C112

自動車模型を用いた低速 PSP 実験

江上 泰広(日本学術振興会・科学技術特別研究員),
飯島 由美, 浅井 圭介[○](航空宇宙技術研究所)

Low-Speed PSP Experiment using an Automobile Model

EGAMI Yasuhiro, IJIMA Yoshimi, and ASAI Keisuke.

ABSTRACT

We have applied PSP to low-speed wind tunnel tests of an automobile model. PSP measurements at low speeds are difficult because of small changes of pressure on a model. To evaluate the accuracy of current PSP system, we made low-speed PSP experiments using an automobile model in the range of 10-50m/s (36 - 180 km/h). Effects of averaging, image registration, flat-field correction and calibration were investigated. It was found that, using an *in situ* calibration, quantitative pressure distributions of the automobile model could be obtained down to 25m/s. A comparison of the PSP data with conventional pressure tap measurements revealed that the largest source of an error was derived from the temperature dependence of PSP.

Keywords: Pressure-Sensitive Paint (PSP), Low speed, Automobile

1. 緒 論

圧力孔を用いた圧力計測に代わる方法として高空間解像度の圧力の面計測を可能にする感圧塗料 (PSP) を用いた計測技術が盛んに研究されている^{1),2)}. PSP はこれまで主に航空機などの高速流体の試験に用いられ大きな成果をあげてきている. 一方, PSP を低速における圧力計測に適用する試みもなされてきている^{3)~7)}. しかし低速では圧力変動が微小だという問題がある. 風速 50m/s(180km/h) と 10m/s(36km/h) では動圧はそれぞれ 1450Pa と 60Pa になる. それぞれ大気圧の約 1.5%, 0.06%に相当する. PSP は原理的に絶対圧センサであるため, この微小な圧力変動を精度よく測定することは非常に困難である.

本研究では自動車模型を用いた風速 50m/s 以下の領域における PSP 圧力計測を試みた. そしてその測定精度, 誤差要因に関する議論を行う.

2. 低速 PSP 試験の概要

2.1 感圧塗料

本実験では, 感圧色素には Pt meso-Tetra(Pentafluorophenyl)-Porphine (PtTFPP), バインダーにはフッ素系ポリマーの poly(IBM-co-TFEM)を用いた. 感圧塗料は圧力だけでなく温度変化によっても発光強度が変化し, 圧力測定の誤差の大きな原因となっている. フッ素系ポリマーを用いた感圧塗料は従来のシリコンポリマー (GP197 など)を用いたものと比較して温度感度が非常に小さく, 高精度の測定を可能とする⁸⁾. 自動車模型には白下地を塗布した上にエブラシを用いて感圧塗料を塗布した.

2.2 自動車模型

Fig.1 に本試験で用いた自動車模型を示す. 模型は全長 221mm, 高さ 96mm, 幅 90mm のハッチバックタイプであり, 直径 7mm, 長さ 10mm の円柱状のサイドミラーを有する. 材質はアルミ合金であり, 模型は中空になっている. PSP データと比較するために模型上面の流れ方向のセンターラインに沿って直径 0.5mm の圧力孔が 16 点設けられている. 区別のためボンネット, フロントガラス, 屋根, リアガラスの各部をそれぞれ Part1~4 と名づける.

Fig. 1 Schematic of an automobile model

2.3 計測系

Fig. 2, 3 に本試験で用いた光学系の概略と写真を示す。風洞側壁はアクリル板で作られており、ここを通じて測定及び観察を行った。感圧塗料の蛍光物質の励起にはキセノンランプを用い照射ヘッドには 380-530nm のバンドパスフィルタと 800nm 以上の赤外を遮断する熱戦吸収フィルタを設置した。発光強度の測定には浜松ホトニクス製の高感度 CCD カメラ（解像度 14bit, 有効画素数 1000×1018 ピクセル）を用いた。撮影はゲイン Low で行った。カメラレンズには 650±20nm の干渉フィルタを取り付けた。CCD カメラの露光時間は照射ヘッドに取り付けられたメカニカルシャッターによって制御した。得られた画像はパーソナルコンピュータに取り込み、ハードディスクに記録した。

2.4 風洞装置

低速 PSP 試験は、航技研小型低乱風洞で行った。この風洞は回流連続式風洞で幅 550mm×高さ 650mm の測定部を持つ。下面壁から 100mm の高さに長さ 550mm、幅

Fig. 2 Schematic diagram of optical setup.

