

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

井門 敦志*

Measurement of Under-floor Air Flow on Board the Train and on the Ground

Atsushi IDO

Complex air flows arise between the underside of trains and the track because of the interaction between them. These flows may cause the phenomena of ballast flying, snow-accretion to the underside of the cars, aerodynamic drag, noise, etc. In order to clarify the under-floor air flow, the velocity profiles of the air flow beneath the cars were measured in field tests. The velocity profiles were obtained on board the train and on the ground. It was confirmed that smoothing the underside of the cars reduce the velocity of the air flow near the ground surface.

キーワード：床下流れ，現車試験，バラスト飛散，着雪，流速測定

1. はじめに

車両の走行により誘起される車両床下の空気の流れは、バラスト飛散¹⁾、車両床下への着雪²⁾、空気抵抗³⁾、車両床下騒音等様々な問題の原因となっている。これらの問題の解決のためには、車両が誘起する床下の流れを明らかにすることが重要である。現車試験においては車両限界および建築限界があるため、車両側もしくは地上側からの測定のみで、車両の床下全体の流れを測定することは非常に困難である。また、これまでの地上側での流速測定は、バラスト飛散に注目したため、主に地表面近くの流速測定が行われてきた。本研究では、現車試験における車上側および地上側からの高さ方向の流速分布の計測により、車両床下の全体の流れの様子を明らかにした。

2. 車上側・地上側での流れの測定

列車が進行することにより、車両床下に流れが誘起されるが、観測者の座標系により流れが異なる(図1)。車上側から見ると、車両が静止し空気と地面が移動する。地上側から見ると、空気と地面が静止し車両が移動する。そのため、測定位置(車上側あるいは地上側)により、測定される流速が異なる。

3. 車上側での流れの測定

3.1 車上側での流れの測定方法

新幹線車両の車両床下の流れを把握するために、車上

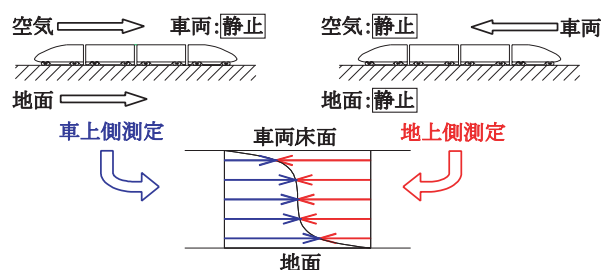


図1 車上側・地上側での流れの測定

で、車両床下の流速を1998年度に測定した。流速測定位置を図2に示す。車両床下の流れを測定した新幹線車両は8両編成で、2, 4, 6号車の車両床下に楕円ピトー管を取付け、おのこの床下の流速を測定した。楕円ピトー管での測定高さ(底面からの離れ)は、40,70,100mmである。現車の床下は、床下の塞ぎ板により平滑化されているとはいえ、床下機器の種類により、取付けボルトや強度確保のための凹凸など、塞ぎ板の形状が微妙に異なるが、今回測定した各車両の前位台車後方から測定位置までの床下形状は、細かな凹凸を含めて同じ形状である。楕円ピトー管は、車両底面への取付けの関係から、車両の幅方向の中心から250mm山側(1号車を先頭に走行する場合、進行方向に向かい右側)にずらした位置に設置した。楕円ピトー管からの総圧と静圧を導圧管(20cm)を介して差圧計(三計エンジニアリング社製:DP8-500)に導き、車両に対する流れの動圧を計測した。差圧計の出力をアンプ(三計エンジニアリング社製:M-0101)で増幅し、DATデータレコーダ(ティアック社製:RD-135T)に記録した。現車試験は、2つの駅間の往復により行い、下り走行時のデータを取得した。

* 環境工学研究部(空気力学)

