

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

横風下の鉄道車両周りの空気の流れを解明する

列車が風から受ける力（空気力）は、車両の形状のみならず、線路構造物の形状にも依存し、強風時の走行安全性の評価において、列車が受ける空気力を正確に把握することが重要です。また、これと同時に、空気力の発生原因となる空気の流れを理解することも大切です。ここでは、空気力を把握するため実施してきた風洞実験について紹介するとともに、数値シミュレーションを活用し、風洞実験では得ることができなかった横風下の車両周りの空気の流れについても紹介します。



野口 雄平
Yuhei Noguchi
環境工学研究部
車両空力特性研究室
副主任研究員



鈴木 実
Minoru Suzuki
環境工学研究部
車両空力特性研究室長



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）



乙部 達志
Tatsushi Otobe
環境工学研究部
車両空力特性研究室
主任研究員

はじめに

強風下においても安全かつ安定な列車運行を実現するためには、鉄道車両の走行安全性を正確に評価すること¹⁾、および鉄道沿線における風速を監視することが重要となります。走行安全性を評価するにあたり、強風時に列車に働く力、具体的には、①風から列車が受ける空気力、②曲線通過時の遠心力、③左右振動ともなう慣性力が必要となります。その中でも、①空気力が走行安全性の評価にもっとも影響を与えるため、空気力を正確に把握しなければ、正確な走行安全性の評価ができません。空気力は空気力係数（☞参照）という指標で整理され、実物の車両を用いた試験ではなく、車両の縮尺モデルを用いた風洞実験により空気力係数を得ることが一般的です。この理由は、実物の車両を使った試験では、人が制御できない自然風に試験の良否が

委ねられるのに対し、風洞では人が自由に風を制御できるためです。

上記のように、空気力係数を正確に把握することが重要である一方で、空気力の発生原因となる空気の流れを理解することも大切です。空気力の発生原因となる空気の流れを理解することで、物理的な考察に基づき対策を立てることが可能になり、具体的には、空気力を低減する車両形状の開発や効果的な防風設備の考案などにつながると期待されます。空気の流れを解明するためには、時々刻々と変化する流れを、広範囲に渡り詳細に測定する必要があります。しかしながら、風洞実験では、車両周りの空気の流れ、具体的には流速や圧力を詳細に取得することは多大な労力がかかるため、空気の流れの理解が進んでいませんでした。一方、近年の計算機の飛躍的な性能向上により、空気の流れの数値シミュレーションを行うことで、詳細な流れの情報を得ることが可能となっています。そこで数値シミュレーションを活用し、車両周りの流れの解明に取り組みました。

ここでは、空気力係数を把握するために鉄道総研で実施してきた風洞実験

☞ 空気力係数

空気力係数は、空気力を、車体の投影面積、風速、空気密度で規格化した値です。空気力は、空気力係数と比例関係にあります。


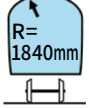



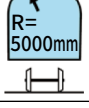
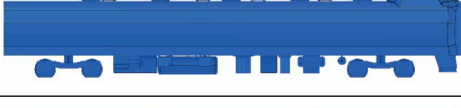
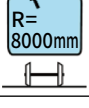

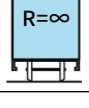
車両模型の外観	断面形状
	R=1840mm 
	R=1840mm 
	R=5000mm 
	R=8000mm 
	R=∞ 

図1 車両模型の外観(屋根半径は実物寸法)



図2 風洞実験の様子



図3 線路構造物の風洞実験模型

について述べた後、空気力の発生原因となる流れの特徴を明らかにすべく実施した数値シミュレーションについて紹介します。

風洞実験による空気力の測定

空気力は風を受ける物体の形状に大きく左右されます。そこで、鉄道総研では車両形状のなかで、とくに車体の断面形状に着目し、代表的な5車種(図1)を対象に風洞実験を行ってきました²⁾。風洞実験では、気流を乱す装置を車両の上流側に設置することにより、風洞内の気流の性質を自然風に近づけることで、より現実に近い気流が車両に作用するよう工夫しています(図2)。これまでの風洞実験により、車体断面における屋根部の曲率、列車編成における車両位置(先頭車両なの

