

列車走行時のパンタグラフまわりの風向・風速特性

池田 充* 光用 剛* 山下 義隆*

Direction and Velocity Characteristics of Air Flow around Pantograph of Running Train

Mitsuru IKEDA Takeshi MITSUMOJI Yoshitaka YAMASHITA

Lift force acting on a pantograph of a high-speed train strongly affects current collection performance of the pantograph, but air flow conditions in the vicinity of the pantograph have been only poorly understood. Therefore, onboard measurement of the flow conditions around the pantograph by using a three-hole probe mounted on the panhead was performed. The results revealed some useful information about direction and velocity characteristics of the flow around the pantograph for design in a high-speed pantograph with suitable aerodynamic properties.

キーワード：パンタグラフ，揚力，流れ場，対向風，三孔管，風向，風速

1. はじめに

新幹線用パンタグラフの揚力は集電性能に大きな影響を与えるため、パンタグラフに適正な揚力特性を付与することは重要である。そのため、パンタグラフの風洞試験が実施され、揚力評価とその調整が行われている。ただし、適正な風洞試験の実施には風速条件やパンタグラフの設置条件（設置角度など）を適切に与える必要があるが、車両屋根上に搭載されたパンタグラフ近傍の流れ場についての詳細な実測例¹⁾が少ないため、車両条件や走行条件（明かり，トンネル）に合わせた風洞試験を実施する上での障害となっている。そこで、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・風速センサとして用いることによって、パンタグラフに対する対向風（相対的な流れ）の風向・風速測定を行った。

2. パンタグラフまわりの風向・風速測定方法

2.1 センサの選定

風向，風速を測定するセンサとしては，三孔管，熱線流速計，超音波風向風速計，レーザドップラ流速計，機械式風向計（風車式風向計，風杯型風向計）などがある。しかし，300km/h（83.3m/s）を超える風速を測定する必要があり，測定箇所近傍が25kVに加圧されていること，測定対象領域の気流へのトレーサ供給が難しいこと，などを勘案すると，三孔管の使用が最も現実的であると考えられる。そこで，図1（b）に示すように，三孔管をパンタグラフの舟体に内蔵し，パンタグラフ自体を風向風速センサとして利用して，舟体近傍における対向風の風向，風速を測定することとした。

なお，パンタグラフまわりの流れ場は鉛直方向に対して一様ではないことから，本来であれば流速の鉛直方向分布を測定することが望ましい。しかし，三孔管による測定は周囲の流れ場の影響を受けることから，枠組部のように作用高さに応じて部材の角度が変わり，周囲の流れ場自体が変化してしまう部位では三孔管による測定は適していない。舟体は，作用高さも変化してもリンク機構により迎角がほぼ一定に保たれるうえ，パンタグラフ構成部材のうち対向風による空力的な影響を最も鋭敏に受ける部位でもあることから，今回は舟体近傍における対向風の風速・風向測定を行うこととした。

舟体に内蔵する三孔管として，構造的に高い強度が期待できるコブラ形三孔管²⁾を選択し，試作を行った。その詳細形状を図1（a）に示す。この三孔管を舟体の前後両面に1個ずつ取り付けたうえで，常に上流側の三孔管を計測に供することとした。耐アーク性，耐熱性を考慮し，三孔管の材質はポリカーボネート製とした。

ただし，舟体への三孔管取り付け位置にはいくつかの制約がある。一つ目は三孔管の取り付けによりパンタグラフの揚力特性に大きな変化が生じない位置であること，二つ目は離線アークによる損傷を受けにくい位置であること，三つ目は取り付け位置近傍の流れ場の性状が

