

# 現車試験による車両底面と地面との流れ場の解明

井門 敦志\* 岩崎 誠\*

Study on Air Flow between Underside of Railway Vehicle and Track On-track Tests

Atsushi IDO Makoto IWASAKI

The air flow between the underside of a railway vehicle and the track has influence on aerodynamic various issues such as aerodynamic drag and aerodynamic noise. For solving these problems, studying an under-floor flow is necessary. In this study, we measured the under-floor flow using a hot wire anemometer that was installed on the underside of the vehicle. Moreover, we verified that the under-floor flow is influenced by the distance between the vehicle nose and the measurement point and by local shapes such as bogies and inter-vehicle gaps.

キーワード：車両床下流れ，現車試験，熱式流速計，空気抵抗

## 1. はじめに

車両が走行すると車両に引きずられて、車両周りに空気が流れるが生じる。車両の底面と地面との間では、底面と地面の相互作用により、複雑な流れ（車両床下流れ）が形成される。この流れは、車両の空気抵抗や車両下部から発生する空力騒音などの空気力学的課題<sup>1) 2) 3)</sup>に影響を与える主な要因の一つである。列車が高速で走行する場合には、必然的に、この車両床下の流れが速くなる。例えば、車両床下の流れから車両が受ける空気力は流れの速度の2乗に比例するために、列車が高速で走行する場合には、その影響は非常に大きくなる。これらの

課題の研究のためには、車両床下の流れを解明することが重要である。

列車は非常に細長いいため、車両床下の流れは、列車先頭部から長手方向の距離、すなわち、編成の中の位置の影響や、台車のような車両床下の局所的な形状の影響を受けることが考えられる。これまでの地上側測定結果<sup>4) 5)</sup>においても、車両通過時に地上で誘起される地上側で測定される流れは、車両の影響が小さい先頭部では遅く、車両の影響が大きくなる先頭車両以降の中間車両ではおおそ一定の流速となり、列車通過後に一時的に流速が高くなることが知られている。また、台車のような車両の局所的な形状の違いの影響が、地上側の流速に現

