

# 高速応答 PSP の膜構造と発光寿命の一様性の関係に関する研究

[研究代表者] 江上泰広 (工学部機械学科)

## 研究成果の概要

感圧塗料 (Pressure-Sensitive Paint: PSP) は発光色素の酸素消光による発光強度や発光寿命の変化を利用した、光学的圧力センサである。近年盛んに研究が行われている発光寿命法は、理論的には無風時画像を必要とせず、通風時の発光寿命分布のみから圧力分布を計測できる。したがって、測定中のモデルの変形や移動に起因する誤差を排除できるため、圧力計測の精度を向上させることが可能である。しかし、PSP の発光寿命は、圧力や温度が均一な条件下でも、モデル上で一様でないことが報告されている。そのため、発光寿命の不均一性を補正するために参照画像を用いることになり、発光寿命法の利点が著しく損なわれてしまう。特に、高速応答 PSP は、従来のポリマ系 PSP と比較して、発光寿命にかなりのばらつきが生じる。そこで本研究では、発光色素の溶媒、発光色素濃度、バインダ厚さ、スプレー条件などを変えて試験を行い、発光寿命の均一性に及ぼす影響を調査した。得られた結果から、塗布時の様々な要因によって発生するバインダ中の発光体分布の不均一性が、発光寿命の不均一性に密接に関係していることが示唆された。例えば、バインダの厚さが 8  $\mu\text{m}$  より薄くなると、高速応答性 PSP は発光寿命に大きなばらつきが生じる傾向が見られた。また、塗布条件によっては、高速応答性 PSP の発光寿命がバインダの深さ方向に変化する可能性があることが分かった。以上より、均一な発光寿命分布を持つ PSP を作製するためには、バインダ層中に発光色素を均一に分布させることが重要であることがわかった。

**研究分野** : 流体力学, 航空工学

**キーワード** : 感圧塗料(PSP), 発光寿命, 寿命法計測, 自動塗布装置

## 1. 研究開始当初の背景

感圧塗料 (PSP) は、モデル表面上の圧力分布を高い空間分解能で捉えることができる光学式圧力センサである。圧力変動の時間分解計測のために、ポリマ/セラミック PSP (PC-PSP) などのスプレー式高速応答 PSP が開発されている。非定常 PSP の測定は、強度法と寿命法の両方で行われてきた。寿命イメージング計測は、PSP の発光寿命の圧力による変化を、カメラを用いて測定する。寿命イメージング計測の最も大きな利点は、風洞通風時の「通風時データ」のみから圧力分布を測定できることである。これにより従来の強度法の主要な誤差要因となっている通風時の模型の変形や移動、模型上の励起光や温度の分布の変化に影響されず計測を行うこ

とができる。しかし、PSP の発光寿命は本来一様であるべき圧力・温度が一様な条件下でも、PSP 塗布面で一様でないことが知られている。そこで、既知の参照条件下で計測される「無風時データ」を追加して発光寿命の平面的不均一性を補償する方法がとられている。しかし、この無風時データの使用は寿命画像法の利点を覆いに減少させてしまう。特に、多孔質で不均一なバインダを用いた PC-PSP は、従来の均質なポリマ系 PSP と比較して、発光寿命にかなりのばらつきが見られることが知られている。しかし、寿命が不均一になる明らかな理由は不明なままであった。

## 2. 研究の目的

本研究では、発光寿命の不均一性を引き起こす要因を

明らかにするために、色素とバインダ（粒子+ポリマ）を一つの溶媒中に混合した1成分系(1C-PSP)と、バインダ溶液を塗布しその上に色素溶液を塗布した2成分系(2C-PSP)の2種類の代表的な高速PSPについて、溶媒や調合割合、塗布量、膜厚、スプレー方法を変えながら調査した。

### 3. 研究の方法

#### (1) 高速応答PSPの作成

感圧色素には PtTFPP, バインダのポリマと粒子には PIBMA と TiO<sub>2</sub> をそれぞれ用いた。多孔バインダを形成するため粒子割合 93 wt%で粒子とポリマを混合した。溶媒にはトルエンを用いた。PtTFPP とバインダを混合した 1C-PSP と、バインダを先に塗布し、その上に色素溶液を塗布した 2C-PSP の2種類の高速応答PSPを作成した。

#### (2) 高速応答PSPの発光寿命の計測

図1に発光寿命の計測に用いた実験装置の概略図を示す。図1(a)のようにパルス励起したPSPの発光寿命の減衰曲線はPMTを用いて計測した。また発光寿命の面分布の計測は図1(b)のようにマルチゲートでシャッターを切れるCCDカメラを用いて行った。

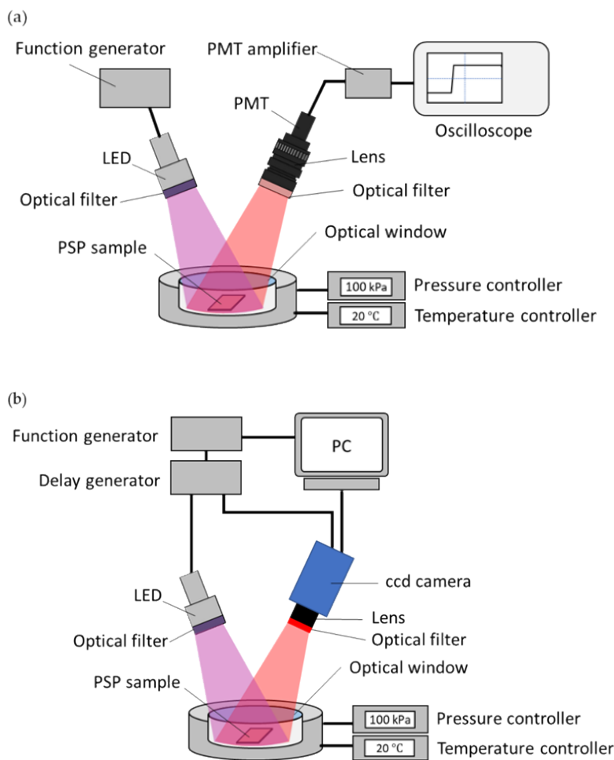


Figure 1 Schematic of the experimental setup for luminescence lifetime measurement with a PMT, and (b) lifetime imaging with a CCD camera.

