感圧塗料の温度依存性および時間応答特性に関する研究*

半田 太郎^{*1}, 益田 光治^{*1}
松尾 一泰^{*2}, 松本 尚之^{*3}Temperature Dependence and Time-Response Characteristics
of Pressure Sensitive PaintsTaro HANDA^{*4}, Mitsuharu MASUDA,
Kazuyasu MATSUO and Masashi MATSUMOTO^{**} Department of Energy and Environmental Engineering, Kyushu University,
6-1 Kasuga-Koen, Kasuga-shi, Fukuoka, 816-8580 Japan

To obtain the time-response and the effect of temperature of the pressure sensitive paints (PSPs), the luminescence intensity of the PSPs is measured in the pressure and wall temperature range of 1~101.3 kPa and 263~303 K, respectively. The PSPs studied in the present works are PtOEP, PtTFPP, H₂TFPP, H₂TCPP, H₂TSP, and H₂TTMAPP; they are painted on a commercially-available porous silica thin-layer chromatography (TLC) plate. The effect of the plate temperature on the pressure measurements is examined, and it is found that H₂TFPP has the smallest temperature sensitivity of 3.5 kPa/K among the paints tested. The time-response of the paints is also investigated by using a shock tube. The change in luminescence caused by the sudden pressure rise due to an incident shock wave is detected by a photomultiplier. Results indicate that the response time is on the order of 20~40 microseconds. In addition, the contact surface in the shock tube flow provides a method of checking the effect of the sudden change in gas temperature, and it is found that the luminescence intensity is insensitive to this effect.

Key Words: Pressure Sensitive Paint, Pressure Measurements, Compressible Flow, Shock Wave, Shock Tube, Temperature Effect

1. まえがき

物体表面上の静圧分布を測定する手段の一つとして、感圧塗料が注目されている。ある種の塗料に特定の波長の光を照射すると、塗料を構成する分子は励起状態に遷移し、その後失活する際に定まった波長の光(りん光)を放射する。いっぽう、物体表面上に存在する酸素分子は塗料内に拡散してくるが、励起分子は酸素分子により無放射遷移して失活するため、物体表面上の酸素の分圧が高いほどりん光強度は低くなる。すなわち、りん光強度は圧力の関数となる。そこで、この塗料を気流中に置かれた物体の表面に塗布し、外部から励起光を照射して、得られたりん光強度分布をCCDカメラなどで撮像し画像処理すると、物体表面上の圧力分布を得ることができる。この方法では、一枚の画像から圧力分布を測定できるため、従来の静圧孔による測定と比較して、簡便で高い空間分解能が得られる利点がある。

感圧塗料に関する本格的な研究は1990年頃に開始された。定常流れ場に関しては、航空機の翼⁽¹⁾、ロケット先頭部⁽²⁾、スクラムジェットエンジン燃料噴射部近

傍⁽³⁾、ボルテックスジェネレータ近傍⁽⁴⁾などにおける壁面圧力分布が測定されている。これらの実験的研究では、感圧塗料の結果と壁面上に設けた静圧孔による測定静圧とを併用することにより、物体表面上の静圧分布が高空間分解能で測定できることが示された。

感圧塗料は現在各国で積極的な研究開発が行われているが、実用レベルに達しているとは言い難い。とくに、感圧塗料が発するりん光強度の温度依存性と、非定常流れ場計測を考慮した場合の時間応答特性は解明を迫られている重要な問題である。

感圧塗料のりん光強度は壁面の温度に依存するため、温度依存特性を把握することは測定精度を向上させるうえで極めて重要である。浅井らは感圧塗料PtOEPの温度依存性を調べており⁽⁵⁾、温度が高くなるほどりん光強度の圧力感度は増すが、りん光強度自身が減少するため、測定は困難になると述べている。また、Wanは複数の塗料の温度依存性を壁面温度10~50℃の範囲で測定し⁽⁶⁾、Liuらは過去に調査された塗料について温度1℃当たりのりん光強度の変化量を求め表にまとめた⁽⁷⁾。これらの研究では壁面温度とりん光強度の関係が調べられたが、圧力測定で重要なのは圧力変化に対するりん光の変化量、すなわち圧力感度で、温度変化によるりん光強度の変化が多少大きくても圧力感度が十分あれば高精度の圧力測定が可能である。すなわ

