

感圧塗料による風洞実験技術

Pressure sensitive paints in wind tunnel testing

キーワード：計測，航空機，自動車，ルミネッセンス，空気力学，風洞

Instrumentation, Aircraft, Automobile, Luminescence, Gas dynamics, Wind tunnel

亀田正治 Masaharu KAMEDA

東京農工大学 Tokyo University of Agriculture and Technology

江上泰広 Yasuhiro EGAMI，浅井圭介 Keisuke ASAI

航空宇宙技術研究所 National Aerospace Laboratory

原稿受付 平成 14 年 8 月 26 日

1. はじめに

「物体表面の圧力・温度分布が知りたい」，熱・流体分野の実験では不変の要請であろう．温度については，赤外線放射温度計や感温液晶など，表面分布を画像として得るための手段が既にいくつか存在する¹⁾．これに対して，圧力については，依然として，圧力センサーを用いた多点計測が主体である．

感圧塗料 (Pressure Sensitive Paint, PSP) は，発光特性から圧力値を知ることができる，機能性分子センサーの一種である．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が可能である．その他にも，

- ・ 凹凸面，薄い物体表面にも適用可能，
- ・ 非接触で計測が行える，
- ・ 原理的には時間応答性が良い，

といった特徴を有しており，さまざまな適用可能性を秘めている．

ただし，後述するように，感圧塗料は，気体専用のセンサーである．また，感圧塗料は，測定レンジが 100 kPa オーダーにわたる絶対圧センサーであり，微小な圧力差をとらえるのが苦手である．

いくつか欠点はあるが，面情報として圧力をとらえられるというのは，画期的である．最近 10 年ほどの精力的な研究開発の結果，PSP による計測技術の基礎は確立しつつある．

本稿では，PSP，および類似の測定原理に基づく感温

塗料 (Temperature Sensitive Paint, TSP) を概観する．すでに，詳細な解説記事^{2),3),4),5)}がいくつか出されているので，本稿とあわせて参照されたい．

2. 原理

感圧・感温塗料は，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．適切な光源を用いて塗料に光を照射し，その際生じるルミネッセンスをカメラ，フォトマル (PMT) などを用いてとらえる．ルミネッセンス強度やその時間変化を解析することによって，圧力・温度が得られる．

2.1 ルミネッセンス

図 2 に，塗料のもとになる色素に光を当てたときに生じる一連の過程を示す．

光を受けた色素分子は，光の持つエネルギーを吸収して，分子内のエネルギーレベルが高まる (励起状態， S_1 , S_2 , T_1)．励起された色素は，何らかの形で，エネルギーを放出して，もとの状態 (基底状態， S_0) に戻る．その放出プロセスは，(1) 熱的失活

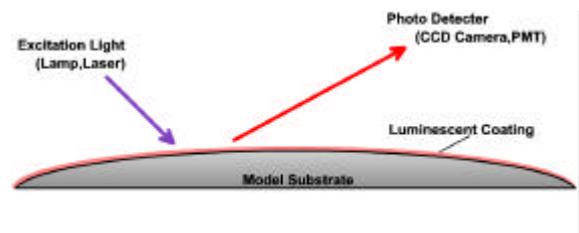


図 1 計測イメージ

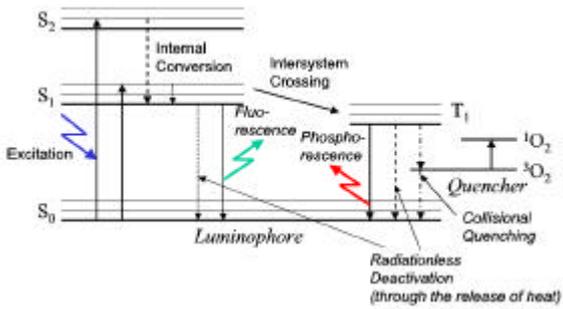


図 2 色素分子のエネルギー準位

(radiationless deactivation), (2) 酸素消光 (collisional quenching), (3) 蛍光 (fluorescence) および燐光 (phosphorescence), に分かれる.

ルミネッセンスの強度, 寿命(持続時間)は, その他のプロセスの反応速度によって大きく変化する. PSP では酸素消光作用を, TSP では熱的失活による温度消光作用を利用する. 酸素濃度が高いほど, 温度が高いほど, それらの消光作用が顕著, すなわち, ルミネッセンス強度が弱く(暗く)なる.

