多様な感圧・感温物質とその諸特性*

江上 泰広**, 染矢 聡***, 松田 佑****, 満尾 和徳†, 沼田 大樹††

Various Pressure-and Temperature-Sensitive Substances and Their Characteristics

Yasuhiro EGAMI, Satoshi SOMEYA, Yu MATSUDA, Kazunori MITSUO and Daiju NUMATA

1. 緒 論

1980 年代に感圧塗料 (PSP), 感温塗料 (TSP) の研究が開始されて以来, 数多くの感圧・感温色素が提案されてきた。本論では, 材料の入手が容易な感圧・感温色素やバインダ物質で作成可能な感圧・感温塗料なものを中心に, PSP/TSP の圧力・温度感度などの諸特性について紹介する。PSP/TSP の諸特性については天尾¹⁾, Liu ら²⁾, 満尾ら³⁾の総説・著書の中でも詳細に述べられている。本論と併せて参照されたい。

2. 感圧塗料

感圧塗料 (PSP) は酸素分圧によって発光強度の変化する感圧色素とそれを模型の表面に担持するバインダからなる。代表的な PSP としてバインダにポリマを用いたポリマ型 PSP と陽極酸化処理することで多孔質化したアルミ基板に感圧色素を吸着させた陽極酸化型 PSP (AA-PSP) がある。PSP で使用される主な感圧色素とバインダを Table 1, 2 にそれぞれ示す。また, 感圧色素とバインダを様々な組み合わせた PSP の諸特性を Table 3 に示す。

PSP に使用される代表的な感圧色素としては, PtTFPP などのポルフィリン, Ru (dpp)₃ に代表されるルテニウム錯体, PBA などのピレン誘導体がある。PtTFPP はポリマをバインダとしたポリマ型 PSP として用いられることが多いのに対して, Ru (dpp)₃ やピレン錯体は AA-PSP の色素として用いられることが多い。

2.1 PtTFPP を用いた PSP

白金ポルフィリンの PtTFPP (Fig. 1 (a)) は, 光安定性が高く現在最も良く使用されている感圧色素の一つである。Fig. 2 の励起/発光スペクトル図に示すように

PtTFPP は 400nm (ソーレー帯) と 500-540nm (Q 帯) で励起され, 650nm に発光ピークを持つ。PtTFPP は Table 2 に示すような酸素透過性の高いポリマと組み合わせ使用される。この中で市販されているポリマは PTMSP, PIBM, PTBS である (Fig. 3)。Fig. 4 に PtTFPP を様々なポリマと組み合わせた場合の圧力校正試験の結果を示す。圧力 p と発光強度 I の関係は以下の Stern-Volmer の関係式で表される。

$$\frac{I_{\text{ref}}}{I} = A(T) + B(T) \frac{p}{p_{\text{ref}}} \quad (1)$$

ここで, ref は参照条件, A , B は Stern-Volmer 係数と呼ばれる温度の関数である。 B の値が大きいほど高い圧力感度をもつことを示す。PSP は温度感度を有し, 圧力だけでなく温度によっても発光強度が変化する。また温度により圧力感度が変化する場合もある。圧力感度や温度感度は色素とポリマの組み合わせにより変化する。

PTMSP はポリマの中で最も酸素透過性が高くガラス転移温度も高いため圧力感度が $B = 0.72$ と高く, 温度依存性 (温度感度) も $-0.29\%/^{\circ}\text{C}$ と低い⁴⁾。しかし, 酸素透過性が非常に高いため他の PtTFPP-PSP と比較すると発光強度が低い。PIBM も高い圧力感度 ($B = 0.81$) を示すが, 温度感度は $-1.7\%/^{\circ}\text{C}$ と高い。これは 100kPa における計測では 1.7kPa/ $^{\circ}\text{C}$ の圧力測定誤差に相当するため, 温度補正が必要となる場合がある。PTBS の温度感度は $-0.69\%/^{\circ}\text{C}$ と低いが, 圧力感度は上記 2 つと比較するとやや低い。

