3703 走行するパンタグラフにおける舟体近傍風向・風速測定 Onboard monitoring of angle and velocity of flow around a panhead of a pantograph

〇正池田充(鉄道総研) 正光用 剛(鉄道総研) 正山下義隆(鉄道総研)

Mitsuru IKEDA, Takeshi MITSUMOJI, Yoshitaka YAMASHITA

Railway Technical Research Institute, 2-8-38, Hikari-cho, Kokubunji-shi, Tokyo, 185-8540

Lift force acting on a pantograph of a high-speed train affects current collection performance, but flow conditions in the vicinity of the pantograph has been poorly understood yet. In this paper, onboard monitoring technique of flow conditions around the panhead by using a three-hole probe is proposed. Furthermore, some results of onboard monitoring of flow conditions around the panhead of a Shinkansen pantograph are presented. This technique can be a powerful tool to clarify aerodynamic effects to current collection performance of pantographs.

Key Words : Railway, Pantograph, Measurement, Onboard monitoring, Flow field, Three-hole probe

1.はじめに

高速鉄道ではパンタグラフの集電性能に対する空気力の 影響が大きいため、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.しかし、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は少な く¹⁾,車両に搭載されたパンタグラフに作用する揚力を精 度よく見積もる上での障害となっている.そこで、パンタ グラフに三孔管を内蔵した舟体を搭載し、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、舟体に対す る相対的な流れ(対向風)の風向・風速測定を行った.

2. 舟体近傍の風向·風速測定方法

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)などが考えられる. しかし,300km/hを超える風速を測定する必要があること, 測定箇所近傍が25kVに加圧されていること,測定対象領 域へのトレーサの供給は難しいこと,などを勘案すると, 三孔管の使用が最も現実的である.そこで図1に示すよう に,三孔管を内蔵した舟体をバンタグラフに搭載し,パン タグラフ自体を風向風速センサとして利用することにした.

なお、パンタグラフが架線と摺動している場合、舟体は 架線に追従しながら上下方向に運動する.このとき、舟体 で計測される風向・風速は、車両に対する相対的な値では なく、あくまでも舟体に対して相対的な値であることに注 意が必要である.ただし、舟体に作用する空気力を見積も るためには、舟体に対して相対的な風向・風速がわかれば よい.

舟体に内蔵する三孔管としては,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 形状を図2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使用す る.三孔管の材質は,耐アーク性,耐熱性を考えてポリカ 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こと、二つ目は離線ア ークによる損傷を受けにくい場所であること、三つ目は取 り付け位置が流れ場のレイノルズ数依存性の小さい場所で あること、などである。舟体中央部は枠組との間に強い空 カ干渉が生じるため、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 頻度も高いことから、三孔管の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、なおかつ離線アークの影響を受けにくい場所として、 主すり板の端部付近(主すり板と補助すり板との突き合わ せ部付近)に三孔管を取り付けることとした。

3.風向・風速に対する測定感度

図2に示す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,風向・風速に対する測定感度検定のための風 洞試験を実施した³⁾.使用した風洞は鉄道総研の大型低騒



Fig.2 Shape of three-hole probe

[No.09-65] 日本機械学会第16回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集〔2009-12.2~4. 東京〕

音風洞(噴出口 3m×2.5m, 最高風速 400km/h)である.パ ンタグラフの作用高さを RL(レール面上高さ)4800mm 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. これを上から順に Cp_u, Cp_c, Cp_1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流れ場は水平かつ 一様とみなしてよいため,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.

パンタグラフへの迎角の与え方は、パンタグラフの架台 を傾けることによって行った.ただし、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で、 上枠のバランスロッドを調整して舟体だけに迎角を与えた.