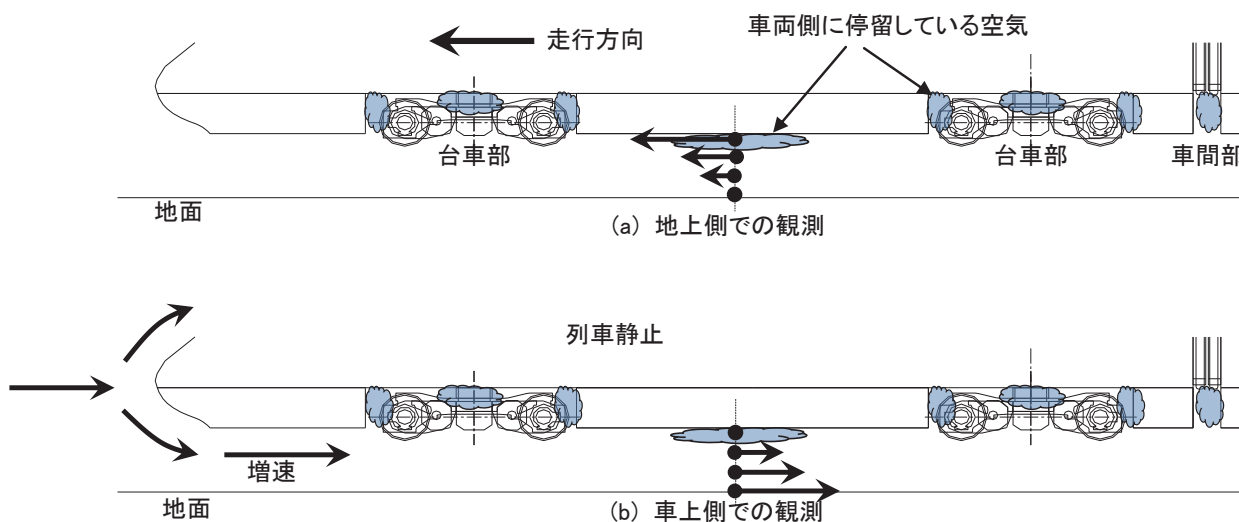


図1 車両床下の流れ

\* 風洞技術センター（前 環境工学研究部 車両空力特性研究室）

特集：環境工学

れている。しかしながら、地上側測定では車両からの離れがあり、車両周りの詳細な流れ場を明らかにすることは難しかった。

本研究では、現車を用いた試験により、車両側から流速を測定し、車両の編成位置や車両床下部の局所的な形状が車両床下流れに与える影響を明らかにした。

## 2. 車両床下の流れ

車両床下の流れ場の様子を図1に示す。図1において地面を示す「線」は、車両の床下様子の説明のために、通常の地面位置よりも下げて描いている。台車部や車間部の空間および車両周りの空気は列車とともに移動する。これを、地上側で観測した場合、列車の通過とともに列車進行方向の流れが観測されることになる。その速度は、台車・車間部の空間や車体の表面では列車速度で移動し、車両から離れるに従って低くなり、地上では静止している。一方で、車上から観測した場合には、台車部などの空間や車体の表面の空気は静止しており、その速度は、車両から離れるに従って高くなり、地表面上では列車速度と同じになる。車上側で観測した場合、静止している台車部などの空間や車体の表面の空気は、車両床下の流れと混合し、車両床下の流れを減速させる。すなわち、車体表面（の空気）は、車両床下の流れを減速させる。その効果は、車両の後方ほど大きくなる。一方で、車上側で観測した場合、軌道表面付近の空気は列車速度で移動することになる。バラスト軌道のように、通常のスラブ軌道と比較して表面の凹凸が大きく、軌道表面付近の空気が多い場合には、それだけ、流速を増加させる効果が大きくなる。本報告の中では、特に断りのない限り「車両床下の流れ」とは、車上側から観測した

流れを意味する。すなわち、車体表面の速度は0、地上表面で列車速度となる。

## 3. 現車試験の概要

### 3.1 流速測定位置および測定装置

4両編成の車両の床下に熱式流速計（カノマックス社製アネモマスター model6141、以下簡易型流速計）を設置し、車両床下の流速を測定した。現車試験では、1号車が先頭車両となる下り走行、4号車が先頭車両となる上り走行の両方で流速測定を実施した。以下では、上り、下りに関係なく、進行方向の前側から、先頭部、1両目、2両目、3両目、4両目、後尾部と記す。台車についても同様に、同一車両内で、先頭に近い台車を前位台車、後尾に近い台車を後位台車とする。また、車体から流れ場を観測するので、先頭に近い側が上流側、後尾に近い側が下流側となる。

車両床下の流れは、編成全体を見た場合に、先頭車両からの距離、すなわち、編成内での位置（先頭からの両数）により影響（以下、編成位置の影響）を受ける。加えて、同じ車両の中でも台車部のような局所的な車両床下形状の影響（以下、局所形状の影響）を受ける。現車試験では、これらの両方の影響を明らかにすることを目的として、車両床下流れを測定した。

図2に現車試験での測定位置を示す。編成位置の影響評価のために、上り走行時の先頭部（4号車）および1～4号車の各車両の長手方向の中心付近に、5本の簡易型流速計を設置した。また、局所形状の影響評価のために、下り走行時の3号車の前位台車の上流および下流、前後の台車間の中心、後位台車の上流及び下流の5箇所、さらに車間部の影響を見るために、4号車の前位