* 原稿受付 2001年9月20日。

^{*1} 正員, 九州大学総合理工学研究院(☎ 816-8580 春日市春日公園6-1)。^{*2} 正員, 北九州市立大学国際環境工学部(☎ 808-0135 北九州市若松区ひびきの1-1)。^{*3} 正員, 東北大学工学研究科(☎ 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉)。

E-mail: handa@ence.kyushu-u.ac.jp

ち、感圧塗料は、塗料の温度特性と圧力感度を同時に考慮して良否を判定する必要があるが、そのための資料は現在十分にそろっているとは言い難い。

感圧塗料の非定常流れ場への適用も重要な検討課題である。Baronら⁽⁸⁾とCarrollら⁽⁹⁾は急速開口バルブにより、測定室内の圧力を短時間で変化させ、塗料の時間応答特性を得た。しかし、この方法では、圧力の立ち上がり時間は1ms程度であり、感圧塗料の応答時間がこれより短い場合、この測定法で得られた応答時間には誤差が含まれると考えられる。さらに、伝ば衝撃波が関与するような高速非定常流れ場を感圧塗料で測定しようとする場合、応答時間と共に、気流の急速な温度変化の影響も明らかにしておく必要がある。

これらの問題を解明するため、本研究では、風洞試験で比較的良く使われるPtOEP, PtTFPP, H₂TFPP, H₂TCPP, H₂TSPP, H₂TTMAPPの6種類の感圧塗料の温度依存性と時間応答性を実験的に調査することとした。これらの塗料は、薄膜クロマトグラフィ(thin-layer chromatography, 以下、TLCとよぶ)板上に物理的に吸着させて用いられる。感圧塗料の温度依存性を調べるため、静止気体セル内に壁面の温度を調節できるペルチェ素子を設置し、圧力1～101.3kPa、壁面温度263～303Kにおける塗料のりん光強度を測定する。さらに、その測定結果をもとに、各種の塗料について1Kの温度変化にともなう圧力測定誤差を評価・比較する。また、衝撃波管を用い、管内の衝撃波の通過にともなう急激な圧力上昇を利用して感圧塗料の時間応答特性を調べる。同時に接触面の通過にともなうりん光強度の変化を観察し、瞬間的な気体の温度変化がりん光特性に与える影響を調べる。

2. 感圧塗料による圧力測定原理

感圧塗料を構成する分子は特定の波長の光を照射すると励起状態に遷移し、その後失活するときりん光を放射する。気体中に存在する酸素分子はこの過程と干渉し、発光強度を減少させる(酸素消光, oxygen quenching)。酸素分子が存在している状態での励起分子の寿命は以下の式で定義される。

$$\tau_q = \frac{1}{k_f + k_{nr} + k_q[O_2]} \quad [s] \quad (1)$$

ここで、 k_f 、 $k_{nr}(s^{-1})$ はそれぞれ、自然放出率、無放射失活率、 $k_q(l/(mol \cdot s))$ は衝突失活係数であり、 $[O_2](mol/l)$ は酸素分子の濃度である。なお、 k_{nr} と k_q は壁面温度の関数である⁽⁷⁾。消光分子がない場合の蛍光寿命 τ は、

