

宇宙航空研究開発機構研究開発報告

JAXA Research and Development Report

JAXA 感圧塗料(PSP)計測システムの研究開発(1) —概要編—

満尾 和徳, 中北 和之, 栗田 充, 渡辺 重哉

2014年2月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

目次

概要.....	1
Nomenclature.....	1
1. 感圧塗料計測について.....	2
1-1. はじめに.....	2
1-2. PSP 計測システム開発の海外における動向.....	3
1-3. PSP 計測の原理.....	3
2. PSP 計測システム.....	5
2-1. PSP 光学系.....	5
2-2. PSP 画像取得.....	7
2-3. PSP 校正データ取得.....	7
3. 感圧塗料の開発概要.....	8
3-1. PSP と TSP について.....	8
3-1-1. 感圧分子センサーと感温分子センサーの種類.....	8
3-1-2. ポリマー.....	8
3-1-3. 白色ベースコート.....	9
3-2. PSP/TSP 基本特性.....	9
3-2-1. 励起・発光分光特性.....	9
3-2-2. PSP の圧力 / 温度感度特性.....	9
3-2-3. TSP の圧力 / 温度感度特性.....	10
3-3. 複合 PSP について.....	10
4. データ処理手法概要.....	12
4-1. PSP 画像処理の基礎.....	12
4-1-1. 画像平均.....	12
4-1-2. ダーク減算.....	12
4-1-3. 画像位置合わせ.....	12
4-1-4. 圧力変換 (A-priori 法 & In-situ 法).....	12
4-1-5. 3次元模型グリッドへのマッピング.....	14
4-2. 高精度画像処理.....	15
4-2-1. PSP 温度補正法.....	15
4-2-2. Self-Illumination 補正.....	16
5. JAXA/WINTEC における PSP 計測例.....	17
5-1. PSP 技術開発試験.....	17
5-1-1. 低速風洞への適用例.....	17
(A) JAXA6.5m × 5.5m 低速風洞 (LWT1) における PSP 試験結果.....	17
(B) JAXA2m × 2m 低速風洞 (LWT2) における PSP 試験結果.....	19

5-1-2. 2m × 2m 遷音速風洞への適用例	20
(A) 標準模型 (ONERA M5) を用いた PSP 計測の結果	20
(B) 宇宙往還機模型を用いた PSP 計測の結果	21
5-1-3. 1m × 1m 超音速風洞への適用例	21
(A) 超音速機模型を用いた PSP 計測の結果	21
(B) PSP 計測によるソニックブーム可視化の結果	24
5-2. 国産小型旅客機開発への協力	24
5-3. PSP 技術移転	25
6. 今後の展開	26
7. 風洞試験実績一覧 (WINTEC における PSP 計測の実績)	27
8. 参考文献	37
9. 研究発表一覧 (2003 年 4 月～2009 年 3 月)	40
10. 謝 辞	42

JAXA 感圧塗料 (PSP) 計測システムの研究開発 (1) - 概要編 - *

満尾和徳^{*1}, 中北和之^{*1}, 栗田充^{*1}, 渡辺重哉^{*1}

Research and Development of JAXA Pressure-Sensitive Paint (PSP) Measurement System (I) *

Kazunori MITSUO^{*1}, Kazuyuki NAKAKITA^{*1}, Mitsuru KURITA^{*1} and Shigeya WATANABE^{*1}

Abstract

Pressure-field measurement technique using Pressure-Sensitive Paint (PSP) has been developed for acquiring global pressure images on wind tunnel models. PSP makes use of the sensitivity of the luminescent materials to the air pressure. PSP measurement technique provides a simple and an inexpensive way to obtain full-field pressure image on aerodynamic model surface with high spatial resolution. JAXA has developed the PSP measurement system for practical use in Wind Tunnel Technology Center (WINTEC). In this paper, the summary of the JAXA PSP measurement technique in industrial wind tunnels were reported.

概要

感圧塗料 (Pressure-sensitive paint : PSP) と呼ばれる発光強度が圧力によって変化する塗料を用いた表面圧力場計測が注目されている。これまでの電子式センサーによる離散的な点計測とは異なり, 面で圧力場を計測することができる。風洞技術開発センターでは大型風洞群へ PSP 計測システムを適用するための実用化研究を進めてきた。感圧塗料, 光学系, および画像処理を含む全計測システムの開発を独自で行っている。本レポートでは, 風洞技術開発センターが開発した PSP 計測技術の概要を示すとともに, 試験結果の一部を紹介する。

Nomenclature

C_p : 圧力係数

I : 発光強度

K_{sv} : スターン・ボルマ係数

M : マッハ数

P : 圧力

P_0 : 風洞総圧

Re 数 : レイノルズ数

S : ヘンリーの溶解係数

T : 温度

T_0 : 風洞総温

U_∞ : 一様流速

α : 迎角

β : 横滑り角

Subscripts

run : 通風時

ref : 無風時

* 平成 25 年 9 月 19 日受付 (Received 19 September, 2013)

*1 航空本部 風洞技術開発センター (Wind Tunnel Technology Center, Institute of Aeronautical Technology)

1. 感圧塗料計測について

1-1. はじめに

本報告書は、宇宙航空研究開発機構（JAXA）研究開発本部風洞技術開発センターにおける感圧塗料（Pressure-Sensitive Paint:PSP）計測システムの実用化研究についてまとめたものである。PSP 実用化研究の内容は、概要編、塗料編、計測システム編、データ処理編の4編から構成されており、本編は概要編である。PSP 計測の塗料、計測システム、データ処理の概要について説明する。詳細については個別テーマの報告書を参照していただきたい。

- JAXA 感圧塗料（PSP）計測システムの研究開発 (2)
- 計測システム編 -
- JAXA 感圧塗料（PSP）計測システムの研究開発 (3)
- 感圧塗料編 -
- JAXA 感圧塗料（PSP）計測システムの研究開発 (4)
- データ処理編 -

従来の風洞試験における圧力計測では、静圧孔とよばれるΦ 0.5mm 程度の孔を風洞模型に設置し、その静圧孔にかかる圧力を半導体センサーを用いて計測する。この計測方法は高い計測精度を得ることができるが、模型の大きさによって静圧孔を設置できる点数が制限される。そのため、離散的な点群しか得られないというデメリットがある。また、静圧孔の加工には1点数万円の費用がかかるため静圧孔数に比例して模型作製費も高くなる。さらに、圧力点数が増えればそれだけ圧力配管の取り回しなどが煩雑になる。1m サイズの開発試験用航空機模型では数百点の静圧孔が必要になる。

1980年代後半の同時期にロシアとアメリカにおいてPSP を利用した革新的な圧力場計測技術が考案された。PSP に含まれる感圧色素はもともとは酸素濃度センサーとして医学の分野で利用されてきたものである。PSP 計測は塗料に含まれる色素の発光強度が酸素により消光する現象（酸素消光）を利用したものであり、模型表面に塗られた感圧塗料からの発光強度を CCD カメラで観測

し、その発光強度画像から圧力場を算出する。従来の静圧孔を用いた電子式センサによる離散的な点計測とは異なり模型の面情報が得られ、詳細に圧力場を計測できる²⁴⁾。また、模型にスプレー塗装するだけで計測準備ができるため安価に計測できるという利点がある。PSP とは別に感温塗料（Temperature-Sensitive Paint : TSP）と呼ばれる温度場を計測するための塗料も研究されている。

PSP 計測を用いれば圧力場から翼面上の衝撃波の位置など詳細な流れ場を把握することができ、さらに圧力場を模型表面上で積分することで局所的な荷重データを得ることができる。この特徴を生かし、航空機設計における荷重推算用圧力計測ツールとして利用され始めている。また、TSP 計測では、温度場情報から流れの遷移パターンの把握や空力加熱率を算出することが可能である。

1990年代は、大学や国立研究機関を中心にPSP の可能性を追求する基礎実験が進められた。定常流れの現象だけではなく、非定常流れ^{5, 6)}や極低温流れ⁷⁾への応用研究も進められた。また、発光強度の変化から計測する強度法と呼ばれる計測と同時にPSP の発光寿命から圧力を計測する手法（寿命法）も考案された。これら一連の基礎研究の成果を受けて、航空機開発への利用を目的として、アメリカやロシア、フランス、ドイツ等において実用開発風洞への整備が進められた⁸⁻¹⁵⁾。航空宇宙機の開発試験においては、計測精度が要求されると同時に、大量な試験データを扱うためデータ処理プログラムの開発も行われた。

日本におけるPSPの研究は1990年代前半に航空宇宙技術研究所（現：JAXA）で開始された。1999年度から2003年度まで、科学技術振興調整費・知的基盤整備推進事業の研究テーマとして研究開発プロジェクト「機能性分子による熱空力センシング技術の研究開発（通称MOSAIC計画）」が実施され、機能性分子センサ、光学機器、データ処理等の計測システムの研究開発、およびそのシステム実証試験等が活発に行われ、機能性分子によるセンシングの可能性拡大とPSP 計測技術の基礎を確立した¹⁶⁻²⁵⁾。

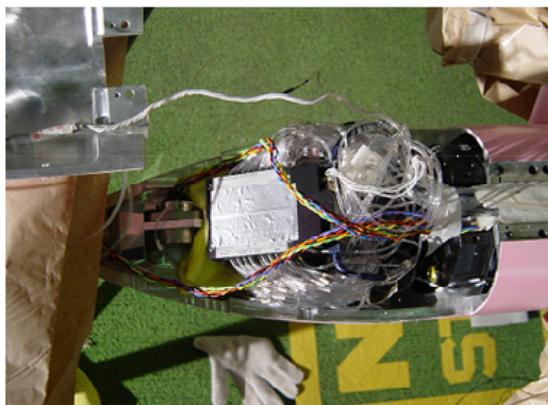


図 1-1 風洞模型内の圧力配管の様子



図 1-2 PSP 塗装された風洞模型

この成果を受けて、2003年から研究開発本部/風洞技術開発センター (ARD/WINTEC) において、航空宇宙機関開発の風洞試験に適用可能な PSP 実用化研究がはじまった。低速～超音速域の風洞において数々の PSP 技術確認試験を行い、PSP 計測システムの高度化を進めている²⁶⁻³⁷⁾。

実用 PSP システムは大きく分けて3つのパート(①PSP 開発 (分子センサー開発)、②PSP カメラシステム開発、③画像処理プログラムの開発) から構成される。分子センサーの開発は、大学などの外部研究機関の化学グループの協力を得て進めており、JAXA では計測システムの高精度化、および画像処理プログラム開発を通して PSP システムの高度化を目指している。また、流体グループの環境負荷低減技術セクションにおいても、次世代の PSP システムを研究しており、WINTEC の PSP 技術開発と密接に関わっている。

開発された PSP 計測技術は、航空宇宙プロジェクトへの貢献や CFD 検証用データとして用いられており、三菱航空機株式会社による MRJ (Mitsubishi Regional Jet) 開発にも活用されている。

本レポートでは、JAXA-PSP 計測システムの成果概要について報告する。JAXA が開発した PSP、光学系、処理方法の概要について説明するとともに、技術確認風洞実験への適用例の一部を紹介する。技術の詳細については、別冊の塗料編、計測システム編、データ処理編を参考にしていきたい。

1-2. PSP 計測システム開発の海外における動向

PSP 計測システムの研究開発は、日本をはじめ、アメリカ、ドイツ、フランス、ロシアを中心に行われている。PSP 関係者のコミュニティは交流が盛んであり、意見交換や技術交流が活発に行われている。

海外の状況について述べる。アメリカでは NASA を中心に AEDC^{39,40)} (Arnold Engineering Development Center)、ISSI (Innovative Scientific Solutions Inc.) や大学で研究開発が行われている。NASA は大学との共同による新規センサーの開発をはじめ、先進的な PSP 計測システム開発を行っている。AEDC では大型風洞における実用 PSP 計測システムの開発が進められ、実機開発試験に本格的に使用されている。彼らの扱う機体は民間機以外も含まれ、主翼が大きく変形する戦闘機等の機体の計測も行う。そのため、計測方法は強度法ではなく、無風時の PSP 画像を必要としない寿命法を用いているのが特徴である⁴¹⁾。ISSI は PSP 関連のベンチャー企業であり、Washington 大学 Prof. Gouterman⁴²⁾ らのグループとの連携により PSP を開発した。彼らが扱っている FIB-PSP は Ideal Paint と呼ばれ、PSP の温度感度が小さい (温度による計測誤差を

受け難い)。大学関係では、Perdue 大学の Prof. Sullivan が PSP や TSP の調査研究を進め、空力計測技術への適用を進めた²⁾。

DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, ドイツ航空宇宙研究所) は PSP の温度依存性を軽減するためピレンと呼ばれる温度感度の低い感圧色素を用いた計測システムを開発している。ピレン PSP は温度による計測誤差が非常に小さく、高い精度の計測が期待できる。DLR はオリジナルのピレン PSP⁴³⁾ を開発し、また PSP 画像処理用ソフトとして ToPaS を開発している。近年は、高速応答型 PSP の開発により非定常圧力場計測技術の開発を行っている。また、実フライト計測における PSP 計測システムの開発も進めている。

ONERA (Office national d'Etudes et de recherches aérospatiales, フランス航空宇宙研究所) では、実用化を目指して大型低速風洞での試験を行い実績を積んでいる。感圧色素には DLR と同じようにピレンを使用し、独自のピレン PSP (ON1) を開発している⁴⁴⁾。また、彼らは画像処理技術に卓越しており、AFIX-2 と呼ばれる画像処理ソフト⁴⁵⁾を開発している。

TsAG (ロシア) においても、早い時期から PSP の研究が行なわれ、実績を挙げている。DLR や ONERA で使用されているピレン PSP のオリジナルは彼らが考案したものである。PSP を非定常現象にも適用し、基準蛍光体を混合した複合 PSP により非定常圧力場計測を行っている⁴⁶⁾。

各国とも、JAXA と同じように、大学の化学グループと連携して高性能 PSP の開発を行っている⁴⁷⁻⁴⁹⁾。PSP に含まれる感圧色素に関しては、日本とアメリカがポルフィリンを使用し、ヨーロッパはピレンを使用している。それぞれ長所と短所はあるが、日本では光劣化に強く、また可視波長域の励起が可能であるためポルフィリンを使用している。

光学系に関しては、Xe アークランプやレーザーを使用するグループと、LED 励起照明を使用するグループがある。ピレンは紫外励起なのでまだ使用は不可能であるが、ポルフィリン-PSP を用いるアメリカでは LED を使用している。PSP の励起波長域が決まっている場合は、電力効率や使い勝手を考えると LED の方が適している。

また、PSP 計測においては画像処理技術は重要であり、各研究機関は独自のソフトを作成している。計測精度や処理ケース数はソフトの性能に大きく左右される。JAXA の PSP ソフトの内容については別冊のデータ処理編で詳しく紹介する。

1-3. PSP 計測の原理

PSP は感圧色素とよばれる発光強度が圧力によって変化する特殊な色素を含んだ塗料である。PSP は感圧色素

と酸素透過性ポリマーおよび溶媒から構成される。ポリマーは酸素透過性を維持したまま計測対象に感圧色素を固着させる役割がある。感圧色素の発光現象は酸素による消光過程 (Oxygen-Quenching) によるものである。大気中の酸素の分圧は 21% と決まっているので、色素の発光変化量から酸素の変化量がわかれば圧力を算出することができる。感圧色素は吸収スペクトルに対応する光エネルギーを吸収して発光する燐光分子である (図 1-3 参照)。周囲に酸素分子が存在すれば酸素消光による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。つまり、PSP の発光強度は圧力が高いと暗く、圧力が低いと明るくなる。代表的なポルフィリン系感圧色素 (PtTFPP) の化学式を図 1-4 に示す。ポルフィリンの励起帯は 380 ~ 550nm 付近にあり、発光のピークは 650nm 付近にある。

消光現象は理論的に Stern-Volmer 関係式 (以下 SV 式) で記述される。色素の発光強度 I (または発光寿命 τ) と酸素濃度は以下の関係式で表される⁵⁰⁻⁵³。

$$\frac{I_0}{I} = 1 + K_{SV} [O_2] \quad (1-1)$$

I は発光強度を表し、添え字 0 は酸素分子による消光がない真空状態の値を示す。ここで、比例定数 K_{SV} はスターン・ボルマー係数と呼ばれる。

高分子の膜に浸透する酸素の濃度は、ヘンリーの溶解法則に従って外気の酸素分圧 P_{O_2} と対応づけられる。気体が空気の場合を考えると酸素の分圧は静圧の 21% になるので、(1-1) 式は以下のように書くことができる。

$$\frac{I_0}{I} = 1 + KP \quad (1-2)$$

ここで、 $K=0.21K_{SV}S$ (S はヘンリーの溶解係数) である。(1-2) 式により、色素分子の発光強度を測定すれば圧力の

値が求まる。

実際の流体実験で真空状態を作り出すのは難しいため、(1-2) 式を圧力が一様な基準 (無風) 状態 (添え字 ref) における値で正規化する。

$$\text{通風状態: } \frac{I_0}{I} = 1 + KP$$

$$\text{無風 (基準) 状態: } \frac{I_0}{I_{ref}} = 1 + KP_{ref}$$

から、両者の比をとって、

$$\frac{I_{ref}}{I} = A(T) + B(T) \frac{P}{P_{ref}} \quad (1-3)$$

$$A(T) = \frac{1}{1 + KP_{ref}} \text{ および } B(T) = \frac{KP_{ref}}{1 + KP_{ref}} \quad (1-4)$$

が得られる。ここで、係数 A と B の間に $A(T) + B(T) = 1$ という関係が成立する。(1-3) 式は、風洞実験における PSP による圧力計測の基礎式であり、これより模型に塗布された PSP の発光強度を圧力に変換することができる。多くの PSP の特性は (1-3) 式に従うが、一般には非線形性を考慮して以下の多項式 (1-5) を用いることが多い。

$$\frac{I_{ref}}{I} = A_0(T) + A_1(T) \frac{P}{P_{ref}} + A_2(T) \left(\frac{P}{P_{ref}} \right)^2 + \dots \quad (1-5)$$

(1-3), (1-5) 式に表れる係数は PSP の校正係数であり、その値は実験的に求めなくてはならない。なお、これらの係数は温度の関数である。したがって、PSP の発光を正確に計測するためには温度補正が必要となる。この温

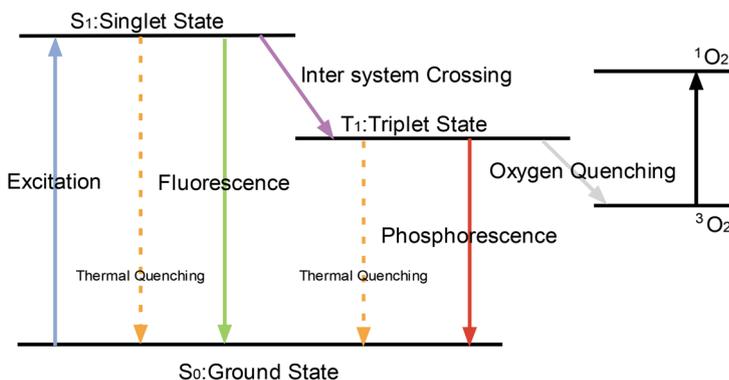


図 1-3 感圧、感温色素の発光原理図

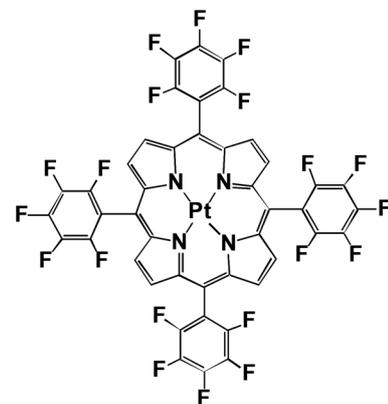


図 1-4 ポルフィリン (PtTFPP) の化学式

度依存性は系間交差 (S1->T1) におけるパスが温度に影響を受けることに起因する。

一般的に、PSP のコーティングは図 1-5 に示すように白色ベースコートと PSP の層からなる。PSP の塗装は通常スプレーガンが用いられる。白色ベースコートは PSP 発光増強のため塗られる。白色ベースコート層と PSP 層の膜厚は、それぞれ約 50 μ m, 5 μ m 程度である。

図 1-5 の PSP 計測原理図が示すように、励起光源として Xe 光源や LED・レーザーなどが用いられ、光検出器には CCD カメラや PMT (光電子増倍管: Photomultiplier Tube) が使用される。Xe 光源を用いる場合、感圧色素の励起帯に合った波長の光だけを照射するために光学フィルタが装着される。また、発光を計測する CCD カメラには発光波長に対応する発光フィルタが取り付けられる。先に述べたように、圧力と発光量の関係は理論的に Stern-Volmer の式で表され、実際の風洞実験では以下のような関係式になる。

$$\frac{I_{ref}}{I_{run}} = A(T) + B(T) \frac{P_{run}}{P_{ref}} \quad (1-3')$$

ここで、 I_{run} および P_{run} は試験時 (通風時) の PSP 発光量と圧力を意味し、 I_{ref} および P_{ref} は無風時の大気圧力下における発光量および圧力を表す。(1-3') 式が示すように、圧力を算出する際に発光強度比をとるため、計測精度は基本的に塗装の塗りムラや照明パターンの影響は受けない。

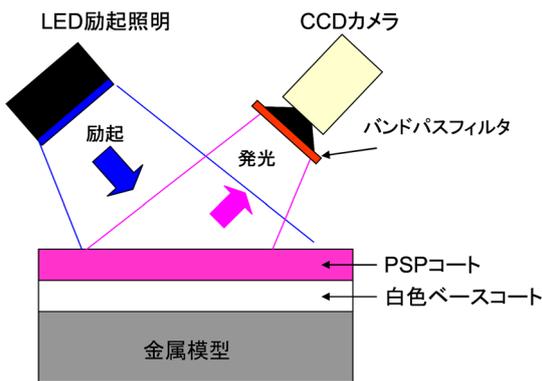


図 1-5 PSP 計測の原理図

2. PSP 計測システム

2-1. PSP 光学系

図 2-1 に PSP 計測の光学系の一例を示す。光学系は、模型に塗装された PSP を発光させる励起照明とその発光強度を計測する CCD カメラから構成され、それらはコントローラとコンピュータにより制御される。

① CCD カメラ

PSP 計測に用いる CCD カメラは、CCD 素子感度特性のリニアリティーが確保されている科学計測用 CCD カメラを使用する必要がある。一般に市販されている CCD カメラでは γ がかかっている (特性が非線形である) ので注意が必要である。PSP 計測では、14bit や 16bit 階調の CCD カメラが用いられることが多い。参考までに、JAXA で使用している浜松ホトニクス株式会社の CCD カメラ (ORCA-II-ERW と ORCA-II-BT1024) のスペックの概略を示す。

■ ORCA-II-ERW (インターライン式 CCD)

- ・ 14bit CCD
- ・ 1024 × 1344 pixel
- ・ 飽和電荷量: 18,500 electron
- ・ 高精細画像取得モードと高速画像取得モードがある。インターライン機構を採用することにより 1.2sec ごとに高精細画像を取得することが可能。

■ ORCA-II-BT1024 (フルフレームトランスファー式 CCD)

- ・ 16bit CCD
- ・ 1024 × 1024 pixel
- ・ 飽和電荷量: 80,000 electron
- ・ 高精細画像取得モードと高速画像取得モードがある。連続画像取得間隔 (フレームレート: 0.28 frame/s) は、転送時間で制約を受けるが、飽和電荷量が高いのでインターライン式に比べて S/N が良い。

一般に、CCD カメラには素子の暗電流ノイズ成分を低減するため空冷あるいは水冷による冷却機構が付いている。水冷式の方がカメラが設置されている環境温度に左右されず、CCD の暗電流ノイズを抑えることができる。そのため、JAXA では水冷式の CCD カメラを使用している。

