

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(3) ー感圧塗料編ー

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. はじめに.....	2
1-1. PSP の特徴について	2
1-2. ペイント開発の海外の動向	2
1-3. PSP/TSP 計測の原理	2
1-3-1. PSP の原理.....	2
1-3-2. TSP の原理.....	4
1-4. PSP/TSP 計測の原理	4
2. PSP/TSP の研究開発	5
2-1. PSP と TSP について	5
2-1-1. 感圧分子センサーと感温分子センサーの種類.....	5
2-1-2. 感圧塗料用ポリマー.....	6
2-1-3. 白色ベースコート.....	7
2-1-4. コーティング方法.....	7
2-2. PSP/TSP 基本特性	8
2-2-1. 励起・発光分光特性.....	8
2-2-2. 色素濃度と発光強度の関係.....	8
2-2-3. PSP の圧力 / 温度感度特性.....	9
2-2-4. TSP の圧力 / 温度感度特性.....	11
2-2-5. 劣化特性.....	11
2-3. 風洞実験結果の一例 – JAXA 2m×2m 遷音速風洞 ONERA (M5) 模型試験 –	13
3. 複合 PSP の研究開発	14
3-1. 複合 PSP について	14
3-2. 複合 PSP の基本特性	16
3-2-1. 複合 PSP の仕様.....	16
3-2-2. 分光データ	16
3-2-3. 圧力 / 温度感度特性	17
3-3. 風洞実験結果の一例 – JAXA 2m×2m 低速風洞 超音速機模型試験 –	18
4. まとめ.....	21
5. 参考文献.....	21
6. 謝 辞.....	23
Appendix A	24
Appendix B	25

JAXA 感圧塗料 (PSP) 計測システムの研究開発 (3) - 感圧塗料編 - *

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 (III) *

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

Abstract

Pressure-sensitive paint (PSP) system is a useful measurement tool for acquiring overall pressure images on an aerodynamic model. The measurement accuracy was strongly sensitive to the characteristics of the PSP. The luminescent intensity of PSP depends on both pressure and temperature. Thereby, the error source due to temperature dependence of PSP must be canceled in order to improve the PSP measurement accuracy. JAXA has developed the the polymer, the temperature-sensitive dye and the bi-luminophore PSP in cooperation with chemists of University. In this paper, the present JAXA research activities of the PSP and temperature-sensitive paint (TSP) were reported.

概要

風洞技術開発センターでは、感圧塗料 (Pressure-sensitive paint : PSP) 計測システムを大型風洞群に適用するために実用化研究を進めてきた。PSP 計測精度は PSP の特性に強く影響を受けるため、高性能 PSP の開発が不可欠である。そのため、大学と協力して低温度感度ポリマーや複合 PSP 等の新規 PSP の研究開発を行ってきた。本レポートでは、PSP 開発概要を示すとともに、実証試験結果の一部を紹介する。

Nomenclature

C_p : 圧力係数

I : 発光強度

I_a : 吸収強度

I_{ex} : 励起光強度

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

P_{O_2} : 酸素分圧

Re 数 : レイノルズ数

$\sigma(T)$: 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

ε : 吸光係数

c : 光を吸収する物質の濃度

l : 光の透過する厚み

k_L : 発光過程の速度定数

k_D : 無放射過程の速度定数

k_Q : 酸素消光の速度定数,

τ : 励起分子の発光寿命

E : 活性化エネルギー

R : 気体定数

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. はじめに

1-1. PSP の特徴について

感圧塗料 (Pressure-Sensitive Paint: PSP) を用いた物体表面圧力場計測が航空宇宙分野の風洞実験をはじめとする熱流体計測実験において注目されている¹⁾⁻¹³⁾。PSP 計測は感圧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。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。感圧塗料のほかに感温塗料 (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。

感圧塗料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。1980 年代後半にロシアとアメリカが、ほぼ同時期にその機能を感圧塗料として航空宇宙分野へ適用したのが始まりである。日本における感圧塗料の研究は 1990 年代前半に航空宇宙技術研究所 (現 : 宇宙航空研究開発機構 (JAXA)) で始められた。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)」が実施された。そのプロジェクトの中で基礎的な研究が進められ、2003 年からは JAXA 風洞技術開発センターにおいて PSP の実用化研究が開始された¹⁴⁾⁻²⁰⁾。

本レポートでは JAXA-PSP システムにおける感圧塗料の成果についてまとめる。JAXA が開発した PSP や TSP の基本特性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について紹介する。

1-2. ペイント開発の海外の動向

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。

アメリカでは NASA を中心に AEDC (Arnold Engineering Development Center), ISSI (Innovative Scientific Solutions Inc.²¹⁾) や大学で研究開発が行われている。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。ISSI は PSP 関連のベンチャー企業であり、Washington 大学 Prof. Gouterman²²⁾ 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)。ISSI が使用している感圧色素は JAXA と同じ PtTFPP (ポルフィリン類) である。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。

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²³⁾。ピレンを使用した 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 PSP を開発しているが、ピレンは光劣化を受けやすくまた昇華しやすいという性質があり、本格的な実用化のためにはまだ課題があるようである。

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ている。画像処理技術が他の研究機関よりも卓越している。

感圧色素の種類で分類すると、ヨーロッパ勢はピレンを、日本・アメリカはポルフィリンを使用して計測を行っている。相対的に光劣化に強く、また可視域で励起できることから、JAXA ではポルフィリンを用いた PSP を使用している。

1-3. PSP/TSP 計測の原理

1-3-1. PSP 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。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。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。数式を用いて順に説明する。発光体色素 (感圧色素) の発光量子効率を以下のように定義する^{5, 24)}。

$$\Phi = \frac{I}{I_a} \quad (1-1)$$

I : 発光強度

I_a : 吸収強度

吸収強度 I_a は、Beer-Lambert 則 ($\log_{10}(I/I_{ex}) = -\epsilon c l$) により、以下のように記述される。

$$I_a = I_{ex} - I_{ex} \times 10^{-\epsilon c l} = I_{ex} (1 - 10^{-\epsilon c l}) \quad (1-2)$$

ε : モル吸光係数 (molar absorptivity)
 c : 光を吸収する物質の濃度 (mol/l)
 l : 光の透過する厚み
 εcl : 光学密度 (Optical Density : OD)
 I_{ex} : 励起光強度

PSP の発光反応過程の発光量子効率以下のように与えられる.

$$\Phi = \frac{I}{I_a} = \frac{k_L}{k_L + k_D + k_Q[O_2]} = k_L \tau \quad (1-3)$$

k_L : 発光過程の速度定数
 k_D : 無放射過程の速度定数
 k_Q : 酸素消光の速度定数,
 $[O_2]$: 酸素濃度
 τ : 励起分子の発光寿命

酸素が存在しない場合, (1-3) 式は次式になり,

$$\Phi_0 = \frac{I_0}{I_a} = \frac{k_L}{k_L + k_D} \quad (1-4)$$

以下の関係式が得られる. この式を Stern-Volmer の関係式という.

$$\frac{I_0}{I} = 1 + k_Q \tau_0 [O_2] = 1 + K_{SV} [O_2] \quad (1-5)$$

I : 発光強度
 I_0 : 酸素消光が無い場合の励起分子の発光強度
 $\tau_0 = 1/(k_L + k_D)$
 : 酸素消光が無い場合の励起分子の発光寿命
 k_Q : 消光係数 (温度の関数)
 K_{SV} : スタン・ボルマ係数

上式より, 発光強度比 (I_0/I) が酸素濃度に比例することがわかる. Henry の法則によれば, 酸素濃度は酸素分圧に比例する.

$$[O_2] = \sigma(T) P_{O_2} \quad (1-6)$$

$\sigma(T)$: ヘンリーの溶解係数
 P_{O_2} : 模型表面上の酸素圧力

さらに空気中の酸素割合は常に 21% で一定なので酸素分圧は圧力に比例する. これらの関係式を (1-5) 式に代入して以下の式を得る.

$$\frac{I_0}{I} = 1 + K_Q \tau_0 \sigma(T) P_{O_2} \quad (1-7)$$

上式は, 酸素分圧を測定することをで圧力分布を得ることを意味する. 高分子薄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酸素分圧 P_{O_2} に対応する. 空気の場合を考えると酸素の分圧は静圧の 21% となるので, (1-7) 式は以下のように書くことができる.

$$\frac{I_0}{I} = 1 + KP \quad (1-8)$$

ここで, $K = 0.21 K_{SV} \sigma$ である. (1-8) 式により, PSP の強度を測定すれば圧力の値が求まる. 酸素分子以外には, NO が消光作用がある²⁵⁾.

風洞実験で真空状態を実現するのは難しいため, (1-8) 式を圧力が様な基準 (無風) 状態 (添え字 ref) における値で正規化する. 通風時と無風時の関係式は,

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

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

となり, 両式の比をとると,

$$\frac{I_{ref}}{I} = A(T) + B(T) \frac{P}{P_{ref}} \quad (1-9)$$

$$A(T) = \frac{1}{1 + KP_{ref}} \text{ および } B(T) = \frac{KP_{ref}}{1 + KP_{ref}} \quad (1-10)$$

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. (1-9) 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, 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. 一般には非線形性を考慮して以下のような多項式を用いることが多い.

$$\frac{I_{ref}}{I} = A_0(T) + A_1(T) \frac{P}{P_{ref}} + A_2(T) \left(\frac{P}{P_{ref}} \right)^2 + \dots \quad (1-11)$$

(1-10), (1-11) 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 を用いて圧力分布を高精度に計測するためには温度補正が不可欠である. この温度依存性は, 系間交差 ($S1 \rightarrow T1$: 1 重項状態から 3 重項状態への遷移過程) における遷移が温度に影響されることによるものである.

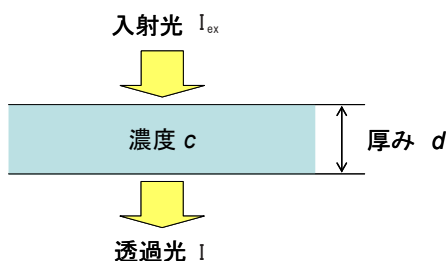


図 1-1 Beer-Lambert 則の説明図

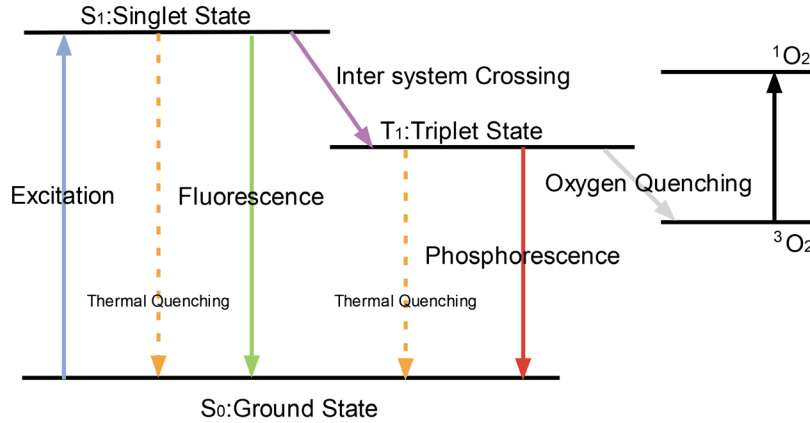


図 1-2 感圧、感温色素の発光原理図

1-3-2. TSP の原理

感温色素の消光過程には酸素は無関係である。先述の(1-3)式を用いると、 $[O_2] = 0$ とすることができ、量子効率率は以下のような簡単な式になる。

$$\Phi = \frac{I}{I_a} = \frac{k_L}{k_L + k_D} = k_L \tau_0 \quad (1-12)$$

無放射失活の速度定数 k_D は熱に依存しない項 k_0 と、系間交差などにより熱的に活性化されるような熱に依存する項 k_1 の和で表される。 k_1 は以下の式のようにArrheniusの関係式で表すことができる。

$$k_1 = C \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (1-13)$$

C : 定数
 E : 活性化エネルギー
 R : 気体定数
 T : 絶対温度

無放射失活の温度に依存する速度定数 k_1 を代入して k_D を消去すると以下の式を得る。

$$\frac{I_a}{I(T)} - \frac{I_a}{I(0)} = C k_L^{-1} \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (1-14)$$

$I(0)$: $T = 0 \text{ K}$ 時の発光強度

さらに、上式を既知の温度 T_{ref} における発光強度 I_{ref} を用いて吸収強度 I_a を消去すると、以下の式を得る。

$$\ln\left(\frac{I(T)[I(0) - I(T_{ref})]}{I(T_{ref})[I(0) - I(T)]}\right) = \frac{E}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right) \quad (1-15)$$

