

# JAXA 2m×2m 遷音速風洞における ONERA M5 感圧塗料試験

中北 和之、栗田 充、満尾 和徳、小池 陽、渡辺 重哉 (JAXA)  
伊藤 正剛、橋本 拓郎 (IHI-AE)

PSP Test Using ONERA M5 Standard Model at JAXA 2m×2m Transonic Wind Tunnel

Kazuyuki Nakakita, Mitsuru Kurita, Kazunori Mitsuo, Akira Koike, Shigeya Watanabe (JAXA)  
Masatake Ito, Takuro Hashimoto (IHI-AE)

## 概要

風洞技術開発センター（以下 WINTEC）では大型実用風洞で感圧塗料（Pressure-sensitive paint; 以下 PSP）試験を行うための実用 PSP 計測システムを整備中である。PSP の特徴を簡単に述べるとともに、実用 PSP 計測システムの内容について紹介する。また本システムの技術確認試験として 2m×2m 遷音速風洞(以下 TWT1)での ONERA M5 標準模型試験について計測結果や圧力センサ、CFD との比較などを紹介する。

## 1. はじめに

PSP<sup>1</sup> は従来模型表面に設けられた離散的な圧力孔でしか求められなかった圧力分布を、PSP を塗装した模型を CCD カメラで画像計測することによって、連続的かつ詳細な圧力分布を得ることができる計測技術である。視覚的に細部の流れ場までの把握が容易であり、また定量的かつ詳細な圧力情報が得られることから航空宇宙機の研究・開発に大きく寄与することが可能な風洞試験技術である。

PSP 技術は旧航空宇宙技術研究所で 10 年にわたり研究開発が進められてきたものである<sup>2,3</sup>。WINTEC ではこの PSP 技術を大型実用風洞での実用開発試験に供するため、実用 PSP 計測システムの開発を進めている。ここでは PSP 全般について簡単に触れ、開発中の PSP システムと、このシステムを用いて大型実用風洞で行った技術確認試験の結果の一部について紹介する。

## 2. JAXA 実用 PSP 計測システム

### 2.1 PSP の原理

PSP は特定の有機分子からの発光が酸素消光によって減少することを利用した分子センサである。PSP からの発光量は酸素分子の少ない低圧環境下では大きくなり、高圧下では小さくなる。Fig.1 に PSP 計測の概要を示す。PSP は反応層と白色下地層の 2 層から構成され、計測対象模型の表面に塗装して用いられる。分子センサである感圧色素をバインダと呼ばれる酸素透過性ポリマーと混合したものが反応層である。白色下地層は拡散反射によって反応層中の感圧色素の発光量を増大させるために用いられる。反応層と白色下地層を合わせた膜厚は 40~70μm 程度である。

感圧色素は吸収スペクトルに相当する光を吸収し、発光スペクトルの波長で発光する分子である。周囲に酸素分子が存在すれば酸素消光による感圧色素から酸素分子へのエネルギー移動が生じるため、発光に費やされるエネルギーが減少し、PSP の発光強度は小さくなる。

この圧力と発光量の関係は理論的には以下の Stern-Volmer の式；

$$\frac{I_{ref}}{I} = A + B \frac{P}{P_{ref}} \quad \text{----- (1)}$$

を用いて記述される。ここで、 $I$  及び  $P$  は試験時の発光量及び圧力、 $I_{ref}$  及び  $P_{ref}$  は無風時の既知圧力下での発光量及び圧力である。