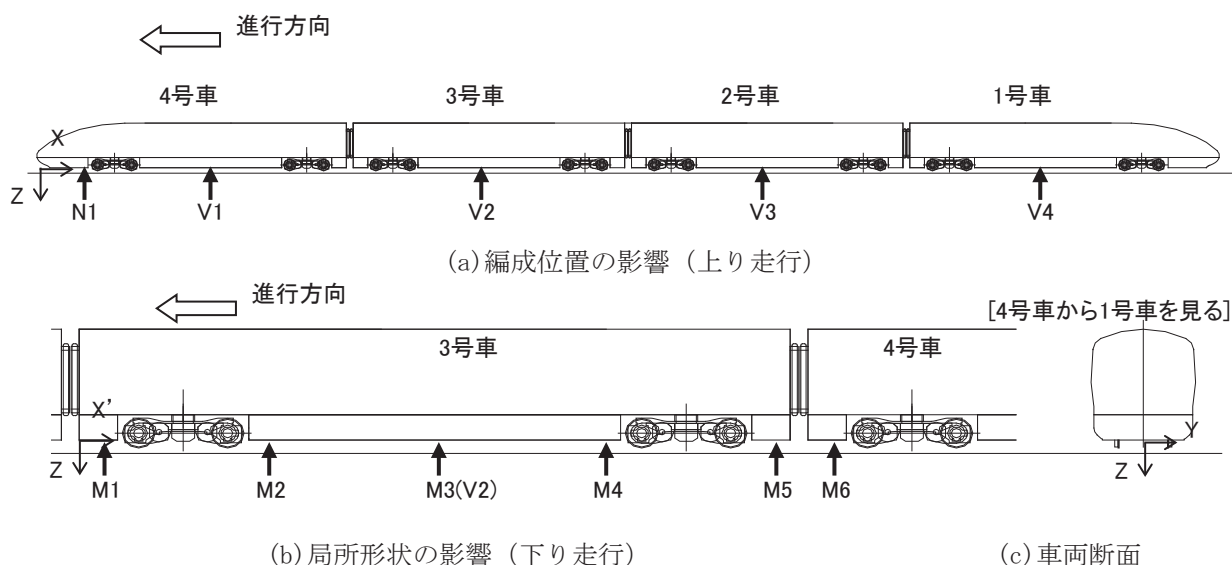


図2 現車試験での流速測定位置

表1 流速測定座標

測定点	X	Y	Z
N1	3,838	0	65/35
V1	13,753	88	100
V2	34,207	88	100
V3	54,765	90	100
V4	75,292	90	100

(単位：mm)

測定点	X'	Y	Z
M1	542	82	100
M2	5,361	89	100
M3	9,123	88	100
M4	14,949	91	100
M5	19,458	-93	100
M6	21,042	88	100

(単位：mm)

台車の上流側1箇所の計6箇所に簡易型流速計を設置した。まくらぎ方向の測定位置は全て中心である。現車にセンサーを取り付ける場合には、取り付け場所が制限されるために厳密に中心位置にセンサーを設置することは難しく、できる限り中心に近い位置とした。ただし、以降では、長手方向、まくらぎ方向ともに、便宜的に「中心」と表記する。具体的な取り付け位置は表1に示す。なお、表1においてM5のY座標がマイナスとなっているのは、車内配線の関係で他のセンサーとは逆側に設置したことを示している。しかし、車両床下形状は概ね左右対称であり、他の測定位置と逆側の測定でも問題はないと考えられる。測定高さ(車両底面からの突き出し量)は車体底面を基準(0点)として表1に示している。先頭部以外の測定高さ(車両底面からの突き出し量)は、100mmとしたが、先頭の車体底面は、他の底面よりも40mm低く(軌道面に近く)なっているため、先頭部の測定高さは、先頭部の車体底面から下方に65mmとした。簡易型流速計は、センサーとアンプで構成され、それらはケーブル(10mもしくは30m)で接続される。通常の簡易型流速計の測定範囲は0~50m/sであるが、N1については、高い流速が予想されたので、測定範囲が0~100m/sの特別仕様の簡易型流速計を用いた。アンプを車内に設置し、そこからケーブルを伸ばし、センサーを車両底面から下方に突き出す形で設置した。アンプの出力はAD変換(NI9229: National Instrument社製)し、PCに取り込んだ。この時のサンプリング周波数は2kHz、アンチエイリアシングフィルタの周波数は1kHzとした。なお、車両の床下には砂や塵なども流れていると考えられる。そのため、砂などの衝突によりセンサーが破損し、その後のデータは取得できなかった測定位置が数カ所あった。

