A131 感圧塗料の発光特性に関する基礎実験

九州大 宮里義昭[○], 半田太郎, 益田光治, 松尾一泰
石川島播磨重工業 松本尚之, 坂本和之

Fundamental Experiment on Luminescence Characteristics of Pressure Sensitive Paint

Yoshiaki MIYAZATO*, Taro HANDA*, Mitsuharu MASUDA*, Kazuyasu MATSUO*,
Masashi MATSUMOTO** and Kazuyuki SAKAMOTO**

A fundamental experiment of the temperature characterisitic of the pressure sensitive paint (PSP) to a continuous change in pressure is performed. As the results, for fixed temperature, as the pressure decreases, the paint's brightness increases and for high temperature the brightness decreases. Also, as temperature increases, relative intensity decreases, and relative sensitivity to pressure changes increases. Furthermore, the characteristic of the response of the PSP to a step change in pressure is presented and the time constant is estimated.

1. まえがき

1990年代前半から、風洞模型の表面圧力を圧力依存性のある発光塗料（感圧塗料）によって測定する方法が研究されている¹⁾。感圧塗料は、特定の波長の光を照射すると励起状態となり、その後失活する際に定まった波長の蛍光を放射する。このとき気体中に存在する酸素分子の濃度が大きいと、発光強度（蛍光の強度）が減少することが知られている。酸素の濃度は空気中の酸素分圧に比例するので、測定部に散布した感圧塗料の発光強度と表面圧力を関係づけることができる。一般に、発光強度 I と表面圧力 p の関係は、Stern-Volmerの式を変形した次式が使用される¹⁾²⁾。

$$\frac{I_a}{I} = A + B \frac{p}{p_a}, A + B = 1 \dots \dots \dots (1)$$

I_a は大気圧状態のときの発光強度、 I はある圧力のときの発光強度を示す。しかし上式の係数は、一般に温度に依存することが知られている^{3),4)}が、感圧塗料の温度依存特性についてはあまりよく知られていない。また上式は定常流れで、温度変化が比較的小さい流れ場についてよく成り立つ式である。したがって圧力が非定常に変化する流れ場については式(1)は成立しない。

本論文は、まず初めに、定常な温度と圧力の変化に対する感圧塗料の発光特性を実験的に調べた。また過度応答装置を試作し、ステップ状の圧力変化に対する感圧塗料の発光特性を実験的に調べ、時定数を評価した。いずれの実験でも、感圧塗料として、100ccの酸素透過性シリコンポリマー（米Genesee Polymer Corp. GP-197）に10mgのPtOEPを溶解したものをを用いた。

2. 実験装置と方法

感圧塗料の温度依存特性を調べるための実験装置をFig.1に示す。UVスポット光源（浜松ホトニクス

Fig.1 Static cell and measuring system

* Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University, 6-1 Kasuga-Koen, Kasuga City, Fukuoka, 816

** Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd., 1-15, Toyosu 3-Chome, Koto-Ku, Tokyo, 135.

社製, L5662-01型, 200W) から放出した光は $375\text{nm} \pm 50\text{nm}$ のバンドパスフィルターを通り, 凸レンズによって平行にされた後, ダイクロイックミラーによって反射され, 測定面に照射される。測定面は, サーモモジュール (小松エレクトロニクス社製, K3M-0411型) の伝熱面になっており, その面上に直接スプレーで感圧塗料を散布した。測定面から放射した光の発光強度分布は 650nm のハイパスフィルターを通過した後, CCDカメラ (東京電子工業社製, CS8310型) で撮影され, パーソナルコンピュータに取り込まれた後, 画像処理される。

次に, 感圧塗料の過度応答特性を調べるための実験装置をFig.2に示す。

実験装置の測定部は, 容積が 2200mm^3 であり, その中に, 図に示すように感圧塗料が散布された $7 \times 10\text{mm}^2$ の小さなアクリルプレートが弁座から 10mm 離れた位置に設置されている。またアクリルプレートの向いの位置に圧力センサー (キュライト社製, XCQ-062型) が, 測定部に面一になるように設置されている。測定部内の初期圧力は, プランジャーを弁座から離れた状態で, 真空ポンプで指定の圧力になるまで排気した後, プランジャーを電氣的に弁座に押し付けることによって得られる。この状態で貯気槽内を大気圧に解放しておけば, プランジャーを弁座から離れた瞬間に, 測定部内の圧力は瞬時に大気圧まで解放されるため, ステップ状の圧力変化が得られる。光学系の配置はFig.2に示す通りである。UVスポット光源から放出した光はバンドパスフィルターを通り, 凸レンズによって平行にされた後, ダイクロイックミラーによって反射され, 感圧塗料が散布されたアクリルプレート上に照射する。プレートから放射した光の発光強度は, ハイパスフィルターを通過した後, 光電子増倍管 (浜松ホトニクス社製, R2228型) で測定する。また測定部内の圧力変化は, 圧力センサーで測定し光電子増倍管からの信号と同時に, デジタルストレージスコープに入力される。得られたデータはパーソナルコンピュータで解析される。