か、編成中程に位置する中間車両なのか)、気流と車両のなす角度(風向角)が、空気力係数に及ぼす影響が大きいのことがわかっています。

上記のように、空気力係数は、車両形状に依存しますが、車両形状だけでなく、線路構造物の形状にも影響を受けます。そこで、代表的な線路構造物として、盛土(1種類)、橋りょう(3種類)、高架橋(3種類)を選択し(図3)、図1に示した5種類の車両と組み合わせた風洞実験を実施し、空気力係数のデータベースを整備しています。なお、橋りょう、高架橋での空気力係数は、桁高の影響を受けるため、桁高の異なる3種類の条件で、それぞれ試験を実施しました。鉄道事業者は、走行安全性の検討対象となる線区における車両や線路構造物と類似の条件を、空気力

係数のデータベースから選択することで、実態に即した条件での走行安全性の評価が可能となっています。

数値シミュレーションの概要

上述したように、鉄道総研では、車両と線路構造物を網羅的に組み合わせた風洞実験を実施してきました。その過程において、特定の線路構造物や風向角で、空気力係数、とくに横力係数(参照)が増大する結果が得られており、例えば、橋りょう、高架橋では

横力、横力係数

横力は、まくらぎ方向に加わる空気力です。空気力により車両に働く転倒モーメントのうち、大部分が横力に起因します。また、横力に対し、空気力係数と同様の方法で規格化した値が横力係数です。