FIB は米国の ISSI 社から市販されている PSP 塗料のポリマであり, 比較的高価ではあるが高い圧力感度と低温度感度を両立している。また, JAXA は奈良女子大との共同研究で高圧力感度かつ低温度依存性のポリマ PHFIPM の開発に成功している^{3,6)}。また, これまでの研究で多く用いられてきた Poly (IBM-co-TFEM)¹⁾ は, 現在は市販されておらず入手困難になっている。

PSP の発光強度を増加させるにはポリマに対する色素濃度を増加させればよい^{2,3,7)}。しかし色素濃度を高くし過ぎると濃度消光が生じ, 逆に発光強度, 圧力感度が低下してしまう。許容される最大色素濃度はポリマや溶媒の種類でも異なるため, 予め試験で確認する必要がある。

* 原稿受付 2017 年 7 月 30 日

** 愛知工業大学 (〒470-0392 愛知県豊田市八草町八千草 1247, E-mail: egami@aitech.ac.jp)

*** 正会員 産業技術総合研究所 省エネルギー研究部門

**** 正会員 名古屋大学 未来材料・システム研究所

† 正会員 宇宙航空研究開発機構 航空技術部門

†† 正会員 東海大学 工学部 航空宇宙学科 航空宇宙学専攻

2.2 その他のポルフィリン系PSP

PtTFPP 以外の主なポルフィリン系の感圧色素としては PtOEP, PdTFPP, H₂TCPP などがある。PtOEP は PtTFPP と比較して光劣化率がやや高いものの、大気圧付近ではほぼ同様の特性を示す。また中心金属がパラジウムの PdTFPP は PtTFPP と比較して長い発光寿命を持ち、低酸素環境下で高い圧力感度を示す⁸⁾。また中心金属がない H₂TCPP は AA-PSP の感圧色素として用いられ、圧力感度は PtTFPP などと比較して低いものの、温度感度が $-0.09\%/^{\circ}\text{C}$ と非常に低いのが特徴である。

2.3 Ru(dpp)₃を用いたPSP

ルテニウム錯体の Ru(dpp)₃(Fig. 1 (b))は PtTFPP と並んで多く使用される感圧色素である。Fig. 2 示されるように Ru(dpp)₃は 400-470nm の青色で励起され、606nm に発光ピークを持つ。Ru(dpp)₃は RTV(シリコンポリマ)以外のポリマとの組み合わせでは、圧力感度が極度に低くなる場合が多く、アルミニウム合金を陽極酸化処理し表面が多孔質化した AA との組み合わせで

Fig. 1 Pressure-sensitive luminophores.

Fig. 2 Excitation and emission spectra of PtTFPP and Ru(dpp)₃.

Fig. 3 Polymers for PtTFPP-based PSP.

使用されることが多い^{2,9-10)}。

また, Ru(dpp)₃の発光寿命は大気圧・室温で約 1 μs と PtTFPP の約 5 μs と比較して短い。そのため Ru(dpp)₃/AA は時間応答性が高く非定常計測にも多く用いられている。Fig. 5 は Ru(dpp)₃を RTV と AA と組み合わせた場合の圧力較正試験の結果を示したものである。PtTFPP と比較すると若干低い圧力感度になっている。また, Ru(dpp)₃-PSP の温度感度は $-0.6 \sim -1.2\%/^{\circ}\text{C}$ の範囲となっている。多孔質な表面を持つ Ru(dpp)₃/AA は湿度の影響を受けやすいため、ステアリン酸などを用いて表面を疎水化することで湿度変化の影響を取り除く対策が提案されている¹¹⁾。

(a) PTMSP, PIBM, PTBS

(b) PHFIPM, FIB, poly(IBM-co-TFEM)

Fig. 4 Pressure calibration curves of PtTFPP-based PSP's.

Fig. 5 Pressure calibration of Ru(dpp)₃-based PSP's.

Table 1 Pressure-sensitive luminophores.

