A101

感圧塗料による高速列車の後尾部流れの可視化

小寺 健幸, 山下 太郎, 浅井 圭介, 永井 大樹 (東北大学), 森田 潔 (日立製作所)

Pressure-Sensitive Paint Measurement of Flow around High-Speed Trains with Different Tail Shapes

Takeyuki KODERA, Keisuke ASAI, Hiroki NAGAI, Taro YAMASHITA and Kiyoshi MORITA

ABSTRACT

Optimizing the performance and increasing the comfort of high-speed trains require the knowledge of aerodynamic effects of a train shape. One of the most critical problems is a compression wave caused by a train entering a tunnel. This noise mainly depends on the cross-sectional area distribution of a train nose. On the other hand, the aerodynamic drag, the stability for side wind, and the low-frequency vibration are attributed to tail shapes. In this study, we studied the effects of train tail shapes on the flow field experimentally. Two models having the same cross-sectional area distribution but with different tail shapes were tested in a low-speed wind tunnel. To analysis the flow field around the model, we used pressure sensitive paint and oil flow techniques. As a result, we could identify the effects of tail shapes for pressure drag and cross wind stability.

Keywords: High speed train, Tail shapes, Pressure-Sensitive Paint, Oil flow.

1. 緒 論

近年、新幹線の速度向上に伴い空気力学上の様々な問題が重要視されている。代表的なものとして、空気抵抗やトンネル微気圧、横風安定性といったことがあげられる。最新の新幹線の形状はこれらを考慮して決められている。

中でもトンネル走行時に発生する微気圧波は、近隣への騒音や振動の原因となるため大きな問題となっていた。この微気圧波の発生は先頭車両形状に依存する¹⁾。この影響を軽減するため、現在では最適な先頭車両の断面積分布が求められており、新幹線にも適用されている。

しかし一方では、抵抗や横風安定性には後尾部車両の形状が大きく影響することが知られている。一般的に、新幹線の先頭車両と後尾部車両は同一形状であるので、微気圧波の低減を考慮に入れた断面積分布が後尾部車両にも反映されることになる。つまり、この制約条件内で後尾部車両に働く抵抗や横風に対する影響が少なくなるように、車両形状を決めることが設計上の重要な課題となっている²⁾。

このような課題を解決する上で、車体面上に働く力(表面圧力)を計測することは重要である。

そこで本研究では、近年発達著しい感圧塗料 (Pressure-Sensitive Paint, PSP) 計測技術を用いて同一断面積分布で後尾部形状の異なる二種類の車体について風洞実験を行った。その結果から、形状差異が車体に

どのような影響を及ぼすかを調べた。

2. 計測方法

2.1 感圧塗料 (Pressure-Sensitive Paint, PSP)

PSP は、色素と高分子からなる分子センサである。これを用いる利点としては、圧力測定は従来の静圧孔のような点計測ではなく面計測ができる、また、非接触計測なので流れ場を乱さない等がある。

感圧塗料 (PSP) の原理を以下にまとめる。PSP で用いられる色素は、励起光が照射されるとエネルギーを与えられ、より高いエネルギー準位に励起されるが、そのエネルギーを蛍光や燐光といった発光で失い、基底状態に戻る。一方、周りの酸素分子と反応しても励起エネルギーは失われ、この場合、発光は生じない。これを酸素消光と言う。

酸素濃度は分圧に比例し、空気中の酸素分圧は常に静圧の 21% に等しいので、この性質により局所的な酸素濃度とその点の圧力が対応付けられる。一般に、発光強度 I と圧力 P は以下の Stern-Volmer 関係式で表される。

$$\frac{I_{ref}}{I} = A(T) + B(T) \frac{P}{P_{ref}} \quad (1)$$

ここで P_{ref} は基準状態の圧力 (既知の圧力、本実験では大気圧)、 I_{ref} は基準状態の発光強度 (P_{ref} での発光強度)、 T は温度である。この関係より、PSP を塗布した模型表面に励起光を照射した際の PSP の発光強度を計測すること

