

鉄道一般
車両
施設
電気
運転・輸送
防災
環境
人間科学
浮上式鉄道

# 車両の床下流れを 解明する

鉄道車両の床下流れは、バラスト表面風速、車両の空気抵抗、台車付近への着雪、車両下部から発生する空力音、さらには、トンネル内車両動揺など、多くの鉄道の空力問題に関係します。このような車両の床下流れは、高さ方向には狭く、車両長手方向には長い、極端な縦横比の空間の流れのため、装置および測定の制約により実験的手法は困難になることがあります。そこで、数値シミュレーションを用いて、車両の床下流れの解明を試みました。ここでは、編成車両全体に及ぶ大きな流れの構造である蛇行流れに着目した数値シミュレーションを紹介します。



中出 孝次  
Koji Nakade  
鉄道力学研究部  
計算力学研究室  
主任研究員  
[専門分野] 流体工学,  
計算流体力学

## はじめに

鉄道車両のような細長い物体（新幹線16両編成で全長400m）が地面付近を高速移動するという状況は、鉄道分野特有のものであり、航空機や自動車などの流体力学にはみられない特殊な空気流れが生じることがあります。とくに、編成列車の車両床下流れは、床下機器、台車、線路、バラスト（もしくはスラブなど）が存在する複雑な流路形状となり、複雑な流れが生じます。このような車両床下流れが密接に関連していると考えられる課題として、空力加振に起因する車両動揺の低減<sup>1)</sup>、バラスト飛散の防止、台車付近への着雪の抑制、車両の空気抵抗の低減<sup>2)</sup>、車両下部から発生する空力音の低減<sup>3)</sup>などがあげられます。これらを進めるにあたっては、車両床下流れの解明が求められます。ここでは、鉄道車両の床下流れを解明するための数値シミュレーションの研究を紹介します。

### ☞ 直交格子法

物体形状に適合する計算格子を用いる計算法ではなく、単純な直交格子を用いる計算法。

## 編成車両の床下流れの数値シミュレーション

編成車両の床下流れの数値シミュレーションには、鉄道総研で開発を進めている「空気流シミュレーター」<sup>4)</sup>を用いました。空気流シミュレーターは直交格子法（☞参照）に基づく流体解析手法を採用しており、計算格子は自動生成され、複雑形状の流体解析を容易に実現できるという特徴があります。また、計算アルゴリズムが単純なため、大規模並列解析を効率よく実現でき、スーパーコンピューターの性能を有効に活用することができます。ここでの数値シミュレーションでは台車付近の複雑形状を含むこと、また、編成車両が対象となり計算規模が大きくなることから、空気流シミュレーターが有効だと考えました。

計算モデルを図1に示します。計算対象は、在来線用1/8.4スケールの4両編成の車両で、台車形状も模擬しています。計算格子分布は、車両近傍領域を細かい計算格子幅（1mm）とし、車両から離れるにしたがって計算格子幅を粗くする不等間隔格子としました。境界条件は、平坦な地面上の列車走行