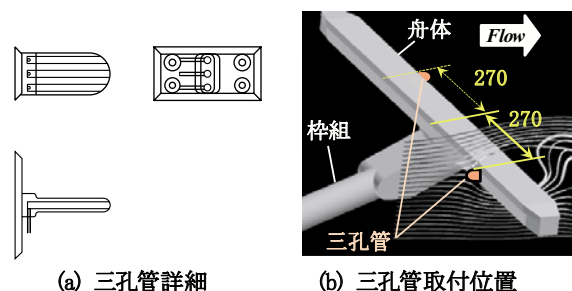


図1 パンタグラフまわりの風向・風速測定法

* 鉄道力学研究部 集電力学研究室

特集：鉄道力学

作用高さ変化や列車速度の影響を受けにくい場所であること、などである。舟体中央部は枠組との間に強い空力干渉が生じるため、舟体形状の小さな変更が空力特性に大きな影響を与える可能性があるうえ、離線アークの発生頻度が高く三孔管へのダメージも大きいと考えられることから、三孔管取付位置としては望ましくない。一方、舟体の両端部も流れ場の3次元性が強いいため、レイノルズ数依存性が大きい可能性があり、やはり三孔管取付位置としては望ましくない。そこで、流れ場が2次元的で、作用高さ変化の影響を受けにくく、なおかつ離線アークの発生頻度の低い場所として、図1 (b) に示す通り、舟体中央から270 mm側方位置に三孔管を取り付けることとした。

2.2 三孔管の校正試験

三孔管による風向・風速測定を実施するためには、測定を行う条件で風向・風速の校正試験を実施する必要がある。そこで、三孔管を内蔵した舟体を試作し、新幹線用パンタグラフに搭載したうえで、鉄道総研の大型低騒音風洞（吹出口3m×2.5m, 最高風速400km/h）において風向・風速の校正のための風洞試験を実施した³⁾。パンタグラフの作用高さをRL（レール面上高さ）4800mm相当ならびにRL5000mm（標準作用高さ）相当で固定し、パンタグラフの迎角を±3°の範囲で変えながら三孔管に設けた3つの圧力孔の圧力係数を計測した。これらを上から順に C_{p_u} 、 C_{p_c} 、 C_{p_l} と定義する。供試体が設置されていないときの風洞計測部の気流は水平かつ一様とみなせるため、パンタグラフそのものを測定用プローブとみなせば、上記作業はパンタグラフが設置されていない状態における舟体位置の風向・風速に対して感度検定を行っていることに相当する。迎角はパンタグラフの支持架台を傾けることにより与えたが、迎角が±1°未満の場合は、パンタグラフを水平に取り付けたままの状態の上枠のバランスロッドを調整し、舟体だけに迎角を与えた。なお、パンタグラフを基準として流れが吹き上げる向きを、迎角の正の向きと定義した。

まず、なびき条件、作用高さRL4800mmにおける C_{p_u} の迎角依存性を220～350km/hの範囲で計測した結果を

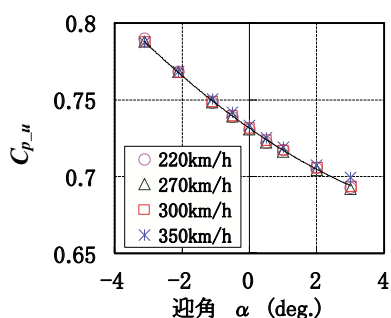


図2 三孔管出力 (C_{p_u}) の迎角特性 (なびき, RL4800 mm)

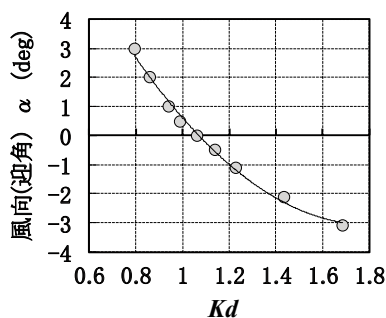


図3 方向特性係数 kd の迎角依存性 (なびき, 300km/h, RL4800 mm)

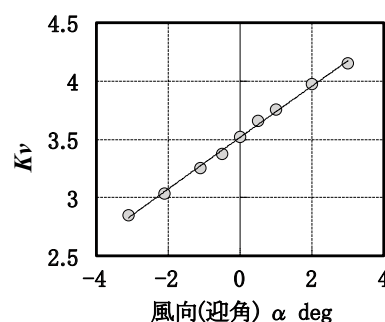


図4 方向特性係数 kv の迎角依存性 (なびき, 300km/h, RL4800 mm)

