

# 最新計測 感圧塗料 (PSP)

亀田 正治\*

## Recent Progress in Pressure-sensitive Paint Measurements

Masaharu KAMEDA

### 1. はじめに

感圧塗料 (Pressure Sensitive Paint, PSP) は、発光特性から圧力値を測るための機能性分子センサの一種である。適当な照明装置・撮影装置を用いれば、PSPを塗布した物体表面全体の圧力分布を、直接、画像情報として得られる。したがって、従来の多点計測とは比較にならない高空間分解能計測を非接触で行うことが可能である。その他にも、凹凸面、薄い物体表面にも適用できるなど、さまざまな可能性を秘めている。

本稿では、最近10年ほどの研究成果に基づいて、PSP計測の現状、特に、PSPによる微小圧力計測、および、非定常圧力計測の状況を中心に説明を行う。PSPは絶対圧センサであり、測定レンジは真空から数気圧までにわたる。そのため、低速風洞試験で必要とされるような大気圧近傍の微小な圧力変化をとらえるには、様々な工夫が必要である。なお、書籍<sup>1),2)</sup>、解説記事<sup>3),4),5),6)</sup>が出されているので、本稿とあわせて参照されたい。

### 2. PSP計測の基礎

#### 2.1 原理

感圧塗料は、いわゆる「蛍光」(正しくはルミネッセンス)塗料の一種である。色素が発するルミネッセンスの特性が、気体圧力(正確には、酸素濃度)や温度によって変化することを利用して計測を行う。

計測のイメージを図1に示す。物体表面に塗布した色素に励起光を照射し、その際生じるルミネッセンスをカメラなどでとらえる。発光強度やその時間変化を解析することによって、圧力が得られる。

PSPでは、酸素濃度を通じて空気圧を測定している。ヘンリーの法則によれば、塗料中の酸素濃度は、気体中の酸素分圧に比例する。空気の場合、組成が変わらないので、酸素分圧は空気圧に比例する。よって、酸素濃度と空気圧との間には線形関係がなりたつ。

発光特性から圧力を得るための方法は、「強度法

(intensity-based method)」と「寿命法 (lifetime method)」に大別される。広く用いられているのは強度法である。

強度法では、ある基準状態  $p = p_{ref}$ ,  $T = T_{ref}$  における発光強度を  $I_{ref} = I(p_{ref}, T_{ref})$  とすると、任意の圧力  $p$ , 温度  $T$  における発光強度  $I$  は、次の関係式(1)を満足することから圧力を求める。

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

すなわち、発光強度比の逆数  $I_{ref}/I$  は、圧力比  $p/p_{ref}$  に比例する。式(1)は Stern-Volmer 式と呼ばれる。また、 $A$ ,  $B$  を Stern-Volmer 定数と呼ぶ。定数は、色素の発光・熱的失活・酸素消光の速度に依存する。熱的失活や酸素消光に寄与する塗料内への酸素分子の浸透性に温度依存性があることから、 $A$ ,  $B$  は温度の関数となる。

実際の PSP では、塗料内の不純物の存在や色素分子の非一様分布などの不均一性が消光特性に影響を与えるため、発光強度比  $I_{ref}/I$  と圧力比  $p/p_{ref}$  との関係は非線形になることが多い<sup>1),3)</sup>。そのため、PSPによる実用試験では、両者の関係を多項式で近似することが多い。

#### 2.2 コーティング

PSPは、発光色素とそれを物体表面に固着させるためのバインダからなる。色素は有機化合物である。バインダにはポリマが多用されるが、時間応答性や低温での応

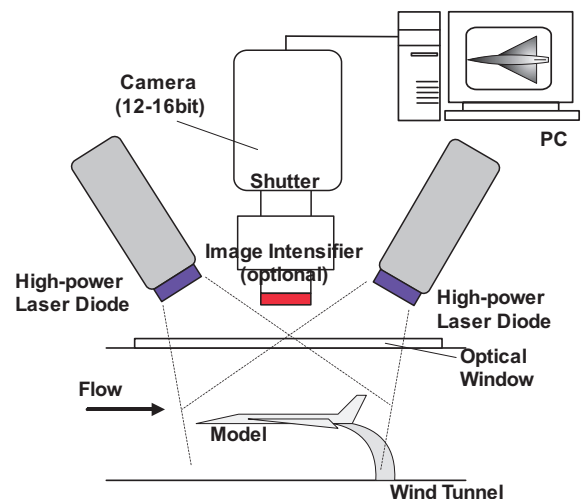


Fig. 1 Schematic diagram of PSP measurement

\* 東京農工大学 工学府 機械システム工学専攻  
(〒184-8581 東京都小金井市中町 2-24-16,  
E-mail: kame@cc.tuat.ac.jp)

