

## 車両周りの圧力分布

風の数值シミュレーションによって車両にあたる風が良好に再現できたことを踏まえて、次に、その風が走行車両に作用したときに生じる車体表面の圧力分布について調べました。車体中心高さの風上側と風下側の圧力分布について、計算結果と実験結果を図4に示します。計算及び実験ケースは、線路に対して真横の風が吹く中、車両が列車速度0, 1.8, 5.8, 10m/sで走行する4ケースになります。列車速度0m/s、つまり静止状態のときには車両に対する風は真横から吹き、圧力分布の形状は、車両の前後で対称になりますが、列車速度の増加にしたがって、車両に対する風は斜め前方から吹くことになり、車両先頭付近の風上側で圧力が高くなること、また、風下側で圧力が低くなることが観察されます。図4で計算結果と実験結果を比較したところ、計算は実験を概ね良好に再現していることが確認できました。なお、車体に生じる空気力は、車体表面の圧力を足し合わせることによって計算することができます。

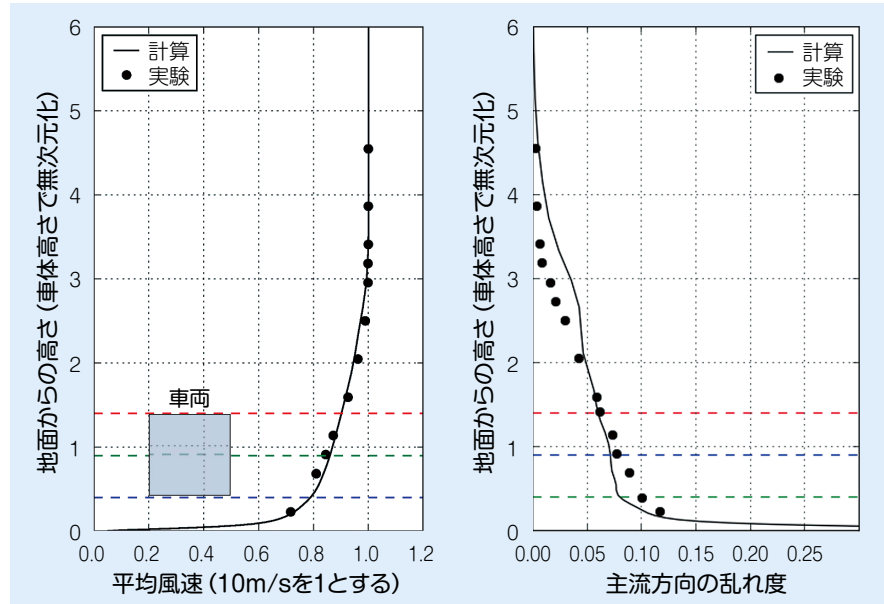


図3 風の数值シミュレーション結果

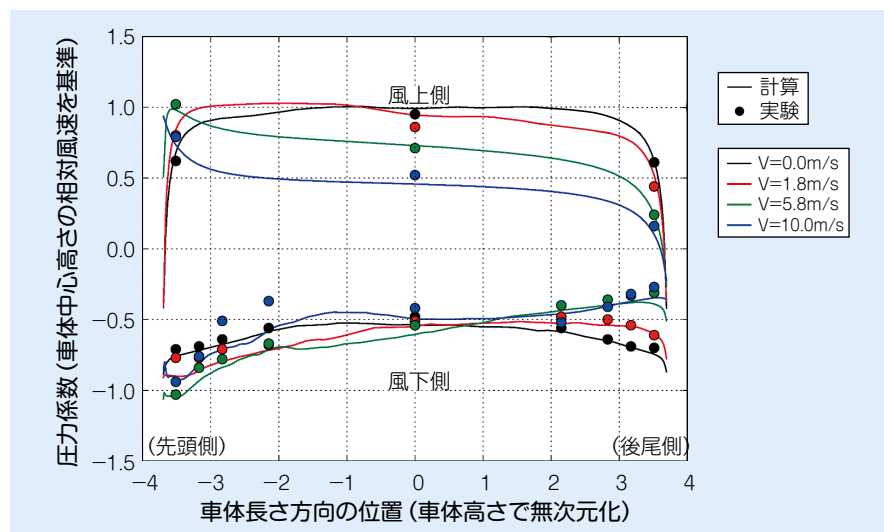


図4 車体表面の圧力分布

## 風を受ける走行車両周りの流れの様子

本稿で紹介している数值シミュレーションの特徴は、大規模数值計算を実現し、非定常三次元空間の詳細な流れの情報を得るところにあります。この情報を用いることにより、実験では観察が困難な現象についての物理現象の解明が進むことが期待されます。

ここでは、走行する車両周りの風の流れについて数値的に再現した流れの様子の例を示します。計算例は、線路

に対して真横の風 ( $\alpha = 90^\circ$ ) が吹く中、車両が列車速度5.8m/sで走行する計算ケースになります。このときの車両が受ける風は、車体中心高さで先頭方向から  $\beta_c = 56^\circ$  の方向から車両に作用することになります。ある瞬間の流れの様子を図5に示します。