図2に示す。この図からわかるとおり、 C_{p_u} の風速依存性はほとんど認められない。同様に、 C_{p_c} 、 C_{p_l} についても風速依存性はほとんど認められなかった。さらに、反なびき条件、あるいは作用高さをRL5000mmにした条件でも、各圧力係数の速度依存性はほとんど認められなかった。したがって、この風速範囲、および作用高さ範囲では、三孔管の各圧力係数は迎角のみで定まると見なしてよい。そこで、風速300km/hで測定した圧力係数をもとに、方向特性係数 Kd 、 Kv を求めた。これら係数の定義は以下の通りである。

$$Kd = (C_{p_c} - C_{p_l}) / (C_{p_c} - C_{p_u}) \quad (1)$$

$$Kv = 1 / (C_{p_c} - C_{p_l}) \quad (2)$$

なびき条件、風速300km/h、作用高さRL4800mmにおける方向特性係数 Kd および Kv を図3～図4に示す。 Kd は迎角を定めるための係数であり、迎角 α を Kd によって表す近似式を作成しておけば、 Kd の実測値から風向（迎角） α を決定することができる。一方 Kv は、 Kd により定められた迎角 α から次式により流速を求めるための係数である。

$$v = \sqrt{2Kv(C_{p_c} - C_{p_l}) / \rho} \quad (3)$$

ただし、 ρ は空気の密度、 v は流速である。

図4の結果をもとに、動圧変化に対する圧力孔の差圧($C_{p_c} - C_{p_l}$)の感度（流速測定感度 = $1/Kv$ ）を求めてみると0.28～0.35であった。この値はピトー管の流速測定感度に比べると小さいものの、測定精度上問題となるような値ではなく、三孔管による風向・風速測定は十分実用的な手法であるといえる。

3. 三孔管の内蔵がパンタグラフの集電性能に与える影響

現車において風向・風速測定を実施するためには、パンタグラフに対して三孔管、および圧力計測用チューブ（内径1.6mm）の取り付けが必要であるが、これによりパンタグラフ揚力が大きく変化すると、集電性能を確保するうえで問題となる。そこで、大型低騒音風洞において三孔管の取り付けがパンタグラフ揚力に与える影響に

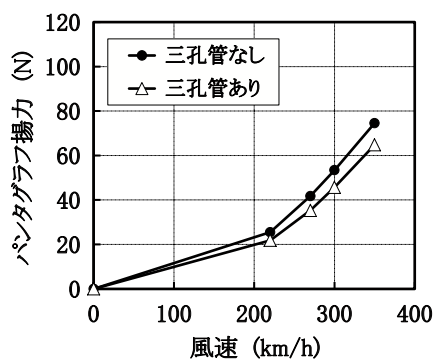


図5 三孔管取付がパンタグラフ揚力に及ぼす影響（なびき条件，RL5000mm）



図6 三孔管に対する離線アークの影響評価結果

ついて調査した。その結果を図5に示す。これは、なびき条件、標準作用高さ（RL5000mm）における揚力測定結果である。舟体への三孔管取り付けによって揚力が若干低下しているが、その低下量は300km/hにおいて約7Nと小さい値である。反なびき条件でも同様の結果であり、三孔管取り付けがパンタグラフ揚力に与える影響は問題にならない程度であると判断した。

次に、離線アークが三孔管自体に与えるダメージを調べるため、鉄道総研のパンタグラフ総合試験装置において、パンタグラフにAC400Aの電流を通電しながら速度300km/hで連続60分間しゅう動させる試験を実施した。ただし、十分な頻度で離線アークを発生させるため、模擬架線に両振幅24mm、周波数4.3Hzの上下振動を与えた条件で300km/hでしゅう動させた。このとき離線率は33%であった。図6に示す通り、60分間しゅう動させた後のすり板しゅう動面は離線アークによりかなり荒れた状態となったが、三孔管の熱変形や損傷は全く認められなかった。

4. 現車屋根上におけるパンタグラフまわりの風向・風速測定

4.1 試験方法

三孔管を内蔵した舟体を新幹線の現用パンタグラフに搭載し、舟体に対する対向風の風向・風速測定を実施した⁴⁾。このパンタグラフは碍子オオイ内に設置されるタイプのものである。三孔管の各圧力孔の圧力はパンタグラフ台枠内に収納した微差圧計により測定し、その出力をテレメータにより車内に伝送して、位置情報や速度情報とともに収録した。ただし、移動物体上で絶対圧の計測を精度よく行うことは容易ではないため、中央の圧力孔に対する上下それぞれの圧力孔の差圧（ $C_{p,u} - C_{p,c}$ 、および $C_{p,l} - C_{p,c}$ ）を計測した。2.2節で述べたとおり、風向・風速の評価のためにはこれらの値があれば十分である。

