

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

トンネル内を走行する車両屋根上の空気の流れを解明する

鉄道車両の屋根上には電力を受給するため、パンタグラフが搭載されています。パンタグラフが良好な集電性能をもつためには、揚力が適切に維持される必要があります。揚力は風速に大きく依存するため、とくに舟体位置における風速を予測することが重要です。そこで、トンネル内を走行する列車屋根上流れに関して、境界層および碍子オオイの影響を数値流体シミュレーションで検討した結果を紹介します。また、外乱の少ない環境下でのデータを取得するため、流速測定用列車模型を製作し、実験を実施したので、その結果について述べます。



菊地 勝浩
Katsuhiko Kikuchi
環境工学研究部
車両空力特性研究室
室長
[専門分野] 鉄道流れ工学



野口 雄平
Yuhei Noguchi
環境工学研究部
車両空力特性研究室
研究員
[専門分野] 横風下の車両の空力特性



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



光用 剛
Takeshi Mitsumoji
鉄道力学研究部
集電力学研究室
主任研究員
[専門分野] 架線／パンタグラフ系に関わる空力現象

はじめに

パンタグラフは、地上設備の架線から走行列車に電力を供給するために、列車屋根上に搭載されている機器です。パンタグラフを構成する部材のなかで、舟体（トロリー線と直接しゅう動する部材）はパンタグラフの揚力特性に対して影響が大きい部材です。そのため、鉄道車両では屋根上流れ、特に舟体位置近傍の流れを十分に把握しておくことが、安定した集電性能を実現するうえで重要です。

舟体に作用する揚力はおおよそ流速の2乗に比例します。列車がトンネル内を走行する際の屋根上流れは、列車とトンネル壁面で囲まれた狭い空間における流れとなるため、明かり区間（トンネル以外の区間）のような開放された空間における流れとは異なる流れと

なります。そして、トンネル区間の流速は、明かり区間の流速と比較すると、約1.2～1.3倍に増えます。

トンネル内における列車屋根上流速の概要

トンネル走行時の列車の中にいる人から見た列車屋根上流速の概念図を図1に示します。列車の中にいる人から見ると、列車壁面の流速は0、トンネル壁面は列車速度 V で列車の後方に移動するため、トンネル壁面の流速は V となります。列車屋根上壁面とトンネル壁面に囲まれた部分の空間断面平均流速は、列車・トンネル断面積比を R とすると、連続の式から $V/(1-R)$ となります。 R は通常0.2くらいですので、トンネル内における列車屋根上流速は列車速度の1.2～1.3倍に増速します。また、トンネル内における列車屋根上流速は、列車屋根上壁面およびトンネル壁面に発達する境界層（参照）の影響により図1に示したような分布になります。したがって、流速分布のどの位置に舟体が位置するのかによって、舟体に作用する流速は大きく異なることとなります。

境界層

物体表面近くの流体の粘度の作用を無視することができない薄い層。境界層内では、流速は0から一様流速の程度まで急激に変化します。境界層は、流体のコロに相当するもので、このコロが物体表面を転がり動き、徐々に厚みを増しながら下流に移動していきます。

