

- 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

高速列車の屋根上の空気の流れを探る

鉄道の高速化の際には、列車周りの空力現象の予測が重要です。ここでは、鉄道総研が最近実施している列車屋根上の流速に関する研究を紹介し、はじめに、列車周りにおける流速の概要を説明し、次に列車が明かり区間を走行する際に斜め風を受けたときの屋根上流れ、とくにパンタグラフ遮音板周りの流れの解析結果を紹介し、また、列車がトンネル内を走行する際に生じる流速を手早く予測する計算手法を紹介します。



菊地 勝浩
Katsuhiko Kikuchi
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)



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



光用 剛
Takeshi Mitsumoji
鉄道力学研究部
集電力学研究室
主任研究員

はじめに

鉄道の高速化の際には、列車周りの空気力学的な現象の予測が重要です。高速列車の空気力学的な現象には圧力に関する現象と流速に関する現象があります。圧力に関する現象の例としては、車両構体や沿線機器に作用する外力、トンネル走行時における耳ツンなどがあります。流速に関する現象の例としては、パンタグラフの揚力変動、駅ホームにおける列車風などがあります。ここでは、おもにパンタグラフの集電性能の検討で重要となる高速列車屋根上の流速に関する研究事例を紹介します。

列車周りにおける流速の概要

自然風の影響

地上で止まっている人から見ると、

走行する列車は静止した空気の中を高速で通過していきます。一方、列車の中にいる人から見ると、列車は静止しており、周りの空気が列車の走行速度で後方に移動していくように見えます。列車の中にいる人から見た状況を再現する実験方法が風洞実験です。風洞実験では、静止した列車模型に対して、列車速度に対応する流速の様な空気を流すことで、列車の走行を模擬します。

明かり区間では、静止した空気の中を列車が走行する状況を想定することが多いですが、実際には自然風の影響を受けます。そのため、列車に対する流速は、列車自身が走行することによる前方向からの向かい風と横方向からの自然風を足し合わせた斜め方向からの流速になります(図1)。明かり区間

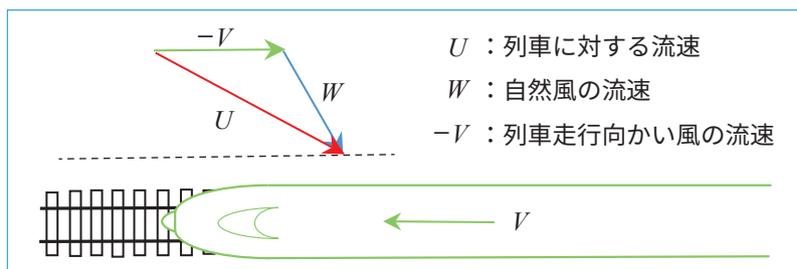


図1 自然風下を走行する列車に対する流速

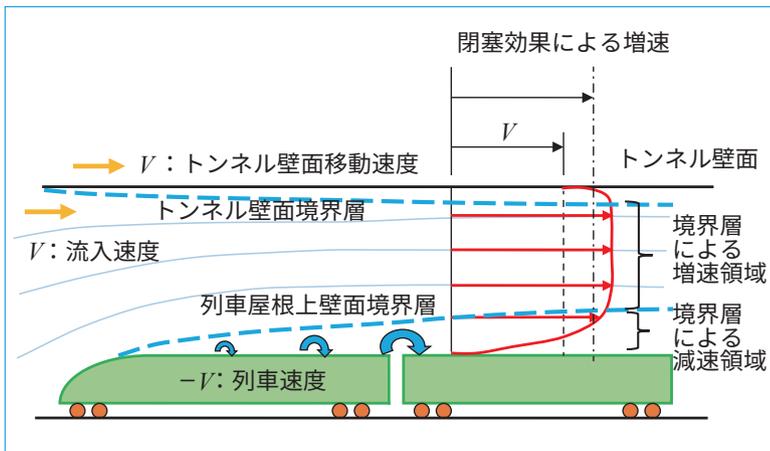


図2 トンネル内を走行する列車屋根上の流速分布の概念図 (列車の中にいる人から見た流速分布)