フルフレームトランスファー式 CCD カメラは CCD の前面にメカシャッターが備わっているため、メカシャッターの動作の影響を受けるので、露光時間の設定には注意が必要である。メカシャッターの開閉動作時間は数 ms なので数百 ms 以上露光時間であれば影響は出ない。

② 励起光源

PSP 計測で使用できる光源には、レーザー、Xe 光源、フ

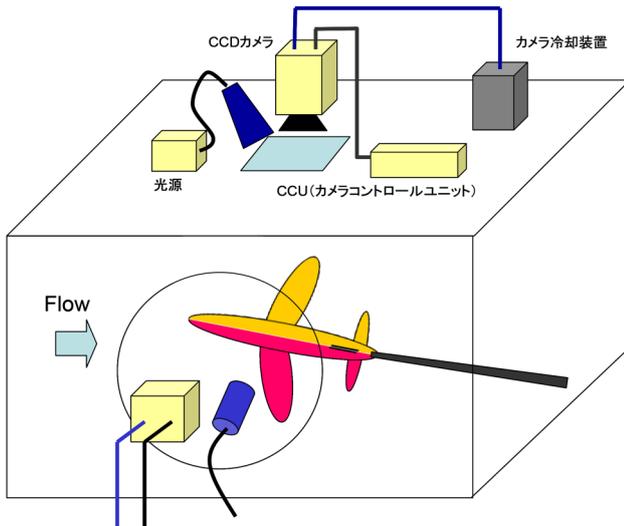


図 2-1 PSP 計測システムの一例

ラッシュランプ、LED などがあるが、一般には Xe 光源と LED が使用される（図 2-3、図 2-4）。Xe 光源の場合、励起フィルタを変えることで自由に励起帯を選択できる利点がある。ランプで発生した光を光ファイバを介して照射器に導く。照射器にはバンドパスフィルタ（励起フィルタ）が内挿されており、PSP の励起帯に合った波長の光を当てることができる。一方、LED の場合、素子の仕様を選択した際に使用波長が限定されるが、比較的安価で高出力化が容易である。

③ PSP 計測用光学フィルタ

a. 発光フィルタ

発光フィルタは CCD カメラに取り付けるレンズ前面に設置する。PSP の発光特性を確認し、その発光に対応したフィルタを選択する。ロングパスフィルタでも、バンドパスフィルタでも良いが、漏れ光対策のため赤外線カットフィルタを重ねることを勧める。CCD の感度は、1100nm 程度の波長の光を受感するので注意が必要である。

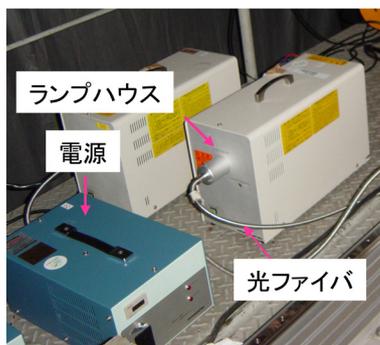


図 2-3 Xe 光源

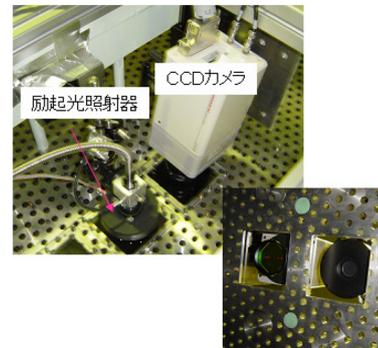


図 2-2 風洞カート上部に設置された CCD カメラと励起光照射器

b. 励起フィルタ

【Xe 光源を使用する場合】

励起フィルタは、PSP の励起帯に対応したフィルタを選び、照射器内部に内挿する。この際、PSP の発光波長帯に対して励起照明の波長特性が重ならないように注意が必要である。PSP の発光に励起照明が含まれると計測精度の低下につながる。

【LED 励起照明を使用する場合】

LED 場合、LED 素子によって発光波長範囲が決められているが、実際にはそれ以外の波長域でもわずかに発光（漏れ光）していることがある。先にも述べたように、励起照明の光が PSP 発光成分に含まれると計測精度が低下する。よって、LED の発光特性を事前に調べ、漏れ光カット用フィルタを重ねる必要がある。



図 2-4 LED 励起照明

2-2. PSP 画像取得

CCD カメラシステムを図 2-5 に示す。CCD カメラ、カメラコントロールユニット (CCU)、PC から構成されている。PC と CCU 間はシリアル/デジタルケーブルで接続され、CCU はカメラを制御し、計測した画像を PC へ転送する。

画像計測は CCD カメラ計測ソフトを用いて行なう。以下の機能が備わっている。

- ・高精密画像撮影モード、高速取得撮影モード、ライブ撮影モード
- ・色調調整用ルット (モノクロ、カラー)
- ・統計処理機能
- ・外部制御計測モード、内部制御計測モード
- ・カメラゲイン (High, Low) 設定機能、露光時間設定機能

2-3. PSP 校正データ取得

PSP 計測を実施するためには、事前に PSP の特性を評価しておく必要がある。JAXA では、PSP の校正データを取得するため、圧力と温度を制御できる真空チャンバーを用いた感圧塗料自動校正装置を使用している。

図 2-6 に示すように、PSP サンプル基板を真空チャンバーの中に設置し、上方から CCD カメラで計測する。システムの概略図を図 2-7 に示す。PSP サンプルの温度はチャンバー内に内蔵されたペルチェ基板で制御される。また、チャンバー内圧は圧力コントローラにより調整される。これらの機能はすべてコンピュータによって制御され、自動計測が可能である。また、JAXA の校正装置は複数のカメラ搭載することが可能で、同時に 4 台まで校正試験データを取得することができる。

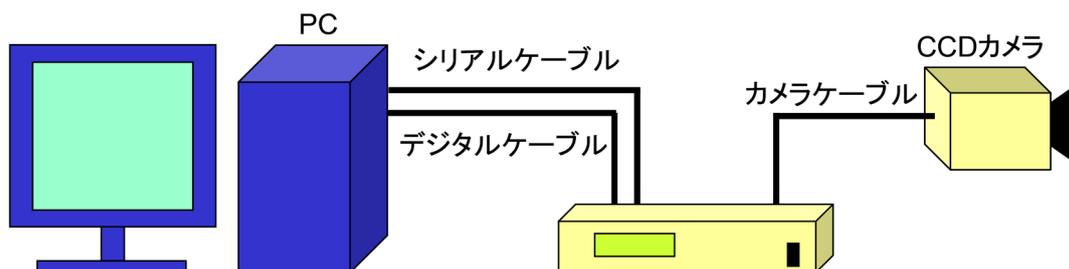


図 2-5 PSP カメラシステム

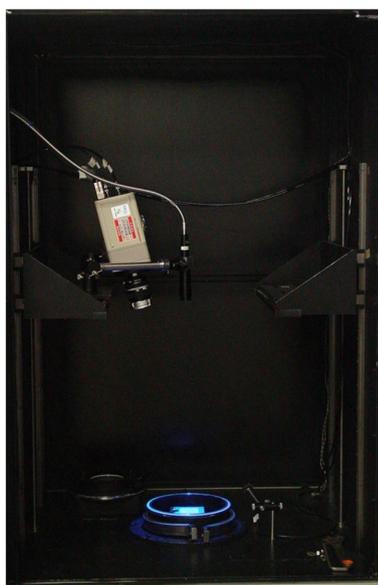


図 2-6 感圧塗料自動校正装置の写真

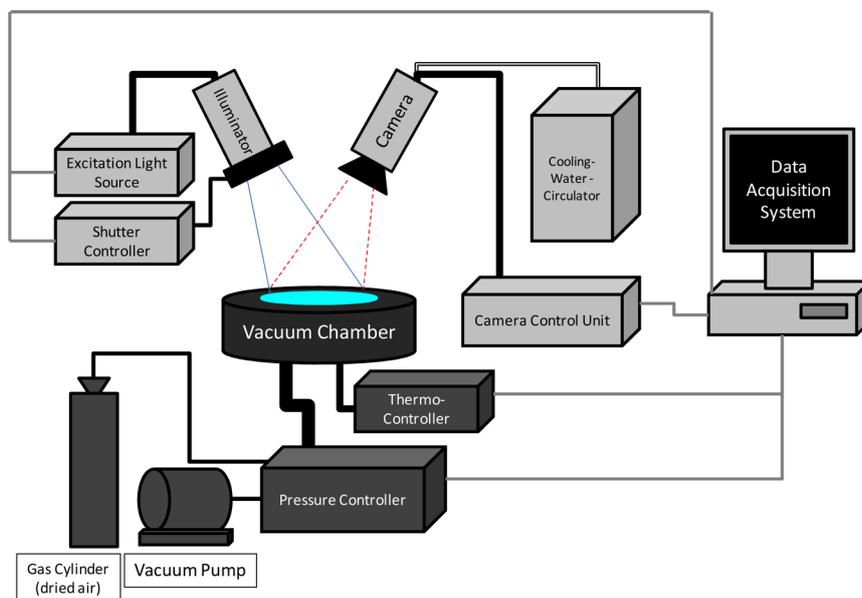


図 2-7 校正試験装置の概略図

3. 感圧塗料の開発概要

3-1. PSP と TSP について

3-1-1. 感圧分子センサーと感温分子センサーの種類

感圧分子センサーには、ポルフィリン、ルテニウム錯体化合物、ピレン系化合物が使用されている。日本や米国では、ポルフィリン化合物である PtTFPP (Pt(II) meso-tetrakis (pentafluorophenyl) Porphyrin) (図 3-1) や PdTFPP (Pd(II) meso-tetrakis (pentafluorophenyl) Porphyrin) がよく使用される³⁷⁾。一方、ピレン系化合物を使用した PSP は温度感度が低く精度の良い計測が期待できるが、励起光による劣化を受けやすいため光劣化防止などの対策が必要である。

感温分子センサーには、希土類錯体やルテニウム錯体、ローダミンやレーザー色素が用いられる。希土類錯体の中では、EuTTA (europium (III) thenoyltrifluoroacetate) がよく使用されている。しかし、光劣化を受けやすく、さらに紫外励起であるというデメリットがある。その点を改良したのが、Eu 四核錯体 ([Eu₄ (μ₃-O) (L1) 10] L1=2-hydroxy-4-octyloxybenzophenone)) を利用した感温色素である^{47), 48)}。可視域で励起でき、かつ光劣化にも耐性がある。また、ローダミン B や、クマリンなどのレーザー色素が感温色素として使用されることがあるが、温度感度は低い。

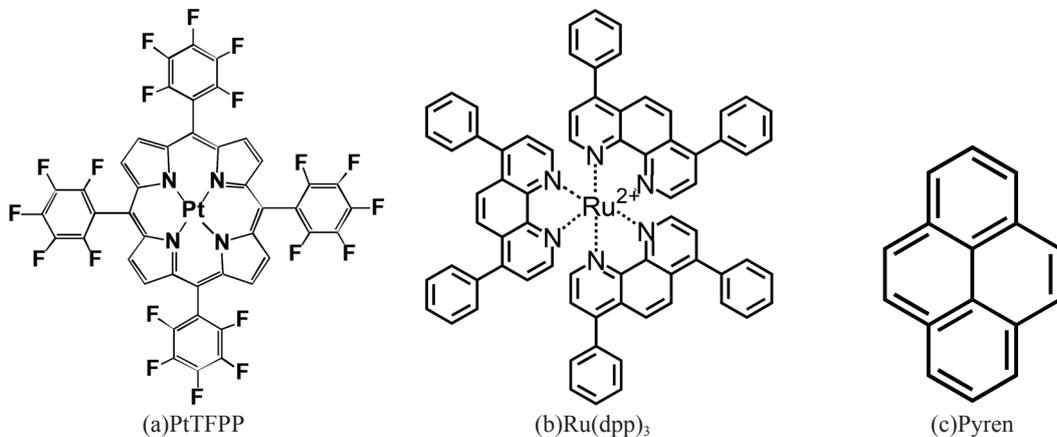


図 3-1 代表的な感圧色素の化学構造式

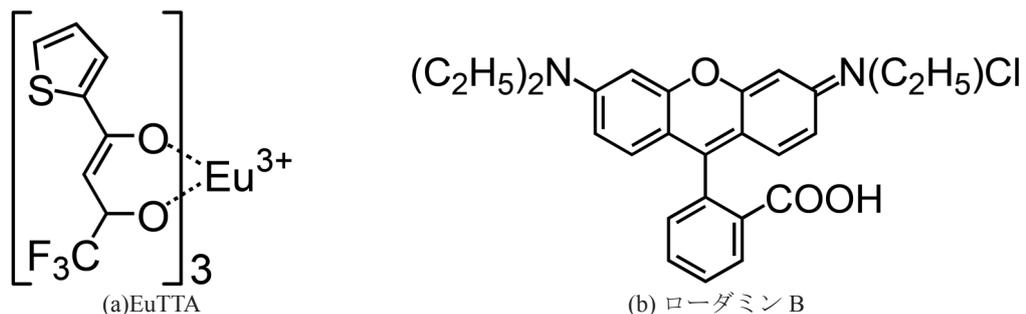


図 3-2 代表的な感温色素の化学構造式

3-1-2. ポリマー

圧力感度を高めるため PSP のポリマーには酸素透過性の高いポリマーを使用する。ポリスチレンが一般的なポリマーとして知られているが、JAXA では Poly-IBM-co-TFEM (Poly (isobutyl - methacrylate -co- trifluoroethylate)), や HFIPM (poly (isobutyl-co-1,1,1,3,3,3 - hexafluoroisopropyl methacrylate)) を使用している (図 3-3)。Poly-IBM-co-TFEM は温度が変わっても圧力感度が変わらない特性を有する¹⁶⁾。HFIPM は新しく開発されたポリマーであり、Poly-IBM-co-TFEM を使用した PSP と同じ圧力特性を持ちながら、温度感度が極めて小さい⁵⁴⁾。また、ベンゼンなどのように人体への影響が極めて悪い溶媒を使用する必要はないというメリットがある。

そのほかに、Poly-TMSP (poly[1-(trimethylsilyl)-1-propyne]) も酸素透過性の高いポリマーとして知られている。ポリマー中の空孔が大きく圧力への応答性が高いことから、非定常圧力場を計測するための PSP 用ポリマー⁵⁵⁾や、低温風洞計測用 PSP ポリマー⁵⁷⁾として利用されている。ポリスチレン、Poly-TMSP は一般の試薬メーカーから購入することができる。

TSP のポリマーには、感温色素の圧力感度を抑えるために酸素透過性の低いポリマーが使用される。代表的な

ポリマーとして PMMA (Poly(methyl-methacrylate)) が知られている。PMMA は試薬メーカーから購入することができる。なお、感温色素の酸素感度が極めて低い場合は、PSP 用のポリマーを使用しても差し支えない。

3-1-3. 白色ベースコート

PSP や TSP の発光強度を増強させるために PSP や TSP の下に白色ベースコートを塗装する。白色ベースコート塗料には PSP の発光を効率よく反射させるために酸化チタンなどの白色顔料が混ざっており、効果的に PSP, TSP の発光強度を増強させることができる。経験的に発光強度は 4 倍から 5 倍に増強される。白色ベースコートは自動車の塗装、補修用に市販されている白色塗料でも良い。白色ベースコートの乾燥が不完全な状態で PSP を塗装すると PSP と白色塗料が混じり酸素透過性が低下し、PSP の圧力感度が悪くなるので注意が必要である⁵⁶⁾。

3-2. PSP/TSP 基本特性

3-2-1. 励起・発光分光特性

図 3-4 と図 3-5 に代表的な PSP と TSP の分光計測結果を示す。図に示されている PSP は PtTFPP, Poly-IBM-co-TFEM とトルエンを混合して得られる。一方、TSP は Eu 四核錯体、PMMA とトルエンからなる。以降、本節で紹介する PSP と TSP は同じ塗料によるものである。

図 3-4 が示すように、PtTFPP の励起帯は紫外外から可視域に渡って広く分布する。共通な励起帯として可視部

に強い複数のピークがあり、長波長領域のものを Q 帯 (Qband), 400nm 付近のものをソーレー帯 (soret band) といい、環の共役 π (パイ) 電子系の状態と関連が強い。この波長域を励起すると PSP は発光する。発光のピークは 650nm にある。励起光源に Xe 光源などの連続波長の光源を使用する場合は、照射器の前に PSP の励起帯に合ったフィルタを取り付けて励起波長を選択する。PSP の発光を計測する場合は、CCD カメラの前面に PSP の発光のみを透過するフィルタを取り付けて計測する。TSP 計測についても同様である。

ユーロピウム (Eu) やテリビウム (Tb) を中心金属とする希土類錯体は一般的に紫外励起であるが、図 3-5 に示すように本感温色素は 400nm 付近で励起することができる。発光スペクトルは狭帯域の発光であり、615nm の中心波長で発光する。

3-2-2. PSP の圧力 / 温度感度特性

PSP の圧力 / 温度感度特性を JAXA 感圧塗料自動校正装置を用いて計測した。PSP サンプル基板を真空チャンバーの中に設置し、上方から CCD カメラで計測した。PSP サンプルの温度はチャンバーに内蔵されたペルチェ基板で制御される。また、チャンバー内圧は圧力コントローラにより調整される。これらの機能はすべてコンピュータによって制御され、自動計測が可能となっている。

PtTFPP と HFPIIM をそれぞれ感圧色素、ポリマーとして使用した PSP の圧力感度と温度感度特性を図 3-6 と図

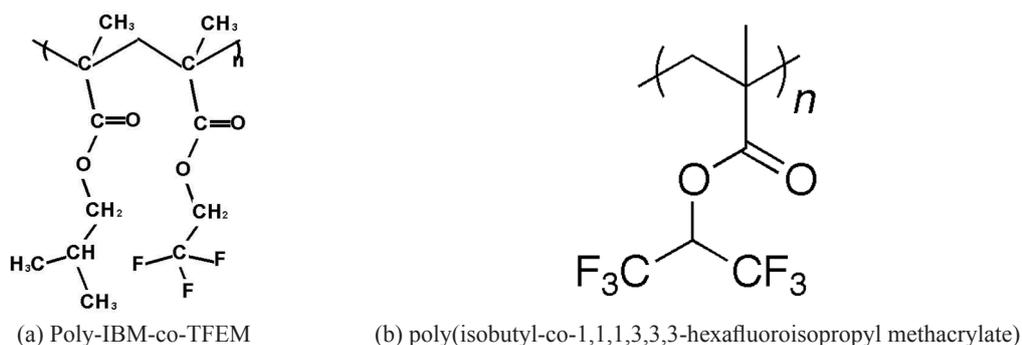


図 3-3 酸素透過性ポリマーの構造式

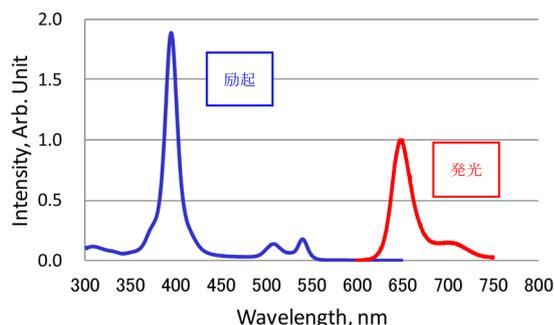


図 3-4 PtTFPP の励起波長と発光波長

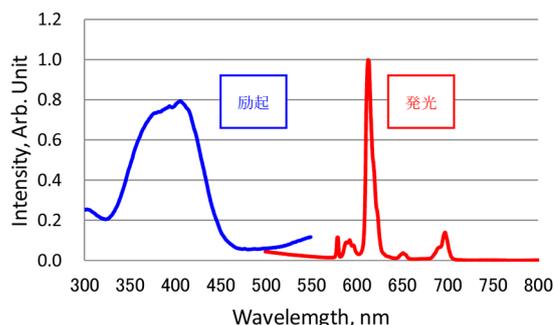


図 3-5 Eu 錯体の励起波長と発光波長

3-7に示す。HFIPMはPSPの温度感度を低減したポリマーとして開発されたものである。図3-7の感温特性をみるとわかるように、従来のPSPよりも温度感度が低く、約0.4%/°Cであった。従来のポルフィリンを使用したPSPの中では最も温度感度が小さい。また、圧力感度は従来のPSPと変わらず、さらに、温度による感度のばらつきが極めて小さい。

3-2-3. TSPの圧力/温度感度特性

TSPの圧力/温度感度特性の一例を図3-8と3-9に示す。TSPは感温色素としてEu四核錯体を使用し、ポリマーにPMMAを用いた塗料である。TSPの温度感度は高く、約3%/°Cを示した。PSPの圧力感度特性とは異なり、発光強度は圧力にほとんど変化しない。なお、TSPの温度感度特性もポリマーの影響を受ける。

3-3. 複合PSPについて

PSPの発光強度は、圧力、温度と励起照明強度に依存する。そのため、高い計測精度を実現するためには温度補正と励起照明強度補正が必要となる。実用的には励起照明強度の補正はIn-situ法である程度対応できるため、温度に起因する計測誤差軽減の方が優先順位が高い。

温度補正方法には、PSP/TSP塗り分けによる計測方法³¹⁾や、赤外線カメラ(IRカメラ)による温度補正³²⁾がある。塗り分け方法ではβ角(横滑り角)をとった計測ができないというデメリットがある。また、IRカメラによる温度補正の場合、マーカー検出の難しさ、背景温度の写り込みや、光学窓ガラスの材質に制限があるという問題などの観点から実用的なシステムではない。上記のような問題を解消するシステムとして、感圧色素と感温色素を混合した複合PSP(Bi-luminophore Paint)を用いた圧力・温度場同時計測法が提案されている³⁵⁾。この計測法

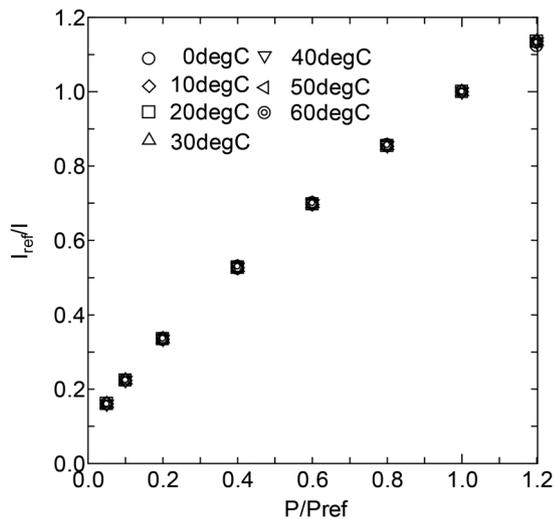


図 3-6 PSPの圧力感度特性 (Poly-HFIPM)

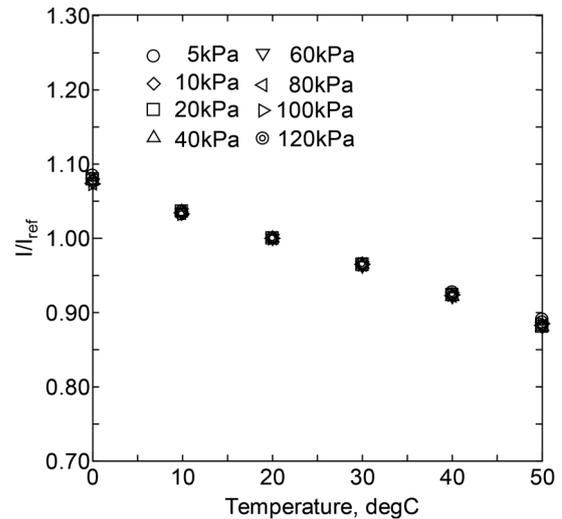


図 3-7 PSPの温度感度特性 (Poly-HFIPM)