なお、各圧力孔から微差圧計まで圧力を導くチューブの長さが約2mあるため、10Hzより高い周波数領域では平坦な振幅・位相特性である保障がない。そのため、今

回の試験では5Hzのローパスフィルタを施すことを標準とした。また、式(3)よりわかるとおり、風速の算出には空気密度 ρ が必要である。通常、 ρ の値は温度、湿度、大気圧を基に算出するが、パンタグラフ近傍の気流に対してこれらの値を常にモニタすることは難しい。そこで、駅停車の大気圧と温度をもとに ρ を評価し、走行中の ρ の変化は無視することとした。実際にはトンネル内走行時には明り区間走行時に対して温度や湿度が変化するため、

風向の計測結果には数%程度の誤差が含まれてしまうことに留意する必要がある。

4.2 中腰条件における風向・風速測定結果

まず、舟体と台枠の間にワイヤを取り付けて舟体上面がRL4800mmで突放状態となるように設定した条件、すなわち中腰条件において、風向・風速測定を実施した。その際、ワイヤの張力を測定することによりパンタグラフ揚力の測定も同時に行った。

反なびき条件における風速測定結果を図7に示す。同図には列車速度ならびにトンネル位置マーカーを併せて示している。この図より、舟体に対する対向風の風速は、明り区間では列車速度にほぼ等しく、トンネル区間では列車速度に対して増速していることがわかる。

ここで、流速変動に対するパンタグラフ揚力の追従性を調べるため、 $(C_{p,c} - C_{p,l})$ に対する揚力変動のコヒーレンスを求めた。その結果を図8に示すが、両者の間に高い相関が認められるのはおおむね0.5Hz程度以下の低周波領域に限られることがわかる。このように周波数が高くなると相関が小さくなるのは、周波数が高いほど空間的な流れのスケールが小さくなり、局所的な圧力変動がパンタグラフ全体の揚力に対して強い影響を示さなくなるためだと考えられる。したがって、流れ場変動に起因するパンタグ

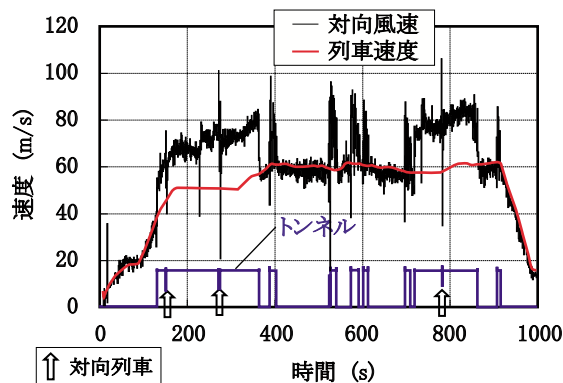


図7 中腰条件における舟体近傍の対向風速測定結果（反なびき条件）

特集：鉄道力学

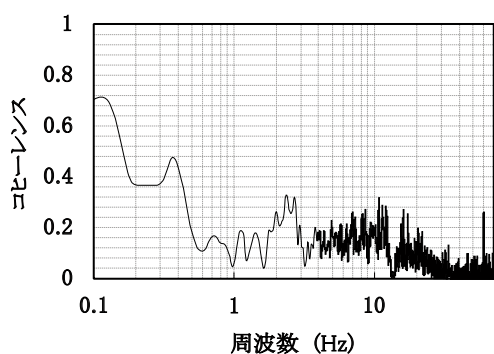
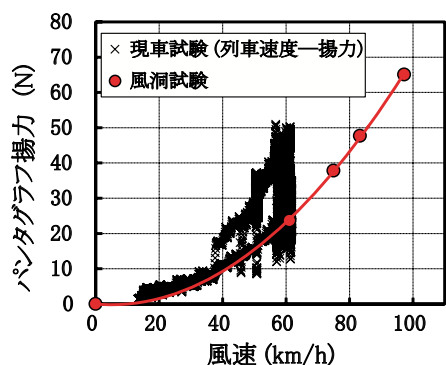