Fig.2 Transient response pressure chamber and measuring system

3. 時定数の評価法

感圧塗料をテストセル上に散布したときの膜内の酸素濃度を $c(t)$, 圧力を $p(t)$, h をヘンリーの定数とすれば, 次式が成り立つと仮定する⁵⁾。

$$\tau \frac{dc(t)}{dt} + c(t) = hp(t) \quad (2)$$

ただし, t は時間, τ は時定数⁶⁾を示す。

時刻 t_0 および任意の時刻 t のときの発光強度をそれぞれ, $I_0 = I(t_0)$, $I(t)$ とすれば

$$\frac{I_0}{I(t)} = C + Dq(t), \quad C + D = 1, \quad q(t) = c(t) / (hp_0) \quad (3)$$

ただし, C, D は定数, p_0 は, 時刻 t_0 のときの膜内の圧力である。

ここで, 式(1)の $p(t)$ として, $p_{\min}$ から $p_0 = p_{\max}$ にステップ状に変化する圧力変化を考える。すなわち, $E(t)$ をステップ関数として, $p(t)$ を次のようにおく。

$$p(t) = p_{\min} + (p_0 - p_{\min})E(t) \quad (4)$$

式(2)~(4)を使って, $I(t)$ と t の関係を求めると

$$\frac{I_0}{I(t)} = 1 + \left(\frac{I_0}{I_{\min}} - 1 \right) \exp \left(-\frac{t}{\tau} \right) \quad (5)$$

ただし, $I_{\min}$ は, 圧力が $p_{\min}$ のときの発光強度を示す。

式(5)を変形すると

$$\ln\left(\frac{1}{1 - \frac{I_a}{I(t)}}\right) = \ln\left(\frac{1}{1 - \frac{I_a}{I_{\min}}}\right) + \frac{t}{\tau} \quad \dots\dots\dots(6)$$

したがって、式(6)と実験値を比較することによって時定数 τ を評価できる。

4. 実験結果と考察

4. 1 温度依存特性

温度 $T = -10^\circ\text{C}$ で、圧力 p と大気圧 $p_a (=101.3\text{kPa})$ の比 p/p_a が、 $p/p_a = 1.0, 0.55, 0.01$ のときの発光強度分布の一例をそれぞれ Fig.3(a)~(c) に示す。また $T = 20^\circ\text{C}$ で、 $p/p_a = 1.0, 0.55, 0.01$ のときの発光強度分布をそれぞれ Fig.4(a)~(c) に示す。Fig.3と4は、 $5 \times 5\text{mm}^2$ の測定面の発光強度分布を CCD カメラで撮影した生の画像である。Fig.3と4からわかるように、温度が一定のとき、圧力が低くなるほど発光強度が増加することがわかる。また例えば Fig.3(a) と Fig.4(a) を比較するとわかるように、圧力が一定のときには、温度が高くなると発光強度が減少することがわかる。なお特に Fig.3 からわかるように、画像にばらつきがみられるが、これは主に測定面上の塗料が均一でないことと測定面への照射光が均一でないためである⁷⁾。

次に、基準を大気圧状態のときの発光強度 I_a とし、その発光強度を各圧力のときの発光強度 I で無次元化したときの相対発光強度 I_a/I を無次元圧力 p/p_a に対して Fig.5 に示す。図中の丸印、三角印、四角印、菱形印はそれぞれ、温度が -10°C 、 0°C 、 10°C 、 20°C のときの I_a/I の値を示す。温度が一定のとき、 I_a/I の値は、圧力が増加するにつれて増加する。これは式(1)からも明らかである。また図からわかるように、相対発光強度 I_a/I は、温度が低くなるほど圧力に対する感度が悪くなる。

なお感圧塗料の発光強度の圧力に対する感度は、塗料の調合の方法によっても変化することが報告されている⁸⁾。

4. 2 過渡応答特性

圧力のステップ変化に対する感圧塗料の発光特性を調べた結果を Fig.6(a) に示す。横軸は測定時間を t [sec] 示し、左側の縦軸は大気圧 p_a で無次元化した圧力 $p(t)/p_a$ 、右側の縦軸は発光強度 $I(t)$ を示す。図より、圧力のステップ状の変化に対し、発光強度 $I(t)$ は最初急激に減少するが、時間とともに緩やかに減少した後、ほぼ一定値に近づく。Fig.6(b) は、Fig.6(a) の発光強度 $I(t)$ を大気圧状態のときの発光強度 I_a で無次元化した結果を示す。ただし、従来の研究²⁾によると、圧力がほぼ大気圧の状態でも、約10分間に10パーセント発光強度が減少することが報告されているため、 I_a は $t = \text{約}10\text{秒}$ のときの発光強度とした。Fig.6(b) より、相対発光強度 $I_a/I(t)$ は、最初急激に増加するが、徐々に勾配がゆるやかになり、 $t = \text{約}3\text{秒}$ 以上になると、ほぼ一定値になる。