なお, 蛍光が生じる特性時間はナノ秒オーダーであり, 酸素消光によるルミネッセンスの変化は少ない. これに対して, 燐光のそれはマイクロ秒から秒オーダーと長く, 酸素消光作用を受けやすい.

2.2 PSP

色素周囲の酸素濃度を $[O_2]$ とすると, ルミネッセンス強度 I は, Stern-Volmer 式(1)に従って変化する:

$$\frac{I_0}{I} = \frac{\tau_0}{\tau} = 1 + K_{SV}[O_2]. \quad \dots (1)$$

I_0 は無酸素状態におけるルミネッセンス強度, K_{SV} は Stern-Volmer 定数と呼ばれる色素依存の定数を表す. また, τ は, 発光の寿命を表す. 式(1)より, 酸素濃度 $[O_2]$ が高いほど, ルミネッセンス強度 I は小さく, 発光寿命 τ は短くなる.

Henry 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, 酸素分圧は, 全圧力の 0.21 である. そのため, 酸素濃度と空気圧との間に線形関係がなりたつ. また, 空気中での実験を想定すると, 無酸素状態の代わりに, ある基準空気圧 p_{ref} におけるルミネッセンス強度 I_{ref} をもとに計測を行う必要がある. そこで, 式(1)を,

$$\frac{I_0}{I} = 1 + K'_{SV} p, \quad \dots (1)'$$

と書き換え, I_{ref} と I との比,

$$\frac{I_{ref}}{I} = \frac{1 + K'_{SV} p}{1 + K'_{SV} p_{ref}} = \frac{1}{1 + K'_{SV} p_{ref}} + \frac{K'_{SV} p}{1 + K'_{SV} p_{ref}} \quad \dots (2)$$

をもとに I と p との関係を求める. 実際の測定では, 非線形効果も考慮に入れて, 次の式を用いる:

$$\frac{p}{p_{ref}} = A_0 + \sum_{n=1}^N A_n \left(\frac{I_{ref}}{I} \right)^n. \quad \dots (3)$$

A_k ($k = 0, 1, 2, \dots$) は, 較正によって定める実験定数である. また, A_k には温度依存性があることに注意する必要がある.

2.3 TSP

酸素の影響がない状況を考える. このとき, ルミネッセンス強度 I は, 基準温度 T_{ref} におけるルミネッセンス強度 I_{ref} との相対値として,

$$\frac{I_{ref}}{I} = \frac{1 + k(T)}{1 + k(T_{ref})}, \quad \dots (4)$$

と表される. k は温度消光作用の反応速度定数を表し, 一般には, Arrhenius 式(5)に従う:

$$k(T) = C \exp\left(-\frac{E}{RT}\right). \quad \dots (5)$$

R は気体定数を, E , C は色素依存の定数を表す. 式(4), (5)より, 温度 T が高いほど, ルミネッセンス強度 I は小さくなる.

圧力計測と同様に, 実際の温度計測では, I と T との間に式(6)のような関係を仮定し, 較正試験によって, 実験定数 B_k を定めている.

$$\frac{T}{T_{ref}} = B_0 + \sum_{n=1}^N B_n \left(\frac{I_{ref}}{I} \right)^n. \quad \dots (6)$$

3. 計測

3.1 計測システム

PSP の計測は, 強度法, 寿命法の二つに大別される. いずれも, 計測の基礎は式(1)であり, 圧力(酸素濃度)を, 発光強度 I または発光寿命 τ の変化からとらえる. 通常は, 簡便さから, 強度法によって計測を行うことが多い.

強度法による計測システムの概略を図 3 に示す. 光

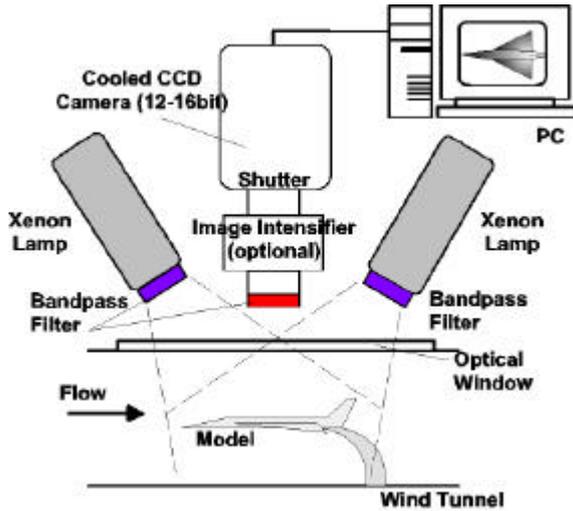


図 3 計測システム (強度法)

