

## トンネル内を走行する車両屋根上流速の解析

菊地 勝浩\*      野口 雄平\*  
 中出 孝次\*\*      眞下 伸也\*\*\*

## Analysis of Flow over Roof of Train Running in a Tunnel

Katsuhiro KIKUCHI      Yuhei NOGUCHI  
 Koji NAKADE      Shinya MASHIMO

A pantograph mounted on a high speed train roof is exposed to high-speed air flow while traveling and lift is generated at the pantograph. In order to ensure high current collecting performance of the pantograph, it is important to adjust properly the lift generated at the pantograph. Velocity of a flow over a train roof has a great influence on the lift. Although the velocity of the flow at the pantograph head position in a tunnel is estimated to be approximately 1.2 times as large as the train running speed by a one-dimensional pressure fluctuation analysis, the velocity of the flow measured by an on-track test is larger than that predicted by the one-dimensional pressure fluctuation analysis. In this paper, in order to investigate the causes of this difference, we carried out a three-dimensional computational fluid analysis of the flow over train roof running in a tunnel. As the causes of the difference, we studied an effect of a boundary layer that develops on train body and tunnel surfaces and that of pantograph shields. We also proposed a simple calculation method to calculate the flow velocity over the roof of the train running in the tunnel using a personal computer.

キーワード：車両屋根上流速，トンネル，パンタグラフ，三次元数値流体解析，簡易計算法

## 1. はじめに

鉄道車両の屋根上には、地上設備である架線から電力を受給するため、パンタグラフが搭載されている。高速車両においては、パンタグラフは高速の気流を受け、揚力が発生する。高速で走行する車両が高い集電性能を有するためには、パンタグラフ舟体に発生する揚力が安定している必要がある<sup>1)~5)</sup>。パンタグラフは常に上下運動し、またすり板材の摩耗による形状変更や走行条件（トンネル通過など）による迎角変化がある。これらの変化が、なるべく舟体の揚力に影響しないように、特定の位置で大きな離れを起こすような鈍頭形状が、舟体に採用されている。

高速車両がトンネル内を走行すると、パンタグラフに対する流速は、明かり区間における流速と比較して大きくなる。一般に、パンタグラフに対する流速が増加すると、パンタグラフが架線を押上げる力（揚力）が増加する。舟体に作用する揚力は、舟体に対する流速の2乗に比例するので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ーである。しかしながら、これまでの

現車試験結果から得られた知見だけでは、さまざまな車両条件やトンネル条件に対して、トンネル走行時に舟体に対する流速を精度良く予測することは困難である。

一方、既存のトンネル内一次元圧力変動シミュレーション<sup>6)</sup>は、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が、実測結果と比較すると、トンネル走行時における舟体に対する流速を過小評価しており、差異がある。この理由として、トンネル断面内の流速分布を考慮していないことや、トンネル内における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。

そこで本研究の前半では、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 (Reynolds Averaged Navier-Stokes Simulation) 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。一方、三次元数値流体解析はトンネル断面全体の流速分布を捉えることが可能であるが、計算の実施には専用のソフトと大型の計算機を必要とし、机上で簡易に屋根上流速を検討する際に利用できる状況にはない。そこで本研究の後半では、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。