次に、発光強度分布から時定数を評価するため、縦軸を式(6)の左辺のようにして整理した結果を Fig.6(c) に示す。図中の実線は、 $t=0$ のときの実験値を通る最小自乗曲線であり、次式で示される。

$$\ln\left(\frac{1}{1 - \frac{I_a}{I(t)}}\right) = 1.05 + \frac{t}{1.09} \quad \dots\dots\dots(7)$$

上式から本実験の感圧塗料の時定数 $\tau = 1.09\text{秒}$ となる。この結果から、本実験で用いた塗料はかなり時間応答性が悪い。

Fig.3 Luminescence intensity in case of $T = -10^\circ\text{C}$

Fig.4 Luminescence intensity in case of $T = 20^\circ\text{C}$

Fig.5 Intensity ratio as a function of pressure ratio at various temperature

なお最近の感圧塗料に関する研究⁹⁾によると、塗料の膜厚が時間応答特性に影響を及ぼすことが報告されている。また感圧塗料の種類や塗料の測定面への散布の方法あるいは塗料の調合の方法によっても時間応答特性が影響されることが報告されている⁹⁾。これらは今後の研究課題である。

5. まとめ

測定面の温度と圧力が独立に変化させることができるよどみ室(Static cell)を製作し、温度を実験のパラメーターとして感圧塗料の圧力に対する発光特性を実験的に調べた。その結果、温度が一定のとき、発光強度は、圧力の減少とともに増加する。また相対発光強度は、温度が低いほど圧力に対する感度が悪いことがわかった。さらにステップ状の圧力変化に対する感圧塗料の発光特性を調べるために実験装置を試作し、基礎実験を行い、本実験で使用した感圧塗料の時定数の評価を行った。

最後に、本研究を進めるにあたり、航空宇宙技術研究所、空力性能部の浅井圭介博士には貴重な御助言を頂きました。また本実験には、大学院学生河野隆修氏と久保諭史氏にご協力頂きました。ここに合わせて深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Kavandi, J.L., Callis, J.B., Gouterman, M., Khalil, G., Wright, D., Green, E., Burns, D. and McLachlan, B.G., Luminescent barometry in wind tunnels, Rev. Sci. Instrum. Vol. 61, No. 11, (1990), 3340-3347.
- 2) McLachlan, B.G., Kavandi, J.L., Callis, M., Gouterman, M., Green, E., Khalil, G. and Burns, D., Surface pressure field mapping using luminescent coatings, Experiments in Fluids, Vol. 14, (1993), 33-41.
- 3) Gallery, J., Gouterman, M., Callis, J., Khalil, G., McLachlan, B. and Bell, J., Luminescent thermometry for aerodynamic measurements, Rev. Sci. Instrum. Vol. 65, No. 3, (1994), 712-720.
- 4) 浅井圭介, 神田宏, 飯島由美, PtOEPをベースにした感圧塗料の発光特性, 可視化情報, Vol. 59, No. 1, (1995), 59-62.
- 5) Baron, A.E., Danielson, J.D.S., Gouterman, M., Wan, J.R. and McLachlan, B.G., Submillisecond response times of oxygen-quenched luminescent coatings, Rev. Sci. Instrum., Vol. 64, No. 12, (1993), 3394-3402.
- 6) 水上憲夫著, 自動制御, 朝倉書店, (1968), 102.
- 7) McLachlan, B.G., Bell, J.H., Park, H., Kennelly, R.A., Schreiner, J.A., Smith, S.C., Strong, J.M., Gallery, J. and Gouterman, M., Pressure-Sensitive Paint Measurements on a Supersonic High-Sweep Oblique Wing Model, J. Spacecraft, Vol. 32, No. 2, (1995), 217-227.
- 8) 浅井圭介, 神田宏, 飯島由美, 李相京, 大倉一郎, 各種の感圧塗料のサンプル特性試験, 可視化情報, Vol. 17, No. 1, (1997), 229-232.
- 9) Carroll, B.F., Abbitt, J.D., Lukas, E.W., and Morris, M.J., Step Response of Pressure-Sensitive Paints, AIAA J., Vol. 34, No. 3, (1996), 521-526.

Fig.6 Response of pressure sensitive paint to air pressure jump