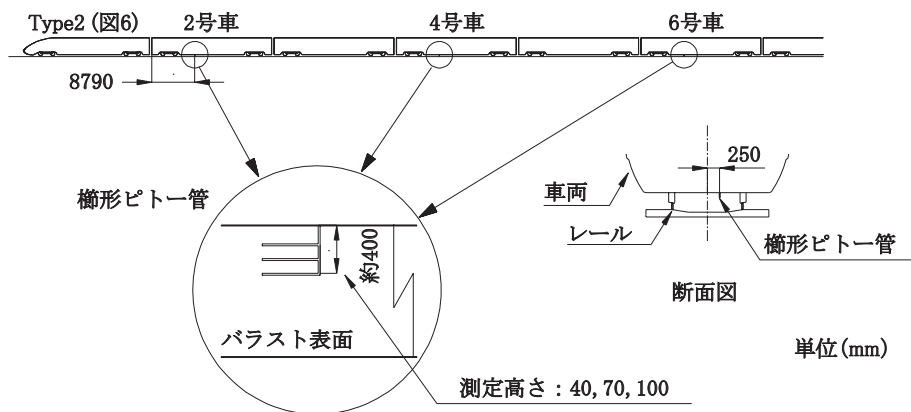


図2 現車試験における車両床下流速測定位置

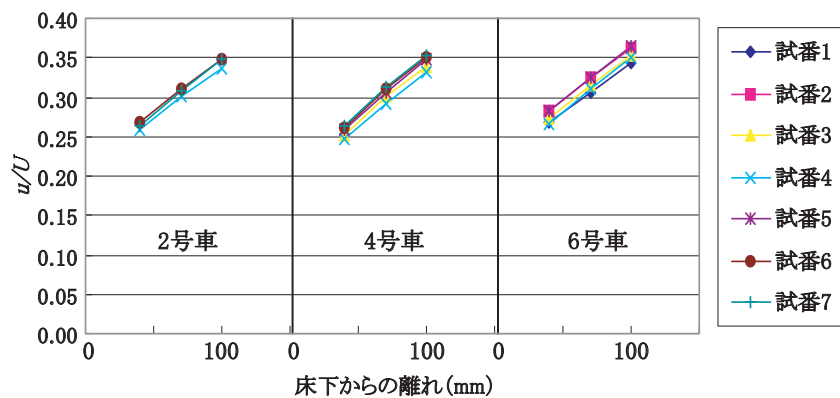


図3 車両床下流速分布（現車試験）

3.2 実験結果および考察

現車における車両床下流速分布は、トンネルや軌道等の地上側の要因にも影響されると考えられる。このような地上側の条件を統一するために、同一区間のデータをA/D変換（システムデザインサービス社製：DASBOX Model-12/512）し、解析した。その区間は、アップダウンの無い直線の明かり区間（トンネルの無い区間）で、軌道面にはバラスト（砂利）がしかれている。車上側で測定される流速 u (m/s) は、その区間の動圧の時間平均値（測定時間20秒）から求めた。データ解析区間の列車速度 U (m/s) の平均値で、流速を無次元化した。なお、その区間の列車速度は270km/h～289km/hである。

図3に実験結果を示す。走行は7回実施した。車両床下にはブローの吹き出し口があり、ブローが作動している場合には、その影響を受けるので、時系列データを確認し、ブローの影響を受けた試番は削除した。ばらつきがあるものの2,4,6号車の流速分布はほぼ一致している。車両床下の流れは乱流クエット流れになっていると考えられるが、中林らの乱流クエット流れについての実験⁴⁾によれば、測定位置が流路の先端から高さの60倍程度まで下流にゆけば乱流クエット流れが十分発達し、平均流速分布および変動速度の実効値が一定値に達することが報告されている。車両底面と道床面との距離は約0.4mで

あるので、先頭車両後端（25m）では車両床下の乱流クエット流れが十分発達していると考えられることから、2号車以降の台車に挟まれた部位での車両床下流れは十分発達した乱流クエット流れとなり、編成の中での号車位置によらずほぼ同じであると推定される。