まず,なびき条件における Cp_u の迎角依存性を 220~350km/h の範囲で計測した結果を図 3 に示す.風速 依存性はほとんど認められない. Cp_c, Cp_1 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 き条件でも各圧力係数の速度依存性はほとんど認められな い.したがって,この風速範囲では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.

$$Kd = (Cp_c - Cp_l) / (Cp_c - Cp_u)$$
(1)

$$Kv = 1 / (Cp_c - Cp_l)$$
(2)

なびき条件における方向特性係数 Kd, Kv を求めた結果を 図 4~5 に示す. このうち Kd は、迎角を定めるための係数 である. 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 が求められる. 一方 Kv は、Kd により定めた迎角 α から次式によって流速を求 めるための係数である.

$$v = \sqrt{2Kv(Cp_c - Cp_l)/\rho}$$
(3)

ただし、 ρ は空気の密度、vは流速である. 図 5 より動圧 変化に対する圧力孔の差圧($Cp_c - Cp_l$)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 値はビ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、十分実用的である.

4.三孔管がパンタグラフ集電性能に与える影響

まず、三孔管,および圧力計測用チューブ(内径 1.6mm) の取り付けがバンタグラフ揚力に与える影響を調べた.そ の結果を図6に示す.これは、なびき条件,標準作用高さ における揚力測定結果である.これより、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ことがわかる. ただし、その低下量は300km/hにおいて約7Nであり、集 電性能に与える影響は小さいと考えられる.

次に、離線アークが三孔管に与えるダメージを調べるため、鉄道総研所有のパンタグラフ総合試験装置を用い⁴⁰、 パンタグラフに AC400A の電流を通電しながら速度 300km/h で摺動させる試験を 60 分間実施した. 十分な頻 度で離線アークを発生させるため、模擬架線には両振幅 24mm、周波数 4.3Hz の上下振動を与えた. このときの離 線率は 33%であった. 60 分間摺動させた後のすり板摺動 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 管の熱変形やアークによる損傷は全く認められなかった.











5.現車走行試験

三孔管を内蔵した舟体を新幹線の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.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,圧力孔から 微差圧計まで圧力を導くチューブの長さが 2m以上あり, 高応答の測定は望めないため,風向・風速の測定波形には 5Hz のローパスフィルタを施した.なお,当該パンタグラ フは碍子オオイ内に設置されている.

5.1. 中腰条件における風向・風速測定結果

まず, 揚力測定のために舟体上面を RL4800mm で固定 した, いわゆる中腰姿勢のパンタグラフにおいて風向・風 速測定を実施した. 図 7 は, 反なびき条件における風速測 定結果を示したものである. 列車速度ならびにトンネル位 置マーカも合わせて示している. これより, 舟体に対する 対向風の風速は, 明かり区間では列車速度にほぼ等しいが, トンネル区間では列車速度に対し増速することがわかる.

これをより詳細に見るため,対向風風速の列車速度に対 する比(風速比)を求め、風向(迎角)とともに図 8(反な びき条件)および図 9(なびき条件) に示した. ただし,風 向は吹き上げる向きを正とした.反なびき条件の場合,各 トンネルともその長さによらず流速比の最大値が約 1.5 程 度となること,比較的長いトンネルでは定常的な流速比の 値が 1.3~1.4 となること、などがわかる.風向は、明かり 区間で約-0.7°,トンネル区間では約-1°であった.一方 なびき条件の場合、トンネルにおける流速比の最大値が約 1.5 程度に達することは反なびき条件と同様であるが、比 較的長いトンネルにおける定常的な流速比の値は反なびき 条件よりも小さくなっている.また,明かり区間における 流速比は1よりやや大きくなっている.風向は、明かり区 間ではほぼ 0°, トンネル区間では約+0.3°であった.以 上のように、舟体に対する対向風の性状はなびき条件と反 なびき条件とでは異なっていることがわかる.

次に、中腰姿勢で計測した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、および舟体への対向風の風速 に対してプロットした場合を比較したものを図 10 に示す. ただし、各信号波形に 0.2Hz のローパスフィルタをかけた うえで、速度-揚力のプロット点を求めている.パンタグ ラフ揚力の測定は、パンタグラフを中腰姿勢で固定するた





めに舟体と台枠の間に張り渡したワイヤの張力をロードセ ルにより計測することによって行った. 揚力を列車速度に 対してプロットした場合,速度に対する揚力のばらつきは 大きく,その速度依存性は不明確である.これに対して揚 力を舟体近傍の対向風速に対してプロットすると,揚力の 速度依存性を明確に読み取ることが可能となるうえ,風洞 試験で得た揚力の速度特性ともよく一致する.このように, 現車で得たパンタグラフの揚力測定結果を評価するうえで, 舟体における風向・風速測定は有用である.