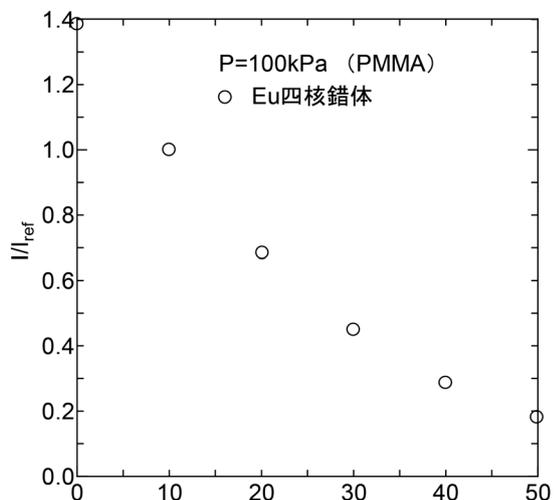


図 3-8 TSPの温度感度特性

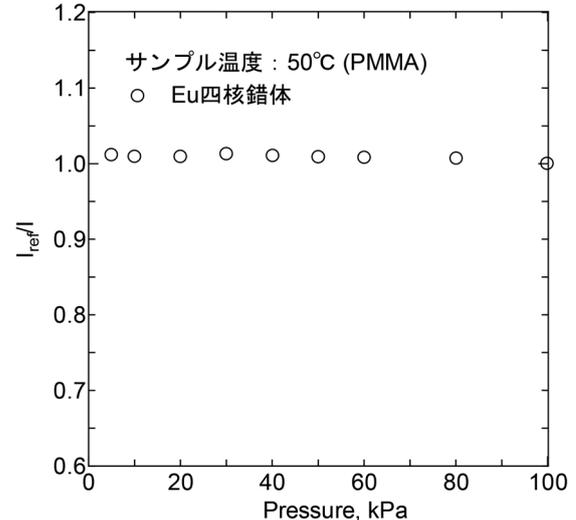


図 3-9 TSPの圧力感度特性

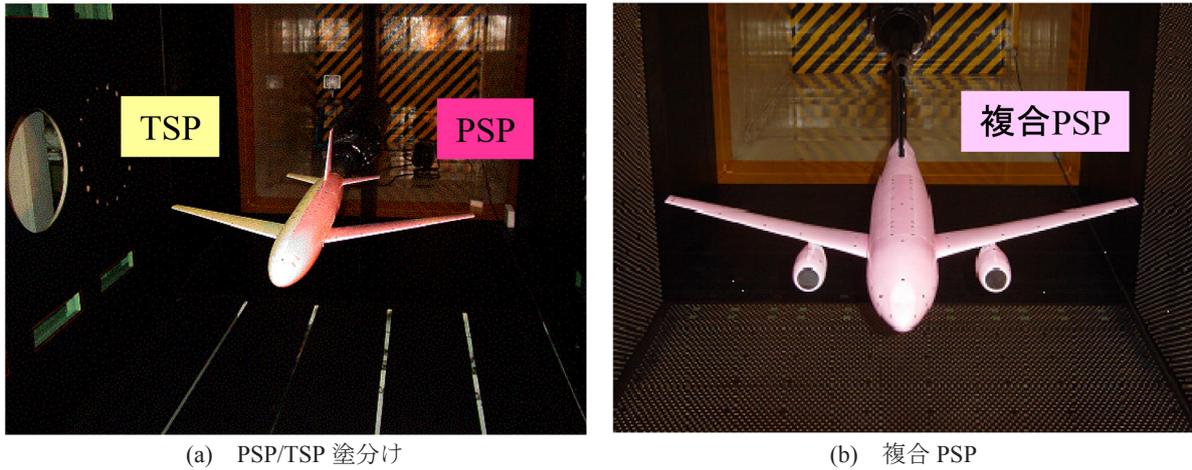


図 3-10 PSP が塗装された模型の写真

は、感圧色素と感温色素の 2 種類の色素の圧力と温度による発光強度変化をもとに圧力と温度を計測する方法である (図 3-11, 3-12)。

複合 PSP に求められる理想的な特性として、以下のよう
な要求が挙げられる。

- ・ 2 色素を共通の励起波長で励起できる。
- ・ 2 色素の発光がはっきりと分離できる。
- ・ 2 色素, ポリマーは共通の溶媒に溶解する。
- ・ 2 色素の感度特性の一様性。
- ・ 光劣化に強い色素の組み合わせ。

複合 PSP 計測では、2 台のカメラで計測する方法 (図 3-12) とフィルタホイールを使用する計測法がある。2 台カメラを用いて計測する方法には、単純に 2 台並べる計測と、波長分離式方法による計測がある。波長分離式カメラは、レンズから入射した光をビームスプリッターで 2 方向に分け、CCD カメラ前面の光学フィルタによって 2 色の発光を計測する。一方、フィルタホイールは 1 台のカメラで計測できる利点があるが、フィルタを交換する時間を要するため、温度が時間的に変化する流れ場の計

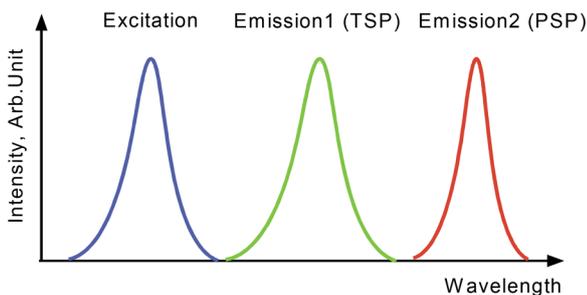


図 3-11 複合 PSP の励起・発光

測には不向きである。

JAXA/WINTEC では大学の協力のもと、複合 PSP 用の感温センサーの開発に取り組んでいる。先に述べた Eu 四核錯体は複合 PSP 用の感温色素として開発されたものである。複合 PSP の感圧色素と感温色素には、それぞれ図に示す PdTFPP と Eu 四核錯体 ([Eu4(μ -O)(L2)10], L2 = 2-hydroxy-4-dodecyloxybenzophenone) を使用し、ポリマーには Poly-IBM-co-TFEM を用いた。

Eu 四核錯体と PdTFPP の分光計測結果 (圧力 / 温度特性) を図 3-13 と図 3-14 に示す。感圧 / 感温色素の 2 種類の発光は波長的に分離できており、複合 PSP に適した色素の組み合わせである。図中の赤色の四角で囲った部分が Eu 四核錯体の発光特性であり、黒色で囲った箇所が PdTFPP の発光である。圧力を 100kPa から 5kPa まで変化させると、PdTFPP の発光強度のみが増加しているのがわかる。Eu 四核錯体の発光強度には変化が見られない。一方、温度を 0℃ から 60℃ まで変えると、感圧色素には温度依存性があるため両色素の発光強度が大きく変化する。これらの圧力と温度による 2 種類の発光強度特性から圧力と温度を求めることができる。

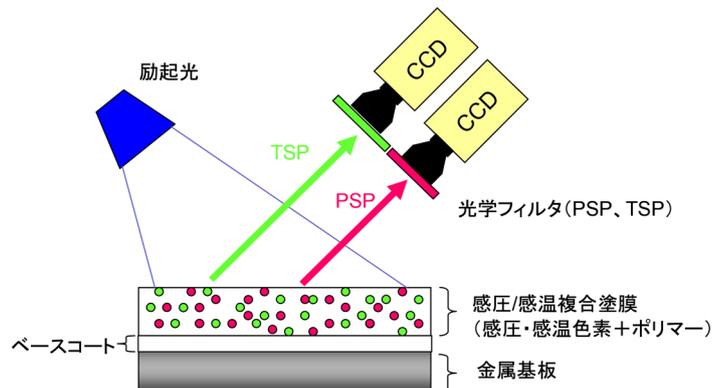


図 3-12 複合 PSP の計測原理図

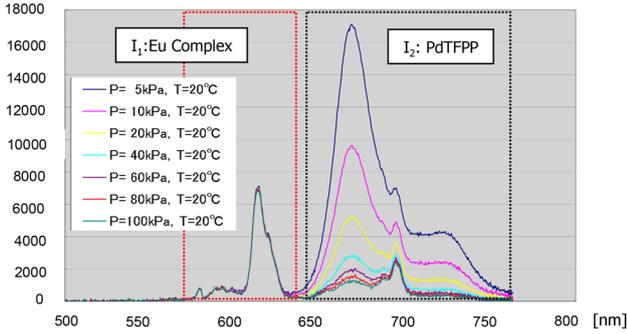


図 3-13 複合 PSP における発光スペクトルの圧力特性

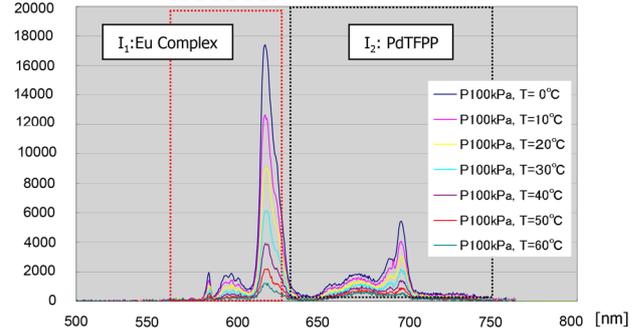


図 3-14 複合 PSP における発光スペクトルの温度特性

4. データ処理手法概要

4-1. PSP 画像処理の基礎

PSP 画像処理に必要な基礎知識について説明する。下記に示す 1～4 の工程により PSP 画像を圧力画像に変換することができる^{2),3)}。

4-1-1. 画像平均

PSP 計測画像には CCD 特性に起因するショットノイズが含まれている。そのノイズ成分を軽減する方法として、PSP 画像を多数計測して平均化する方法がとられる。圧力が大きく変化する高速流れ場の計測では 5 枚程度平均化すれば十分効果がある。ノイズが目立つ場合はメディアンフィルタなどの画像フィルタで処理する。

4-1-2. ダーク減算

CCD で計測した PSP 画像の輝度値には CCD の暗電流による成分が含まれているので、その成分を差し引く必要がある。PSP 計測画像とは別に、PSP を発光させていない時の画像（ダーク画像）を計測し、PSP 画像からダーク画像を差し引く。

4-1-3. 画像位置合わせ

PSP 計測では、通風中の画像と無風時の画像計測し、それらの比をとることで PSP の塗り斑や励起照明の非一様性による影響をキャンセルする。一般に、通風すると模型は空気力を受けるため変形や移動を受ける。よって、厳密に画像の比をとるためには両画像間の位置合わせが必要となる⁵⁾。

一般には、模型上に貼り付けたマーカー位置を参照した幾何的な変換を行い、通風画像と無風画像間の位置合わせを行なう。ここでは、以下のように 2 次式で定式化する。さらに高次の式も考えられるが、旅客機形状の風洞模型であれば 2 次で十分な位置合わせ精度が確保できる。この変換は、平行移動、回転、伸縮、捩（ねじ）れに対

応している。無風時画像上のマーカー位置を $r_i = r_i(x_i, y_i)$ とし、通風時画像上のマーカー位置を $R_i = R_i(X_i, Y_i)$ とすると、

$$x_i = a_1 + a_2 X_i + a_3 Y_i + a_4 X_i^2 + a_5 X_i Y_i + a_6 Y_i^2 \quad (4-1)$$

$$y_i = b_1 + b_2 X_i + b_3 Y_i + b_4 X_i^2 + b_5 X_i Y_i + b_6 Y_i^2 \quad (4-2)$$

各係数 a, b は、最小二乗法により計算できる。

$$F(a_i) = \sum_i (x_i - a_1 + a_2 X_i + a_3 Y_i + a_4 X_i^2 + a_5 X_i Y_i + a_6 Y_i^2)^2 \quad (4-3)$$

$$G(b_i) = \sum_i (y_i - b_1 + b_2 X_i + b_3 Y_i + b_4 X_i^2 + b_5 X_i Y_i + b_6 Y_i^2)^2 \quad (4-4)$$

$$\frac{\partial F(a_i)}{\partial a_i} = 0 \quad (4-5)$$

$$\frac{\partial G(b_i)}{\partial b_i} = 0 \quad (i=1 \sim 6) \quad (4-6)$$

上記方程式の解を求めるには最低 6 点必要であるが、実用上十分な精度を得るためにはマーカーの数は 10～15 点程度必要である。求めた係数 a_i , b_i を用いて画像ピクセルすべてに対して変換処理を行なう。

4-1-4. 圧力変換 (A-priori 法 & In-situ 法)

PSP 画像を圧力に変換する方法は、大きく分けて 2 種類の方法がある。PSP の圧力感度特性のみを利用して圧力画像に変換する A-priori 方法と、静圧孔データを参照する In-situ 法がある。

a. Apriori 法

圧力を調整することのできる真空チャンバー内に PSP を塗装したサンプル板を設置し、圧力を変えながらサンプルの PSP 発光強度を計測する。すると、以下のような PSP 発光強度に対する圧力の較正カーブを得ることができ、較正式は簡単に次式 (Stern-Volmer 式) で表すことができる。

$$\frac{P}{P_{ref}} = A_1 + A_2 \left(\frac{I_{ref}}{I} \right) \quad (4-7)$$

一般に、PSP の特性は非線形であるので、以下のように高次の式が用いられる。

$$\frac{P}{P_{ref}} = A_1 + A_2 \left(\frac{I_{ref}}{I} \right) + A_3 \left(\frac{I_{ref}}{I} \right)^2 + \dots = \sum_{i=1}^n A_i \left(\frac{I_{ref}}{I} \right)^{i-1} \quad (4-8)$$

変換係数 A_i が求めれば、上式を用いて PSP 画像比 (I_{ref}/I) から圧力画像 (P/P_{ref}) を算出することができる。ここで

は、PSP 発光強度の温度による影響は無視したが、温度が変化するような流れ場を計測する場合、温度補正を施す必要がある。温度補正方法は次節で述べる。

b. In-situ 法

In-situ 法は PSP 較正データを必要とせず、静圧孔データを参照する処理方法である。通風時と無風時の画像の比 (I_{ref}/I) を取り、静圧孔まわりの発光強度比を抜き出す。静圧孔データと発光強度比から次式のような較正カーブが得られる。

$$\frac{P}{P_{ref}} = B_1 + B_2 \left(\frac{I_{ref}}{I} \right) \quad (4-9)$$

較正係数 B_1, B_2 は最小自乗法で求める。この較正式を用いて、PSP 発光強度比画像を圧力画像へ変換する。圧力孔は可能な限り発光強度の変化が大きく生じる箇所に設ける。圧力差が出ない箇所に静圧孔を設置すると、較正カーブが正確に決まらないので注意が必要である。

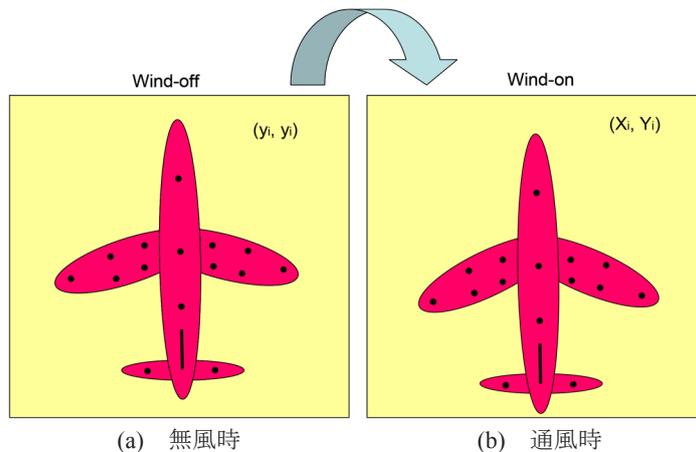


図 4-1 模型上のマーカーイメージ

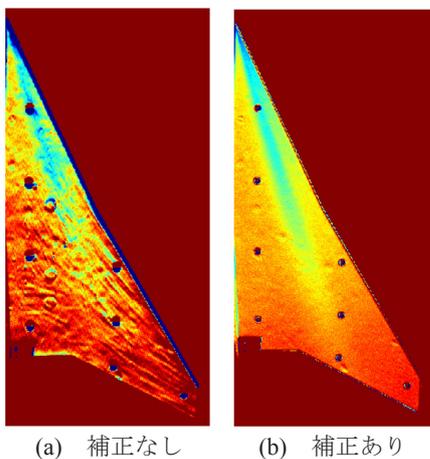


図 4-2 位置合わせの効果

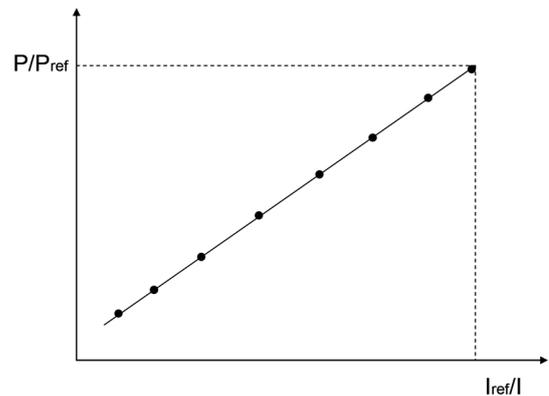


図 4-3 PSP 較正曲線

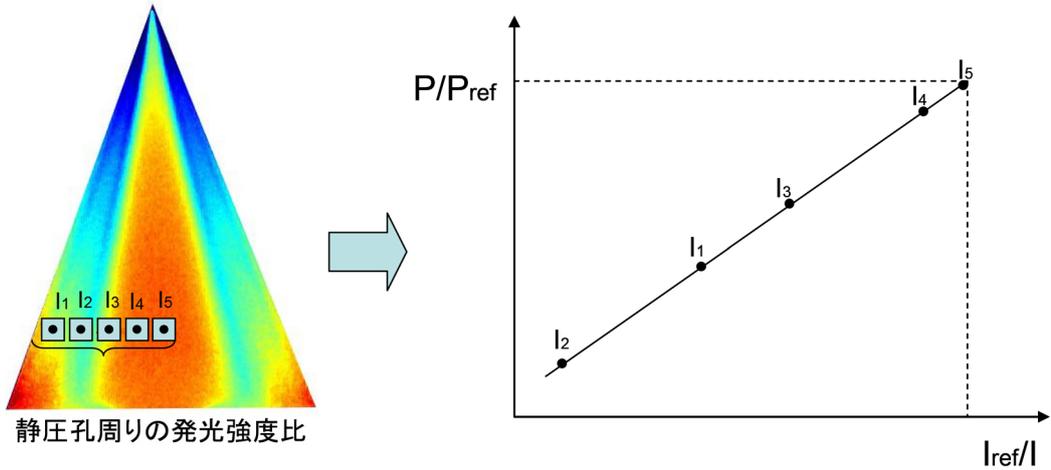


図 4-4 In-situ 較正曲線

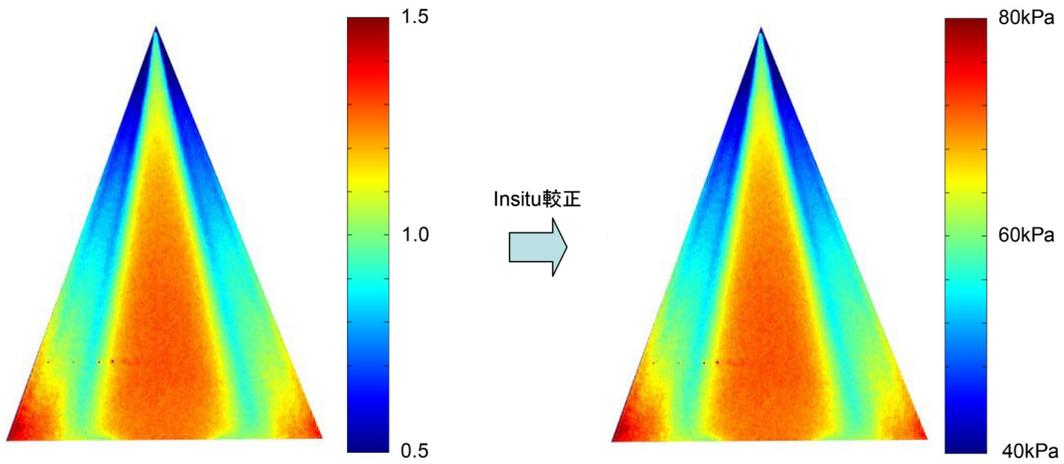


図 4-5 In-situ 較正による変換

4-1-5. 3次元模型グリッドへのマッピング

計測した2次元圧力分布を3次元模型グリッドへマッピングする方法について紹介する。2次元圧力場情報を3次元模型座標へ投影する際、座標変換は模型上に設置されたマーカー座標を用いて行なう。Direct Linear Transfer (DLT) と呼ばれる線形変換により、模型表面上の座標 $R_i=R_i(X_i, Y_i, Z_i)$ から圧力画像座標 $r_i=r_i(x_i, y_i)$ への変換式は次のように表される。

$$x_i = \frac{L_1 X_i + L_2 Y_i + L_3 Z_i + L_4}{L_9 X_i + L_{10} Y_i + L_{11} Z_i + 1} \tag{4-10}$$

$$y_i = \frac{L_5 X_i + L_6 Y_i + L_7 Z_i + L_8}{L_9 X_i + L_{10} Y_i + L_{11} Z_i + 1} \tag{4-11}$$

最低6点の座標があれば全ての係数を求めることができるが、実用上15点程度の座標は参照した方がよい。上式を誤差の自乗和に書き直して、最小自乗誤差を満たすよ

うに各係数を求める。

$$F(L_1, L_2, \dots, L_{11}) = \sum_i \{L_1 X_i + L_2 Y_i + L_3 Z_i + L_4 - x_i(L_9 X_i + L_{10} Y_i + L_{11} Z_i + 1)\}^2 \tag{4-12}$$

$$G(L_1, L_2, \dots, L_{11}) = \sum_i \{L_5 X_i + L_6 Y_i + L_7 Z_i + L_8 - y_i(L_9 X_i + L_{10} Y_i + L_{11} Z_i + 1)\}^2 \tag{4-13}$$

$$\frac{\partial H(L_i)}{\partial L_i} = 0 \quad (H = F + G, \quad i=1 \sim 11) \tag{4-14}$$

得られた係数 L_i ($i=1 \sim 11$) を用いて変換すれば、模型3次元グリッド座標に対応する2次元圧力場における座標を求めることができる。

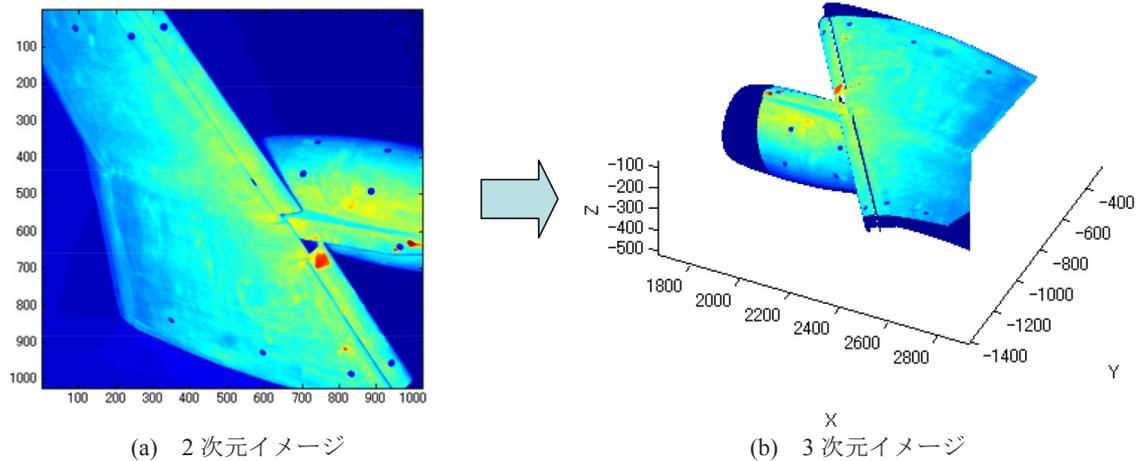


図4-6 2次元PSP画像の3次元グリッドへのマッピング

4-2. 高精度画像処理

4-2-1. PSP 温度補正法

PSP は圧力感度だけではなく、その発光強度は温度によっても変化する。そのため、計測精度を上げるためには温度補正を施す必要がある。温度補正法には、赤外線カメラを併用した計測、PSP/TSP 塗分けによる計測、複合 PSP 計測がある。以下にその補正方法について簡単に説明する。