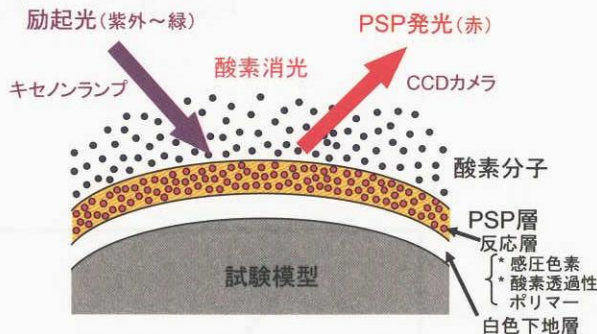


Fig.1 PSP の原理と構成

### 2.2 PSP の温度補正

PSP は圧力感度だけではなく、温度依存性も併せ持っている。このため定量的 PSP 計測にはこの温度補正が重要となる。Fig.2 は PSP/TSP の発光強度( $I$ )の温度・圧力特性である。TSP は感温塗料 (Temperature-Sensitive Paint) である。 $I$  は 25°C, 100kPa での発光強度  $I_{ref}$  を用いて規格化されている。Fig.2(a)からも分かるように PSP は圧力感度だけでなく温度依存性も持つため、十分精度の良い定量計測を行うためには模型温度を計測し、温度補正を加える必要がある。簡易的には温度計による代表点温度計測などが用いられる。しかし、実際には温度分布が存在するため、JAXA 実用 PSP 計測システムでは模型温度分布の左右対称性を仮定し、模型の一半面に PSP、他半面に Fig.2(b)に示す PSP より温度感度が大きく圧力感度が小さい特性を持つ TSP を塗装し、PSP・TSP 2 種類の計測データから相互補完的に温度と圧力を算出する方法<sup>4,5</sup>を用いている。

使用する PSP としては感圧色素 PtTFPP とフッ素系バインダ Poly(IBM-co-FEM)、TSP は感温色素 Ru(phen)と酸素

透過性の小さいポリウレタン系バインダの組み合わせである。

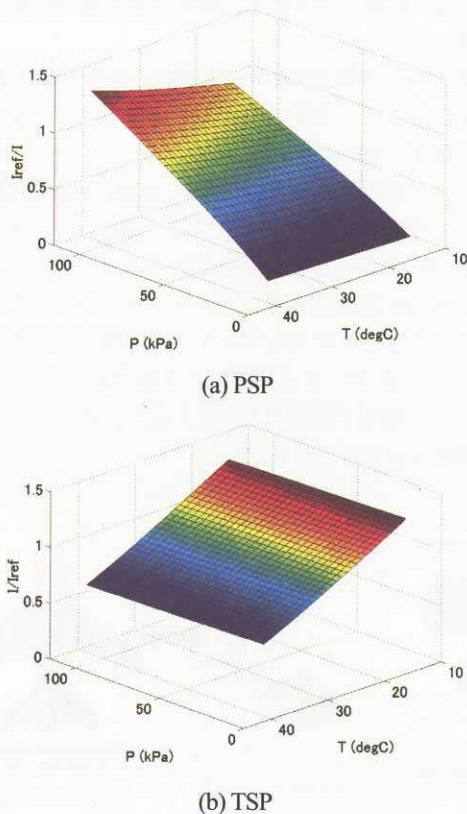


Fig.2 PSP/TSP 発光強度の圧力・温度特性

### 2.3 PSP 計測装置

PSP 計測装置の主な構成部品としては励起光源、CCD カメラ、光学フィルタの 3 点がある。

励起光源は PSP/TSP を光励起するための装置であり、JAXA 実用 PSP 計測システムでは発光量の時間変動の小さい高安定型 300W キセノン光源を用いている。キセノン光源からの光の伝送には伝送効率が低下するという短所はあるものの、取り扱いの容易さからライトガイドを用いる。その先端には均一に近い分布で光照射できるように設計された照射ヘッドを設置し、試験模型に励起光を照射する。

PSP/TSP からの発光を計測するためには A/D 分解能が 14bit で、ノイズを低減させるためにチップを冷却する冷却型 CCD カメラを用いる。PSP からの発光は微弱であるため、量子効率が高い (>50%) 科学計測用 CCD カメラを用いている。

光学フィルタとしては、励起光源側の照射ヘッドに PSP と TSP の吸収スペクトルに相当する 400-550nm のみを透過させる励起光フィルタ、CCD カメラ側に PSP と TSP の発光スペクトルに相当する 590-710nm のみを透過させる発光フィルタを装着し PSP/TSP の発光計測画像に励起光成分が混入しないようにする。

また PSP/TSP 特性を較正するためには、温度及び圧力を任意に設定できる較正装置を使用している。

### 2.4 データ処理ソフト

開発風洞試験では様々な流速、模型姿勢にわたっての膨大な試験ケースのデータ取得が行われる。このため実用 PSP 試験では効率的なデータ処理ソフトが必須となる。JAXA 実用 PSP 計測システムでは MATLAB<sup>®</sup> をベースとし、多数の試験ケースを系統的に効率よく処理する PSP データ処理ソフト<sup>6</sup> を独自開発し用いている。データ処理の詳細については次の 3 章に記す。