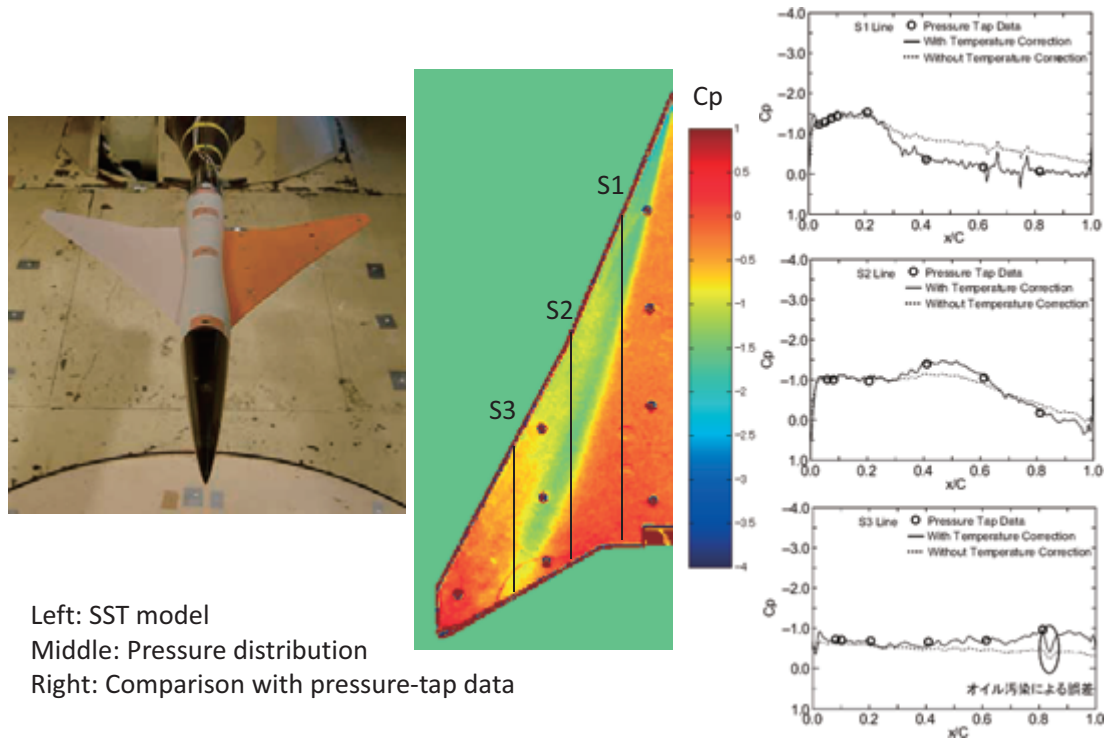


Fig. 2 PSP measurement in low-speed wind tunnel ( $U = 50 \text{ m/s}$ ,  $q = 1.5 \text{ kPa}$ ,  $\text{AOA} = 12\text{deg}$ )<sup>15)</sup>

答特性を改善するためには、多孔質皮膜を用いる。

現在、米国の企業 (ISSI 社(米)<sup>7)</sup> が PSP を商品として供給している。手順さえ踏めば、塗料は自作可能であり、書籍<sup>9)</sup>にもいくつかのレシピが掲載されている。

### 2.2.1 色素

PSP 用色素として良く用いられているものには、次の3種類がある：

- ・ポルフィリン化合物 (PtTFPP など)
- ・ルテニウム(II)錯体 (バソフェンルテニウムなど)
- ・ピレンおよびその誘導体 (ピレンブタン酸など)