源, 撮像装置 (CCD カメラ), 画像取り込み・処理用パソコンから構成される。

特定の波長の光によって色素を励起することにより, 特定の波長のルミネッセンスが得られる。ルミネッセンスの波長は, かならず, 励起光の波長より長くなる。そこで, 光源, 撮像装置それぞれに, 特定波長の光のみ透過するバンドパスフィルターを用いる。光源として, 青色 LED・レーザーなどの単色光源を用いれば, フィルターは必要ない。撮像装置側については, ルミネッセンスのみを通し, 反射した励起光はカットされるようなフィルターを選定しなければならない。

撮像装置には, CCD カメラを用いる。強度を細かくデジタル化できるように, 12bit 以上の A/D コンバーターを搭載した機種が望ましい。また, CCD カメラ自体の感度変動・雑音は計測誤差につながるため, 冷却 CCD カメラを用いるべきである。

3.2 コーティング

PSP, TSP は, ルミネッセンスを発する色素と, それを物体表面に固着させるためのバインダーからなる。色素は有機化合物である。バインダーにはポリマーが多用されている。時間応答性や低温での応答特性を改善するために, 酸化金属皮膜を用いる場合もある。前章式(3), (6)に示した実験定数 A_k , B_k は, 色素自身のみならず, 組み合わせるバインダーの違いによっても大きく変化する。

すでに, 複数のベンチャー企業 (ISSI 社(米)⁶⁾, OPTROD 社(ロシア)⁷⁾ が, PSP/TSP を商品化している。これらは, 国内の試薬販売業者を通じて購入することができるが, 相当高価 (約 10 万円/ m^2) である。

手順さえ踏めば, 塗料は自作可能である。日本では, 航空宇宙技術研究所 (NAL) が中心となって PSP/TSP の研究開発を進めており, 同所から, 塗料の作成法に関する情報が公開されている⁸⁾。

3.2.1 色素

PSP には, 酸素消光性を持つ複素環式化合物, 遷移金属錯体, 多環式芳香族炭化水素が用いられる。手に入れやすい色素には, 次の 3 種類がある:

- (1) 白金ポルフィリン (PtOEP, PtTFPP など)
- (2) ルテニウム(II)錯体 ($[Ru(dpp)_3]^{2+}$ など)
- (3) ピレン誘導体 (Pyrene buthlyic acid など)

一方, TSP には, 多環式芳香族炭化水素 (Rhodamine B, Perylene など) や希土類金属錯体 ($Eu(TTA)_3$ など) が用いられる。

3.2.2 バインダー

主にポリマー (シリコン系, フッ素系, スチレン系, メタクリル酸系) が用いられる。これらのポリマーを, 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。塗布後の塗料膜厚は, 10 μm 程度である。

PSP の特性は, バインダーの酸素透過性に大きく依存する。酸素透過性に優れたバインダーを用いれば, 感度が良く, 温度の影響を比較的受けづらい PSP を作ることができる。

酸素透過性をさらによくするために, ポリマーバインダーの代わりに, 酸化アルミニウム皮膜⁹⁾ やクロマトグラフィ用のシリカゲルプレート (TLC プレート) を用いる場合¹⁰⁾ がある。いずれも, ナノメートルオーダー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。このような多孔質性皮膜は, ポリマーに比べて圧倒的に気体浸透性が高い。

浸透性を, バインダー中における気体の拡散係数 D の形で示せば, ポリマーバインダーは $O(10^{-9} m^2/s)$ 以下であるのに対して, 多孔質皮膜は $O(10^{-6} m^2/s)$ 以上になる。拡散係数は, PSP の時間応答性と密接な関係

があり、拡散係数が大きいほど、高速応答性を示す¹¹⁾。ポリマーバインダー型 PSP の応答時間は 0.1 秒以上、多孔質皮膜型 PSP は、10 マイクロ秒程度となる¹²⁾。