(i)IR カメラによる温度補正

PSP は圧力感度だけではなく、温度感度も有する。図 4-7、4-8 に示す特性は感圧色素に PtTFPP、ポリマーに Poly-IBM-co-TFEM を使用した PSP の圧力・温度感度特性である。

PSP 発光強度の温度補正の方法について説明する。PSP の通風時 (run) の輝度値を $I_{run}(P_{run}, T_{run})$ とし、無風時 (ref) の輝度値を $I_{ref}(P_{ref}, T_{ref})$ とすると、PSP の発光強度比は以下のように表される。

$$\frac{I_{ref}}{I_{run}} \equiv \frac{I_{ref}(P_{ref}, T_{ref})}{I_{run}(P_{run}, T_{run})} \tag{4-15}$$

この式では、温度の影響を含んだ式となっている。温度の影響を除去した発光強度比を

$$\frac{I_{ref}}{I} \equiv \frac{I_{ref}(P_{ref}, T_{ref})}{I(P_{run}, T_{ref})} \tag{4-16}$$

とし、式変形を施すと、以下のようにかける。(4-16) 式では無風時の温度に合わせている。)

$$\begin{aligned} \frac{I_{ref}}{I} &\equiv \frac{I_{ref}(P_{ref}, T_{ref})}{I(P_{run}, T_{ref})} \\ &\equiv \frac{I_{ref}(P_{ref}, T_{ref})}{I_{run}(P_{run}, T_{run})} \cdot \frac{I_{run}(P_{run}, T_{run})}{I(P_{run}, T_{ref})} \end{aligned} \tag{4-17}$$

(4.17) 式は、無風時と通風時の温度差を求め、温度差に応じた発光強度の変化量を (4-15) 式にかければ、温度依存性を除去した発光強度比が求まることを示している。通風時と無風時の温度差は IR カメラを用いて計測することができ、その温度差に対応した PSP の発光強度変化量は図 4-8 のデータから計算できる。

ここでは、IR カメラによる温度補正法について説明したが、TSP による温度補正の場合も同じである。また、物体上に温度分布がない場合は、測温抵抗体等の温度センサによる温度補正もできる。

(ii)PSP/TSP 塗分けによる温度補正

PSP/TSP 塗り分けによる温度補正の場合、流れの対称性を仮定する必要があるが、PSP カメラシステムのみを用いて計測できるという利点がある。共通の波長域で計測できる色素を選択すれば、PSP と TSP は同じ発光フィルタを用いて計測することができる。圧力と温度の算出法は、PSP と TSP の較正データを以下のように圧力と温度の関数として定義し、Newton-Raphson 法などを用いて連立方程式を解けばよい。

PSP と TSP の圧力/温度特性は、較正試験装置を用い、マトリックス的に圧力と温度を変えてデータを取得しておく。その発光データに対して、基準状態 (圧力, 温度) の発光強度で正規化したデータを用いる。

PSP は励起光強度変化や色素劣化による計測誤差が生じるため、JAXA では A-priori/In-situ Hybrid 法と呼ば

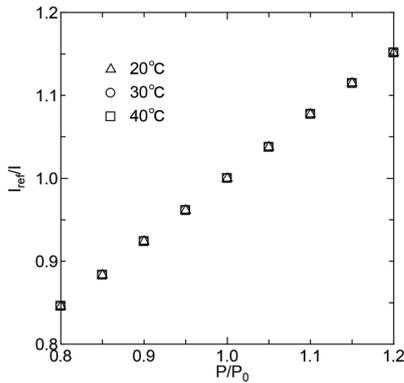


図 4-7 PSP の圧力感度特性

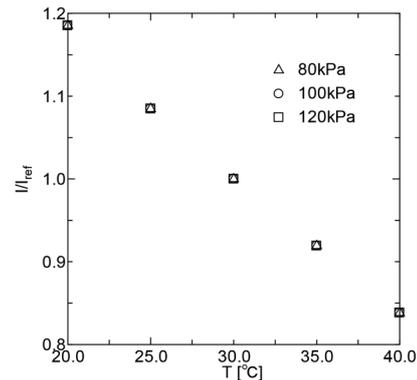


図 4-8 PSP の温度感度特性

れる PSP 特性と静圧孔を併用した処理法を用いている。A-priori/In-situ Hybrid 法とは、圧力感度は PSP の特性を用い、この誤差分を補正するために静圧孔データを使用する方法である^{58), 59)}。In-situ 法では外挿部分が不確定であるが、A-priori/In-situ Hybrid 法では PSP の感度特性を参照しているため外挿範囲なく、圧力を算出することができる。

$$\frac{I_{Prf}}{I_p} = f(P, T) \quad (4-18)$$

$$\frac{I_T}{I_{Tref}} = g(P, T) \quad (4-19)$$

(iii) 複合 PSP による温度補正

PSP の温度補正のために、図 3-13 と図 3-14 に示すような特性をもつ感圧色素と感温色素を混合した複合 PSP を用いることがある。複合 PSP の感圧色素と感温色素の発光強度から圧力と温度を求める方法は、(ii) に示した PSP/TSP 塗分けの処理方法と基本的に同じである。両発光の発光強度を圧力と温度の関数として表現し、連立方程式を解くことにより求めることができる。

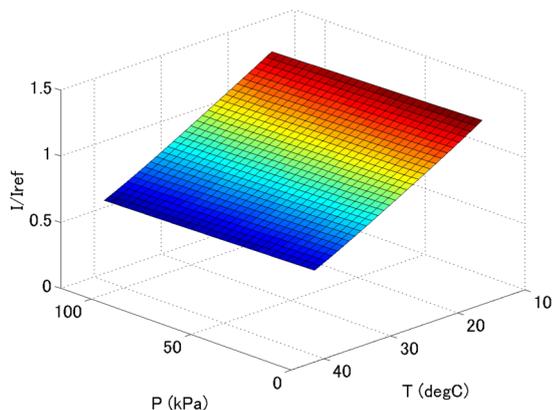


図 4-9 PSP の較正曲面

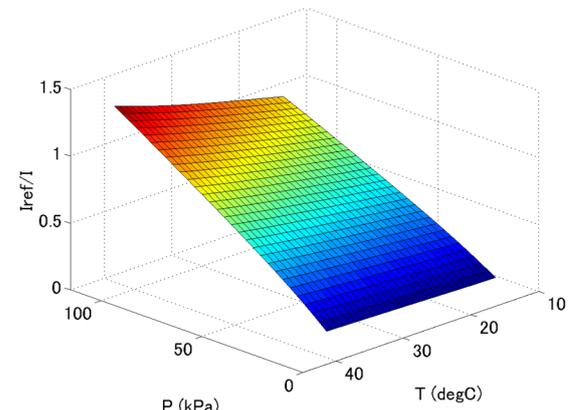


図 4-10 TSP の較正曲面

4-2-2. Self-Illumination 補正

航空機形態に見られる複雑な 3 次元形状をなす領域を計測する場合、以下の図 4-11 が示すように他部位（たとえば胴体）からの PSP 発光が反射して重なるため計測精度が悪化する。高精度化のためにはこの影響を補正する必要がある。PSP 自身があたかも照明のように周りを照らして相互に影響を及ぼすため、Self-Illumination (SI: 自己照明) 効果と呼ばれている。この効果を除去する方法を SI 補正という。

一般に、SI の影響は模型形状、発光強度、塗装面の反射率に依存する。塗装面における鏡面反射成分を考慮した場合には、模型とカメラの位置関係等にも依存するため SI の影響を補正するのが非常に難しい。実際の PSP の塗装面は艶の少ないマットな状態であることから、反射は相互反射を含む拡散反射であると仮定できる。この仮定を適用することにより関係式が単純化されて計算時間の節約につながる。拡散反射を仮定した手法はラジオシティ法として 3 次元コンピュータグラフィックス等の分野で使用されている⁶⁰⁾。(4.20) 式にその基礎式を示す。

$$I_i = I_i^{(0)} + R_i \sum_{j=1}^N A_{i,j} I_j \quad (4-20)$$

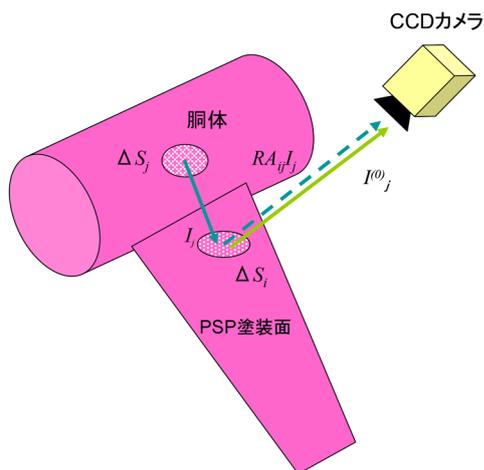


図 4-11 Self-Illumination 補正のイメージ

ラジオシティ法では、要素面 ΔS_j の光強度 I_j は要素面 ΔS_j 自ら放射する光強度 $I_j^{(0)}$ と、他の要素面 ΔS_j から放射される光のうち ΔS_i に到達する光の反射成分との総和として表される。つまり、左辺 I_i は他要素面からの光の影響を含んだ値である。一方、右辺 $I_i^{(0)}$ は他の要素面からの光の影響を受けていない本来の光強度である。また、 R_i は要素面 ΔS_i の反射率であり、 A_{ij} は一般にフォームファクタと呼ばれ要素面間の形状寸法と相対的な幾何学的配置のみで決定される。 I_j は要素面 ΔS_j の光強度であり、他の要素面からの光の影響を含んでいる。上述のラジオシティ法では求める値は I_i と I_j であり $I_i^{(0)}$ が既知であるのに対し、PSP 計測では求めるべき値は $I_i^{(0)}$ である。 I_i と I_j は CCD カメラで取得できる。さらに、PSP 塗装面の PSP の発光波長における反射率が一樣であり一つの定数 R で与えられると仮定すると (4.20) 式は (4.21) 式ようになる。なお、反射率 R は PSP を塗装したサンプル板を使用し、予め較正試験により求めておく⁶¹⁻⁶³⁾。

$$I_i^{(0)} = I_i - R \sum_{j=1}^N A_{i,j} I_j \quad (4-21)$$

マッピング後の無風時および通風時の発光強度データは、(4.21) 式により他要素面からの self-illumination の影響を差し引かれた本来の発光強度に補正される。詳しい式の導出については、文献を参照していただきたい⁶¹⁻⁶³⁾。

5. JAXA/WINTEC における PSP 計測例

5-1. PSP 技術開発試験

第 5 章では、JAXA の PSP 計測システムで計測した風洞試験結果について紹介する。

5-1-1. 低速風洞への適用例

PSP 計測を低速流れへ適用する試みが進んでおり、航空宇宙機だけでなく、自動車や鉄道への応用が期待されている。低速流れでは模型上に生じる圧力差が小さく、高速気流中では顕著に現れなかった誤差要因が問題になる。PSP は圧力感度と同時に温度感度をもつ。例えば、ポルフィリンとよばれる感圧色素では 1°C あたり発光強度が約 1% 変化し、この変化量は圧力に換算すると約 1kPa に相当する。また、PSP の発光は励起光強度の安定性に強く依存し、励起光強度が 1% 変動すれば約 1kPa の誤差になる。50m/s の風速では動圧が約 1.5kPa であることから、これらの要因が致命的な計測誤差になることは容易に推察できる。したがって、低速流れではこれら温度や励起照明による誤差要因が小さくなるように工夫して計測を行う。

(A) JAXA6.5m × 5.5m 低速風洞 (LWT1) における PSP 試験結果

LWT1 において実施した高揚力装置模型を用いた PSP 計測の結果を紹介する。JAXA の大型実用低速風洞で初めて実施した PSP 試験である^{28),29)}。

JAXA 高揚力装置標準模型の略図を図 5-1 に示す。巨大模型であるため通常使用している PSP 塗装ブースではスプレーできない。そのため、風洞測定部内で模型を塗装できるように塗装システムを開発した。スプレーにより飛散する塗料が風洞を汚さないように透明シートで囲い、さらに有機溶媒ガスによる中毒を防ぐため作業員は専用のスーツを着用して作業を行なった。ブース内の空気は排気装置を通して建屋の外に排気するようにした。

図 5-2 に PSP 光学系の概略図を示す。CCD カメラと LED 照明を風洞北壁に設置し、光学窓を通して計測した。模型が大きく、照明位置と模型間の距離が離れているため、通常使用している Xe 光源では PSP の発光は弱い。PSP の発光を増強させるため、LED ヘッドに 1024 個の LED 素子を使用した高出力 LED 照明を使用し、高出力化を図った。熱による LED 発光強度特性の変化を防ぐため背面には空冷ファンを取り付けた。

低速流れでは PSP の温度による計測誤差が顕著に現れるようになる。そのため、通風中の模型温度と、風洞を止めて気流が静止した直後の模型温度はほぼ等しいと仮定して画像処理を行った。静圧孔データを参照する In-situ 法を用いて PSP 発光強度を圧力画像に変換した。ま

た、低速流れでは PSP 発光強度の変化が小さいため画像平均枚数を増やして S/N を高めた。通常、高速（遷音速）流れでは、5～8 枚の画像で十分な解像度を得ることができるが、本計測では S/N を高めるため 64 枚の PSP 画像を処理した。

計測結果の一例を図 5-5 に示す。PSP 発光強度変化の小さい低速度域にも関わらず、模型全面の圧カイメージを鮮明に可視化することができた。計測精度は、風速 60m/s において RMS 値約 0.2 (Cp 換算) であった。

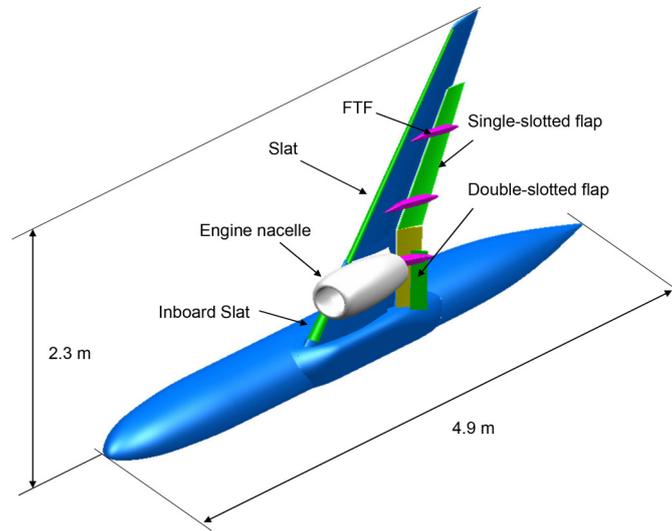


図 5-1 JAXA 高揚力装置標準模型の図

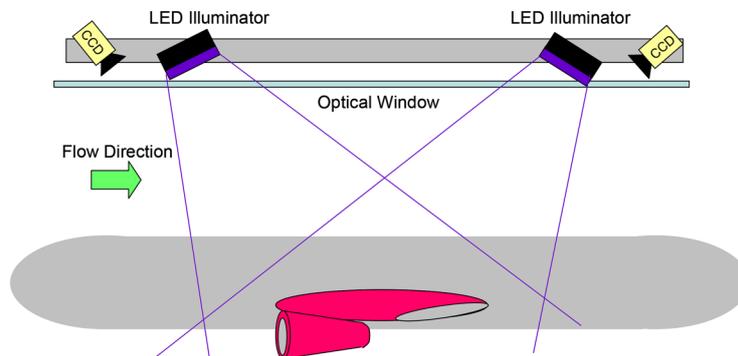


図 5-2 LWT 1 における PSP 光学系



図 5-3 PSP 塗装された模型の写真



図 5-4 LED 照明に照らされた模型

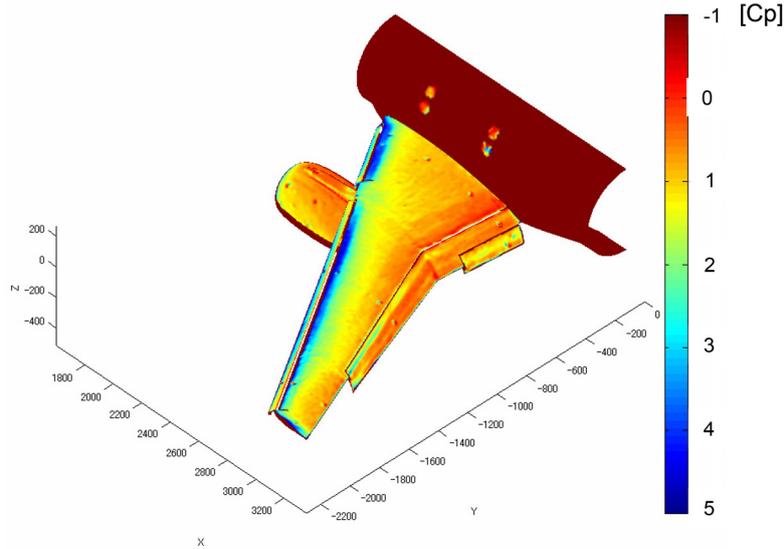


図 5-5 計測された圧力分布

(B) JAXA2m × 2m 低速風洞 (LWT2) における PSP 試験結果

通風直後の無風時画像を使用することにより簡易的に PSP 温度補正が可能であるが、赤外線 (IR) カメラを併用することにより、さらに計測精度を高めることができる³²⁾。IR カメラを用いた PSP 計測システムの概要を図 5-7 示す。

低速用 PSP システムは、16bit CCD カメラ (HAMAMATSU PHOTONICS C4880-50-26W) と励起用 Xe 光源から構成されている。カメラの前面には PSP の発光のみを選択的に

透過バンドパスフィルタ (590-710nm) と IR カットフィルタを取り付けた。また、励起光照射器には PSP の励起帯に適したバンドパスフィルタ (380-530nm) および IR カットフィルタを取り付けた。

IR カメラ (AMEGA Infrared System: THV 900) は風洞の天井観測部に PSP 用 CCD カメラと併設され、模型を上

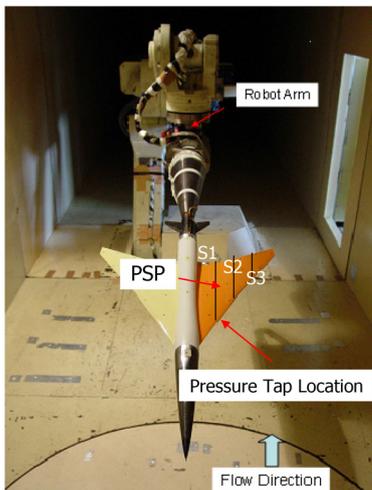


図 5-6 LWT2 に設置された SST 模型

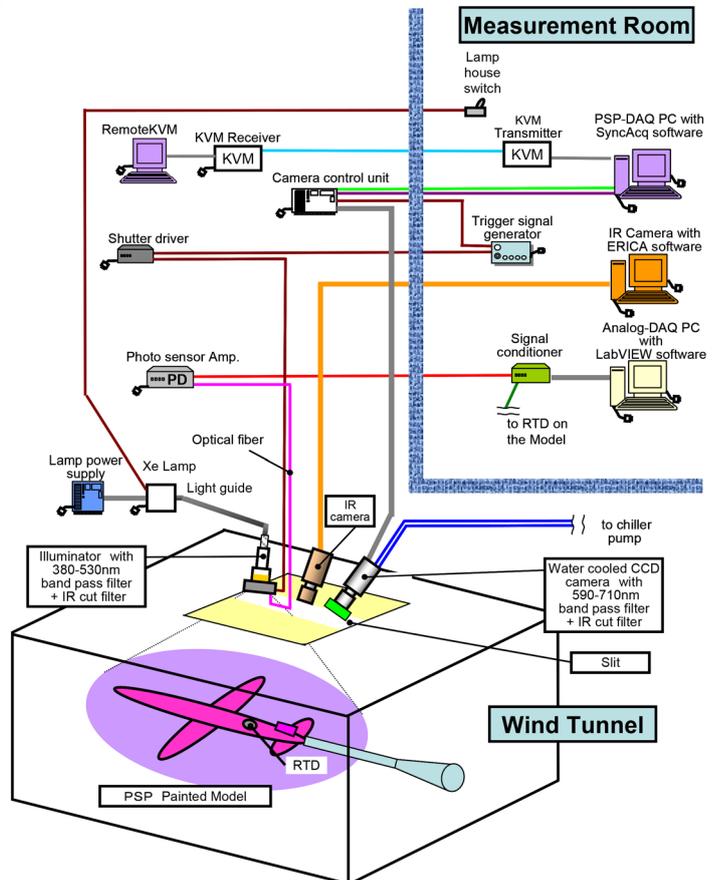


図 5-7 LWT2 における PSP/IR 計測システム

面から計測するように取り付けた。赤外線の透過率は風洞の観測窓ガラス材質に強く依存するため、観測窓ガラスは用いず、風洞天井部に気流に影響を与えない程度にスリットを設けて計測した。また、PSP計測用 CCD カメラと IR カメラを同期させ、PSP 画像と温度画像を同時に計測できるように設定した。

実験は、超音速機 (SST) 模型 (8.5%, 3 次形状) を用い、2m × 2m 低速風洞 (LWT2) で行った。模型の左翼には静圧孔が 3 列 (S1 (y/b=30%), S2 (y/b=50%), S3 (y/b=70%)) 設けられている。模型には IR カメラで認識できるようにアルミ箔のマーカを取り付けた。また、温度モニター用に测温抵抗体を模型に設置した。

本システムでは IR カメラによって得られた温度分布を用いて PSP の温度補正を行う。PSP 画像から圧力画像への変換は、静圧孔を参照する In-situ 法を用いた。PSP の温度感度特性 (発光強度と温度の関係) を予め計測しておき、計測した温度分布から PSP の発光強度補正を行う。なお、通風時と無風時間の模型温度差が小さい方が計測誤差を軽減できるため、無風時画像として通風直後の画像を用いることにした。

IR カメラ併用 PSP システムを用いて計測した圧力画像を図 5-8 に示す。デルタ翼特有の前縁剥離渦により生じる低圧領域が鮮明に可視化されているのがわかる。

次に、静圧孔データと PSP 計測結果の比較を図 5-9 に示す。図中には、PSP の IR 画像による温度補正有りと無しの結果を示してある。温度補正無しは、通風直後の基準画像で処理した結果である。すべてのケースにおいて、温度補正を施すことにより明らかに計測精度が改善されているのがわかる。

計測精度を評価するため、PSP 画像を圧力に変換する際に用いた In-situ 較正曲線 ($U=50\text{m/s}$, $\text{AoA}=16^\circ$) を図 5-10 に示す。温度補正処理を行った結果ではデータのばらつきが軽減され、温度による影響が補正されていることがわかる。温度補正ありの場合で RMS (Root-mean-Square) 値は $C_p=0.07$ 、補正無しの場合で $C_p=0.25$ であった。

5-1-2. 2m × 2m 遷音速風洞への適用例

(A) 標準模型 (ONERA M5) を用いた PSP 計測の結果

JAXA 遷音速風洞 (TWT1) で ONERA M5 模型を使用して行なった技術確認試験の一例を紹介する。本計測では PSP の温度補正を行うため、模型を PSP/TSP に塗分け、流れの対称性を仮定して PSP の温度補正を行った。図 5-11 に塗装された模型を示す。PSP 光学系は風洞天井部と風洞側面のシュリーレン窓付近に設置し、上/左右の 3 方向から模型上の圧力分布を計測した (図 5-12)。水冷却 CCD カメラ (14bit) を使用し、励起光源には Xe 光源を用いた。PSP 画像の PSP 画像への変換は、A-priori/In-situ Hybrid 法を用いて処理した。

