

# 3413 噴流によるパンタグラフ舟体の揚力制御の試み

## Lift control of high-speed pantograph using blowing jets

○ 池田 充(鉄道総研) 吉田和重(鉄道総研) 鈴木昌弘(鉄道総研)

Mitsuru IKEDA, Kazushige YOSHIDA, Masahiro SUZUKI,  
Railway Technical Research Institute, 2-8-38, Hikari-cho, Kokubunji-shi, Tokyo, 185-8540

Aerodynamic characteristics of high-speed pantograph, such as lift force and aerodynamic noise, are very important to maintain steady current collection performance and environmental compatibility. We attempt to control the lift force of panhead by blowing jets from its surface. To evaluate this method, we performed a wind tunnel test of a 2-dimensional panhead model in which a jet blowing device is installed. The experimental results show that lift force of the panhead can be controlled by blowing jets. Furthermore, aerodynamic noise generated by the frequent eddies in the wake of the panhead can be reduced by blowing jets.

**Key Words:** flow control, railway, pantograph, lift force, aerodynamic noise, jet

### 1.はじめに

高速鉄道用パンタグラフは、空気力学的影響を強く受ける。特にパンタグラフに作用する揚力は、パンタグラフと架線との接触力に影響を与えるため、集電性能を決定づけるパラメータの一つとなっている。

パンタグラフの各部材に作用する揚力のうち、舟体部に作用する揚力は接触力に対する寄与が大きく、舟体の揚力適正化は非常に重要である。しかし最近では環境対策の一環として舟体部から発生する空力音の低減が強く要請されており、これを目的として舟体断面形状平滑化が進められていることから、揚力適正化は非常に難しい作業となっている。

ところで近年、物体の空力特性をアクティブに制御する様々な試みがなされている。もし、舟体の定常揚力をアクティブに制御する事ができれば、空力音低減に重点をおいた舟体設計が可能となる上、すり板摩耗に伴う揚力特性変化を考慮する必要もなくなることから、一層の空力音低減と安定した揚力特性の実現が期待できる。さらに将来的には制御の応答性を高めることによって接触力制御のためのアクチュエータとして用いることも考えられる。

空力特性をアクティブに制御する手法として、最近ではMEMSを用いた手法が盛んに研究されている<sup>1)</sup>。しかし、これをパンタグラフに適用するためには、耐久性や動力供給などの面でまだ課題が多いと思われる。そこでまず、より実現性の高い手法として、物体表面から噴流を吹き出す方法<sup>2)</sup>をパンタグラフの舟体に適用することを検討することとし、噴流吹き出し機構を有する舟体2次元模型を製作して風洞実験を行った。

### 2.噴流による流れ場制御

物体表面から噴流を吹き出す、あるいは吸い込むことによる空力特性制御を行う場合、渦放出周波数と同程度以上の周波数で噴流を周期的に吹き出す(もしくは吸い込む)ことがよく行われている。これは、少ない動力で物体近傍乱流場の準秩序構造を制御するためには、その構造と直接干渉できるような時間スケールを有することが求められる<sup>3)</sup>からである。ただし、このような高い応答性を有する噴流吹き出し機構をパンタグラフの舟体に内蔵するこ

とは、現実にはかなり難しい。しかし、たとえ制御の効果には限界があるとしても、準定常的な噴流の吹き出しによる揚力の定常成分もしくは低周波成分の制御が可能であれば、十分実用性があると思われる。そこで本研究では、舟体の後縁部近傍に設けた噴出孔から定常的に噴流を吹き出すことにより、舟体の定常揚力を制御することを目指すこととした。

### 3.供試体

本研究では、供試体として舟体の2次元模型を用いた。供試体は図1示すように、幅(翼弦長)120mm、厚み55.13mm、軸方向長さ600mmの一様断面を持つ。この断面形状は、CFDと最適化手法を組み合わせた手法<sup>4)</sup>により解析的に算出したもので、舟体の迎角変化( $\pm 3^\circ$ )およびすり板の状態変化(新品と摩耗)を考慮した上で揚力変動が最小となるように最適化したものである。ただし形状は上下対称とし、舟体長さ最小厚みを制約条件として与えている。