Luminophore	Cas No.	Synonyms	Purchase source
PtTFPP	109781-47-7	Pt(II) meso-tetra(pentafluorophenyl)porphine	Frontier Scientific, Inc. TriPorTech GmbH
PtOEP	31248-39-2	Pt(II) Octaethylporphine	Frontier Scientific, Inc. TriPorTech GmbH
PdTFPP	72076-09-6	Pd(II) meso-Tetra(pentafluorophenyl)porphine	Frontier Scientific, Inc.
H ₂ TCPP	14609-54-2	Tetrakis(4-carboxyphenyl)porphyrin	Aldrich
Ru(dpp) ₃	36309-88-3	Tris-(bathophenanthroline)ruthenium(II)chloride Tris(diphenyl-phenanthroline)ruthenium(II) dichloride complex	GFS Chemicals
PBA	3443-45-6	1-Pyrenebutyric acid	Aldrich /Wako
PSA	654055-00-2	1-Pyrenesulfonic acid	Aldrich /Wako

Table 2 Binder materials for pressure-sensitive paints.

Binder materials	Cas No.	Synonyms	Purchase source
PTMSP	87842-32-8	Poly(1-trimethylsilyl-propyne)	Gelest
PIBM	9011-15-8	Poly(isobutyl methacrylate)	Sigma Aldrich
PTBS	26009-55-2	Poly(4-tert-butylstyrene)	Sigma Aldrich
FIB		Fluoro/Isopropyl/Butyl polymer	ISSI
PHFIPM		Poly(hexafluoroisopropyl methacrylate)	JAXA
Poly(IBM-co-TFEM)		Poly(isobutyl-co-2,2,2-trifluoroethyl methacrylate)	Not available/ in house
RTV		Silicone rubber	Shin-Etsu
AA		Anodized Aluminum	In house ¹⁰⁾

Table 3 Pressure-sensitive paints.

Luminophore	Binder	Solvent	Excitation Wavelength (nm)	Emission Wavelength (nm)	Stern-Volmer Coefficient B	Temp. Sensitivity (%/°C)	Ref.
PtTFPP	PTMSP	Toluene	400	650	0.72	-0.29	1,4)
PtTFPP	PIBM	Toluene	400	650	0.87	-1.7	
PtTFPP	PTBS	Toluene	400	650	0.62	-0.69	
PtTFPP	FIB	Toluene	400	650	0.75	-0.50	5)
PtTFPP	PHFIPM	Ethyl acetate	400	650	0.70	-0.40	3,6)
PtTFPP	Poly(IBM-co-TFEM)	Toluene	400	650	0.79	-1.4	1,3)
H ₂ TCPP	AA	EtOH /MeOH	410	640 / 710	0.36	-0.07	9)
Ru(dpp) ₃	AA	Dichloromethane	460	620	0.45-0.60	-0.6 - -1.2	9-11)
Ru(dpp) ₃	RTV	Dichloromethane	460	620	0.29	-1.0	12)
PBA	AA	MeOH	355	410/480	0.4 - 0.55	-0.1	9-10)
PSA	AA	MeOH	355	405/480	0.6 - 0.7	-0.1	10)

2.4 ピレン誘導体を用いた PSP

PBA や PSA などのピレン誘導体は非常に短い発光寿命を持つため時間応答性に優れ AA と組み合わせた PSP が提案されている。モノマピークとエキシマピークの両方を同時に計測する事で温度感度を非常に低くすることができる。一方、励起には UV 光が必要となり、光学窓にも UV 透過可能な石英などが必要となる。また光劣化率が 40%/h と他の色素と比較して大きく、実験中に発光強度が低下するなど定量的なデータを得るのが容易ではないため、近年使用頻度は低くなってきている。

3. 感温塗料

3.1 室温用 TSP

感温塗料(TSP)は温度消光によって発光強度が大きく変化する発光体を透明性の高いポリマのバインダと組み合わせたものが多く用いられている。代表的な感温色素を Table 4 に示す。EuTTA^{2,13,14)} と Ru(phen)₃^{2,13)} は