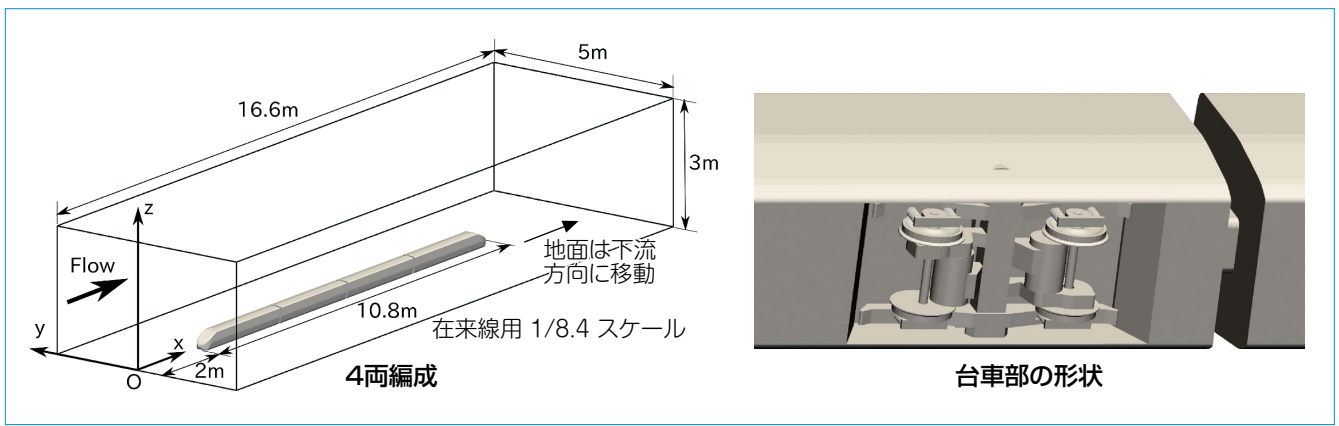


図1 計算モデル

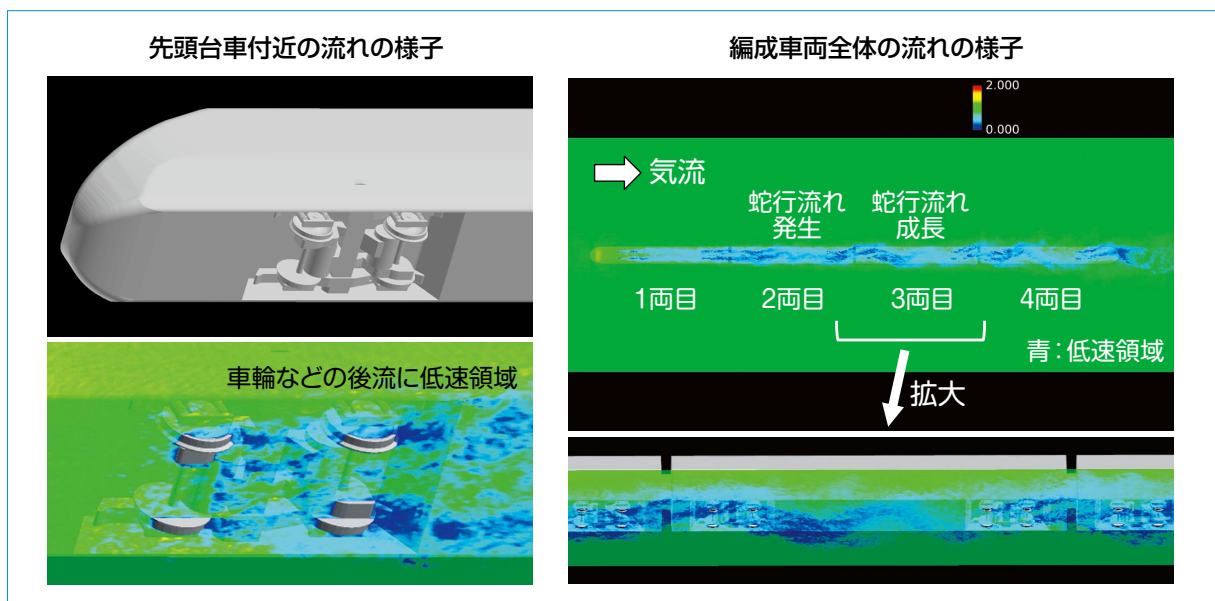


図2 車両床下の流れの様子 (計算結果)

