

2C07 極超音速衝撃波計測を目指した DP-AA-PSP の発光特性の改良

○川又有真, 川島健, 沼田大樹（東海大学）

Improvement of the Emission Characteristics of DP-AA-PSP for Hypersonic
Yuma Kawamata, Takeru Kawashima and Daiju Numata

Key Words : Pressure-Sensitive Paint, Flow Visualization, Flow Measurement Technique

Abstract

In this study, we aimed to develop a DP-AA-PSP that can achieve a sufficient signal-to-noise ratio even under ultra-short exposure conditions required for hypersonic shock wave measurements. Based on the fabrication conditions reported by Kawamata et al., we investigated the effects of varying dye concentration and number of coatings on the properties of DP-AA-PSP. As a result, we successfully fabricated a PSP with higher luminescence intensity and performance than conventional DP-AA-PSP and ultra-fast response PSP. Although no significant improvements were observed in pressure sensitivity or time response compared to conventional DP-AA-PSP, it was found that dye concentration and number of coatings do affect these properties.

1. はじめに

宇宙往還機や極超音速航空機の開発の場において、極超音速で飛翔する物体の表面および周囲の流れ場を定量的に計測する事は重要である。しかしながら、極超音速で移動する物体上もしくは移動物体周囲の現象を時系列計測する場合においては、1 データ取得に許容されるサンプリング時間は極めて短時間であり、これらの現象を空間的に鮮明に捉えるためには一般的にサブマイクロ秒からナノ秒オーダーのサンプリング時間とする必要がある。

このような中、感圧塗料 (Pressure-Sensitive Paint, PSP) ⁽¹⁾を用いた非定常衝撃波現象の可視化計測法や飛翔体表面の圧力場の可視化計測法などが、PSP の応用例 ⁽²⁾として注目を集めている。極めて高速で推移する現象の場合、現象の空間方向に対するシャープさを維持するために、PSP 計測時には極短時間露光条件を設定するのが必須となる。そのため、このような計測に用いられる PSP は必然的に現象の検出に十分な発光強度を有することが求められる。また、高速で伝播する現象に起因する圧力変動を直ちに検出可能となる、高い時間応答性を有している必要もある。

このような中、我々のグループでは、超音速・極超音速飛翔体の表面圧力場および周囲圧力場計測に適用可能な新たな PSP として、色素塗装型陽極酸化皮膜型感圧塗料 (Dye-Painted Anodized-Aluminum PSP, DP-AA-PSP) を独自開発した。⁽³⁻⁵⁾ DP-AA-PSP とは、時間応答性能に優れた陽極酸化型 PSP の色素吸着

過程をディッピングからスプレーガンを用いた色素溶液の自動塗装に置き換えた PSP である。色素吸着過程は独自開発した自動塗装装置によって塗装が行われるため、色素吸着量などを厳密にコントロールする事が可能である。また、塗装条件を変更することで PSP の特性を様々に変更する事が可能である。DP-AA-PSP はその特徴として非常に速い時間応答性を有しており、最も時間応答性に優れたサンプルでは 90% 立ち上がり時間は 0.163 [μ s] を示している。⁽⁵⁾ この値は従来の最速の時間応答性を持つ Numata ら⁽⁶⁾によって開発された超高速応答型 PSP の 0.81 [μ s] を遥かに超える時間応答性である。このようにサブマイクロ秒オーダーの高い時間応答性を持つ DP-AA-PSP は、極超音速衝撃波の可視化計測において従来の PSP に比べ時間応答性で圧倒的な優位性を示している。また、その実用性は Kawamata らによりすでに実証されており、垂直衝撃波衝突時における三角柱周りの衝撃波現象の鮮明な可視化計測に成功している。⁽⁷⁾

本研究では、極超音速衝撃波の計測を実施する際に必須となる極短時間露光計測条件時においても十分な S/N 比で計測が実現できる DP-AA-PSP の開発を目的としている。その目的のもと、Kawamata らの DP-AA-PSP 作成条件 ⁽⁵⁾を元に色素溶液の濃度および塗装回数をパラメータとし、色素溶液の濃度および塗装回数が DP-AA-PSP の発光特性に及ぼす影響を調査した。また、作成した DP-AA-PSP を超高速応答型 PSP やKawamata ら⁽⁷⁾の報告した DP-AA-