\* 環境工学研究部 車両空力特性研究室

\*\* 鉄道力学研究部 計算力学研究室

\*\*\* 西日本旅客鉄道株式会社 車両部 車両設計室

## 2. トンネル内を走行する車両屋根上の流速分布の概要

ここでは、本研究の対象としているトンネル内を走行する車両屋根上の流速分布について、実測結果と流れ場の概要を述べる。

車両屋根上に搭載されているパンタグラフ近傍の流れ場を把握するため、パンタグラフの舟体に三孔管を内蔵し、舟体そのものを風向・風速センサーとして用いる測定法が開発されている<sup>7)</sup>。その測定法を用いた実測結果によると、明かり区間では舟体に対する流速は列車速度とほぼ等しいが、トンネル区間では舟体に対する流速は平均的には列車速度の1.2～1.3倍に増加し、また一部条件では列車速度に対して最大で1.6倍程度まで増加することが確認されている。トンネル内走行時の舟体に対する流速の一次元圧力変動シミュレーション結果と実測結果を比較したものを図1に示す。図1を見ると、舟体に対する流速がどのように変化するか、といった定性的な振る舞いについては、実測結果と一次元圧力変動シミュレーション結果の傾向はほぼ一致している。しかし、一次元圧力変動シミュレーションでは、トンネル内の流れを1次元流として取り扱っているため、トンネル内断面における流速分布が一様である（空間断面平均流速）と仮定されており、舟体に対する流速の値に対して車両屋根上壁面やトンネル壁面に発達する境界層の影響が考慮されていない。そのため、境界層の排除効果による流速の増速効果が過小評価される（流速の参照点境界層内にある場合は、参照点の流速が空間断面平均流速より遅くなるため、逆に過大評価となる）。さらに、車両断面形状・トンネル断面形状の影響等についても考慮されていない。これらの要因により、一次元圧力変動シミュレーションによる舟体に対する流速の計算結果は実測値より小さくなったものと推測される。

トンネル走行時の車両座標系から見た車両屋根上流速の概念図を図2に示す。車両座標系から見ると、車両屋根上壁面の流速は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流速は $V$ となる。車両屋根上壁面とトンネル壁面に囲まれた部分の断面内における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、連続の式から概ね $V/(1-R)$ となる。車両屋根上壁面とトンネル壁面に囲まれた部分の流れは、車両屋根上壁面およびトンネル壁面に発達する境界層の影響により図2に示したような分布になる。そして舟体位置における流速は、舟体が境界層の外にある場合、空間断面平均流速より大きな値になる。

## 3. 三次元数値流体解析<sup>8)</sup>

本章では、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 (Reynolds Averaged

Navier-Stokes Simulation) による三次元数値流体解析を行うことにより、車体表面および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。

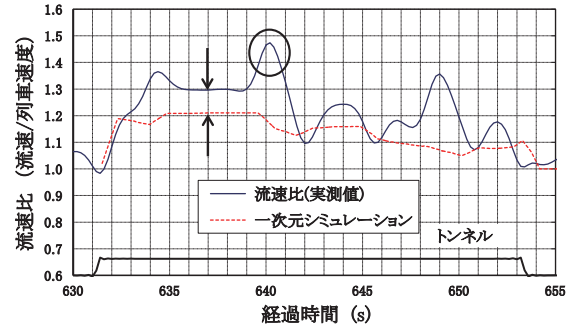


図1 トンネル内走行時の舟体に対する流速の一次元シミュレーション結果と実測の比較 (列車速度 300km/h, Tトンネル (L=1822m))

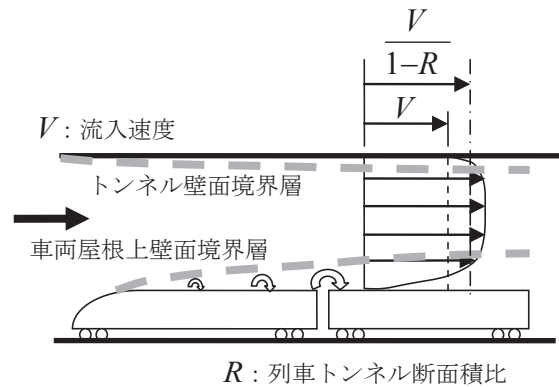


図2 トンネル内走行時の車上座標系から見た車両屋根上流速の概念図

### 3.1 境界層の影響

#### 3.1.1 解析手法

本章で用いた解析モデルの断面図を図3に示す。車両の長さは204.7mであり、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。この車両モデルでは、台車、車間、パンタグラフを省略している。車両の横幅は3.36m、高さは3.22m、車両断面積は10.75m<sup>2</sup>であり、トンネル断面積は63.4m<sup>2</sup>である。トンネル中央から車両中央までの距離は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 (Rail levelに相当)、 $Z$ はトンネル中央である。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。計算領域の $X$ 方向長さは295.2mであり、計算領