PtTFPP, バソフェンルテニウムは、可視光で励起が可能、発光特性の経時変化 (光劣化) が少ない、という特徴があり、アメリカ、日本では良く用いられている。一方、ピレンは大変明るく、発光強度の温度依存性も小さい、しかし光劣化が著しいという特徴がある。ドイツの航空宇宙研究所 (DLR) では、光劣化を抑えたピレン誘導体を独自に開発し風洞試験に用いている<sup>8)</sup>。

### 2.2.2 バインダ

通常の PSP のバインダはポリマであり、適当な溶媒を用いて溶解し、色素を加えて攪拌したものを、スプレーなどを用いて物体表面に塗布することが可能である。PSP には酸素透過性に優れたポリマが適しており、ISSI 社の FIB などが商品として販売されている。

ポリマバインダの時間応答性は通常  $0.1 \text{ s}$  以上であるため、非定常圧力計測のために、より酸素透過性の高い陽極酸化アルミニウム皮膜 (AA-PSP)<sup>9),10)</sup> や、シリカナノ粒子<sup>11),12)</sup> を用いる PSP の開発が進められている。いずれも、nm オーダの細孔を有する多孔質体であり、色素は、吸着によって、酸化アルミニウムやシリカゲル表面

に固着される。これらの多孔質バインダを用いた PSP の応答特性時間は  $10 \mu\text{s}$  程度となる<sup>10),12)</sup>。

### 2.3 画像データ処理 (圧力算出)

強度法による PSP 計測における基本的なデータ処理の流れは、(1) 画像ノイズ (ダークノイズ、ショットノイズ) 除去、(2) 位置合わせ (image registration)、(3) 発光強度比算出、(4) 圧力データへの変換、(5) 物体表面へのマッピング、である。以上の手法については、文献 1),3) に詳しい記載がある。

強度法では、式(1)に示すとおり、測定したい圧力、温度データを含む発光強度画像 ( $I_{\text{run}}$ ) に加えて、発光強度比を取るための基準画像 ( $I_{\text{ref}}$ ) が必要である。(2) の位置合わせは、基準画像と測定画像の位置を正確に合わせるために必要なステップである。比 ( $I_{\text{run}}/I_{\text{ref}}$ ) を用いることで、塗料中の色素濃度や照射する励起光強度の不均一性が測定に与える影響を排除できるという利点がある。

## 3. 風洞実験への適用

### 3.1 低速風洞実験における定常圧力分布計測

流速  $10 \text{ m/s}$  程度の流動現象に対する PSP 測定は、産業界から強い要望がある。微差圧計測成功のカギは、PSP の温度依存性の補償にある。大気圧近傍における動圧は、流速  $10 \text{ m/s}$  で  $60 \text{ Pa}$  程度である。これに対して、PSP は、圧力感度 ( $I_{\text{ref}}/I$  の変化率) は  $1\%/\text{kPa}$  に近いものが用いられているが、温度変化に対する発光量変化もまた約  $0.5\text{-}1\%/^{\circ}\text{C}$  程度存在する<sup>1),7)</sup>。

温度補償の方法として、対称性が仮定できる実験では、半面毎に感圧塗料と感温塗料 (TSP) を塗り分け、TSP のデータから得た温度分布を使う方法<sup>13)</sup> がよく使われる。

より汎用性の高い、同一圧力計測位置における温度をとらえる手段としては2つの方法が検討されている。第1の手段は、塗料内に温度感度のみのPSP用色素と発光波長の異なるreference用色素を合わせて混ぜる二色素(bi-luminophore)塗料<sup>7),14)</sup>を用いる方法である。この方法では、2色素からの発光の比を用いることで、PSP発光量に対する温度変化の影響を0.1%/°C程度まで抑えることができる。

もう一つの手段として、赤外線サーモグラフィを用いてPSP表面温度分布を測定し、そのデータを用いてPSP出力の温度補償を行う方法がある。本節では、満尾ら<sup>15)</sup>の研究成果を用いて、定常微差圧計測の現状を示す。

