A108

複合感圧塗料計測システムの研究開発

満尾和徳¹*, 栗田充¹, 中北和之¹, 藤井啓介¹, 渡辺重哉¹, 片桐真也², 和田雄二³

¹宇宙航空研究開発機構 総合技術研究本部

²大阪大学大学院 工学研究科 生命先端工学専攻

³東京工業大学大学院 理工学研究科 応用化学専攻

Research and Development of Bi-luminophore PSP Measurement Systems

Kazunori MITSUO, Mitsuru KURITA, Kazuyuki NAKAKITA
Keisuke FUJII, Shigeya WATANABE, Shinya KATAGIRI and Yuji WADA

ABSTRACT

Bi-luminophore Pressure-Sensitive Paint (bi-PSP) has been developed in order to correct the error due to temperature dependence of PSP and increase PSP measurement accuracy. The bi-PSP was composed of pressure- and temperature-sensitive dye. Tetranuclear europium (III) complexes and PdTFPP were used as temperature- and pressure-sensitive dye, respectively. The luminescence intensity of the Eu complex was highly sensitive to temperature and insensitive to pressure. The bi-PSP was examined using a painted coupon and its characteristics were clarified. As a verification test, pressure distributions on a supersonic transport (SST) model at low-speed flow were acquired by the bi-PSP measurement system. The root mean square of C_p at 50m/s was approximately 0.1 (150 Pa) at flow speed of 50m/s, indicating that this bi-PSP system can measure more accurately pressure than conventional pressure conversion technique using reference PSP images immediately after stop of wind tunnel free stream.

Keywords: Pressure-Sensitive Paint, Bi-luminophore Paint, Low-Speed

1. はじめに

近年、航空宇宙分野の熱流体計測において、感圧塗料 (Pressure-Sensitive Paint: PSP) を用いた模型表面圧力場計測が注目を浴びている^{1), 2)}。これまでの電子式センサーによる離散的な圧力情報ではなく、面で圧力場を計測することができる。また、静圧孔を設けるよりも簡単に、しかも安価に計測できる利点がある。しかし、PSPは圧力感度と同時に温度感度を有するため、計測精度向上のためには温度補正が必要である。

JAXAでは、PSPの温度依存性を補正するため、PSP/TSP (Temperature-Sensitive Paint: 感温塗料) 塗り分けによる温度補正を行っている^{3), 4)}。この手法によって精度良く圧力場を計測することが可能であるが、模型片側の情報しか得ることができず、また横滑り角をとる形態の計測に対応できない。

上記問題を解消するため、赤外線 (Infrared: IR) カメラを用いたPSP温度補正を試みた。PSPが塗装された部分の温度分布を直接計測することにより、計測精度を改善することができた⁵⁾。しかし、IRカメラを用いる場合、観測用光学窓ガラス材質の制限や、背景温度の写りこみ対策が必要である。またPSPと異なるシステムを併用するため計測系全体のハンドリングが煩雑になるという問題点がある。そのため、IRカメラを併用した計測システムは実用

には不向きである。

これらの問題を解消するため、圧力/温度場同時計測法のひとつであるPSPに感温色素を混合した複合PSP (Binary Pressure-Sensitive Paint: Bi-PSP) による計測を行った。複合PSP計測では、2種類の分子センサーを用いて同じ領域の圧力と温度を同時に計測するため精度向上が期待でき、またPSP計測システムで統一できる利点がある。

これまで何種類かの複合塗料⁶⁾を試作したが、感温色素の温度感度が低く、高い計測精度を達成することができなかった。そこで、高温度感度の感温色素を実現するために、大阪大学と共同で複合PSP用高性能感温色素の開発を行った。開発した色素の温度感度は約3%/°Cあり、加えて圧力感度が小さく、複合PSPに適している。

本研究では、感圧色素としてPdTFPPを用いて複合化を行い、サンプル試験を通してその有効性について評価した。さらに、実証試験に8.5% SST模型 (4次形状) を用いて低速流れ場中のデルタ翼表面圧力場を計測し、複合PSPによる温度補正機能の有効性を実証した。

2. 複合PSP計測システム

2-1 複合PSP

本実験で使用した複合PSPは、感圧色素であるPdTFPP

と、感温色素である Eu 四核錯体 ($[\text{Eu}_4(\mu\text{-O})(\text{L}_2)_4]$, $\text{L}_2 = 2\text{-hydroxy-4-dodecyloxybenzophenone}$), およびフッ素系ポリマー (Poly-IBM-co-TFEM) からなる⁷⁾. Eu 四核錯体は、過去に複合 PSP に使用したクマリン色素よりも温度感度が高く、また圧力感度が小さい。感圧・感温色素それぞれの発光ピークは 670nm と 615nm にあり、共通の波長で励起することができる。開発された感温色素 (Eu 四核錯体) は一般的な希土類錯体とは異なり、可視域 (400nm 付近) で励起することができる。さらに、両色素とも共通の溶媒に可溶である。

参考までに、感圧色素の圧力感度特性と感温色素の温度感度特性を Fig.1, 2 に示す。(以降では、Eu 錯体の発光を I_1 , PdTFPP の発光を I_2 と称する。) I_2 の圧力感度は温度に依存しない。また、 I_1 の温度感度は圧力に依らず約 3%/°C ある。なお、 I_2 (PdTFPP) の温度感度は、約 1.5%/°C であり、計測精度向上のためには温度による影響を補正しなければならない。

Fig. 1 Pressure-Sensitivity of Pressure-Sensitive Dye in Bi-PSP.