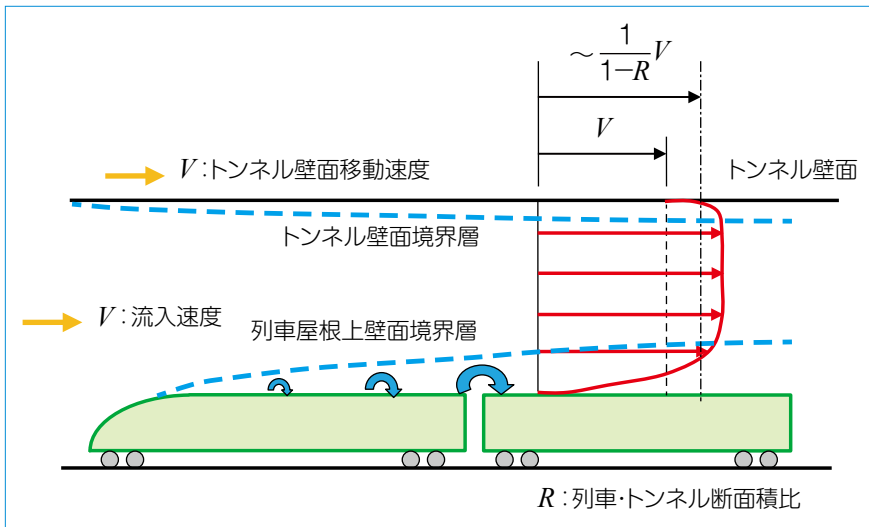


図1 トンネル内を走行する列車屋根上の流速分布の概念図
(列車の中にいる人から見た流速分布)

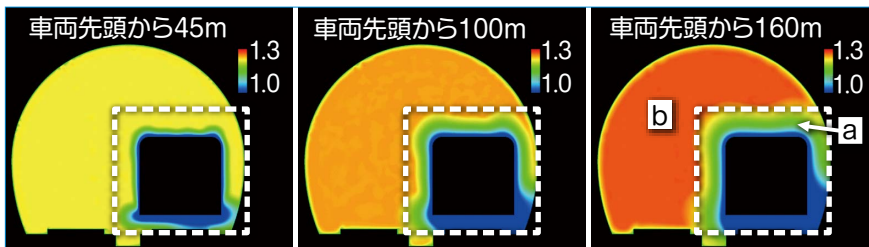


図4 トンネル断面内の対列車流速

境界層および碍子オオイの影響に関する数値流体シミュレーション¹⁾

本章では、トンネル内を走行する列車屋根上の流れに対して、境界層および碍子オオイ（空力音低減を目的として、パンタグラフを支持する碍子が直接気流にさらされることを防ぐフェアリング）が及ぼす影響について、数値流体シミュレーションによって検討した結果について説明します。

○数値シミュレーション手法

近年は飛躍的な計算機性能の向上により、数値流体シミュレーションにより列車まわりの空気の流れを解析することが多くなっています。数値流体シミュレーションでは、計算領域内の空間を分割し、分割した小さな領域ごとに空気の流れを支配する方程式を解き、空間上の流れの情報を得ます。列車まわりの流れ場は乱流であり、流れの中

に大小さまざまな渦が存在し、時間的、空間的に流れの状態は変化します。数値流体シミュレーションでは、すべての渦を計算機上で直接再現せずに、乱流の効果を反映させる乱流モデルを用いることが一般的です。ここでは、乱流におけるすべての渦をモデル化の対象とし、乱れのない平均流れのみを直接の計算対象とする手法（RANS：Reynolds-Averaged Navier-Stokes equation）を用いました。

図2に数値シミュレーションにおいて解析対象とした領域を示します。列車およびトンネルは実物大として、列車の長さは約200m、トンネルの長さは約300mです。実際のトンネルは、300mより長いことが多いですが、長さ200mの列車がトンネル内を走行する際の列車まわりの流れをシミュレーションするにあたり、トンネル全体を解析領域とする必要はなく、列車位置

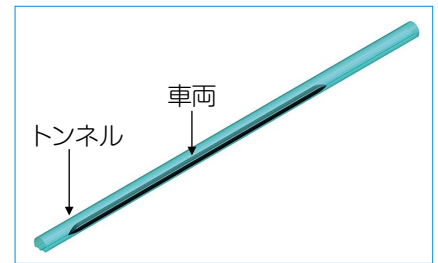


図2 数値シミュレーションの領域

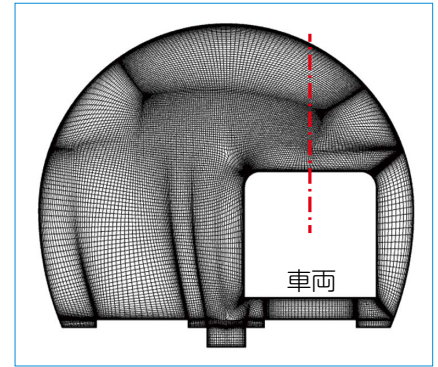


図3 トンネル断面の空間分割

の前後のみに、ある程度の長さのトンネルが存在すれば十分であるため、ここではトンネル長さは300mとしました。

地上にいる人から見れば、トンネルは当然止まっており、静止した空気の中を、ある走行速度で列車が走っていきます（地上固定座標系）。一方で、列車の中にいる人から見れば、トンネルは列車とは逆向きに動いており、列車は、走行速度と等しい速さの風を前から受けることとなります（列車固定座標系）。数値シミュレーションでは、後者の列車固定座標系によって列車まわりの流れのシミュレーションを行っています。