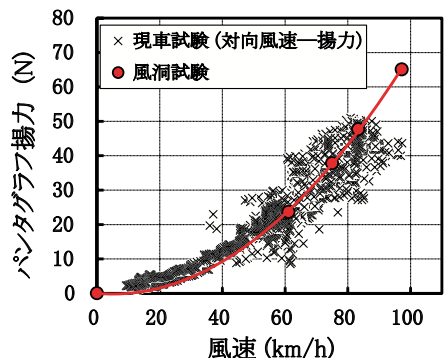
図8 三孔管の差圧出力、 $(C_{p,c} - C_{p,l})$ とパンタグラフ揚力のコヒーレンス

ラフ揚力の変動を検討するうえでは、おおむね0.5Hz以下の流れ場変動だけを考慮すれば十分であるといえる。

そこで、各信号波形に0.5Hzのローパスフィルタをかけたうえで、パンタグラフ揚力を列車速度に対してプロットした場合、ならびに舟体近傍の対向風速に対してプロットした場合の比較を行った。これらを図9に示す。ただし、測定結果を参照したところ、対向風速波形とパンタグラフ揚力波形との間に1sの時間遅れが認められたため、図9(b)ではこれを考慮してプロットしている。図9(a)のようにパンタグラフ揚力を列車速度に対してプロットした場合、その速度依存性は不明確である。これに対し、図9(b)のようにパンタグラフ揚力を舟体近傍の対向風速に対してプロットすると速度依存性が明確に表れ、風洞試験結果ともよく一致することがわかる。前述した、明



(a) 揚力を列車速度に対してプロットした場合



(b) 揚力を対向風速に対してプロットした場合

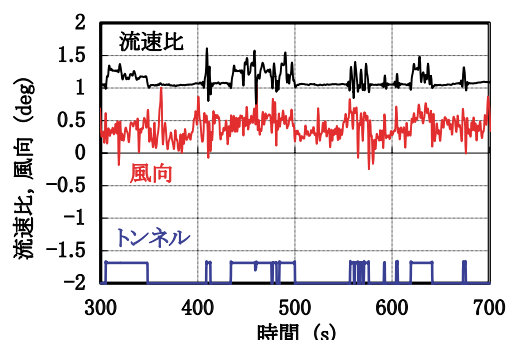
図9 パンタグラフ揚力の速度依存性（反なびき条件）

かり区間では舟体に対する対向風速は列車速度にほぼ等しい、という事実を勘案すると、この結果はトンネル内走行時におけるパンタグラフ揚力は、列車速度ではなく舟体近傍の対向風速によって決定づけられることを意味している。

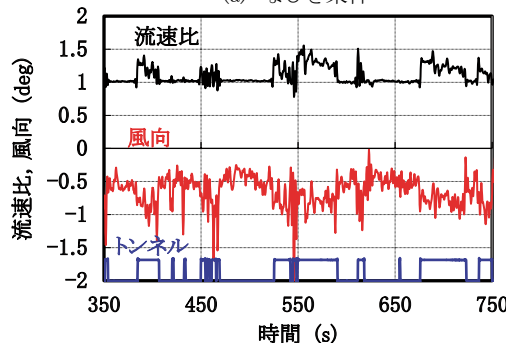
4.3 しゅう動走行時の風向・風速測定結果

中腰条件における測定に続いて、パンタグラフが架線としゅう動して集電を行っている条件において、舟体近傍の流れ場の風向・風速測定を行った。トロッコ線の標準的な静高さはRL5000mmである。

舟体近傍における対向風速の列車速度に対する比（流速比）、ならびに対向風の風向の測定結果を、なびき条件、反なびき条件のそれぞれについて図10に示す。ただし、流速比ならびに迎角については0.5Hzのローパスフィルタを施した波形である。中腰条件の場合と同様に、明かり区間における流速比はほぼ1であるが、トンネル区間では流速比が明かり区間より増加するうえ、走行位置により流速比が変動していることがわかる。対向風の風向については、なびき条件と反なびき条件では傾向がやや異なっており、なびき条件では若干の吹き上げ、反なびき条件では若干の吹き下ろしとなっている。ただし、迎角の値そのものは±1度以内にほぼ収まる程度である。また、トンネル内走行時の迎角は、なびき条件では吹き上げが増す方向に、反なびき条件では吹き下ろしが強くなる方向に、それぞれ変化しているが、その