$$\tau = \frac{1}{k_f + k_{nr}} \quad [s] \quad (2)$$

となり、式(1)、(2)より次のStern-Volmerの関係式が導かれる。

$$\frac{\tau}{\tau_q} = 1 + k_q \tau [O_2] = 1 + K_{SV}[O_2] \quad (3)$$

ここで、 $K_{SV}(l/mol)$ はStern-Volmer定数である。

酸素分子が無いときのりん光強度を I_{max} 、酸素分子が存在するときのりん光強度を I とすると、一般に

$$\frac{\tau}{\tau_q} = \frac{I_{max}}{I} \quad (4)$$

が成り立つので、式(3)は以下ようになる。

$$\frac{I_{max}}{I} = 1 + K_{SV}[O_2] \quad (5)$$

気体中の酸素分子の濃度 $[O_2]$ はヘンリーの法則より気体の圧力 $p(Pa)$ と比例関係にあるので式(5)は $K(Pa^{-1})$ を定数とすると以下ようになる。

$$\frac{I_{max}}{I} = 1 + K \cdot p \quad (6)$$

なお、 I_{max} の測定は困難なので、式(6)を大気圧状態で正規化すると、

$$\frac{I_a}{I} = A + B \cdot \frac{p}{p_a} \quad (7)$$

となる。ここで、 I_a は大気圧 p_a におけるりん光強度であり、 A 、 B は以下のとおりである。

$$A = \frac{1}{1 + K \cdot p_a}, \quad B = \frac{K \cdot p_a}{1 + K \cdot p_a} \quad (8)$$

実際のりん光強度は式(7)に従わない場合もあるため、実験では通常以下の式が用いられる。

$$\frac{I_a}{I} = A + B \cdot \frac{p}{p_a} + C \cdot \left(\frac{p}{p_a} \right)^2 \quad (9)$$

3. 実験装置と方法

3.1 感圧塗料 本研究では感圧塗料としてPtOEP, PtTFPP, H₂TFPP, H₂TCPP, H₂TSPP, H₂TTMAPP^{(6),(7)}の6種類の物質を用いる。図1にPtTFPPとH₂TFPPの化学式を示す。本実験で用いた塗料は化学結合の係子から2つに分類できる。PtOEPとPtTFPPは(a)図に示すように、結合状態の中心に1

つの白金原子Ptが存在する分子構造で、残りの4種類の塗料は(b)図に示すように、結合状態の中心に2つの水素原子Hが存在する構造をとる。

上述の物質を感圧塗料として使用する場合、これらを壁面に塗布しなければならないが、本研究ではMerck社製のTLCプレートに塗料を物理的に吸着させる⁽⁸⁾。この方法を用いることにより、塗料を構成する分子は表面にさらされ、従来の酸素透過性シリコンポリマーをベースとした塗布方法⁽⁵⁾に比べて気体中の酸素分子と速やかに衝突し、速い応答特性が得られる。

(a) PtOEP

(b) H₂TFPP

Fig.1 Structural formulas of PSP molecules

3.2 壁面温度依存性測定装置 感圧塗料の壁面温度依存性を測定する実験装置を図2に示す。気体が静止している場合のりん光強度を測定するため、本研究では静止気体セル(1)を用いる。静止気体セル内の圧力は弁(6)により1~101.3kPaの範囲で調節できる。また、水分の影響を取り除くため、セル内に封入する気体には乾燥空気(水分含有率5ppm以下)を用いる。感圧塗料を塗布したTLCプレートを設置する壁面はペルチェ素子(2)(小松エレクトロニクス社製、K3M-0411型)からなっており、263~303Kの範囲で温度が調節できる。

光源には水銀-キセノンランプ(8)(浜松ホトニクス社製、L5662-01型)を用いる。光源から出た光は熱吸収

Fig.2 Experimental setup for measuring the luminescence characteristics

Fig.3 Spectral profile of mercury-xenon lamp

Fig.4 Shock tube

フィルタ(浜松ホトニクス社製、A6562-03型)と可視光を除去するフィルタ(シグマ光機社製、BLF-50S-390B型)からなるフィルタA(9)を通り、光ファイバ(10)を通して、感圧塗料に照射される。塗料からのりん光はレンズ(12)により集光され、りん光の波長のみを選択するフィルタB(13)(シグマ光機社製、SCF-50S-580型)を透過した後、光電子増倍管(14)(浜松フォトニクス社製、R374型)によって検出される。なお、りん光のスペクトルを測定する場合には、フィルタBのかわりに分光器(15)(分光計器社製、M25型)を介して光電子増倍管でりん光強度を検出する。光電子増倍管からの信号はデジタルオシロスコープ(16)(LeCroy社製、9360型)でA/D変換された後、パーソナルコン