4. 地上側での流れの測定

新幹線車両が通過する際に誘起される流れを地上側で測定し、車両床下形状が流れに与える影響を評価した。これまでの試験で用いられてきた熱線流速計では、応答性が低い（最大10Hz程度）ため車両形状の影響を十分捕らえていない可能性があった。例えば、時速300km/hで走行する新幹線では、0.1秒間に8.3m進むことになり、台車の長さが2.5mであることを考えれば、車両床下形状の影響を評価する場合には熱線流速計の応答性は十分とは言えない。そこで、本試験では、従来の熱線流速計の測定に加えて、10kHz以上の高い応答性を持つ熱線流速計を用いた流速測定を実施した。以下では、従来の熱線流速計を「簡易型熱線流速計」、本試験で用いた高い応答性を持つ熱線流速計を「高応答型熱線流速計」と記す。高応答型熱線流速計は、環境の厳しいフィールド試験では破損したり、安定したデータが収録できないことも考え

られる。そこで、フィールド試験の実績のある風圧計を用いた動圧測定を併せて実施した。風圧計は、列車が誘起する列車進行方向の流れに垂直になるように配置した。風圧計の応答周波数は最大1kHzであり、高応答型熱線流速計には及ばないものの、時速300km/hで走行する新幹線が0.001秒間に進む距離は83mmとなり十分な応答性が得られる。

これまでの試験では、バラストの飛散に直結するバラスト表面付近の流速にのみ注目してきたが、本試験では、車両床下面とバラスト表面に挟まれた空間の流れを解明するために、楕形ピトー管を用いて高さ方向の流速分布も測定した。

4.1 地上側での流れの測定方法

4.1.1 計測機器

流速測定には複数の計測機器を用いるため、全ての機器を同一断面に設置することはできない。そこで、レール方向に離れた3つの断面(図4)に計測器のセンサー部を取り付けた。各種測定機器の設置位置関係を図4に示す。列車の通過を検知するために、レール底部に取り付けた歪みゲージから、車輪通過時に信号が出力され、この信号により各機器の同期をとった。図5に各種計測機器のマクラギ方向断面内の設置位置を示す。以下に測定に用いた測定機器の特徴を示す。

- (1) 高応答型熱線流速計：ダンテック社製の熱線流速計 StreamLine を用い、センサーには1次元のフィルム型プローブを用いた。風洞を用いた事前の校正時にセンサーの応答周波数が10kHz以上あることを確認したが、測定時には3kHzのローパスフィルターを用いていたため、応答周波数は最大3kHzとなる。高応答型熱線流速計は使用環境により影響を受ける。したがって、事前に校正した風洞の状態とフィールドでは環境が異なるため、高応答型熱線流速計の流速値は実際の流速から多少異なる可能性がある。
- (2) 風圧計：三計エンジニアリング社製の風圧計P310W-01Sを用いた。風圧計の応答周波数は1kHzである。風圧計の受圧面を流れ方向に直角に向けることにより流れの総圧を測定した。
- (3) 楕形ピトー管：楕形ピトー管は、6本の総圧管と総

圧管の1本(車両に近い側から2番目)に組み込んだ静圧管からなる。総圧管、静圧管からのチューブをバラストの中に埋め込んだ圧力計(上記と同じ風圧計P310W-01S)に接続し各々の圧力を測定した。総圧と静圧の差から動圧を求めることにより高さ方向の流速分布を求めた。