域入口から車両先頭までは20m、計算領域出口から車両後尾までは70.5mである。物体表面における第一格子点の法線方向高さは車両側で0.001m、トンネル側で0.004mとした。物体表面から第一格子点までの無次元距離 $y^+$ は100程度となる。車両長手方向の格子間隔は、0.1mから1.0mとした。車両およびトンネル周方向の平均格子間隔は、それぞれ0.04m、0.05mである。総格子数は約1100万である。なお物体表面の速度境界条件には標準壁関数を用いた<sup>9)</sup>。車両底面を除く車両表面およびトンネル壁面は粗さ高さ $K_s$ を0mとした。また、車両床下の流れは台車や台車が収まるキャビティの影響を強く受け、車両床下流速は、車両固定座標系から見て列車走行速度の半分程度となることが分かっている<sup>10) 11)</sup>。この状況を簡便に模擬するために本章では車両底面の粗さ高さ $K_s$ を0.01mおよび0.1mに設定して解析を行った。

基礎式は非圧縮性流体に対するナビエーストークスの式である。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。本研究では解析ツールとしてANSYS Fluent 15.0.7を使用した。

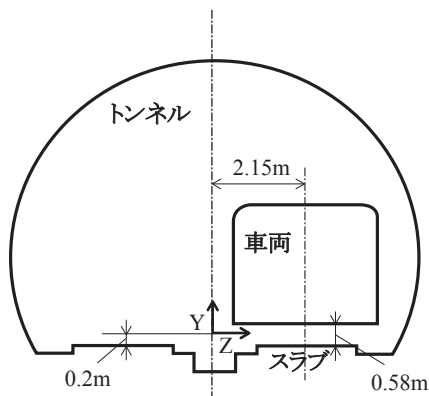


図3 計算モデルの断面図

### 3.1.2 解析結果

図4に車両底面の粗さ高さ $K_s$ を0.01mとした条件における $X=45$ （前位側パンタ位置）、100、160m（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規格化した。車両後尾に近づくにつれて車両周りに境界層が発達し、低速の領域が車両周りに広がっている。特に表面粗さを与えた車両底面下方の流速低下が著しく、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5に車両床下（ $Y=0\text{m}$ 、 $Z=2.15\text{m}$ ）における $X$ 方向流速の $X$ 方向分布を示す。比較のため、車両底面の粗さ高さ $K_s$ を0.01m、0.1mにした結果に加えて0mとした結果も示している。 $X=0\text{m}$ において流路が縮小するため列車速度で規格化した規格化流速は1.2に増加する。車両底面に

表面粗さを与えなかった場合には車両後尾に近付いても床下流速があまり低下しないのに対して、車両底面に表面粗さを与えた条件では床下流速が大きく低下していることが確認できる。図6に車両屋根上の車両中央（ $X=45$ 、160m、 $Z=2.15\text{m}$ ）における $X$ 方向流速の $Y$ 方向分布を示す。グラフ横軸が規格化流速であり、縦軸の0は車両屋根高さに当たる。 $X=160\text{m}$ 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。また同じ $X$ 座標であれば、車両底面の粗さ高さによらず、車両屋根上の境界層厚さは同程度である。しかしながら図5に示したように車両底面の粗さ高さにより床下流速が大きく異なるため、車両底面の粗さ高さを0.01m、0.1mにした条件では、粗さ高さ0mと比較して床下から排除された流体により境界層外側の流速が増大している。

