

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

# 鉄道車両周りの 空気流を再現する

空気流を解明するための研究手法として、実物に対する実測、風洞などを用いた実験、計算機を用いた数値解析などがあります。数値解析は、鉄道車両周りの空気流の詳細な情報を提供します。ここでは、流れの数値解析の特徴、数値解析ツールである「空気流シミュレーター」の概要を紹介します。また、空気流シミュレーターによる鉄道車両周りの空気流の再現例として、横風を受ける車両周りの流れ、編成車両周りの流れ、通勤型車両の車外と車内の流れ（窓開け走行時の車内換気）の数値シミュレーションについて紹介します。



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(上級)

## はじめに

鉄道車両の空力性能向上のためには、鉄道車両周りの空気流を解明する必要があります。空気流は、実物に対する実測、風洞などを用いた実験、計算機を用いた数値解析などにより検討されます。これら各手法はそれぞれ特徴があり、相互に補完する関係にあります。つまり、空気流の解明を効率よく進めるためには、それぞれの特徴を理解して、うまく活用することが求められます。ここでは流れの数値解析に注目します。以下に、流れの数値解析の特徴、現在開発している流れの数値解析ツール（空気流シミュレーター）の概要、および空気流シミュレーターの計算例を紹介します。

そこで、解析的に厳密な解を求めるかわりに、計算機を用いた数値解析により近似的な解を求めることになります。

鉄道車両周りの流れに数値解析を適用すると、計算精度の範囲内ですが、その流れは計算機上に再現されます。つまり、空間上のあらゆる場所で時間変化する流れを把握することができます。これは、数値解析の手法の大きな特徴であり、詳細に「流れを見る」ことを可能にします。すなわち、現象についての原因と結果だけでなく途中経過（メカニズム）に迫ることが可能になります。また、数値解析では計算条件を柔軟に設定することが可能であり、現実の条件にとどまらず、理想条件や仮想条件などの検討を進めること

## 流れの数値解析とは

空気の流れは、約180年前に導出された方程式（ナビエ・ストークス方程式（※参照））により書き表せます。つまり、ナビエ・ストークス方程式を解けば、空気の流れがわかります。しかし、この方程式は非線形偏微分方程式であり、特別な境界条件の場合を除いて、未だに誰も解けていない状況です。

### ※ ナビエ・ストークス方程式

土木技術者のナビエ（1822年フランス）と物理数学者のストークス（1845年イギリス）により導出された、流体の運動を記述する方程式。厳密解が求められていないだけでなく、それが存在するのかわかっていない。クレイ数学研究所（アメリカ）のミレニアム懸賞問題（100万ドル）の7つのうちの1つとなっている。

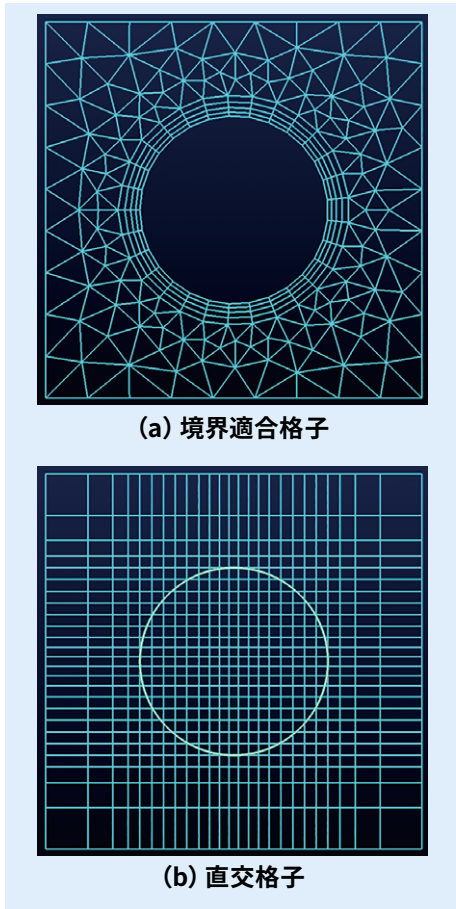


図1 円柱周りの流れを計算するための計算格子の例

ができ、さまざまな状況に対しての流れの予測が得られます。さらには、情報科学と融合し、流れの数値解析に最適化計算（計算機で自動的に希望する条件に対する解を算出）を組み合わせることで、経験的予測からは得ることが困難な、空力特性に優れた形状のヒントを得る手段としても活用されるようになってきています。

