

# トンネル内を走行する車両屋根上流速の解析

環境工学研究部 車両空力特性研究室

室長 菊地 勝浩

## 1. はじめに

高速車両がトンネル内を走行すると、パンタグラフに作用する揚力は、明かり区間における揚力と比較して大きくなる。舟体に対する流速は揚力に影響を及ぼす重要なパラメータである<sup>1),2)</sup>。種々の車両条件やトンネル条件に対して舟体に対する流速を予測することができる既存のトンネル内一次元圧力変動シミュレーション<sup>3)</sup>では、実測結果<sup>4)</sup>と差異がある(図1)。この理由として、トンネル壁面や車両屋根上壁面に発達する境界層を考慮していないことや、舟体近傍の流れ場は碍子オオイや二面側壁の影響を受ける可能性があることが考えられる。

そこで本報告の前半では、車両表面やトンネル壁面に発達する境界層および碍子オオイに着目し、RANSによる三次元数値流体解析を行うことにより、車体表面やトンネル壁面に発達する境界層および碍子オオイがトンネル内の流速分布に与える影響について考察する。また本報告の後半では、トンネル内を走行する車両屋根上流れをパソコンで簡易に計算できる計算法を検討する。

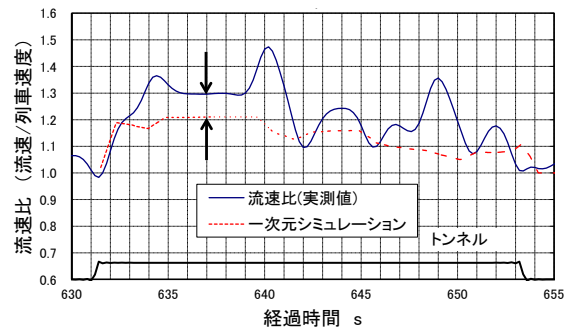


図1 トンネル内走行時の舟体に対する流速の一次元シミュレーション結果と実測の比較 (列車速度 300km/h、Tトンネル (L=1822m))

## 2. 三次元数値流体解析<sup>5)</sup>

### 2.1 境界層の影響

研究で用いた解析モデルは以下の通りである。車両の長さは204.7m、車両の先頭部長さは9.2mである。先頭部は流れが剥離しない流線形とした。車両は、台車、車間、パンタグラフは省略している。車両断面積は10.75m<sup>2</sup>、トンネル断面積は63.4m<sup>2</sup>である。トンネル断面中央から車両断面中央までの距離は2.15m、車両底面とスラブとの距離は0.58mである。本解析では車両固定座標系で計算を行った。主流方向がX、鉛直方向がY、まくらぎ方向がZである。座標原点は、Xは車両先頭、Yはスラブより0.2m上方(レールレベルに相当)、Zはトンネル断面中央である。計算領域入口を速度境界条件として、列車走行速度と等しい一様な流速83.3 m/s(=300 km/h)を与えた。車両は静止しており、トンネル壁面および地面はX方向に列車走行速度と等しい速度で移動している。計算領域出口は圧力境界条件とした。総格子数は約1100万である。車両底面を除く車両表面およびトンネル壁面は粗度高さ $k_s$ を0mとした。また、床下流れについては台車や台車が収まるキャビティの影響を簡便に模擬するため、車両底面の粗度高さ $k_s$ を0.01mおよび0.1mに設定した。基礎式は非圧縮性に対するNS方程式である。対流項の空間離散化にはQUICKスキームを用いた。乱流モデルはRealizable k- $\epsilon$ モデルを使用し、SIMPLE法に基づく定常解析を行った。本解析ではANSYS Fluent 15.0.7を使用した。