Fig. 2 Temperature-Sensitivity of Temperature-Sensitive Dye in Bi-PSP.

2-2 複合 PSP 計測システム

複合 PSP 計測システムの概要を Fig. 3 に示す。励起用 LED 光源 (発光ピーク : 405nm) により照らされた模型からの複合 PSP 発光を、フィルタホイールを介して CCD カ

メラで計測した。フィルタホイールには、感圧/感温色素用フィルタが取り付けられ、ホイールを回転することで交互に 2 色の発光を計測した。劣化を最小限に抑えるため LED は画像計測時のみ点灯させ、CCD カメラと同期制御して計測した。

本複合 PSP において、各色素単体の光劣化特性は問題なかった。しかし、溶液に混合すると、色素間干渉により励起光による劣化が顕著に現れるようになった。そのため、本試験では通風直後の無風時画像を基準画像とし、通風画像取得との時間差が短くなるように計測を行なった。

2-3 2m x 2m 低速風洞 (LWT2) と SST 模型

実験は WINTEC の 2m x 2m 低速風洞 (LWT2) で実施した。LWT2 の最大風速は 60m/sec であり、模型をロボットアームで支持することにより模型姿勢を自由に変更することができる。

Fig. 4 に実験で用いた SST 模型 (8.5%, 4 次形状) の写真を示す⁸⁾。静圧孔がスパン方向 y/b=15, 30, 50, 70, 90% の位置に取り付けられている。画像位置合わせ処理が必要であるため、模型にはマーカーが取り付けられている。また、模型温度をモニターするため翼に測抵抗体を取り付けた。

Fig. 3 Bi-PSP Measurement System at LWT2.

Fig. 4 Photo of Painted SST model.

3. 複合 PSP 計測結果

複合 PSP を用いて SST 模型上の圧力分布を計測した結果を示す。まず、通風中の模型上の温度分布を推定するため、感温色素の発光強度から算出した温度分布を Fig. 5 に示す。図が示すように、僅かな温度差 (1°C 以下) であるが、翼端で温度が低く、また翼胴付近で現象には関係のない温度パターンがみられた。この温度分布が生じている部分は、圧力配管を樹脂で埋めたところであり、熱伝達率の相違による温度の影響が出やすい。この程度の温度差でも低速 PSP 計測では致命的な誤差となる。

温度補正無しの発光強度比 ($I_{2,ref}/I_{2,run}$) イメージを Fig. 6 に示す。明らかに翼端や樹脂で埋められた箇所は温度の影響を強く受けているのがわかる。この画像からわかるように、精度良く計測するためには PSP の温度補正が不可欠である。

較正データから算出した温度分布を用いて PSP 発光の温度補正を行った後、*In-situ* 法により圧力イメージに変換した。しかし、温度補正の効果はみられたが、十分な精度を確保することができなかった。サンプル試験時の複合塗料の感度特性と、風洞における感度特性が僅かに異なるためであると推定される。

較正試験データから、 I_1 と I_2 の温度感度は両者とも局所的な温度範囲で線形とみなせる。また、感圧色素の圧力感度は温度に依存しない特性をもつ。この特性を利用すると、 I_1 、 I_2 と静圧孔データを用いた *In-situ* 法により、次式のよう温度補正を考慮した圧力変換が可能になる。

$$\frac{P_{run}}{P_{ref}} = f\left(\frac{I_{2,ref}}{I_{2,run}} \cdot \frac{I_{1,run}}{I_{1,ref}}\right) = A + B\left(\frac{I_{2,ref}}{I_{2,run}} \cdot \frac{I_{1,run}}{I_{1,ref}}\right)$$

ここで、A と B は変換係数であり、最小自乗法に求めることができる。

温度補正の効果を確認するため、温度補正有り温度補正無しの *In-situ* 較正直線を比較した結果を Fig. 7 に示す。試験条件は、風速 $V=50\text{m/s}$ 、 $\alpha=12^\circ$ 、 $\beta=10^\circ$ である。図から温度補正による効果は明らかであり、Root Mean Square (RMS) はそれぞれ C_p 換算で 0.27 (補正無し) と 0.07 (有り補正) であった。ここで示す RMS は、PSP により得られた測定値と *In-situ* 較正曲線に対する差分から算出した。他のケースにおいても同等の計測精度を得た。