### 2.5 模型塗装

風洞試験前には事前に模型に PSP/TSP を塗装しておく必要がある。この塗装は下記の手順で行われる。これらの作業に要する日数としては標準として①で 1 日、②、③、④で 1 日、⑤で 1 日、⑥で 1 日に予備の 1 日を加えれば 1 週間が必要である。

#### ①白色下地層塗装

汚れや油分を除去するために模型表面をエタノールで脱脂した後、ウレタン系白色下地層をスプレー塗装する。その後、乾燥炉中に模型を設置し、乾燥を促進するために 50°C 程度で一晩の加熱乾燥を行う。

#### ②白色下地層研磨

白色下地層の乾燥が終了し表面が硬化した後、白色下地層表面を平滑化しラフネスを除去するために表面の研磨を行う。

#### ③マーカ取付

白色下地層の表面研磨終了後、無風画像と通風画像の位置合わせ(3.2 参照)用のマーカを取り付ける。JAXA 実用 PSP 計測システムではこのマーカとして膜厚が薄くかつ正確な円形マーカが確保できることから、ステンシルシートを用いている。

#### ④マーカ位置計測

マーカは位置合わせのためだけでなく 3 次元格子へのデータ Mapping(3.4 参照)の位置基準点としても用いられる。これには機体軸上でのマーカ座標が必要であり、3 次元測定機を用いてマーカ位置の計測を行う。

#### ⑤TSP 塗装

模型の一方の半面に TSP を塗装する。TSP 塗装後は白色下地層の場合と同様に乾燥炉中で一晩加熱乾燥を行う。

#### ⑥PSP 塗装

模型の TSP と別の半面に PSP を塗装する。PSP 塗装後は白色下地層、TSP と同様に乾燥炉中で一晩加熱乾燥を行う。

### 2.6 試験前較正

PSP 試験で使用する PSP/TSP の圧力・温度特性を事前に較正しておく。本来は風洞試験で使用する PSP/TSP 塗装された模型をそのまま用いることが望ましいが、非常に大掛かりな較正装置が必要となるため、模型と同時に塗装された小型のサンプル板を用いて、風洞試験模型と同じ PSP/TSP ロットであれば特性は同じとの仮定のもとに較正を行っている。

このサンプル板を温度と圧力を独立かつ任意に設定可能な圧力チャンバーに取り付け、試験で用いる CCD カメラ

全台による較正を行う。カメラ全台による較正を行うのは、個体ごとによる CCD チップの波長特性差があると誤差要因となるためである。

この較正データより Fig.2(a), (b)に示された PSP/TSP 特性面を構築する。この特性面は 3 章で後述する圧力算出で用いられる。

### 2.7 PSP 計測システム整備対象風洞

WINTEC ではまず PSP 計測システムを最も PSP に対する需要の多い TWT1 と SWT1 の 2 風洞に整備中である。これと並行して、低速風洞へも PSP 計測導入するべく低速用 PSP システムの研究開発も行っている。PSP は絶対圧センサであり、大気圧付近かつ差圧の小さな低速流への適用は遷・超音速に比べ技術的に困難なためである。

これらの風洞とは別に 0.44m 極超音速衝撃風洞(HST)にも高速応答型感圧塗料を用いた PSP 計測技術が確立されている<sup>7</sup>。

## 3. JAXA 実用 PSP システムにおけるデータ処理

開発風洞試験では様々な流速、模型姿勢にわたっての膨大な試験ケースのデータ取得が行われる。このため実用 PSP 試験では効率的なデータ処理ソフトが必須となる。WINTEC PSP 計測システムでは汎用画像処理ソフトである MATLAB®をベースとし、多数の試験ケースを系統的に効率よく処理するデータ処理ソフトを独自開発し用いている。

### 3.1 前処理

定常的な風洞試験では、CCD カメラデータに重畳するショットノイズを低減させるため、複数枚の計測画像を取得し、平均化によるノイズ低減手法を採用することが一般的である。また CCD カメラ画像には CCD の暗電流に起因するベース成分も含まれており、このベース成分を同定するため、暗状態で CCD カメラ画像を取得し、それをダーク画像として、個々の PSP 計測画像から減算する操作も必要となる。