PSP と特性比較する事で、その有用性を評価した。

2. 実験装置

2. 1 自動塗装装置

Fig.1 に東海大学沼田研究室で開発された自動塗装装置を示す。本装置は、塗装ブース内に設置されたスプレーガンを用いて事前に設定した塗装条件に従って動かすことが可能な装置である。色素塗装はプログラムに従い機械制御の下、塗装が行われるため塗膜の均一性や色素吸着量の厳密な制御などが可能である。また、作り手の塗装に関する技量に起因する再現性の問題や、塗装距離や塗装条件などの差によって生じるサンプル特性の差異等、手動塗装を行う上では避けられない各種の塗装上の課題を解消可能である。



Fig.1 Automatic painting system at Numata laboratory

2. 2 自動校正試験装置

Fig.2 に本研究で用いた自動校正試験装置の概念図を示す。本装置は圧力コントローラ（CPC4000, WIKA）を用いることで、校正チャンバー内の圧力を0.08 [kPa] から 1,000 [kPa] までの範囲において制御可能である。また、ペルチェコントローラ（TDU-5000AR, CELL）を用いることで、サンプル温度を 0 [deg. C] 程度から 50 [deg. C] 程度の範囲で変化させることが可能である。サンプル試験片からの発光検出には各種の撮像用カメラを用いることが可能である。校正試験時の光源としては各種の LED やキセノン連続光源が使用可能である。なお、サンプルの励起・発光スペクトルの調査のために、分光蛍光光度計（RF-6000, 島津製鉄所）を用いた分光計測が可能となっている。なお、校正試験時には、事前に設定した校正試験条件に基づき校正チャンバー内の圧力・温度が自動で変更されるため、それぞれの条件におけるサンプル画像や発光スペクトルデータは自動で収集される。

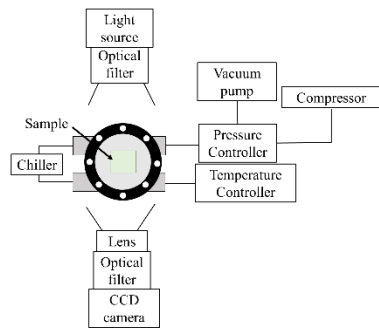


Fig.2 Schematic diagram of a calibration system

2. 3 無隔膜衝撃波管

Fig.3 に東海大学沼田研究室に設置された 60 mm × 150 mm 断面無隔膜衝撃波管を示す。この衝撃波管は隔膜部にゴム膜を用いており、補助高压室を加圧することで低压室と高压室をゴム膜で物理的に遮断する構造となっている。その後、低压室と高压室を所定の圧力まで調圧した後、補助高压室を瞬間的に減圧することによってゴム膜を補助高压室側に急激に引き込み、高压室と低压室を瞬時に一体化させることで、低压部に衝撃波を形成する。無隔膜式は隔膜式と比べ隔膜の破断を伴わないため、隔膜式で問題となる、隔膜の破膜状況や隔膜の破片により衝撃波の形成過程が影響を受けるという事態を回避できるメリットがある。そのため、試験毎の衝撃波マッハ数の再現性が一般的に高い。PSP の時間応答性の評価に本装置を用いる際には、試験部に衝撃波に正対する形で PSP 試験片を設置し、衝撃波衝突時の PSP サンプルの発光強度の時間履歴から PSP の時間応答性を決定することになる。

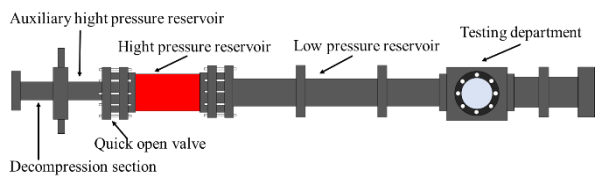


Fig.3 Schematic diagram of shock tube

3. 試験条件

3. 1 陽極酸化皮膜の作成

本試験では、色素吸着を行うバインダとしてリン酸型陽極酸化皮膜を用いた。陽極酸化を行うサンプルの素材は A1050 であり、Numata らの論文に記載の方法⁽²⁾を改良した条件でサンプル表面に陽極酸化皮膜を作成した。詳細な作成条件を Table 1 に示す。