ピュータ(17)に記録される。なお、本実験の場合、光電子増倍管の印加電圧は1000Vである。また、空間分解能を規定するため、光電子増倍管前面に1×1mmのスリットを設けた。

フィルタA透過後の水銀-キセノンランプの発光スペクトルを図3に示す。図の横軸は波長 λ (nm)、縦軸は最大強度 I_{peak} で正規化したりん光強度である。これより、光源は波長約365nmにピークを持ち、その半値幅は約2.4nmであることがわかった。

感圧塗料に励起光を照射し続けると、光解離が起こり、りん光強度が減少する⁽¹⁰⁾。本研究では、予備実験として、励起光を30分間照射し続け、感圧塗料からのりん光強度の時間変化を観察した。その結果、ある時間以上励起光を照射すると、りん光強度はほぼ一定になることがわかった。そこで、本実験では光解離による影響を取り除くため、20分間励起光を照射した後、測定を行う。1種類の塗料について、測定に要する照射時間は約200秒であり、この間のりん光強度の低下量は最も大きい塗料で約3%である。

3.3 時間応答特性測定装置 感圧塗料の時間応答特性を調べるため、本研究では衝撃波管を用いる。その模式図を図4に示す。本実験では高圧部を大気圧、低圧部を10kPaに設定する。測定部における流れの持続時間は、接触面の到達によって制限され、8.5msである。

測定部壁面に塗料を吸着したTLCプレートを設置する。その壁面の反対側の壁面は光学ガラス製で、ここから励起光を入射し、同時にりん光を観測できるようになっている。衝撃波通過時のりん光強度の時間変化を測定するための光学系は図2と同様である。なお、測定部壁面に半導体型圧力センサー(キュライト社製、XCQ-062-25SG型、受圧面直径1.63mm)を設置し、りん光強度の測定と同時に圧力センサーによる圧力測定も行う。

(a) PtTFPP

(b) H₂TFPP

Fig.5 Temperature characteristics of luminescent spectrum

4. 実験結果および考察

4.1 感圧塗料の壁面温度依存性 大気圧下におけるりん光スペクトルの壁面温度依存性を調べた。PtTFPP、H₂TFPPの結果を図5(a)、(b)に示す。PtTFPPのスペクトルは波長約650nmでピークをとるのに対し、H₂TFPPのスペクトルは約650nmと710nmの二ヶ所にピークがある。他の塗料については、PtOEPではPtTFPPと同様に約650nmにピークが1つあるのに対し、他の結合部中心に2つの水素原子を有する塗料は全て、約650nmと710nmにピークがあった。このことは、りん光スペクトルのピーク波長が結合部中心の原子の種類によることを示していると考えられる。また、図5では壁面温度をパラメータとしてりん光スペクトルを示したが、PtTFPP、H₂TFPPのいずれの塗料も温度が高くなるにつれ、スペクトルのピークが長波長側にシフトしていることが分かる。他の塗料についても同様の結果が得られた。これは、壁面温度により分子内緩和過程が異なるためと考えられ

Fig.6 Temperature characteristics of luminescent intensity ($p_a=101.3\text{kPa}$)

るが、詳細な理由は不明である。

図6にはPtTFPP, H₂TFPP, H₂TCPPの圧力に対するりん光強度の変化を壁面温度 T_w をパラメータとして示す。図の横軸はセル内の圧力 p を基準圧力 p_a (=101.3kPa)で無次元化した値、縦軸は圧力 p_a 、壁面温度293Kのりん光強度 $I_{a,293K}$ を圧力 p におけるりん光強度 I で割った値である。図の実線は、最小二乗法を用いて式(9)に含まれている定数 A , B , C を定めた場合の、式(9)の計算値である。

