

光学的圧力分布観測装置の構成

神田 宏, 飯島 由美, 浅井 圭介 (航技研 空力特性研究部)

Development of the Pressure-Field Imaging Camera System

Hiroshi KANDA, Yoshimi IJIMA, and Keisuke ASAI (NAL)

ABSTRACT

Pressure-sensitive paint (PSP) is a measurement technique based on the quenching phenomena of luminescent molecules. Using PSP, pressure field on model surfaces can be evaluated from luminescence intensity of the paint emission. In order to use PSP in production wind tunnel testing, the measurement system called Pressure-Field Imaging Camera System (PICS) has been developed. The hardware of PICS is consists of an excitation light, light delivery system, a filter wheel, a high-resolution CCD camera, computer system, a sample calibration chamber, etc. The whole processes, including data acquisition, image processing, and paint calibration are handled by a set of dedicated software. Simple image processing is made on site in an interactive manner and data is stored for more sophisticated post processing. In this paper, the specification and construction of PICS are described in detail and applications of PICS to transonic wind tunnel testing is presented.

1. 概要

近年, 風洞実験における新しい圧力計測手法として, 感圧塗料 (以下, PSPと称する) による画像計測技術が注目されている。この方法は, ポルフィリン等の蛍光物質の酸素による消光現象を応用したものである。PSPを風洞模型に塗布し, 励起光を照射した際のルミネセンス強度分布をCCDカメラ等で正確に測定すれば, 模型表面上の圧力分布を求めることができる¹⁾。我々は, PSPを用いた画像計測技術が, 航空機開発等の風洞試験において, データ生産性の向上や空力現象の解明に十分有効な手法になり得るとの観点から, 風洞試験での圧力分布計測を主目的とした光学的圧力分布観測装置 (Pressure-Field Imaging Camera System, 以下, PICSまたは本装置と称する) を製作した。そして, 風洞計測装置としての技術的問題点を評価するため, 遷音速風洞で実証試験を行った。本発表では, このシステムの概要と当所における風洞試験への適用例について報告する。

2. 基本構成

PICSは, 次の要素で構成される。まず, PSPを塗布した風洞模型を照射する励起光源, 蛍光物質から放射されるルミネセンスを検出する光検出器, そしてルミネセンス分布を画像データとして処理を行うコンピュータである。これらの画像計測機器と, 模型表面に塗布するPSPの特性試験を行う校正チャ

ンバーの組合わせによってシステムが構成される。図1に概要を示す。

2. 1. 設計指針

PSPとして利用可能な化学物質は, 世界各国で開発が進められている。これらの蛍光物質は, それぞれ異なった励起及びルミネセンス・スペクトルを持っている。また, 塗布に必要となるバインダー物質との組合せで, 圧力感度や温度依存性などの特性が変化する²⁾。

PICSの開発にあたり, 各種のPSPが利用可能で, 最終的にPSPの校正試験データをもとに風洞実験で得られた画像データだけで圧力分布が算出できるシステム (A Priori法) を目標とした。装置の具体的な設計においては, 以下を指針とした。

- ① 様々なPSP物質に対応できる。
- ② 複数の蛍光物質の組合せが可能である。
- ③ 校正試験と風洞試験で装置を共用化する。
- ④ 従来の圧力センサによる計測を補完, または代替できるような精度の定量計測。
- ⑤ 各種の校正方法が適用できる。
- ⑥ 風洞実験現場において取扱いが容易である。