常温付近での計測を考えると、 T は T_{ref} と近い値を取るため、(1-15)式の $[I(0) - I(T_{ref})]/[I(0) - I(T)]$ は1と近似できる。よって、(1-15)式は、以下のように単純化できる。

$$\ln\left(\frac{I(T)}{I(T_{ref})}\right) = \frac{E}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right) \quad (1-16)$$

上式が示すように、理論上では、縦軸に発光強度比の対数と横軸に温度の逆比をとったArrheniusプロットになる。TSP試料によっては簡単なArrheniusの関係式に合わないものもある。その場合、発光強度と温度の関係式は半実験式に近似して、以下のような関数で表される。

$$\frac{I(T)}{I(T_{ref})} = A_0 + A_1 \frac{T}{T_{ref}} + A_2 \left(\frac{T}{T_{ref}}\right)^2 + \dots \quad (1-17)$$

1-4. PSP/TSP 計測の原理

一般的に、PSPのコーティングは図1-3に示すように白色ベースコートとPSPの層からなる。PSPは感圧色素と酸素を透過させる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。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 $50 \mu\text{m}$ 、 $5 \mu\text{m}$ 程度である。

図1-3のPSP計測原理図が示すように、励起光源とし

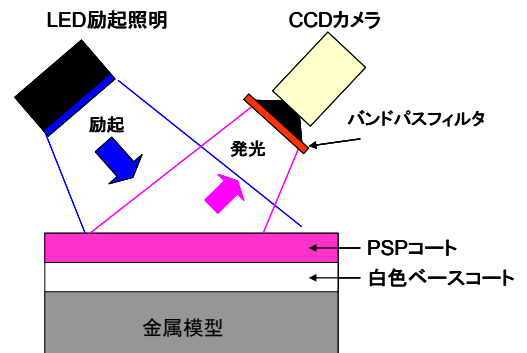


図 1-3 PSP 計測の原理図

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 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。

$$\frac{I_{ref}}{I_{run}} = A(T) + B(T) \frac{P_{run}}{P_{ref}} \quad (1-18)$$

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。

2. PSP/TSP の研究開発

2-1. PSP と TSP について

2-1-1. 感圧分子センサーと感温分子センサーの種類

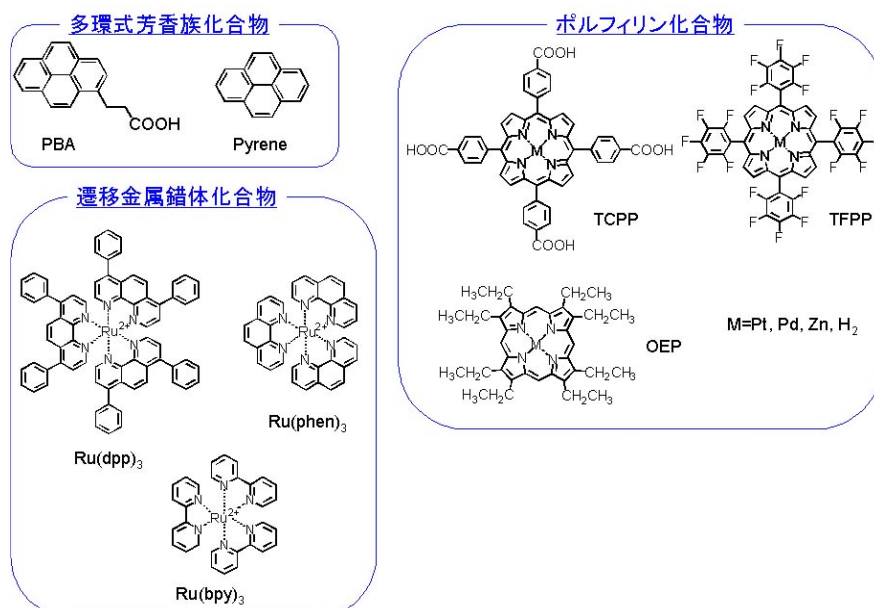
感圧分子センサーには、ポルフィリン、ルテニウム錯体化合物、ピレン系化合物が使用されている（表 2-1 参照）。日本や米国では、ポルフィリン化合物である PtTFPP (Pt(II) meso-tetrakis (pentafluorophenyl) porphine) (図 2-1) や PdTFPP (Pd(II) meso-tetrakis (pentafluorophenyl) porphine) がよく使用される。一方、ピレン系化合物を使用した PSP は温度感度が低く精度の良い計測が期待できるが、励起光による劣化を受けやすいため光劣化防止などの対策が必要である。

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（表 2-2 参照）。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

表 2-1

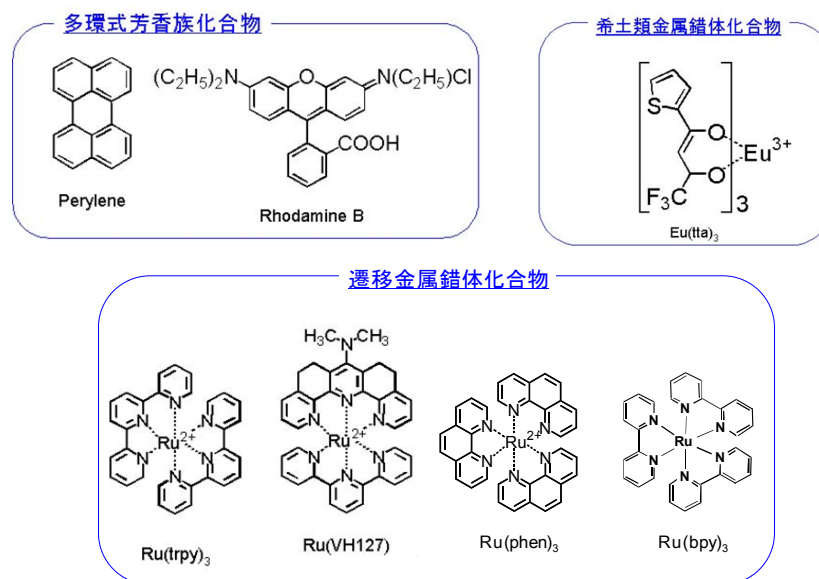
感圧色素	励起帯(nm)	発光ピーク波長(nm)	圧力感度 (SV-B係数)	温度感度 %/°C	ポリマー	溶媒	劣化特性	備考
PtTFPP	380-530	650	0.85	-0.9	Poly-IMB-co-TFEM	トルエン	○	JAXAオリジナル
PtTFPP	380-530	650	0.85	-0.375	Poly-HFIPM	酢酸エチル	○	JAXAオリジナル
PtTFPP	380-530	650	0.85	-0.5	FIB	ベンゼン	○	ISSI(米国)
PdTFPP	380-530	670	0.85	-0.9	Poly-IMB-co-TFEM	トルエン	○	JAXAオリジナル
Ru(dpp) ₃	420-500	620	0.8	-1.1	シリコンゴム	ジクロロメタン	△	
Pyren	300-345	425-550 (広域発光)	0.75	-0.3	不明	不明	△	B1ペイント: OPTROD(露)

- ・PtTFPP の購入先：Frontier Scientific, Inc. <http://www.frontiersci.com/> (PtTFPP の購入先)
- ・ルテニウム錯体の購入先：GFS Chemicals (ルテニウム錯体の購入先)
- ・B1 ペイント (Pyren の PSP) の購入先：OPTROD (<http://www.optrod.com/>)
- ・SV-B 係数：式 (1) における B を表し、B 係数が高いほど感度が良い。



(a) 感圧色素の化学構造式

図 2-1 感圧 / 感温色素の化学構造式



(b) 感温色素の化学構造式

図 2-1 感圧 / 感温色素の化学構造式

表 2-2

感温色素	励起帯(nm)	発光ピーク 波長(nm)	圧力感度 (SV-B係数)	温度感度 %/°C	ポリマー	溶媒	劣化特性	備考
EuTTA	300-350	615	0	1.5	PMMA	トルエン	×	
Eu四核錯体	350-420	615	0	2.5	Poly-IBM- co-TFEM	トルエン	○	JAXAオリジナル
Ru(phen)	420-500	620	0.05	2~3	PMMA	混合溶媒	△	圧力感度は若干あり 温度感度は濃度 に依存
RhodamineB	500-600	580	0	0.75	PMMA	ジクロロメタン	○	

リットがある。その点を改良したのが、Eu 四核錯体 ([Eu4 (μ-O) (L1) 10] L1=2-hydroxy-4-octyloxybenzophenone)) を利用した感温色素である。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。

2-1-2. 感圧塗料用ポリマー

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 (isobutylmethacrylate-co-trifluoroethylate))²⁶⁾、や HFIPM (「poly(isobutyl-co-1,1,1,3,3,3-hexafluoroisopropyl methacrylate)」)²⁷⁾ を使用している (図 2-2)。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。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。

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、ポリマーベースの非定常 PSP のポリマーとしても利用されている。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 (Appendix A 参照)。

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。

ポリマーと色素は共通の溶媒に溶解しなければならない。しかし、溶媒には極性・無極性溶媒があり、溶解する色素やポリマーを選ぶ。そのため、PSP や TSP を作成する前に、各材料の溶媒適合性を調べておく必要がある。最近の技術では、ポリマーと色素の溶解性が異なっても、ポリマーに色素を結合することによって、溶解性を改善する方法が研究されている²⁸⁾⁻³¹⁾ (Appendix B 参照)。色素はポリマーに結合されているため、溶解性はポリマーの素材に依存する。

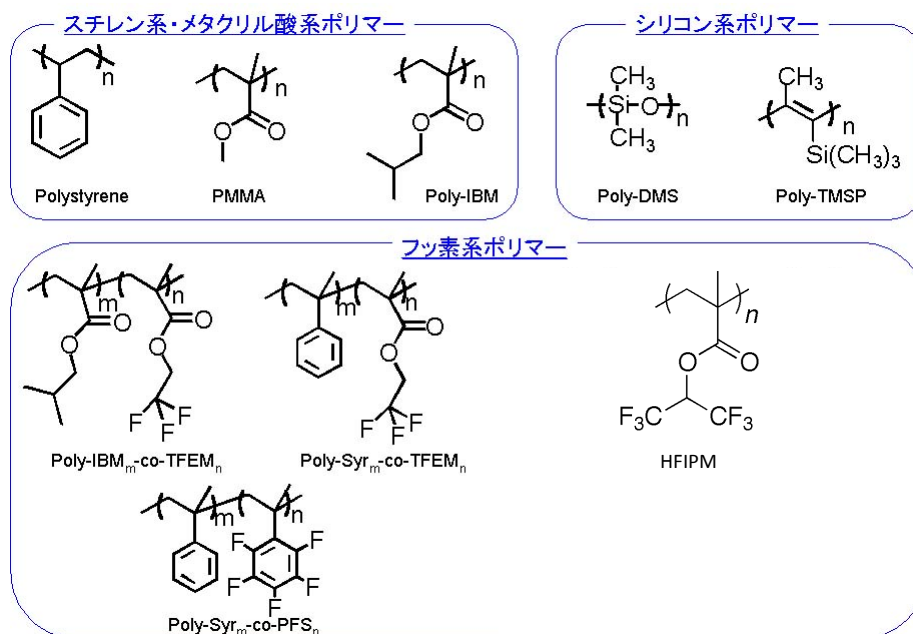


図 2-2 酸素透過性ポリマーの化学構造式

2-1-3. 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てしまうため、PSP の圧力感度が悪くなるので注意が必要である。

2-1-4. コーティング方法

簡単に PSP 塗装方法について説明する。PSP の塗装はエアスプレーガン (エアブラシ) を用いて行う。塗料の噴出し量、スプレーガンの手元圧などを適度に調整して模型を塗装する (図 2-3)。PSP 計測では、多少の塗り斑は画像の比をとることにより解消されるため、ほぼ均一に塗装できれば問題なく計測できる。模型の塗装は以下の手順で進められる。

(1) 模型の養生

塗装しない部分を塗装用養生シートなどを用いて覆う。また、静圧孔を保護するためパージ圧をかけて塗料が静圧孔に流入するのを防ぐ。

(2) 白色ベースコート塗装

PSP の発光強度を増加させるためベースコートを塗装する。ベースコートを塗装する前には模型をエタノールで拭き、脱脂しておくこと。有機溶媒を使用するためマスクや防護服を着用して作業を行なう。小型の模型の塗装は塗装ブースで行うが、巨大な模型の場合は風洞内で塗装する。その場合は専用ブースを設置して塗装を行う。