規格化された断面平均流速は列車トンネル断面積比から1.20となる。それに対し車両中央（ $Z=2.15\text{m}$ ）におけるパンタグラフ標準作用高さ（車両屋根から1.4m）での $X$ 方向流速は、車両底面粗さ高さ $K_s$ が0mの場合に、 $X=45\text{m}$ で1.22、 $X=160\text{m}$ で1.25、 $K_s$ が0.01mの場合に、 $X=45\text{m}$ で1.23、 $X=160\text{m}$ で1.27、 $K_s$ が0.1mの場合に、 $X=45\text{m}$ で1.24、 $X=160\text{m}$ で1.29となり、車両底面の粗さ高さが大きいほど流速が増加した。

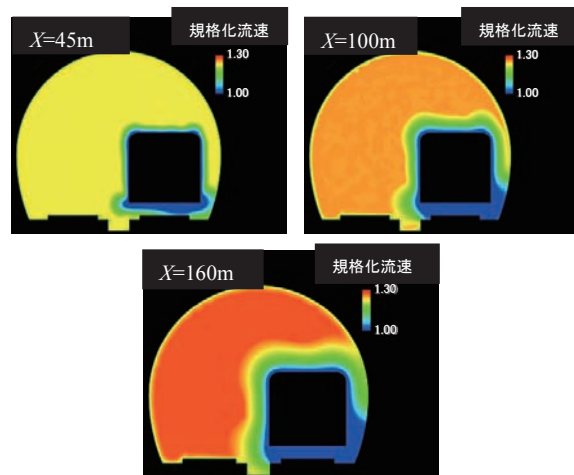


図4 断面内における流速分布（ $K_s = 0.01\text{m}$ ）

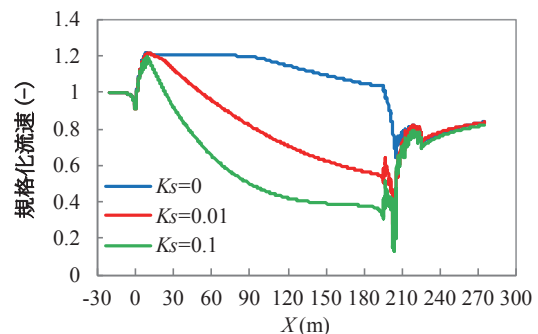


図5 車両床下の $X$ 方向の流速分布

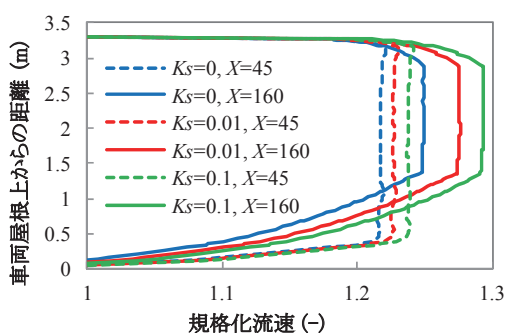


図6 車両屋根上のY方向の流速分布

### 3.2 碍子オオイの影響

#### 3.2.1 解析方法

本節で用いた碍子オオイの形状を図7に示す。高さ0.5m、横幅2mのバスタブ形である。車両およびトンネルの断面形状は図3に示したものと同一である。計算領域のX方向長さは210mであり、本節における車両には先頭部および後尾部は付いていない。そのため先頭部の影響を加味するために、3.1節で得られた計算結果からX=20mにおける流速、乱流エネルギー、エネルギー散逸率を抽出し、計算領域入口の境界条件として与えた。従って本節では計算領域入口がX=20mとなり、計算領域の長さが210mなので計算領域出口はX=230mとなる。Y座標、Z座標の定義は3.1節と同じである。なお碍子オオイが無い条件において本節で得られた計算結果と、3.1節で得られた計算結果は、後尾部の影響が見られないX=180m程度まで一致することを確認している。碍子オオイはX=45mおよびX=160m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3.1節と同じである。なお車両底面の粗さ高さ $K_s$ 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。