- (4) 簡易型熱線流速計：日本カノマックス社製のアネモマスター Model6141を用いた。

4.1.2 測定列車

図6に測定対象の車両の概形を示す。床下機器が平板

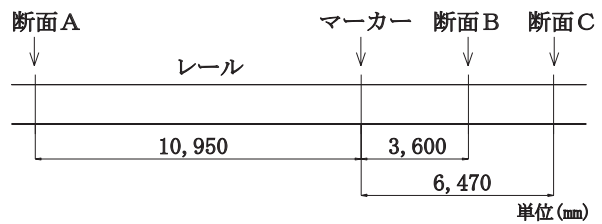


図4 レール方向の地上側流速測定位置

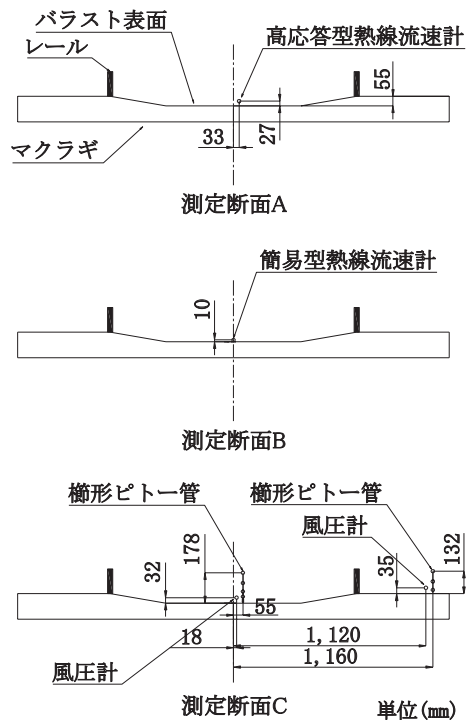


図5 地上側測定センサー位置

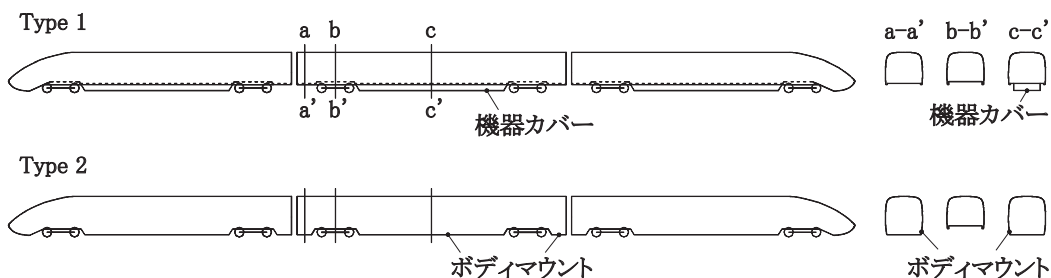


図6 車両形状の概形

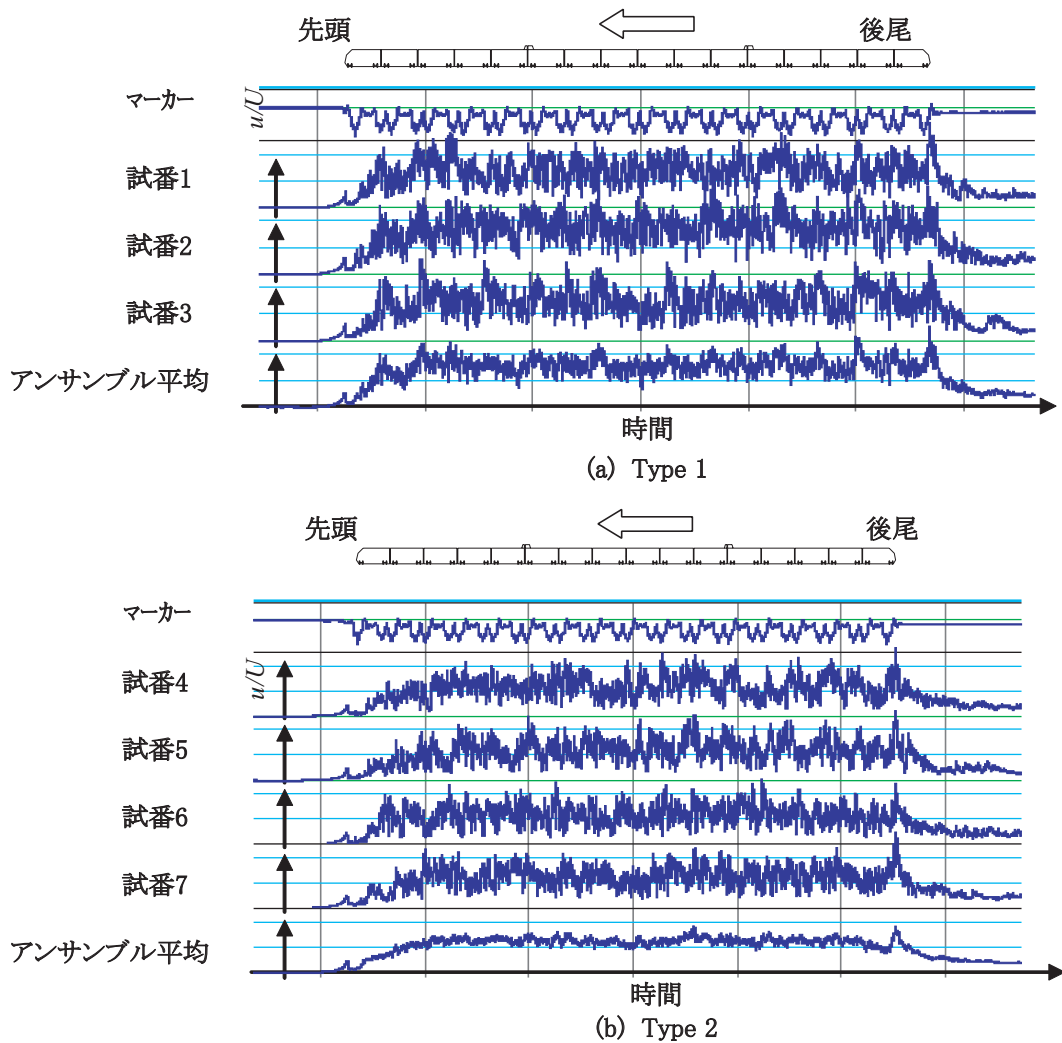


図7 列車通過時の地上側流速（高応答型熱線流速計）

の機器カバーで覆われている形状をType1、側カバーで覆われている形状（便宜的にボディマウント形状と記す）をType2とする。

4.2 データ解析方法

4.2.1 時系列データのアンサンブル平均化処理

図7に、Type1およびType2の高応答型熱線流速計による列車通過時の流速測定結果を示す。グラフには、マーカー、各試番での流速、アンサンブル平均（ここでは試番ごとのデータ）化された流速の時系列データが示されている。マーカーの信号の負のピークが台車通過時に対応する。車両長さ（先頭台車から後尾台車までの流れ）がわかっているので、マーカーから列車速度を求めることができる。現実には、各試番ごとに列車速度が異なるが、グラフに表示した時系列データは、以下で説明する標準化を行っている。図4、図5に示す通り、レール方向のマーカーの位置は、高応答型熱線流速計の位置と異なるが、レール方向の測定位置の違いによる時間軸