(3) マーカー取り付けおよび塗装面の研磨

白色ベースコートを塗装後、表面粗さが気になるようであればサンドペーパーで研磨する。また、画像処理で使用するため、この段階で模型上にマーカーを取り付ける (図 2-4)。マーカー位置は取り付け後に 3 次元計測器で計測するか、または事前に模型にターゲットマーカーを付けておくことと良い。

(4) PSP 塗装

塗り斑がひどくならないように慎重に塗装する (図 2-5)。

(5) 塗装模型の乾燥

時間がない場合は加熱炉に入れて強制乾燥を行う。乾燥時間や温度などは使用する塗料に合わせる。

(6) 塗装の除去

PSP は塗料に混合した溶媒で落とすことができる。強固に密着している場合、市販の塗料用の剥離剤を用いると良い。



図 2-3 白色ベースコート塗装の様子



図 2-4 マーカーの取付け作業



大型風洞に設営された塗装ブース



PSP 塗装作業の様子

図 2-5 大型風洞における塗装の様子

2-2. PSP/TSP 基本特性

2-2-1. 励起・発光分光特性

図 2-6 と図 2-7 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 2-6 が示すように, PtTFPP の励起帯は紫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。なお, ソーレー帯と Q 帯の励起ピーク強度は色素濃度に依存する。色素濃度が低い場合はソーレー帯のピークが大きく, 濃度が高い場合は Q 帯のピークが大きくなる。

この波長域を励起すると PSP は発光し, 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。

Eu (ユーロピウム) や Tb (テレビウム) 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 2-7 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。

2-2-2. 色素濃度と発光強度の関係

PSP の色素濃度と発光強度の関係を調べた結果を図 2-8 に示す。PSP 中の感圧色素の量を増加させると発光強度は単調に強くなるが, ある濃度を超えると発光強度は減衰する。これは, 濃度が増すことにより色素間距離が接近するため色素間でエネルギー移動が起こり, 濃度消

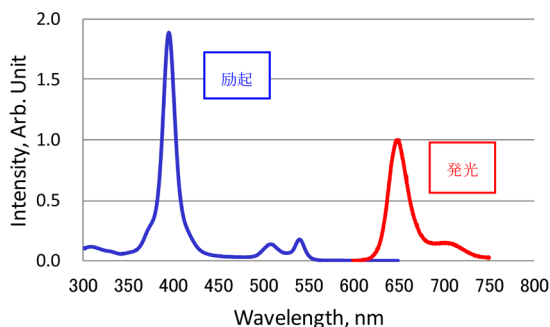


図 2-6 PtTFPP の励起波長と発光波長

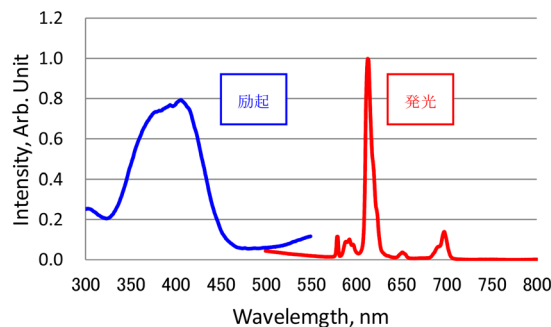


図 2-7 Eu 錯体の励起波長と発光波長

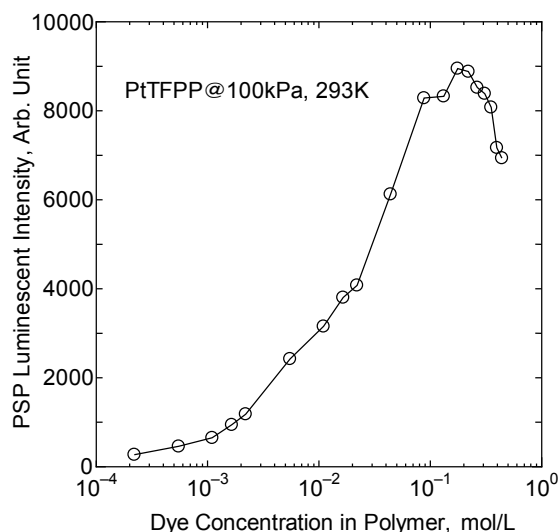


図 2-8 PSP の発光強度とポリマー中の色素濃度の関係

光するためである。よって、発光特性は励起照明の強さだけでなく、色素濃度にも依存する。なお、PSP にある量以上の色素を加えても溶解限界（色素が溶媒に溶ける限界の濃度）のため色素は溶けない。

2-2-3. 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 (図 2-9)。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。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。

圧力感度と温度感度の結果を図 2-10 と図 2-11 に示す。Poly-IBM-co-TFEM と PtTFPP を用いた PSP の圧力感度は 0.85 (Stern-Volmer の関係式の B 係数) あり、PSP の中でも圧力感度が高い色素である。温度感度は約 1 % / °C である。図 2-10 が示すように、Poly-IBM-co-TFEM を使用した PSP は温度を変えても圧力感度特性が変わらない。他のポリマーでは、温度が異なると圧力感度が変わるため温度ごとの校正曲線が必要となる。

図 2-12 にポリマーとして HFIPM を使用した PSP の圧力感度と温度感度特性を示す。HFIPM は PSP の温度感

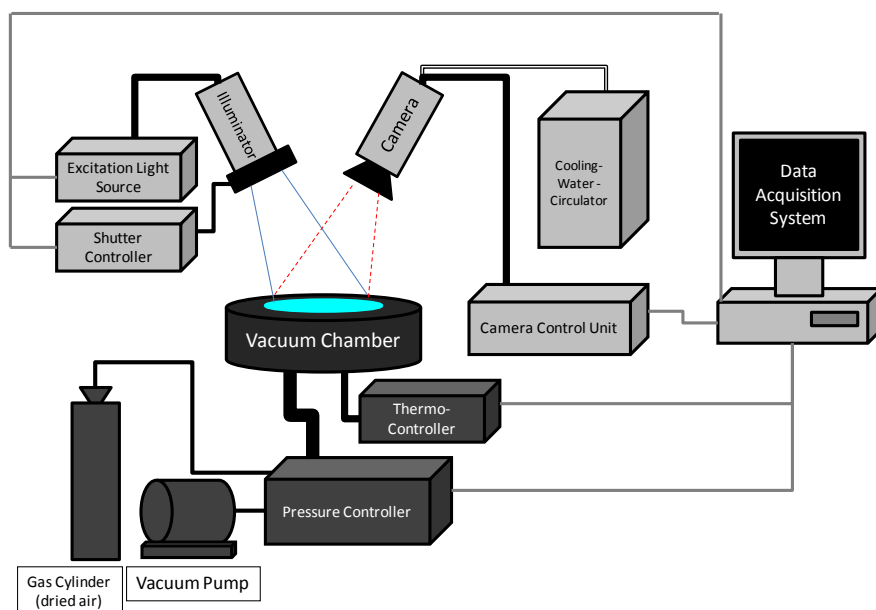


図 2-9 感圧塗料校正装置の模式図

度を低減したポリマーとして開発されたものである。図 2-13 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 $0.4\%/^{\circ}\text{C}$ 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。白色ベースコートが PSP の溶媒に溶けてしまうような場合、白色ベースコート層と PSP 層の境界は両者の混合層となり、PSP 感度特性が変質してしまう。PSP 層とベースコート層の間にポリマーのみの中間層をコーティングした場合と、コーティングしない場合の結果を図 2-14 に示す。中間層がある場合、ベースコートとの縁切りができていたため圧力感度特性に温度によるばらつきはなく、(c) のアルミ基板に PSP を塗布した結果と同じである。一方、中間層がない場合は、温度によって圧力感度が微妙に異なる。混合層に含まれる感圧色素は、酸素透過性が著しく低下したポリマー中に包含されるため圧力にほと

んど感応しない。そのため、見かけ上の PSP の発光強度は、PSP 自身の発光と混合層の発光の 2 種類が混じった発光強度になる。感圧色素の発光強度は温度上昇とともに弱くなるため、図 2-14(b) が示すように、高温側では混合層の発光の影響を受け難くなる。よって、使用する前に白色ベースコートが PSP の溶媒に耐性があるかどうかを確認しておくべきである。

従来の PSP では感圧色素とそれを物体表面に薄膜固化させるポリマーを溶解させる溶媒として、一般的にトルエンやベンゼンが使用されている。特にベンゼンは一般に発がん性物質であり、厳重な管理が要求されている。このような状況を受けて JAXA では人体により影響の少ない溶媒への移行を進めている。

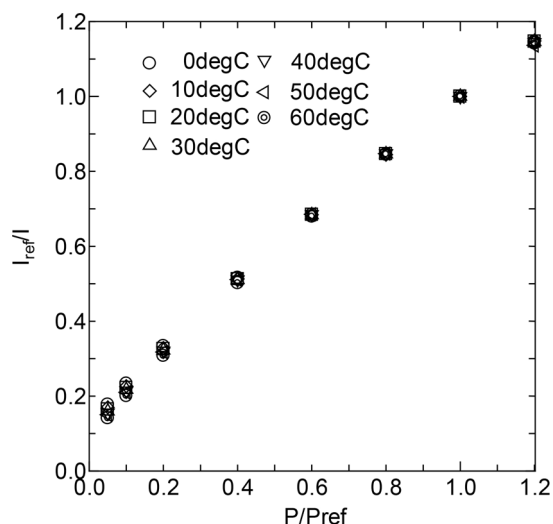


図 2-10 PSP の圧力感度特性
(Poly-IBM-co-TFEM)

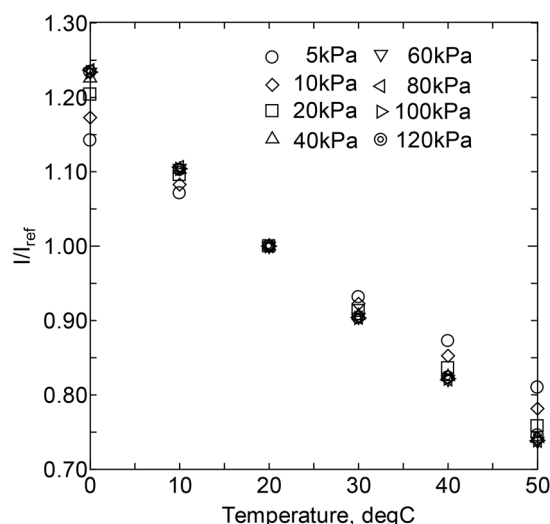


図 2-11 PSP の温度感度特性
(Poly-IBM-co-TFEM)

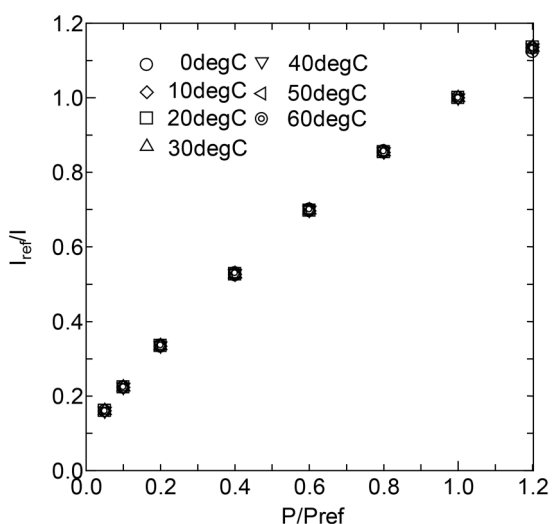


図 2-12 PSP の圧力感度特性
(HFIPM)

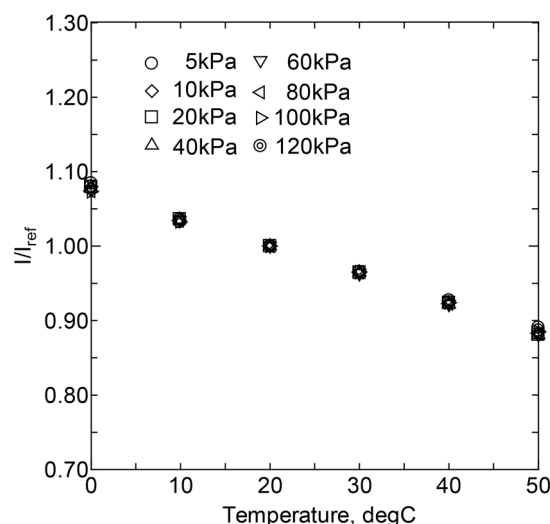


図 2-13 PSP の温度感度特性
(HFIPM)