で表面圧力を求めることができる。このときの計測模式図をFig.1に示す。

Fig. 1 Schematic of PSP measurement

本実験では、PSPとして、ISSI社 (Innovative Scientific Solutions, Inc.) のBF405を用いた。これは、励起波長が405[nm]であり、発光波長は、感圧色素が650[nm]、基準色素が550[nm]である。模型には、発光強度を強くしSN比を高めるために、最初に白色の下地塗料を、さらには温度による発光強度の変化を抑えるためにBase Coatを塗布し、その上からPSPをスプレーで塗装した。

2.2 Oil Flow

Oil Flowとは模型表面に油と顔料の混合物を塗布し、流れにさらすことで流体のせん断力によって現れる縞・筋などの模様から、物体表面極近傍付近の流れの方向を調べる方法である。

今回の実験では模型全面に混合物を塗布し、流れの方向を調べた。用いた混合物は油としてシリコン油50ml、顔料に酸化チタン25g、表面活性にオレイン酸1.2ml、適度な粘性を持たせるために油とは別に流動パラフィン1.1mlを用いた。

なお、可視化するにあたっては混合液の液垂れによる干渉を防ぐために上面、側面とも先頭部、中間部、後尾部とそれぞれにわけて実験を行った。

3. 実験模型

今回の実験で用いた模型をFig.2に示す。これらの模型は、長さ292mm、高さ27.1mm、幅28.2mmと共に同じである。ただし先頭部・後尾部車両の形状は、断面積分分布は等しいが、形状はそれぞれ異なるもの(模型1、模型2)を使用した。模型1の特徴は幅が全長を通して一定であり、高さのみが変化するくさび形状である。一方、模型2は模型中間部の高さとの基準と同じ比になる形状である。二つの模型の模式図をFig.3に示す。なお両模型にはPSPの温度補正のため後尾部付近に熱電対を7点、PSP結果との比較のため静圧孔を8点設置した。図中ではそれぞれ中空青丸、緑丸で示した。

模型はまず、二つの足に設けたネジ穴を用いてアクリル円板($\phi=250\text{mm}$)に固定し、さらにその円板ごと、風洞測定部に設置した地面版に固定した。このアクリル円板を回転することによってヨー角 ϕ を0degから

90degまで5deg間隔で変更することができ、横風を受けた状態を模擬することができる。今回の実験はヨー角 $\phi=0, 30\text{deg}$ で実験を行った。

(a) model 1 (b) model 2

Fig. 2 Overview of model

(a) model 1

(b) model 2

Fig. 3 Schematic Illustration of model

4. 実験装置

今回の実験に用いた風洞は東北大学基礎実験用低速風洞(T-BART)³⁾である。計測セットアップの概略をFig.4に示す。

Fig. 4 Experimental setup for PSP measurement

この風洞は大気吸い込み型であり、通風による温度上昇が比較的小さいため PSP を用いた低速領域での実験に適している。今回の流速は 50m/s で一定とした。測定部は密閉型であり、寸法は 300mm×300mm×760mm である。測定部の形状が直方体で測定面が 4 面存在する。その測定壁としてアクリル壁を使用しているの上下左右からの光学計測が可能である。

PSP 計測では使用塗料 BF405 に対応して励起光に UV LED(中心波長 395nm)を 2 基、光検出器として冷却 CCD カメラ(16bit,1024×1024pixels)を用いた。CCD カメラには、感圧色素の発光の中心波長 650nm だけを検出できるよう 650±20nm のバンドパスフィルタを装備した。

5. 結果および考察

5.1 ヨー角 $\phi=0\text{deg}$ の場合

まず、PSPによる圧力分布の計測結果をFig.5 に示す。図は上面から模型後半部分のみを捉えた画像であり、圧力係数 C_p に換算した値で表示してある。流れの方向は左から右である。この結果からわかることは、両模型とも後尾部開始点付近に負圧領域が存在することである。これは模型 1 のほうが大きい。さらには、模型 1 のみ後尾部稜線に沿い負圧領域が発達している。これは模型 2 には見られない。