の修正を行う。

車両床下形状とバラスト表面流速との関係を調べるために、ここでは、同じ型式の車両で同程度の速度（速度差±数km/h程度）のデータを集めてアンサンブル平均化した。各試番の速度の平均値を標準速度とし、各試番の時系列データを標準速度に合うように、時間軸を伸縮させた。その後、マーカーにより基準時刻を合わせた上で、アンサンブル平均をとった。

以上の平均化により、以下の効果が期待できる。

- (1) 電気信号ノイズはランダムに発生すると考えられるので、信号を重ねることにより、ノイズが低減できると考えられる。
- (2) 車両床下の流れは非常に乱れており収録されたデータには様々な乱れ成分が含まれている。流れの変動が記録されていたとしても、その原因が、先頭部の通過時見られるように、車両形状に直接的に依存する流速の変動か、渦の通過による流速の変動かを区別することは難しい。渦の通過等による流れの変動

は、複数のデータの平均化処理により相殺され、車両の床下形状に直接起因する流れの変化だけが残り、車両床下形状がバラスト表面流れに直接与える影響を評価することができる。

4.2.2 ピトー管データの平均化処理

車両床下の流れは先頭車両および後尾車両の通過時を除き流速の変動が大きくないので、先頭・後尾車両の影響がない中間車両通過時のデータの時間平均値として高さ方向の流速分布求めた。