高い感度を示すため良く用いられている。これらの色素の構造式を Fig. 6 に、励起/発光スペクトルを Fig. 7 に示す。EuTTA は 340nm 付近の UV 光で励起され、614nm に鋭い発光ピークを持つ。一方、Ru(phen)₃ は青色の 400-470nm に励起スペクトルのピークを持ち、580nm 付近で発光する。その他の感温色素には、Rhodamine B^{2,3,15)} などの蛍光体や近年では発光波長を調整可能な ZAIS^{16,17)} をはじめとする量子ドット(Q-dot)なども用いられはじめています。

TSP は PSP とは異なり酸素透過性の高いポリマは必要ではなく、逆に TSP の圧力感度と光劣化を抑制するため酸素バリア性の高いポリマが望ましい。TSP に用いられる代表的なポリマの一覧を Table 5, Fig. 8 に示す。またこれらを組合せた主な TSP の諸特性を Table 6 に示す。

EuTTA を種々のアクリルポリマと組み合わせた TSP の温度校正試験の結果を Fig. 9 に示す。

EuTTA-TSP は $-2.8\sim-4.2\%/^{\circ}\text{C}$ の温度感度を示し、ポリマのガラス転移温度以上の温度域で感度が高くなっていることが分かる。また EuTTA/PMMA は色素濃度によって発光強度だけでなく、温度感度も変化することが報告されている¹⁴⁾。しかし EuTTA は光劣化率が比較的大きく、励起に UV が必要であるというデメリットもある。そのため、JAXA では Eu 四核錯体 (Tetranuclear Eu(III) complex) という $350\sim420\text{nm}$ の可視光域を含む波長で励起可能で、かつ光耐性の高い感温色素が開発されており、温度感度も $-4.5\%/^{\circ}\text{C}$ と高い値を示している³⁾。DLR でも可視光で励起可能で高温感度の Eu 錯体 (Eu(III), 3-di(thienyl) propane-1,3- di-ones)が開発されている¹⁸⁾。一方、Ru(phen)₃は可視光の青色で励起でき、光劣化率も EuTTA と比較すると低いというメリットがある。また、EuTTA の発光寿命が約 $500\mu\text{s}$ と長いのに対して Ru(phen)₃は約 $1\mu\text{s}$ と短いため熱流束計測など温度を高い時間分解で計測する試験に適している。Ru(phen)₃は PMMA や PAA のポリマと組み合わせることでそれぞれ -4.5 、 $-2.7\%/^{\circ}\text{C}$ の温度感度を示している (Fig.10, Table 6.)。

3.2 高温用 TSP

100°C 以上の高温域における温度計測では、有機色素に代わって無機蛍光体のフォスファーが用いられることが多い¹⁹⁾。ここでは Table 7 に示す BAM と MFG について紹介する。高温域では、参照温度と実験温度での発光強度比から温度を算出する強度法だけでなく、発光寿命の変化から温度を求める寿命法も多用されている。BAM と MFG の温度による発光強度変化と発光寿命変

化をそれぞれ Fig.11, 12 に示す。BAM は $100\sim900^{\circ}\text{C}$ の幅広い温度域で温度感度があることが分かる。一方 MFG は $350\sim600^{\circ}\text{C}$ で高い感度を示すことが分かる。MFG は 631nm と 659nm に二つの発光ピークを持ち異なる感度を持つ。

Fig. 8 Polymers for TSP.

Fig. 9 Temperature calibration of Eu-based TSP's.

Fig.10 Temperature calibration of Ru(phen)₃-based TSP's.

Fig. 6 Temperature-sensitive luminophores.

Fig. 7 Excitation and emission spectra of EuTTA and Ru(phen)₃.

Fig.11 Intensity variations of BAM and MFG as TSP at a temperature range of $100\sim910^{\circ}\text{C}$.

Fig.12 Lifetime variations of BAM and MFG at a temperature range of 100–910°C.

Fig.13 Temperature calibration curves of cryoTSP's.

Table 4 Temperature-sensitive luminophores for room temperatures.