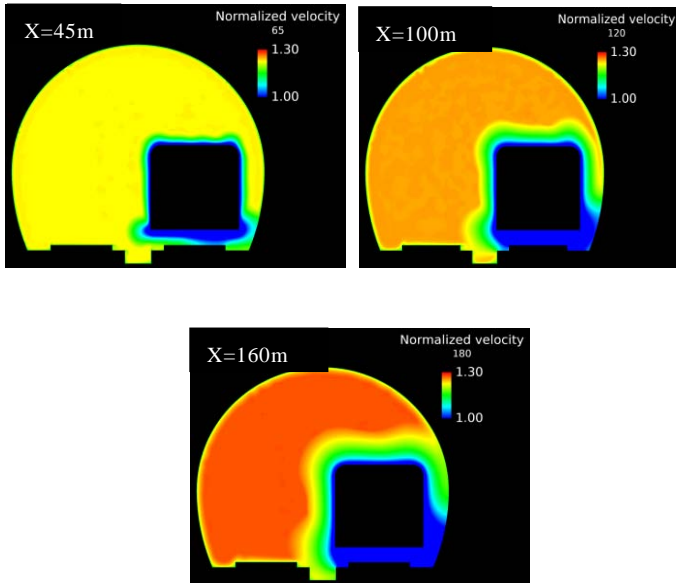


図2 断面内における流速分布 ( $k_s = 0.01\text{m}$ )

図2に車両底面の粗度高さ  $k_s$  を  $0.01\text{m}$  とした条件における  $X=45$  (前位側パンタ位置),  $100$ ,  $160\text{m}$  (後位側パンタ位置)でのトンネル断面内の  $X$  方向流速分布を示す。流速は列車走行速度で無次元化した。車両後尾に近づくにつれて車両周りに境界層が発達し、低速の領域が広がっている。特に表面粗さを与えた車両底面下方の流速低下が早く、その後トンネル壁面と車両側面とで挟まれた領域にも低速の領域が広がっていることが分かる。また車両周りに低速の領域が広がるにつれて、境界層外側の流速が増加することも見て取れる。

図3に車両中央 ( $X=45, 160\text{m}$ ,  $Z=2.15\text{m}$ ) における  $X$  方向流速の  $Y$  方向分布を示す。縦軸の  $0$  は車両屋根高さに相当する。 $X=160\text{m}$  の流速分布を  $X=45\text{m}$  と比較すると境界層厚さが増し、境界層の排除効果により境界層外側の流速が増大している。

## 2.2 碓子オオイの影響

本節で用いた碓子オオイの形状は、高さ  $0.5\text{m}$ 、横幅  $2\text{m}$  のバスタブ形である。碓子オオイは  $X=45\text{m}$  および  $X=160\text{m}$  に2個設置し、二面側壁は省略した。計算条件は計算領域入口の境界条件を除いて全て2.1節と同じである。なお車両底面の粗度