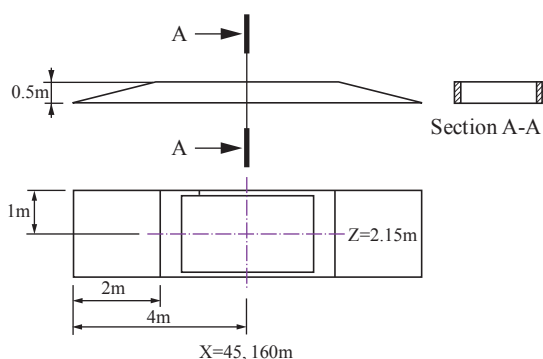


図7 碍子オオイの形状

#### 3.2.2 解析結果

図8に車両中央断面(Z=2.15m)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9、図10に車両中央(Z=2.15m)におけるX方向流速のY方向分布を示す。図9は碍子オオイ中央より10m上流の地点(X=35, 150m)、図10は碍子オオイがある地点(X=45, 160m)の流速分布である。図9より碍子オオイの設置の有無で流速分布に大きな違いは見られない。このことから車両中央では下流に碍子オオイがある場合でも、十分に碍子オオイから離れた地点の流速分布は碍子オオイの影響をほとんど受けないと考えられる。図10より、前位側(X=45m)、後位側(X=160m)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。前位側では屋根上0.9mで流速の最大値をとるのに対して、後位側では屋根上1.6mで流速の最大値をとる。

車両中央におけるパンタグラフ標準作用高さ(車両屋根から1.4m)での規格化されたX方向流速を比較すると、碍子オオイが無い場合にはX=45mで1.22、X=160mで1.25となった。それに対して碍子オオイがある場合にはX=45mで1.27、X=160mで1.28となった。

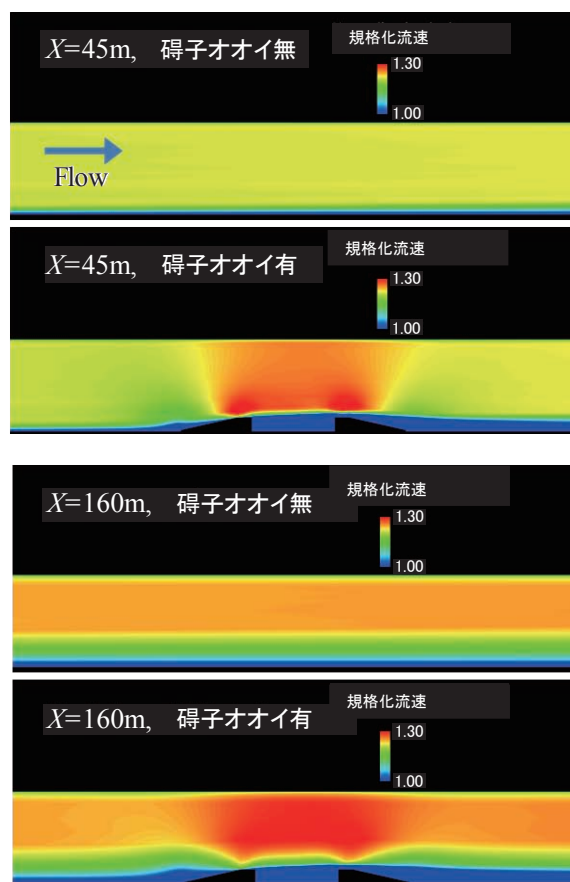


図8 X方向流速分布の比較

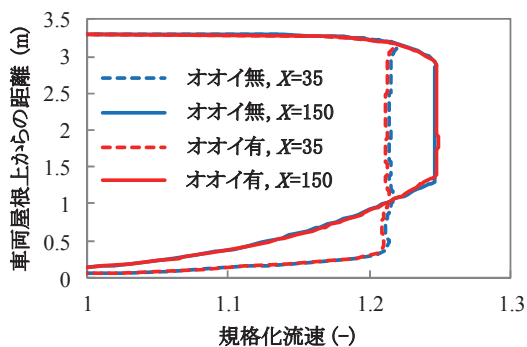


図9 車両屋根上のY方向流速分布 (X=35, 150m)