(a) なびき条件



(b) 反なびき条件

図10 しゅう動走行時の舟体近傍における対向風の風速と風向（速度300km/h）

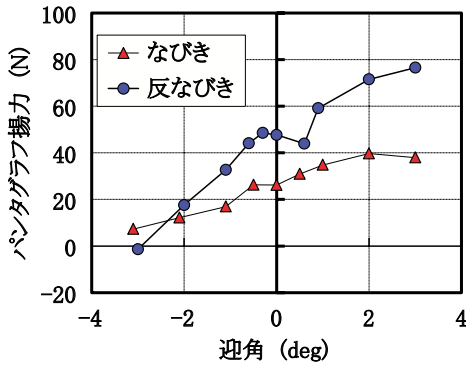


図11 パンタグラフ揚力の迎角依存性の例
(風洞試験 300km/h)

変化量自体は0.3度程度と小さい値であった。図11に、風洞試験において風速300km/hにおけるパンタグラフ揚力の迎角依存性を評価した例を示すが、0.3度程度の迎角変化ではパンタグラフ揚力に大きな影響を与えないことがわかる。以上の結果より、トンネル内走行時に生じるパンタグラフ揚力の増加は主として対向風速の増加により生じるものであり、トンネル内走行に伴う対向風の風向変化の影響はあまり大きくないものと推定される。

ところで、列車長に対してある程度長いトンネルを走行する際に観察される流速比の波形には、一定の傾向が認められる。その代表例を図12に示す。この図のように、トンネル突入直後に流速比が増加したあと、しばらく流速比がほぼ一定となる状態が継続する(図12の橙色部分)。この区間における流速比の平均値をトンネル坑口近傍平均値と称することにする。また、流速比がピーク状の極大値を示す箇所(図12の矢印部分)が何箇所か現れ

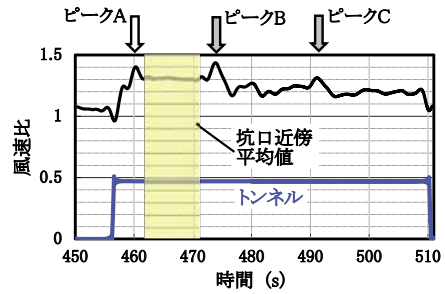


図12 トンネル内走行時に観察される舟体近傍における対向風風速比の変化(代表例 なびき条件)

る。そこで、トンネル内走行時に測定された風速比のうち、坑口近傍平均値、ならびにピーク値を、それぞれ列車速度およびトンネル長に対してプロットした結果を図13～図14に示す。ただし、風速比は0.5Hzのローパスフィルタを施して評価している。この図より、トンネル内走行時に生じる風速比の増加は、トンネル近傍平均値で評価すれば1.3程度であるが、過渡的に生じるピークの値は最大1.6程度になる場合もあることがわかる。また、列車速度が高いほどトンネル内走行の対向風速増加は大きくなる傾向が認められる。トンネル長の影響に関しては、ある程度まではトンネル長が長いほど流速比も大きくなるものの、1000mを超えるようなトンネルでは、流速比のトンネル坑口近傍平均値ならびにピーク値のどちらも、トンネル長とは無関係にほぼ一定の値となる傾向が認められる。

トンネル内で観測される対向風の風速比にピークが出現する理由は、列車のトンネル突入に伴って発生する圧力波の波面の挙動と関連すると思われる⁵⁾。すなわち、自列車最後尾がトンネルに突入した際に発生する膨張波