先に述べたように、空気の流れをシミュレーションするにあたり、計算領域内の空間を分割する必要があります。図3にトンネル断面の空間分割を示します。空気の流れのシミュレーションでは、境界層とよばれる物体近傍に生じる速度変化が激しい領域を、特に細かく空間分割することが求められます。そういった領域では、列車の高さ約3mに対して、空間分割の幅は1mm

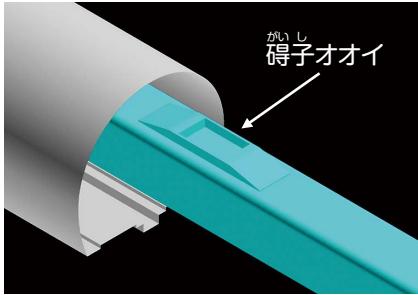


図5 がいし 碍子オオイの計算モデル

として、シミュレーションを実施しました。

○境界層の影響

このシミュレーションによって得られた列車まわりの流れの様子について説明します。図4にトンネル断面内の流速分布を示します。ここで示す流速は、列車から見た流速であり、図中の青の領域が低速、赤の領域が高速に対応します。列車先頭からの距離が長くなるほど、列車まわりの低速領域(図中aの領域：青および緑の領域)が広がり、列車まわりに境界層が発達する様子が見て取れます。また、列車とトンネルの間に存在する低速領域の外側(図中bの領域)の流速は、列車先頭からの距離が長くなるほど、増速(黄色から濃い橙色に変化)していることがわかります。

○がいし 碍子オオイの影響

次に、列車屋根上にがいし 碍子オオイ(図5)を設置した場合にトンネル内を走行する列車まわりの流れに及ぼす影響について述べます。図3に赤線で示した断面の流速分布を図6に示します。図6には比較のため、がいし 碍子オオイを設置しなかった条件についても示しています。がいし 碍子オオイを設置することで、がいし 碍子オオイ内の流速は低くなります。一方で、がいし 碍子オオイの上方では、流れががいし 碍子オオイによって跳ね上げられるとともに、流路ががいし 碍子オオイの存在に

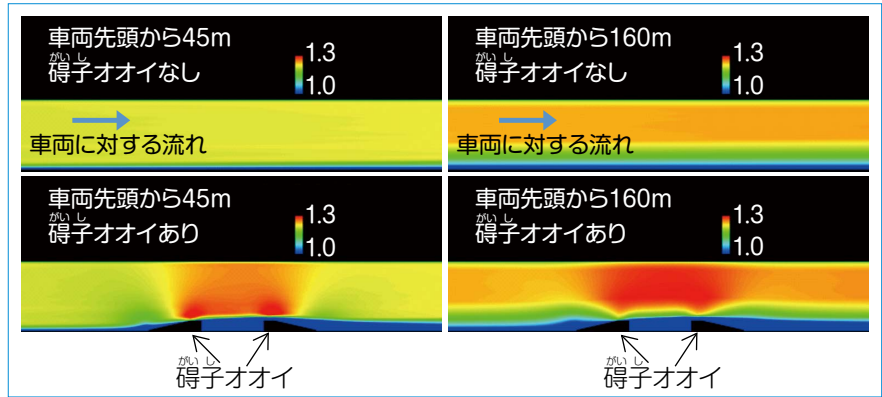


図6 対列車流速分布の比較

より縮小するため、がいし 碍子オオイ上方の空間全体が増速することがわかります。

以上述べたように、明かり区間とは異なり、トンネル区間では、空気の流れる流路が列車とトンネル壁面に挟まれた領域に制限されるため、列車およびがいし 碍子オオイが直接影響を及ぼす領域より、さらに外側の領域の流速に対しても影響を及ぼすことが、以上のシミュレーションによりわかりました。