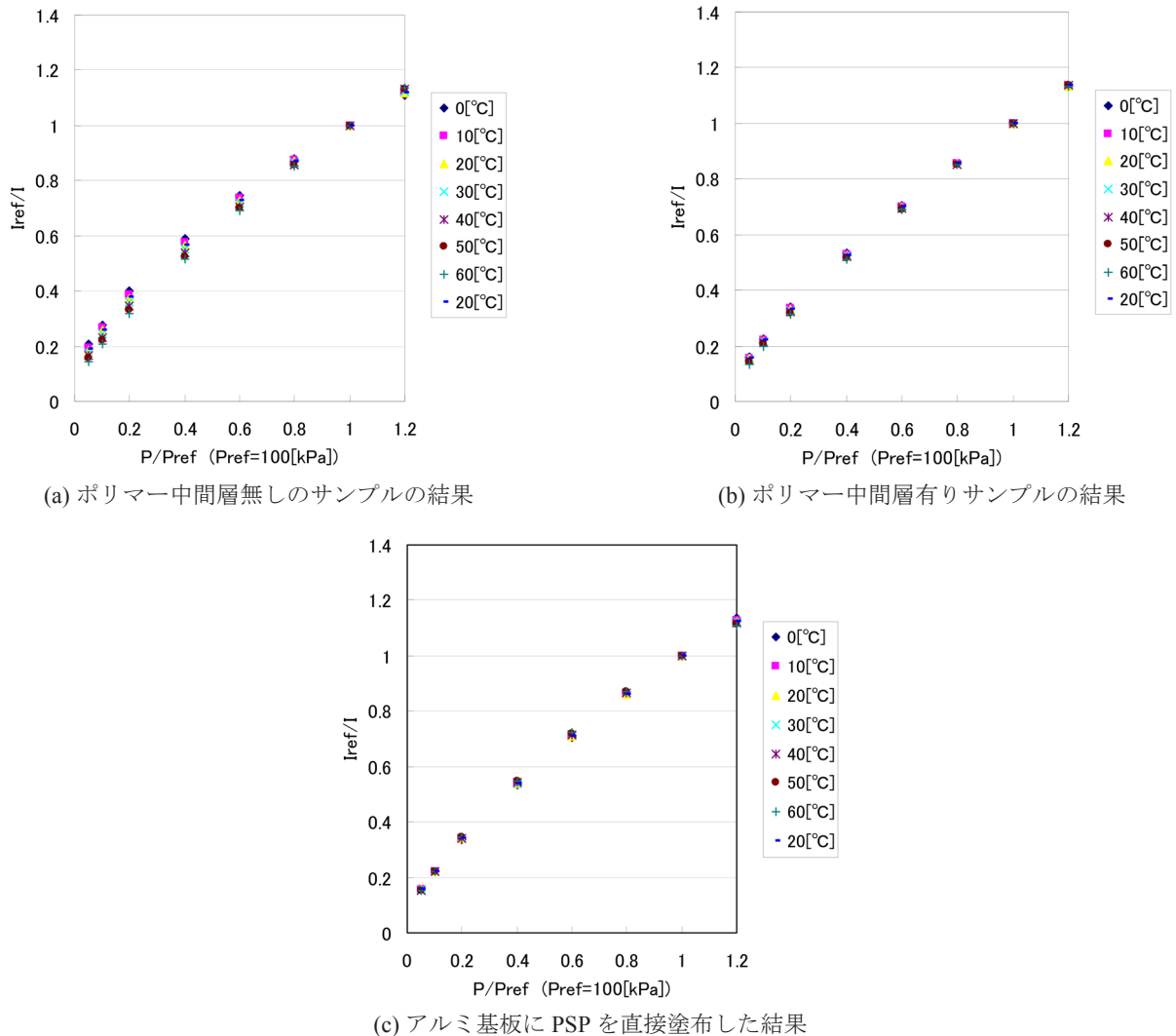


図 2-14 感圧塗料の圧力感度特性比較 (ポリマー: Poly-IBM-co-TFEM)

2-2-4. 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 2-15 と 2-16 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。

様々な種類の TSP があるが、計測可能温度レンジは約 -120°C ~ 300°C である。

2-2-5. 劣化特性

PSP や TSP は励起光によって劣化を受けるため、強すぎる励起光を照射すると計測精度に影響する。その程度は色素によって異なるため事前に劣化の程度を測っておき、計測精度に影響がないかどうか確認しておく必要がある。

光劣化の特性評価を行った感圧塗料自動校正装置を図 2-17 に示す。PSP, TSP の圧力感度特性の評価も行うことができる。真空チャンバーの中に PSP, TSP サンプルが置

かれ、励起照明と CCD カメラは約 50cm 離れた場所に設置されている。励起フィルタの透過特性はフィルタ自身の温度に強く依存するため、照明を点けて直ぐの励起強度は急激に減衰する。フィルタの温度が安定するまでに数分かかる。そのため、劣化特性を計測する際には、励起照明を点灯してから数分後に PSP に照明を当てて PSP 発光強度を時系列に計測した。

図 2-18 と図 2-19 に計測結果を示す。計測は 100kPa, 20°C の環境で試験を行った。発光強度は、計測開始時の発光強度と比較して、1 時間後には約数 % 弱くなっていることがわかる。この変化量が計測精度に影響する。実際の JAXA での風洞試験では照明と模型間の距離が 1m 程度離れているため劣化試験結果よりも劣化の程度が少ない。また、この劣化特性の結果を受けて励起照明は計測時以外は点灯しない計測方法をとっているため、実際には数 % もの影響は受けない。ちなみに、劣化特性は圧力環境にも影響を受け、低压になるほど活性酸素が少ないため劣化は受け難くなる。

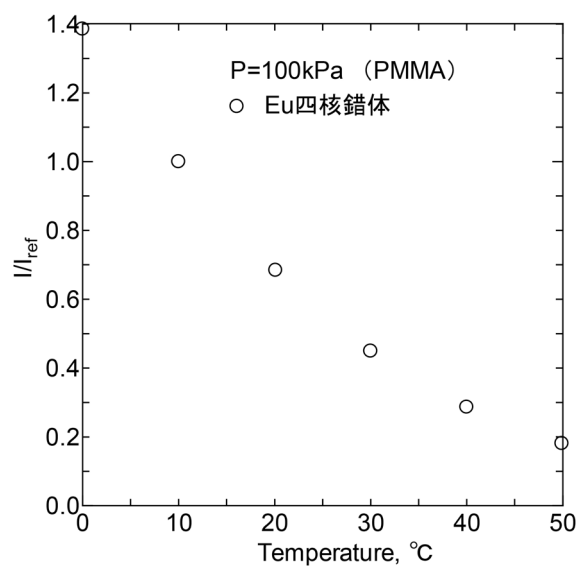


図 2-15 TSP の温度感度特性

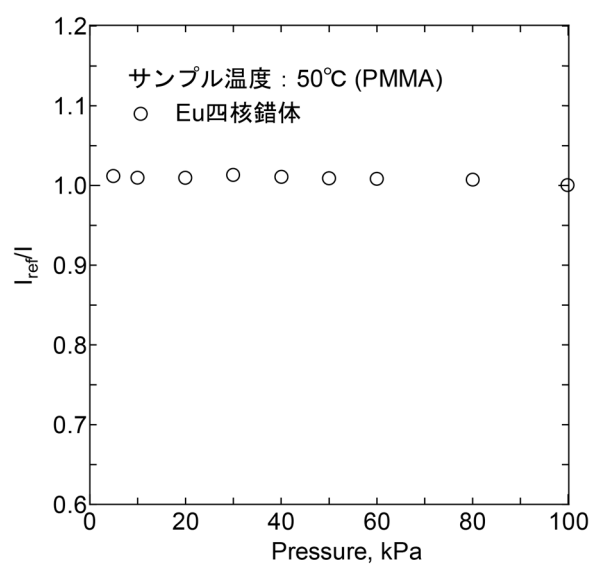


図 2-16 TSP の圧力感度特性

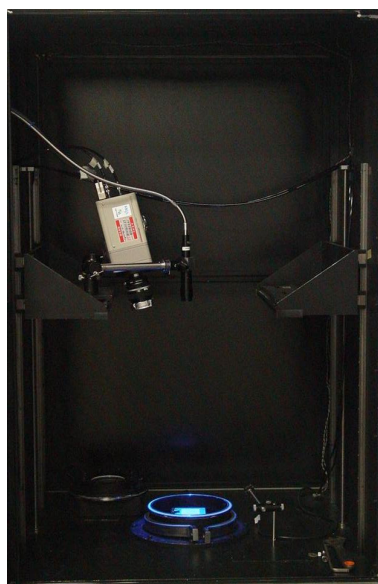


図 2-17 感圧塗料自動校正装置の内部写真

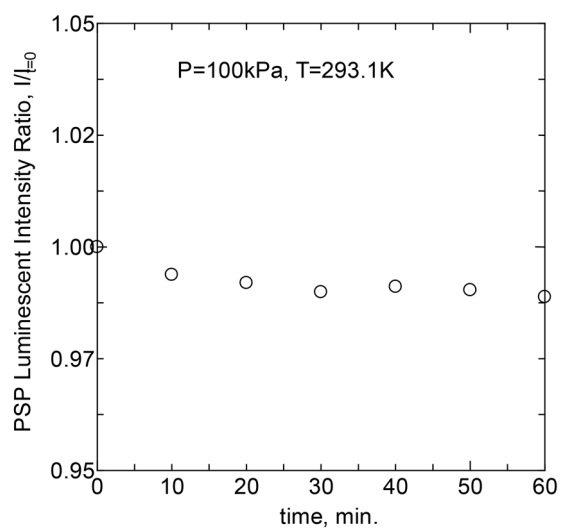


図 2-18 PSP の劣化特性

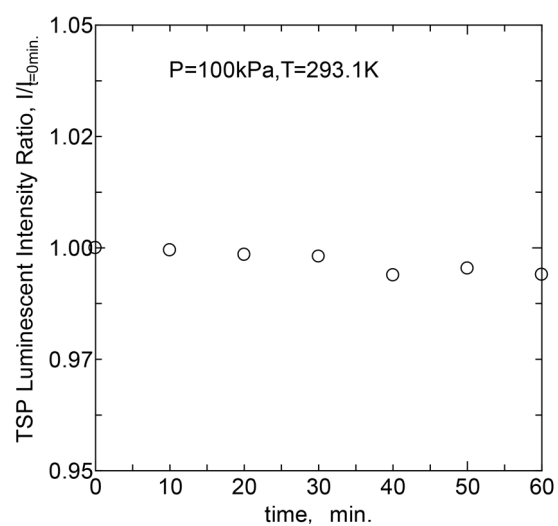


図 2-19 TSP の劣化特性

2-3. 風洞実験結果の一例 - JAXA 2m×2m 遷音速風洞 ONERA (M5) 模型試験 -

JAXA-2m × 2m 遷音速風洞 (TWT1) で実施した PSP 試験の一例を紹介する³³⁾⁻³⁵⁾。風洞模型に ONERA M5 を使用した。本実験では、PSP の温度補正を行うため PSP/TSP 塗分けによる計測を行った (図 2-20)。PSP は感圧色素である PtTFPP とフッ素系ポリマーである Poly-IBM-co-TFEM からなる。TSP には感温色素として Ru (phen) を用い、ポリマーにウレタン系ポリマーを使用した。

図 2-21 に TWT1-PSP 光学系を示す。風洞測定部の天井と側壁のジュリーレン窓に水冷式 CCD カメラと励起光源を設置し、模型全周の PSP/TSP 発光を計測した。通風中の TWT1 カート室は 40℃ 付近の高温になり、かつ大気圧よりも低い圧力 (60kPa 程度まで下がる) 環境になるため光学系の熱環境対策が必要となる。さらに、励起照明に Xe 光源を用いているため発熱量が多く、光源が落ちる可能性が高い。そのため、乾燥空気を外部から供給して光源の冷却を行った。

励起照明の照射器の前面には、熱線吸収フィルタと

380-530nm バンドパスフィルタを取り付けた。さらに、照射器前面にメカニカルシャッターが取り付けられ、照明の ON/OFF を制御した。CCD カメラのレンズの前面には 590-710nm バンドパスフィルタと IR カットフィルタを取り付けた。CCD カメラと励起照明の制御は、TWT1 計測室から遠隔操作した。コントロール系の最上流にはファンクションジェネレータがあり、計測ごとの TTL 信号を送る。CCD カメラと励起照明の動作タイミングはディレイジェネレータによってコントロールした。