Fig.8 Velocity ratio and angle of attack of the relative flow against the panhead fixed at rail-level of 4800mm (Knuckle-downstream direction)



Fig.9 Velocity ratio and angle of attack of the relative flow against the panhead fixed at rail-level of 4800mm (Knuckle-upstream direction)





5.2. 摺動走行における風向・風速測定結果

トロリ線と摺動しているパンタグラフにおいて測定した、 舟体に対する対向風の流速比と風向を図 11 に示す、この 図は反なびき条件における測定結果を示したものである. 図8に示した中腰・反なびき条件における測定結果と比較 すると、トンネル区間における流速比が全体的に小さくな っていることがわかる.同様に風速についても図8と比べ てみると、中腰状態のときよりも舟体近傍の対向風はより 水平に近い流れとなっていることもわかる.

架線と摺動するパンタグラフの舟体位置は、中腰状態の 舟体位置に比べて 200~300mm 程度高い. したがって、中 腰状態にある舟体の方が境界層のより底部側に位置してい ることになる、明かり区間とトンネル区間とでは車両屋根 上の境界層分布自体が変化するため,中腰状態にある舟体 まわりの流れ場の方が明かり/トンネルの影響をより顕著 に受けるものと思われる. そのため、中腰状態の方が摺動 状態に比べてトンネル走行に伴う流速比や風向の変化がよ り顕著に現れたと考えられる.

次に、比較的長いトンネルを走行する際の、舟体に対す る対向風の風速比および風向の測定結果を図 12 に拡大し て示す、図 12(a)はトンネル内に対向列車がない場合、図 12(b)は対向列車がある場合の結果である.一般に,列車 のトンネル突入時, あるいはトンネル退出時には, 列車ま わりの流れ場は過渡的に変化する.ただし、トンネル突入 に伴う風向変化はせいぜい 0.5°程度であるが、トンネル 退出時に認められる風向変化は 1°以上であり、トンネル







退出時の方がパンタグラフは空力的に不安定な状態となる 可能性があることがわかるこまた、このような過渡的な流 れ場変化に伴い、トンネル突入時には風速比が増加する. しかしながら図 12 を参照すると、流速比が最大となるの はトンネル突入時であるとは限らないことがわかる。これ は長いトンネルの場合,列車がトンネルに突入する際に形 成された圧力波がトンネル入口と出口の間を行き来するが、 その波面と列車がすれ違ったり、あるいは追い越したりす るタイミングで流速比が不連続に変化するためである. さ らに、図 12(b)のようにトンネル内で対向列車とすれ違う 場合,対向列車が形成した圧力波の影響も加わるため風速 比は複雑に変化するうえ、対向列車のない場合に比べて風 速比が全体的に大きくなる.ただし、すれ違う瞬間には双 方の列車がトンネル内に引き起こす流れが相殺され、流速 比は1程度に低下していることが確認できる.

なお、今回の測定結果より、明かり・トンネルなどの設 備条件、あるいは列車走行方向などを勘案しても、高速走 行時では舟体に対する対向風の風向変化は±2°程度を見 込んでおけば十分であると思われる.

6.まとめ

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、 走行中の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の風速は、トンネル内走行 時には最大で列車速度の約 1.5 倍に達すること、風速が最 大となるのはトンネル突入時であるとは限らないこと、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, パンタグラフの揚力を舟体に対する対向風 の風速により整理すると良好な相関を示すことを確認した.

参考文献

- 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, (2000.12)
- 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, (1979.5)
- 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, (2008.8)
- 4) パンタグラフ総合試験装置, RRR, Vol.59, No.11, pp.31, (2002.11)

Angleofattack

Velocity ratio

Tunne

580

600

Passing train