次に、風速を 50m/s に固定し、迎角を $8^\circ \sim 20^\circ$ に変化させたときの測定結果を Fig. 8 に示す。デルタ翼特有の前縁剥離渦により生じる低圧領域が鮮明に可視化されているのがわかる。迎角が大きい場合、デルタ翼の上流側に強い低圧領域が形成され、迎角が小さくなるに従い下流方向に低圧領域が伸びている。また、迎角が小さくなるほど低圧領域の圧力レベルが小さくなり、前縁方向にシフトしているのがわかる。

Fig. 9 に PSP データと静圧孔データの比較 (S1~S3 line) を示す (風速 $V=50\text{m/s}$ 、迎角 $\alpha=16\text{deg}$)。温度補正無しの

In-situ 処理結果 (破線) も同図に記載されている。複合 PSP を用いて温度補正をすることにより、PSP 計測精度が飛躍的に向上することがわかる。

4. まとめ

PdTFPP と Eu 四核錯体を混合した複合塗料を新規に開発し、その評価試験を JAXA2m・2m 低速風洞にて実施した。本研究によって得られた結果を以下に示す。

- (1) Eu 錯体と PdTFPP の発光強度比 ($(I_{2,ref}/I_{2,run}) \cdot (I_{1,run}/I_{1,ref})$) に *In-situ* 法を適用することで、温度補正を考慮した圧力変換が可能となり、精度良く圧力場を計測することができた。
- (2) 複合 PSP を使用することにより、従来の計測 (通風直後の無風時画像をリファレンスとした計測) 精度よりも格段に精度を向上させることができた。50m/s において、 C_p 換算で RMS 約 0.1 (150Pa) を達成した。
- (3) 低速における SST 模型の表面圧力場を鮮明に可視化することができた。さらに、翼前縁に生じる剥離渦パターンの迎角依存性を捉えることができた。

参考文献

- 1) Bell, J.H, Schairer, E. T., Hand, L. A and Mehta, R. D., "Surface Pressure Measurements Using Luminescent Coatings," *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 33 (2001), pp.155-206.
- 2) Engler, R. H., Klein, C. And Trinks, O., "Pressure-Sensitive Paint Systems for Pressure Distribution Measurements in Wind Tunnels and Turbomachines," *Measurement Science and Technology*, Vol. 11, No. 7 (2000), pp. 1077-1085.
- 3) Nakakita, K., Kurita, M., Mitsuo, K. and Watanabe, S: Practical pressure-sensitive paint measurement system for industrial wind tunnels at JAXA, *Meas. Sci. Technol.* 17 No 2, pp.359-366 (2006).
- 4) Mitsuru Kurita, Kazuyuki Nakakita, Kazunori Mitsuo, and Shigeya Watanabe, "Temperature Correction of Pressure-Sensitive Paint for Industrial Wind Tunnel Testing," *JOURNAL OF AIRCRAFT*, Vol. 43, No. 5, September-October 2006, pp. 1499-1505.
- 5) Mitsuo, K., Kurita, M., Nakakita, K. and Watanabe, S., "Temperature Correction of PSP Measurement for Low-Speed Flow Using Infrared Camera," 21st International Congress on Instrumentation in Aerospace Simulation Facilities, ICIA SF'05 10-1, 30 August, Sendai, Japan, 2005.
- 6) Mitsuo, K., Asai, K., Hayasaka, M. and Kameda, M., "Temperature Correction of PSP Measurement Using Dual-Luminophore Coating," *Journal of Visualization*, Vol.6, No.3(2003), pp.321-331.
- 7) Mitsuo, K., Kurita, M., Nakakita, K. Fujii, K. and Watanabe, S., "Development of Bi-Luminophore Pressure-Sensitive Paint Systems," 22nd International Congress on Instrumentation in Aerospace Simulation Facilities, ICIA SF'07, 2007 (to be published).
- 8) 堀之内茂, 大貫武, 吉田憲司, 郭東潤, 徳川直子, 滝沢実, 進藤重美, 町田茂, 村上義隆, 中野英一郎, 高木正平, 柳良二, 坂田公夫 「小型超音速実験機 (ロケット実験機; NEXST-1) の基本設計結果について」, JAXA-RR-05-044, 2006 年 3 月。

Fig. 5 Temperature Difference between wind-on and wind-off I_1 image at $\alpha=12\text{deg}$, $\beta=-10\text{deg}$ at 50m/s.

Fig. 6 Ratioed Image $I_{2, \text{ref}}/I_2$, run at $\alpha=12\text{deg}$, $\beta=-10\text{deg}$ at 50m/s.

(a) Without temperature correction (RMS=0.27) (b) With temperature correction (RMS=0.07)
Fig. 7 In-situ calibration curve ($V=50\text{m/s}$, $\alpha=12\text{deg}$, $\beta=-10\text{deg}$).

(a) $\alpha=20\text{deg}$ (b) $\alpha=16\text{deg}$ (c) $\alpha=12\text{deg}$ (d) $\alpha=8\text{deg}$

Fig. 8 Pressure images by bi-PSP Measurement at $V=50\text{m/s}$.

(a) S1 line (b) S2 line (c) S3 line
Fig. 9 Comparison of PSP Data with Pressure Tap Data at $V=50\text{m/s}$ and $\alpha=16^\circ$