Fig. 3 Picture of experimental setup.

400mm、厚さ 10mm の地面板を設け、その上面中央自動車模型を設置した。試験条件とその動圧を Table 1 に示す。試験は主流速度 50, 25, 10m/s の三条件で行った。風洞の温度変化による測定誤差を最小にするために、各条件で 1 時間以上予備通風を行い装置全体の均温化を図った。

Table 1 Experimental conditions

Mean Velocity	Dynamic Pressure
50m/s (180km/h)	1450Pa
25m/s (90km/h)	370Pa
10m/s (36km/h)	60Pa

2.5 画像の取得とその処理

予備通風を行った後、まず 64 枚連続で通風時画像を取得した。その後直ちに風洞を停止し無風時画像を 64 枚取得した。64 枚取得するのに約 30 分要する。通風時と無風時の温度差を最小にするため、画像の平均は通風と停止した時点を基準点とし、通風画像は遡って、無風画像は取得順に一定枚数平均した。この結果より画像の平均化の効果を評価した。画像は平均化する前に各画像に位置補正を行った。今回の実験では、主流速度が小さいこともあり模型位置の変化は大きくはない。また、CCD 素子とレンズの特性を考慮に入れるためにフラットフィールドを撮影したデータで各画像を補正した。

3. 実験結果

3.1 In-situ 較正

Fig. 4 に各測定条件における *in situ* 較正曲線を示す。*in situ* 較正とは発光強度比と圧力孔データを比較する較正方法である。ここでは通風/無風画像をそれぞれ 4 枚平均した場合の結果を示している。これを見ると主流速度の大きい $U=50\text{m/s}$ のケースは一本の較正曲線によく載っているのに対し、 $U=25, 10\text{m/s}$ と速度を小さくしていくとデータのばらつきが大きくなった。特にリアウインドウの部分 (part4) では大きな差異が見られた。この理由に関しては後ほど議論するが、較正曲線を求める際にこの部分のデータは除外した。圧力変動幅はそれぞれ主流の (a) 約 2%, (b) 0.6%, (c) 0.1% に相当する。較正曲線の標準偏差は各圧力変動幅の約 4%, 7.5%, 16% であった。

Fig. 4 In-situ calibrations for each test condition.

Fig.5 は PSP によって得られた自動車模型上の圧力分布を示している。画像の数字は「通風画像-無風画像」の平均した枚数をそれぞれ示している。ノイズの大きさを純粋に評価するためフィルタリングなどの処理は行っていない。各画像ともフロントガラスで圧力が上昇し、屋根根の部分で一度流れがはく離し圧力が低下し、その後再付着に伴い圧力が回復する様子が良く捉えられている。またフロントガラスの両端の部分でははく離している様子も観察された。カメラのショットノイズに由来するノイズは画像の平均枚数を増すにしたがって減少していることがわかる。また、主流速度が小さくなり圧力変動が小さくなると、ショットノイズの成分も大きくなることわかる。模型側面の圧力が高く示されている部分は励起光フィルタから漏れた赤外線に影響されたと思われる誤

(a) $U=50\text{m/s}$

(b) $U=25\text{m/s}$

(c) $U=10\text{m/s}$

Fig. 5 Pressure distributions on the model at low speeds.

差である。

PSP によって得られた圧力分布と圧力孔データの比較を Fig.6 に示す。1-1 は各条件ともショットノイズ成分が他のものと比較して大きいものの圧力孔データと一番良く一致した。平均画像枚数を増していくと前述の通りショットノイズは低減するが、リアウィンドウ部分(part4)で圧力孔データと大きくずれるようになった。この傾向は低速になるほど顕著になった。

この誤差要因を調べるために通風/無風画像の積算枚数を変化させて得られた結果を Fig.7 に示す。これより無風時画像を 4 枚平均した場合 (1-4) よりも通風時

(a) $U=50\text{m/s}$

(b) $U=25\text{m/s}$

(c) $U=10\text{m/s}$

Fig. 6 Comparison between PSP data and pressure tap data.