2. 3. ハードウェア

前述した設計指針に基づき, PICSは次のような機器構成とした。

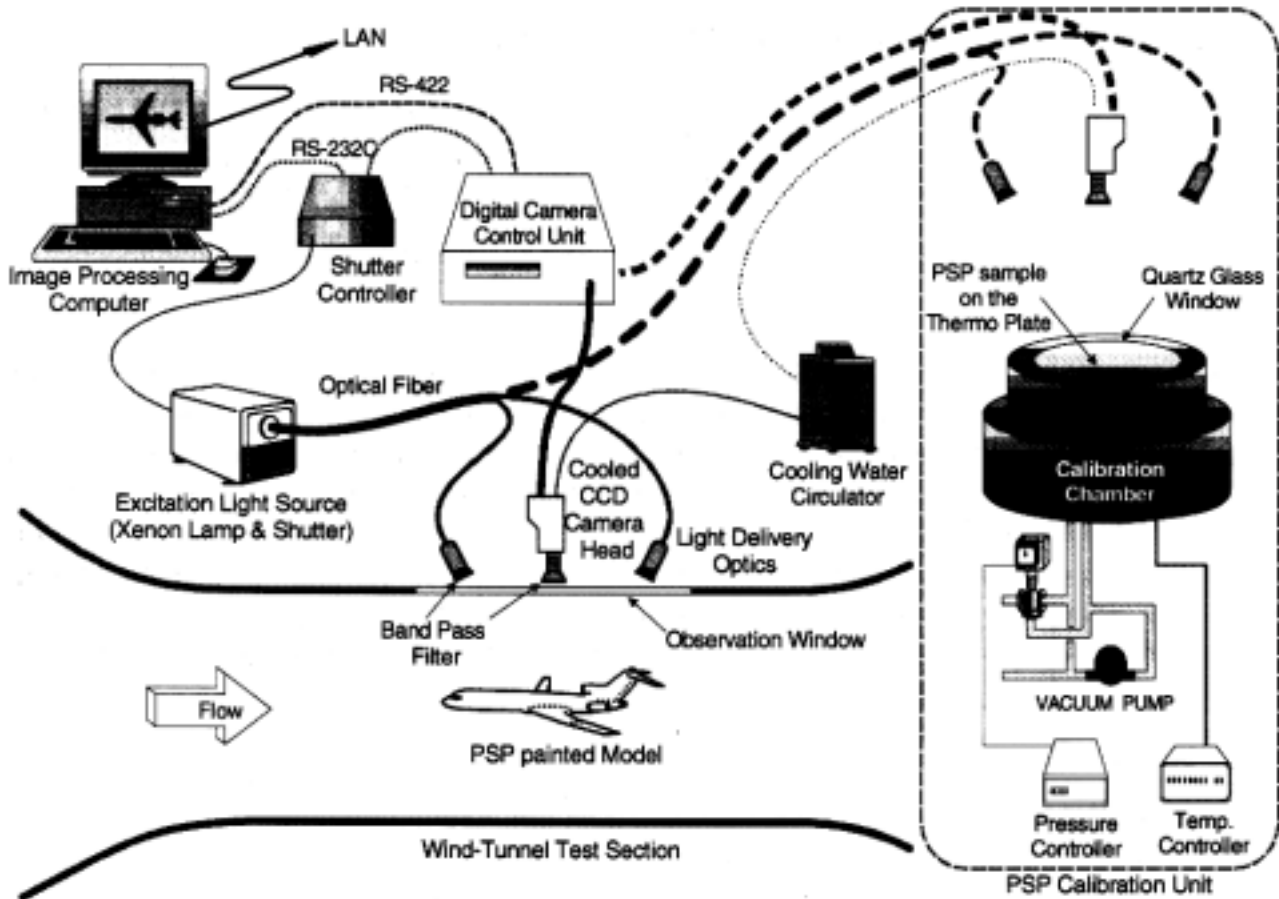


図 1. Pressure-Field Imaging Camera System

(1) 励起光源

一般に蛍光物質の励起光源として、主に紫外域に発光スペクトルを持つレーザーや放電管などが利用される。レーザーは特定波長のみを効率的に発光できる特徴があるが、励起スペクトルが特定できない場合は都合が悪い。このためレーザーよりも取扱いが容易で広い範囲のスペクトルを持つキセノン(Xe)アークランプを採用した。この光源スペクトルから、各蛍光物質の励起に最適な波長のみ透過する干渉フィルタによって選択する方式とした。

励起光源には300Wの高安定Xeランプ（浜松ホトニクス L2480-0X）を直流安定化電源で点灯させて

いる。この光源装置は、電源部とランプ収納部が分離されており、ランプ収納部に光ファイバーによるライトガイドが接続できるので、放熱対策や実験装置への装着が容易である。

励起光はランプ収納部に接続された石英ファイバーにより、実験装置の観測窓に取付けられた集光レンズを内蔵した照射器に導かれる。照射器の先端には、PSPの励起波長のみを通過させるバンドパスフィルタが取付けられる(図2)。また、励起光による塗料物質の劣化を抑えるため、ファイバー接続部には遮光用のシャッター機構が設けられ、画像処理コンピュータに接続したコントローラによって、カメラの撮影動作と連動して励起光を照射させる事ができる。