Table 1 Anodizing condition

Sample material	Pure Aluminum (A1050)
Electrolyte	Phosphoric acid (0.3 mol/L)
Current density [mA/cm ²]	3.5
Electrolyte temp [deg.C]	10
Peak Voltage [V]	180

3. 2 陽極酸化皮膜への色素溶液塗装

本試験では色素溶液濃度と塗装回数をパラメータとして自動塗装装置を用いて色素塗装を行った．塗装条件の詳細は Table 2 に示す．
感圧色素にはピレンスルホン酸 (PSA, CAS No. 26651-23-0, Frinton Laboratories) を用い，溶媒としてアセトンを用いた．色素溶液の濃度は， 0.1 [mg/ml], 0.2 [mg/ml], 0.3 [mg/ml] の三条件で Table 2 の塗装条件に従い塗装を実施した．

Table 2 Painting condition

Painting distance [cm]	5
Number of paints [Times]	2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20
Air pressure setting [MPa]	0.025
Painting speed [mm/s]	25
Open degrees [deg]	45

3. 3 較正試験

本試験では, 2.2 で述べた自動較正試験装置を用いて較正試験を行った．較正試験では全てのサンプルについて，試験温度 20 [deg.C] の定温条件下で，圧力を 10 [kPa] から 150 [kPa] まで10 [kPa] 刻みに 15 条件変化させ，それぞれの条件における PSP の発光強度を取得した．取得した各圧力条件の発光強度から圧力感度を評価した．また，同様に全てのサンプルにおいて圧力 100 [kPa] の定圧条件下で, 温度を 10 [deg.C] から 30 [deg.C] まで 5 [deg.C] 刻みで変化させ，PSP からの発光強度の変化を取得する事で温度感度を評価した．
較正試験時の光源は UV-LED 光源（中心波長 365 nm）に Red Rejection 340 (OPTICAL FILTERS, ASAHI SPECTRA CO) を設置し，発光検知用のカメラとしては 12 bit CCD カメラ (ORCA-ERC4742-80-12AG, Hamamatsu Photonics K.K) を用いて，レンズとカメラの間に 450 nm ハイパスフィルタ (FILTER LONGPASS OD4 - 450 NM 25 MM, Edmund Optics) と 600 nm ショートパスフィルタ (Premium Short pass Filter, Cut-Off Wavelength: 600 nm, THORLABS)を設置することでカメラがサンプルからの 450 nm から

600 nm の波長の発光のみを検出できるよう検出系を構築した．

3. 4 発光スペクトル計測

本試験では，サンプル片を較正試験装置のチャンバー内に設置したうえで励起光を照射し，サンプル片の発光スペクトルを評価した．具体的には，圧力 100 [kPa] の定圧環境下において，温度条件を 20 [deg.C] から 10 [deg.C] に変化させた場合と 温度 20 [deg.C] の定温環境下で 圧力を 100 [kPa] から 10 [kPa] へ変化させた際の発光スペクトルの変化を分光蛍光光度計 (RF 6000, 島津製作所) を用いて調査した．励起光源には UV-LED 光源 (中心波長 365 nm) に Red Rejection 340 (OPTICAL FILTERS, ASAHI SPECTRA CO) を設置したものをを用いてサンプルを励起させた．