前処理ではこの画像積算及び平均化と、ダーク画像減算の 2 つの操作と、さらに必要であればノイズ除去のための数値的な空間フィルタを適用する。

### 3.2 位置合わせ

PSP のデータ処理では式(1)の Stern-Volmer 式から分かるように  $I_{ref}/I$  と  $P/P_{ref}$  を (TSP では  $II_{ref}$  と  $T/T_{ref}$ ) をパラメータとしてデータ処理を行う。(これには PSP/TSP の場所による塗り方の違いを正規化するという実用的な意味も含まれる。) このため、無風時の既知圧力・温度下での  $I_{ref}$  画像と通風時の  $I$  画像の比を取る作業が必要となる。

しかし、実際の試験では通風時には空気力による模型の位置変化や弾性変形が生じる。このため通風時の  $I$  画像を無風時の  $I_{ref}$  画像に位置合わせをする作業が必須となる。位置合わせのためには模型上に黒い丸のマーカを設置し、 $I$  画像上のマーカを  $I_{ref}$  画像上のマーカに合わせるよう画像処理を行う。

この処理の後に  $I$  画像と  $I_{ref}$  画像の比を取り  $I_{ref}/I$  画像を

(TSP では  $II_{ref}$  画像) を算出する。

### 3.3 圧力算出

PSP の  $I_{ref}/I$  画像と TSP の  $II_{ref}$  画像の発光量比画像を用いて圧力値の算出を行う。

本研究での圧力算出法を述べる前に、まず PSP 計測で一般的に用いられる圧力算出法である *a-priori* 法と *in-situ* 法について簡単に触れたい。

*a-priori* 法の概要を Fig.3(a)に示す。*a-priori* 法は試験前較正によって別途 PSP の特性を取得しておき、これを用いて PSP 試験データを処理する手法である。

一方の *in-situ* 法は試験時の PSP データと、それと同時に取得された模型上の圧力孔データとの相関式を作成し、これを用いて PSP データ全体で圧力を算出する方法である。この方法では模型上に複数点の圧力孔が必要となる。*in-situ* 法の概要を Fig.3(b)に示す。

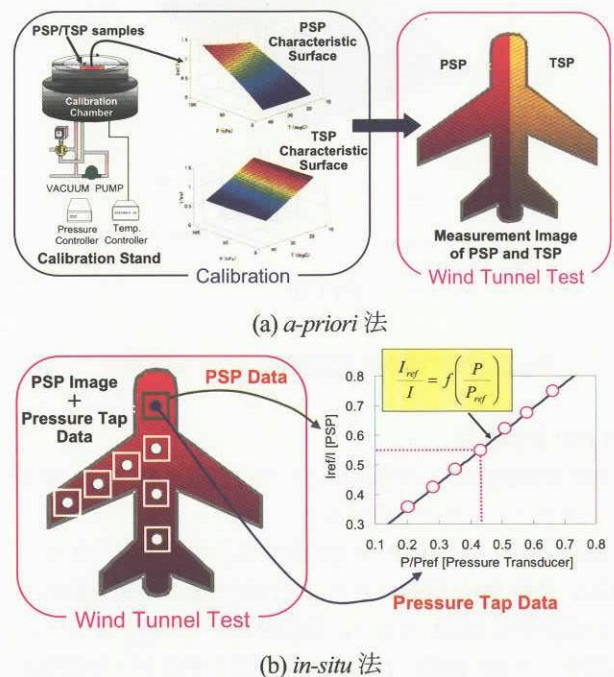


Fig.3 *a-priori* 法及び *in-situ* 法の概要

両手法の長短所としては、*a-priori* 法では PSP/TSP のみで圧力計測が可能であり圧力孔が必要ないため、特別な圧力計測模型を製作しなくても一般的な力計測模型だけで圧力分布の計測が可能となり、模型製作コストや製作期間の面で有利である。反面、例えば励起光源の光量変動や PSP 発光量の劣化など  $I_{ref}$  画像と  $I$  画像の間で PSP 特性に変化が存在すると誤差となり、計測精度の確保にはいろいろな問題に対する十分な配慮が必要となる。一方の *in-situ* 法では圧力孔データを併用することによって十分な計測精度を確保することが可能である。しかし、模型上に圧力孔が必要となること、*in-situ* 手法に用いる圧力孔として、十分に広い圧力範囲にわたるデータを使わないと外挿の影響が現れること、また PSP 特性の非線形性を取り入れるため高次関

数を導入すると外挿の影響が現れやすいことなどの問題がある。

*a-priori* 法と *in-situ* 法はそれぞれに長所短所を抱えているが、JAXA 実用 PSP 計測システムでは計測精度の面で両者の長所を組み合わせた *a-priori/in-situ* Hybrid 法<sup>8</sup>を用いて圧力算出を行っている。この *a-priori/in-situ* Hybrid 法の概要を Fig.4 に示す。