図 5-13 に PSP 計測結果を示す³⁾。主翼上面に衝撃波により形成される複雑な圧力パターンが鮮明に可視化されているのがわかる。また、主翼の胴体接合付近では、圧力が低くなっており、強い翼胴流れの干渉が起こっているのがわかる。

静圧孔データとの比較を図 5-14 に示す。PSP データと静圧孔データは一致しており、実用 PSP システムとして機能しているのがわかる。現在の遷音速風洞における PSP システムの計測精度は C_p 換算で約 0.06 (2σ) である。

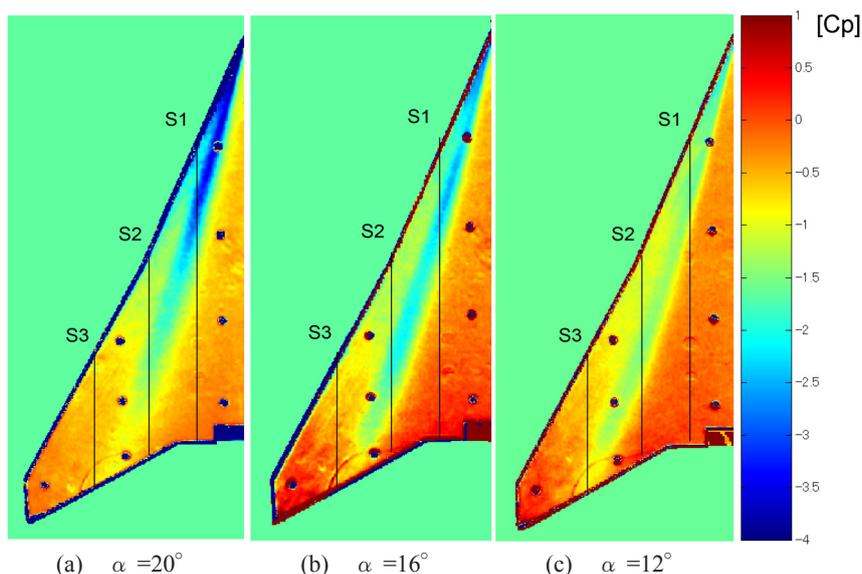


図 5-8 PSP 計測結果 ($U_\infty=50\text{m/s}$)

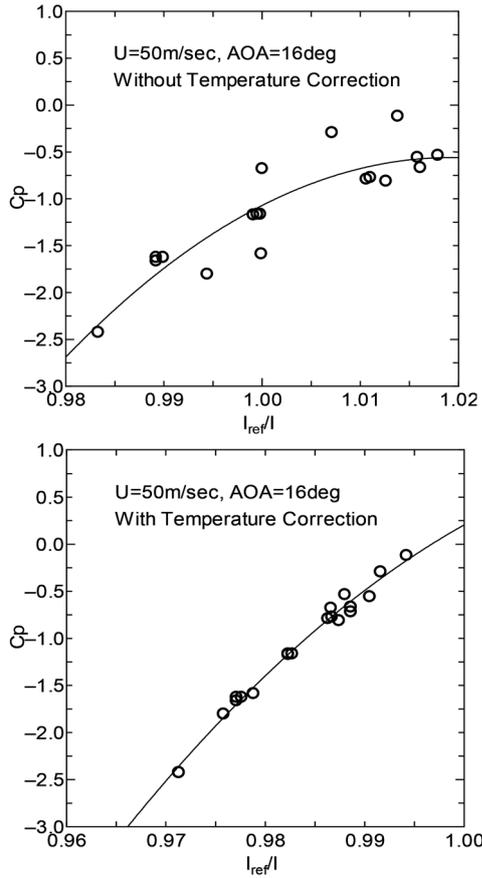


図 5-9 PSP と静圧孔データの比較

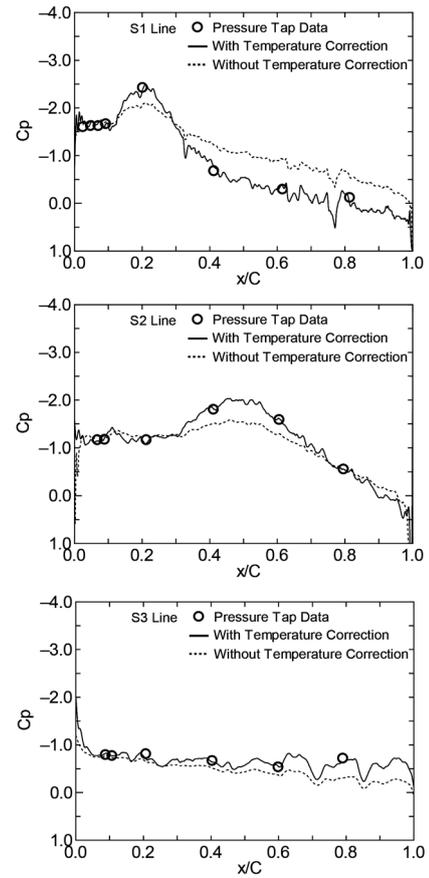


図 5-10 温度補正有り / 無しの精度比較

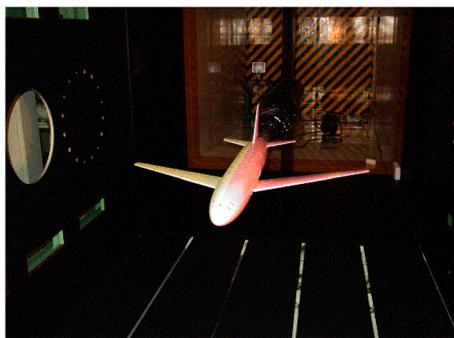


図 5-11 感圧塗料が塗装された ONERA M5 模型

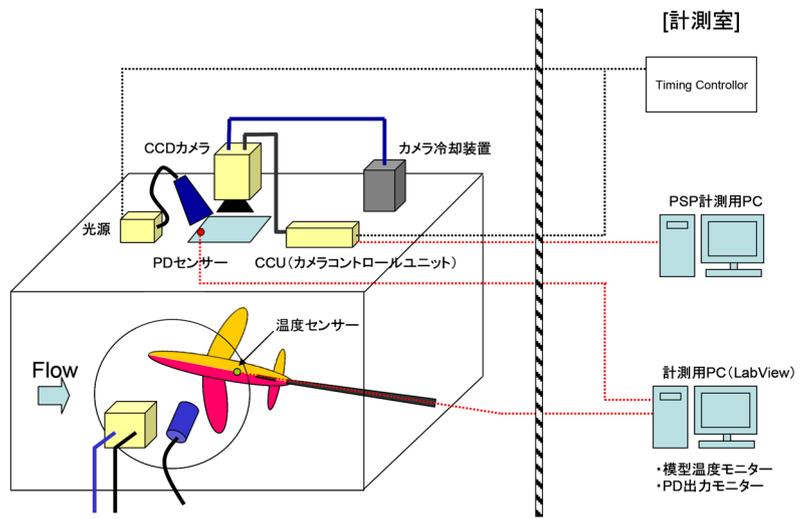


図 5-12 2m × 2m 遷音速風洞の光学系セットアップ

(B) 宇宙往還機模型を用いた PSP 計測の結果

宇宙往還機模型の計測結果を図 5-15 及び図 5-16 に示す。圧力分布と衝撃波のパターンが鮮明に可視化されている。詳しくは文献を参考にさせていただきたい⁶⁴⁾。

5-1-3. 1m × 1m 超音速風洞への適用例

(A) 超音速機模型を用いた PSP 計測の結果

1m × 1m 超音速風洞 (SWT1) は吹出し式風洞であり、マッハ数 1.4~4 の範囲で試験を実施できる。超音速風洞においても、PSP システムの整備が進められており、計測結果の一例を紹介する³⁷⁾。

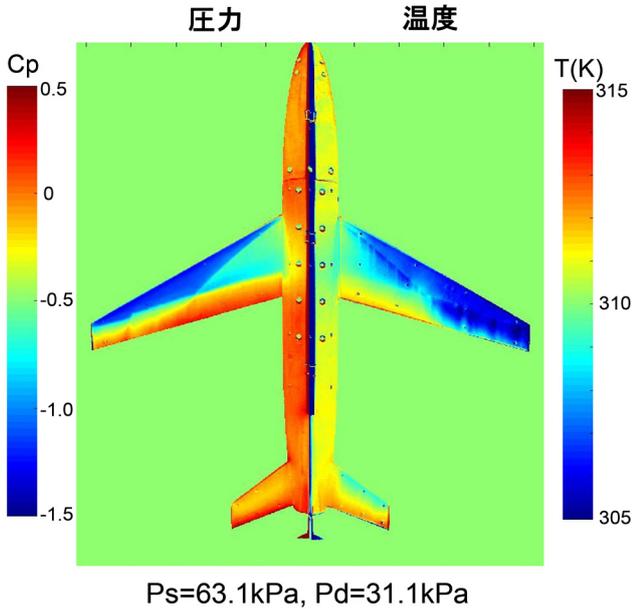


図 5-13 PSP/TSP により計測された圧力 / 温度場 (P0=100kPa, M=0.84, $\alpha = 0\text{deg.}$)

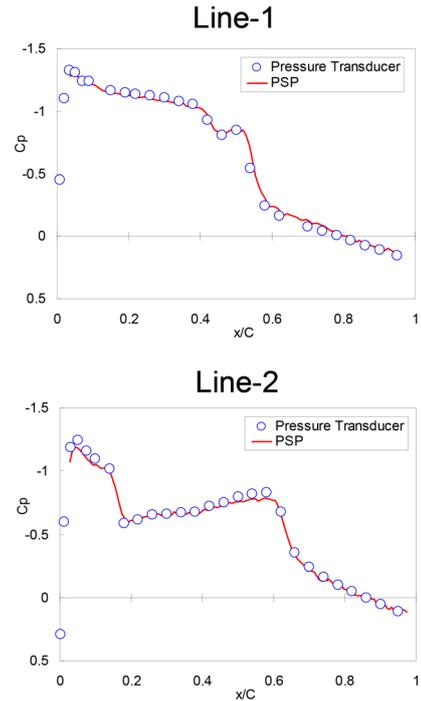


図 5-14 静圧孔データとの比較 (P0=100kPa, M=0.84, $\alpha = 0\text{deg.}$)

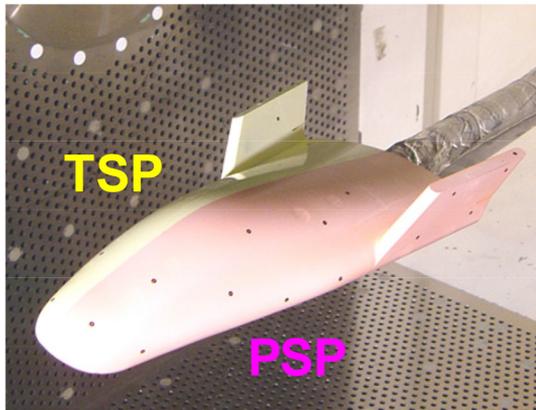


図 5-15 PSP/TSP が塗装された宇宙往還機模型

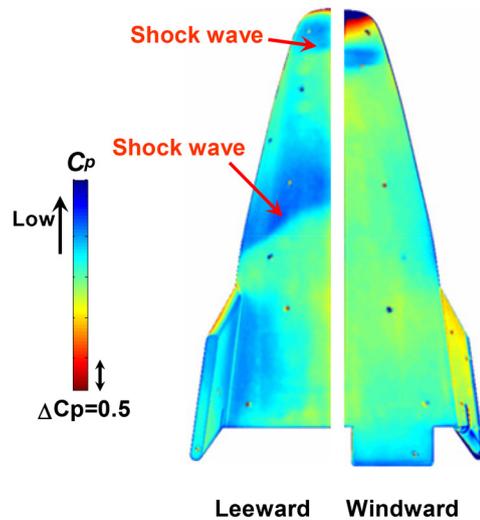


図 5-16 PSP による計測結果

まず、複合 PSP 計測の結果について紹介する。SWT1 は吹出し式の風洞であるため通風時間が約 30 秒と短い。そのため、フィルタホイールを使用した複合 PSP 計測には不向きである。そこで、風洞壁に CCD カメラを 4 台配置し、2 種類の発光を計測するためにそれぞれ風洞上と側面に 2 台ずつ使用して計測を行った (図 5-18, 図 5-19)。光源には 405nm 発光の LED 光源を用いて PSP を励起した。図 5-20 は計測中の画像取得ソフトの画面である。4 台の CCD カメラを使用し、それらは 1 台のマスター PC により制御される。

図 5-21 に複合 PSP 計測の結果を示す。複合 PSP を用いることによって両翼の圧力分布が鮮明に可視化できているのがわかる。両翼を同時に計測することは、PSP/TSP 塗分けによる計測では不可能である。しかしながら、右舷をみると、うっすらと圧力配管を埋めている樹脂のパターンがみられる。これは、樹脂と金属の温度に顕著な差があり、温度の影響を完全に解消できなかったためである。複合 PSP を改良するため、大学と共同研究を進めているところである。

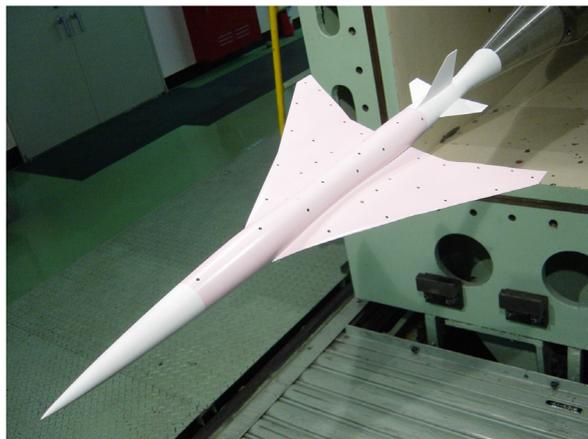


図 5-17 超音速機模型の写真

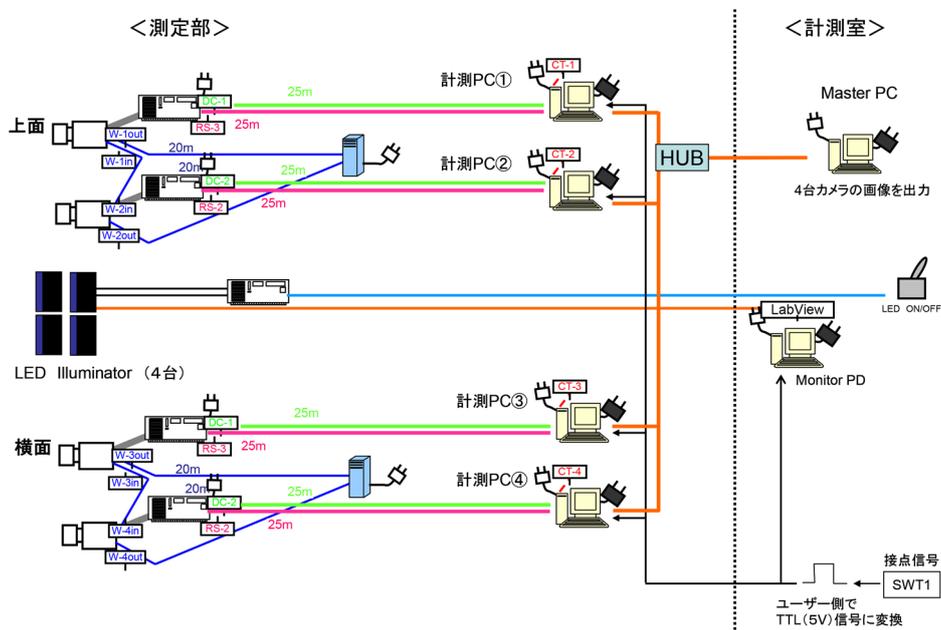


図 5-18 複合塗料計測システム (4 台カメラ同時計測システム)

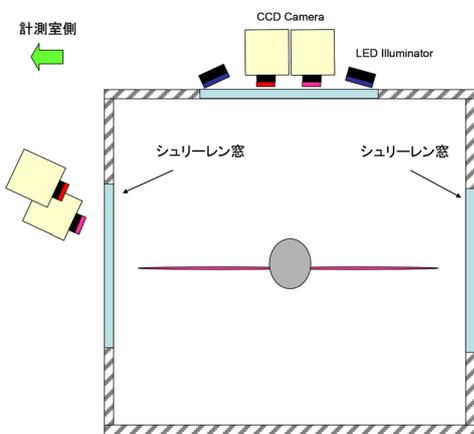


図 5-19 複合塗料計測用システム (カート天井部)

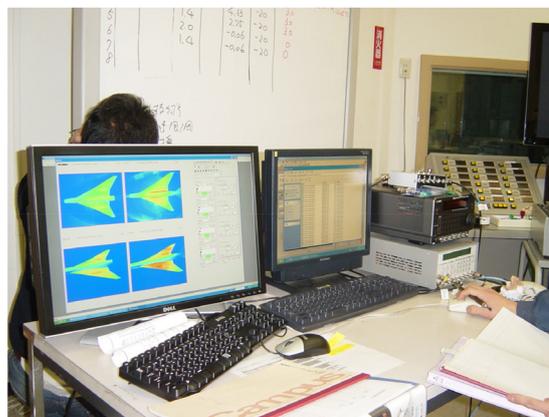


図 5-20 複合塗料計測用システム

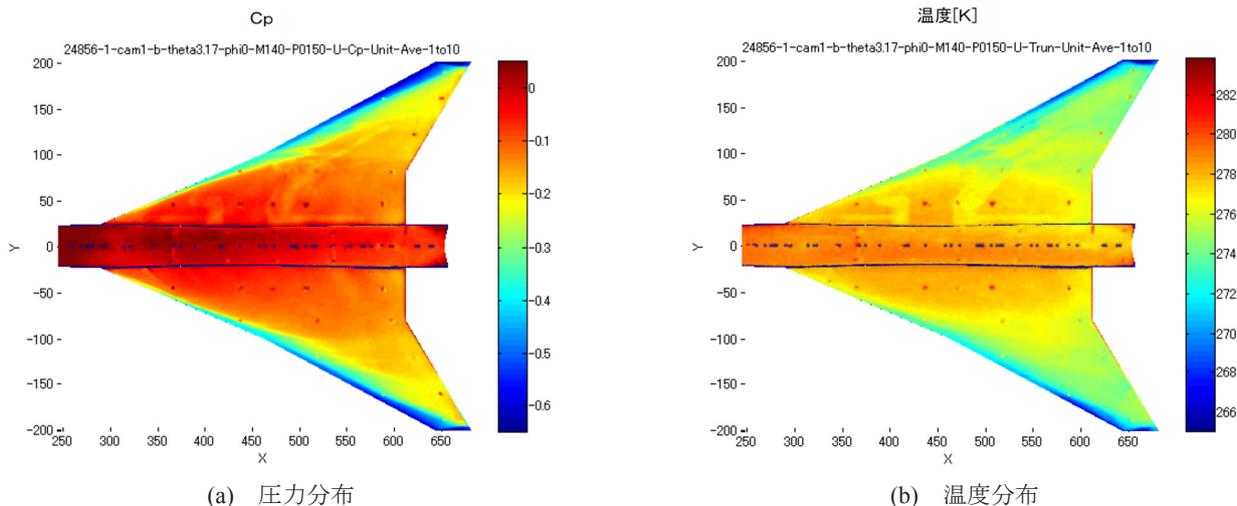


図 5-21 圧力分布と温度分布 (M=1.4, $\theta=3.12\text{deg}$, $\phi=0\text{deg}$)

(B) PSP 計測によるソニックブーム可視化の結果

JAXA では超音速旅客機研究開発の一環として、ソニックブーム低減化の研究を進めている。その研究への協力として、衝撃波により形成される圧力場を PSP を用いて計測した。以下にその概略を示す。

模型から発生した衝撃波により地面（風洞壁面）に形成される圧力場を計測するために、静圧孔レールによる圧力計測と PSP による圧力場計測を行った。図 5-22 に示すように、風洞内に模型がスティングにより支持され、風洞壁面には静圧孔レールと PSP/TSP 塗装板が設置された。カメラおよび励起照明は図 5-23 のように配置され、風洞両壁面のシュリーレン窓から計測を行った。

PSP を用いて計測した結果を図 5-24 に示す。模型から発生した衝撃波により風洞壁面に生じる圧力場を PSP により鮮明に可視化することができた。

5-2. 国産小型旅客機開発への協力

JAXA では三菱重工業と PSP 計測システムの共同研究を行っており、その成果が三菱航空機株式会社による

MRJ (Mitsubishi Regional Jet, 図 5-25, 図 5-26) 開発に活用されている。PSP 計測システムの実用化研究を推進するとともに、機体設計用表面圧力場データの取得 / 提供を行っている。現在まで、TWT1 における遷音速風洞試験と、LWT1 における低速風洞試験の PSP 計測の実績がある。PSP により計測された表面圧力場データは航空機体周りの流体现象の把握や荷重データの算出などに利用されている。以下に、得られた PSP 計測結果の一部を紹介する³⁷⁾。

先ず、TWT1 風洞試験の結果を示す。試験は第 4 カートで実施された。第 4 カートには光学窓が風洞壁の上下面および側面に設置されており、本実験では 4 方向から PSP 計測を行った。模型上下面を同時計測することによって従来の計測よりもデータ生産性を倍増することが可能になった。

図 5-27 に PSP 計測結果の一例を示す。図 5-26 の模型写真が示すように、模型の主翼は PSP と TSP で塗り分けら

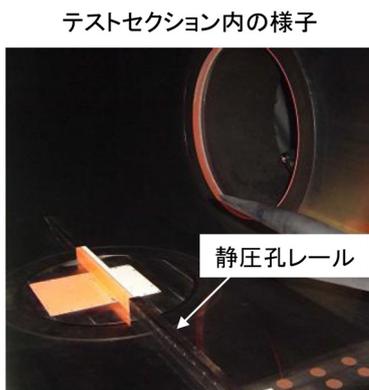


図 5-22 風洞内部の写真

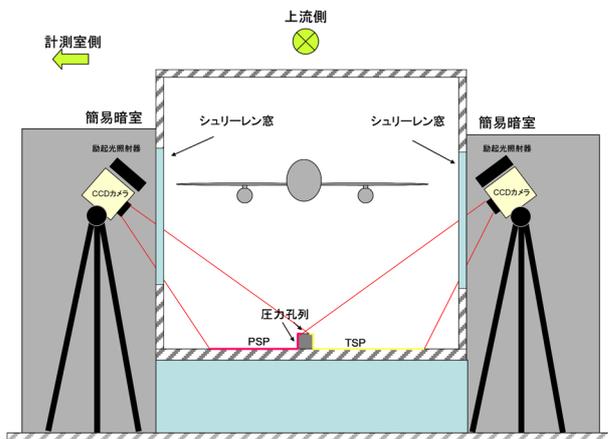


図 5-23 PSP システムの概略図

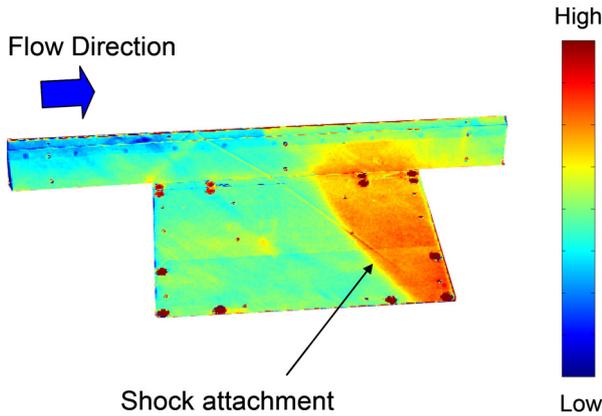


図 5-24 PSP 計測による圧力イメージ

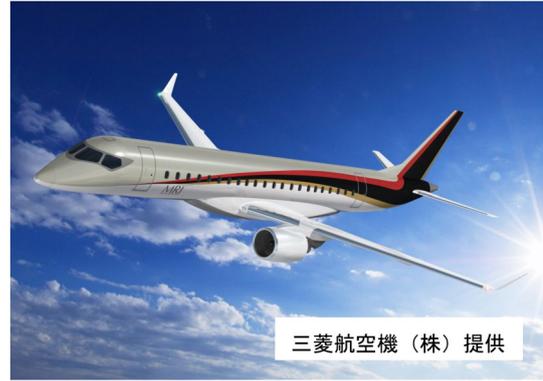


図 5-25 Mitsubishi Regional Jet (MRJ) のイメージ図

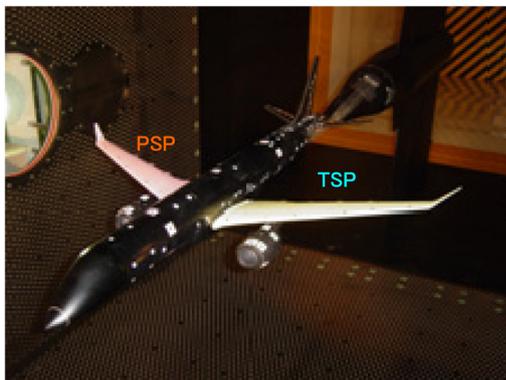


図 5-26 PSP/TSP 塗装された MRJ 模型

れ、左舷の TSP のデータをもとに PSP の温度補正を行った。主翼上面にはスポイラーが取り付けられている。スポイラー前面に形成される高い圧力領域が主翼に及ぼす影響を鮮明に捉えており、また静圧孔データとも良好に一致している。