3. 5 時間応答性試験

本試験では, 2.3 で述べた無隔膜衝撃波管を用いて時間応答性試験を行った．本試験に用いたサンプルは，各色素溶液濃度において最も発光強度が高い塗装条件で作製したものであり，その詳細を Table 3 に示す． Fig. 4 に応答性試験のセットアップの模式図を示す．PSP サンプルは衝撃波管のエンドウォールに衝撃波に相対するように設置した．PSP の励起光源には Red Rejection 340 (OPTICAL FILTERS, ASAHI SPECTRA CO) を取り付けたキセノンフラッシュ光源 (SA-200F, 日進電子工業(株)) を用い，インダクターボックス (LB-5L (SA), 日進電子工業(株)) を取り付けることで，応答時間評価時の励起光強度が一定となるように調整した．発光検出器としては，較正試験時に用いた 2 枚のフィルタから構成されるバンドパスフィルタ (透過波長帯：450-600 nm) を取り付けた光電子増倍管 (Photomultiplier Tube (PMT), H10721-20, Hamamatsu Photonics K. K.)を用い，発光強度履歴をデジタルオシロスコープ (DS-4262, 岩通計測株式会社) でサンプリング速度 500 [MS/s] の条件で記録した．ステップ応答性試験の際にサンプルに衝突させる衝撃波は,試験部内初期圧を 30 [kPa], 高圧室圧力を 240 [kPa] とした場合に形成される,衝撃波 Mach 数1.5 程度の衝撃波を用いている．
解析時には，まず，PMT で検出した発光を較正式を用いて圧力値に変換し，圧力センサによって検出した実際の圧力値と比較することによって PSP の応答時間を決定した．なお，本稿では PSP によって計測した圧力上昇値が衝撃波衝突に伴う圧力上昇値の 90 % に相当するまでに要した時間 (90 % 立ち上がり時間) を PSP の応答時間として採用してい

る。

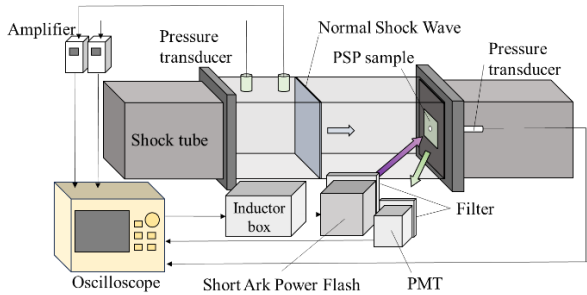


Fig.4 Schematic illustration of time response test setup

Table 3 Painting condition

	Dye solution concentration [mg/ml]		
	0.1	0.2	0.3
Painting distance [cm]	5		
Air presser setting [MPa]	0.025		
Open degrees [deg]	45		
Number of paint [Times]	14	8	20

4. 結果および考察

4. 1 塗装回数と溶液濃度が発光強度特性に及ぼす影響

Fig.5 に、色素濃度 0.1 [mg/ml]～0.3 [mg/ml] の溶液を用いて 2～20 回塗装を実施したサンプルの 100 [kPa] 条件下での発光強度の結果を示す. 図より、色素濃度が 0.1 mg/ml のサンプルでは、塗装回数の増加に伴い発光強度が増加しており、塗装回数 14 回以上からは約 1700 カウント付近で安定する傾向を示した. また、色素濃度 0.2 mg/ml の場合においては、塗装回数 8 回まで発光強度は増加傾向を示し、その後は約 2100 カウント付近で安定する傾向を示した. 一方で、色素濃度 0.3 mg/ml のサンプルにおいては、塗装回数が 20 回に達した時点でも発光強度の上昇が続いており、さらに塗装回数を増やすことで、より高い発光強度を持つサンプルが得られると推察される. しかしながら、塗装回数 14 回以降の発光強度の増加率は、それ以前と比較して低下していることから、他の濃度条件と同様に、ある塗装回数でピークを迎えて最終的に発光強度は安定化すると考えられる.

これらの結果から、色素溶液濃度が高いほど発光強度特性に優れた DP-AA-PSP の作成が可能であることが示された. また、本試験で作製したサンプルのうち最も高い発光強度を示したのは、色素濃度 0.3 mg/ml で 20 回塗装したサンプルであり、その発光強度は超高速応答型 PSP の約 3.5 倍、また過去に可視化試験に適用した DP-AA-PSP ⁽⁷⁾ の約 2.2

倍に達しており、従来に比べ極めて明るい DP-AA-PSP を得ることが出来た.