満尾らは、白金ポルフィリン(PtTFPP)とフッ素系ポリマー(Poly-IBM-co-TFEM)からなるPSPを用いて、PSPの励起、発光をとらえるシステムとIRカメラの組み合わせで、PSP出力の温度補正の効果を詳しく調べている。本PSPは、圧力感度0.75%/kPaに対して、温度感度が1.5%/°Cとやや大きい、温度による圧力感度の変化がない(式(1)のA, Bが温度に依存しない)ため、通風時と無風時の温度差( $T_{run}-T_{ref}$ )がわかれば温度補正が可能、という利点がある。

図2に、塗装された超音速機(SST)模型の様子と、圧力分布算出結果例を示す。実験は、JAXA 2m×2mの低速風洞を用いて、一様流速50 m/sの条件で行われた。PSPの撮影は16 bit冷却CCDカメラを用い、かつS/N比を高めるため、1ケースにつき64枚の画像を撮影して平均化したデータを用いて算出されている。右図に示す、中央図S1, S2, S3に設置した圧力孔データとの比較グラフを見ると、温度補正により、PSP出力が圧力孔データに近づくことが分かる。詳しい解析結果から、満尾らは、本計測システムの計測精度は約 $C_p=0.1$ (150 Pa)と評価している。

現状のPSPを用いて10 Pa オーダまで正確な圧力を求めるには、気流温度を精密に管理するか、表面温度を0.01 K オーダで計測する必要がある。気流温度の管理は設備上の制約やデータ生産性低下の問題が生じること、IRカメラによる精密な温度計測でも約0.1 K程度の誤差は残ることから、定常圧力絶対値の場合、100 Pa程度の誤差は避けられない。したがって、現状のPSP計測が信頼できる一様流速の下限は25 m/s程度だと考えられる。

### 3.2 シリカナノ粒子PSPによる遷音速デルタ翼表面非定常圧力分布計測

非周期的な変動圧力の計測事例として、シリカナノ粒子PSPを用いてとらえた遷音速デルタ翼面上の圧力分布<sup>16)</sup>を紹介する。遷音速域では、翼付近に衝撃波が発生し、剥離渦との干渉により衝撃波位置が時間的に変動する「バッフェット(buffet)」と呼ばれる現象が生じる。

宇宙研の遷音速風洞を用いて行った実験のセットアップを図3に示す。本実験では、後退角65°の翼の左半面にPSPを塗布した。右半面にはTSPが塗装されており、このデータから得られた温度情報を用いて、PSPの温度

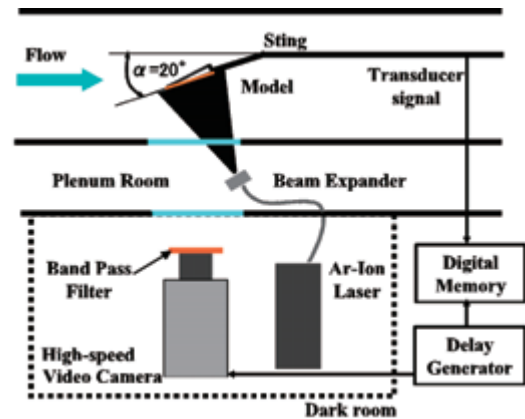
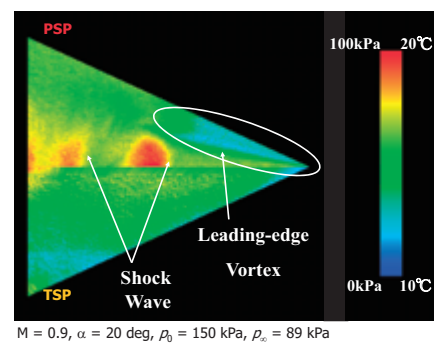
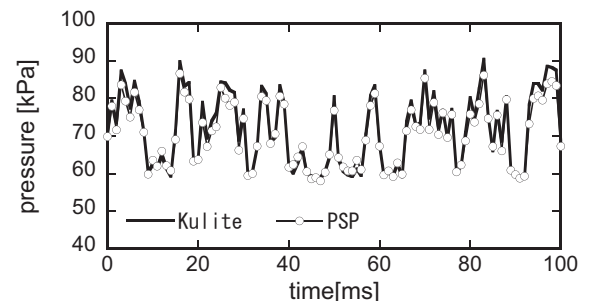