3.3 較正

撮像装置を用いてとらえたルミネッセンスの強度（ないし寿命）を圧力・温度に変換する較正方法を説明する。PSP の較正には、大別して、in situ 法、a priori 法の二つがある。

in situ 法では、模型上に、複数の圧力センサーを PSP とともに設置する。センサー設置位置における PSP 出力をセンサー出力と比較することで、PSP の感度を求める。この手法は、較正試験を別途行う必要がないのが利点である。ただし、PSP 感度には温度依存性があるため、模型全体の温度が不均一になると、この手法は適用できない。

a priori 法は、模型とは別に準備した PSP サンプルを用いて較正試験を行い、感度を求める手法である。感度の温度依存性などを細かく評価できる利点がある。ただし、較正試験と本実験との間で PSP 感度が変化しないことが前提となる。

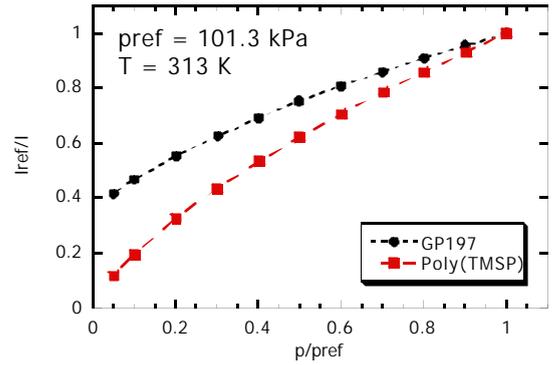
4 計測結果例

4.1 較正試験

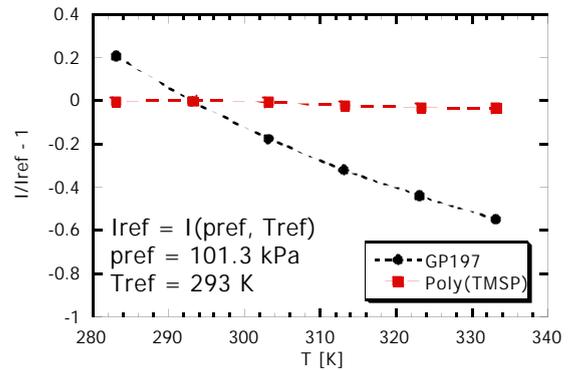
PSP 較正試験結果の一例¹³⁾を図 4 に示す。ここでは、ポリマーバインダー型 PSP を取り上げた。感圧色素として、ポルフィリンの一種である PtTFPP を、バインダーとして、シリコン系ポリマー-GP197、ガラスポリマー-Poly(TMSP) を用いた。Poly(TMSP)を使った PSP は、ポリマーベースのものとしては、出色の酸素透過性、時間応答性を有している¹⁴⁾。なお、励起光源側のバンドパスフィルター波長は 400 ± 50 nm、ルミネッセンス受光側は 650 ± 20 nm とした。

図 4(a) は、圧力と発光強度の関係である。温度は 313 K (40) である。同じ色素であっても、バインダーによって感度（グラフの傾き）が異なる。図 4(b) は、温度と発光強度の関係である。圧力は大気圧である。こちらも、バインダーによる違いが顕著である。このように、バインダーは、PSP の特性を決める大きな要因になっている。

図 4(b)でもわかるとおり、PSP の発光特性は、大



(a) 圧力-発光強度



(b) 温度-発光強度

図 4 PSP の圧力・温度感度 (PtTFPP)

り小なり、温度によって変化する。このため、対称性を仮定できる風洞試験では、対称面を境に PSP/TSP を塗りわけ、圧力・温度の空間分布を半分ずつ計測することが多い。最近では、発光特性の異なる PSP/TSP を混ぜて塗布し、PSP/TSP 出力を同時にとらえる手法の研究も進んでいる¹⁵⁾。

4.2 デルタ翼

図 5 8 は、超音速航空機に良く用いられるデルタ(三角)翼の風洞試験結果¹⁶⁾である。図 5 に、風洞試験に用いた模型の概略を、図 6 に、位置補正の概念を、図 7 に、ルミネッセンス強度分布のグレースケール画像を、図 8 に、圧力センサー出力との比較を、それぞれ示した。一様流マッハ数 M 、模型の迎角 α はそれぞれ 0.55, 20° 、風洞総圧 p_t 、総温 T_t はそれぞれ、55 kPa, 320 K である。模型には、比較のために静圧計測用孔を穿ってある。