PSP/TSP 塗分けによる PSP の温度補正の場合、流れの対称性を仮定できる姿勢でしか計測できない (横滑り角をとることができない。) というデメリットがあるものの、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。また、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 の校正データを発光強度と圧力・温度の関数 (式 (2-1)、式

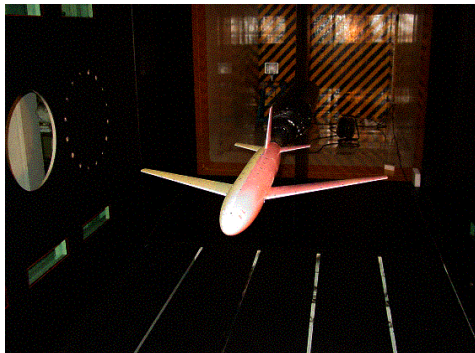


図 2-20 PSP 塗装 ONERA M5 模型

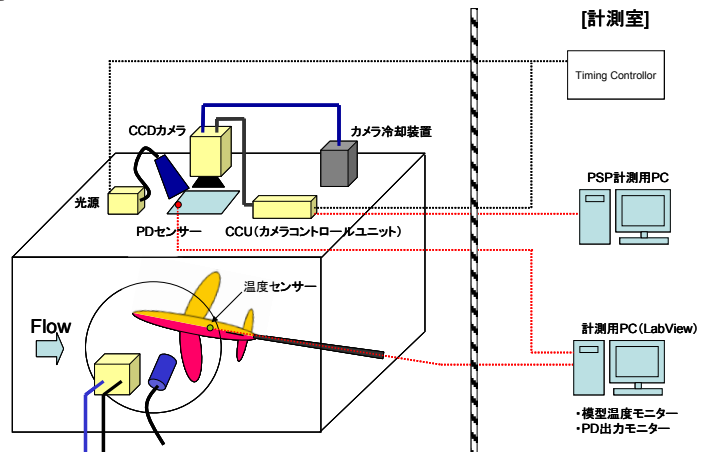
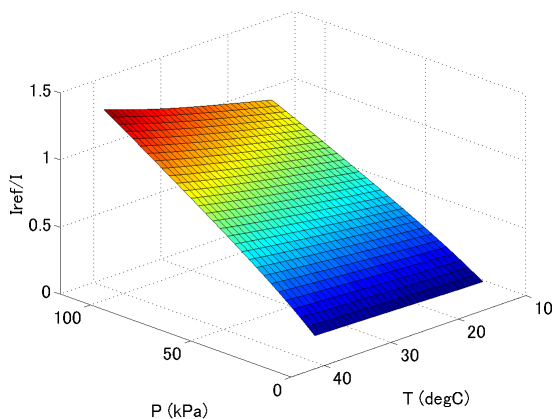
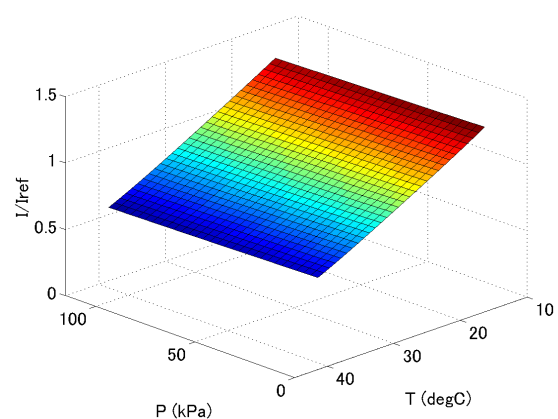


図 2-21 2m × 2m 遷音速風洞の光学系セットアップ



(a) PSP の校正曲面



(b) TSP の校正曲面

図 2-22 校正曲面

(2-2)) 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, TSP 発光強度の圧力 / 温度特性データは, 較正試験装置を用いてマトリックス的に圧力と温度を変えて取得する. 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する.

圧力と温度への変換は A-priori/In-situ Hybrid 法を使用した. 静圧孔のみを使用する 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/TSP の圧力 / 温度感度特性と静圧孔データを併用しているため, 外挿することなく圧力を求めることができる.

$$\frac{I_{P_{ref}}}{I_P} = f(P, T) \quad (2-1)$$

$$\frac{I_T}{I_{Tref}} = g(P, T) \quad (2-2)$$

図 2-23 に PSP/TSP 計測結果 (左: 圧力, 右: 温度) を示す. 衝撃波により形成された複雑な圧力場が主翼上面に鮮明に可視化されているのがわかる. 主翼上の低圧領域が胴体にまで干渉するため, 主翼と胴体の付け根に低圧領域が形成されている. 一方, 温度分布については, 衝撃波が通過する (圧力急激に変化する) 領域で温度分布が生じている. 計測結果が示すように, 従来の静圧孔による離散的な情報からは得られなかった詳細な圧力 / 温度分布を得ることができた.

PSP データと静圧孔データとの比較を図 2-24 に示す. PSP データと静圧孔データは良好に一致しており, 精度良く計測できている. 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.

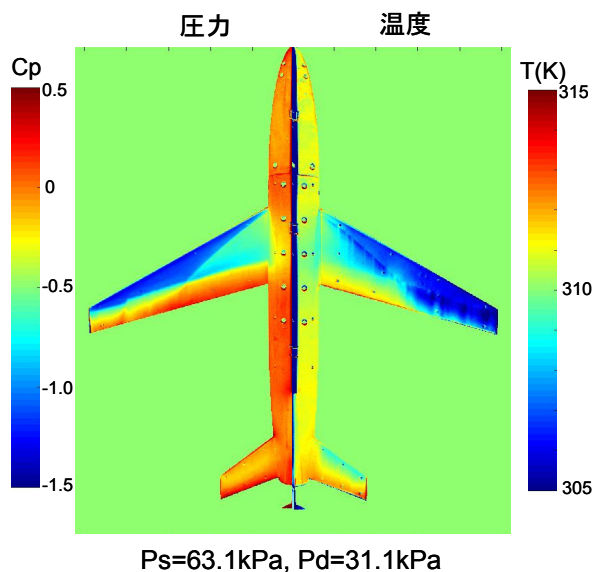


図 2-23 計測された圧力 / 温度場

3. 複合 PSP の研究開発

3-1. 複合 PSP について

PSP は圧力に感応するセンサであるが, PSP の発光強度は圧力と同時に温度にも影響を受ける. また, PSP の発光強度は励起照明の強さに依存する. そのため, 高い計測精度を実現するためには PSP 温度補正と, 励起照明強度の高安定性が不可欠である. 特に, 圧力変化の小さい低速 PSP 計測では, これらの影響を強く受ける. 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や, 赤外線カメラ (IR カメラ) による温度補正がある³⁶⁾. 塗り分け方法では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. この計測法は, 感圧色素と感温色素の 2 種類の波長の異なる色素の発光強度変化をもとに圧力と温度を計測する (図 3-1).

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.

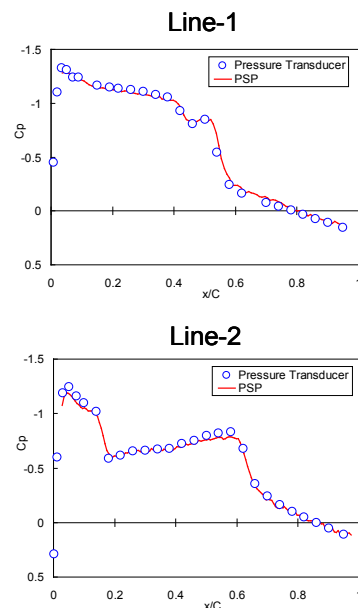


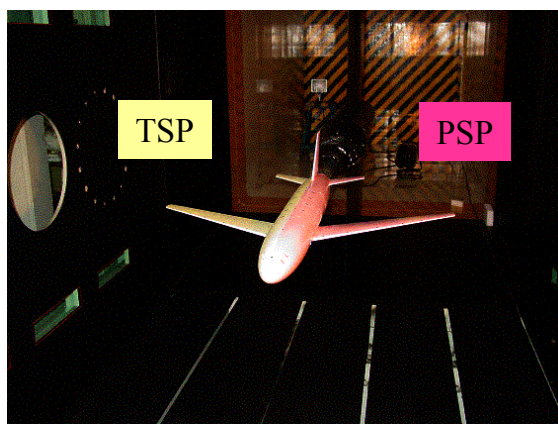
図 2-24 静圧孔データとの比較

- ・ 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 の一例として、図 3-2 に PtTFPP (感圧色素) と Rhodamin B (感温色素) を混合した複合 PSP の分光結果を示す^{38), 39)}. 580nm にあるピークは Rhodamin B (RhB) の発光で、PtTFPP の発光は 650nm と 700nm にピークをもつ. RhB の発光強度は圧力によって全く変化せず, PtTFPP の発光強度は圧力によって大きく変化しているのがわかる. 他方、温度を変えると RhB と PtTFPP の両方の発光強度が減少するのがわかる. RhB の発光強度の変化から温度を計測し、その温度を用いて PSP の温度補正を行う.

複合 PSP 計測では、2 台のカメラで計測する方法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で 2 方向に分け、CCD カメラ前面に設置された光学フィルタによって 2 色の発光を計測する.

図 3-5 に示すように、フィルタホイールには複数の光学フィルタが取り付けられるようになっており、外部信号によってホイールが回転し、フィルタが入れ替わって CCD カメラの前面に配置されるようになっている. フィ

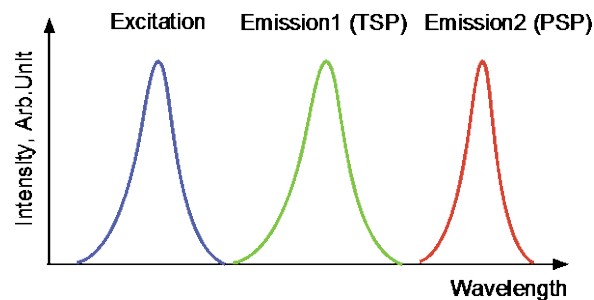


(a) PSP/TSP 塗分け

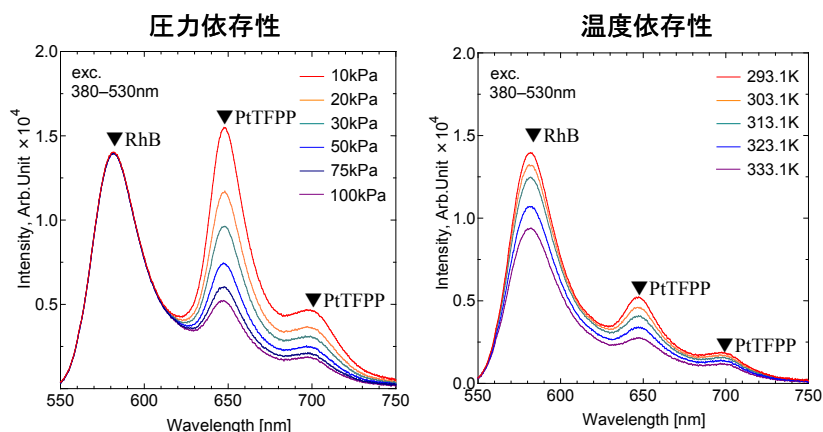


(b) 複合 PSP

図 3-1 PSP が塗装された模型の写真



(a) 励起 / 発光のイメージ



(b) 発光スペクトルの圧力 / 温度依存性

図 3-2 複合 PSP の一例 (PtTFPP と Rhodamin B との組み合わせ)