Fig. 3 Experimental setup for transonic delta wing



(a) Instantaneous pressure and temperature distributions



(b) Comparison between PSP and pressure tap  
Fig. 4 Unsteady pressure on the delta wing<sup>16)</sup>

依存性の補償を行った。撮影にはCMOS素子の高速度ビデオカメラを用いた。撮影速度は1000 fpsである。

図4(a)に圧力、温度分布のスナップショットを示す。マッハ数は0.9、迎角は20°である。翼中央部に見られる2か所の高圧域が衝撃波によるものである。圧力データの定量性を評価するために、翼に埋め込んだ小型半導体圧力センサ(Kulite XCQ-062)出力との比較を行った結果を図4(b)に示す。この図を見るとわかるように、PSPによる計測結果は、半導体圧力センサ出力とよく一致する。流し撮り撮影による非定常圧力分布計測では、1 kHzの変動を1 kPa程度の精度でとらえることが可能であることが分かる。

### 3.3 AA-PSPによる翼後縁部の非定常圧力分布計測

多数の連続した画像データの各点について求めた圧力

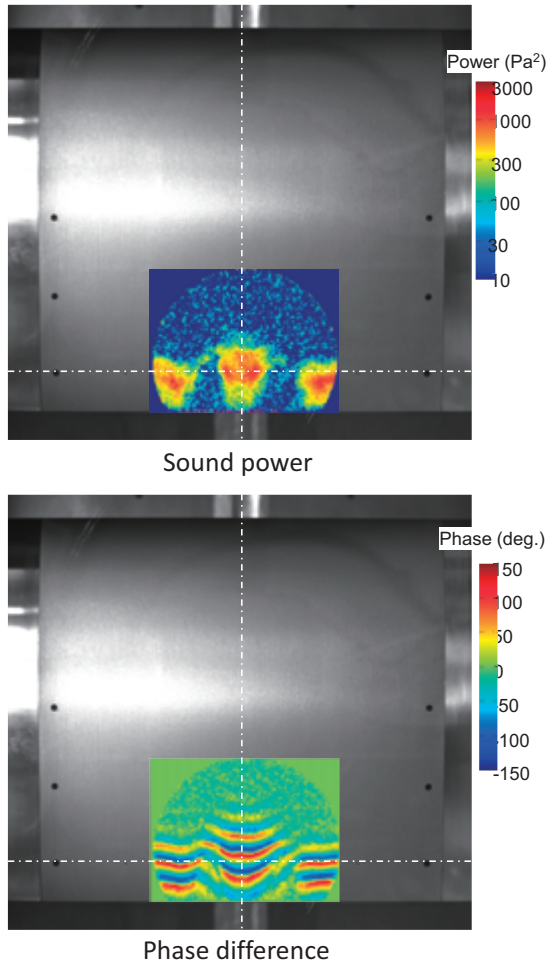


Fig. 5 Unsteady pressure fluctuation around the trailing edge of NACA0012 wing<sup>17)</sup>

時間履歴をFFTによる周波数スペクトルに変換し、注目したい周波数データを抽出することで、周期的な圧力変動をとらえる場合は大幅なS/N比の向上が可能である。ここでは、中北<sup>17)</sup>が行ったNACA0012翼後縁部の変動圧力計測結果を紹介する。

この実験では、JAXAの小型低乱風洞（計測部高さ65cm×幅55cm）を用いて、一様流流速28m/sの条件で、翼弦長250mmのNACA0012模型後縁付近の圧力変動を調べている。翼スパン方向中央部にAA-PSPを塗布し、高出力青色半導体レーザ、12bit高速度ビデオカメラの組み合わせで非定常圧力変動分布をとらえている。

図5に実験から得られた圧力振幅、位相差分布を示す。十分な数（53,000点程度）のPSP時系列画像データを用いて、特定の周波数（917Hz）に着目すれば、変動圧力については、10Paオーダの振幅振幅が面上の位相分布情報とともに抽出できることが分かる。