画像を4枚平均した場合(4-1)の方がより part4 の圧力孔データとのずれがより大きいことがわかる。Table 2 に示すように通風中の温度変化は無風時の温度変化よりも大きかった。ハッチバックの部分は剥離渦の中に位置するため温度変化が他の部分と異なることが予想される。そのため画像の平均枚数を増やすことによって温度に由来する誤差がこの部分でより大きくなったと考えられる。

Fig. 8 は通風前に無風画像を取得した場合の結果である。通風/無風時で模型の温度差が大きく温度分布も異なるため、圧力データは $1\%/^{\circ}\text{C}$ ある温度誤差に埋もれてしまっている。このため模型温度分布ができる限り通風時と等しくなるように無風時データは通風後に取得することが必要であることがわかった。

今回用いた模型はアルミニウム製であったが、例えば熱伝導率が小さい材質(例えば木)の模型を用い、主流温度の変化に対し模型上の全ての点で同様に温度が変化することで、主流温度の変動の影響は補正できると考えられる。逆に模型を内部から強制的に均温化する方法もある。抜本的には、模型の局所的な温度補正が行える複合塗料や、温度感度のより小さい PSP の開発が必要になると考えられる。

Fig. 7 Comparison of image averaging procedures.

Table 2 Temperature changes during the data acquisition.

Mean Velocity	Changes of temperature /64images	
	Wind on	Wind off
50m/s	+3.8 $^{\circ}\text{C}$	-1.2 $^{\circ}\text{C}$
25m/s	+0.64 $^{\circ}\text{C}$	-0.20 $^{\circ}\text{C}$
10m/s	+0.13 $^{\circ}\text{C}$	-0.10 $^{\circ}\text{C}$

Fig. 8 Effects of selection of the reference image.

5. 結 言

- 1) 風速 50m/s 以下の低速領域で自動車模型を用いた PSP 圧力計測を行った。その結果少なくとも風速 25m/s 以上であれば in-situ 較正を用いて定量的な圧力分布が得られることがわかった。
- 2) 圧力の測定誤差要因でもっとも大きいものは温度誤差であることがわかった。特に通風中の模型温度分布の変化が大きな誤差を生み出すことがわかった。
- 3) 温度由来する誤差を最小にするため通風時/無風時間で模型の温度分布ができる限り等しくなるよう手段を講じることが測定精度を向上する上で最も重要である。無風時データは上記の理由で通風直後に撮影することが必要である。
- 4) 今後、気流の温度変化の影響を抑え測定精度の向上を図るには、模型の材質を断熱性の高いものに変更するなどの対策が有効であると考えられる。抜本的には、局所的な温度補正が行える複合塗料や、温度感度のより小さい PSP の開発が必要である。

謝 辞

本研究の測定に際し、航技研の中北和之氏、西沢啓氏、満尾和徳氏、東京農工大の田部井孝聡氏の協力を得た。この場を借りて感謝の意を表す。本研究の一部は、文部科学省科学技術振興調整費「機能性分子による熱流体センシング技術の研究開発(MOSAIC)」により行われた。

参 考 文 献

- 1) 浅井圭介, “感圧塗料技術の現状と展望,” 可視化情報学会誌, Vol.21, No.83, 2001.10, pp. 203-208.
- 2) Bell, J. H., Schairer, E. T., Hand, L. A., et al: Surface Pressure Measurements Using Luminescent Coatings, Annu. Rev. Fluid Mech. Vol.33 (2001) pp.155-206.
- 3) Brown, O.C., Metha, B.J., and Cantwell, B.J.: Low-Speed Flow Studies Using the Pressure Sensitive Paint Technique, 81st AGARD/FDP, (1997).
- 4) Moris, M.J.: Use of Pressure Sensitive Paints in Low-Speed Flows, 16th ICIASF, USAF Wright Laboratory, OH, (1995).
- 5) Shimbo, Y., Mehta, R.D., Cantwell, B.J.: Vortical Flow Field Investigation Using the Pressure Sensitive Paint Technique at Low Speed, AIAA 97-0388, (1997).
- 6) Torgenson, S.D., Tianshu, L. Sullivan, J.P.: Use of Pressure Sensitive Paint in Low Speed Flows, AIAA Paper 96-2184, (1996).
- 7) Engler, R.H., Mérienne, M.C., Klein, C., Sant, Y.L.: Application of PSP in Low Speed Flows, Aerospace Science and Technology Vol.6, (2002), pp.313-322.
- 8) Amao, Y., Asai, K, et al: Photophysical and Photochemical Properties of Optical Oxygen Pressure Sensor of Platinum Porphyrin-Isobutylmethacrylate- Tri-fluoroethylmethacrylate Copolymer Film, Polymer Journal, Vol.31, No.12, (1999), 1267-1296.