4. 2 塗装回数と溶液濃度が圧力感度に及ぼす影響

Fig. 6 に、色素溶液濃度 0.1～0.3 [mg/ml] の溶液を用いて 2～20 回塗装を行った場合における、作成サンプルの圧力感度の傾向を示す. 縦軸が圧力感度 [%/kPa] であり、横軸が塗装回数である. 図より、色素濃度 0.1 [mg/ml] のサンプルでは、塗装回数 4 回までは圧力感度が増加したが、それ以降は塗装回数の増加に伴って圧力感度が低下する傾向が確認された. 色素濃度 0.2 [mg/ml] においては、塗装回数の増加とともに圧力感度が一貫して低下し、20 回塗装時には約 0.27 [%/kPa] まで減少した. 一方、0.3 [mg/ml] のサンプルでは、0.1 [mg/ml] の場合と同様に塗装回数 10 回までは感度の向上が見られたが、10 回以降では急激な低下が見られた.

以上より、塗装回数および色素濃度は圧力感度に大きな影響を及ぼすと考えられる. 各濃度における若干の傾向の違いはあるものの、圧力感度は塗装回数の増加に伴い一般的に低下する傾向も見られ、先に述べた発光強度の増加のために単純に塗装回数を増やすという作業が結果として DP-AA-PSP を用いた可視化計測試験の S/N 比を悪化させる原因ともなりうる可能性も示された.

4. 3 塗装回数と溶液濃度が単位圧力変化における発光輝度値変化に及ぼす影響

4. 1, 4. 2の結果を踏まえ、圧力感度と発光強度の 2 つの観点を加味した発光特性評価法として、圧力感度と発光強度から計算される、単位圧力変化時における発光輝度値変化量に着目し塗装条件の影響評価を行った. Fig.7 に、色素濃度 0.1～0.3 [mg/ml] で塗装を行った場合における、各塗装回数における単位圧力変化あたりの発光輝度値変化量を示す. 縦軸は発光輝度値変化量であり、Fig.5, Fig.6 で得られた大気圧における圧力感度及び発光輝度値の値を各塗装回数に乗算して得られた値である. これは便宜的には圧力変化 1kPa における DP-AA-PSP の発光輝度値変化量を示しており、圧力感度とは異なり、同一強度の励起光で励起された場合における PSP の実計測上の圧力分解能と同義である.

図より、色素濃度 0.1 mg/ml のサンプルにおいては、塗装回数の増加に伴い発光輝度値変化量は増加する傾向を示した. 一方、色素濃度 0.2 [mg/ml] については、塗装回数 10 回程度で発光輝度値変化量は最大値を取り、その後塗装回数の増加に伴い減少する傾向を示した. 色素濃度 0.3 [mg/ml]のサンプル

においては、塗装回数の増加に伴い発光輝度値変化量は増加した。値は塗装回数 14 回でピークに達し、その後やや減少する傾向を示した。

色素濃度の観点で見ると、色素濃度の増加に伴い発光輝度値変化量が単純に増加するという傾向にはないが、最大の発光輝度値変化量が得られるのは、色素濃度が大きい条件であるという傾向が得られている。また、色素濃度が 0.2 [mg/ml] から 0.3 [mg/ml] に変化する際には、発光輝度値変化量の最大値は急激に大きくなり、0.2 [mg/ml] で得られた最大輝度値変化量の値が 0.3 [mg/ml] の場合においては 2 倍程度増加している。

これらの結果から、発光輝度値変化量の観点から整理すると、色素濃度 0.3 [mg/ml]、塗装回数 14 回前後の条件が、明るさと圧力感度の双方の値を考慮した場合における実計測上の最適条件であることが示された。また、この値は超高速応答型 PSP の約 3.7 倍、Kawamata らによって報告された DP-AA-PSP の約 2.2 倍の性能であり、溶液濃度と塗装回数最適化を行ったことで大幅な特性向上に成功したと言える。

4. 4 スペクトル計測

Fig.8 ~ Fig. 10 に溶液濃度が 0.1 [mg/ml] ~ 0.3[mg/ml] における、各波長において圧力が 90 [kPa] 変化した場合における発光強度の変化量を示す。横軸は発光スペクトル [nm] であり、縦軸は 10 [kPa] のスペクトル計測結果から大気圧のスペクトル計測結果を差し引いた値を、大気圧のスペクトル強度で除算した値である。つまり、縦軸の値の大小は、その波長域における圧力感度の有無、およびその大小と等価である。