列車屋根上流速を測定するための模型実験

列車屋根上の流速を測定しようとする場合、もっとも確実な手法は、現車(実車)試験を実施することです。しかし、現車試験は時間的にも経済的にもハードルが高く、容易に実施できるものではありません。一方、模型実験は、実験結果と現車結果の関係性(相似則)を検討する必要があるものの、現車試験と比較すると時間的にも経済的にも有利です。また、現車試験と比較すると外乱が少なく、理想的な環境下で実施することができます。

列車まわりの流れの実験を行う場合、

静止した列車模型を対象に風洞試験を実施することが一般的です。しかし、風洞試験では列車とトンネルの相対運動が模擬できません。そこで、列車まわりの流速を測定できる縮尺1/62の流速測定用列車模型を製作し、列車模型発射装置によって列車模型をトンネル模型に突入させ、列車模型まわりの列車模型から見た流速測定を行いました²⁾。模型装置全体の写真を図7に示します。列車模型発射装置は、トンネル模型内部の軸方向にピアノ線を張り、このピアノ線に沿って列車模型が滑り動く構成になっています。列車模型の加速は、上下の回転輪で列車模型後方に設置された発射体を挟み込んで行います。列車模型には、流速を測定するために、外径1.1mmの7本の管をくし形に組み合わせたくし型総圧管(参照、図8)を搭載しています。また、データを保存するためのデータロガーや電源バッテリーも合わせて搭載されています。

測定で得られた流速波形を図9に示します。図の横軸は時間、図の縦軸は列車速度で割った無次元流速を示して

☞ 総圧管

流れに平行に置かれた管の先端に作用する圧力を測定します。管先端には、管まわりの静圧と流れにともなう動圧を加えた総圧(全圧ともいう)がかかります。管まわりの静圧を別途測定し、総圧から引くことで、動圧を、そして動圧から流速を算出することができます。