Luminophore	Cas No.	Synonyms	Purchase source
EuTTA	21392-96-1	Europium(III) thenoyltrifluoroacetate, trihydrate	ACROS
Tetranuclear Eu(III) complex		Europium (III) ₄ (μ-O)(2-hydroxy-4-dodecyloxybenzophenone) ₁₀	JAXA/ in house
Ru(phen) ₃	23570-43-6	Tris(1,10- phenanthroline) ruthenium (II) chloride	GFS Chemicals
Rhodamine B	81-88-9	Tetraethylrhodamine	Wako/ Sigma Aldrich
ZAIS		ZnS-AgInS ₂ (x=0.4)	In house
Ru(trpy) ₃	168922-04-1	Bis-(2,2',2''-terpyridine) Ruthenium (II) chloride	GFS Chemicals
Eu(hfc) ₃	34788-82-4	Europium(III) tris [3-(heptafluoropropylhydroxymethylene)-d-camphorate]	Sigma Aldrich

Table 5 Polymers for TSP.

Binder materials	Cas No.	Synonyms	Glass transition temperature, T_g , [°C]	Purchase source
PMMA	9011-14-7	Poly(methyl methacrylate)	99	Sigma Aldrich / Wako
PEMA	9003-42-3	Poly(ethyl methacrylate)	62	Sigma Aldrich
PBMA	9003-63-8	Poly(butyl methacrylate)	15	Sigma Aldrich
PAA	9003-01-4	Poly(acrylic acid)	106	Sigma Aldrich / Wako

Table 6 Temperature-sensitive paints for room temperatures.

Luminophore	Binder	Solvent	Excitation wavelength (nm)	Emission wavelength (nm)	Stern-Volmer coefficient B	Temp. sensitivity (%/°C)	Ref.
EuTTA	PMMA	Toluene	300-380	614	0.06	-2.8	14)
EuTTA	PEMA	Toluene	300-380	614	0.07	-4.2	14)
EuTTA	PBMA	Toluene	300-380	614	0.05	-4.0	14)
Tetranuclear Eu(III) Complex	PMMA	Toluene	350-420	615	0.0	-4.5	3)
Ru(phen) ₃	PMMA	Toluene+EtOH	450	580	0.05	-4.5	
Ru(phen) ₃	PAA	Toluene	450	580	0.0	-2.7	
Rhodamine B	AA	Hexane/toluene	407	625		-0.9	15)
Rhodamine B	PMMA	Toluene	407	625	0.05	-0.75	3)
ZAIS	PMMA	Toluene	250-420	532	0.08	-1.3	17)

Table 7 Temperature-sensitive phosphors for high temperatures.

Phosphor	Excitation wavelength (nm)	Emission wavelength (nm)	Useful temp. range (°C)	Temp. sensitivity (%/°C)	Purchase source	Ref.
BAM	350	452	100 - 900	-0.1 – -1.1	Tokyo Kagaku Kenkyusho Nemoto Lumi-Materials	
MFG	350	631 / 659	100 - 600	-2 (500°C)	Tokyo Kagaku Kenkyusho	

BAM: BaMgAl₁₀O₁₇:Eu, MFG: 3.5MgO·0.5MgF₂·GeO₂:Mn⁴⁺

Table 8 Temperature-sensitive paints for low temperatures (CryoTSP).

Luminophore	Binder	Excitation wavelength (nm)	Emission wavelength (nm)	Temp. sensitivity (%/K)	Ref.
Ru(trpy) ₃	Polyurethane	430-490	610	-1.5 (130K)	20-21)
Eu(hfc) ₃	Polyurethane	430-490	610	-2.3 (260K)	20)
Rhodamine B	AA	407	625	-2.2 (170K)	15)

3.3 低温用 TSP

低温風洞は、液体窒素を気化させ気流温度を 110K まで下げることで、縮尺模型を用いて実機レイノルズ数を実現できる高レイノルズ数風洞である。この低温風洞において、境界層遷移の可視化に TSP が近年盛んに用いられている²⁰⁾。低温風洞で用いられている感温色素には Ru(trpy)₃ や Eu(hfc)₃ があり (Table 8), Fig. 13 に示す通り、Ru(trpy)₃ は 100-300K の幅広い温度域で感度を示すが、250K 以上では発光強度が低くなり S/N が低下してしまう。そのためより高い温度域で高い温度感度と発光強度を有する Eu(hfc)₃ と組み合わせ 100-300K の幅広い温度域をカバーする 2 色 cryoTSP が提案されている²¹⁾。その他にも Rhodamine B を AA に吸着させたものが 170K 付近で -1.7%/K の温度感度を持つことが報告されている¹⁵⁾。