### 3.2 データ解析

車両床下流速は、列車速度の影響や編成位置や車両床下の局所的な形状のような車両側の影響に加えて、軌道やトンネルなどの地上側の影響を受ける。そのため、それらの地上側の条件

が一定になる区間で測定を行った。測定時の地上側の条件を以下に示す。

- ・ 軌道条件：枠型スラブ軌道/バラスト軌道
- ・ 明かりトンネル条件：明かり区間/トンネル区間

車両床下の流速は、車両周りの流れが空力現象に与える影響の大きい、高い列車速度(207~274km/h)を測定対象とした。線形条件は直線区間とし、軌道条件が一定となる10秒間(500m以上の区間)とした。サンプリング周波数は2kHzであり、その間の20,000データの時間平均値( $u$ )を求めた。さらに、平均流速を列車速度の時間平均値( $V$ )で無次元化し、無次元流速( $u/V$ )を求めた。収録の10秒間で列車速度が4km/h以上変化する場合には、そのデータを除外した。

## 4. 現車試験結果および考察

### 4.1 列車速度の影響

現車試験では、1号車が先頭車両となる下り走行、4号車が先頭車両となる上り走行の両方で流速測定を実施した。図2(a)には上り走行の配置を示しているが、この図では4号車が1両目である。先頭部の流速測定のために4号車の先頭部の床下に簡易型流速計を配置した。そのため、各車両の長手方向の中心位置の流速は上

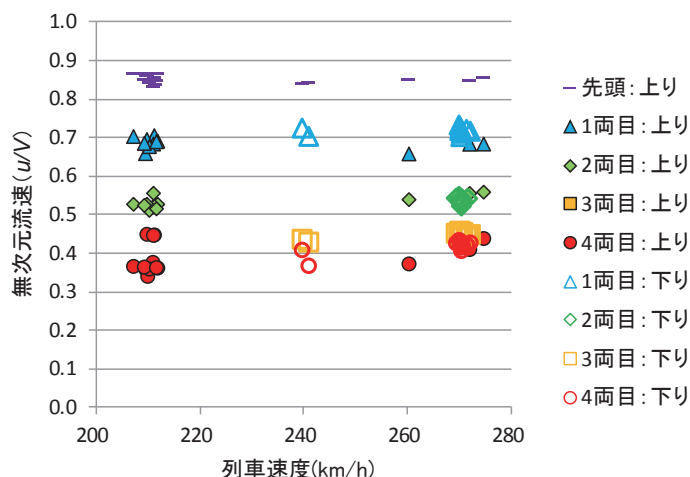


図3 床下流速に対する走行方向及び列車速度の影響

特集：環境工学

り下りの両方で測定できるが、先頭部の流速は上り走行の測定結果である。地上側の条件は、枠型スラブの明かり区間である。

明かり区間の枠型スラブ走行時の先頭および1～4両目の測定結果（無次元流速）を図3に示す。4両目の上り走行ではばらつきが大きいものの、207～274km/hの速度範囲において、各測定位置での無次元流速は列車速度に関係なくほぼ一定となることがわかる。また、例えば、1両目上り（4号車）と1両目下り（1号車）のように、異なる車両であっても同じ編成位置では、上り走行と下り走行の差はほとんどないことがわかる。

4.2 車両側条件の影響

4.2.1 編成位置の影響

270km/h付近の（269km/h～274km/hまで）データについて、編成位置の影響を評価した。車両床下流速は、局所的な形状の影響を受けるため、ここでは、各車両の測定点として中心（V1～V4）を用いた。これらに、先頭部（N1）の無次元流速を加えて、編成位置と車両床下の流速の関係を図4に示す。地上側の条件は、枠型スラブの明かり区間である。車両床下の流速は、先頭部が最も高く、後方の車両ほど流速が低くなる。また、3両目と4両目の流速の差は小さく、編成位置の影響（車両の後方ほど流速が低い）が一定になっていることがわかる。