を模擬するように、計算領域に固定した車両に対して地面を下流方向に移動する条件としました。列車走行速度は15m/sとしました。

流体解析における乱流解析方法は、非定常現象の解析に有効な手法であるラージ・エディ・シミュレーション(※参照)を用いました。

計算は鉄道総研のスーパーコン

ピューター (CRAY 製) で2400並列計算を実施しました。1ケースに要した計算時間は5日間程度となりました。

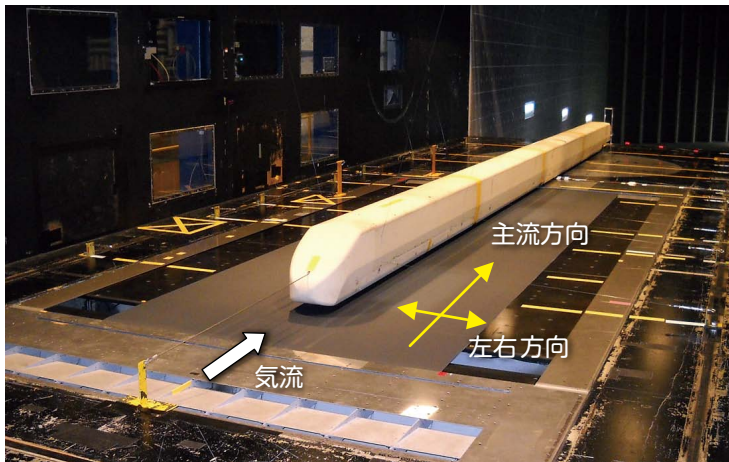
計算結果を図2に示します。ここでは、ある瞬時の流れの可視化として、車両床下中心高さにおける水平断面上の速度の大きさのコンターが示されています。高速が赤、低速が青を示します。

まず、先頭台車付近の流れに注目します。流れの可視化で対象となる水平断面上に位置する車輪の後流には、低速領域が形成される様子が観察されます。このように、本シミュレーションでは、台車部の複雑形状を対象とした

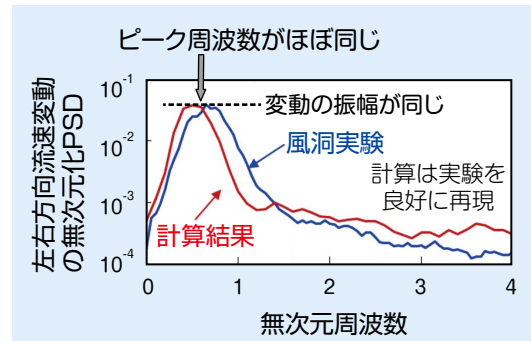
流体解析が実現されています。

次に、編成車両全体に注目します。ここでも、低速領域(図の青の領域)によって、車両床下流れの様子が可視化されています。ここで特徴的なことは、車両床下に蛇行流れが生じていることです。この蛇行流れは2両目あたりから発生し、3両目および4両目で大きな蛇行流れに成長している様子がわかります。この可視化を動画にしてさらに詳細に観察したところ、この流れの蛇行現象は、台車部や車間部などの局所的な形状変化の箇所に対して、増幅も減衰もしないということがわか

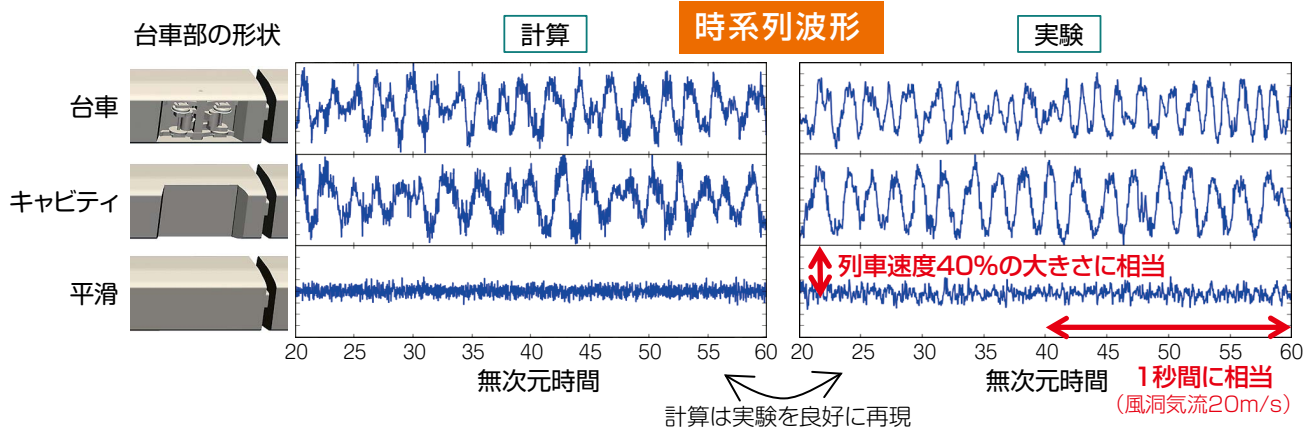
※ ラージ・エディ・シミュレーション  
乱流解析方法のひとつ。計算格子以下の小さなスケールの流れのみをモデル化する手法。