実用目的の PSP 計測では計測精度確保の観点から *in-situ* 手法を採用する必要があるが、PSP 特性の非線形性を考慮し高次式で特性を決定する場合、圧力孔データの内挿部分は計測精度が良いが、外挿部分では非現実的な PSP 特性となることもありうる。このような問題を避けるため、基本となる PSP 計測手法としては、*a-priori* 法と同様に PSP の温度補正のために TSP も併せて塗装し、Fig.2 に示す PSP/TSP 特性面を用いて圧力を算出する。加えて計測精度向上のために圧力孔データを用いた PSP データの *in-situ* 補正係数  $C_{PSP}$  (測温抵抗体データを用いた TSP データの補正が可能な場合には  $C_{TSP}$  も) 導入し、計測精度の改善を行う。

PSP の発光量と圧力の関係は、理論的には式(1)の Stern-Volmer 式で表されるが、実際の PSP 試験では PSP が持つ温度依存性や圧力感度の非線形性を考慮して Stern-Volmer 式を拡張した次式；

$$f\left(\frac{P}{P_{ref}}, \frac{T}{T_{ref}}\right) = f\left(\left(\frac{I_{ref}}{I}\right)_{PSP}, \left(\frac{I}{I_{ref}}\right)_{TSP}\right) \quad \text{--- (2)}$$

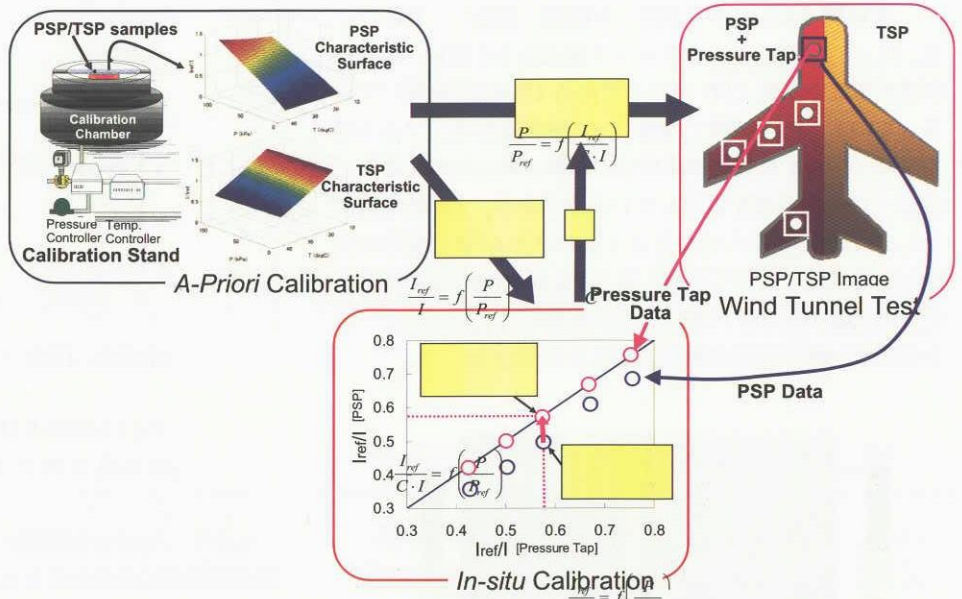
が用いられる。JAXA 実用 PSP 計測システムの *a-priori/in-situ* Hybrid 法では式(2)をさらに拡張し、力孔データ及び測温抵抗体データを用いた *in-situ* 補正係数  $C_{PSP}$  と  $C_{TSP}$  を導入した式；

$$f\left(\frac{P}{P_{ref}}, \frac{T}{T_{ref}}\right) = f\left(\left(\frac{I_{ref}}{C_{PSP} \cdot I}\right)_{PSP}, \left(\frac{C_{TSP} \cdot I}{I_{ref}}\right)_{TSP}\right) \quad \text{--- (3)}$$

を用いる。この式(3)では、 $(I_{ref}/I)_{PSP}$  と  $(I/I_{ref})_{TSP}$  の 2 入力に対し、Newton-Raphson 法などを用いて数値的に収束計算を行って圧力と温度の 2 出力を得る処理を行う。TSP データ補正用測温抵抗体データのない場合には  $C_{TSP}=1$  とする。 $C_{PSP}$  と  $C_{TSP}$  は比較に用いた圧力孔及び測温抵抗体の点数算出されるが、それぞれの平均値を代表値として用いる。