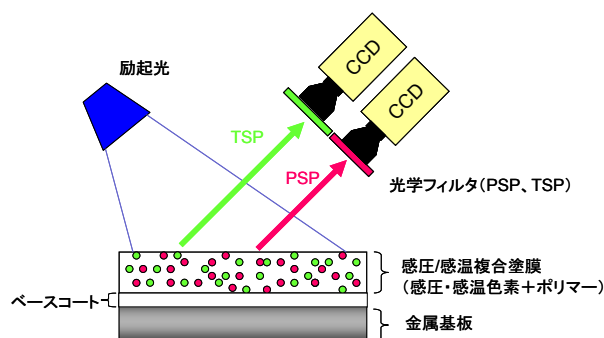
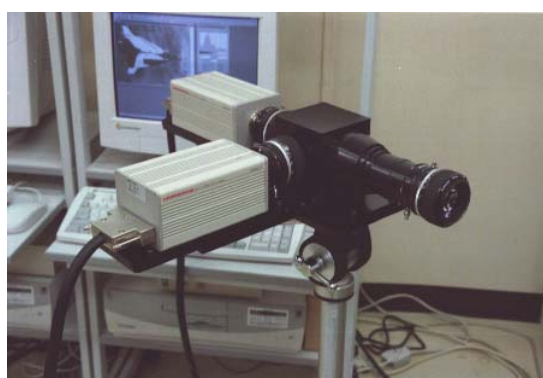
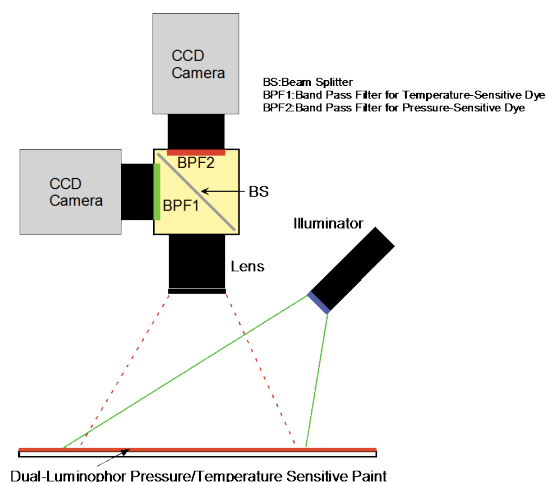


図 3-3 複合 PSP 計測のイメージ図



(a) 写真



(b) 模式図

図 3-4 波長分離式カメラの図

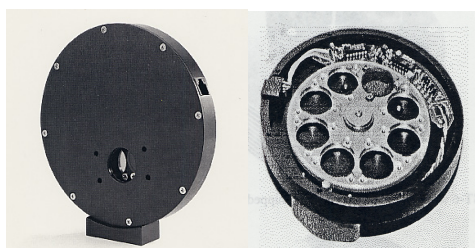


図 3-5 フィルタホイールの写真

ルタホイールを使用した場合、1 台の CCD カメラで計測でき、システムが簡便化される利点がある。しかしながら、ホイールを駆動させて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測には不向きである。

3-2. 複合 PSP の基本特性

3-2-1. 複合 PSP の仕様

複合 PSP 研究のこれまでの実績については、文献を参考にしたい^{41)~49)}。本節では最新の JAXA 複合 PSP の情報について記す。

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⁴⁹⁾。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 3-6 と図 3-7 に示す PdTFPP と Eu 四核錯体([Eu₄(μ₃-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。

3-2-2. 分光データ

Eu 四核錯体と PdTFPP の分光計測結果（圧力 / 温度特性）を図 3-8 と図 3-9 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

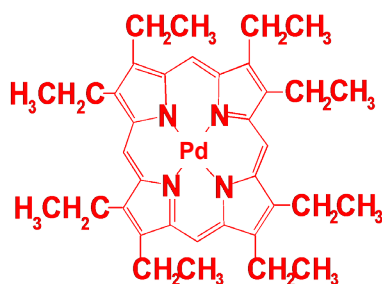


図 3-6 PdTFPP の構造式

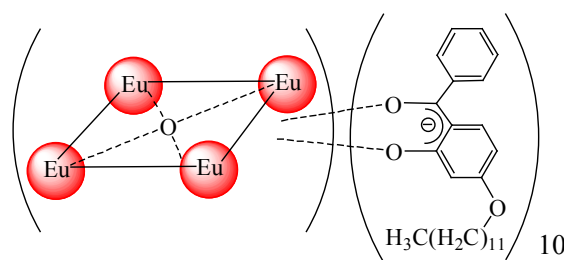


図 3-7 Eu 四核錯体の構造式

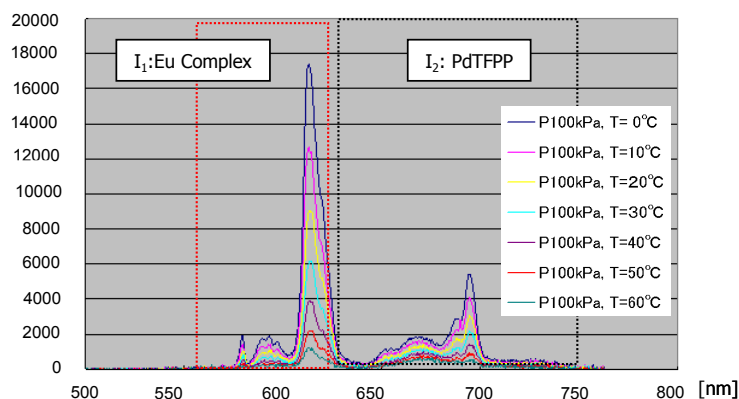


図 3-8 複合 PSP における発光スペクトルの圧力特性

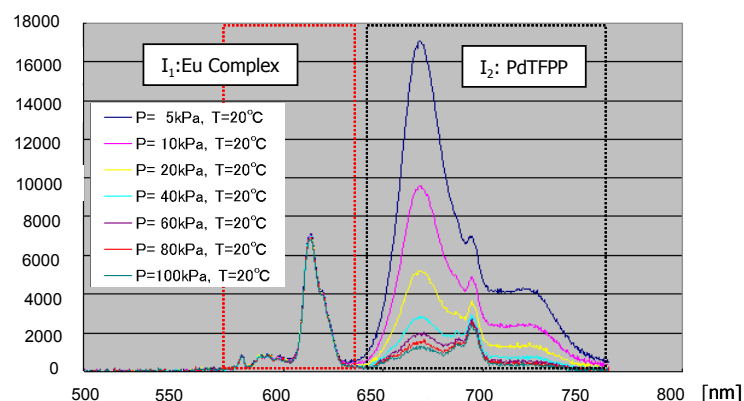


図 3-9 複合 PSP における発光スペクトルの温度特性

度を 0°C から 60°C 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した⁴⁷⁾。

3-2-3. 圧力 / 温度感度特性

図 3-10 と図 3-11 に自動校正装置で計測した複合 PSP の圧力 / 温度感度特性の結果を示す。計測はフィルタホイールを使用して行った。発光フィルタとして、Eu 四核錯体の発光を計測するために BG40 (Schot) と O56 (HOYA) を使用し、PdTFPP の発光を計測するために R66 (HOYA) を使用した。データは 100kPa, 20°C の発光強度を用いて正規化した結果である。

図 3-10 が示すように、感温色素の発光強度は温度に

よって大きく変化するが、圧力によってほとんど変わらない。温度感度は温度域によって異なるが、約 2 ~ 3%/°C である。なお、温度感度は圧力に依存しない。次に感圧色素の特性を図 3-11 に示す。温度感度は圧力に依存せず、温度感度は約 1.5%/°C である。感圧感度はほぼ線形であり、十分な圧力感度 (約 0.85%/kPa) がある。また、本複合 PSP における感圧発光成分の圧力感度は温度に依存しない。この特性はフッ素系ポリマーを用いた PSP と同じである。

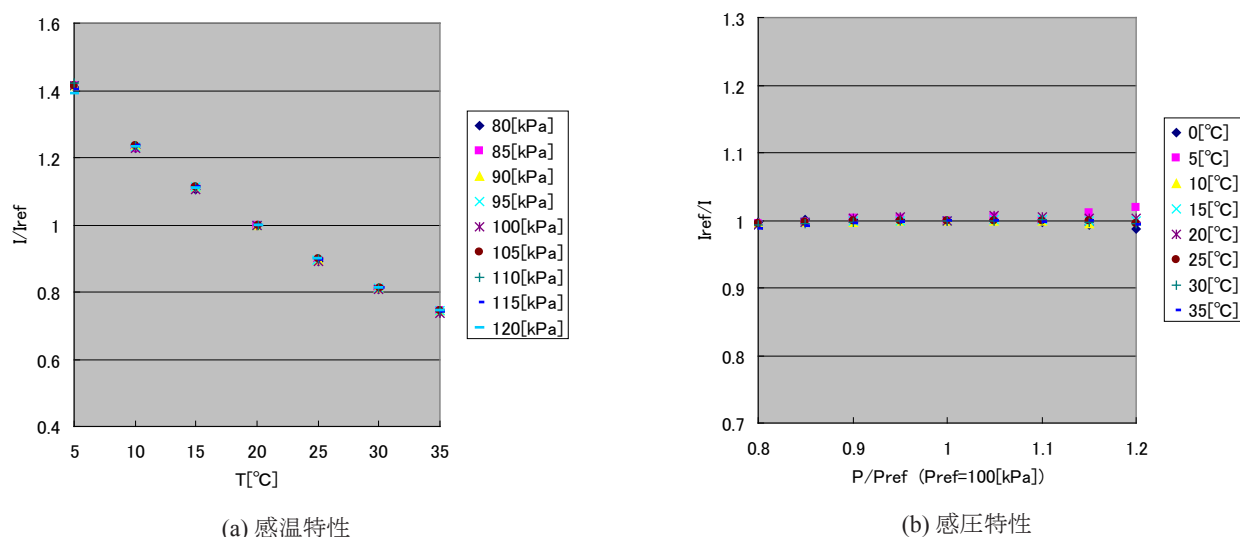


図 3-10 複合 PSP における感温色素の感度特性

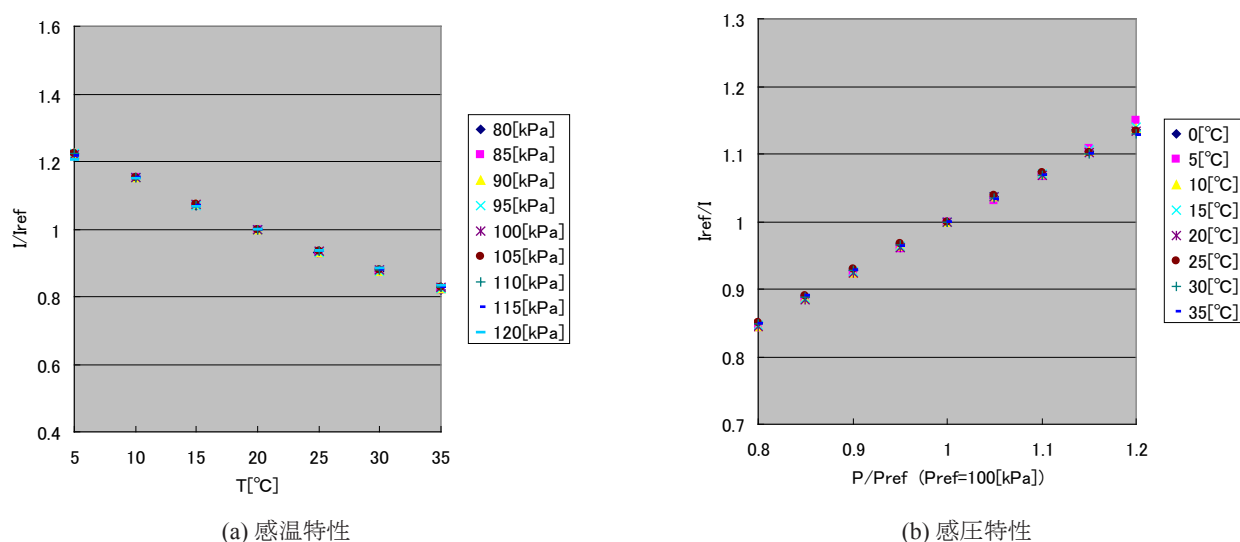


図 3-11 複合 PSP における感圧色素の感度特性

3-3. 風洞実験結果の一例 - JAXA 2m×2m 低速風洞 超音速機模型試験 -

本実験で使用した複合 PSP は、感圧色素である PdTFPP と、感温色素である Eu 四核錯体 ([Eu4(μ -O)(L2)10], L2 = 2-hydroxy-4-dodecyloxybenzophenone), およびフッ素系ポリマー (Poly-IBM-co-TFEM) を用いて調合した^{47), 52)}。

複合 PSP 計測システムの概要を図 3-12 に示す。励起用 LED 光源 (発光ピーク : 405nm) により照らされた模型からの複合 PSP 発光を、フィルタホイールを介して CCD カメラで計測した。フィルタホイールには、感圧/感温色素用フィルタが取り付けられ、ホイールを回転することで交互に 2 色の発光を計測した。劣化を最小限に抑えるため LED は画像計測時のみ点灯させ、CCD カメラと同期制御して計測した。本複合 PSP において、各色素