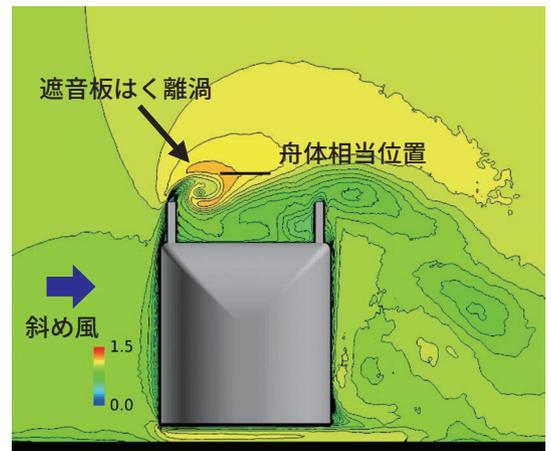


図3 舟体位置断面の平均速度絶対値コンター

における列車屋根上流れを解析する際には、斜め風の影響を考慮する必要があります。

境界層の影響

風洞試験において、列車模型から十分離れた位置における流速は、列車速度に対応する流速ですが、静止した列車模型表面における流速は空気摩擦のためゼロであり、列車模型から離れた位置と列車模型表面の間には、流速が徐々に変化する領域が存在します。この領域は境界層とよばれ、境界層内の流速は、列車速度に対応する流速より遅くなります。境界層は、空気の流れの上流から下流にかけて、層の厚さを徐々に増していきます。

トンネル内における流速

続いてトンネル内における列車屋根上の流速を考えます。まず、境界層の影響を無視し、一様な空気が流れていると仮定します。列車に乗っている人から見ると、列車速度と同じ流速で列車前方向から流れてくる空気は、列車とトンネルの間では流れる断面積が小さくなる影響のため、流速は列車速度よりも速くなります。複線トンネルにおける流速は、列車速度の約1.2倍になります。現実の流れでは流れの断面積が小さくなる影響に、境界層の影響が加わります。境界層によって減速

される領域が発生すると、トンネル内の残された断面積においては、流れが一樣であると仮定した場合に比べて部分的に速い流れが生じる領域が生じます¹⁾²⁾。その様子を図2に示します。

また、トンネル内を列車が走行すると、種々の空気力学的な影響により、トンネル入口からトンネル出口に向かう流れが生じ、列車に乗っている人から見た流速は時間的に減少します。トンネル内を走行する列車屋根上流速を予測する際には、境界層の影響と流速が時間的に変化する影響を考慮することが重要です。

明かり区間における斜め風を受ける列車屋根上流速³⁾

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。舟体(トロリー線と直接しゅう動する部材)に作用する揚力は、パンタグラフが架線を押上げる力の中で大きな割合を占めます。舟体に作用する揚力は、おおむね流速の2乗に比例するため、パンタグラフが架線を押上げる力を定量的に評価するためには、パンタグラフ周辺の流速を把握することが必須となります。

パンタグラフの側方には、パンタグ

ラフから発生した騒音が沿線に伝播することを防ぐため、遮音板が設置される場合があります。遮音板に斜め風が作用すると、舟体位置における流速は、斜め風がない場合の流速と異なることが想像されます。ここでは、遮音板に斜め風が作用した時の舟体付近の流れの様子を、数値シミュレーションと小型風洞試験で検討した結果を紹介いたします。また、斜め風の影響を低減するための遮音板改良形状の検討結果も示します。

数値シミュレーションによる斜め風を受ける遮音板周りの流れ解析

図3は風向角 20° の条件における遮音板周りの流れの数値シミュレーション結果を示しています。風向角は列車進行方向からの風が 0° 、列車進行方向真横からの風が 90° です。風向角 20° は、たとえば走行速度 200km/h の列車が真横から 20m/s の風を受ける状況に相当します。斜め風が遮音板に作用すると、上流側の遮音板から渦(遮音板はく離渦)が発生し、その渦は舟体近傍まで達しています。鉛直方向平均流速の列車幅方向分布を調べた結果を図4に示します。遮音板はく離渦の影響により、グラフの左側の領域で舟体に下向きの流速が作用し、流速の大きさは舟体の位置が低下するとともに