同図より、PtTFPP((a)図)では他の2つの塗料と比較して $I_{a,293K}/I$ の圧力感度が高い反面、温度に対する感度も高い。図には示していないがPtOEPについても、PtTFPPとほぼ同様の結果が得られた。このことは、結合中心に白金原子がある塗料は結合中心に2つの水素原子がある塗料と比較して、 $I_{a,293K}/I$ の圧力感度も高いが、温度感度も高いことを示している。また、その傾向は圧力の高い領域で顕著である。

図6によれば、 $I_{a,293K}/I$ の圧力感度と温度感度は塗料によって異なるが、温度感度 $\partial(I_{a,293K}/I)/\partial T_w$ が圧力感度 $\partial(I_{a,293K}/I)/\partial p$ と比較して小さい塗料ほど、壁面温度の変化による圧力測定誤差が少ない塗料といえる。そこで、本論文では温度の影響を定量的に評価するため、次式で定義される温度依存係数 k を用いる。

$$k = \frac{\partial(I_{a,293K}/I)/\partial T_w}{\partial(I_{a,293K}/I)/\partial p} \quad [\text{kPa/K}] \quad (10)$$

k の値は実験結果を用いて決定する。上式によれば、温度依存係数が k (kPa/K)の塗料では1Kの壁面温度変化があった場合、 k (kPa)の圧力測定誤差が生じることを意味する。実験で測定したりん光強度をもとに各塗料について温度依存係数を求めた。その結果を図7に示す。図の横軸は圧力 p (kPa)、縦軸は温度依存係数 k (kPa/K)である。(a)~(d)図は壁面温度が263, 283, 303K、(e)図は278, 293, 303K、(f)図は273, 298, 303Kの場合の結果を示す。H₂TSPP((e)図)とH₂TTMAPP((f)図)ではそれぞれ278Kと273K以下の温度では塗布面が結露し、正確な測定ができなかった。図より、どの塗料においても圧力が高くなるほど k の絶対値は大きくなり、壁面温度変化による圧力測定誤差が大きくなる。また、結合中心に白金原子があるPtOEPやPtTFPPは結合中心に水素原子がある他の塗料と比較して k が大きく、とくに壁面温度が低いとその傾向が強いことがわかる。

4.2 感圧塗料の時間応答特性 衝撃波管における衝撃波通過によるステップ状の圧力変化を利用し、感圧塗料の時間応答特性を評価する。本研究では塗料の応答特性を以下に示すステップ関数に対する一次遅れ系の式で近似することとした。

Fig.7 Temperature dependence factor as a function of pressure

$$\frac{p - p_{\min}}{p_{\max} - p_{\min}} = 1 - e^{-t/\tau} \quad (11)$$

ここで、 p は感圧塗料で測定される圧力、 $p_{\min}$ は初期圧力、 $p_{\max}$ は衝撃波通過後の圧力、 t は衝撃波通過後の時間、 τ は時定数である。本研究では、実験結果より、最小二乗法を用いて τ を求め、感圧塗料の時間応答性を評価する。

H_2 TFPPで測定した衝撃波通過後の圧力の時間変化を図8に示す。図の横軸は衝撃波通過後の時間 t 、縦軸は衝撃波による初期圧力からの圧力上昇 $p - p_{\min}$ を衝撃波通過後の圧力上昇 $p_{\max} - p_{\min}$ で割った値、すなわち、式(11)の左辺である。左縦軸が感圧塗料、右縦軸が圧力センサーの結果を示す。先に述べたように、圧力セ