### 複雑形状の流れを解析する「空気流シミュレーター」<sup>1)</sup>

流れの数値解析では、空間を分割して限定された点を対象にナビエ・ストークス方程式を解きます。ここで、分割した空間のことを計算格子とよびます。通常の流れの数値解析では、物体近傍の流れを高精度に計算するために、物体形状に沿わせた計算格子（境界適合格子）が用いられます

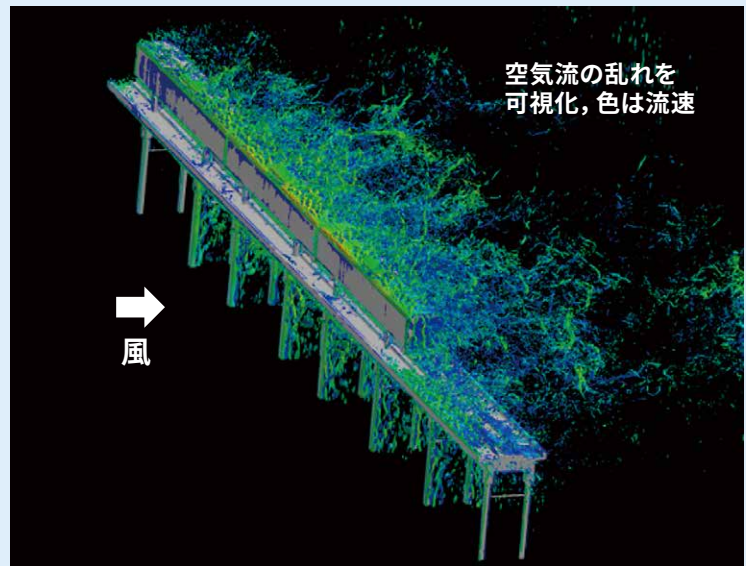
（図1 (a)）。しかし、複雑形状を計算対象とした場合には、境界適合格子の生成にかなりのコストを要します。そのため、格子生成をほぼ自動化できる直交格子（図1 (b)）に注目し、空気流シミュレーターでは直交格子法を採用しました。直交格子法は、大規模計算で必須となる複数の演算を並行に計算する能力（並列計算効率）の高さにも特徴があり、将来の超大規模並列計算機環境においては有力な流体解析手法になると考えられます。そして、大規模解析における詳細な計算格子によって、必要な計算精度は確保されることが期待できます。

### 横風を受ける車両周りの流れ<sup>2)</sup>

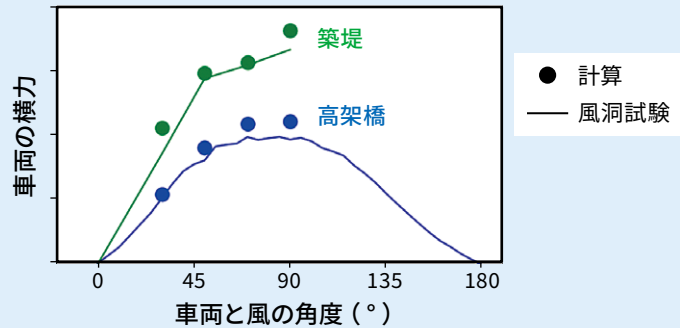
強風時の鉄道車両の安全・安定輸送

を実現するためには、横風に対する鉄道車両の空力特性を把握することが重要です。そのために、現在まで、縮尺模型を用いた風洞試験により、横風空力特性の評価が行われています。一方、その評価においては、車両形状、地上構造物、風の特性などパラメーターが膨大となり、風洞試験だけで必要な条件すべてを確認することが困難になることがあります。そこで、試験条件の絞り込みなど効率的な試験計画を策定するためのツールとして、流れの数値解析の活用が期待されています。ここでは、空気流シミュレーターによる横風空力特性の予測精度の検証を目的に実施した計算例を紹介します。