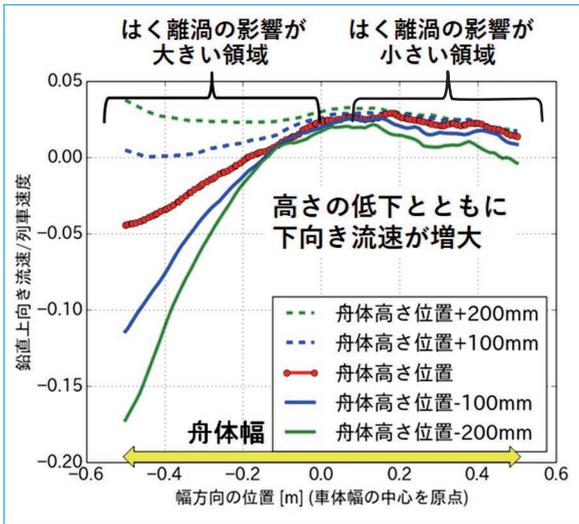


図4 鉛直方向流速の列車幅方向分布

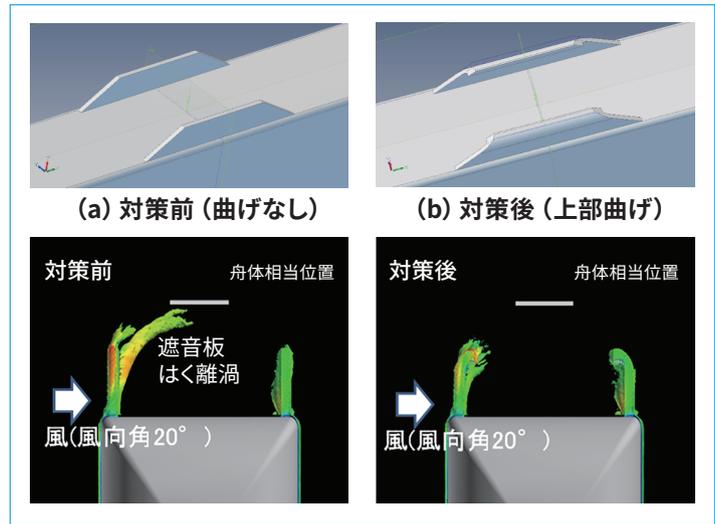


図6 形状対策前後の遮音板はく離渦の様子

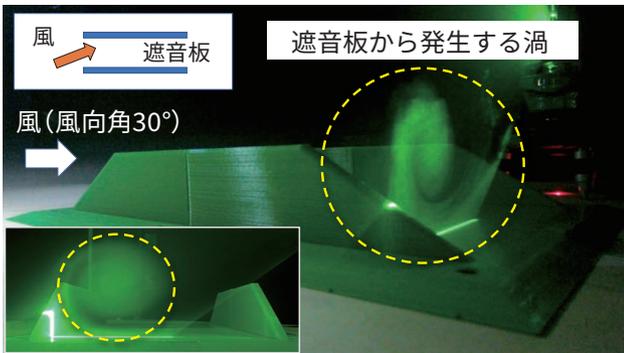


図5 風洞試験における遮音板はく離渦

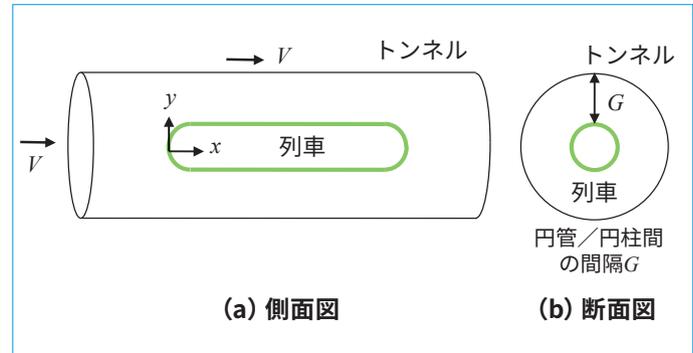


図7 円管と円柱によるトンネル/列車のモデル化

増大しています。

風洞試験による可視化

流れの数値シミュレーションによって示された遮音板はく離渦について、小型風洞を用いた流れの可視化試験により検証しました。地面板上に縮尺1/15の遮音板を風向角30°で設置し、風洞気流4.5m/sの風を作用させました。風洞ノズルから可視化のための煙を流し、遮音板に対して垂直にスリット光源をあて、遮音板の下流側から上流側に向かってカメラで撮影した写真を図5に示します。遮音板間のスリット光源に映し出された煙の様子を観察すると、上流側の遮音板から渦が発生している様子がうかがえます。これは、数値シミュレーションによって示唆された遮音板はく離渦と同様の渦と考えられます。

遮音板はく離渦低減のための遮音板形状の検討

遮音板に斜め風が作用すると、遮音板はく離渦が発生し、舟体付近の流れ場に影響を与えることがわかりました。舟体付近の流れ場に対する遮音板はく離渦の影響を低減するため、遮音板の形状を検討しました(図6)。解析の結果から、遮音板の上部を内側に曲げることによって、舟体近傍に伸びていた渦を抑制することができました。