(a) 風洞実験の様子



(b) 左右流速変動のパワースペクトル密度関数(PSD)



(c) 左右流速変動の時系列波形(3両目の車両床下)

図3 シミュレーションの検証(風洞実験と比較)

りました。つまり、蛇行流れは、局所的な形状から発生するのではなく、大きな流れの構造として発現していることがわかりました。

### 数値シミュレーションの検証

編成車両の床下には蛇行流れが生じることが、流れの数値シミュレーションによって示唆されました。しかし、実際に蛇行流れが実測された例はありませんでした。そこで、数値シミュレーションの妥当性を確認するために風洞実験を実施しました。

風洞実験は、鉄道総研の大型低騒音風洞(滋賀県米原市)で実施しました。風洞実験の様子を図3(a)に示します。風洞実験に用いた車両模型は計算モデ

ル(図1)と同一形状です。車両模型はピアノ線でつり下げ、車両床下高さは40mmとしました。列車走行の模擬は風洞備え付けの移動地面板を用いることで実現しています。風洞気流20m/s(移動地面板の速度も20m/s)のときの3両目の車両床下の左右方向流速を熱線流速計で測定しました。

台車部を形状変更した3種類(「台車」、「キャビティ」(台車を削除した形状)、「平滑」(台車を削除し、台車部を平滑化した形状))について、計算と実験を比較した結果を図3(c)に示します。ここでは、左右方向の流速成分の時系列波形が示されています。各形状に対する左右方向の流速変動の特徴が計算と実験で一致していること

がわかります。さらに詳細な比較を行うために、「台車」条件の時系列波形のパワースペクトル密度関数(PSD)の比較を図3(b)に示します。時系列波形の比較でみたように、変動の振幅とピーク周波数について、計算は実験を良好に再現していることが確認できます。つまり、数値シミュレーションで示唆された編成車両床下の蛇行流れの存在が実験的にも確認できることが示されるとともに、数値シミュレーションによる定量的な予測精度もおおむね良好であることが示されました。