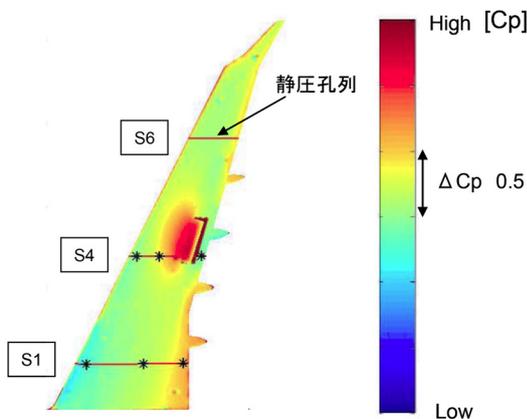
次に、LWT1 で行われた低速試験の結果を示す。本試験の模型は半裁模型 (図 5-28) であるため PSP/TSP 塗り

分けが不可能である。そのため、温度感度の低い PSP を使用して内舷側スラットの表面圧力場を計測した。エンジンナセルに取り付けたチェーンの有り/無しの効果がスラット表面圧力に及ぼす影響を調べた結果を図 5-29 に示す。チェーンによる空力的効果が確認でき、低速においても有効な計測であることが実証された。

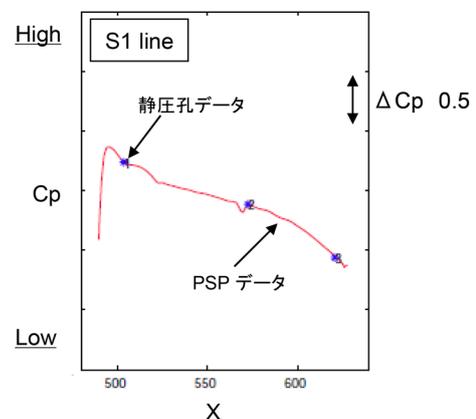
5-3. PSP 技術移転

JAXA では PSP 計測の技術移転を行っており、PSP 計測に係わるノウハウ (PSP 塗装, 光学系の設営, 画像処理の基本など) を提供している。以下に、技術移転の例を紹介する。

鉄道総合技術研究所から委託を受けて実施した試験の例を以下に示す。PSP 計測は鉄道総合技術研究所の米原低速風洞で実施した。PSP が塗装された舟体模型の写真と計測結果を図 5-30 と図 5-31 に示す。図において、気流は左から右に流れている。舟支え付近は舟体との空力干渉のため流れの 3 次元性が強く、舟体両端付近と圧力分布が異なるようすが明瞭に可視化されている。試験の詳細は文献を参考にさせていただきたい^{65), 66)}。



(a) 主翼上面の PSP 計測結果 (褐色の部分は無効データ)



(b) PSP と静圧孔データの比較 (S1 line)

図 5-27 MRJ-PSP 計測結果 ($M=0.78$, $\alpha=0\text{deg}$)



図 5-28 低速試験用 MRJ 半裁模型

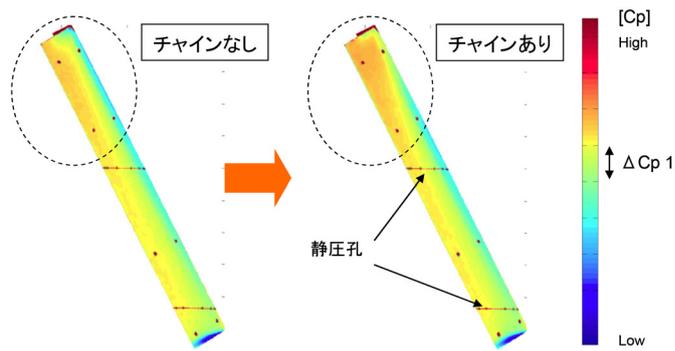
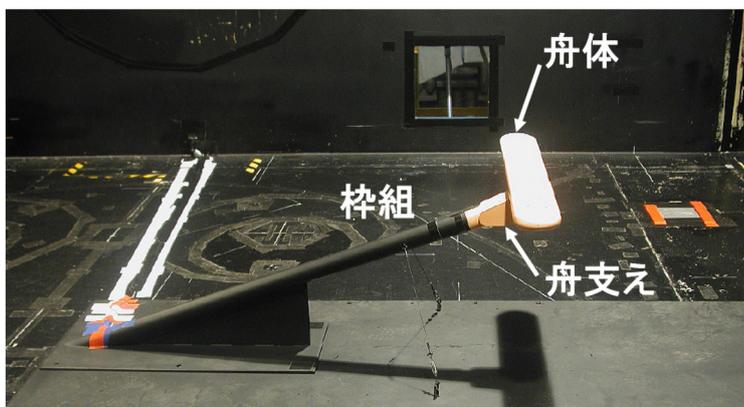
図 5-29 デバイスの効き
($U_{\infty}=50\text{m/s}$, $\alpha =15\text{deg}$, 内舷スラット)

図 5-30 風洞内に設置された模型の写真

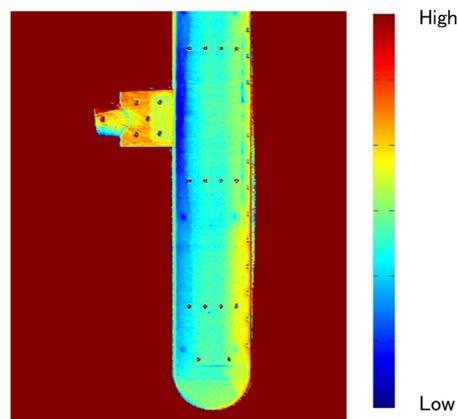


図 5-31 計測された圧力分布の一例 (80m/s)

6. 今後の展開

JAXA/WINTEC では、PSP/TSP 計測技術の大型風洞群への適用に向けて実用化研究を行ってきた。今後も以下のような方針をもって、PSP/TSP 研究開発を推進していきたいと考えている。

- PSP 計測の高精度・高効率化を追求するとともに、大学や企業の研究者と連携して革新的な空力計測技術開発にも注力する。たとえば、せん断力計測など、圧力・温度計測以外の計測にチャレンジする。
- PSP 計測と同時に PIV 計測、変形量計測、シュリーレン計測等が可能な同時計測システムを開発し、流れ場を詳細かつ高精度に診断するとともに、計測時間や準備時間の効率化を図る。
- 実用 PSP 計測システムをさらに改善し、プロジェクトや外部ユーザー試験に貢献する。
- 飛行中の航空機の圧力分布を計測する実機フライト PSP 計測にも挑戦する。

7. 風洞試験実績一覧 (WINTEC における PSP 計測の実績)

【低速試験の実施例】

■ 2m × 2m 低速風洞の実施例

試験名称	低速感圧塗料技術確認試験 #1		
目的	低速 PSP 計測システムの開発		
期間	2003年6月9日 ~ 2003年6月27日		
塗装方法	PSP/TSP 塗分け		
開発項目	低速風洞への PSP システムの構築		
風洞名	2m × 2m 低速風洞		
M_∞/U_∞	$U_\infty=10 \sim 50\text{m/s}$	模型	SST 模型 3 次形状 (圧力模型)
Re [1/m]	~	P_0 [kPa]	大気圧
α [deg]	0 ~ 20deg	T_0 [K]	気温
β [deg]	-	支持系	ロボットアーム
参考文献	低速 PSP 技術確認試験 #1 試験報告書		

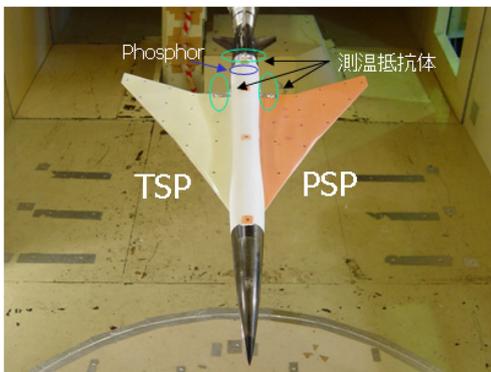


図1 PSP/TSP 塗装した SST 模型

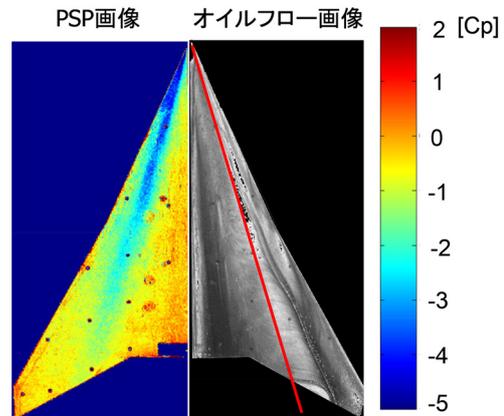


図2 Cp 分布とオイルフローの結果 ($U_\infty=50\text{m/s}$, $\alpha=20\text{deg}$)

試験名称	低速感圧塗料技術確認試験 #2		
目的	低速 PSP 計測の精度向上		
期間	2004年2月5日 ~ 2004年2月27日		
塗装方法	PSP/TSP 塗分け		
開発項目	FFT タイプ CCD カメラ (16bit) の導入, およびインターラインカメラとの性能比較		
風洞名	2m × 2m 低速風洞		
M_∞/U_∞	$U_\infty=15-50\text{m/s}$	模型	SST 模型 3 次形状 (圧力模型)
Re [1/m]	~	P_0 [kPa]	大気圧
α [deg]	5 ~ 20deg	T_0 [K]	気温
β [deg]	-	支持系	ロボットアーム
参考文献	Mitsuo, K., et al., "Application of Pressure-Sensitive Paint to Low-Speed Wind Tunnel Testing at Japan Aerospace Exploration Agency," 24th ICAS 2004-3.2.3, August, Yokohama, Japan, 2004.		

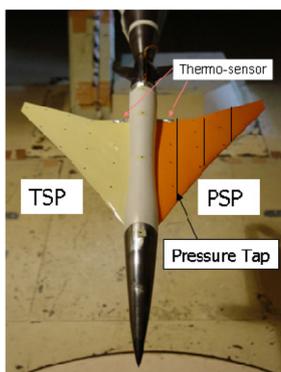


図1 PSP/TSP 塗装した SST 模型

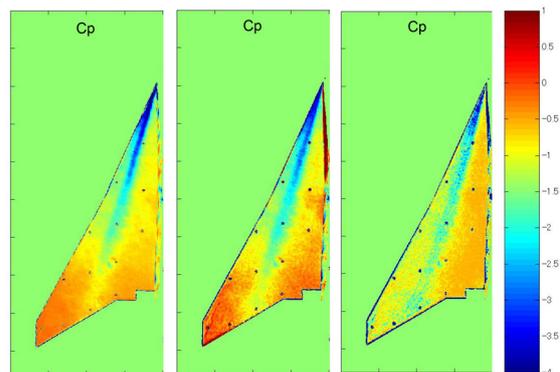


図2 Cp 分布 (左から $U_\infty=50, 30, 20\text{m/s}$, $\alpha=20\text{deg}$)

試験名称	低速感圧塗料技術確認試験 #3		
目的	IR カメラ, および複合塗料を用いた感圧塗料の温度補正技術の実証		
期間	2004年7月12日 ~ 2004年7月30日		
塗装方法	PSP		
開発項目	IR カメラシステムと PSP 計測システムを用いた同時計測システムの構築		
風洞名	2m × 2m 低速風洞		
M_∞/U_∞	$U_\infty=20\text{-}50\text{m/s}$	模型	SST 模型 3 次形状 (圧力模型)
Re [1/m]	~	P_0 [kPa]	-
α [deg]	12 ~ 20deg	T_0 [K]	気温
β [deg]	-	支持系	ロボットアーム
参考文献	JAXA-RR-06-028: 赤外線カメラを利用した感圧塗料温度補正法の研究 - 低速流れへの適用 - : 満尾和徳, 他		

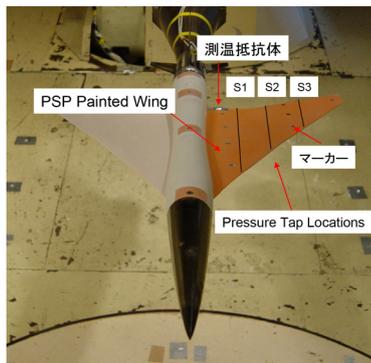
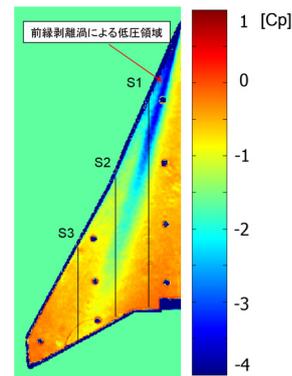


図1 PSPを塗装したSST模型

図2 Cp分布 (50m/s, $\alpha=20\text{deg}$)

試験名称	低速感圧塗料技術確認試験 #4		
目的	低速における複合 PSP 計測の技術実証		
期間	2006年12月4日 ~ 2006年12月13日		
塗装方法	複合 PSP (Pd ポルフィリン + Eu 四核錯体)		
開発項目	複合 PSP の開発 フィルタホイールシステム, 小型 LED 照明システムの構築		
風洞名	2m × 2m 低速風洞		
M_∞/U_∞	$U_\infty=20\text{-}60\text{m/s}$	模型	SST 模型 4 次形状 (圧力模型)
Re [1/m]	~	P_0 [kPa]	-
α [deg]	0 ~ 20deg	T_0 [K]	気温
β [deg]	0 ~ 20deg	支持系	ロボットアーム
参考文献	JAXA-RR-07-0123: 複合 PSP 計測技術の研究開発: 満尾和徳, 他		

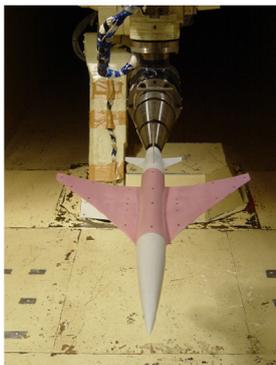
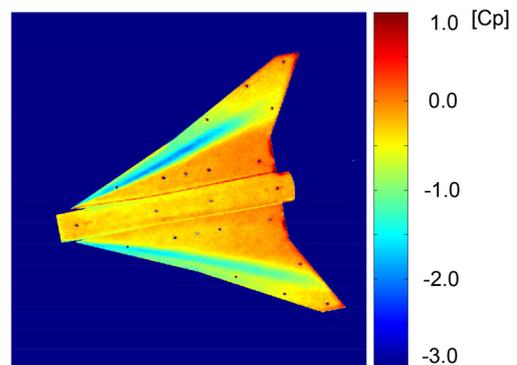


図1 複合PSPを塗装したSST模型

図2 Cp分布 (50m/s, $\alpha=12\text{deg}$, $\beta=10\text{deg}$)

■ 6.5m × 5.5m 低速風洞の実施例

試験名称	高揚力装置標準模型半裁風洞試験		
目的	巨大低速風洞における PSP 計測技術の確立, および APG 国産機チームへの協力		
期間	2005 年 11 月 25 日 ~ 2005 年 12 月 9 日		
塗装方法	PSP/TSP 塗分け		
開発項目	大型風洞における PSP システム (塗装および計測システム) の構築		
風洞名	6.5m × 5.5m 低速風洞		
M_∞/U_∞	$U_\infty=30 \sim 70\text{m/s}$	模型	JAXA 高揚力装置標準模型
Re [1/m]	~	P_0 [kPa]	大気圧
α [deg]	5 ~ 21deg	T_0 [K]	気温
β [deg]	0 deg	支持系	半裁模型
参考文献	Mitsuo, K., et al, "PSP Measurement of a High-Lift-Device Model in JAXA 6.5m × 5.5m Low-Speed Wind Tunnel", AIAA-2007-1065, Reno, Nevada, 2007.		



図1 PSP 塗装された風洞模型

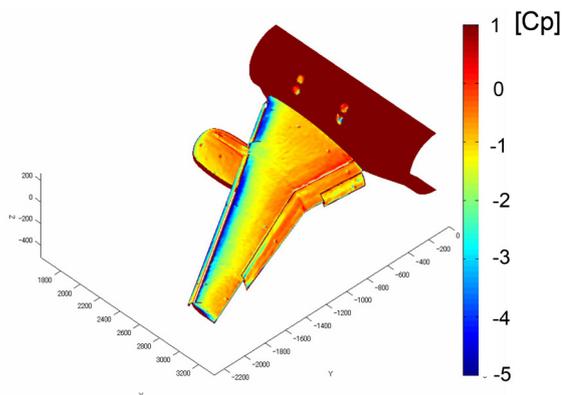


図2 主翼上の圧力分布 ($U_\infty=60\text{m/s}$, $\alpha=15\text{deg}$)

試験名称	MRJ 低速 PSP 計測試験		
目的	実用 PSP 計測システム研究開発		
期間	-		
塗装方法	低温度感度 PSP 塗装		
開発項目	低速 PSP 計測システムの構築		
風洞名	6.5m × 5.5m 低速風洞		
M_∞/U_∞		模型	MRJ 模型
Re [1/m]		P_0 [kPa]	-
α [deg]		T_0 [K]	-
β [deg]		支持系	半裁模型
参考文献	満尾和徳, 他: JAXA における実用 PSP 計測システムの研究開発, 第 46 回飛行機シンポジウム, 2008 年 10 月.		



図1 MRJ 低速風洞模型 @LWT1

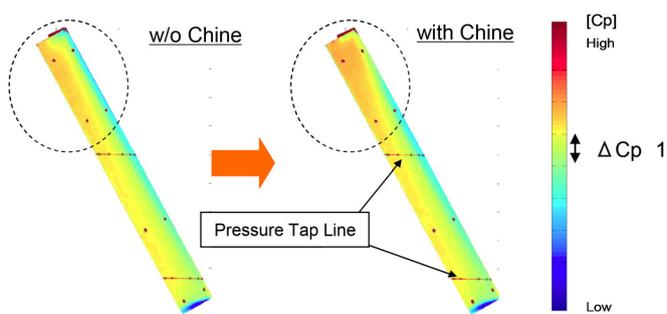


図2 Cp 分布 (空力デバイス: チャインの効果)

試験名称	ONERA 標準模型低速風洞 PSP/PIV 試験		
目的	温度感度を低減した PSP の技術実証および機体全周計測システムの構築		
期間	2007 年 11 月 7 日 ~ 2007 年 11 月 20 日		
塗装方法	PSP 塗装		
開発項目	温度感度を低減した PSP (奈良女子大学と共同開発) の開発 機体全周計測 (4 方向計測) のための PSP 光学系構築		
風洞名	6.5m × 5.5m 低速風洞		
M_∞/U_∞	$U_\infty=20 \sim 50\text{m/s}$	模型	ONERA MX 模型
Re [1/m]	~	P_0 [kPa]	大気圧
α [deg]	0 ~ 12deg	T_0 [K]	気温
β [deg]	-8deg	支持系	ストラット
参考文献	ONERA 標準模型低速風洞 PSP/PIV 試験 PSP 試験報告書		



図1 ONERA 模型の写真

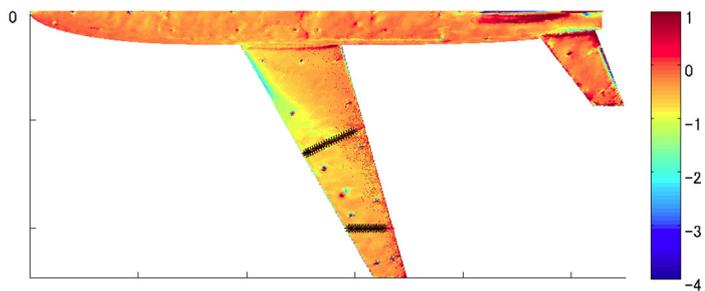


図2 Cp 分布 ($U_\infty = 50\text{m/s}$, $\alpha = 8\text{deg}$)

【遷音速試験の実施例】

試験名称	民間機空力設計 要素技術開発試験 (その1)		
目的	実用 PSP 計測システム研究開発		
期間 / 風洞	-/ 2m × 2m 遷音速風洞		
塗装方法	PSP/TSP 塗分け		
開発項目	-		
M_∞	-	模型	民間機形状模型
Re	-	P_0 [kPa]	-
α [deg]	-	T_0 [K]	-
β [deg]	-	支持系	ステーニング
参考文献	Kazuyuki Nakakita, Mitsuru Kurita, Kazunori Mitsuo and Shigeya Watanabe, "Practical pressure-sensitive paint measurement system for industrial wind tunnels at JAXA," Meas. Sci. Technol. 17 No 2 (February 2006), pp.359-366.		

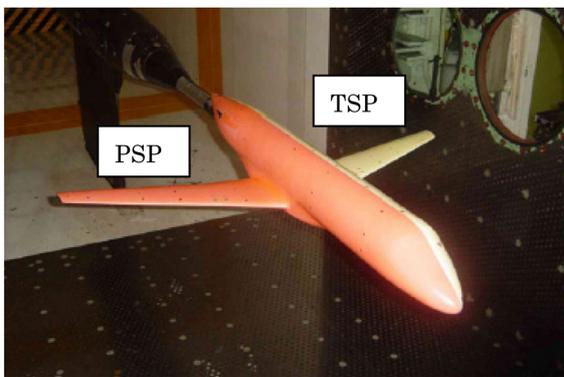


図1 民間機形状模型の写真

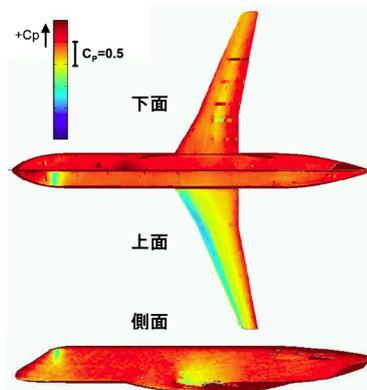


図2 巡航条件における PSP 試験結果

試験名称	TWT1 感圧塗料技術確認試験		
目的	技術的ノウハウの獲得および試験データ精度の確認		
期間 / 風洞	2003年9月 - 日 ~ 2003年9月 - 日 / 2m×2m 遷音速風洞 (PSP計測は, 9月1日と9月2日)		
塗装方法	PSP/TSP 塗分け		
開発項目	-		
M_∞	0.60 ~ 0.92	模型	ONERA M5 標準模型
Re	約 $0.3 \times 10^6 \sim 1.8 \times 10^6$	P_0 [kPa]	50~100
α [deg]	-1 ~ 3	T_0 [K]	約 290 ~ 330
β [deg]	0	支持系	スティング
参考文献	中北和之, 満尾和徳, 栗田充, 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」 ANSS2004.		