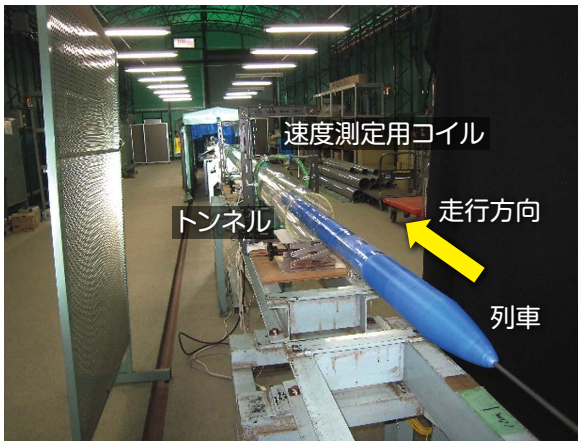


図7 実験装置の全景写真

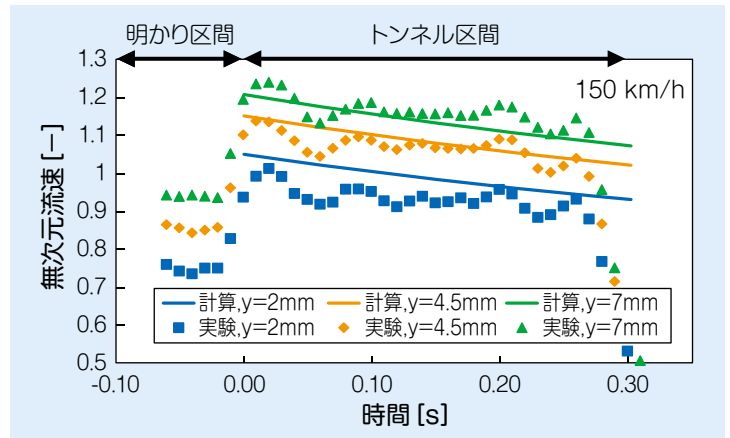


図9 模型実験で得られた流速波形

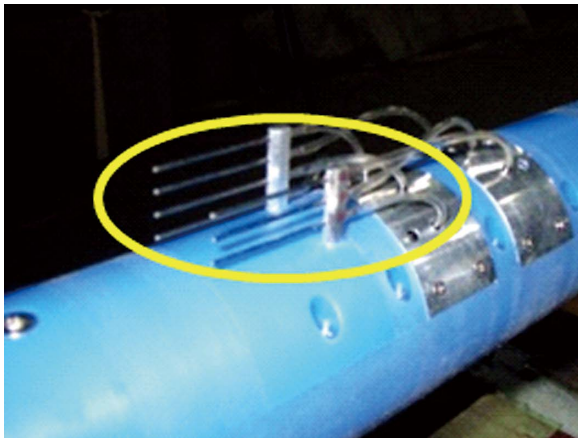


図8 くし型総圧管の拡大写真

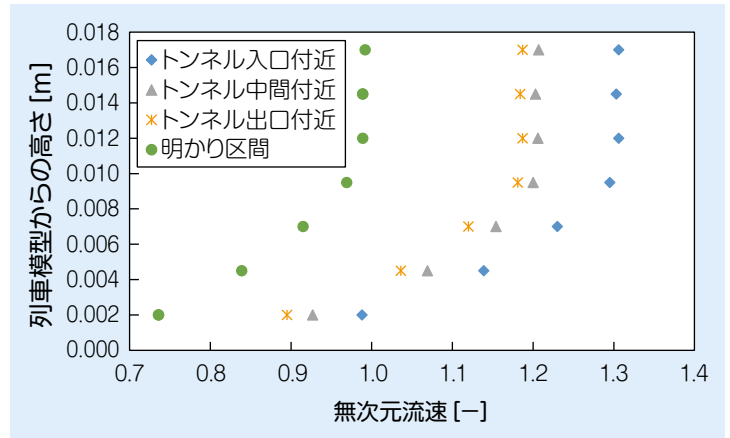


図10 列車屋根上の流速分布

います。図は列車模型壁面からの高さが2mm, 4.5mm, 7mmのみの結果を示しています。図9を見ますと、列車まわりの流速は、トンネルに突入することで明かり区間の流速より増加すること、トンネル突入後は全体的なトレンドとして時間とともに流速が減少していること、列車模型壁面に近づくほど流速が遅くなっていることなどがわかります。また、列車模型がトンネルに突入した際に発生する圧力波によって、流速が変動している様子も読み取れます(例えば $t=0.04\sim 0.05$ s付近)。図9には、模型実験に合わせて開発した簡易計算法による予測値も合わせて示しています。簡易計算法による予測値は、実験結果をよく再現しています。

鉛直方向の流速分布を図10に示します。図10には比較のため、明かり

区間における流速分布も合わせて示しています。図10を見ますと、トンネル内を走行する列車屋根上の流速は、空間的にも時間的にも変化していて、トンネル入口付近では列車速度の1.3倍程度の流速がトンネル出口に近づくにつれて徐々に減速している様子わかります。また、今回の実験条件では、トンネル内での流速分布は明かり区間の流速分布と同様の分布になりました。

おわりに

トンネル内を走行する列車屋根上の流速に関する最近の研究事例を紹介しました。ここで紹介した数値流体シミュレーションや模型実験は、列車屋根上流れ解析において、今後ますます活用されると考えられます。

日本は、新幹線という高速鉄道シス

テムを世界に先駆けて実用化する過程において、それまでの鉄道に前例がなかったさまざまな空力問題に直面してきました。しかし、その度に、系統を超えた関係者の努力により、問題の解決を図ってきました。鉄道総研はこれからも、関係各所からの期待に応えられるように、研究開発を着実に推進していきます。[RRR]

文献

- 1) 菊地勝浩, 野口雄平, 中出孝次, 眞下伸也: トンネル内を走行する車両屋根上流速の解析, 鉄道総研報告, Vol.30, No.7, pp.29-34, 2016
- 2) 菊地勝浩, 野口雄平: トンネル内を走行する単純形状車両模型に搭載したくし型総圧管による流速測定, 第27回交通・物流部門大会, 1105, 2018