4.3 試験結果および考察

時系列データを示す際には、流速は列車速度、総圧は列車速度による動圧 ($=1/2 \rho U^2$, ρ :空気密度 (kg/m^3)) で無次元化した。

4.3.1 列車通過時の時系列データ

高応答型熱線流速計での測定結果 (図7) から、車両床下形状とバラスト表面流速の関係について考察する。バラスト表面の流速は、Type1, Type2ともに、2号車以降、ほぼ一定の流速となり列車通過後に一時的に流速が大きくなる。車上側の測定結果 (図3) からも2号車以降の台車に挟まれた部位での車両床下流れは編成中の位置に依らず、ほぼ同じであると考えられる。このことから、車両床下と地面の間の流れは、2号車以降では車両内の位置 (例えば、車間部、台車の無い床下部、台車部) による違いはあるが、編成中の位置によらずほぼ同じ流速分布であると推定される。また、測定を実施した床下形状の車両では、台車部や車間部等の車両側の局所的な形状の違いとバラスト表面流速の間には、はっきりとした相関は見られないことがわかる。

図8に高応答型熱線流速計、簡易型熱線流速計、風圧計のアンサンブル平均化処理をしたデータを示す。高応答型熱線流速計、簡易型熱線流速計のデータは、無次元化流速、風圧計のデータは圧力係数である。先頭・後尾部通過時には、列車通過に伴う圧力変動があるために風圧計の出力が大きな変動を示すがこれは流速とは無関係である。簡易型熱線流速計の時系列データは、高応答型熱線流速計および風圧計の時系列データと、同様の変化をとらえていることがわかる。

4.3.2 高さ方向の流速分布

高さ方向の流速分布を調べるために、軌間中央および軌間外 (図5) で楕形ピトー管による測定を行った。流速は先頭・後尾両車両の影響がない中間車両通過時のデータの時間平均値として求めた。通過時の列車速度で無次元化した流速を図9に示す。軌間中央では、Type1と比較して、ボディマウント化されたType2は、車両床下面とバラスト表面に挟まれた流れ全体が遅くなり、バラスト表面流速も遅くなることわかる。バラスト表面の時系列データからは、台車部や車間部等の車両床下の

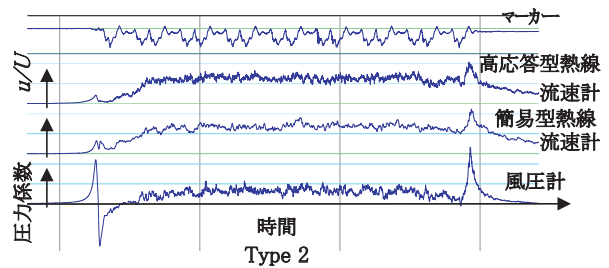


図8 計測機器による比較

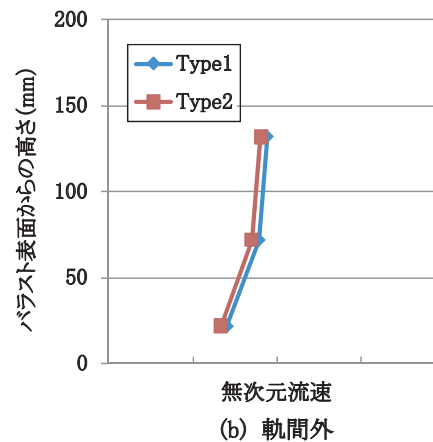
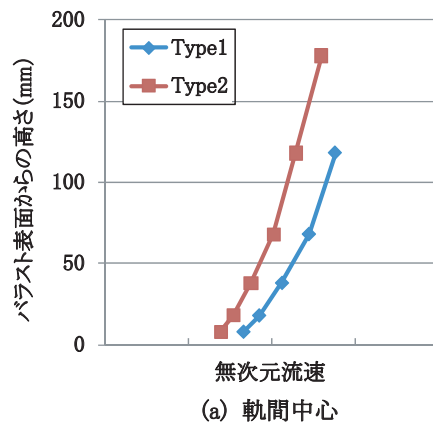


図9 高さ方向の無次元流速分布

凹凸のバラスト表面流速に対する直接的な影響は見られなかったが、Type2の流れは、Type1よりも遅くなることから、車両床下の凹凸は、車両床下と地面に挟まれた空間全体の流れに影響を及ぼすと推定される。また、軌間外でも、車両床下形状による流速差は軌間中央ほど大きくないが、軌間中央同様に、ボディマウント化されたType2の流速が遅くなる。