### 4. 研究成果

図2に1C-PSPと2C-PSPの膜厚による発光寿命の変化を示す。バインダに混合したTiO<sub>2</sub>の粒径は15-250 nmの間で変化させた。またポリマのみのバインダのPSPの結果も比較のために示した。

ポリマ型PSPは膜厚変化に関わらずほぼ一定の発光寿命を示している。1C-PSP, 2C-PSPはポリマ型PSPと比較すると寿命がバラつき、特に膜厚5 μm以下では大きく変化した。

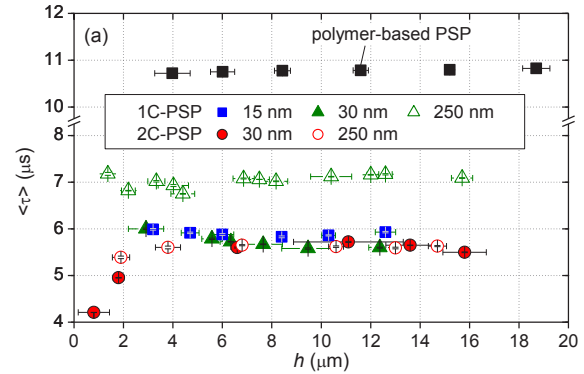


Figure 2 Variation in luminescence lifetime ( $\tau$ ) of 2C- and 1C-PSPs, as well as the polymer-based PSP, with binder thickness.

図3は2C-PSPの表面(a)と研磨した内部(b), (c)の寿命分布を示したものである。表面の発光寿命が短いに対し、内部の発光寿命が長くなっていることが分かる。これより色素溶液をバインダに上塗りする2C-PSPは深さ方向に寿命分布を持つことが分かる。

図4は1C-PSPの(a)乾燥気味に塗布した場合と(b)濡れ気味に塗布した場合の表面と内部の発光寿命分布の違いを示したものである。乾燥気味に塗布した(a)では表面と内部がほぼ同じ発光寿命を示したのに対し、(b)では表面よりも内部の発光寿命が長くなっている。これは、溶媒がバインダ表面から蒸発する際に色素と一緒に移動してしまい、深さ方向の色素分布に偏りが生じてしまったためであると考えられる。図3の2C-PSPで深さ方向に発光寿命が異なるのも、同様に溶媒蒸発時に色素が移動したためであると考えられる。

以上のように、平面方向の発光寿命分布をより一様にするためには膜厚を8 μm以上にしてばらつきを抑制し、深さ方向の一様性を高めるためには、1C-PSPで乾燥気味に塗布するとよいことが分かった。

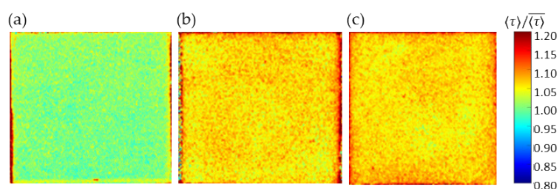


Figure 3 Change in normalized  $\langle \tau \rangle$  between the surface and the inside of the binder for 2C-PSP ( $d = 250$  nm): (a) on surface  $h = 16.2$   $\mu\text{m}$  (100%), (b)  $h = 13.8$   $\mu\text{m}$  (83.8%), and (c)  $h = 8.5$   $\mu\text{m}$  (53.3%).

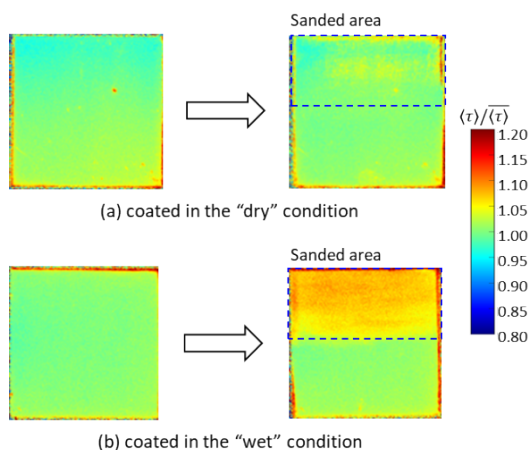


Figure 4 Change in normalized  $\langle \tau \rangle$  between the surface (left hand) and the interior (right hand) of the binder for (a) dry and (b) wet coating conditions: 1C-PSP ( $d = 30$  nm and  $h = 10$   $\mu\text{m}$ ).

## 5. 本研究に関する発表

- (1) Y. Egami, Y. Yamazaki, N. Hori, Y. Sugioka, K. Nakakita, "Investigation of Factors Causing Nonuniformity in Luminescence Lifetime of Fast-Responding Pressure-Sensitive Paints," *Sensors* Vol.21(18), 6076, (2021)
- (2) 江上 泰広, 浜田大地, 龍頭 幸彦, 「シルクスクリーンを用いて作成した高速応答 2 色 PSP に関する研究」, 第 49 回可視化情報シンポジウム, 慶応義塾大学(オンライン)P4, (2021)