図1 ONERA M5 模型の写真

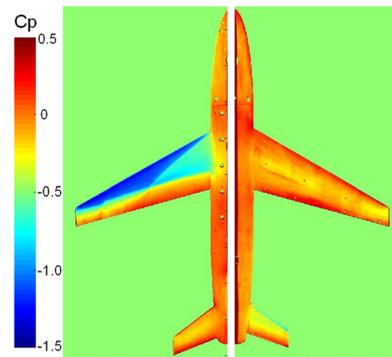


図2 圧力分布 ($M_\infty = 0.84, \alpha = 0 \text{ deg}, \beta = 0 \text{ deg}$)

試験名称	リフティングボディ実験機形状改善 遷音速 PSP 計測風洞試験		
目的	遷音速領域におけるリフティングボディ型再突入実験機まわりの流れ場解析		
期間	2004年11月24日 ~ 2004年11月26日 / 2m×2m 遷音速風洞		
塗装方法	PSP/TSP 塗分け		
開発項目	3次元データ処理手法の開発.		
M_∞	0.5 ~ 1.4	模型	リフティングボディ型再突入実験機模型
Re	約 $2.2 \times 10^6 \sim 3.2 \times 10^6$	P_0 [kPa]	60
α [deg]	-5 ~ 15	T_0 [K]	約 290 ~ 320
β [deg]	0, 5	支持系	スティング
参考文献	M. Kurita, K. Nakakita, K. Mitsuo, Y. Yamamoto, S. Watanabe, K. Fujii, and H. Kawato, Aerodynamic Characteristics of a Lifting-Body-Type Reentry Vehicle at Transonic Speeds, AIAA Paper, AIAA-2006-665, 2006.		

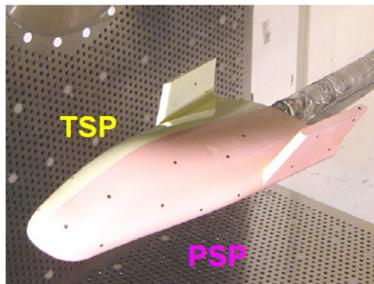


図1 リフティングボディ型再突入実験機模型の写真

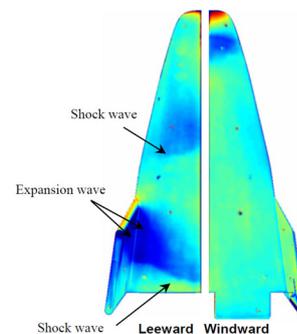


図2 圧力分布 ($M_\infty = 0.9, \alpha = 0 \text{ deg}, \beta = 0 \text{ deg}$)

試験名称	民間機空力設計 要素技術開発試験 (その2)		
目的	実用 PSP 計測システム研究開発		
期間 / 風洞	- / 2m × 2m 遷音速風洞		
塗装方法	PSP/TSP 塗分け		
開発項目	Self illumination 補正による計測精度向上. 3次元データ処理手法の改良. 複数台カメラ計測システム及びデータ処理手法の開発.		
M_∞	-	模型	民間機形状模型
Re	-	P_0 [kPa]	-
α [deg]	-	T_0 [K]	-
β [deg]	-	支持系	ステーイング
参考文献	栗田 充, 満尾和徳, 口石 茂, 中北和之, 渡辺重哉, 藤井啓介.: JAXA 実用風洞における PSP 計測データ処理技術の開発. 第34回可視化情報シンポジウム講演論文集 pp.211-214		



図1 民間機形状模型の写真

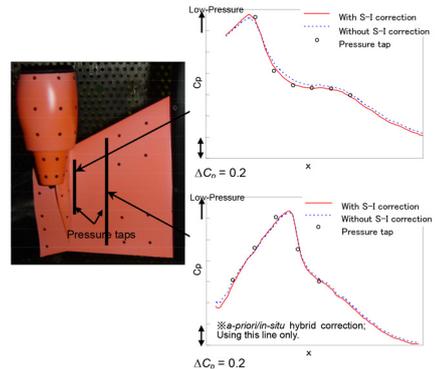


図2 民間機形状模型の圧力分布

試験名称	MRJ PSP 計測試験 (その1)		
目的	実用 PSP 計測システム研究開発		
期間 / 風洞	- / 2m × 2m 遷音速風洞		
塗装方法	PSP/TSP 塗分け		
開発項目	マーカー検出の能力の向上. 大量データ処理能力の向上.		
M_∞	-	模型	MRJ 模型
Re	-	P_0 [kPa]	-
α [deg]	-	T_0 [K]	-
β [deg]	-	支持系	ステーイング
参考文献	栗田 充, 満尾和徳, 口石 茂, 中北和之, 渡辺重哉, 藤井啓介.: 感圧塗料計測技術の実用性向上による開発風洞試験への適用, 第44回飛行機シンポジウム.		

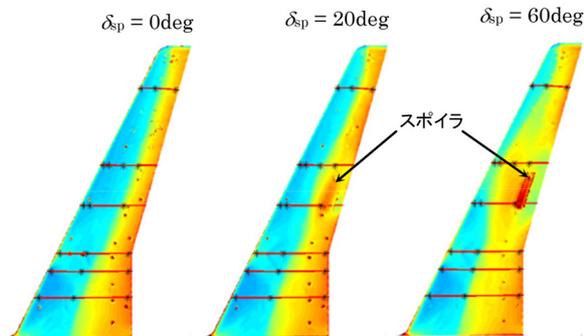


図1 スポイラ展開による主翼上面圧力分布への広範囲な影響

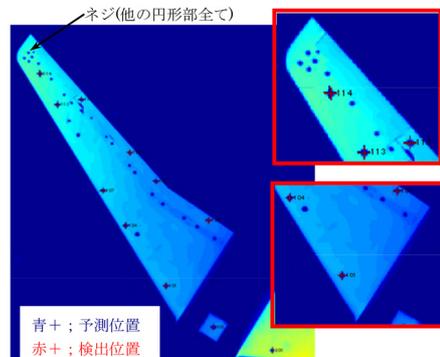


図2 ターゲットマーカーの予測位置と検出位置

試験名称	複合感圧塗料技術確認風試		
目的	遷音速における複合 PSP 計測の技術実証		
期間	2008年 2月 12日 ~ 2008年 2月 22日		
ペイント	複合 PSP 感圧色素: PdTFPP, 感温色素: Eu 四核錯体, ポリマー: HFIPM, 溶媒: 酢酸エチル		
開発項目	<ul style="list-style-type: none"> 複合 PSP (Pd ポルフィリン+ Eu 四核錯体), およびフィルタホイールを用いた光学システムの開発 4 枚画像の統合および複合 PSP 処理の検証 		
風洞名	2m × 2m 遷音速風洞		
M_∞	$M_\infty = 0.50 \sim 0.84$	模型	DLR-F6 模型
Re [1/m]	~	P_0 [kPa]	80kPa
α [deg]	-2.9 ~ 2.7deg	T_0 [K]	~
β [deg]	0deg	支持系	スティング
ケース数	54 ケース		
圧力変換方法	Apriori-Hybrid-In-situ 法		
計測精度	0.05 (in Cp)		
実験結果	<p>(1) 複合 PSP, 光学系, 処理プログラムを含む複合 PSP 計測システムを開発するとともに, JAXA-2mx2m (TWT1) に適用してその有効性を確認した.</p> <p>(2) F6 模型全周の 3 次元圧力・温度分布を計測し, 流れ場を詳細に可視化することができた.</p>		
参考文献	Mitsuo, K. et al, "Temperature Correction of PSP Measurement Using Bi-luminophore Dyes", the 26th AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference, AIAA 2008-3945, Seattle, 2008.		



図1 DLR-F6 模型の写真

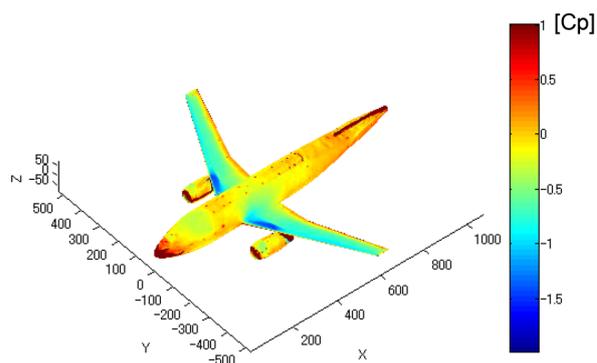


図2 F6 模型の圧力分布 ($M=0.75, \alpha = 1\text{deg}, \beta = 0\text{deg}$)

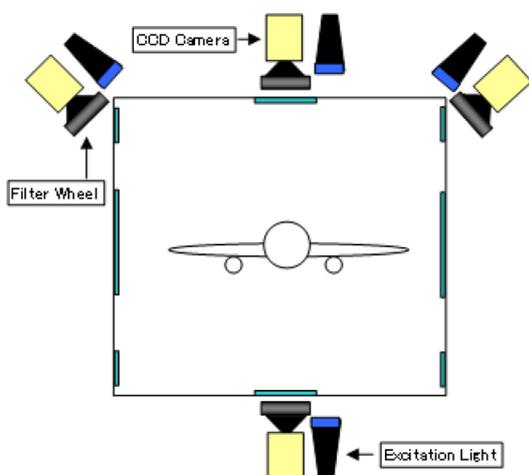


図3 PSP 光学システムの図



図4 JAXA-TWT1 の測定室内部

試験名称	MRJ PSP 計測試験 (その2)		
目的	実用 PSP 計測システム研究開発		
期間	-		
塗装方法	PSP/TSP 塗分け		
開発項目	少人数 PSP 計測体制の確立 PSP 処理システムの改良：2 次の幾何変換による位置合わせ精度向上		
風洞名	2m × 2m 遷音速風洞		
M_∞/U_∞		模型	MRJ 模型
Re [1/m]		P_0 [kPa]	-
α [deg]		T_0 [K]	-
β [deg]		支持系	スティング
参考文献	満尾, 他「JAXA における実用 PSP 計測システムの研究開発」, 第 46 回飛行機シンポジウム, 2008 年 10 月.		

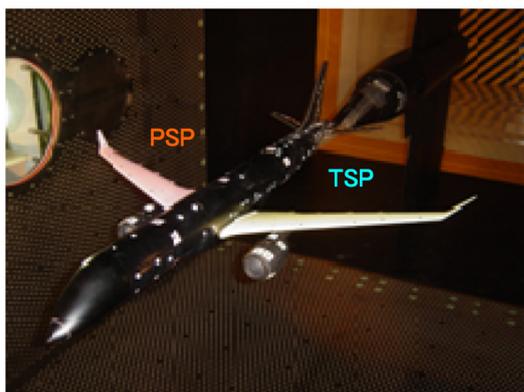


図 1 PSP/TSP 塗装された MRJ 模型

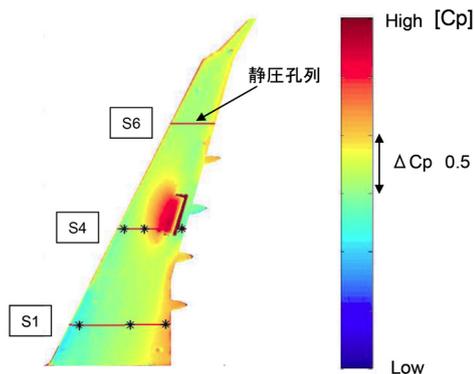


図 2 主翼上面の PSP 計測結果 (褐色の部分は無効データ)

試験名称	MRJ PSP 計測試験 (その3)		
目的	実用 PSP 計測システム研究開発		
期間	-		
塗装方法	PSP/TSP 塗分け		
開発項目	-		
風洞名	2m × 2m 遷音速風洞		
M_∞/U_∞		模型	MRJ 模型
Re [1/m]		P_0 [kPa]	-
α [deg]		T_0 [K]	-
β [deg]		支持系	スティング
参考文献	なし		

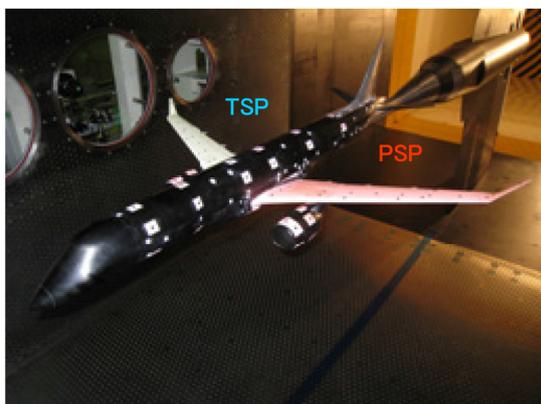


図 1 PSP/TSP 塗装された MRJ 模型

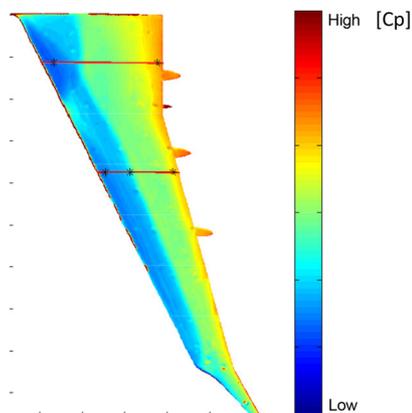


図 2 主翼上面の PSP 計測結果 (赤線は静圧孔ラインを示す.)

【超音速試験の実施例】

試験名称	1m × 1m 超音速風洞における SST 模型感圧塗料試験		
目的	大型実用風洞での感圧塗料 (PSP) 計測技術整備		
期間 / 風洞	2002 年 7 月 - 日 ~ 2002 年 8 月 - 日 超音速風洞試験 (PSP 計測は, 7 月 31 日と 8 月 2 日)		
塗装方法	PSP/TSP 塗分け		
開発項目	解析ソフトの開発		
M_∞	1.4, 2.0	模型	ロケット実験機 第 4 次形状単体圧力模型
Re	約 $2.1 \times 10^7 \sim 2.6 \times 10^7$	P_0 [kPa]	150 ~ 220
α [deg]	2.0, 6.0	T_0 [K]	約 330
β [deg]	0	支持系	ステーイング
参考文献	栗田充, 中北和之, 満尾和徳, 神田宏, 浅井圭介, 渡辺重哉, 「NAL 1m×1m 超音速風洞における SST 模型感圧塗料試験」, 第 34 期年会講演会, 航空宇宙技術研究所, 平成 15 年		

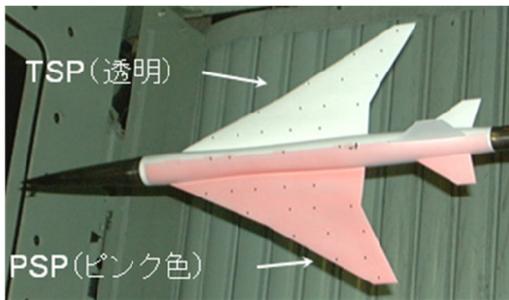


図 1 ロケット実験機第 4 次形状単体圧力模型の写真

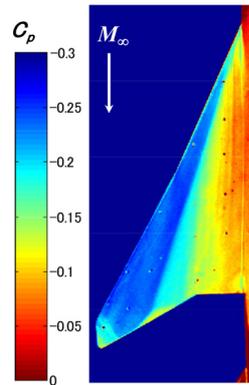


図 2 圧力分布 ($M_\infty = 2.0, \alpha = 6 \text{ deg}, \beta = 0 \text{ deg}$)

試験名称	SSBJ 機及びコンコルドのソニックブーム特性評価風洞試験		
目的	近傍場におけるソニックブームの可視化		
期間	2005 年 2 月 6 日 ~ 2007 年 2 月 15 日		
塗装方法	PSP/TSP 塗分け		
開発項目	圧力レールへの PSP/TSP 塗装による圧力場計測		
風洞名	1m × 1m 超音速風洞		
M_∞ / U_∞	$M_\infty = 1.4 \sim 2.0$	模型	SSBJ 及びコンコルド模型
Re [1/m]	~	P_0 [kPa]	190 ~ 220kPa
α [deg]	0deg (模型)	T_0 [K]	-
β [deg]	0deg (模型)	支持系	-
参考文献	なし		

テストセクション内の様子

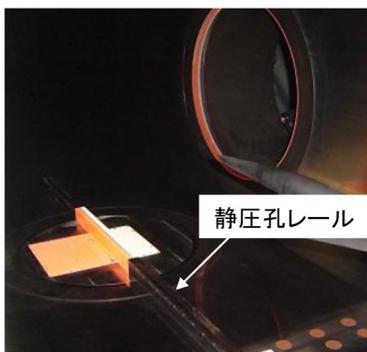


図 1 PSP/TSP 塗装された圧力レール

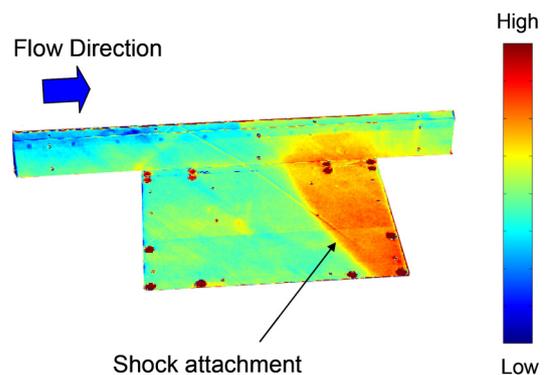
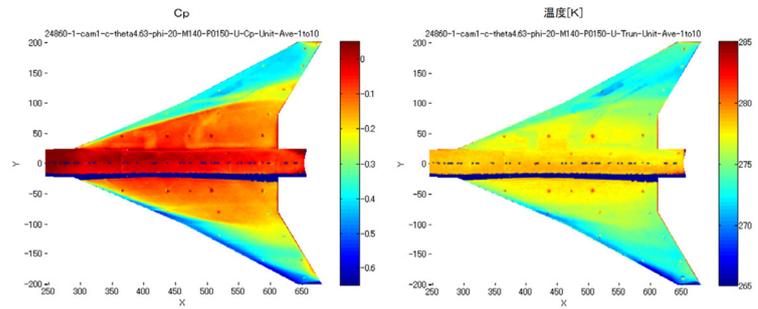


図 2 ソニックブームにより形成される壁面圧力分布

試験名称	複合感圧塗料計測技術確認試験		
目的	超音速における複合 PSP 計測の技術実証		
期間	2007年 2月 5日 ~ 2007年 2月 9日		
塗装方法	複合 PSP		
開発項目	複合 PSP (Pd ポルフィリン+ Eu 四核錯体) の技術実証 マルチカメラ画像計測システムの構築		
風洞名	1m × 1m 超音速風洞		
M_∞/U_∞	$M_\infty=1.4 \sim 2.0$	模型	SST 模型 4 次形状 (圧力模型)
Re [1/m]	~	P_0 [kPa]	190 ~ 220kPa
α [deg]	0 ~ 6deg	T_0 [K]	TBD
β [deg]	0 ~ 1.29deg	支持系	ステーイング
参考文献	満尾和徳, 他: JAXA における実用 PSP 計測システムの研究開発, 第 46 回飛行機シンポジウム, 2008 年 10 月.		



図 1 SST 模型の写真

図 2 圧力分布と温度分布
($M=1.4$, $\alpha=4.83\text{deg}$, $\beta=1.29\text{deg}$)

8. 参考文献

- 1) Kavandi, J., Callis, J., Gouterman, M., Khalil, G., Wright, D., Green, E., Burns, D., and McLachlan, B. Luminescent barometry in wind tunnels. *Rev. Sci. Instrum.*, 1990, 61(11), pp.3340-3347.
- 2) Liu, T. and Sullivan, J. P., "Pressure and Temperature Sensitive Paints", Springer Berlin Heidelberg New York, 2004.
- 3) Bell, J.H, Schairer, E. T., Hand, L. A and Mehta, R. D., "Surface Pressure Measurements Using Luminescent Coatings," *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 33 (2001), pp.155-206.
- 4) 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, 1998, pp.97-103.
- 5) Asai, K., Amao, Y., Iijima, Y., Okura, I., and Nishide, H. Novel pressure-sensitive paint for cryogenic and unsteady wind-tunnel testing. *J. Thermophys. Heat Transf.*, 2002, 16(1), pp.109-115.
- 6) Sakaue, H. and Sullivan, J. P. Time response of anodized aluminum pressure-sensitive paint. *AIAA J.*, 2001, 39(10), 1944-1949.
- 7) Egami, Y., Fey, U., and Engler, R. H., "Appropriate selection of pressure-sensitive paint for cryogenic wind tunnels," 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting, AIAA 2006-1045, Reston, VA, 2006.
- 8) Bell, J.H, Schairer, E. T., Hand, L. A and Mehta, R. D., "Surface Pressure Measurements Using Luminescent Coatings," *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 33, 2001, pp.155-206.
- 9) Liu, T., Campbell, B. T., Burns, S. P. and Sullivan, J. P., "Temperature- and Pressure-Sensitive Luminescent Paints in Aerodynamics", *Appl. Mech. Rev.*, 50-4, 1997, pp.227-246.
- 10) Engler, R. H., Mérienne, M. C., Klein, C. and Sant, Y. Le., "Application of PSP in low speed flows," *Aerospace Science and Technology*, 6, 2002, pp 313-322.
- 11) Engler, R. H., Klein, C. And Trinks, O., "Pressure-Sensitive Paint Systems for Pressure Distribution Measurements in Wind Tunnels and Turbomachines," *Measurement Science and Technology*, Vol. 11, No. 7, 2000, pp. 1077-1085.
- 12) Liu, T. and Sullivan, J. P., "Pressure and Temperature Sensitive Paints", Springer Berlin Heidelberg New York, 2004.
- 13) Sant, Y. Le, Bouvier, F., Merienne, M. C. and Peron, J. L., "Low Speed Tests using PSP at ONERA," 39th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, AIAA 2001-0555, Reno, Nevada, 2001.
- 14) Mebarki, Y. and Cooper, K.R., "Aerodynamic Testing of a Generic Automotive Model with Pressure Sensitive Paint," The 10th International Symposium on Flow Visualization, Kyoto, Japan, ISFV-F0120, 2002.
- 15) Lyonnet, M., Deléglise, B. and Lesant, Y. Application of Pressure Sensitive Paint Technique un the S1MA Wind Tunnel. 40th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, Reno, NV, AIAA 2002-0744, January, 2002.
- 16) Amao, Y., Asai, K., Miyashita, T. and Okura, I., "Photophysical and Photochemical Properties of Optical Oxygen Pressure Sensor of Platinum Porphyrin-Isobutylmethacrylate-Trifluoroethylmethacrylate Copolymer Film," *Polymer Journal*, (1999) ,pp.1267-1269.
- 17) 浅井圭介：圧力測定の最先端－光学的圧力分布測定法について，日本流体力学会誌「ながれ」，1999.
- 18) 新美智秀，吉田昌記，近藤誠，大島佑介，森英男，江上泰広，浅井圭介，西出宏之：PSPの低圧力域における基礎特性に関する研究，日本機械学会論文集（B編），68(676)，2002，pp.3360-3368.
- 19) 手塚宣和，亀田正治，浅井圭介，天尾豊，中北和之：非定常流計測のための吸着型感圧コーティング，日本機械学会論文集（B編），68(669)，2002，pp.1391-1399.
- 20) 浅井圭介：感圧塗料技術の現状と展望，可視化情報学会誌，vol.21 Supp.1, 2001.
- 21) Egami, Y., Iijima, Y., Amao, Y., Asai, K., Fuji, A., Teduka, N. and Kameda M., "Quantitative Visualization of the Leading-edge Vortices on a Delta Wing by Using Pressure-sensitive Paint," *Journal of Visualization*, 2001, pp.139-150.
- 22) Mitsuo, K., Asai, K., Takahashi, A., and H. Mizushima, "Advanced lifetime PSP imaging system for pressure and temperature field measurement", *Meas. Sci. Technol.*, (17), 2006, pp.1282-1291.
- 23) Mitsuo, K., Asai, K., Hayasaka, M. and Kameda, M., "Temperature Correction of PSP Measurement Using Dual-Luminophor Coating," *Journal of Visualization*, 6(2), 2003, pp.213-223.
- 24) 中北和之，山崎喬，浅井圭介：極超音速流れでの感圧塗料による圧力分布計測，日本流体力学会誌「ながれ」，2000.
- 25) 江上泰広，飯島由美，浅井圭介：低温風洞のための感圧塗料の開発，可視化情報学会誌，Vol.21, No.83, 2001.10, pp. 234-239, 2001.
- 26) 栗田充，中北和之，満尾和徳，神田宏，浅井圭介，渡辺重哉：NAL1m × 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，2002年4