トンネル内列車屋根上流速の簡易計算法⁴⁾

トンネル内では自然風はありませんが、トンネル区間走行時の列車屋根上流速は、明かり区間走行時の列車屋根上流速より増速し、たとえば流速が2割増加すると舟体に作用する揚力は4

割増加します。さらに、境界層の影響による列車屋根上からの高さによって流速は異なります。これまでのトンネル走行時の列車屋根上流速の数値計算法(従来法)では、境界層の影響を考慮することができませんでした。そこで、境界層の影響を考慮しつつ、トンネル内流速をパソコンとMicrosoft Excelを用いて手早く計算できる手法(簡易計算法)を開発しました。ここでは開発した簡易計算法について紹介します。

境界層の影響のモデル化

簡易計算法ではトンネルを円管、列車を円柱で表し、円管と円柱の間の流れを計算対象とします(図7)。そして、トンネル壁面から発達する境界層と、列車屋根上壁面から発達する境界層を考えます。それぞれの境界層の流速分

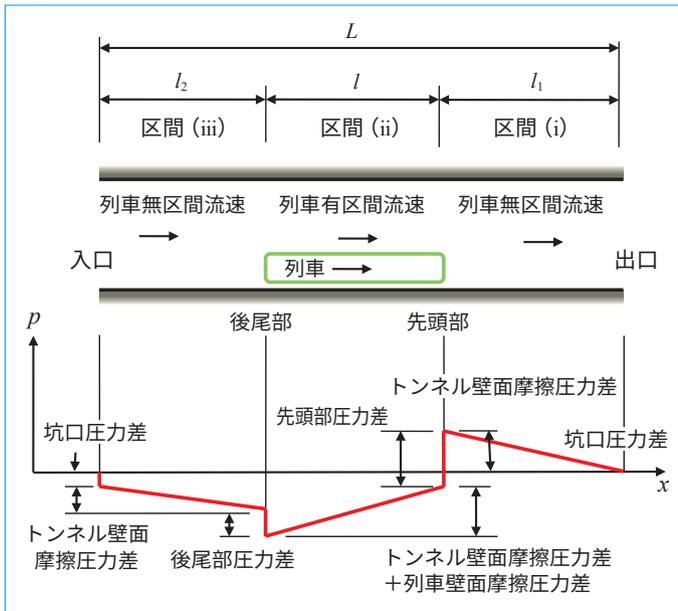


図8 非定常非圧縮性流体モデルによるトンネル内の圧力分布

布を求めて、両者が交わる位置における流速が一致するように繰り返し計算を行うことで、境界層の影響をモデル化します。境界層の影響をモデル化することで、列車屋根上で高さ方向に変化する流速の予測が可能となります。

