C208

単純自動車形状まわりの流れの感圧塗料による可視化計測

山下太郎[○], 杉浦光, 永井大樹, 浅井圭介(東北大学),
石田圭太郎(日産自動車(株))

PSP Measurement of the Flow around a Simplified Car Model

Taro Yamashita, Hikaru Sugiura, Hiroki Nagai, Keisuke Asai, and Keitaro Ishida

ABSTRACT

In applying Pressure-Sensitive Paint (PSP) to low-speed wind tunnel testing, it is important to minimize the measurement uncertainties. There are various noise sources such as camera noise, misalignment of images due to model displacement, and temperature distribution over a model. Among these factors, we studied the effects of temperature distribution change during tests on pressure measurement accuracy. Pressure and temperature distributions over a simplified car model (Ahmed model) were measured using biluminophore paint. Sequential images were acquired at the same interval over the entire test period including the conditions before or after the tunnel run. As a result, it was found that, the most accurate result was obtained by ratioing wind-on image with the wind-off image having similar temperature distribution. In these cases, we could correct the effect of temperature distribution using a single-point measurement of model surface temperature.

Keywords: Pressure-Sensitive Paint (PSP), Low-speed wind tunnel, Ahmed model

1. 緒言

近年, 感圧塗料を用いた可視化計測は, 様々な分野へと広がりを見せている. その1つが低速風洞試験への適用である. 特に, 自動車開発においては設計ツールやCFDの検証用として感圧塗料を用いることが望まれている.

低速流中に置かれた物体周りの圧力変化は非常に小さい. 主流速で50m/s(180km/h)の場合は, 動圧は1.5kPaである. 感圧塗料は絶対圧センサーであり, 1kPaの変化に対して0.7~0.8%しか発光強度が変化しない. このことから感圧塗料で微小な圧力変動を捉えるためには計測誤差を最小限にすることが必要である. 過去の研究から, カメラノイズ, 空気力による模型の位置ずれ, 模型の温度分布等がノイズ源となることが示されている. カメラノイズのようなランダムノイズに対しては画像の加算平均を, 模型の位置ずれに対しては画像の位置補正を必ず行う必要がある. 一方で, 温度誤差を減らすには通風時画像と無風時画像の間の温度差を減らして計測を行うのが良いとされている⁽¹⁾. しかし, 無風時画像と通風時画像の最適な組み合わせやa-priori法を用いた場合の計測精度については, 調べられていない.

そこで, 本研究では, 単純自動車模型である1/10スケ

ールAhmed modelを用いて, 試験中に数ケースの通風時画像と無風時画像を撮影し, 模型上1点の温度を用いて温度補正が可能であるか調べた. さらにa-priori法で算出された圧力が静圧孔の結果とどの程度一致するかを調べた. 最終的に, 試験中の模型の温度変化から, 通風時画像と無風時画像の最適な組み合わせを調べた.

2. 実験概要

2.1 感圧塗料

感圧塗料は色素の酸素分子による消光現象を利用した計測手法である. 実際には, 圧力が一様な基準状態(無風時)と計測対象(通風時)との発光強度の変化率から圧力場を, 次式(Stern-Volmer関係式)を用いて求める.

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

式(1)より, a-priori法で圧力を求めるには, 温度補正が不可欠である. 通風時画像の発光強度を $I(P, T)$ とし, 無風時画像の発光強度を $I(P_{ref}, T_{ref})$ とすると,

$$\frac{I(P_{ref}, T_{ref})}{I(P, T)} = \frac{I(P_{ref}, T_{ref})}{I(P_{ref}, T)} \cdot \frac{I(P_{ref}, T)}{I(P, T)}$$

ここで温度補正係数 $\alpha = I(P_{ref}, T_{ref})/I(P_{ref}, T)$ と置くと、

$$\frac{I(P_{ref}, T_{ref})}{I(P, T)} = \alpha(T) \left(A(T) + B(T) \frac{P}{P_{ref}} \right) \quad (2)$$