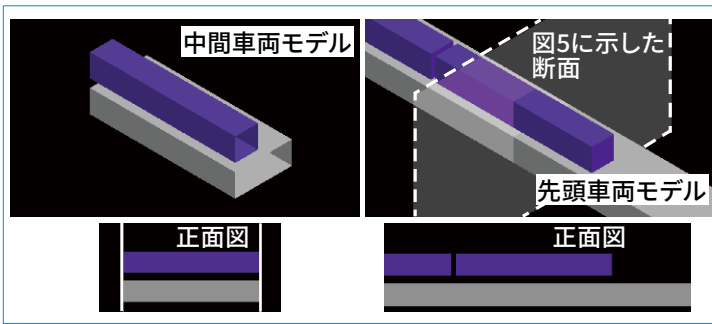


図4 解析対象とした車両モデルの形状

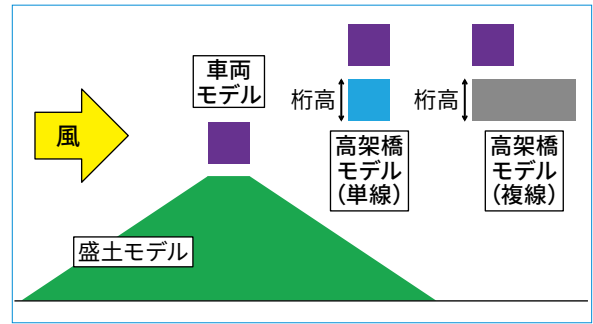


図5 解析対象としたモデルの断面形状

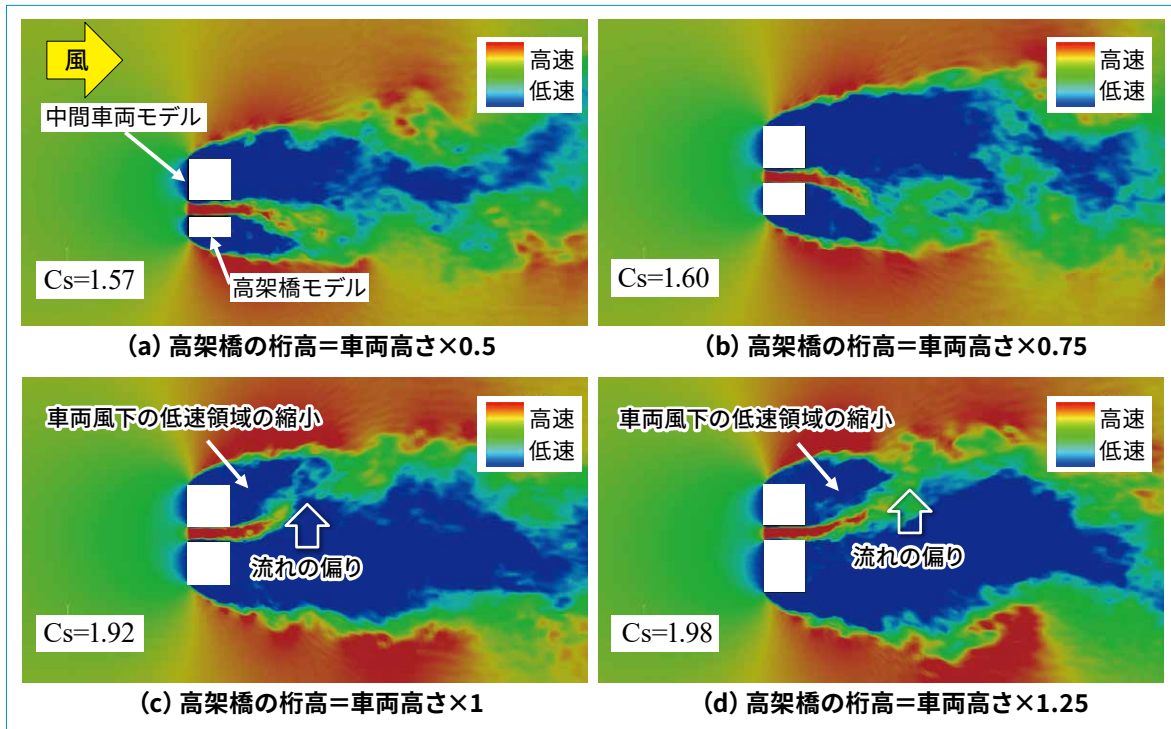


図6 中間車両モデル周りの流速分布

桁高の大きな条件で横力係数が大きくなります。走行安全性の評価において、空気力の中でもっとも重要な成分が横力であり、横力係数の増加は、走行安全性の低下を招くため、この知見は重要なものです。しかしながら、この現象の発生原因を、空気の流れの観点から明らかにしたものではありませんでした。そこで空気の流れの数値シミュレーションを実施することにより、この現象の発生メカニズムを探りました³⁾。

解析対象は図4に示すように中間車両と先頭車両とし、車両モデルと線路構造物モデルは図5に示す断面形状としました。一見してわかるように、解析対象とした形状は、実物の車両や線路構造物と比べて大きく簡略化されて

います。空気や水の流れは、とても複雑な現象であり、単純な形状周りの流れでも、大きささまざまな渦が生じ、複雑な流れになります。したがって、実形状に近いモデルを用いると、流れがより一層複雑化し、空気力に対して重要な流れをとらえることが難しくなります。そこで、横力係数の増大につながる流れの本質的な構造をとらえることができるよう、あえて解析対象を可能な限りシンプルにしています。解析対象は、きわめて単純な形状ですが、風洞実験で得られた横力係数が増大する条件と同様の条件で、車両モデルの横力係数が増大する結果が得られており、この形状を用いて流れを調べることへの妥当性を確認しています。

中間車両周りの流れ

図6に中間車両モデルが真横(風向角90度)から風を受けた際の流速の分布を示します。線路構造物は、単線の高架橋モデルです。図中には横力係数(Csと表記)も記載しています。横力係数は、風洞実験と同様に、高架橋の桁高の大きい条件(図6(c)(d))で増大しています。流れを調べることで、高架橋の桁高が大きい2条件では、車両と高架橋の隙間を抜けた流れが車両側に偏り、車両風下側の低速の領域(図中の青色の領域)が縮小することがわかりました。その結果、車両風下側の圧力が低下し、横力係数が増大することが明らかとなりました。