過去に実施された横風風洞試験の中で、典型的な2条件（高架橋上の先



(a) 高架橋条件での流れの様子



(b) 車両の横力を風洞試験と比較

図2 横風を受ける車両周りの流れの数値シミュレーション

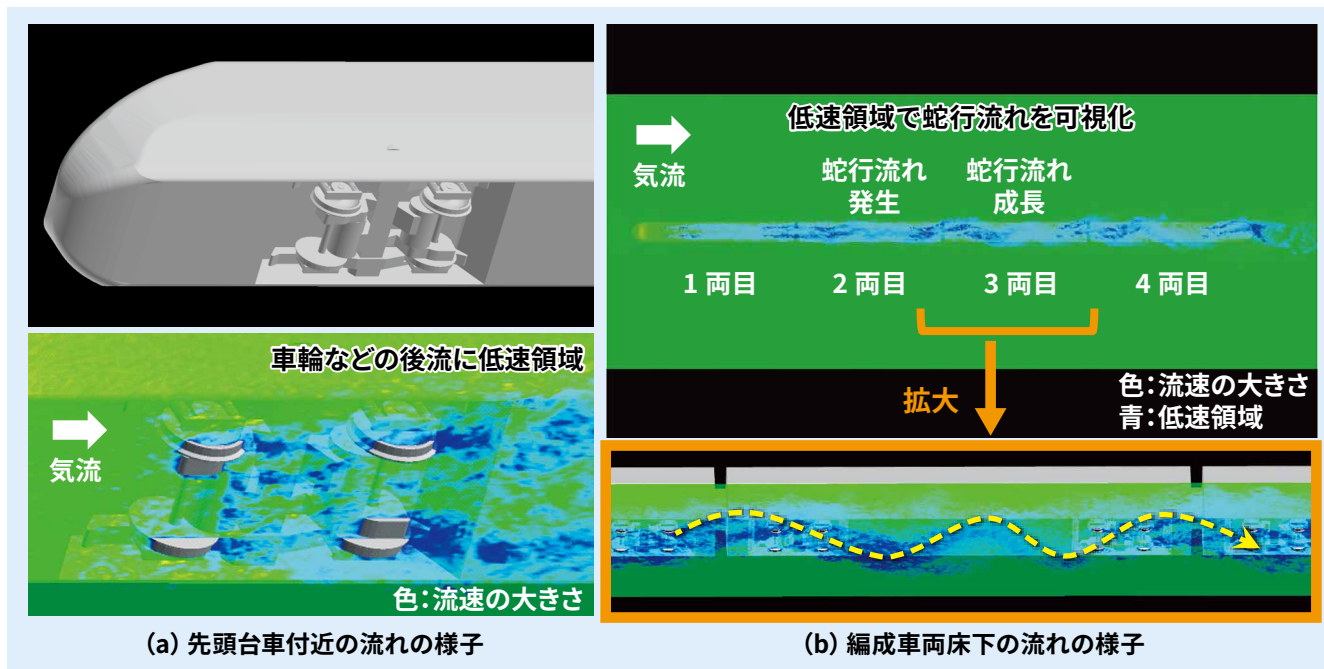


図3 編成車両周りの流れの数値シミュレーション

頭車両、築堤上の先頭車両)について、空気流シミュレーターを用いた数値解析を実施しました。横風風洞試験では、通常風洞試験における一様流ではなく、自然風(乱流)を模擬することに特徴があります。空気流シミュレーターでも風洞試験と同様に自然風を模擬し、車両周りの流れの数値解析を実施しました(図2(a))。計算結果を風洞試験結果と比較したところ、空気流シミュレーターは風洞試験を良好に再現できることを確認しました(図2(b))。図中の「横力」は車両への横方向の力を示し、「車両と風の角度」は真横の風を90°、前方からの風を0°としています。今後は、さらに異なる形状をもつ車両および地上構造物に対しても適用を進め、実証計算例を増やし、その予測精度についてさらなる検討を進めていきます。