Fig.8 Response of H_2 TFPP to step change in pressure

Table 1 Response time

PSP	τ (μ s)
PtOEP	18
PtTFPP	43
H_2 TFPP	16
H_2 TCPP	35
H_2 TSP	31
H_2 TTMAPP	19

ンサーの受圧面直径は1.63mmである。この距離を衝撃波が通過するために必要な時間は約4 μ sと見積もられるが、同図の圧力センサー波形から計算される時定数は4.5 μ sで、両者はほぼ一致する。次にりん光波形の計測では、光電子増倍管前面に1 $\times$ 1mmのスリットを設置したが、1mmの距離を衝撃波が通過するために必要な時間は約2.5 μ sである。いっぽう、同図から、りん光強度の立ち上がりには10 μ s以上を要していることから、本計測系の時間分解能で、感圧塗料の時定数を測定することができると思われる。図の測定値に基づき式(11)の τ を最小二乗法により求めたところ $\tau=16\mu$ sの値

を得た。この τ を用いて式(11)を計算した結果が図の破線であるが、これより式(11)は実験結果をよく表現できることが分かる。なお、圧力センサーの結果と比較すると感圧塗料のりん光波形には雑音が多い。この雑音は光電子増倍管に入射する光子数の変動や増倍管中の光電面やダイノードからの熱電子による変動など光電子増倍管固有のものと考えられる⁽¹¹⁾。

各塗料について求めた τ の値を表1に示す。表より、本研究で用いた塗料の応答時間は20 $\sim$ 40 μ sであることがわかる。

4.3 気体温度が急激に変化する場合の塗料のりん光特性 2.1節で感圧塗料による圧力測定原理を述べた際、式(3)のStern-Volmer定数 K_{SV} は壁面温度の関数とした。感圧塗料に接している気体の温度が急激に変化した場合にもこの仮定が成立するか否かについて検討した例は過去に無い。この疑問に答えるため、本研究では衝撃波管内流れにおける接触面を利用する。接触面通過の前後では圧力変化が無く、大きな温度変化が生じる。本実験では温度が約200K変化する。

観測部の圧力の時間変化を感圧塗料と圧力センサーにより測定した。その結果を図9に示す。感圧塗料は、りん光強度の壁面温度依存性が強いPtOEPである。図の上部は本実験条件における波動線図である。破膜後8msで衝撃波は観測部に到達し、その8.5ms後に接触面が到達する。一次元理論によれば、接触面前後の温度は、それぞれ409K、204Kである。また、衝撃波管

Fig.9 The wave diagram (upper) and the time variation of pressure measured by PtOEP and the pressure transducer.

高圧部の管端は開放端となっており、破膜時に発生した膨張波は管端で反射した後、圧縮波となって観測部へ伝ばし、衝撃波通過後約10ms後で観測部に到達する。図9の圧力センサーによる圧力波形によれば、衝撃波通過によって圧力が上昇し、その約10ms後に反射圧縮波の到達により再び圧力が上昇する。感圧塗料による圧力波形は、光子統計による雑音成分がみられるものの、圧力センサーによる波形と良く一致している。接触面が通過すると気体の温度が低くなるため、もし塗料のりん光が接触面の影響を受けるとすれば、りん光強度が増加し、感圧塗料で測定した圧力値は低くなる。しかし、図9の実験結果では接触面の通過する $t=8.5\text{ms}$ において、波形の変化はみられず接触面の影響は全くない。PtTFPP, H_2TFPP を用いて同様の実験を行ったが、接触面の影響はみられなかった。これらの実験事実、感圧塗料のりん光強度は壁面温度のみに依存し、周囲の気体の急激な温度変化に影響されないことを意味している。

5. 結論

感圧塗料の温度依存性を評価するため、静止気体セル内で壁面温度を変化させて、塗料のりん光強度を測定した。また、感圧塗料の時間応答特性を調べるため、衝撃波管を用いて、ステップ状の圧力変化に対する塗料のりん光強度の時間変化を測定した。さらに、瞬間的な気体の温度変化がりん光強度へ及ぼす影響を調べるため、衝撃波管流れにおける接触面通過時のりん光強度の時間変化を観察した。用いた塗料はPtTFPP, H_2TFPP , H_2TCPP , H_2TSPP , $\text{H}_2\text{TTMA-PP}$ である。得られた結果を以下に要約する。