供試体の後縁部近傍には、図1のように噴流を吹き出すための噴出孔を全部で56個設けている。噴出孔は内径6mmの円形で、舟体の上面、および下面に20mmピッチ(スパン方向)で配置される。噴出孔から噴流を吹き出すための空気配管は、噴出孔8個で1つのユニットを形成しており、計7ユニットある。各ユニットとも1本の内径6mmのチューブによって模型外部の空気源に接続される。ただし、空気を通過する際の圧損によって各噴出孔からの噴流の流量にばらつきが生じないように、空気源から各噴

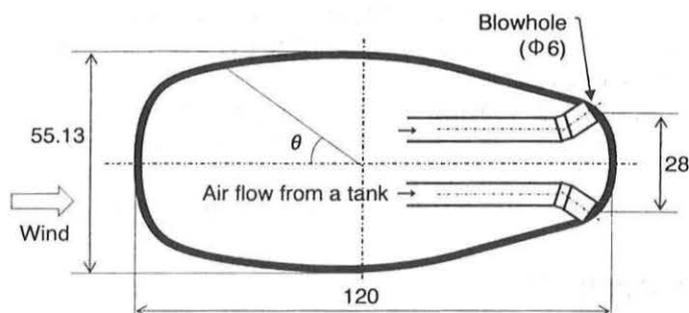


Fig. 1 Cross section of the panhead model

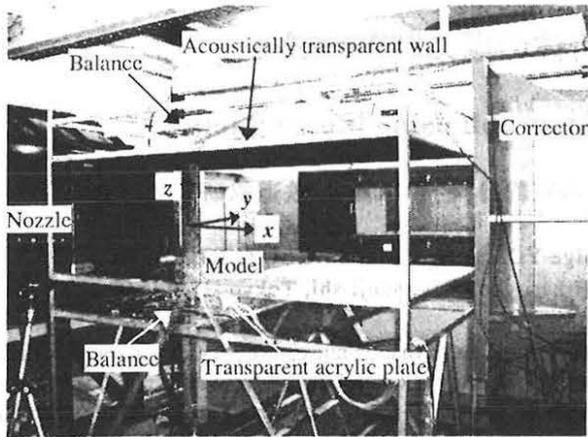


Fig. 2 Experimental apparatus

出孔までの流路距離が一定になるようにした。供試体のスパン方向中央断面(噴出孔と噴出孔の中間部に相当)には静圧孔を45点設け、表面圧力分布の計測ができるようにした。静圧孔には内径0.5mm 外径1.0mmの真鍮管を使用している。

#### 4. 実験装置

図2に実験装置を示す。風洞は鉄道総研の小型低騒音風洞を使用した。吹出し口寸法は横720mm、縦600mmで、吹出し口先端から下流側500mmの位置に、供試体を軸方向が鉛直方向に向くように設置した。風洞形態は開放胴であるが、計測部の風路下面側および上面側には端版を設け、流れの2次元性を確保するようにした。端版の大きさは幅1200mm、風軸方向長さ2000mmである。下面側の端版は、PIV測定が可能となるように透明なアクリル板(厚さ10mm)とした。一方、上面側の端版は無反射音響条件を実現するため、音響透過板(アイオン製ベルイータFB(D)、厚さ10mm、気孔径300 $\mu$ m、気孔率91%)とパンチングメタル(開口率50%)を組み合わせた構造とした。

供試体の上端と下端は3分力計により把持する構造となっており、供試体の2分力(抗力、揚力)を測定できるようにした。ただし供試体と端板とが直接接触すると空気力の計測が不可能になるため、供試体と端板との間に間隙を設け、両者が接触しないようにしている。圧力係数算出に用いる基準圧は、吹出し口先端から下流側500mm位置の下面側端板中央に設けた静圧孔で計測した。

噴出孔への空気供給は、0.8MPaの圧縮空気で満たされた容積34lのエアタンクからレギュレータを介して7本のエアチューブ( $\phi$ 6mm)に空気を送ることにより行った。このチューブはそれぞれ7組の噴出孔ユニットに接続されている。噴流の流量調節はレギュレータの圧力を調整することによって行うが、今回の試験ではレギュレータ圧力を0.05MPaに設定した。