単体の光劣化特性は問題なかった。しかし、溶液に混合すると色素間干渉により励起光による劣化が顕著に現れるようになった。そのため、本試験では通風直後の無風時画像を基準画像とし、通風画像取得との時間差が短くなるように計測を行なった。

実験は WINTEC の 2m × 2m 低速風洞 (LWT2) で実施した。LWT2 の最大風速は 60m/s であり、模型をロボットアームで支持することにより模型姿勢を自由に変更することができる。

図 3-13 に実験で用いた SST 模型 (8.5%, 4 次形状) の写真を示す^{50), 51)}。静圧孔がスパン方向 y/b=15, 30, 50, 70, 90% の位置に取り付けられている。画像位置合わせ処理が必要であるため、模型にはマーカーが取り付けられている。また、模型温度をモニターするため翼に測抵抗体

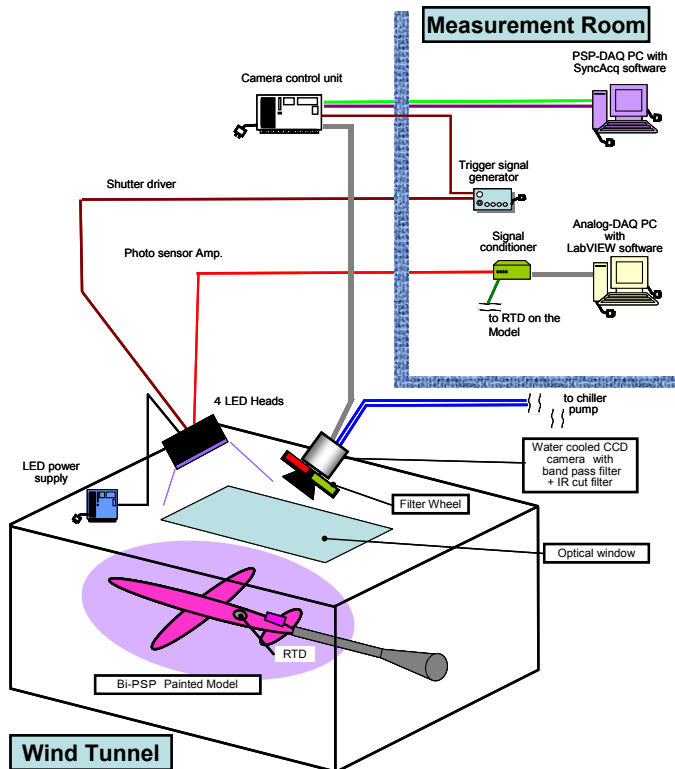


図 3-12 LWT2 における複合 PSP システムの光学系

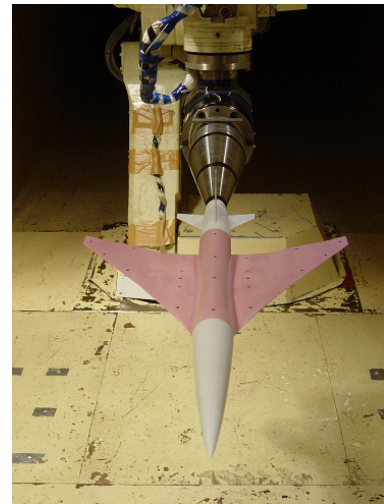


図 3-13 複合 PSP が塗装された SST 模型

を取り付けた。

較正データから算出した温度分布を用いて PSP 発光の温度補正を行った後、In-situ 法により圧力イメージに変換した。しかし、温度補正の効果はみられたが、十分な精度を確保することができなかった。サンプル試験時の複合塗料の感度特性と、風洞における感度特性が僅かに異なるためであると推定される。

較正試験データから、 I_1 と I_2 の温度感度は両者とも局所的な温度範囲で線形とみなせる。また、感圧色素の圧力感度は温度に依存しない特性をもつ。この特性を利用すると、 I_1 、 I_2 と静圧孔データを用いた In-situ 法により、次式のように温度補正を考慮した圧力変換が可能になる。

$$\frac{p_{run}}{p_{ref}} = f \left(\frac{I_{2,ref}}{I_{2,run}} \cdot \frac{I_{1,run}}{I_{1,ref}} \right) = A + B \left(\frac{I_{2,ref}}{I_{2,run}} \cdot \frac{I_{1,run}}{I_{1,ref}} \right) \quad (3-1)$$

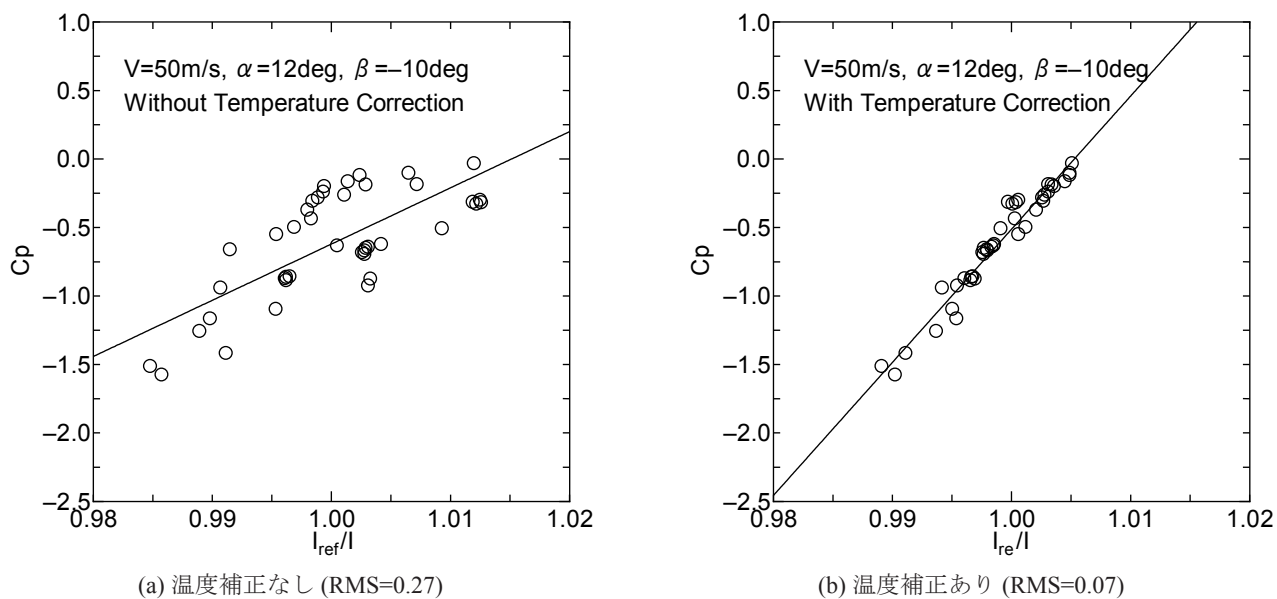
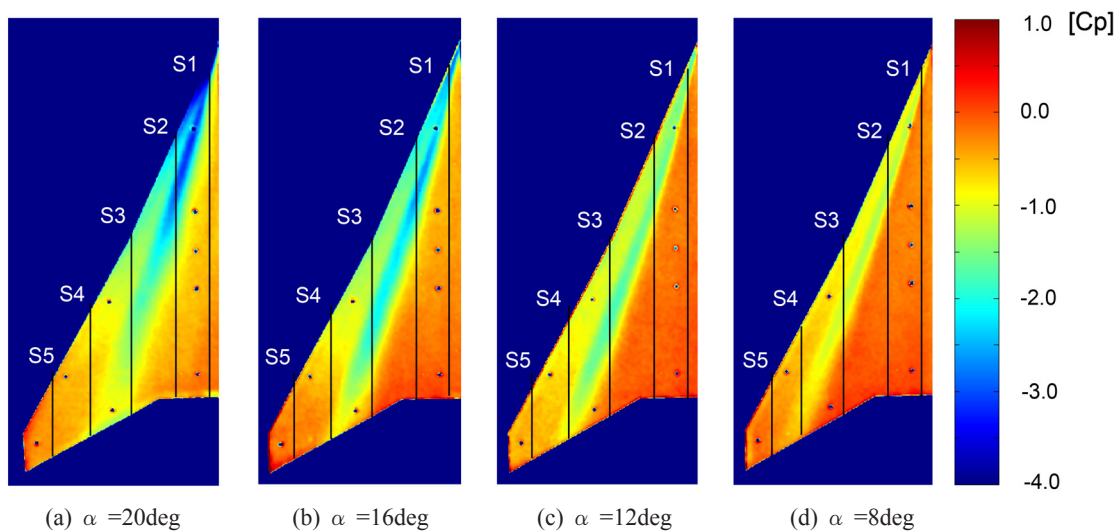
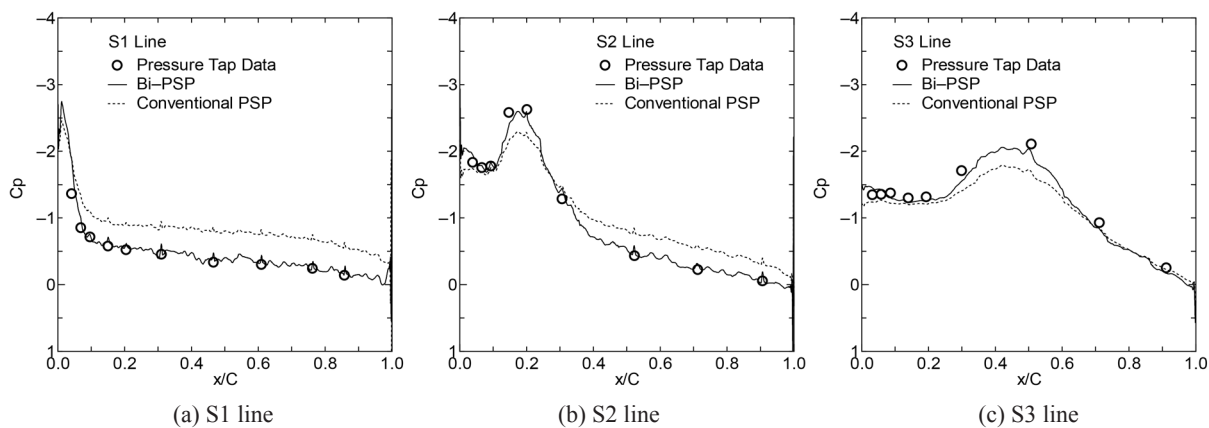
ここで、 A と B は変換係数であり、最小自乗法に求めることができる。

温度補正の効果を確認するため、温度補正有りと温度補正無しの In-situ 較正直線を比較した結果を図 3-14 に示す。試験条件は風速 $U_{\infty}=50\text{m/s}$ 、 $\alpha=12^\circ$ 、 $\beta=10^\circ$ である。図から温度補正による効果は明らかであり、Root Mean Square (RMS) はそれぞれ C_p 換算で 0.27 (補正無し) と

0.07 (有り補正) であった。ここで示す RMS は、PSP により得られた測定値と In-situ 較正曲線に対する差分から算出した。他のケースにおいても同等の計測精度を得た。

次に、風速を 50m/s に固定し、迎角を $8^\circ \sim 20^\circ$ に変化させたときの測定結果を図 3-15 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。低圧領域は迎角が小さくなるに従い前縁方向にシフトした。

図 3-16 に PSP データと静圧孔データの比較 ($S1 \sim S3$ line) を示す (風速 $U_{\infty}=50\text{m/s}$ 、迎角 $\alpha=16\text{deg}$)。温度補正無しの In-situ 処理結果 (破線) も同図に記載されている。複合 PSP を用いて温度補正をすることにより、PSP 計測精度が飛躍的に向上することがわかった。

図 3-14 In-situ calibration カーブ ($U_{\infty}=50\text{m/s}$, $\alpha=12\text{deg}$, $\beta=10\text{deg}$) .図 3-15 圧力分布の迎角依存性 ($U_{\infty}=50\text{m/s}$)図 3-16 PSP データと静圧孔データの比較 ($U_{\infty}=50\text{m/s}$, $\alpha=16\text{deg}$.)