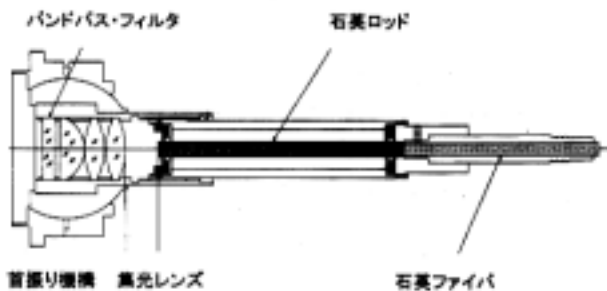


図 2 照射器の構造

(2) デジタルカメラ

PSPの圧力測定精度を上げるためには、ルミネセンス強度を正確に計測する必要がある。ルミネセンスの計測には、検出精度の良いフォトダイオードや光電子増倍管(PMT)などのスポット型センサの光学系を走査して面情報データとする方法がある。この

場合、走査は機械的に行われるので1枚の画像を得るのに、ある程度の時間を要する。一方、対物レンズと二次元CCD撮像素子によって捉えるカメラ方式は、面情報の同時性が確保できる。

一般に出回っているCCDビデオカメラは毎秒30コマの撮影が可能であるが、S/Nが45~60dB程度でデジタルデータとして扱うと精度は8~10ビット相当となる。通常のビデオカメラでは肉眼の特性に合わせて非線型な補正を行ったり、明るさによって感度を自動的に変化させる回路があり、また周囲温度によってCCDの暗電流が変化するなど、精密な計測には適さない。当面は定常状態での圧力分布測定に限れば、基本的に静止画像として扱えるので、テレビ標準規格等の制約を受けず空間分解能の高いメガピクセルのCCDが利用できる。これらを考慮して本装置には、通常のCCDカメラよりも飽和電荷量の大きいフレームトランスファ型CCDを用いた科学計測用高感度デジタルカメラ(浜松ホトニクスC4880)を採用した。このカメラはCCDをベルチエ素子によって約-60℃まで電子冷却し暗電流を抑えている。ベルチエ素子の放熱は、冷却水がカメラヘッド部を循環する水冷式である。また、CCUに内蔵された高精度AD変換器(14bit)によってダイナミックレンジを広くとれる。画素数は1000×1018ピクセル

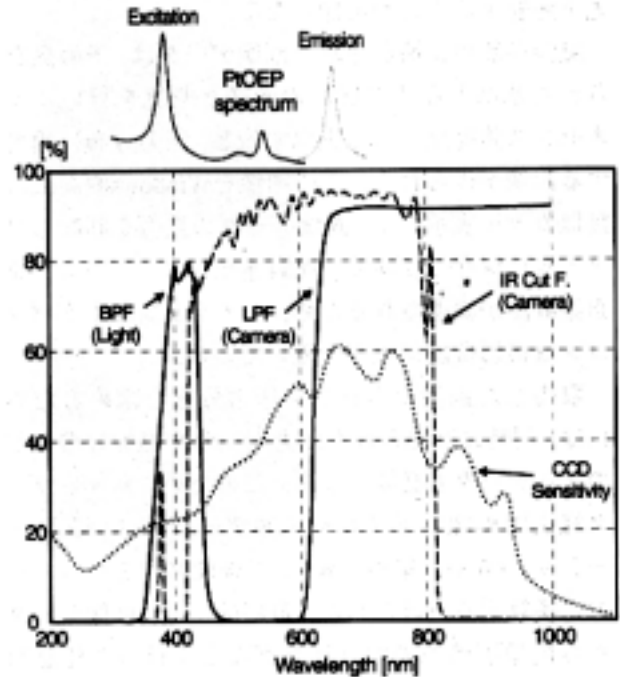


図3. 光学フィルタの透過分光特性

と高解像度であるが全画素を14bit精度でAD変換を行った場合、1枚の画像をパソコンに取込むまで約4秒かかる。CCUにはこれとは別に高速AD変換器(10bit)を内蔵しており光学系の調整などに使用される。本カメラは、露光時間の設定を機械式シャッターにより行うため、長時間露光による低照度撮影も可能である。表1にカメラ性能を示す。

撮影レンズには、種類が豊富な一眼レフカメラ用のものが利用できるように考慮した。マウント部分には、回転ホイール上にフィルターを8個まで組込んだ光学フィルター切換機構が装着できる。対物レンズ先端には、Xeランプの赤外線成分を除去するフィルターを取付けている。