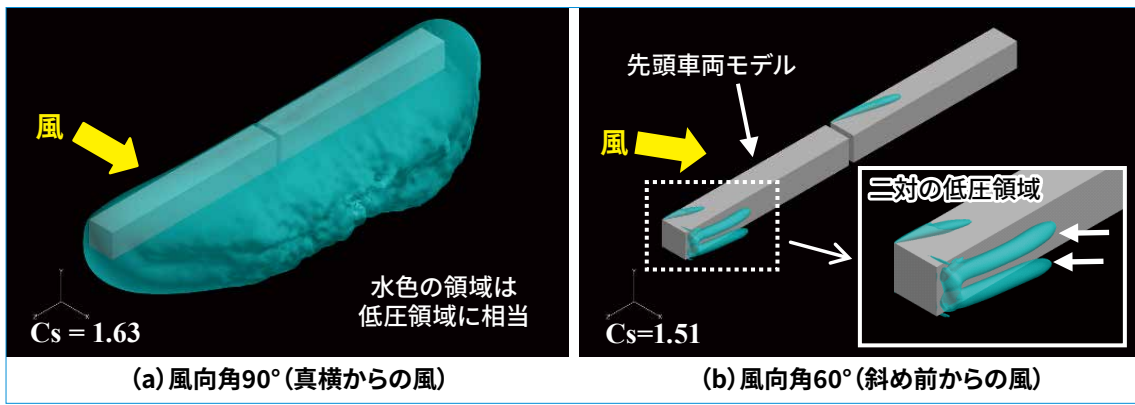


図7 先頭車両モデル周りの低圧領域（線路構造物なし）

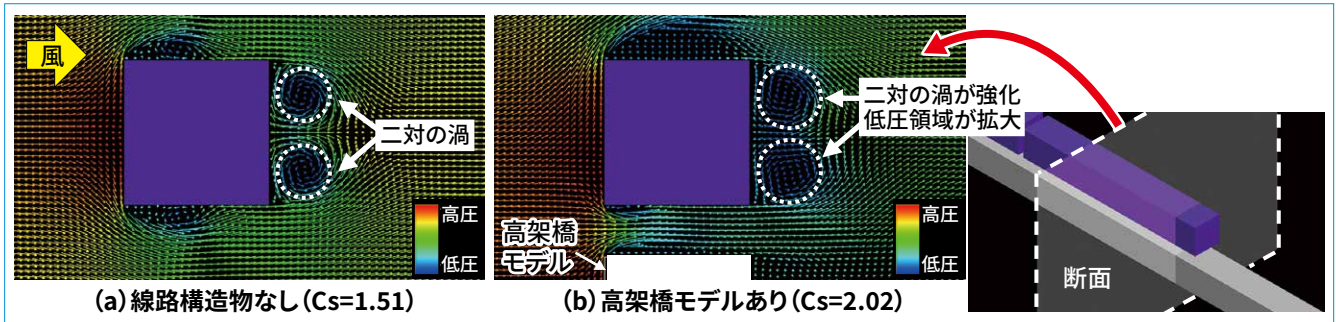


図8 風向角60度における先頭車両モデル周りの流れの様子（流速の向きと大きさを矢印で表現し、圧力の値で色付け）

先頭車両周りの流れ

先頭車両では、中間車両と比べ、横力係数に対する風向角の影響が大きいことが知られています。そこでまず、風向角90度（真横からの風）において、高架橋モデルと組み合わせて先頭車両モデルに対しシミュレーションを行った結果、図6に示した中間車両の場合と同様のメカニズムで、高架橋の桁高が大きい際に横力係数が増大することがわかりました。

次に風向角60度（斜め前からの風）の検討を行いました。まず、車両に対する風向角の影響だけを調べるため、あえて線路構造物をなくし、車両を宙に浮かせた状態で、風向角90度および風向角60度の風を受けた先頭車両モデルに対しシミュレーションを行いました（図7）。図7の水色の領域は、低圧の領域を示しています。風向角90度と60度で横力係数に大きな違いはありませんが、圧力分布が大きく異なり、風向角60度では、車両先頭部付近に生じる二対の低圧領域に起因して

横力が発生することがわかりました。

さらに、風向角60度で、桁高の大きい単線の高架橋モデルと組み合わせた場合の流れの様子を図8に示します。比較のため、図7に示した車両が宙に浮いた条件（線路構造物なし）も示しています。図8には、図示した断面における流速の向きと大きさを矢印で示すとともに、圧力の大きさを矢印を色付けしています。高架橋モデルの存在により、車両が宙に浮いた条件と比べて、横力係数が顕著に増大しています。車両が宙に浮いた条件では、図7に示した二対の低圧領域に相当する二対の渦が見て取れます。横力係数が増大した高架橋モデルありの条件では、その二対の渦が強化され、低圧領域が広がることで、横力係数が増大することがわかりました。図8に示した風向角60度のように斜め前から風を受けた先頭車両の場合には、真横から風を受けた場合とはまったく異なるメカニズムにより、横力係数が増大することが明らかとなりました。

おわりに

数値シミュレーションにより横風下の車両周りの流れを調べた結果、風向角によって大きく異なる流れが生じ、空気力が増大することが明らかとなりました。風向角によって異なる流れを理解し、空気力の増大につながる流れを抑制する方法を考えることで、空気力を低減させる効果的な対策につながる可能性があります。今後、効果的な防風設備などを考える際に本研究で得られた知見を活かしていきたいと考えています。RRR

文献

- 1) 日比野有, 石田弘明: 車両の転覆限界風速に関する静的解析法, 鉄道総研報告, Vol.17, No.4, pp.39-44, 2003
- 2) 種本勝二, 鈴木実, 斎藤寛之, 井門敦志: 在来線車両の空気力係数に関する風洞試験結果, 鉄道総研報告, Vol.27, No.1, pp.47-50, 2013
- 3) 野口雄平, 鈴木実, 菊地勝浩: 数値解析による横風下の車両空力特性に関する研究, 鉄道総研報告, Vol.35, No.6, pp.29-34, 2021