試験風速は150km/hとした。また、空力係数算出のための代表長さ、代表面積をそれぞれ、0.12m(舟体の翼弦長)および0.072m<sup>2</sup>(舟体長さ $\times$ 軸方向長さ)とした。風速150km/hにおけるレイノルズ数は $3.3 \times 10^5$ である。

#### 5. 噴流の流速

まず、供試体の噴出孔から吹き出す噴流の流速を把握するため、熱線流速計による流速測定を行った。測定は

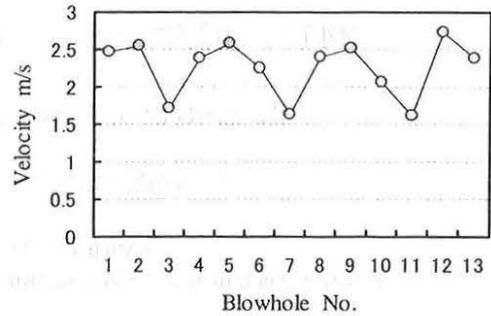


Fig. 3 Velocity of jet near blowholes

風洞を停止させた状態で行い、噴流の吹き出しを行ったときの、噴出孔の開口部中心から1.5mmはなれた位置における流速を1プローブにより測定した。この際、トラバースにより熱線流速計をスパン方向に移動させ、舟体上面側の各噴出孔の噴流流速を順次測定した。

図3に測定結果を示す。13箇所の噴出孔における噴流流速を示しているが、これらを平均すると2.3m/sであった。したがって、風速150km/hの主流に対する噴流流速の比は0.06である。また、噴流の流速が周期的に変動しているが、これは既述のように8個の噴流孔(片側あたり4個)が一つのユニットを構成しているため、ユニット内における圧損の差によって周期的な変動が生じたものである。

#### 6. 空力特性測定結果

図4~5に、風速150km/hで測定した供試体表面の静圧分布を示す。この図は、模型中心と各静圧孔を結ぶ直線が風軸となす角度 $\theta$ によって静圧孔の位置を示しており、 $\theta=0$ が前縁、 $\theta=180^\circ$ が後縁に対応する(図1)。なお、図4は舟体の両面とも噴流吹き出しを行った場合、図5は舟体の下面側( $180 < \theta < 360$ )の噴出孔のみ噴流の吹き出しを行った場合を、それぞれ示している。

この図から、舟体の両面で噴流の吹き出しを行うと $\theta=30 \sim 330^\circ$ の広い範囲にわたって表面静圧が増加することがわかる。一方、舟体下面側( $180 < \theta < 360$ )のみ噴流の吹き出しを行った場合には、舟体下面側のみ噴流の吹き出しによる静圧増加が認められる。したがって、舟体の上面側と下面側で非対称な噴流吹き出しを行うことにより、舟体の定常揚力を変化させることが可能であることがわかる。

次に、風速150km/hにおいて舟体下面側のみ噴流の吹き出しを行ったときの舟体の空力係数変化を、3分力計測定結果および静圧分布測定結果からそれぞれ求めた結果を表1に示す。揚力係数の変化は、3分力計および静圧分布のどちらで評価しても約0.04である。したがって、舟体の全長(軸方向長さ)を1mとし、300km/hにおいてこのような制御を行ったときに期待される揚力変化量は約20Nである。今回は、噴流の流量を確保するためにレギュ

Table 1 Effect of blowing jets on aerodynamic characteristics

	Estimated by balances	Estimated by static pressure
$\Delta C_L$	0.036	0.035
$\Delta C_D$	-0.001	-0.002

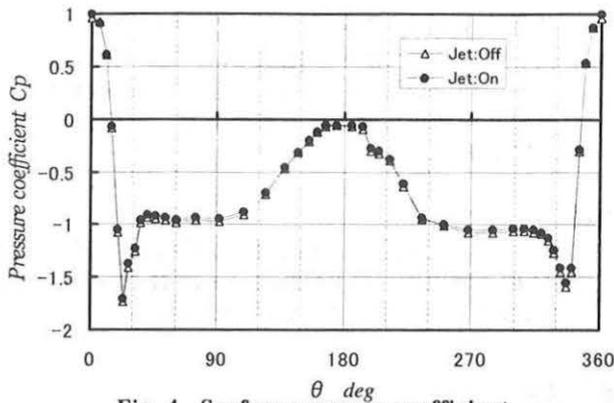


Fig. 4 Surface pressure coefficient  
(with/without jets from both sides of the model)