この *a-priori/in-situ* Hybrid 法の特徴としては、

- PSP と TSP の両データを用いることで、PSP の温度依存性を補償する
- *in-situ* 補正係数 C を導入し、圧力孔データの併用によ



る精度向上を図る  
 ・ *a-priori* 特性面を用い、外挿の影響をなくすの3点が挙げられる。

4. 風洞試験結果

TWT1 標準模型の ONERA M5 模型を用いて遷音速領域での PSP 技術確認試験を行った<sup>9-11</sup>。Fig.5 は PSP/TSP 塗装された ONERA M5 模型である。この試験結果の一例として、 $M=0.84$ ,  $\alpha=0.6^\circ$ ,  $P_0=100\text{kPa}$  のケースでの模型上面の圧力と温度の計測結果、CFD との比較を Fig.6 に示す。Fig.6(a)は PSP による模型上面圧力及び温度分布の計測結果である。左半面の  $C_p$  分布画像では主翼上面コード方向の衝撃波構造が内翼側(2 段)と外翼側(1 段)で異なっていること、翼面上の圧力分布が胴体上にも影響を及ぼしていること、など模型上の複雑な圧力分布が捕らえられている。Fig.6(c)(d)はスキャニバルブによる圧力孔データと PSP 計測結果との比較である。PSP による計測結果は圧力孔データと定量的にも非常に良く一致している。

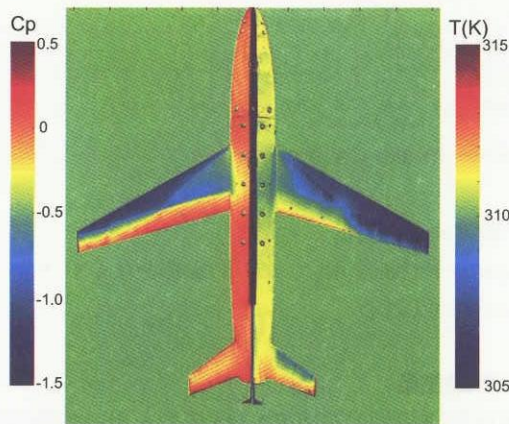
Fig.6(b)に PSP による ONERA M5 模型圧力分布と、対応する CFD 結果<sup>12</sup>との比較を示す。CFD 計算には 648 万



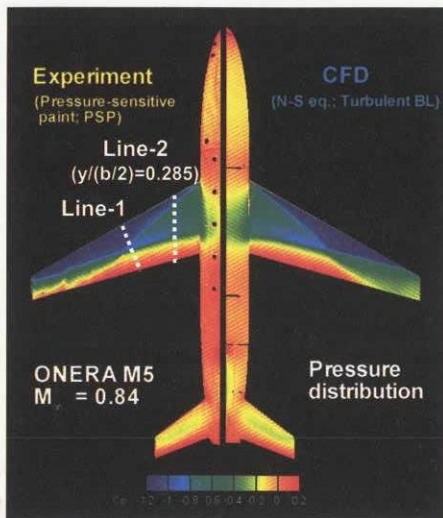
Fig.5 PSP/TSP 塗装された ONERA M5 模型と圧力孔列の設置位置

右舷側（ピンク）：PSP、左舷側（黄色）：TSP

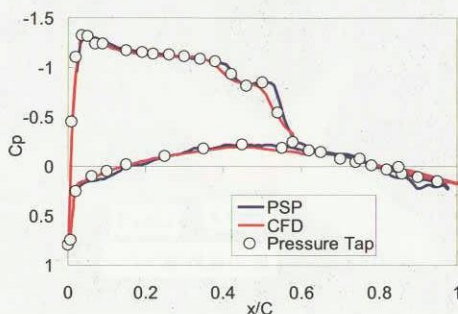
点、98ブロックのマルチブロック構造格子を用い、総合技術研究本部の基盤 CFD コードである UPACS<sup>13</sup>を用いて計算している。PSP 試験では模型上に強制遷移用ラフネス等の設置は行わず自然遷移条件での試験であったのに対し、CFD では全面乱流を仮定している差がある。全体的な傾向としては Fig.6(b)から分かるように PSP と CFD の結果は全体として良く一致している。また Fig.6(c) (d)の圧力孔データとの比較から PSP、CFD とともに定量的にも圧力孔データと差のない値が算出されていることが分かる。