図5 (a) は、車体中心高さの水平断面上、車体の先頭付近・中央・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ます。斜め前方から風が吹く様子、車両から流れが剥離する様

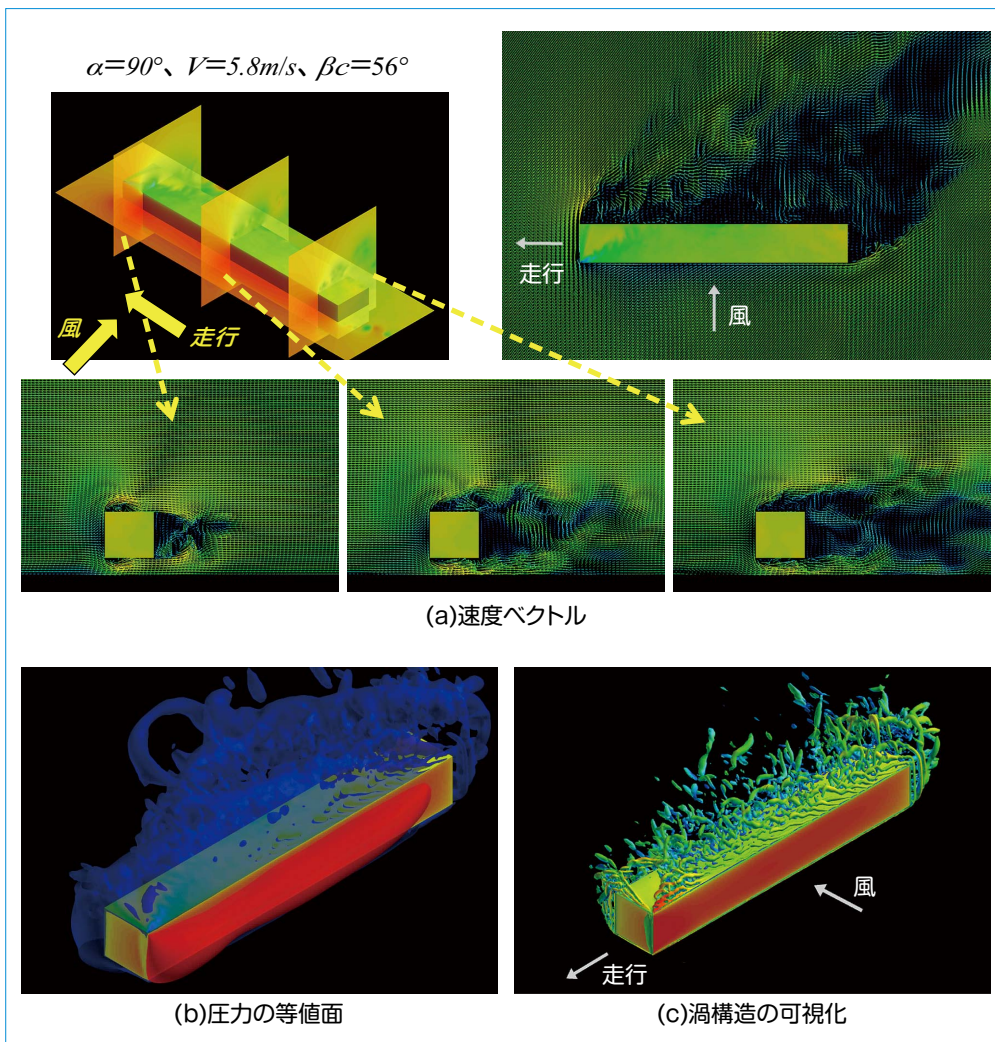


図5 ある瞬間の流れの様子

子、車両の風下側は乱れた流れとなる様子などが観察されます。

図5 (b) は圧力の等値面を示しています。赤色は高い圧力、青色は低い圧力の等値面になります。車両の風上面に生じる高圧力の様子、流れの剥離した領域の低圧力が複雑に変動する様子が観察されます。

図5 (c) は渦構造の可視化の例を示しています。複雑な形状をした管状の渦構造が観察されます。車両の先頭部の屋根上付近では、2対の円錐状の渦構造が観察されます。

図5ではある瞬間の流れの様子を示していますが、これらの画像の時

間変化の動画を作成し、非定常流れの様子を詳細に観察することにより、流れの物理現象に対する知見の深度化が進められます。

### おわりに

本稿では、風が吹いている中を走行する鉄道車両周りの空気流れの数値シミュレーションを紹介しました。そして、実験との比較を通して、開発した計算手法の妥当性を示すとともに、詳細な流れの様子を紹介しました。なお、研究主題である車両走行が横風空力特性に及ぼす影響については、平地上の単純形状車両を対象としたもの

から線路構造物（例えば築堤）の考慮、実形状車両へと拡張しつつ、検討を進めていきます。RRR

### 文献

- 1) 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，pp.258-263，2011
- 2) 中出孝次：平地上の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，日本機械学会2012年度年次大会講演論文集，G050016，2012
- 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