### 編成車両周りの流れ<sup>3)</sup>

車両床下の空気の流れは、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となり、装置および測定 of 制約により実験の手法の適用は困難になることがあります。そこで、流れの数値解析を用いて、車両の床下流れの解明を試みました。

4両編成車両を対象に空気流シミュレーターによる流れの数値解析を実施しました。計算結果より、先頭台車付近の流れの様子を見ると、図3(a)に示すように、車輪などの後流に低速領域が存在することがわかります。また、編成車両全体の流れの様子を観察したところ、図3(b)に示すように、車両床下には左右方向に蛇行する流れが存在することを見いだしました。ここで、この蛇行流れを風洞試験で検証したところ、定量的にも妥当であることが確認できました。さらに、トンネル走行時の流れについても同様に調べたところ、明かり区間に見られた車両床下の蛇行流れは車体側面(トンネル壁に近い側)まで広がることわかりました。そして、この蛇行流れにともなう圧力

変動が車体側面に作用し、車両には左右方向の変動空気が生じることが示唆されました。ここで予測された変動空気の周波数は、過去に新幹線で測定された約2Hzの車両動揺に対応することが確認できました。つまり、トンネル内車両動揺の主因は車両周りに形成される蛇行流れだと推定されました。このように、流れの数値解析を用いることで、編成車両周りの流れの現象解明を進めることができました。

### 通勤型車両の車外と車内の流れ(窓開け走行時の車内換気)<sup>4)</sup>

通勤型車両内の感染症対策のうち、「密閉」対策のひとつとして窓開けによる車内換気があります。窓を開ければ車内の換気が良くなることは経験的にわかっていますが、走行する鉄道車両の換気量に関する知見は多くはなく、車内の換気量を定量的に評価することが求められています。そこで、空気流シミュレーターを用いて車外と車内の流れを同時に計算することで、窓開け走行時の車内換気量を評価しました。車両周りの流れの様子を図4(a)に、