発光強度から圧力・温度に変換するためには、基準状態 (p_{ref}, T_{ref}) における発光強度 I_{ref} が必要である。

回転するタービンブレード表面や、自動車ボディ周りの圧力分布計測も行われている。流速 30 m/s (時速 108 km) 程度の条件までは、ある程度信頼性のあるデータが得られると報告されている¹⁷⁾。これ以下の流速では、現状ではPSP計測は難しい。

大気圧近傍の微差圧計測はPSPの泣き所である。大気圧近傍における動圧 ($\rho U^2/2$) は、流速 10 m/s で 60 Pa 程度である。これに対して、PSPは、前述の通り、圧力レンジ 100 kPa オーダーの絶対圧センサーである。データ取得に用いられる CCD カメラの発光強度分解能力は 12bit で 4096 階調であり、その他の誤差がゼロなら、0.01 kPa オーダーの精度を期待できる。しかし、模型表面の温度が 1℃ 変われば、絶対圧に対して 1% 程度の誤差が生じる。そのため、どんなに慎重にデータ取得を行ったとしても、0.1 kPa オーダーの誤差は避けられない。より広範なPSPの普及に向けては、微差圧計測技術の開発が欠かせない。

6. まとめ

PSPによる風洞計測技術を、基礎的な部分を中心に説明した。比較的高速な空気流を対象とするのであれば、従来の圧力センサー多点計測に代わる測定技術として導入に取り組む価値は高い。また、日米欧各国で技術開発が進んでおり、近い将来には、より広範囲に適用可能なPSPが生まれてくるものと期待される。

本稿は、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)」により得られた成果をベースに執筆したものである。

塗料の作成法、測定システム、関連サイトなどの詳細な情報が MOSAIC ホームページ⁸⁾ に掲載されている。

文献

- 1) 日本機械学会編:「熱流体の新しい計測法」, 養賢堂, 東京 (1998).
- 2) T. Liu, B.T. Campbell, S.P. Burns and J.P. Sullivan: Appl. Mech. Rev., 50(4), 227 (1997).
- 3) 浅井圭介: 可視化情報, 18(69), 97 (1998).
- 4) J.H. Bell, E.T. Schairer, L.A. Hand and R.D. Mehta: Annu. Rev. Fluid Mech., 33, 155 (2001).

- 5) 「特集 感圧塗料技術の新展開」, 可視化情報, 21(83), 203-245 (2001).
- 6) <http://www.innssi.com/Diags/PSP/psp.html>
- 7) <http://pt.comcor.ru/~optrod/>
- 8) <http://www.nal.go.jp/ndivision/fluid/japanese/mosaic/>
- 9) 浅井圭介, 特許3101671号 (2000.8.25).
- 10) A.E. Baron, J.D.S. Danielson, M. Gouterman, J. Wan, J.B. Callis and B. McLachlan: Rev. Sci. Instrum., 64, 3394 (1993).
- 11) N.A. Winslow, B.F. Carroll and A.J. Kurdila: AIAA J., 39, 660 (2001).
- 12) 手塚宣和, 亀田正治, 浅井圭介, 天尾豊, 中北和之: 機論, 68-669B, 1391 (2002).
- 13) 手塚宣和: 東京農工大学大学院修士学位論文 (2001).
- 14) 浅井圭介, 大倉一郎, 西出宏之, 特許出願 2000-61625 (2000.3.7).
- 15) K. Mitsuo, M. Hayasaka, M. Kameda and K. Asai: Proc. 10th Intl. Symp. on Flow Visualization, Paper No. F0287 (2002).
- 16) Y. Egami, Y. Iijima, Y. Amao, K. Asai, A. Fuji, N. Teduka and M. Kameda: J. Visualization 4(2), 139 (2001).
- 17) R.H. Engler: Proc. 8th PSP Workshop (Hampton, VA, U.S.A) (2000).
- 18) E. Duell, D. Everstine, R Mehta, J. Bell and M. Perry: SAE-paper 2001-01-0626 (2001).

Summary

Luminescent oxygen sensor utilized as surface pressure sensor of wind-tunnel models is reviewed. The intensity of luminescence emitted from sensing molecules, which are coated on the model surface, is readily transformed into static pressure. Photo-physical principles and measuring techniques including setup, calibration, and data reduction are described. An example of wind tunnel testing, subsonic flow around a delta wing, indicates that the present technique has sufficient accuracy for measuring the pressure field in a quantitative manner. A few recent topics are briefly remarked.