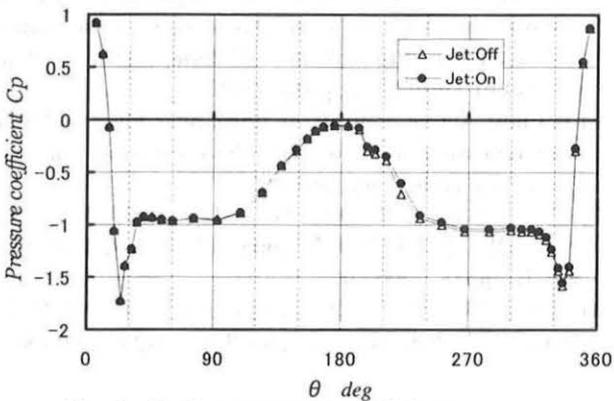


Fig. 5 Surface pressure coefficient  
(with/without jets only from the lower side of the model)

レータの圧力を 0.05MPa 程度にしか上げることができなかったが、さらに高い圧力を噴流に与えることにより、揚力制御の効率を増すことが可能であると考えられることから、本手法は十分実用的なものであるといえる。ただし、抗力係数については噴流吹き出しによる低減効果はほとんど認められない。

## 7. 空力音測定結果

すでに述べたように、舟体の空力音低減が強く要請されている。前章では噴流の吹き出しによって舟体の空力係数を制御することが可能であることを述べたが、空力特性の制御が可能なのであれば、空力音低減に対する効果も期待できる。そこで、噴流吹き出しの有無が発生空力音にどのような変化をもたらすのかを調べるため、空力音測定を行った。マイクロホンは(x,y,z)=(0,-2000,-300)に設置した。

まず図 6 は、風速 150km/h において噴流の有無による空力音比較を行った結果である。なお、噴流の吹き出しは舟体の両面で行っている。噴出孔が存在するだけ(噴流の空気源圧力 0)の場合、430Hz に顕著な狭帯域音の発生が認められる。この音は後述するように、舟体後流に発生する交番渦によるものである。また 3kHz にも狭帯域音が認められるが、これは噴出孔で発生する共鳴音である。これに対し、噴流の吹き出しを行うと 430Hz の狭帯域音のピークレベルは 5dB 程度低下する。これは、噴流の吹き出しによって後流の交番渦が弱くなったことを示している。ただし、1kHz 以上の広い周波数において噴流吹き出しによる音圧レベル増加が認められる。

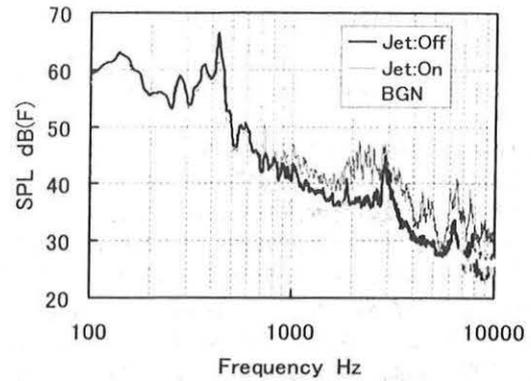


Fig. 6 Sound pressure level at 150km/h  
(with/without jets from both sides)

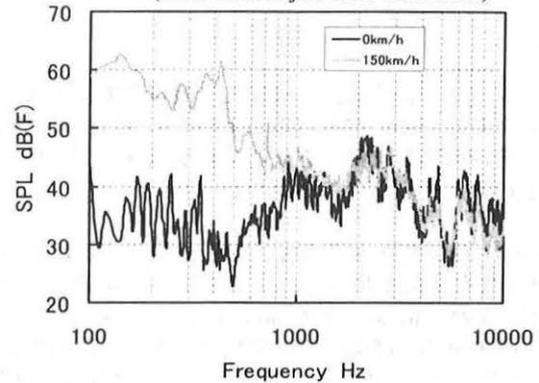


Fig. 7 Sound pressure level of the test model  
with blowing jets from both sides