4. まとめ

JAXA/WINTEC の感圧塗料 (PSP) 研究開発において得られた成果を以下にまとめる。

- (1) 大学の化学分野の研究者と連携し、新規分子センサーを開発した。
 - ・ 温度感度を低減した PSP (PtTFPP + HFIPM) の開発
⇒ 圧力感度 0.85%/kPa, 温度感度 0.4%/°C
 - ・ Eu 四核錯体を利用した TSP (ポリマーに PMMA を使用) の開発
⇒ 圧力感度: 約 0%/kPa, 温度感度約 2.5%/°C
 - ・ 感圧色素と感温色素をポリマーに結合した分子センサーの開発
⇒ 色素凝集の解消および溶媒への溶解性改善。
- (2) PSP 仕様や巨大模型への塗装方法など PSP 計測実用化のための技術開発を行った。その成果はプロジェクトの風洞試験で活用された。
- (3) 複合 PSP の実現により PSP/TSP 塗分けでは不可能であった横滑り角をとる姿勢の模型を計測できるようになった。開発風洞試験に使用できる本格的な実用化のためには、複合 PSP に含まれる色素の光劣化を解消しなければならないが、この課題については大学との協力のもとさらに研究を進める。

5. 参考文献

- 1) 浅井圭介: 感圧塗料による圧力分布の計測技術, 可視化情報, Vol.18, No.69, 1998, pp.97-103.
- 2) 浅井圭介, 神田宏, 飯島由美, 杉浦裕樹, 真保雄一, 石黒満津夫, 小松信義: 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) Egami, Y., Iijima, Y., Amao, Y., Asai, K., Fuji, A., Teduka, N. and Kameda, M., 2001, "Quantitative Visualization of the Leading-edge Vortices on a Delta Wing by Using Pressure-sensitive Paint," Journal of Visualization, Vol. 4, No.2, pp.139-150.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) Engler, R. H., Mérienne, M. C., Klein, C. and Sant, Y. Le., "Application of PSP in low speed flows," Aerospace Science and Technology, 6, pp 313-322, 2002.
- 7) 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.
- 8) Liu, T. and Sullivan, J. P., "Pressure and Temperature Sensitive Paints", Springer Berlin Heidelberg New York, 2004.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) Asai K, Amao Y, Iijima Y., Okura, I., Nishide H., "Novel Pressure-Sensitive Paint for Cryogenic and Unsteady Wind Tunnel Testing" J. of Thermophysics and Heat Transfer, Vol. 16, No. 1, pp 109-115, 2002.
- 12) 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.

- 13) 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)
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) 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.
- 17) 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.
- 18) 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.
- 19) 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.
- 20) 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.
- 21) Innovative Scientific Solutions Incorporated <http://psptsp.com/psp/>
- 22) 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.
- 23) Klein, C., Sachs, W. E., Henne, U., Engler, R. H., Wiedemann, A. and Konrath, R., "Development of PSP Technique for Application on the VFE- 2 65° Delta Wing Configuration," 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, AIAA 2004-59, Reno, Nevada.
- 24) Lakowicz J. R., *Principles of Fluorescence Spectroscopy*, Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, 1999.
- 25) Mori, H., Niimi, T., Hirako, M. and Uenishi, H., "Pressure sensitive paint suitable to high Knudsen number regime," *Measurement Science and Technology*, Vol. 17, 2006, pp. 1242-1246.
- 26) Amao, Y., Asai, K., Miyasita, T. and Okura, I., "Photo-physical and Photochemical Properties of Optical Oxygen Pressure Sensor of Platinum Porphyrin-Isobutylmethacrylate-Trifluoroethylmethacrylate Copolymer Film." *Polymer Journal*, 31-12, 1999, 1267-1296.
- 27) 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.
- 28) Obata, M., Tanaka, Y., Araki, N., Yano, S., Harada, M., Mitsuo, K., Asai, K., Kakuchi, T., Ohtsuki, C., "Synthesis of Poly(isobutylmethacrylate-co-2,2,2-trifluoroethyl methacrylate) having Tetraphenylporphinato Platinum(II) Moiety as an Oxygen-Sensing Dye for Pressure Sensitive Paint (PSP)", *J. Polym. Sci. Part A Chemistry*, 2005, 43(14) 2997-3006.
- 29) 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), 2876-2885.
- 30) 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, 特許出願番号: 特願 2004-175284 号.
- 31) 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.
- 32) 満尾和徳: 3 層構造の感圧塗料薄膜センサー, 特許出願番号: 2007-266036 号.
- 33) 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.
- 34) 中北和之, 満尾和徳: 実用試験への PSP の適用, 航空宇宙学会特集記事, Vol.53、No.624, 2006 年.
- 35) 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.
- 36) 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.
- 37) 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.
- 38) 満尾和徳, 浅井圭介, 亀田正治: 感圧・感温複合機能塗料, 特開 2005-29767 号.
- 39) Mitsuo, K., Asai, K., Hayasaka, M. and Kameda, M., "Temperature Correction of PSP Measurement Using Dual-Luminophore Coating," Journal of Visualization, Vol.6, No.3, 2003, pp.321-331.
- 40) 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.
- 41) 田部井孝聡, 満尾和徳, 浅井圭介, 亀田正治: 複合塗料を用いた圧力・温度場計測, 第 31 回可視化情報シンポジウム, 2003 年 7 月.
- 42) Mitsuo, K., Kurita, M., Nakakita, K. Fujii, K. and Watanabe, S., "Development of Bi-Luminophore Pressure-Sensitive Paint Systems," 22nd International Congress on Instrumentation in Aerospace Simulation Facilities, ICIASF' 07, 2007.
- 43) Katagiri, S., Hasegawa, Y., Wada, Y., Mitsuo, K., 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.
- 44) 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, pp. L1-L3, April, 2008.
- 45) 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.
- 46) 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.
- 47) 満尾和徳, 栗田充, 中北和之, 藤井啓介, 渡辺重哉, 伊藤正剛, 片桐真也, 和田雄二: 複合 PSP 計測システムの研究開発, JAXA-RR-07-023, ISSN 1349-1113, 2008 年 2 月.
- 48) 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).
- 49) 満尾和徳: 複合分子センサー, 特願 2007-129965 号.
- 50) 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.
- 51) 堀之内茂, 大貫武, 吉田憲司, 郭東潤, 徳川直子, 滝沢実, 進藤重美, 町田茂, 村上義隆, 中野英一郎, 高木正平, 柳良二, 坂田公夫: 小型超音速実験機 (ロケット実験機; NEXST-1) の基本設計結果について, JAXA-RR-05-044, 2006 年 3 月.
- 52) Watanabe, S., Kato, H., Kwak, D. Y., Shirotake, M. and Rinoie, K., "Stereo PIV measurements of leading edge separation vortices on a cranked arrow wing," Meas. Sci. Technol. Vol. 15, 2004, pp.1079-1089.

6. 謝 辞

PSP 研究開発を行うにあたり, 様々な助言を頂いた東北大学浅井圭介教授に感謝致します. また, 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と, 低温度感度 PSP に用いるポリマーや色素結合型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.

Appendix A

PSP 圧力特性のポリマー依存性（色素：PtTFPP）※ ポリマー中間層なし

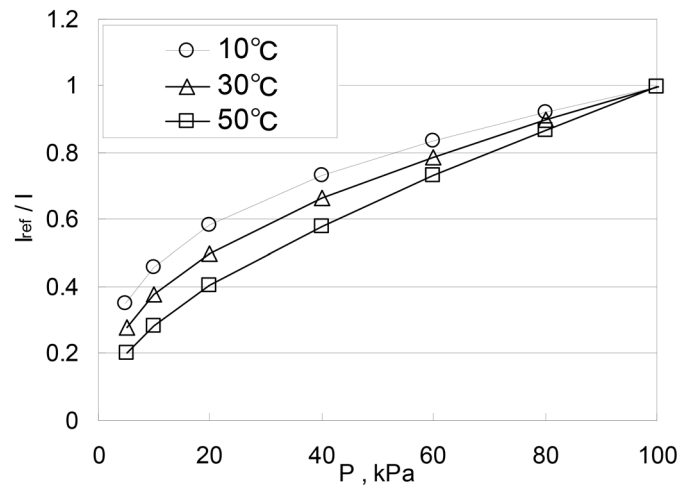


図 A-1 Poly(TMSP)

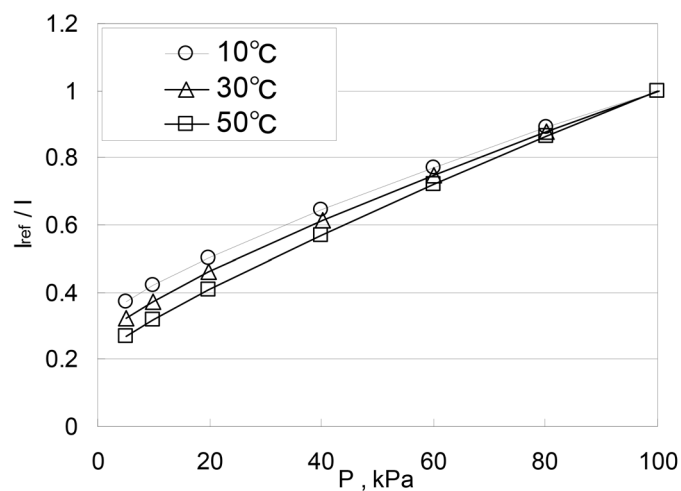


図 A-2 Poly(Styrene)

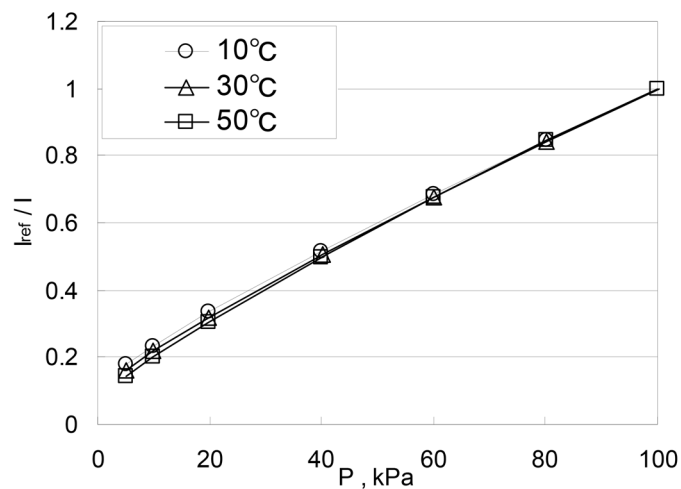


図 A-3 Poly(IBM-co-TFEM)

Appendix B

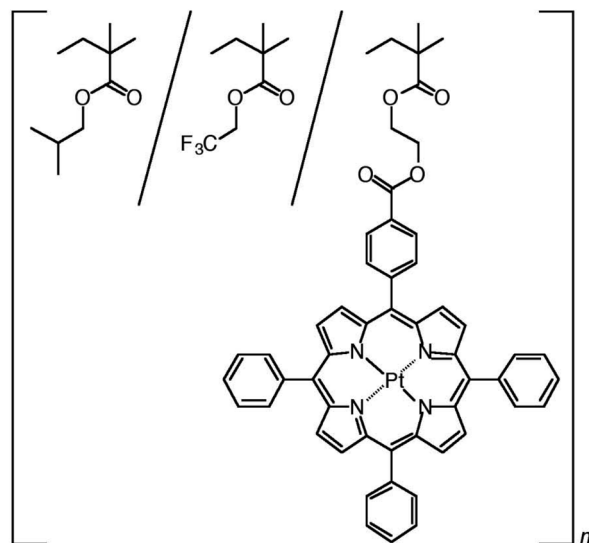
色素結合型ポリマーの一例³⁰⁾

図 B-1 テトラフェニルポルフィリン白金 (II) 錯体 (感圧色素) を結合した酸素透過性ポリマーの構造式

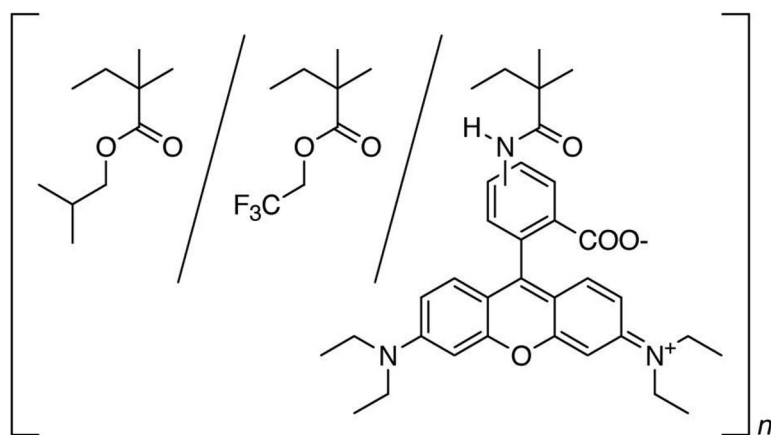


図 B-2 Rhodamine B (感温色素) を結合した酸素透過性ポリマーの構造式