を用いて、圧力を算出することができる。

本研究で用いた、BF405(Innovative Scientific Solutions, Inc.)は、複合塗料と呼ばれるもので、波長405nmで励起光を与えると、感圧色素の発光が650nmで、感温色素の発光が545nmで起こる。本来は複合塗料として用いることで模型全体の温度補正係数を求めることができるが、現状の研究設備では圧力と温度を計測する間に手でフィルタ交換を行う必要があり、同時刻の圧力場と温度場を計測することが困難である。従って本研究ではBF405を複合塗料として用いるのではなく、感圧塗料と感温塗料として用いた。この塗料の特性をFig.1に示す。感圧塗料としては温度による感度の変化が小さいことがわかる。感温塗料としては圧力に依存せず、温度によってのみ変化することがわかる。故にこの塗料を用いた場合、式(2)の係数AとBは温度に依存しない定数となり、係数 α のみが温度の関数となる。

2.2 供試体

実験に用いた模型をFig.2に示す。模型は1/10スケールAhmed model(長さ $L=104.4\text{mm}$ 、幅 $D=38.9\text{mm}$ 、高さ $H=28.8\text{mm}$)である。材質はアルミ合金で、模型は中空である。下地剤として白色塗料(T-6 041, 武蔵ホルト)を塗布した上に、感圧塗料をエアブラシで塗布した。模型の中心線上には感圧塗料と比較を行うために静圧孔を8点設けた。また位置補正を行うためにマーカーを8点設けた。さらに模型前面内部には模型温度を調べるためにT型熱電対を設けた。

2.3 実験装置

試験には東北大学流体科学研究所附属検定風洞を用いた。装置の概略図をFig.3に示す。測定部は開放状態であり、対辺距離293mmの八角形を有する。模型は長さ600mm、幅296mmの地面板の上に設置した。試験は主流速50m/sで行った。

2.4 計測系

感圧塗料の励起には、色ガラスフィルタ($400\pm 50\text{nm}$)を取り付けたUV-LEDを2基用いた。発光強度の計測には冷却CCDカメラ(浜松ホトニクス、解像度16bit、有効画素数 $1024\times 1024\text{pixel}$)を用いた。感圧塗料の発光は $650\pm 20\text{nm}$ のバンドパスフィルタを、感温塗料の発光は $550\pm 42\text{nm}$ のバンドパスフィルタをそれぞれレンズに取り付けて計測した。画像の撮影は、感圧塗料・感温塗料

いずれの場合も、供試体上面に対して行った。

2.5 画像取得と画像処理

本実験における計測条件をTable1に示す。感圧塗料による圧力計測をRun1とし、感温塗料による温度計測をRun2とする。Run1では、通風開始前に無風時画像を取得し、通風時画像を10分おきに3ケース取得し、通風停止後にもう1度無風時画像を取得した。それぞれのケースで画像を64枚ずつ撮影した。Run2では、通風開始前に無風時画像を取得し、通風時画像を20分おきに4ケース取得し、通風停止後にもう1度無風時画像を取得した。それぞれのケースで画像を8枚ずつ撮影した。

取得後の画像処理、演算は以下に行った。

- (1) それぞれのケースで画像を加算平均する。
- (2) 位置補正を行った後、発光強度比を求める。
- (3) 感圧色素の場合、温度補正係数 α を熱電対の温度から算出し、a-priori法で圧力を算出した。感温塗料の場合はa-priori法で温度を算出した。

Table 1 Experimental conditions

無風時	通風時			無風時
通風前	0min	10min	20min	通風後
$I_{ref, before}$	I_0	I_{10}	I_{20}	$I_{ref, after}$

(a) Run1 (Pressure measurement)

無風時	通風時				無風時
通風前	0min	20min	40min	60min	通風後
$I_{T, ref, before}$	$I_{T, 0}$	$I_{T, 20}$	$I_{T, 40}$	$I_{T, 60}$	$I_{T, ref, after}$

(b) Run2 (Temperature measurement)

(a) Pressure sensitivity

(b) Temperature Sensitivity

Fig. 1 Calibration result

Fig. 2 Experimental model

Fig. 3 Experimental setup

(a) Pressure profile

(b) Pressure distribution

(c) Oil Flow

Fig. 4 PSP result (case of $I_{ref,after}/I_{20}$)