(1) 式(10)で定義される温度依存係数 k により、感圧塗料の壁面温度変化にともなう圧力測定誤差を評価した。その結果、本研究で対象とした全ての塗料において、壁面温度が低くなるほど、また、圧力が高くなるほど、温度変化による圧力測定誤差が大きくなることが分かった。

(2) 本研究で用いた感圧塗料は、化学結合の状態では2つに分類できるが、結合中心に白金原子が1つある塗料は、結合中心に水素原子が2つある塗料に比べて、本測定圧力範囲1~101.3kPaにおいて温度依存性が大きい。

(3) 結合中心に水素原子が2つある塗料のなかでも H_2TFPP は温度依存係数が3.5kPa/K以下で、温度分布のある壁面の圧力測定に適している。

(4) 圧力が急激に変化する流れ場における感圧塗料の時間応答性を調べるため、衝撃波管を用いて入射衝撃波の通過に伴う感圧塗料のりん光強度の変化を調べた。その結果、塗料の応答時間は20~40 μs であるこ

とがわかった。

(5) 感圧塗料に接する気体の温度が急激に変化した場合のりん光強度の変化を調べるため、衝撃波管における接触面前後の流れ場を利用した。その結果、感圧塗料のりん光強度は気体温度の急激な変化の影響を全く受けないことが分かった。

謝辞

実験に当たり北村巧氏、福島章氏の助力を得た。ここに記して感謝する。

本研究は一部、日本学術振興会科学研究費補助金「基盤研究(B)」の補助を受けた。

参考文献

- (1) 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. Aircraft*, 32-2(1995), 217.
- (2) 浅井圭介, 感圧塗料における圧力分布の計測技術, 可視化情報, 18-69(1998)97.
- (3) Everett, D.E., Woodmansee, M.A., Dutton, J.C. and Morris M.J., Wall Pressure Measurements for a Sonic Jet Injected Transversely into a Supersonic Crossflow, *J. Propulsion and Power*, 14-6(1998), 861.
- (4) Cler, D., Lamb, M., Farokhi, S., Taghavi, R. and Hazlewood, R., Application of Pressure-Sensitive Paint in Supersonic Nozzle Research, *AIAA J.*, 33-6(1996), 1109.
- (5) 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, 15-1(1995)59.
- (6) Wan, J.R., Fast Response Luminescent Pressure Sensitive Coating and Derivatives of Tetra(pentafluorophenyl)porpholactone, PhD Thesis, University of Washington, (1993).
- (7) Liu, T., Campbell, B.T., Burns, S.P. and Sullivan, J.P., Temperature- and Pressure-sensitive luminescence paints in aerodynamics, *Appl. Mech. Rev.*, 50-4(1997), 227.
- (8) Baron, A.E., Danielson, J.D.S., Gouterman, M., Wan, J.R., and Callis, J.B., Submillisecond response times of oxygen-quenched luminescent coatings, *Rev. Sci. Instrum.*, 64-12(1993), 3394.
- (9) Carrol, B.F. and Abbitt, J.D., Lukas, E.W. and Morris, M.J., Step Response of Pressure-Sensitive Paints, *AIAA J.*, 34-3(1996), 521.
- (10) McLachlan, B.G., Kavandi, J.L., Callis, J.B., Gouterman, M., Green, E., Khalil, G. and Burns, D., Surface pressure field mapping using luminescent coatings, *Exp. Fluid*, 14(1993), 33.
- (11) 鈴木範人, 吉川淳, 光の検出とデータ処理 第3講 光電子増倍管の出力信号の処理, 分光研究, 23-3(1971), 147.