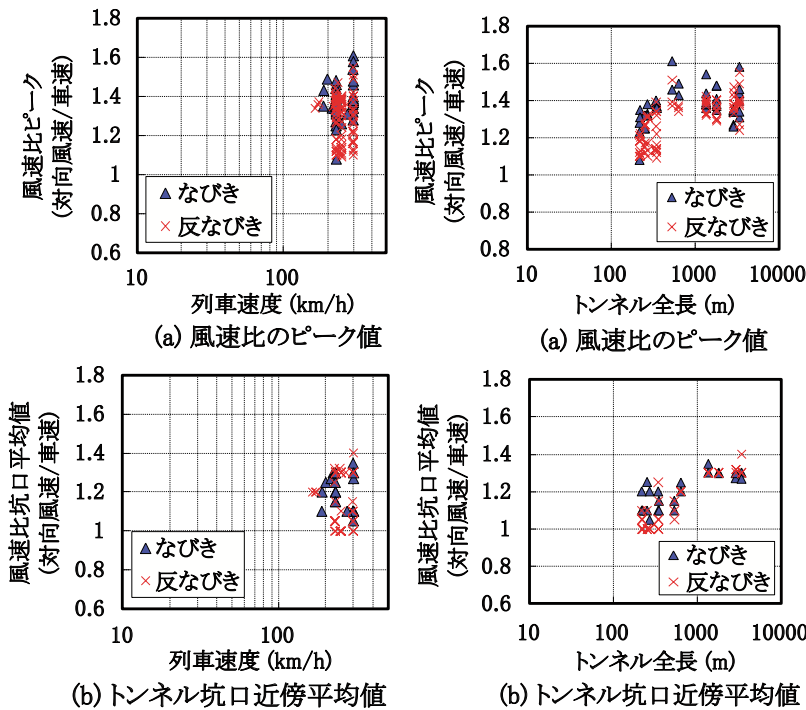


図13 列車速度と風速比の関係

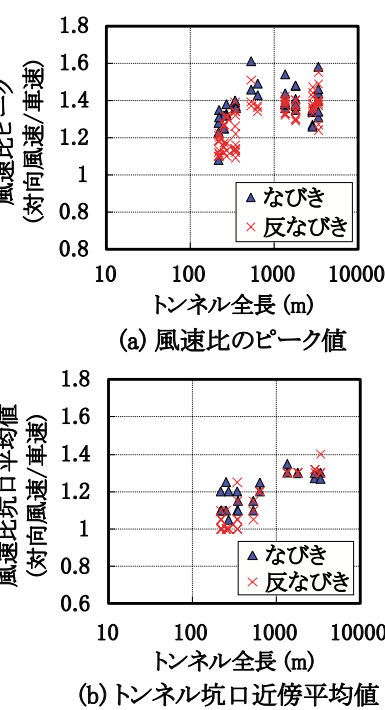


図14 トンネル長と風速比の関係

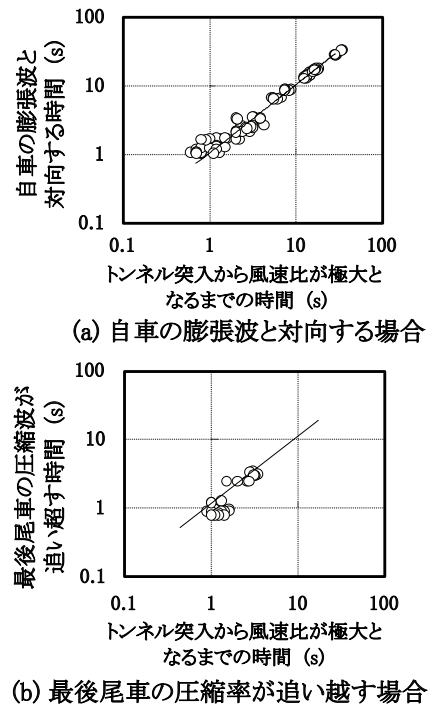


図15 風速比のピークが出現する時間

特集：鉄道力学

がパンタグラフを追い越していく際（図12中のピークA）、および自列車の先頭部がトンネルに突入した際に発生した圧縮波がトンネル出口で反射し、膨張波としてパンタグラフに対向する際（図12中のピークB、ピークC）に、それぞれ風速比が一時的に増加するものと考えられる。そこで、それぞれに相当するピークが発生する時間（トンネル突入時からの経過時間）を実測結果から求めるとともに、上記仮定によりピーク発生時間を予測し、両者をプロットした結果を図15に示す。図15(a)、図15(b)のどちらについても、実測値と予測値はよく一致していることから、舟体近傍の対向風速が極大となる位置を、列車速度、列車編成（パンタグラフ位置）、およびトンネル長をもとに推定することが可能であることがわかる⁶⁾。ただし、列車長に対してトンネル長が十分長くない場合には現象が過渡的となり、必ずしも上記の通りとはならないことに注意が必要である。