図 7 は、噴流の吹き出しを風速 0 および 150km/h において行い、それぞれの空力音を比較したものである。この結果から、風速 150km/h で噴流を吹き出した場合に認められた、1kHz 以上の音圧増加は噴流そのもの、もしくは噴出孔内部で発生する音であり、噴流と流れ場との相互作用により発生する音ではないことがわかる。したがって、噴流自身の性状(乱れ率など)や噴出孔の開口部形状の改良、あるいは噴流吹き出しのための空気配管の見直しにより、騒音低減を図る必要がある。

なお、舟体の片面側のみから噴流を噴出させた場合、430Hz の狭帯域音は約 10dB 低減する。これは、非対称な噴流の吹き出しによって後流のせん断層の不安定性が一層弱められるためと思われる。

## 8. PIV による流れ場測定結果

PIV により供試体の後流領域の流速分布を測定した。本実験で用いた PIV 装置は TSI 社製の 2 次元 PIV システムであり、計測のサンプリング周波数は 4Hz である。

まず図 8 に、噴流の吹き出しがない場合の流れ場測定結果を示す。風速は 150km/h であり、任意時間における速度場、レイノルズ分解によって求めた変動流速場、および渦度場を図示している。ここでレイノルズ分解とは次式で定義されるもので、流れ場に含まれる小さなスケールの構造を評価するために用いられる手法の一つである。

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}' + \mathbf{U} \quad (1)$$

$\mathbf{u}'$  がレイノルズ分解によって得られる変動流速ベクトルであり、 $\mathbf{u}$  は瞬時流速ベクトル、 $\mathbf{U}$  は平均流速ベクトルである。

図8より、舟体の後流に交番渦の存在が認められる。この交番渦の間隔は約75mmであることから、前章で述べた430Hzに現れる狭帯域音はこの交番渦により発生していることがわかる。

次に舟体上下両面の噴出孔から噴流吹き出しを行った場合の流れ場の様子を図9に示す。この図から、噴流の吹き出しを行うと後流の交番渦の巻き込みが弱くなっている様子がわかる。したがって、430Hzの狭帯域音の減音の理由は、交番渦の強い巻き込みを抑制する効果を噴流の吹き出しがもたらしたためであることがわかる。これは、噴出孔からの噴流によって後流のせん断層に弱い擾乱が加わり、2つのせん断層の間の相互作用が大きな空間スケールで生じにくくなるためと思われる。

## 9. 結論

パンタグラフの舟体表面に噴出孔を設けて噴流を吹き出すことにより、舟体の空力特性および空力音特性の制御を試みた。噴流吹き出し機構を有する舟体2次元模型を用いた風洞試験の結果、以下のことがわかった。

- (1) 舟体の片面側のみ噴流の吹き出しを行うことにより、揚力係数を変化させることができる。今回確認された揚力係数の変化は、風速300km/hにおいてスパン長1mの舟体の揚力を約20N変化させることに相当する。
- (2) 噴流の吹き出しを行うと、舟体後流の交番渦に起因す

る狭帯域音のピークを低減することができる。

- (3) 噴流の吹き出しに伴い、1kHz以上の広い周波数で音圧レベルの増加が認められる。この音は噴流自身もしくは噴出孔内部から発生する音であり、その低減は今後の課題である。

## 謝辞

本実験の実施にあたり、東京農工大学 M2 宝渦寛之氏、同 M1 伊東雅史氏、同 B4 Syed Anees Haider Bukhari 氏に多大な協力を得た。ここに感謝の意を表す。

## 参考文献

- 1) T.Yoshida, et al.; Toward development of feedback control system for wall turbulence with MEMS sensors and actuators, Proc of the 3<sup>rd</sup> Symposium on Smart Control of Turbulence, pp115,2002
- 2) H.Choi; Active controls of flows over bluff bodies for drag reduction, Proc of the 4th Symposium on Smart Control of Turbulence, pp1,2003
- 3) 笠木, 鈴木; マイクロデバイスによる革新的乱流制御への期待, 日本機械学会 2002 年度年次大会講演論文集(VIII), pp85, 2002.9
- 4) 鈴木; 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), pp325, 2003.8