4.2.2 車両の局所的な形状の影響

上述したとおり、車両床下流速は編成位置の影響を受ける。しかしながら、3両目以降では、長手方向中央位置の流速がほぼ等しくなり、編成位置の影響が一定になると考えられる。すなわち、新幹線のような長大編成の場合には、編成の大部分を占める3両目より後ろの中間車両においては、編成位置の影響が一定となる。そこで、3号車が3両目（下り走行）となり編成位置の影響が一定となった中間車両において、車両の局所的な形状の影響を調べた（図2（b））。地上側の条件は、枠型スラブの明かり区間である。測定結果を、無次元流速として、図5に示す。車両床下の流れは軌道面の影響により増速されるが、その一方で、車体（底面）の影響により減速される。

前位台車の前後（M1→M2）では、台車部を通過することによる流れの減速が見られる。車体に囲まれている台車部内の空気は、車両と共に移動し車両から見た場合に流速が低い。一方で、流速の高い車両床下の流れは、

台車の前側の端部で剥離し、台車部内の流速の低い空気との混合が進む。その結果、台車部の後方では流速が低くなる。

前位台車部より下流の中心位置や後位台車部の上流（M2→M3）では車体底面が平坦であり、車体の影響による減速の効果が小さいために、相対的に軌道面の影響による増速の効果が大きくなり、台車部で減速した流れが回復する。同一車両内では、中心から後位台車部の上流までの間（M3→M4）で最も流速が高くなる。

後位台車の前後（M4→M5）でも、前位台車の場合と同様に台車部を通過することによる流れの減速が見られる。

後位台車の下流と後方の車両（4号車）の前位台車前方では、3両目の前位台車上流と同じ程度まで回復している。3号車の下流と4号車の上流には車間部があるが、車間部についても台車部同様に、車間部の空気は車両と共に移動するため、車両から見た場合の遅い空気が存在している。しかし、車間部の長さは、台車部と比較して短いために、速度の低い空気と車両床下の流れの混合は、

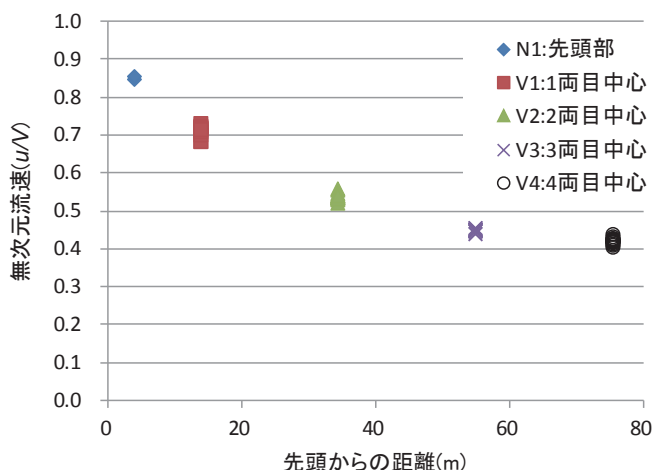


図4 先頭からの距離と流速の関係（上り走行）

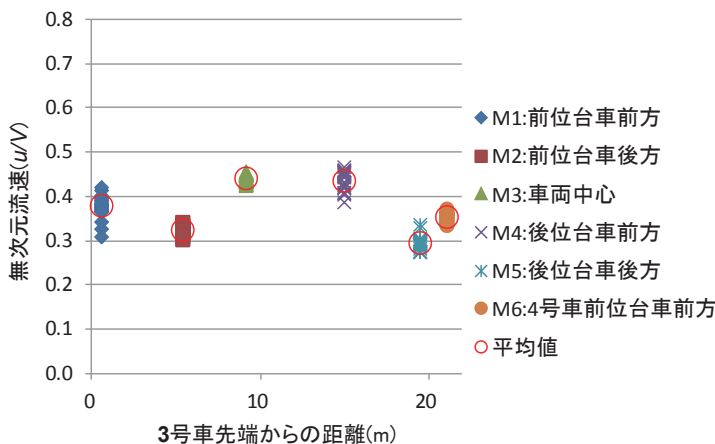


図5 床下流速に対する車両の局所的な形状の影響（下り走行）

台車部ほど進まず、軌道面の流れを増速する影響が強く表れ、流速が回復していると考えられる。ただし、車間部の減速効果があるために、中心から後位台車部の上流までの間（M3 → M4）と比較すると、流速が低くなる。