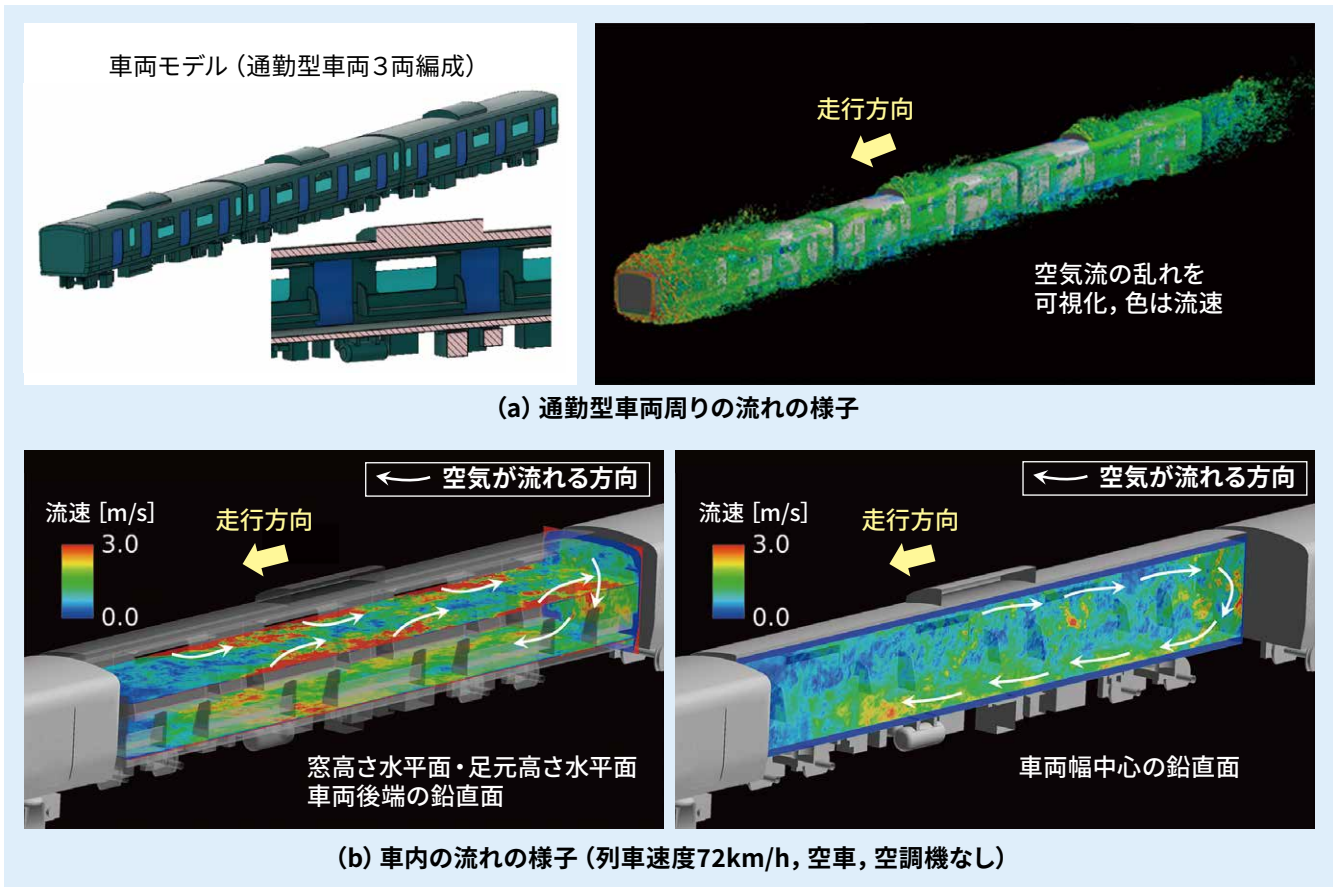


図4 窓開け走行時の車内換気の数値シミュレーション

車内の流れの様子を図4 (b) に示します。車両表面付近では、先頭車両から最後尾車両にわたって乱れた空気流が形成されます。この空気流は、窓の開口部から車内に流入します。ここで、窓の開口部は、車外の流れ（高速流）と車内の流れ（速度ゼロ）の境界部となり、急激な速度変化によって流れは不安定になり、左右方向に振動する複雑な流れを形成します。そして、この空気の一部が車内に流入し、車内をゆっくりと循環しながら流れます。つまり、車内換気量の評価においては、車外と車内の境界部（窓部）の空気流の再現が重要になります。

種々の条件（窓開口量，列車速度，乗車率，空調機気流，座席配置など）に対して数値シミュレーションを行い、走行時の窓開けによる車内換気量について、次のことがわかりました。換気量は、窓開口面積および列車速度に比

例すること，乗車率・空調機気流・座席配置に対する影響は小さいことがわかりました。最終的に、これらの結果を整理して、換気量の簡易予測式を提案しました。なお、シミュレーションにより得られた換気量は、実測値とおおむね対応することを確認しています。

### おわりに

鉄道の空力性能向上を目標に、流れを解明する手法として、鉄道車両周りの流れの数値解析を紹介しました。流れの数値解析では、計算機上に流れを再現し、そのデジタルな流れ場を詳細に調べることで実物の流れの理解を進めます。ここで重要なことは数値解析の適用範囲を誤らないことです。過去と比較して、この適用範囲は飛躍的に拡大しています。10年前にできなかったことが現在できるようになったという例も少なくありません。この適用範

囲拡大のための研究開発は今後も継続する必要があります。そして、実測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ります。[RRR]

### 文献

- 1) 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
- 2) 野口雄平，中出孝次：横風空力特性に関する風洞試験を模擬した数値シミュレーション，鉄道総研報告，Vol.31，No.9，pp.11-16，2017
- 3) 中出孝次：車両の床下流れを解明する，RRR，Vol.75，No.11，pp.12-15，2018
- 4) 中出孝次，高垣昌和，遠藤広晴：列車走行時の窓開けによる車内換気量を評価する，RRR，Vol.78，No.9，pp.4-7，2021