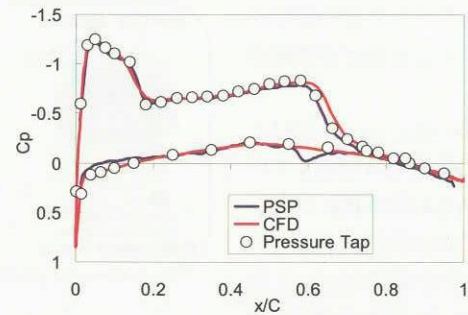
(a) PSP/TSP 計測データ；右側：Cp、左側：温度



(b) PSP と CFD の比較；右側：PSP、左側：CFD



(c) PSP、CFD と圧力孔の比較; Line-1



(d) PSP、CFD と圧力孔の比較; Line-2

Fig.6 ONERA M5 模型 PSP 計測結果  
( $M=0.84$ ,  $\alpha=0.6^\circ$ ,  $q=31.1\text{kPa}$ ,  $P_s=62.9\text{kPa}$ )

しかし、Fig.6(b)を詳細に比較すると、3ヶ所で PSP/CFD 両者の結果に差のあることが分かる。まず主翼-胴体接合部であるが、胴体上への主翼上圧力分布影響領域の大きさが両者で異なる。この原因として考えられるのは、全面乱流で計算された CFD と胴体・主翼ともに自然遷移である PSP との流れの差や、光学計測である PSP の翼面上の発光と胴体上の発光が干渉し誤差となる自己反射の問題などが可能性として考えられる。次に主翼端では衝撃波の存在位置が異なり、PSP より CFD で衝撃波位置が前縁寄りに位置している。他の一連の PSP と CFD の結果より、衝撃波が前方に位置することは迎角がより大きい場合に相当する。CFD での計算格子と異なり、風洞模型では空気力によって模型が弾性変形する。後退翼の場合、一般に弾性変形により翼端は捻り下げ方向に弾性変形し、相違と方向としては一致するが、弾性変形の量が定量的に一致するかどうかの評価までは行っていない。他に後胴での圧力レベルが CFD データと比較して PSP データで大きくなっていることである。この部分に圧力孔が設置されていれば定量的な評価が行えるところであるが、残念ながら ONERA M5 胴後胴部には設けられていない。この差の原因としてはやはり胴体上での境界層条件の差や、境界層や弾性変形による主翼上の圧力分布の差が胴体上にも影響を及ぼしていることなどが考えられる。

Fig.6に示された結果を含む一連の試験結果を用いて PSP の計測精度評価を行った。評価方法としては、圧力孔データを正とし、対応する PSP 計測データと圧力孔データとの差を評価した。PSP 計測データとしては前述の *a-priori/in-situ Hybrid* 法による処理データを用いる。Fig.7に圧力孔データと PSP 計測結果との比較を示す。*a-priori/in-situ Hybrid* 法による PSP データ処理によって PSP 結果と圧力孔データは良好な一致を示しており、両者の差の標準偏差は  $0.95\text{kPa}$  であった。計測誤差として  $2\sigma$  をとった場合、 $2\sigma=1.9\text{kPa}$  に相当する  $C_p$  は  $M=0.84$ ,  $P_0=100\text{kPa}$  を基準とすると ( $q=31.1\text{kPa}$ )、およそ  $0.06$  となる。

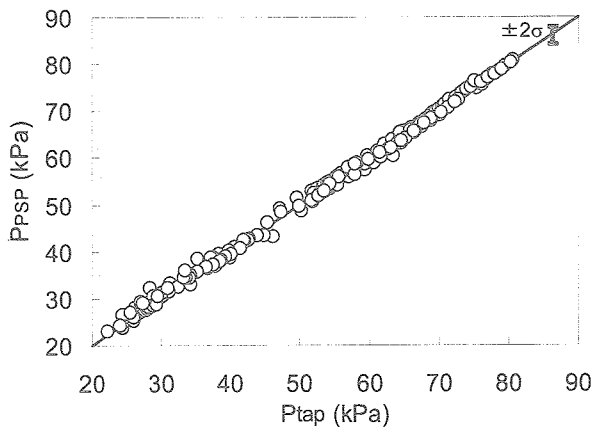


Fig.7 PSP の計測精度評価

## 5. まとめ

PSP の概要と、JAXA 実用 PSP 計測システムについてシステム構成やデータ処理手法、特に *a-priori/in-situ* Hybrid 法を用いた高精度圧力算出手法について紹介した。また技術確認試験としての ONERA M5 標準模型を用いた TWT1 での術確認試験の結果も紹介した。この ONERA M5 試験の結果より計測精度評価を行った。圧力孔データと PSP 試験結果との差の  $2\sigma$  に相当する  $C_p$  としては  $M=0.84$ ,  $P_0=100\text{kPa}$  ( $q=31.1\text{kPa}$ ) を基準とすると  $0.06$  であった。