Fig.8 より、溶液濃度 0.1 [mg/ml] の条件階においては全ての波長帯で圧力変化による発光強度の変化が見られた。よって、本試験で計測を行った 420 [nm]~ 700 [nm] の範囲すべてにおいて、本 PSP は圧力感度を持つことがわかる。また、発光強度の変化が最大化する波長帯は 470 [nm] 付近であり、溶液濃度 0.1 [mg/ml] で作成した DP-AA-PSP については、計測時に 470 [nm] 近辺の波長帯を用いるのが最も高い圧力感度を得られる事がわかる。620 [nm] 以降については圧力感度が急激に低下する傾向が見られた。塗装回数の観点から見ると、塗装回数の増加に伴い発光強度の変化率が増加する傾向があり、概ね塗装回数 8 回程度でピークを持った後減少し、一定値に収まるような傾向が見られた。

Fig. 9 より、溶液濃度 0.2 [mg/ml] の条件においても傾向は大きく変化せず、スペクトルの示す傾向は 0.1 [mg/ml] の場合と同様であった。塗装回数の

増加に伴い発光強度の変化率が増加し、塗装回数 8 回でピークを持った後に圧力感度が低下する傾向が見られた。これらの傾向は Fig.10 に示す 溶液濃度 0.3 [mg/ml] の結果においても同様の傾向を示し、塗装回数とスペクトルの関係に大きな差異は見られなかった。

上述の結果を踏まえ、スペクトルの観点からみ纏めると、どの溶液濃度においても最大の圧力感度を持つ塗装回数にあまり差異は見られず、定性的な傾向もほぼ同一であった。4.2 の較正試験の結果と比較しても、光学フィルタの選択やサンプルの明るさの影響によって若干のばらつきはあるものの、発光スペクトルに対する色素溶液濃度の影響は定量的なものにとどまり、定性的な傾向に及ぼす影響は少ないと考えられる。

4. 5 時間応答性

Fig.11 に、本試験における時間応答性試験で得られた圧力履歴を示す。本試験では各色素溶液濃度における最も明るい塗装条件のサンプルを試験に用いた。Table 4 に本試験で得た各サンプルの 90% 立ち上がり時間をまとめた。

表より、色素溶液濃度 0.2 [mg/ml] のサンプルが最も高い時間応答特性を持ち、その値は 0.81 [μs] であり、Numata らが開発した超高速応答型 PSP と同値であった。また、色素溶液濃度 0.1 [mg/ml]、0.2 [mg/ml] それぞれのサンプルの 90% 立ち上がり時間は、1.2 [μs]、0.9 [μs] となった。概ねどのサンプルにおいても 1 [μs] 近傍もしくはそれ以下の時間応答特性を示すことがわかり、非定常 PSP として非常に高い時間応答特性を有することが示された

5 結論

本研究では、極超音速衝撃波の計測を実施する際に必須となる極短時間露光計測条件時においても十分な S/N 比で計測が実現できる DP-AA-PSP の開発を目的として、Kawamata らの DP-AA-PSP 作成条件⁽⁷⁾を元に色素溶液の濃度および塗装回数をパラメータとし、色素溶液の濃度および塗装回数が DP-AA-PSP の発光特性に及ぼす影響を調査した。

本研究の結果、従来型の DP-AA-PSP 及び超高速応答型 PSP よりも優れた PSP の作成に成功し、大幅な発光強度の増加、および計測上で高い性能を示す DP-AA-PSP の塗装条件を見出すことが出来た。

一方で、圧力感度および時間応答性能に関しては従来の DP-AA-PSP と比べ顕著な向上は見られなかったものの、色素濃度および塗装回数がそれらの特性に影響を及ぼすことが明らかとなった。今後は、