### 3. おわりに

翼を対象とした風洞実験の結果を用いて、PSP計測の現況を紹介した。定常圧力計測では二色素塗料の性能向上が待たれる。非定常圧力計測は、光源、カメラ性能の

向上もあり、直近5年で著しく信頼性を高めている。

本稿をまとめるにあたって、JAXA風洞技術開発センターの中北和之、満尾和徳の両氏から貴重なご助言と実験データの提供を受けた。記して謝意を表します。

### 参考文献

- 1) Liu, T., Sullivan, J.P.: Pressure and Temperature Sensitive Paints, Springer-Verlag: Berlin Heidelberg (2005).
- 2) 亀田正治, 浅井圭介: 感圧塗料(PSP)・感温塗料(TSP), 非侵襲・可視化技術ハンドブック, エヌ・ティー・エス (2007) pp. 871-881.
- 3) Bell, J.H., Schairer, E.T., Hand, L.A., Mehta, R.D.: Surface pressure measurements using luminescent coatings, Annu. Rev. Fluid Mech. Vol. 33 (2001) pp.155-206.
- 4) 浅井圭介: 可視化情報 Vol. 18, No. 69 (1998) pp. 97-103.
- 5) 浅井圭介ほか: 特集 感圧塗料技術の新展開, 可視化情報 Vol. 21, No. 83 (2001) pp. 203-245.
- 6) Gregory, J., Asai, K., Kameda, M., Liu, T., Sullivan, J.P.: A review of pressure-sensitive paint for high speed and unsteady aerodynamics, Proc. IMechE G: J. Aerospace Eng., Vol. 222, No. 2 (2008) pp. 249-290.
- 7) <http://psp-tsp.com/>
- 8) Klein, C., Engler, R.H., Henne, U., Sachs, W.E.: Application of pressure-sensitive paint for determination of the pressure field and calculation of the forces and moments of models in a wind tunnel, Exp. Fluids, Vol. 39 (2005) pp. 475-483.
- 9) Asai, K., Kanda, H., Cunningham, C.T., Erasquin, R., Sullivan, J.P.: Surface pressure measurement in a cryogenic wind tunnel by using luminescent coating, 17th Intl. Congr. on Instrumentation in Aerospace Simulation Facilities (ICIASF) (1997) pp. 105-114.
- 10) Kameda, M., Tezuka, N., Hangai, T., Asai, K., Nakakita, K., Amao, Y.: Adsorptive pressure-sensitive coatings on porous anodized aluminum, Meas. Sci. Technol., Vol. 15, No. 3 (2004) pp. 489-500.
- 11) 亀田正治, 天尾豊: セラミック超微粒子を用いた高速応答型感圧塗料, セラミックス, Vol. 46, No. 7 (2011) pp. 576-581.
- 12) Kameda, M., Seki, H., Makoshi, T., Amao, Y., Nakakita, K.: A fast-response pressure sensor based on a dye-adsorbed silica nanoparticle film, Sens. Actuators B: Chem., Vol. 171-172 (2012) pp. 343-349.
- 13) 例えば, Kameda, M., Tabei, T., Nakakita, K., Sakaue, H., Asai, K.: Image measurements of unsteady pressure fluctuation by a pressure-sensitive coating on porous anodized aluminum, Meas. Sci. Technol., Vol. 16, No. 12 (2005) pp. 2517-2524.
- 14) Gouterman, M., Callis, J., Dalton, L., Khalil, G., Mébarki, Y., Cooper, K.R., Grenier, M.: Dual luminophor pressure-sensitive paint: III. Application to automotive model testing, Meas. Sci. Technol., Vol. 15 (2004), pp. 1986-1994.
- 15) 満尾和徳, 栗田充, 中北和之, 藤井啓介, 渡辺重哉, 伊藤正剛: 赤外線カメラを利用した感圧塗料温度補正法の研究—低速流れへの適用—, 宇宙航空研究開発機構研究開発報告 (2007) JAXA-RR-06-028.
- 16) Kameda, M., Seki, H., Makoshi, T., Amao, Y., Nakakita, K.: Unsteady measurement of a transonic delta wing flow using a novel PSP, AIAA Paper 2008-6418 (2008).
- 17) 中北和之, FFTを用いた低速非定常PSP計測における流れの位相情報抽出, 第44回流体力学講演会/航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム2012 (2012), JSASS-2012-2120.