図16は、同じトンネルをほぼ同じ速度（300km/h）で走行したときの、舟体近傍における対向風の風速比を比較したものである。ただし、図16(a)はトンネル内に他列車が在線していない場合、図16(b)はトンネル内で対向列車とすれ違う場合を、それぞれ示している。対向列車の速度は300km/hである。この図より、トンネル内で対向列車とすれ違う場合には対向列車が形成した圧力波の影響が加わるため、風速比がより複雑に変化すること、対向列車がない場合に比べて風速比が全体的に大きくなること、などが確認できる。ただし、すれ違う瞬間には双方の列車が引き起こす流れが互いに相殺し合うため、風速比が1.1程度にまで低下していることも確認できる。

以上のように、舟体に対する対向風速はトンネル内走行時に増加し、トンネル入口近傍の平均値で評価すれば列車速度の約1.3倍となることがわかった。過去の研究でも、新幹線のトンネル内において測定した列車通過時のトロリ線の支持点押上量、ひずみを、パンタグラフ近傍の対向風速が列車速度の1.3倍になると仮定したうえでシミュレーションにより求めた支持点におけるトロリ線押上量、ひずみと比較すると、両者は比較的良好に一致することがわかっている⁷⁾。ただし、前述したとおり、舟体に対する対向風速はトンネル内で一定ではなく、列車速度の1.6倍程度にまで大きくなる箇所が存在するうえ、対向列車の有無がこうした対向風速の過渡的な特性に大きな影響を与えることに、十分留意する必要がある。

5. 結論

三孔管を内蔵した舟体を新幹線用パンタグラフに搭載し、舟体に対する対向風の風向・風速測定を実施した。その結果、舟体に対する対向風速はトンネル内走行時に増加し、トンネル入口近傍の平均値で評価すれば列車速度の約

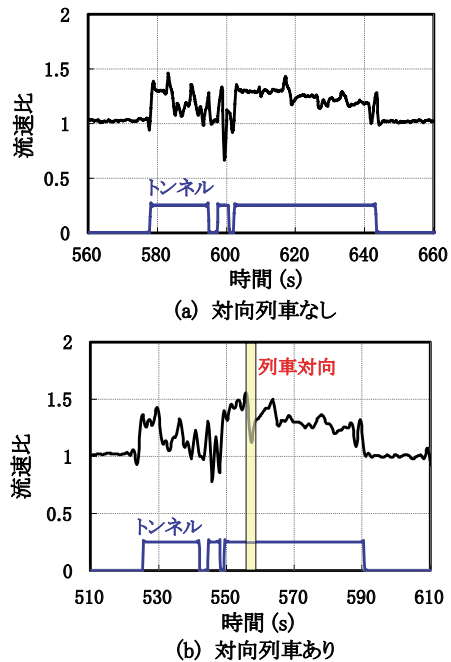


図16 対向列車の有無による風速比の相違
(反なびき条件 列車速度300km/h)

1.3倍になるが、過渡的には列車速度の約1.6倍程度に達すること、対向風速が極大となる位置は列車のトンネル突入時に形成される圧力波の振る舞いと関係づけられること、高速走行時の舟体に対する対向風の風向変化は全区間を通じて±2°程度を見込んでおけば十分であること、などがわかった。また、流れ場変動に起因するパンタグラフ揚力の変動を検討する際には、おおむね0.5Hz以下の流れ場変動を考慮すればよく、この周波数範囲であればパンタグラフ揚力は対向風速と高い相関を示すことがわかった。

文献

- 1) 森川, ほか4名; 新幹線列車のトンネル内高速走行に伴う集電系の空力現象, J-Rail 2000, pp.251-254, 2000
- 2) 高松, ほか3名; コブラ形ヨーメータの方向特性と取圧部形状, 機論B, 45巻393号, pp.672-680, 1979
- 3) 池田, ほか2名; 三孔管を内蔵する舟体によるパンタグラフ近傍における風向・風速測定法, 日本機械学会2008年度年次大会講演論文集(VII), pp.259-260, 2008
- 4) 池田, ほか2名; 走行するパンタグラフにおける舟体近傍風向・風速測定, 第16回鉄道技術連合シンポジウム(J-RAIL2009)講演論文集, pp.701-704, 2009
- 5) 山本; 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
- 6) 飯田, 前田; トンネル内圧力変動シミュレーション, 鉄道総研報告, Vol.4, No.7, pp.54-62, 1990
- 7) 甘利, ほか2名; トンネル入り口付近におけるトロリ線押上・ひずみ特性, J-Rail2010, pp.123-124, 2010