塗装条件が DP-AA-PSP の特性に与える影響をさらに詳細に調査し、塗装条件の最適化を行う事で、さらなる性能向上を目指す計画である。

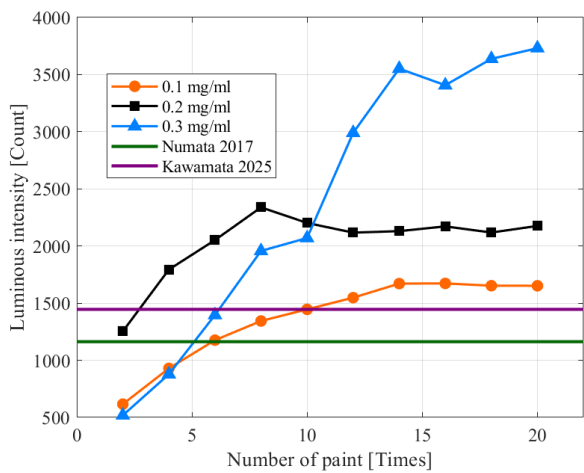


Fig.5 Effects of number of paint and solution concentration on luminous intensity

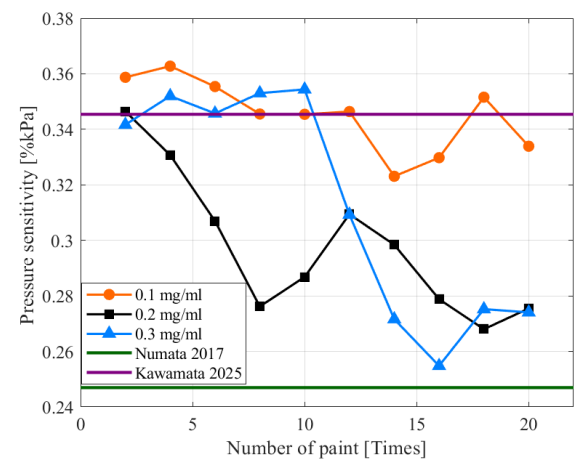


Fig.6 Effects of number of paint and solution concentration on Pressure sensitivity

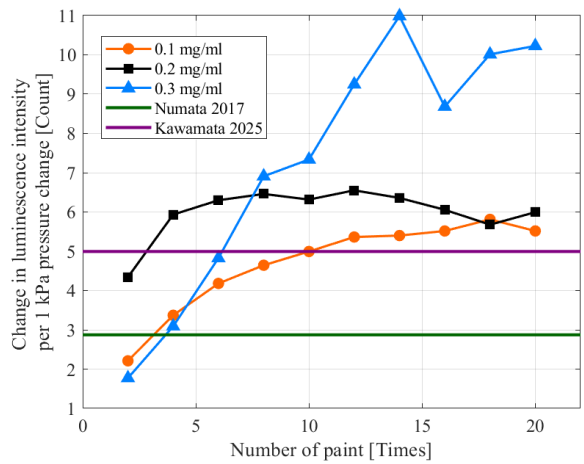


Fig.7 Change in luminescence intensity per 1 kPa pressure change at each number of paints

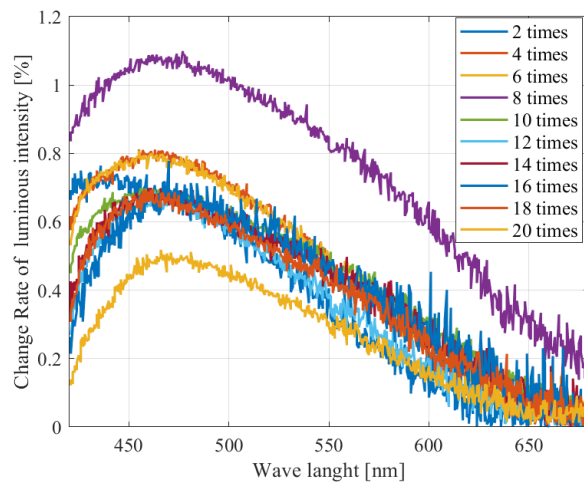


Fig.8 Pressure Sensitivity Spectra of PSP at a dye concentration of 0.1 [mg/ml]