このように PSP 計測技術は視覚的な圧力分布の情報と定量的な圧力値データを併せ持つ強力な画像圧力計測技術である。本技術はその大情報量かつ定量的な特性を活かして、航空宇宙機開発の際の構造解析への表面圧力分布の提供や、視覚的あるいは翼面上空気力分布の算出などによる空力設計の最適化、また CFD コード検証用データの提供など、今後様々な用途にその応用が広がっていくものと考えられる。また、PSP では模型製作の低コスト化及び期間短縮にもメリットがあり、効率的な実機開発に寄与することが期待できる。WINTEC では今後も航空宇宙を中心とした広範な分野での研究開発に対してより有効な風洞試験データを提供するため、PSP 計測システムの完成を目指して開発・整備を進めていく予定である。

## 謝辞

ONERA M5 模型 CFD 結果を提供していただいた情報技術開発共同センター・山本一臣チームリーダー、向井純一研究員、技術確認試験にご協力頂いた WINTEC 遷音速風洞チームの皆様へ感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) J. H. Bell, E. T. Schairer, L. A. Hand and R. D. Mehta, "Surface Pressure Measurements Using Luminescent Coatings," *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 33, 2001.
- 2) 浅井, 神田, 飯島, 杉浦, 真保, 石黒, 小松, "開発風洞試験のための感圧塗料技術の開発", 日本航空宇宙学会第 34 期年会講演会, 2003.

- 3) 知的基盤整備推進事業 "機能性分子による熱流体センシング技術の研究開発(MOSAIC)" プロジェクト HP : <http://www.nal.go.jp/fluid/jpn/mosaic/index.html>
- 4) Y. Shimbo, K. Asai, H. Kanda, Y. Iijima, M. Komatsu, S. Kita and M. Ishiguro, "Evaluation of Several calibration techniques for Pressure- Sensitive Paint in Transonic Testing," AIAA Paper 98-2502, 1998.
- 5) 栗田, 中北, 満尾, 神田, 浅井, 渡辺, "NAL 1m×1m 超音速風洞における SST 模型感圧塗料試験", 日本航空宇宙学会第 34 期年会講演会, 2003.
- 6) M. Kurita, K. Nakakita, K. Mitsuo, and S. Watanabe, "Data Processing of Pressure-Sensitive Paint for Industrial Wind Tunnel Testing," AIAA-2004-2189, 2004.
- 7) K. Nakakita and K. Asai, "Pressure-Sensitive Paint Application to a Wing-Body Model in a Hypersonic Shock Tunnel," AIAA-2002-2911, 2002.
- 8) 中北, 栗田, 満尾, "A-priori/in-situ Hybrid 感圧塗料データ処理手法", 特願 2004-249302, 2004.
- 9) K. Nakakita, M. Kurita, and Kazunori Mitsuo, "Development of the Pressure-Sensitive Paint Measurement for Large Wind Tunnels at Japan Aerospace Exploration Agency," ICAS 2004-3.2.2, 2004.
- 10) 中北和之, 栗田充, 満尾和徳, 渡辺重哉, "大型実用風洞における感圧塗料技術の研究開発," 宇宙航空研究開発機構 第 1 回総合技術研究本部公開研究発表会, 2004.
- 11) 中北和之, 栗田充, 満尾和徳, 渡辺重哉, 山本一臣, 向井純一, 高木亮治, "感圧塗料計測データを用いた CFD コード検証について," 航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム 2004, 2004.
- 12) 山本一臣, 向井純一, 高木亮治, "UPACS による ONERA M5 周りの流れ解析," 航空宇宙数値シミュレーションシンポジウム 2002 概要集, 2002.
- 13) 山本, 他, "CFD 共通基盤プログラム UPACS の開発", 第 14 回数値流体力学シンポジウム, 2000.