編成位置の影響が一定となる3両目以降の中間車両では、「台車部の影響により遅くなる流れが、台車の無い区間（台車間）で回復する」というサイクルが繰り返されていると考えられる。

### 4.3 地上側条件の影響

#### 4.3.1 軌道条件の影響

これまでの知見においても、車両床下流れには軌道条件が影響することが知られている。軌道面の凹凸が大きいほど軌道面の影響を強く受け、その結果車両から見た流速が高くなる。例えば、バラスト軌道とスラブ軌道（表面が平らなスラブ軌道）では、バラスト軌道の凹凸のほうが大きいので、バラスト軌道の流速が高くなる<sup>6)</sup>。図6に、明かり区間の枠型スラブ軌道とバラスト軌道の比較を示す。V1～V4（1両目～4両目）の結果に注目すると、バラスト軌道のほうが枠型スラブ軌道よりも流速が低くなる傾向が見られる。この結果は、以前の現車試験結果<sup>6)</sup>と矛盾しているように見える。しかしながら、本試験でのスラブ軌道には、枠型スラブが用いられており、レール間のスラブ板には大きな穴が開いている。この穴の凹凸はバラストの凹凸よりも大きく、枠型スラブ軌道の影響が強く表れ、枠型スラブ軌道走行時の流速が高くなると考えられる。一方で、先頭の流速は、逆に、バラスト軌道の流速のほうが高くなる。先頭部床下の流れは、先頭部が排除した空気が床下に入ることにより増速すると考えられる（図1(b)）。この時、床下の空間（車両底面と軌道面の空間）が狭いと、増速効果が大きくなる。枠型スラブ軌道とバラスト軌道を比較すると、枠型スラブ軌道ではスラブ板に大きな穴があるため、バラスト軌道と比較して車両床下の空間が広がる。軌道面の凹凸の影響としては、バラスト軌道走行時の流速が低くなるのが考えられるが、先頭部では軌道面の影響が大きくないと考えられる。先頭部の車両底面では、バラスト軌道の影響は流路が狭くなるという増速要因のみが作用し、先頭部に限ってはバラスト軌道の流速が高くなっているものと考えられる。なお、図6において、3両目の結果が示されていないのは、最初の下り走行の途中でセンサーが破損したためである。

#### 4.3.2 トンネルの影響

列車がトンネル内を走行する場合、車両の走行により排除された空気は列車進行方向のトンネル出口側と進行方向逆向きのトンネル入り口側の両方に流れる。トンネル入り口側に流れる空気は、車両から見た場合には増速要因となる。図7に枠型スラブ軌道の明かり区間・トンネル区間の比較を示す。現車試験においても、トンネルを走行する場合に流速が高くなっていることが捉えられている。最も流速が高い先頭部の流速のトンネルの影響による増速効果を評価する。図7に示される全データのトンネル区間の平均値と明かり区間の平均値を求め、その比を増速率 $\alpha$ とすると、 $\alpha = 1.1$ となる。この値は、本試験結果として得られた数値であり、トンネル断面積や車体の断面積が異なれば $\alpha$ が異なることに注意する必要がある。また、トンネル内では、列車がトンネルに突入した際に生じる圧力波の影響によりトンネルによる増速効果が、場所や時間により異なる<sup>7)</sup>ことが知られている。しかしながら、現車試験では、流速データとして