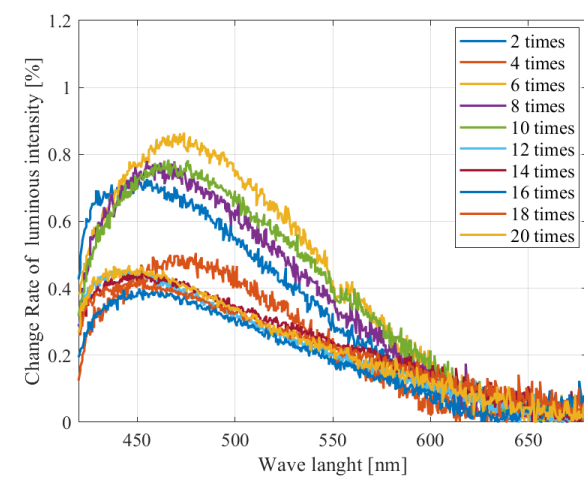


Fig.9 Pressure Sensitivity Spectra of PSP at a dye concentration of 0.2 [mg/ml]

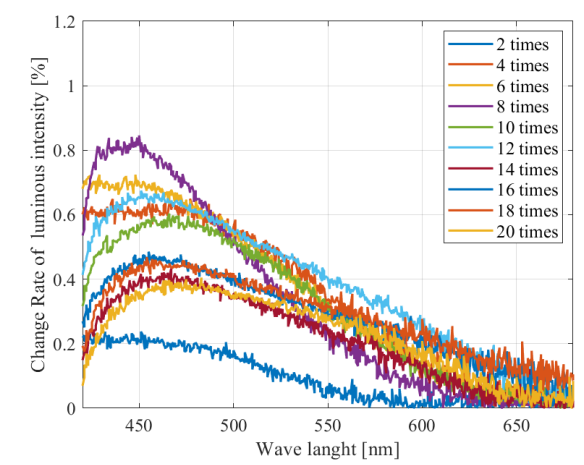


Fig.10 Pressure Sensitivity Spectra of PSP at a dye concentration of 0.3 [mg/ml]

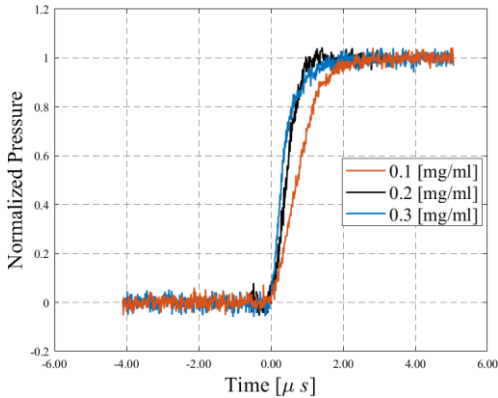


Fig.11 Rise history in responsiveness tests

Table 4 90% rise time for each Painting concentration

Dye solution concentration [mg/ml]	0.1	0.2	0.3
90 % rise time [μs]	1.2	0.81	0.9

参考文献

(1) Liu, T. and Sullivan, J. P. “Pressure and Temperature Sensitive Paints, Second Edition”, Springer-Verlag, (2021)

(2) Daiju Numata and Kiyonobu Ohtani, “Surface Pressure Measurement on Supersonic Free-Flight Projectiles Using Unsteady PSP Techniques”, AIAA SciTech Forum, AIAA 2018-3315, (2018)

(3) 川又有真, 川島健, 沼田大樹, 自動塗装装置を用いて色素吸着した陽極酸化皮膜型感圧塗料の開発, 2023 年度衝撃波シンポジウム 講演論文集 (2024)

(4) 川島健, 川又有真, 沼田大樹, 高速非定常衝撃波計測への適用に向けた色素塗装型 AA-PSPの開発, 第 56 回流体力学講演会講演論文集 (2024)

(5) Y. Kawamata, T. Kawashima, D. Numata, Effect of Spray Coating Parameters on the Characteristics of Dye-Painted Anodized Aluminum Pressure-Sensitive Paint, Proc. of the 2025 AIAA Scitech Forum, AIAA 2025-1062 (2025)

(6) Daiju Numata, Shota Fujii, Hiroki Nagai and Keisuke Asai, “Ultrafast-Response Anodized-Aluminum Pressure-Sensitive Paints for Unsteady Flow Measurement”, AIAA JOURNAL, Vol. 55, No. 4, pp.1118-1125 (2017)

(7) 川又有真, 川島健, 沼田大樹, 塗装型 AA-PSPを用いた非定常衝撃波現象の極短時間露光計測, 2024 年度衝撃波シンポジウム 講演論文集 (2025)