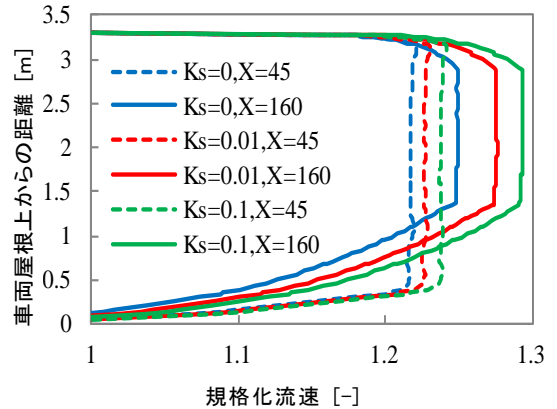


図3 車両中央における  $Y$  方向の流速分布

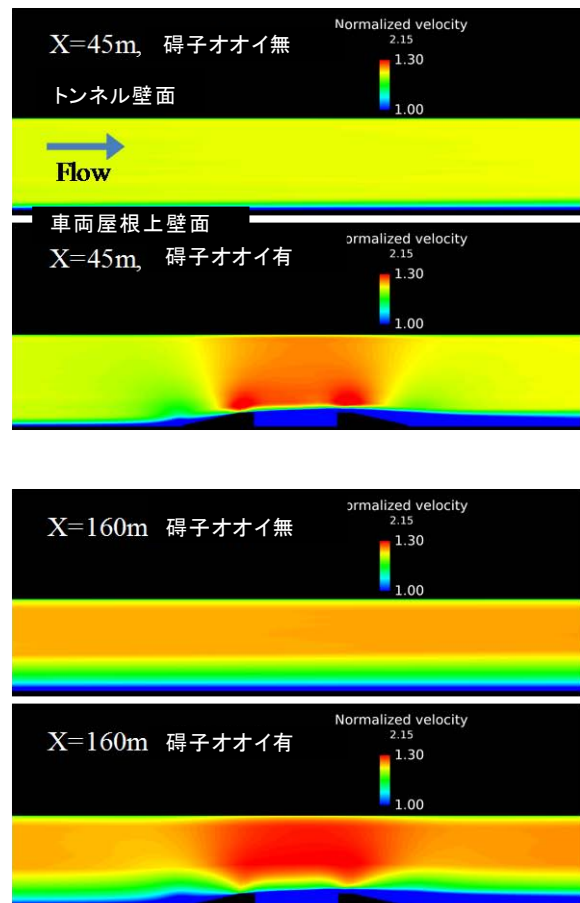


図4  $X$  方向流速分布の比較

高さ  $k_s$  は 0m とした。総格子数は碍子オオイが無い条件で約 680 万、碍子オオイがある条件で約 890 万である。図 4 に車両中央断面 ( $Z=2.15\text{m}$ ) における碍子オオイ周辺の  $X$  方向流速分布を示す。比較のため碍子オオイを設置しなかった条件も示している。碍子オオイにより流れが跳ね上げられるとともに、管路が縮小されるため、碍子オオイ上方で流速が増加していることが分かる。図 5 に車両断面中央 ( $Z=2.15\text{m}$ ) における  $X$  方向流速の  $Y$  方向分布を示す。図 5 より、前位側 ( $X=45\text{m}$ )、後位側 ( $X=160\text{m}$ ) ともに碍子オオイにより碍子オオイ上方で流速が増加していることが分かる。しかしながら、前位側と後位側では碍子オオイに当たる気流の境界層厚さが異なるため、流速分布に違いが見られる。

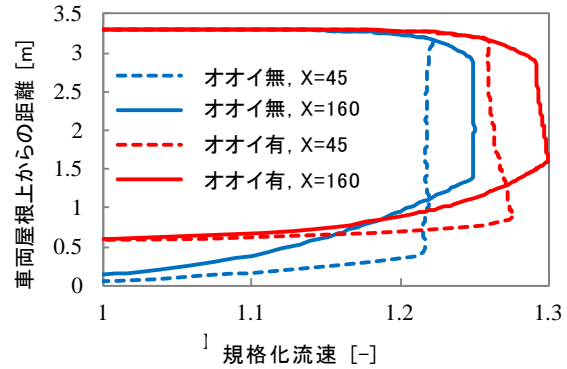


図 5 車両屋根上の  $Y$  方向の流速分布 ( $X=45, 160\text{m}$ )

### 3. 簡易計算法

2章では三次元数値流体解析結果を示した。三次元数値流体解析は、車両やトンネルの詳細な形状を考慮し、乱流の影響も計算に取り入れることができる。しかし、三次元数値流体解析は、専用のソフトと大型の計算機を必要とし、現場で簡易に車両屋根上流速を検討する状況にはない。そこで、特別な計算機やソフトを必要としない簡易な計算法を検討する。ここでは、車両屋根上流れを2つの境界層で近似する Earnshaw の方法<sup>6)</sup>を採用する。