5. 車両床下と地面の間流速分布

車上側計測時の車両は、地上側計測時のType2の車両と同じ形状である。そこで、車上側の流速分布と地上側

特集：環境技術

の流速分布結果を合わせて、車両床面と地面の間の流速分布を図10に示す。車上側測定は幅方向位置は中央より山側に250mmシフトした位置、地上側は軌間中央である。車上側と地上側で得られる流速は正負が逆になるが(図1)、ここでは、地上側から見た流速として、両方の結果を示した。図10の縦軸は、地面と車両床面高さを基準とした無次元高さで、地面:0、車両床面:1.0である。横軸は列車速度を基準とした無次元流速で、1.0は、列車速度を示す。また、車上側の測定位置は車両の1箇所の時間平均値であるのに対し、地上側の測定結果は、流速が安定した部分の空間的(列車の中間部通過時)な平均値であることに注意が必要である。

バラスト表面と車両床下面に囲まれた領域の流れが、2次元の乱流のクエット流れになっているとすれば、半分の高さで無次元流速が0.5になるはずであるが、実際にはそれより大きな値となっていることがわかる。

6. まとめ

現車試験における車上側および地上側からの流れの計測より以下のことが明らかになった。

- (1) 車上側で測定した2, 4, 6号車の床下の流速分布はほぼ一致しており、2号車以降の車両床下流れは編成中での号車位置によらずほぼ同じである。
- (2) 高応答型熱線流速計での測定結果(アンサンブル平均値)から、Type1, Type2ともに、2号車以降ではほぼ一定の平均流速となり列車通過後に一時的に平均流速が大きくなる。
- (3) 簡易型熱線流速計の時系列データは、高応答型熱線流速計および風圧計の時系列データと、同様の変化をとらえていることがわかった。
- (4) 床下形状をボディマウント化すると、車両床下面とバラスト表面に挟まれた流れ全体が遅くなり、バラスト表面流速も遅くなることがわかった。

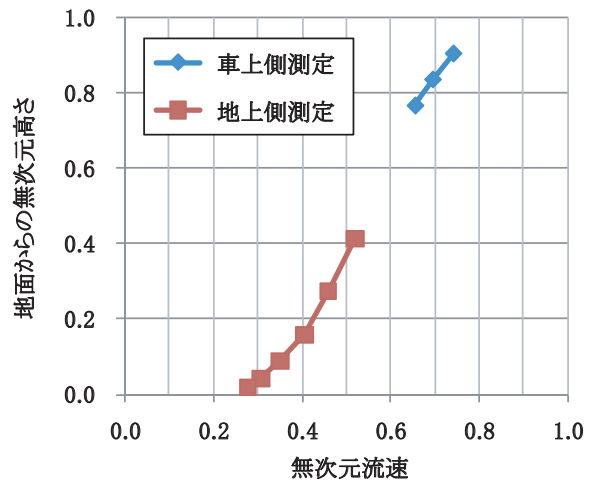


図10 車両床下と地面の間の流速分布(地面から見た流速)
(車上側は中央から250mm海側, 地上側は軌間中心)

文献

- 1) 吉田真, 内田雅夫, 矢口直幸, 御船直人: 高速走行時のバラスト飛散防止対策, 鉄道総研報告, Vol.6, No.6, pp.27-36, 1992.
- 2) 河島克久, 遠藤徹, 藤井俊茂: 新幹線の雪の舞い上がり防止に関する基礎的研究, 鉄道総研報告, Vol.8, No.7, pp.7-12, 1994.
- 3) 井門敦志, 小濱泰昭: 鉄道車両の床下形状平滑化による空気抵抗低減についての研究, 機械学会論文集B編, 71-703, B, pp.73-80 (2005).
- 4) 中林功一, 鬼頭修己, 岩田裕司, 加藤英司, 上原年, 乱流潤滑に関する基礎研究: 第1報, 平板間乱流クエット流れ, 機械学会論文集B編, pp.54-499 (1988).