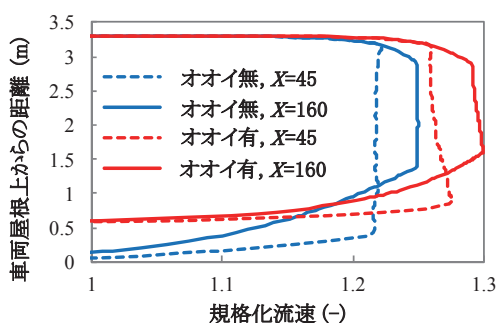


図10 車両屋根上のY方向流速分布 (X=45, 160m)

#### 4. 簡易計算法

3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、その結果は、現車試験の状況をほぼ再現している。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する。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>12)</sup>を採用する。

##### 4.1 計算モデル

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。ただし、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する。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) を計算対象とする。2つの円管間の距離を  $G$  とし、車両屋根上壁面からの境界層厚さを  $\delta'$ 、トンネル壁面からの境界層厚さを  $\delta$  とする (図11)。簡易計算法の概略の手順は、直径がそれぞれ、 $2\delta$ 、 $2\delta'$  である2つの円管を考え (図12)、それぞれの円管に対して境界層内の流速分布を求め、各円管内の中心位置における速度が一致するように、 $\delta + \delta' = G$  を満たしながら  $\delta'$  を変化させ、繰り返し計算を行うものである。圧力勾配は、山本が提案している定常流れモデル<sup>13)</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

速が保存されるように圧力勾配を  $a$  倍する ( $a$  を圧力勾配係数と呼ぶ)。

平均粗度高さ  $k_s$  を考慮した2つの円管間の平均流速の鉛直方向 ( $y$  方向) の分布は、

$$\langle U \rangle = u_\tau \left( \frac{1}{\kappa} \ln \frac{y}{k_s} + C \right) \quad (1)$$

と表される<sup>14)</sup>。ここで、 $\kappa$  はカルマン定数、 $C$  は  $u_\tau k / \nu$  に依存する付加定数、 $k_s$  は平均粗度高さ、 $\nu$  は動粘性係数、 $u_\tau$  は摩擦速度である。式(1)を計算する際には、平均粗度高さ  $k_s$  と付加定数  $C$  が必要になる。本研究では、水力的摩擦係数  $\lambda$  が既知として、Nikuradse の粗管の実験公式<sup>15)</sup> から平均粗度高さ と付加定数を求める。