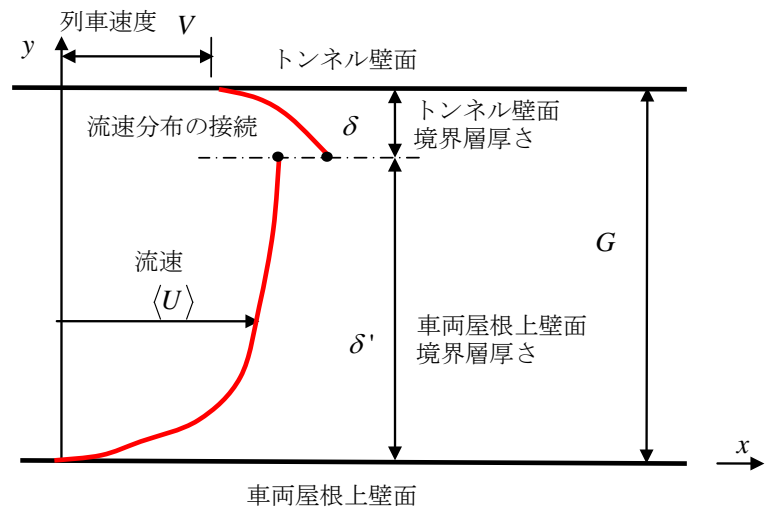


図 6 二重円管内における流速分布

座標系を車両固定座標系とする。主流方向 (車両進行方向と逆方向) を  $x$ 、車両屋根上壁面からトンネル天井壁面に向かう方向を  $y$  とする。トンネル内を走行する車両のモデルとして、トンネルと車両の双方を円管とし、2つの円管の中心軸は同一とする。2つの円管の間の流れ (annular flow) を計算対象とし、車両屋根上壁面からの境界層厚さ  $\delta'$  と、トンネル壁面からの境界層厚さ  $\delta$  を適切に仮定し、流速分布が連続となるように繰り返し計算をする (図 6)。圧力勾配は、山本が提案している定常流れモデル<sup>7)</sup>を用いる。ただし、流速分布から得られる空間断面平均流速が保存するように圧力勾配を  $\alpha$  倍する。

簡易計算法による計算結果の妥当性を検討するため、列車速度 300km/h の新幹線車両を対象に計算を実施した。圧力勾配係数  $\alpha$  は  $\alpha=2.0$  とした。結果を図 7 に示す。図 7 は車両屋根上流速の鉛直方向分布を示している。図 7 にはまた、比較のため三次元数値流体解析の結果 (CFD 結果) も示している。図 7 を見ると、簡易計算法で求めた車両屋根上流速の鉛直方向分布は CFD 結果を全体的に良く再現していることが分かる。しかし、簡易計算法で求めた車両屋根上流速分布と CFD 結果を比較すると、簡易計算法で求めた車両屋根上流速分布の値がやや小さい。

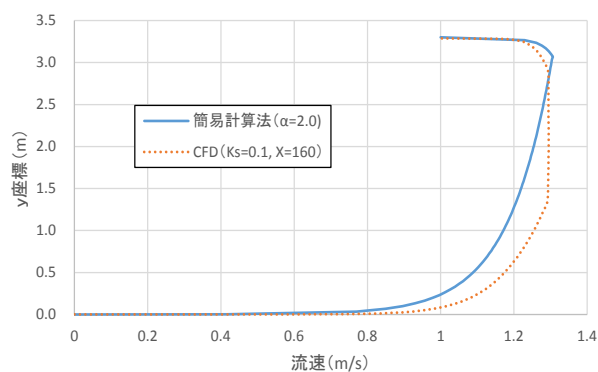


図 7 簡易計算法結果と CFD 結果の比較  
(列車速度 300km/h トンネル L=1822m)

#### 4. まとめ

本研究では、トンネル内を走行する車両屋根上流速に対する境界層の影響や碍子オオイの影響を検討するため、三次元数値流体解析を実施した。また、パソコンで簡易に計算可能な計算法を提案した。本研究で実施した計算例はまだ少数であり、今後はさらに計算例を増やしていく必要がある。

#### 参考文献

- 1) 池田充, 集電性能をめぐる研究の動向, 鉄道車両と技術, No. 200, pp. 2-8, 20138
- 2) 光用剛, 常本瑞樹, トンネル内高速走行時の架線とパンタグラフ周りの風速を測る, RRR, Vol. 72, No. 9, pp. 24-27, 2015
- 3) 梶山博司, 飯田雅宣, 前田達夫, 大深度地下鉄道の空気流動シミュレーション, 鉄道総研報告, Vol. 7, No. 7, pp. 51-58, 1993
- 4) 池田充, 光用剛, 山下義隆, 列車走行時のパンタグラフまわりの風向・風速特性, 鉄道総研報告, Vol. 25, No. 6, pp. 11-16, 2011
- 5) 野口雄平, 菊地勝浩, 中出孝次, 眞下伸也, トンネル内を走行する鉄道車両の屋根上流れの基礎解析, 日本機械学会2015年度年次大会講演論文集, G1800204, 2015
- 6) P. B. Earnshaw, On the aerodynamic resistance to long trains passing through long close-fitting tunnels, Royal Aircraft Establishment, Technical Report 70199, pp. 1-56, 1970
- 7) 山本彬也, 新幹線トンネルの圧力変動・空気抵抗・トンネル換気, 鉄道技術研究報告, No. 871, pp. 60-74, 1973