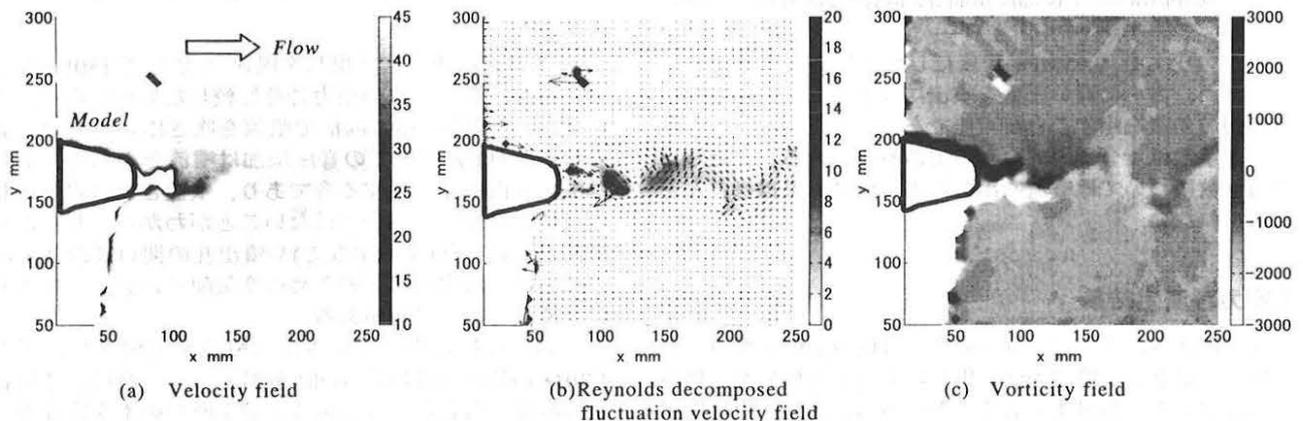


Fig. 8 Instantaneous flow fields behind the model without jets

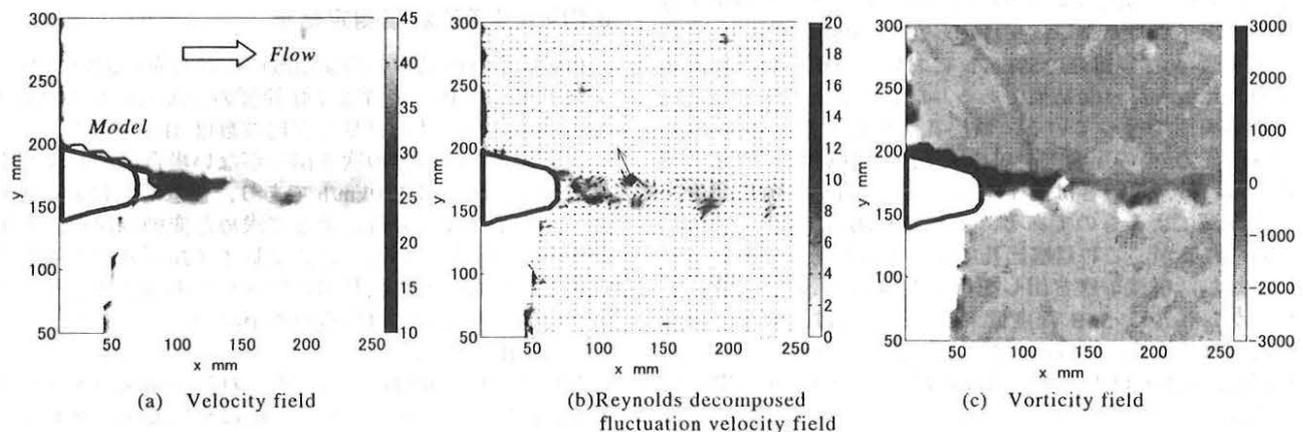


Fig. 9 Instantaneous flow fields behind the model with jets from both sides