- 月 ,pp.176-179.
- 27) 中北和之, 満尾和徳: 実用試験への PSP の適用, 日本航空宇宙学会誌 PSP 特集記事, Vol.54, No.624, 2006 年 1 月号, pp. 9-14.
 - 28) 満尾和徳, 栗田充, 口石茂, 藤井啓介, 渡辺重哉, 伊藤正剛: JAXA 高揚力形態旅客機模型の低速風洞試験 (低速 PSP 計測システムの開発), 第 44 回飛行機シンポジウム, 2006 年 10 月 .
 - 29) Mitsuo, K., Kurita, M., Kuchi-Ishi, S., Fujii, K., Ito, T. and Watanabe, S., “PSP Measurement of a High-Lift-Device Model in JAXA 6.5m × 5.5m Low-Speed Wind Tunnel”, AIAA-2007-1065, Reno, Nevada, 2007.
 - 30) Nakakita, K., Kurita, M., Mitsuo, K. and Watanabe, S: Practical pressure-sensitive paint measurement system for industrial wind tunnels at JAXA, Meas. Sci. Technol. 17 No 2, 2006, pp.359-366.
 - 31) 中北和之, 栗田充, 満尾和徳, 小池陽, 渡辺重哉, 伊藤正剛, 橋本拓郎: JAXA2m × 2m 遷音速風洞における ONERA M5 感圧塗料試験, 第 71 回風洞研究会議 2003 年.
 - 32) 満尾和徳, 栗田充, 中北和之, 藤井啓介, 渡辺重哉, 伊藤正剛: 赤外線カメラを利用した感圧塗料温度補正法の研究 - 低速流れへの適用 -, JAXA-RR-06-028, 2007.
 - 33) 栗田充, 満尾和徳, 中北和之, 渡辺重哉: JAXA 実用風洞への PSP 計測技術の適用, 第 37 回流体力学講演会講演集, 千葉大学工学部, 平成 17 年 9 月, pp.5-8.
 - 34) 中北和之, 栗田充, 満尾和徳, 渡辺重哉, 真保雄一: 国産小型航空機開発への感圧塗料技術の適用, 第 42 回飛行機シンポジウム講演集 1A1, 2004.
 - 35) 満尾和徳, 栗田充, 中北和之, 藤井啓介, 渡辺重哉, 伊藤正剛, 和田雄二: 複合 PSP 計測技術の研究開発, JAXA-RR-07-0123, 2008 年 2 月 .
 - 36) 満尾和徳, 日本機械学会, No.07-56 講習会, 「実験流体力学 -JAXA の流れ・燃焼の光学的計測」
 - 37) 満尾和徳, 栗田充, 中北和之, 渡辺重哉, 伊藤正剛, 山内智史, 山谷英樹: JAXA における実用 PSP 計測システムの研究開発, 46 回飛行機シンポジウム, 2008 年 10 月 .
 - 38) Sellers, M. E., “Application of pressure sensitive paint for determining aerodynamic loads on a scale model of the F-16C,” AIAA-2000-2528, AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference, 21st, Denver, CO, June 19-22, 2000.
 - 39) Bell, J.H., “Transonic/Supersonic Wind Tunnel Testing of the NASA Orion Command Module,” AIAA-2007-1006, 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, Jan. 8-11, 2007.
 - 40) Bell, J.H., “Applications of Pressure-Sensitive Paint to Testing at Very Low Flow Speeds,” AIAA-2004-878, 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, Jan. 5-8, 2004.
 - 41) Ruyten, W. and Sellers, M., “Lifetime Analysis of the Pressure-Sensitive Paint PtTFPP in FIB,” AIAA-2004-881, 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, Jan. 5-8, 2004.
 - 42) Gouterman, M., “Oxygen Quenching of Luminescence of Pressure-Sensitive Paint for Wind Tunnel Research,” Journal of Chemical Education, Vol. 74, No. 6, 1997, pp. 1-7.
 - 43) Klein, C., Sachs, W., Henne, U., Engler, R., Wiedemann, A. and Konrath, R., “Development of PSP Technique for Application on the VFE-2 65 ° Delta Wing Configuration,” AIAA-2006-59, 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, Jan. 9-12, 2006.
 - 44) Merienne, M. C., Sant, Y. Le., “Reliable PSP Application and Data Processing at Low Speed Flow Conditions,” AIAA-2006-3632, 25th AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference, San Francisco, California, June 5-8, 2006.
 - 45) Sant, Y. Le., Ensmä, A. D., and Merienne, M. C., “Image Processing Tools Used for PSP and Model Deformation Measurements,” AIAA-2005-5007, 35th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit, Toronto, Ontario, June 6-9, 2005.
 - 46) Fonov, S., Mosharov, V., Radchenko, V., Engler, R. H., Klein, Chr. “Application of the PSP investigation of the oscillating pressure fields,” AIAA-1998-2503, 20th Advanced Measurement and Ground Testing Technology Conference, Albuquerque, NM, June 15-18, 1998.
 - 47) 満尾和徳, 萬関一広, 片桐真也, 長谷川靖哉, 和田雄二: 感温センサ及び感温塗料, 特願 2005-259417 号.
 - 48) Katagiri, S., Hasegawa, Y., Wada, Y., Mitsuo, K. and Yanagida, S., “Temperature-dependent energy transfer in photo-sensitized luminescence of rare earth complexes,” Journal of Alloys and Compounds, 408-412 (2006) , pp.809-812.
 - 49) 満尾和徳, 小幡誠, 矢野重信: 温度感度を低減した感圧塗料および感圧センサ, 特願 2008-187174 号.
 - 50) Lakowicz J. R., Principles of Fluorescence Spectroscopy, (Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, 1999.
 - 51) Bell, J.H, Schairer, E. T., Hand, L. A and Mehta, R. D., “Surface Pressure Measurements Using Luminescent

- Coatings,” *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 33, 2001, pp.155-206.
- 52) Liu, T., Campbell, B. T., Burns, S. P. and Sullivan, J. P., “Temperature- and Pressure-Sensitive Luminescent Paints in Aerodynamics”, *Appl. Mech. Rev.*, 50-4, 1997, pp.227-246.
- 53) 可視化情報学会講習会：感圧塗料を用いた圧力計測技術，2002年7月18日。
- 54) 満尾和徳，小幡誠，矢野重信：温度感度を低減した感圧塗料および感圧センサ，特願 2008-187174 号。
- 55) Kameda, M., Teduka, N., Hangai, T., Asai, K., Nakakita, K., and Amao, Y., “Adsorptive pressure-sensitive coatings on porous anodized aluminium,” *Meas. Sci. Technol.*, 2004, 15(3), pp.489-500.
- 56) 満尾和徳：3層構造の感圧塗料薄膜センサー，特願：2007-266036号。
- 57) Bell, J.H, and Mclachlan, B. G., “Image registration for luminescent paint applications,” *AIAA-1993-178*.
- 58) 中北和之，栗田充，満尾和徳：A-priori/In-situ Hybrid 感圧塗料データ処理手法，特願 2004-249302。
- 59) Kurita, K., Nakakita, K., Mitsuo, K. and Shigeya Watanabe,” Temperature Correction of Pressure-Sensitive Paint for Industrial Wind Tunnel Testing,” *Journal of Aircraft*, Vol. 43, No. 5, September–October 2006, pp. 1499-1505.
- 60) 千葉則茂，土井章男：3次元CGの基礎と応用「改訂版」，サイエンス社，2004。
- 61) Ruyten, W., “Self-Illumination Calibration Technique for Luminescent Paint Measurements,” *Rev. Sci. Instr.*, 68, 1997, pp.3452-3457.
- 62) 杉浦裕樹，飯島由美，浅井圭介：航空機風洞試験における感圧塗料の反射補正 .NAL TR-1441,2002.
- 63) 口石茂，栗田充，満尾和徳，藤井啓介：感圧塗料計測法 Self-Illumination 補正プログラムの開発，JAXA-RR-08-002。
- 64) Kurita, M., Nakakita, K., Mitsuo, K., Kawato, H. Yamamoto, Y., Watanabe, S. and Fujii, K., “Aerodynamic Characteristics of a Lifting-Body-Type Reentry Vehicle at Transonic Speed,” 44th AIAA Aerospace Science Meeting and Exhibit, AIAA 2006-665, 9-12 January 2006, Reno, Nevada.
- 65) 高岩利充，池田充，鈴木昌弘，中出孝次，中北和之，満尾和徳：感圧塗料を用いたパンタグラフ舟体の表面圧力分布測定，第11回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2004)，2004年12月。
- 66) 池田充，小山達弥，鈴木昌弘，高岩利充，満尾和徳，中北和之「感圧塗料を用いたパンタグラフの舟体・枠組間における空力干渉の影響評価」，第33回可視化情報シンポジウム，2005年7月。
- 67) 中北和之，満尾和徳，伊藤正剛，児玉直人，明本禧洙：自動車エンジン吸気ポート開発へ感圧塗料の適用，第40回流体力学講演会/航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム，2008年6月。

9. 研究発表一覧 (2003年4月～2009年3月)

■査読論文・レポート

- (1) Obata, M., Tanaka, Y., Araki, N., Hirohara, S., Yano, S., Mitsuo, K., Asai, K., Harada, M., Kakuchi, T. and Ohtsuki, C., "Synthesis of Poly(isobutylmethacrylate-co-2,2,2-trifluoroethyl methacrylate) having Tetraphenylporphyrin Platinum(II) Moiety as an Oxygen-Sensing Dye for Pressure Sensitive Paint (PSP)", *J. Polym. Sci. Part A Chemistry*, 2005, 43(14), pp. 2997-3006.
- (2) Katagiri, S., Hasegawa, Y., Wada, Y., Mitsuo, K. and Yanagida, S., "Temperature-dependent energy transfer in photo-sensitized luminescence of rare earth complexes," *Journal of Alloys and Compounds*, 408-412, 2006, pp.809-812.
- (3) Nakakita, K., Kurita, M., Mitsuo, K. and Watanabe, S., "Practical pressure-sensitive paint measurement system for industrial wind tunnels at JAXA," *Meas. Sci. Technol.* 17 No 2, 2006, pp.359-366.
- (4) Kurita, M., Nakakita, K., Mitsuo, K. and Watanabe, S., "Temperature Correction of Pressure-Sensitive Paint for Industrial Wind Tunnel Testing," *JOURNAL OF AIRCRAFT*, Vol. 43, No. 5, September-October, 2006, pp. 1499-1505.
- (5) Obata, M., Morita, M., Nakase, K., Mitsuo, K., Asai, K., Hirohara, S., Yano, S., "Synthesis and photophysical properties of Rhodamine B dye-bearing poly(isobutyl methacrylate-co-2,2,2-trifluoroethyl methacrylate) as a temperature-sensing polymer film", *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, 2007, 45(14), pp.2876-2885.
- (6) Katagiri, S., Manseki, K., Tsukahara, Y., Mitsuo, K., Wada, Y., "Luminescent Polymer Film Containing Tetranuclear Eu(III) Complex as Temperature-Sensing Device," *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 453, No. 1-2, April, 2008.
- (7) 満尾和徳, 栗田充, 中北和之, 藤井啓介, 渡辺重哉, 伊藤正剛: 赤外線カメラを利用した感圧塗料温度補正法の研究 - 低速流れへの適用 -, JAXA-RR-06-028, 2007年.
- (8) 満尾和徳, 栗田充, 中北和之, 藤井啓介, 渡辺重哉, 伊藤正剛, 和田雄二: 複合 PSP 計測技術の研究開発, JAXA-RR-07-0123, 2008年.
- (9) 口石茂, 栗田充, 満尾和徳, 藤井啓介: 感圧塗料計測法 Self-Illumination 補正プログラムの開発, JAXA-RR-08-002, 2008年.

■特許

- (1) 満尾和徳, 浅井圭介, 小幡誠, 矢野重信: 感圧色素を

フッ素系ポリマーに担持した感圧塗料とその製造法, 特願 2004-175284 号.

- (2) 栗田充, 中北和之, 満尾和徳, 渡辺重哉: 温度依存性補正を加えた感圧塗料の In-situ 計測手法とその装置, 特願 2004-188358 号.
- (3) 中北和之, 栗田充, 満尾和徳: A-priori/In-situ Hybrid 感圧塗料データ処理手法, 特願 2004-249302.
- (4) 満尾和徳, 萬関一広, 片桐真也, 長谷川靖哉, 和田雄二: 感温センサ及び感温塗料, 特願 2005-259417 号.
- (5) 満尾和徳, 浅井圭介, 小幡誠, 矢野重信: 感温塗料および感温センサ, 特願 2006-57241 号.
- (6) 鈴木昌弘, 池田充, 満尾和徳: 圧力分布測定システム及び校正用測定子, 特願 2006-186029).
- (7) 栗田充, 藤井啓介, 満尾和徳: 感圧塗料計測法の時系列的温度変化による温度依存性補正手法, 特願 2007-92054 号.
- (8) 満尾和徳: 複合分子センサー, 特願 2007-129965 号.
- (9) 満尾和徳: 3層構造の感圧塗料薄膜センサー, 特願: 2007-266036 号.
- (10) 満尾和徳, 小幡誠, 矢野重信: 温度感度を低減した感圧塗料および感圧センサ, 特願 2008-187174 号.

■招待講演

満尾和徳: 圧力温度場同時計測, 日本機械学会年次大会 流体工学部門企画, 2003年.

■国際会議発表論文

- (1) Mitsuo, K., Kurita, M., Nakakita, K., Watanabe, S., and Wada, Y., "Temperature Correction of PSP Measurement Using Bi-luminophore Dyes", the 26th AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference, AIAA 2008-3945, Seattle, 2008.
- (2) Mitsuo, K., Kurita, M., Nakakita, K., Fujii, K., Watanabe, S., Katagiri, S. and Wada, Y., "Development of Bi-Luminophore Pressure-Sensitive Paint Systems", the 22nd International Congress on Instrumentation in Aerospace Simulation Facilities, ICIASF-2007, California, 2007.
- (3) Mitsuo, K., Kurita, M., Kuchi-Ishi, S., Fujii, K., Ito, T. and Watanabe, S., "PSP Measurement of a High-Lift-Device Model in JAXA 6.5m × 5.5m Low-Speed Wind Tunnel", AIAA-2007-1065, Reno, Nevada, 2007.
- (4) Kurita, M., Nakakita, K., Mitsuo, K., Kawato, H., Yamamoto, Y., Watanabe, S. and Fujii, K., "Aerodynamic Characteristics of a Lifting-Body-Type Reentry Vehicle at Transonic Speed," 44th AIAA Aerospace Science Meeting and Exhibit, AIAA 2006-665, 9-12 January 2006, Reno, Nevada.

- (5) Mitsuo, K., Kurita, M., Nakakita, K. and Watanabe, S., "Temperature Correction of PSP Measurement for Low-Speed Flow Using Infrared Camera," 21st International Congress on Instrumentation in Aerospace Simulation Facilities, ICIASF' 05 10-1, 30 August, Sendai, Japan, 2005.
- (6) Fujii, K., Ito, M., Sato, M., Mitsuo, K. and Noguchi, M., "Development of a Transition Detection Technique Compatible with Conventional Force/Pressure Measurements, 21st International Congress on Instrumentation in Aerospace Simulation Facilities, ICIASF' 05 8-2, 30 August, Sendai, Japan, 2005.
- (7) Watanabe, S., Kato, H., Mitsuo, K., Kurita, M. and Nakakita, K., "Pressure and Velocity Field Measurements in JAXA Wind Tunnels," First Joint Meeting of 103rd STAI& 41st SATA, New York, May, 2005.
- (8) Mitsuo, K., Nakakita, K. and Kurita, M., "Application of Pressure-Sensitive Paint to Low-Speed Wind Tunnel Testing at Japan Aerospace Exploration Agency," 24th International Congress of the Aeronautical Sciences, ICAS 2004-3.2.3, August, Yokohama, Japan, 2004.
- (9) Nakakita, K. and Kurita, M. and Mitsuo, K., "Development of the Pressure-Sensitive Paint Measurement for Large Wind Tunnels at Japan Aerospace Exploration Agency," 24th International Congress of the Aeronautical Sciences, ICAS 2004-3.2.2, August, Yokohama, Japan, 2004.
- (10) Kurita, M., Nakakita, K., Mitsuo, K. and Watanabe, S., "Data Processing of Pressure-Sensitive Paint for Industrial Wind Tunnel Testing," 24th AIAA Aerodynamics Measurement Technology and Ground Testing Conference, AIAA 2004-2188, 28 June-1 July, Portland, 2004.
- (4) 満尾和徳, 栗田充, 中北和之, 渡辺重哉: 感圧塗料計測の低速風洞試験への適用, 第33回可視化情報シンポジウム, 工学院大学, 2005年7月.
- (5) 池田充, 小山達弥, 鈴木昌弘, 高岩利充, 満尾和徳, 中北和之: 感圧塗料を用いたパンタグラフの舟体・枠組間における空力干渉の影響評価, 第33回可視化情報シンポジウム, 2005年7月.
- (6) 中北和之, 栗田充, 満尾和徳, 渡辺重哉, 真保雄一: 国産小型航空機開発への感圧塗料技術の適用, 第42回飛行機シンポジウム講演集 1A1, 2004.
- (7) 中北和之, 栗田充, 満尾和徳, 渡辺重哉, 山本一臣, 高木亮治, 向井純一: CFD 検証のための感圧塗料計測データの活用, 東北大 21 世紀 COE 航空宇宙流体科学サマースクール, 2004年7月.
- (8) 藤井啓介, 佐藤衛, 神田宏, 野口正芳, 満尾和徳, 細江信幸: 遷音速領域における境界層遷移位置計測法に関する風洞試験, 第36回流体力学講演会, 平成16年9月.
- (9) 栗田充, 満尾和徳, 中北和之, 渡辺重哉: JAXA 実用風洞への PSP 計測技術の適用, 第37回流体力学講演会, 2005年9月.
- (10) 満尾和徳, 栗田充, 中北和之, 藤井啓介, 渡辺重哉: 複合感圧塗料計測の低速風洞試験への適用, 第34回可視化情報シンポジウム, 工学院大学, 2006年7月.
- (11) 栗田充, 満尾和徳, 口石茂, 中北和之, 渡辺重哉, 藤井啓介: JAXA 実用風洞における PSP 計測データ処理技術の開発, 第34回可視化情報シンポジウム, 工学院大学, 2006年7月.
- (12) 満尾和徳, 栗田充, 口石茂, 藤井啓介, 渡辺重哉, 伊藤正剛: JAXA 高揚力形態旅客機模型の低速風洞試験 (低速 PSP 計測システムの開発), 第44回飛行機シンポジウム, 大宮ソニックシティ, 2006年10月.
- (13) 栗田充, 満尾和徳, 口石茂, 中北和之, 藤井啓介, 渡辺重哉: 感圧塗料計測技術の実用性向上による開発風洞試験への適用, 第44回飛行機シンポジウム, 2006年10月.
- (14) 満尾和徳, 栗田充, 藤井啓介, 渡辺重哉, 口石茂: JAXA 6.5m × 5.5m 低速風洞における PSP 計測システムの研究開発, 第78風洞研究会議, 2007年5月.
- (15) 満尾和徳, 栗田充, 中北和之, 藤井啓介, 渡辺重哉, 和田雄二: 複合感圧塗料計測システムの研究開発, 第35回可視化情報シンポジウム, 2007年7月.
- (16) 栗田充, 満尾和徳, 中北和之, 口石茂, 渡辺重哉: マルチカメラ PSP 計測におけるデータ処理手法, 第40回流体力学講演会 / 航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム, 2008年6月.
- (17) 満尾和徳, 栗田充, 中北和之, 藤井啓介, 渡辺重哉,

■国内学会発表

- (1) 栗田充, 中北和之, 満尾和徳, 神田宏, 渡辺重哉, 浅井圭介: NAL1m × 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, 2003年.
- (2) 中北和之, 栗田充, 満尾和徳, 小池陽, 渡辺重哉, 伊藤正剛, 橋本拓郎: JAXA 2m × 2m 遷音速風洞における ONERA M5 感圧塗料試験, 第71回風洞研究会議 2003年.
- (3) 高岩利充, 池田充, 鈴木昌弘, 中出孝次, 中北和之, 満尾和徳, 感圧塗料を用いたパンタグラフ舟体の表面圧力分布測定, 第11回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2004), 2004年12月.

和田雄二, 望月大, 小幡誠: 複合 PSP 計測の遷音速風洞試験への適用, 第 36 回可視化情報シンポジウム, 2008 年 7 月.

- (18) 満尾和徳, 栗田充, 中北和之, 渡辺重哉: Research and Development of Practical PSP Measurement Systems in JAXA, 日独共同セミナー, 学際領域における分子イメージング技術の新展開, 2008 年 9 月.
- (19) 満尾和徳, 栗田充, 中北和之, 渡辺重哉, 伊藤正剛, 山内智史, 山谷英樹: JAXA における実用 PSP 計測システムの研究開発, 第 46 回飛行機シンポジウム, 2008 年 10 月 10 日.
- (20) 満尾和徳, 栗田充, 中北和之, 渡辺重哉: 大型風洞における実用 PSP 計測システムの研究開発, 第 4 回学際領域における分子イメージングフォーラム, 2008 年 10 月.

■その他

- (1) 坂上博隆, 満尾和徳, 中北和之: 感圧塗料技術の近年の動向について, 可視化情報学会誌 特集記事, Vol.24, No.95, pp.218-223.
- (2) 中北和之, 満尾和徳: 実用試験への PSP の適用, 日本航空宇宙学会誌 PSP 特集記事, Vol.53, No.624, 2006 年.
- (3) 日本航空新聞社 記事(日刊航空通信 第 13350 号 平成 18 年 6 月 15 日木曜日 pp.5-6, ”感圧塗料で流れ場情報を詳細に取得/CFD に貢献<航空新世紀>”.
- (4) 満尾和徳: 実験流体力学 -JAXA の流れ・燃焼の光学的計測, 日本機械学会 No.07-56 講習会. 2007 年.

10. 謝 辞

JAXA 大型風洞群への実用 PSP 計測システム適用するにあたり, MOSAIC プロジェクトを成功させた経験をもとに様々な助言を頂いた東北大学浅井圭介教授に深く感謝致します. 新規塗料開発においては, 複合 PSP に使用する感温色素の開発にご協力頂いた東京工業大学和田雄二教授に感謝致します. また, 低温度感度 PSP に用いる新規ポリマーの研究にご尽力頂いた山梨大学小幡誠准教授に御礼申し上げます.

PSP 計測システム開発に協力頂いた藤井啓介氏, 口石茂氏に感謝致します. また, PSP 計測を風洞で実施するにあたり, 多大な支援と協力を頂いた各風洞セクションのスタッフに感謝致します.