流速が時間的に変化する影響のモデル化

流速が時間的に変化する影響をモデル化の際に考慮しなければならないトンネル内の圧力分布の要素は、断面が変化するトンネル坑口・列車先頭部・列車後尾部における圧力差、およびトンネル壁面・車体表面における摩擦力です。これらの要素を考慮したトンネル内の圧力分布を図8に示します。図8に示したモデルから、時間的に変化する流速の起動力を求めることができます。

計算結果

舟体位置における流速の時間変化の計算結果を図9に示します。図9には、比較のため、従来法の結果も合わせて示しています。簡易計算法は、従来法と遜色のない結果を与えています。図10には、列車屋根上流速の鉛直方向分布を示しています。従来法で

は、鉛直方向の流速分布を一定と仮定していますが、簡易計算法では鉛直方向の分布も仮定の範囲で予測可能です。簡易計算法では、パソコンを用いて解析に要する時間は1分以内と短いため、トンネル内流速に対する列車速度、列車長、列車断面積、トンネル長、トンネル断面積、摩擦係数などのパラメータスタディーを多数実施することが可能です。これにより、たとえばパンタグラフの集電性能に流れが与える影響の簡易評価などといった応用も考えられます。

おわりに

列車が明かり区間とトンネル区間を走行する際に生じ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、風洞試験、簡易計算法は、列車屋根上流れ解析を行う際に今後ますます活用されると考えられます。鉄道には安全性、高速性、定時性、快適性、信頼性などが求められています。これらの要求に対して高いレベルで応えていくためには、列車周りの流れに対するさらなる研究が必要です。RRR

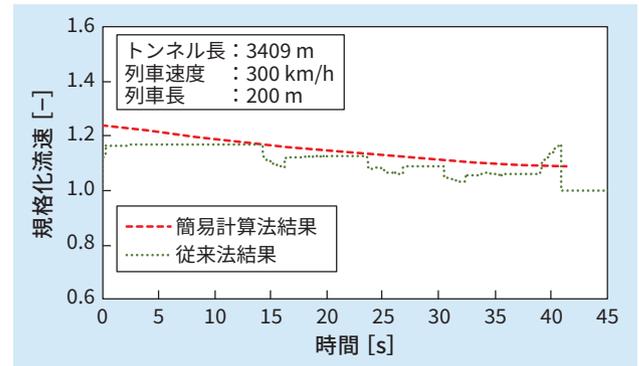


図9 パンタグラフ舟体位置における流速の時間変化

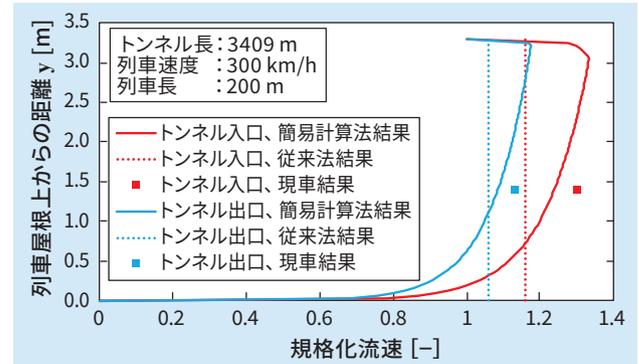


図10 屋根上流速の鉛直方向分布

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, 中出孝次, 光用剛: 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, RRR, Vol.76, No.5, pp.12-15, 2019
- 3) 中出孝次, 光用剛: 騒音低減装置, 公開特許公報 (A), 特開2019-17217, 2019
- 4) K.Kikuchi, S.Ozawa, Y.Noguchi, S.Mashimo, T.Igawa: A simple calculation method for estimating the flow velocity on the roof of a train running through a tunnel using an unsteady incompressible flow model, Proc.IMEchE.Part F, Journal of Rail and Rapid Transit, Vol.234, No.7, pp.734-748, 2019