次に後尾部の Oil Flow の可視化結果を Fig.6 示し、PSP の結果と対比する。両模型とも、後尾部開始点から少し後方に向かったところに付着の様が見られる。これは中間部からの流れが後尾部開始点付近で剥離し、再び付着したことで生じたと考えられる。Fig.5 の PSP の結果に見られた負圧領域は、この剥離により生じたものと考えられる。また Oil Flow の結果から、模型 1 では稜線から中心線に向かい発達する剥離の様が存在することがわかる。これは模型 2 には見られない。この剥離の様は稜線からと、中心線からの流れがぶつかることにより生じ、さらに発達している。Fig.5 の PSP の結果ではこの付近が負圧領域となっていることから、この部分には縦渦が存在すると考えられる。

以上から $\phi=0\text{deg}$ の時、中間部からの流れが剥離することにより生じる負圧領域は模型 1 のほうが大きく、また縦渦の存在により後尾部上面に生じる負圧領域は模型 1 のほうが大きいことになる。以上を総合すると空気抵抗が大きいと考えられる。

5.2 ヨー角 $\phi=30\text{deg}$ の場合

次にヨー角 $\phi=30\text{deg}$ の場合の PSP の結果を Fig.7 に示す。この結果からまず、両模型とも中間部では風上側から風下側に向かって発達する大規模な負圧領域が存在することがわかる。一方、後尾部では中間部とは逆に風下側から風上側に向かい負圧領域が発達していることがわかる。

これらの結果をFig.8、9に示したOil Flowの結果と対

Fig. 5 Pressure distribution of upper surface

Fig. 6 Oil flow visualization of upper surface

Fig. 7 Pressure distribution of upper surface

比して考える。

まず、Fig.8の結果から両模型とも左上から斜めに剥離の様、さらにその下方に付着の様が発達しているのが見られる。これは風上側からの流れが稜線で剥離した流れが付着し、さらに風上側に向かった後に剥離したものと考えられる。つまりこれは大規模な剥離渦が発達しているものと考えられる。PSPに見られた負圧領域はこの剥離渦に対応していると考えられる。このような流れは杉浦⁹⁾が行った実験にも見られる。Fig.9の結果では、

Fig. 8 Oil flow visualization of upper surface in the middle of model

Fig. 9 Oil flow visualization of upper surface

Fig. 10 Pressure distribution of side surface of windward

PSPに見られた負圧領域に対応したところに、風下側から風上側に向かう流れが存在しているのがわかる。これは中間部に見られた剥離渦の発達がついには模型上面の前面を覆い、さらには側面の流れと干渉し風上側に巻き上げられたのではないかと考えられる。そこでの複雑な流れにより渦が発生し、PSPに見られる風上に向かう負圧領域が発生していると考えられる。

Fig. 11 Pressure distribution of side surface of leeward

次に側面についての考察を行う。風上側と風下側の側面の圧力分布を比べることにより、働くヨーイングモーメントの大きさを比較し、横風安定性を評価できる。まず風上側面のPSPの結果をFig.10に示す。結果から分かるように、風上側面の圧力係数は約-0.3で同じであり、ほぼ一様であるといえる。次に風下側面のPSPの結果をFig.11に示す。模型1の後尾部風下側面では圧力係数が-1.0程度ではほぼ一定なのに対して、模型2の後尾部風下側面では圧力係数が-1.3と大きく違う。そのため、風上側面との圧力差は模型2の方が大きいことになり、より横風安定性が悪いと考えられる。また、Fig.7に見られた風上側に向かい発達する負圧領域に対応した部分が側面からも捉えられているのがわかる。

6. 結論

1. PSPを用い $\phi=0$ 、30degの模型まわりの流れ場の圧力分布を捉えた。また、Oil Flowにより圧力と渦や剥離との相関を明らかにした。
2. 同一断面積変化の模型でも、3次元形状の差異により、流れ場が大きく異なることが確認できた。

参考文献

- 1) 井門敦志、飯田雅宣、前田達夫、列車先頭部・後尾部形状最適化のための風洞試験、鉄道総研報告、Vol. 7, No. 7, '93. 7
- 2) 小澤智、高速列車の空気力学的諸問題、ながれ、vol. 21 No. 4 P346-P353 (2002)
- 3) 杉浦光、車体周り流れと横風特性に関する研究、平成 18 年度東北大学大学院修士学位論文、(2007)。