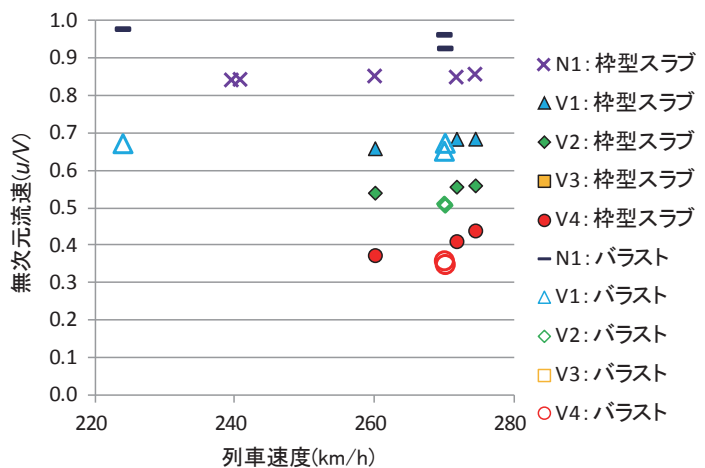


図6 床下流速に対する軌道条件の影響（上り走行）

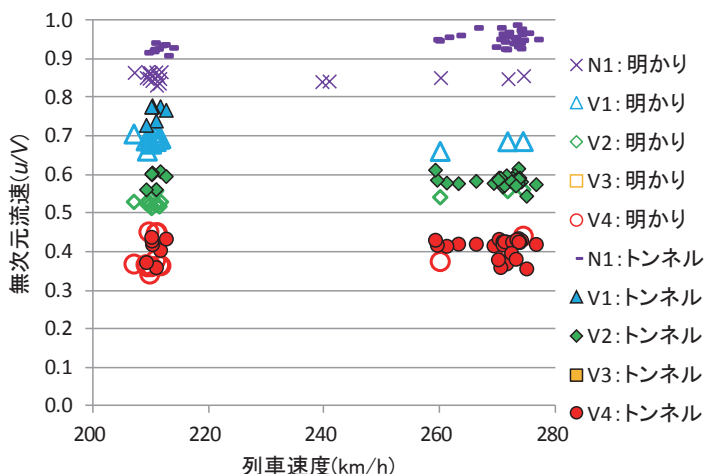


図7 床下流速に対するトンネルの影響（上り走行）

10秒間の平均値（例えば、時速270km/hで走行した場合には750m進む）を用いているため、トンネル内の場所や時間の影響まで切り分けることが難しい。本試験で得られた増速率は、トンネル内の圧力波の影響や外乱などを含めた平均的な値となっている。

## 5. おわりに

車両床下流れを明らかにするために、現車試験を実施した結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 車両床下の無次元流速は列車速度に関係なくほぼ一定となることがわかった。また、例えば、1両目上り（4号車）と1両目下り（1号車）のように、異なる車両であっても同じ編成位置では、上り走行と下り走行の差はほとんどないことがわかった。
- (2) 車両床下の流速は、先頭部が最も高く、後方の車両ほど流速が低くなり、また、3両目と4両目の流速の差は小さく、3両目以降では編成位置の影響が一定になっていることがわかった。
- (3) 局所的な車両形状の影響を受け、編成位置の影響が一定となる3両目以降の中間車両では、「台車部の影響により遅くなる流れが、台車の無い区間（台車間）で回復する」というサイクルが繰り返されていることがわかった。
- (4) バラスト軌道のほうが枠型スラブ軌道よりも流速が

低くなる傾向が見られることがわかった。

- (5) 車両床下の流速は、トンネルの影響により明かり区間より高くなることがわかった。

## 文献

- 1) 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, 日本機械学会論文集 (B編), 71巻, 703号, pp.817-824, 2005
- 2) 高石武久, 善田康雄, 佐川明朗, 長倉清: 高速鉄道の車両下部空力音に関する研究, 日本機械学会論文集 (B編), 67巻, 662号, pp.2478-2486, 2001
- 3) 吉田眞, 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
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 井門敦志, 山崎展博, 栗田健, 松本雅則: LDVによる車両床下流速分布の測定, 第16回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, pp.199-200, 2009
- 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, 1973