ここで、図3(b)(c)から得られた蛇行流れの特性を実車(走行速度300km/hの新幹線)に換算すると、蛇行流れによる左右方向流速は60km/h

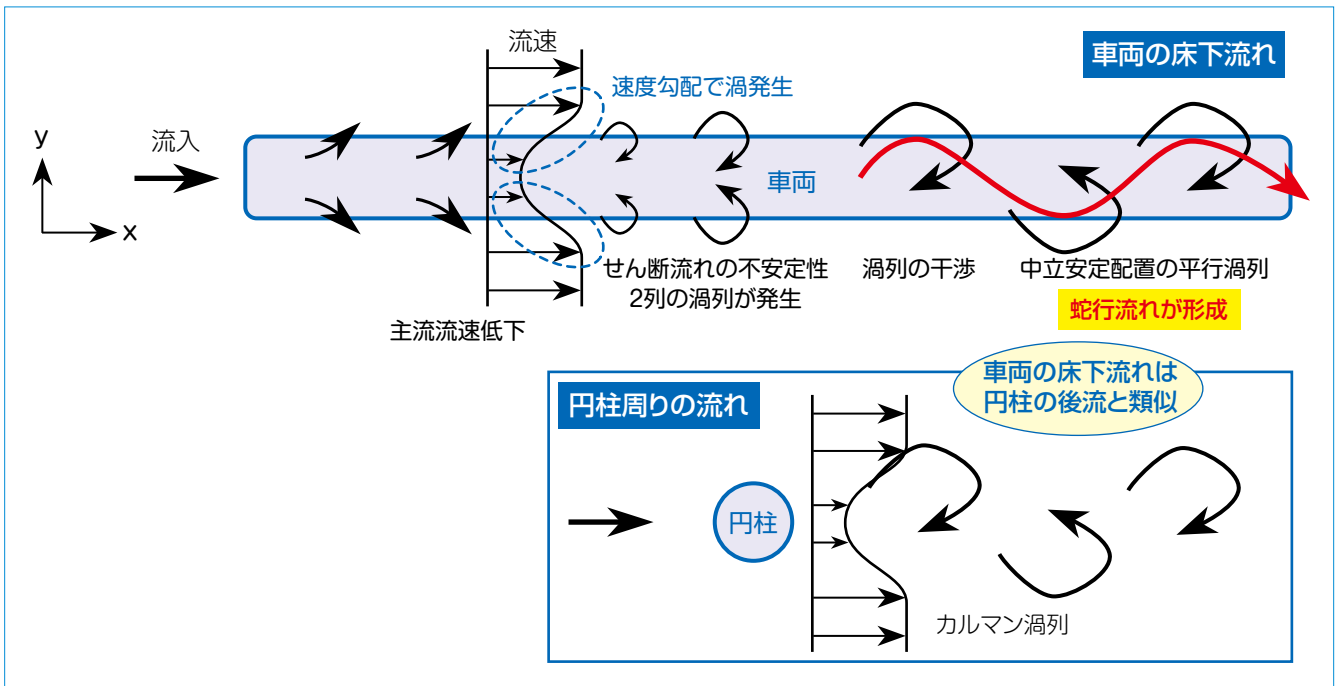


図4 蛇行流れの発生メカニズム (イメージ)

程度、変動周波数は約5Hz程度となります。また、「平滑」ケースにおいては蛇行流れが発生しなかったことより、蛇行流れの低減対策として、台車部の平滑化が有効だと示唆されました。

### 蛇行流れの発生メカニズム

流れの数値シミュレーションより得られた流れ場を解析することにより、蛇行流れの発生メカニズムについて図4のようなイメージが考えられます。車両床下の流れは車両底面の摩擦により低速流れとなります。一方、その車両底面の左右両側では列車速度に対応した高速流れとなっています。そこで、

それらの境界では、大きな速度勾配が生じ、流れの不安定による渦が生じます。この車両床下の左右両端で形成された平行渦列は、それぞれが干渉するようになり、最終的には、安定状態に落ちつき、カルマン渦列(円柱の後流に発生する千鳥配置の渦列)と同様の蛇行流れが形成されます。

このような車両床下の蛇行流れは、トンネル走行時の車両動揺とも関係することが数値シミュレーションにより示唆されています(※参照)<sup>1)</sup>。

### おわりに

編成車両の床下流れを解明する数値

解析的研究を紹介しました。ここでは、編成全体に及ぶ大きな流れの構造である蛇行流れを予測し、その特性を調べました。一方、車両の床下流れにおいては、台車部の局所的な詳細流れの解明も今後必要になります。その際、ここで紹介した流れの数値シミュレーションは重要なツールになります。実際に裏づけられた数値シミュレーションを有効活用していくことが現象解明の研究では重要になると考えています。

RRR

### 文献

- 1) 中出孝次：トンネル内走行時の高速列車の変動空気力, RRR, Vol.73, No.11, pp.32-35, 2016
- 2) 井門敦志：車両床下の空気の流れを調べる, RRR, Vol.65, No.1, pp.10-13, 2008
- 3) 山崎展博, 長倉清, 北川敏樹, 宇田東樹, 若林雄介：風洞試験を用いた新幹線車両下部から発生する空力音の評価手法, 鉄道総研報告, Vol.29, No.5, pp.17-22, 2015
- 4) 中出孝次, 光用剛：複雑形状に対応した空気流・空力音シミュレーション, RRR, Vol.72, No.12, pp.22-25, 2015

### ※ トンネル走行時の車両動揺<sup>1)</sup>

トンネル区間では、車両床下の蛇行流れが車体側面(トンネル壁に近い側)まで広がります。この蛇行流れによる圧力変動が車体側面に作用し、車両には左右方向の変動空気力が生じます。