照射器及びカメラレンズに使用した光学フィルタの透過分光特性を図3に示す。

(3) 画像データ処理装置

CCDカメラで捉えたルミネセンス画像は、デジタルデータとして画像処理コンピュータへ転送される。このコンピュータはデジタルカメラ専用のインターフェースをPCIバススロットに搭載したWindowsパソコン(CPU:Pentium133MHz,メモリ:96MB, HDD:2GB)である。カメラ制御用のシリアルケーブルの中間には、Xe光源装置のシャッターを制御するコントローラが接続されている。このコントローラとデジタルカメラの制御器(CCU)を連動することによって、撮影動作に同期させて励起

表1. デジタルカメラの仕様

メーカー型番	浜松ホトニクス C4880-07
使用CCD素子	FFT型 (TI社 TC-215)
有効画素数	1000 (H) × 1018 (V)
画素サイズ	12 μm × 12 μm
飽和電荷量	60,000 electrons
転送時間	0.25フレーム/秒(高精度モード) 7フレーム/秒(高速モード)
冷却温度	0 ~ -60 ℃ (水冷式)
平均暗電流	0.02 electron/pixel/s
読出ノイズ	8 electron r.m.s.(min.) 12 electron r.m.s.(typ.)
ダイナミックレンジ	5,000 : 1 (typ.) 7,500 : 1 (max.)
最大感度	10 ⁻⁷ lx (撮像面照度)
最適撮像領域	10 ⁻² ~ 10 ⁻⁶ lx
A/Dコンバータ	14 bit (高精度モード用) 10 bit (高速モード用)
その他機能	ビニング、サブアレイスキャン スーパーピクセル読出し シェーディング、コントラスト補正

光を照射することが可能となる。

風洞通風中に撮影された画像データは、予め撮影された基準となる無風時の画像と割算を行いルミネセンス強度比として表示すると、圧力分布に相当する画像が得られる。この画像をWindows画面上に疑似カラー表示して、画像データの良否を判断しファイルに保存してゆく。風洞運転中は、このような画像計測が繰返されるため、カメラを制御するパソコンは撮影機能に重点を置いている。

取得した画像から正しい圧力分布を求めるためには、同時に計測された圧力センサや温度分布などの補正データも必要となる。このため、ネットワーク経由で画像ファイルや計測データをワークステーション(WS)に集め、WS上で画像処理を行って圧力に換算する方針とした。最終的には、画像データから模型座標へのマッピングなどを行って任意断面の圧力プロファイルなどが表示できるよう計画している。



図 4 Data Reduction Procedures

(4) サンプル校正試験装置

PSPは調合後、実際に風洞模型に塗布する前にアルミ板にサンプルとして塗装し、圧力および温度が自由に設定できる校正チャンバーに入れて特性が調べられる。この校正試験装置には前述した光源装置やカメラが取付けられるので、風洞試験時とほぼ同じ器材によって特性データが取得できる。チャンバー内は、電磁弁制御によって圧力が真空～500kPa、ベルチエ素子を応用したサーモプレート上の温度が-20～+60℃の任意の状態に再現できる。また、画像計測用パソコンとGP-IBで接続され自動運転が可能である。

本校正試験で得られた圧力感度や温度係数は、風洞実験時の画像データから圧力分布を求める際に必要となる。これらの処理の流れを図4に示す。

3. ソフトウェア

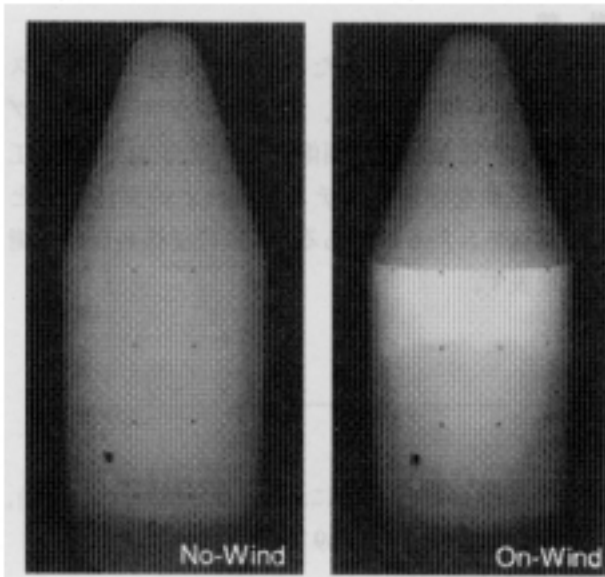
PICSのソフトウェアは風洞試験用と、サンプル校正試験用の2つのプログラムで構成されている。どちらのプログラムでも光源装置とデジタルカメラは同じ物を使用するため、基本的な撮影機能は同一である。デジタルカメラの撮影条件の設定や画像取得および光源装置の制御等、撮影に必要な操作を全て画面上で行う事ができる。