3. 実験結果および考察

Fig.4 に可視化結果を示す。感圧塗料により得られた圧力分布の中心線上の分布を(a)に、全体の分布を(b)に、油膜法による可視化を(c)に示す。前縁付近に負圧ピークが存在し、その直後に層流剥離泡が存在している。下流側の傾斜面上には馬蹄渦が存在している。これらの図より、感圧塗料を用いて、模型上面の複雑な流れ場によって生じる圧力変化が可視化できていることがわかる。

Run1 で撮影した無風時画像 2 ケースと通風時画像 3 ケースの組み合わせ 6 通りについて、a-priori 法で圧力算出した結果を Fig.5 に示す。(a)は温度補正を行わなかった場合($\alpha=1$)、(b)は熱電対の温度に基づいて温度補正を行った場合の結果である。温度補正を行わないと静圧孔と合わないが、模型上の 1 点の熱電対の温度で温度補正を行うことで圧力孔との一致がよくなる。

それぞれの分布における前縁部負圧ピークと中央の定圧部との差 ΔP をまとめたものを Fig.6 に示す。各ケースの負圧ピークの値に違いが生じていることがわかる。静圧孔との偏差やピーク圧力の違いは、熱電対の測定精度と温度分布の非一様性に関連していると思われる。前者は熱電対を模型内部に設けたため、塗料の正確な温度を計測できなかった可能性がある。より正確な圧力の絶対値を計測するには、熱電対の計測精度を上げる必要がある。一方、後者の模型の温度分布を調べるために Run2 のデータ解析を行う。

Fig.7 に模型中心線上の温度分布の変化を示す。試験中、模型温度は単調に上昇している。さらに通風前の均温化された状態から、温度分布の非一様性が現れていく様子が捉えられている。無風時画像 2 ケースと通風時画像 4 ケースの組み合わせ 8 通りについて、各温度変化率から温度補正係数 α の分布を求めたものを Fig.8 に示す。図中の①と⑧以外は、温度補正係数 α が模型上で一様ではなく、前縁の補正係数を用いて温度補正を行うことはできないことがわかる。これより、1 点の温度を用いて温度補正を行えるのは、通風開始直前直後と通風停止直前直後の場合であることがわかる。

4. 結言

1. 主流速度 50m/s において単純自動車模型上面の複雑な流れ場を可視化することができた。
2. 模型上の温度の代表値を用いて温度補正を行うことによって、すべての組み合わせで静圧孔の結果との一致がよくなった。
3. 模型上 1 点の温度で補正を行うためには、圧力分布が歪まないように計測を行うためには、通風開始直前直後の発光強度比か通風停止直前直後の発光強度比をとるのが良いことが、温度分布の時間変化から示せた。
4. 圧力の絶対値の測定精度を上げるためには、模型温度の計測精度の向上が必要である。

参考文献

- 1) 江上康広, 他, 自動車模型を用いた低速 PSP 実験, 可視化情報, Vol.23, No.1(2003) pp.149-152.
- 2) Bell, James H., Application of Pressure-Sensitive Paint to Testing at Very Low Speeds, AIAA Paper2004-878.

(a) Without temperature correction

(b) With temperature correction

	Difference from Taps [kPa]	Standard Deviation [kPa]
①	0.45	0.11
②	0.64	0.13
③	0.14	0.14
④	0.47	0.18
⑤	0.63	0.14
⑥	0.12	0.15

(c) Statistics

	I_0	I_{10}	I_{20}
$I_{\text{ref,before}}$	①	②	③
$I_{\text{ref,after}}$	④	⑤	⑥

Fig. 5 Pressure profile with and without temperature correction

	①	②	③	④	⑤	⑥
ΔP [kPa]	1.35	1.52	1.61	0.97	1.07	1.18

Fig. 6 Comparison between pressure profiles

Fig. 7 Temperature change during Run2

	$I_{T,0}$	$I_{T,20}$	$I_{T,40}$	$I_{T,60}$
$I_{T,\text{ref,before}}$	(1)	(2)	(3)	(4)
$I_{T,\text{ref,after}}$	(5)	(6)	(7)	(8)

Fig. 8 Change of temperature correction coefficient