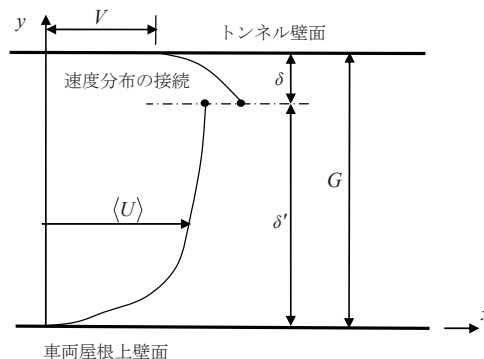


図11 円管間における流速分布

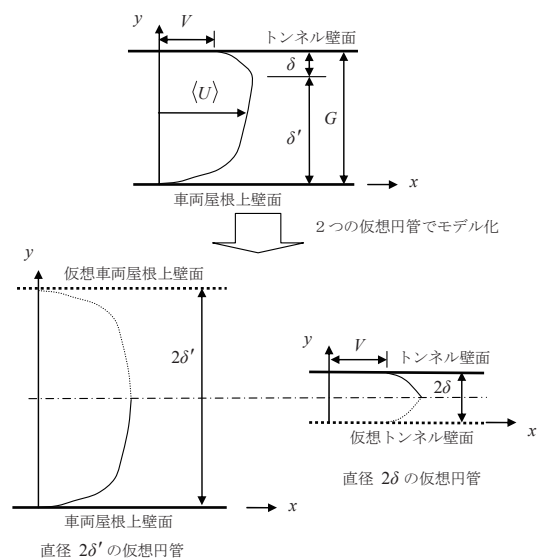


図12 2つの仮想円管によるモデル化

##### 4.2 計算結果

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。圧力勾配係数は  $a=2.0$  とした。結果を図13に示す。図13は車両屋根上流速の鉛直方向分布を示している。図13にはまた、比較のため三次元数値流体解析の結果 (以下、CFD 結果と呼ぶ) も示している。図13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の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で求めた車両屋根上流速分布とを比較すると、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。これは、簡易計算法では、車両屋根上流れを十分に発達した乱流流れ場と仮定しているのに対して、CFDで平均流速分布を求めた位置（車両先頭部から主流方向に160 m下流）でも、十分に発達した乱流流れ場になっていないためである。十分に発達した乱流流れ場になっていれば、流れ場全体を対数則で表すことができるが、図13のCFDで求めた流速分布では対数分布から外れた領域（図13では一定の分布になっている）が存在しており、簡易計算法の仮定が成り立っていないためである。

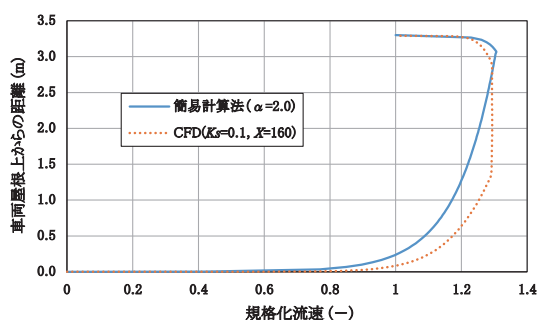


図13 簡易計算法結果とCFD結果の比較  
(列車速度300km/h, Tトンネル(L=1822m))

## 5. おわりに

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、パソコンで解析できる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。また、列車がトンネルに突入する際に発生する圧力波のトンネル内を走行する車両屋根上流速に対する影響は大きい（例えば、図1の丸印の部分）。そのため、模型実験等を通じて、圧力波が通過する際の車両屋根上流速に対する影響を把握する研究が今後必要である。

## 文献

- 1) 眞鍋克士, 架線・パンタグラフ系の高速性能, 日本機械学会(C編), Vol. 54, No. 504, pp. 1843-1851, 1988
- 2) 鈴木昌弘, パンタグラフの空力最適化, 日本機械学会2003年度年次大会講演論文集(II), pp. 325-326, 2003
- 3) 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, 2013
- 4) M. Flueckiger, P. Reinke, S. Nyfeler, W. Kapfenberger, Contact force disturbances of the pantograph system due to air flow at high-speed trains in tunnels, ISAVFT 15, BHR Group, pp. 763-776, 2013.
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 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
- 9) ANSYS Inc., ANSYS Fluent ユーザーズガイド, pp. 281-291, 2012.
- 10) 井門敦志, 車上側および地上側からの計測による車両床下流れの評価, 鉄道総研報告, Vol. 23, No. 7, pp. 39-44, 2009
- 11) 岩崎誠, 井門敦志, 山崎展博, 宇田東樹, 若林雄介, 新幹線車両の床下流れの特性, 鉄道総研報告, Vol. 29, No. 5, pp. 11-16, 2015
- 12) 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.
- 13) 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
- 14) S. B. Pope, Turbulent Flows, Cambridge University Press, pp. 264-332, 2000.
- 15) Nikuradse, Law of flow in rough pipes, NACA TM 1292 (Translation of "Strömungsgesetze in rauhen Röhren." 1933), pp. 1-62, 1950.