風洞試験用のプログラムでは、実験中に撮影した画像の取得とデータ良否判定、及びファイルへ保存する一連の作業がスムーズに行えるように配慮されている。具体的には、自動ダーク補正、繰返し撮影・連写保存機能などである。

校正試験用プログラムでは、校正チャンバーの運転と監視機能があり、温度一定条件で圧力をスイープさせたり、逆に圧力一定で温度をスイープさせた時のルミネセンス強度の変化を測定する。この作業を自動的に行うため、予め圧力や温度を段階的に設定しておき、圧力×温度のマトリクスを任意方向にスキャンしながら一連のデータを取得するようにプログラムされている。

4. 適用例

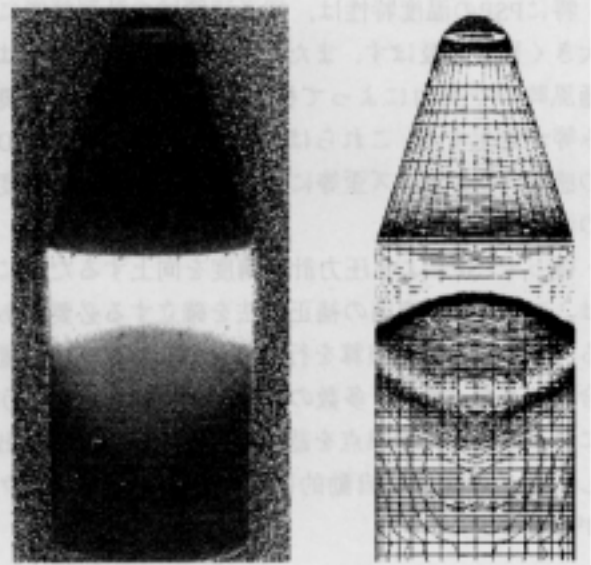
図2に示した照射器やデジタルカメラを風洞測定部の観測窓に取付け、圧力分布の可視化を試みた。一例として航技研2m×2m遷音速風洞で行われたPICSの実証試験を次に紹介する³⁾。



Mach=0.9, P=80kPa, $\alpha=4^\circ$

図5 Luminescence Images of H2 Faring Model.

図5は、感圧物質となるポルフィリン(PtOEP)をバインダーとなる酸素透過性ポリマー(GPI97)に溶し込んだPSP⁴⁾をH2ロケットのフェアリング模型(縮尺5.3%)に塗布し、上方から撮影した画像の例である。左図は無風時に撮影した基準画像、右図はマッハ数=0.9, 迎角=4°における通風画像である。照射光強度の分布や塗膜の厚さが均一ではないので、無風時でもルミネセンスは一様でない。通風画像で明るく見える部分は超音速領域で局所的に圧力が低くなっているためである。これらの2枚の画像間で位置あわせを行い除算処理して得られた画像(左)と、圧力孔で計測された圧力分布(右)との比較を図6に示す。機首先端部の低圧領域や超音速領域後縁のアーチ状の衝撃波など、全般的に両者は良く一致している。この画像は温度補正を施していないので、厳密には模型に温度分布が生じている部分で注意



PSP Ratio Image

Pressure Tap Data

図6 Comparison of Pressure Distribution.

を要するが、圧力分布を可視化する目的には簡易な方法で実用的である。

図7は、測定部断面が0.1m×0.1mの低温遷音速風洞にPICSを適用した例である。この風洞は小型でかつ断熱構造のため、光学系の設置にかなり制約を受ける。そこでシュリーレン観測窓を利用し、ダイクロミックミラーによって照射と検出を1つの光軸上に配置した。ダイクロミックミラーの反射と透過の分離波長は、励起とルミネセンスの両スペクトルの谷間に入るようにした。この配置は、観測窓が1つで済むが、照射光が平行光線に近いので、衝撃波などの急激な密度変化を伴う現象があると照度分布に斑ができる。低温風洞ではPSPのほかに感温塗料を利用し、本装置によって二次元翼模型上の境界層遷移の可視化を試みた⁵⁾。このようにPICSは感圧塗料だけでなく、蛍光物質を利用した実験に広く応用できる特徴をもつ。

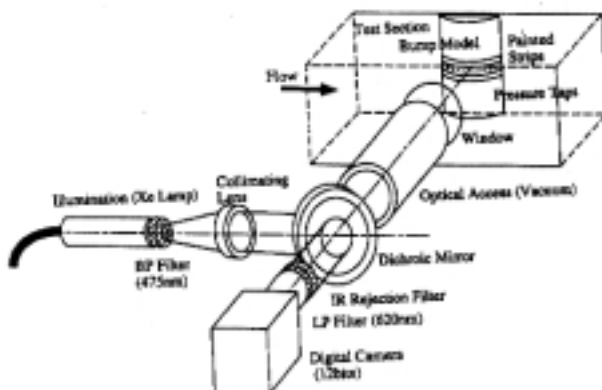


図7 Schematic of Optical setup in the 0.1m TCWT.

5. 誤差要因

圧力分布計測装置としてのPICSの計測精度を問題とする場合、以下の誤差要因が考えられる。

- ③ 感圧塗料 (PSP) の特性 (圧力・温度感度, 劣化, ヒステリシス)
- ④ 励起光源 (輝度の安定性, 照射の均一性)
- ⑤ CCDカメラ (雑音, ばらつき, 画像歪)
- ⑥ 風洞試験 (模型の移動と変形, 塗膜の汚染)

これらの誤差要因は、PICSの実用性を左右する技術課題であり、各種専門分野に及んでいる。

特にPSPの温度特性は、超音速領域の計測精度に大きく影響を及ぼす。また、航空機形状の模型では通風時の空気力によって機体位置のずれや翼の撓み等が発生する。これらは、光源の不均一性やCCDの感度ムラ、レンズ歪等によってルミネセンス強度の測定誤差となる。

従ってPSPによる圧力計測精度を向上するためには、これら誤差要因の補正方法を確立する必要がある。さらに画像間演算を行う際には、お互いの位置合せが必要となる。多数の画像処理を効率的に行うには、模型上の基準点を認識し、画像のずれを算出して2つの画像を自動的に一致させるテクニックが必要である。

6. まとめ

風洞実験用の光学的圧力分布観測装置としてPICSを製作した。PICSは、Xeランプ光源と科学計測用デジタルカメラ及びパソコンから構成され、風洞試験とPSPの校正用チャンバーで光学系などの器材を共有している。

PICSを当所の小型低温風洞および大型遷音速風洞に適用し、PSPによる圧力分布計測の実証試験を行った。H2ロケットフェアリング模型を用いた実験では、PSPによる圧力分布画像と、圧力孔による計測データとは比較的良い一致を示している。これらの風洞はいずれも連続式風洞で、計測時間や気流温度に関して有利であった。

今後、計測時間が短く温度変動の大きい吹出し式風洞でもPICSを適用し、技術的な問題点を探る計画である。

謝 辞

PICSの設計製作にあたっては、浜松ホトニクス(株)の協力を得た。また、H2ロケットフェアリング模型の風洞試験および画像データ処理は、三菱重工業名古屋航空宇宙システム製作所との共同研究として実施されたものである。ここに関係各位に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 浅井圭介, 「感圧塗料による圧力分布の計測技術」, 可視化情報Vol.18 No.69 P.97 (1998.4)
- 2) 飯島由美, 神田宏, 浅井圭介, 「各種の感圧塗料のサンプル特性試験」, 第58回風洞研究会議論文集(航技研特別資料 SP-38) P.87 (1998.1)
- 3) Y.Shimbo, K.Asai, H.Kanda, et al., "Evaluation of Several Calibration Techniques for Pressure Sensitive Paint in Transonic Testing", AIAA 98-2502, (June 1998)
- 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.15 Suppl. No.1 P.59 (1995.7)
- 5) K.Asai, H.Kanda, T.Kunimasu, T.Liu, J.P.Sullivan, "Boundary-Layer Transition Detection in a Cryogenic Wind Tunnel Using Luminescent Paint", Journal of Aircraft Vol.34 No.1 P.34-42, (Jan.-Feb. 1997)