まとめ

本論では代表的な感圧・感温塗料の材料及び諸特性について紹介した。PSP, TSP を発展させていくには、様々な分野の方からの「こういうものを計測したい」という「ニーズ」が重要である。より多くの人に興味を持っていただき、分野を超えた協力を行うことで、さらに優れた PSP/TSP の開発を行っていきたいと考えている。

参 考 文 献

- 1) 天尾 豊：感圧塗料の測定原理-機能性分子センサーの調製と特性」, 可視化情報学会誌, 21(83), (2001), pp.209-215.
- 2) Liu T., Sullivan, J. P.: Pressure and temperature sensitive paints, Springer-Verlag Berlin Heidelberg (2005).
- 3) 満尾和徳, 中北和之, 栗田充, 渡辺重哉：JAXA 感圧塗料 (PSP) 計測システムの研究開発 (3)：感圧塗料編, 宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-13-006 (2014).
- 4) Egami, Y., Fey, U., Engler, R. H.: Appropriate Selection of Pressure-Sensitive Paint for Cryogenic Wind Tunnels, (2006), AIAA-2006-1045.
- 5) Puklin, E., Carlson, B., Gouin, S., Costin, C., Green, E., Ponomarev, S., Tanji, H., and Gouterman, M.: Ideality of pressure-sensitive paint I. Platinum tetra(pentafluorophenyl) porphine in fluoroacrylic polymer, J. Appl. Polym. Sci., Vol. 77, (2000), pp. 2795-2804.
- 6) Obata, M., Asato, R., Hirohara, S., and Mitsuo, K.: Effect of polymer matrix on the performance of pressure-sensitive paint comprising 5,10,15,20-tetrakis (pentafluorophenyl) porphinato platinum (II) and poly (1,1,1,3,3,3-hexafluoroisopropyl-co- tert- butyl methacrylates)", J. Appl. Polym. Sci., Vol. 133(16), (2016), 43316(P10).
- 7) Grenoble, S., et al: Pressure-sensitive paint (PSP): concentration quenching of platinum and magnesium porphyrin dyes in polymeric films, J. Luminescence, 113, (2005) pp. 33-44.
- 8) Mori, H., Niimi, T., Hirako, M., Uenishi, H.: Molecular Number Flux Detection using Oxygen Sensitive Luminophore, Phys. Fluids, Vol.17, 100610 (2005).
- 9) Kameda, M., Tezuka, N., Hangai, T., Asai, K.: Adsorptive pressure-sensitive coatings on porous anodized aluminium, Meas. Sci. Technol., 15(3), (2004), pp. 489-500.
- 10) Sakaue H., Anodized aluminum pressure sensitive paint for unsteady aerodynamic applications, PhD thesis, Purdue Univ. (2003).
- 11) Kameda, M., Yoshida, M., Sekiya T., Nakakita, K.: Humidity effects in the response of a porous pressure-sensitive paint, Sensor Actuat. B-Chem., Vol. 208 (2015) pp. 399-405.
- 12) Sakaue, H., Hayashi, T., Ishikawa, H.: Luminophore application study of polymer-ceramic pressure-sensitive paint, Sensors, Vol. 13 (2013), pp. 7053-7064.
- 13) Liu, T., Campbell, B., Burns, S. P., Sullivan, J. P.: Temperature and pressure-sensitive paints in Aerodynamics. Appl. Mech. Rev., Vol. 50, (1997), pp. 227-246.
- 14) Egami, Y., Matsuda, Y., Yamaguchi, H., Niimi, T.: Property changes of temperature-sensitive paint immobilized in acrylic polymer matrices, Sensor Actuat. B-Chem., Vol. 195, (2014), pp. 677-681.
- 15) Claucherty, S., Sakaue, H.: An optical-chemical sensor using rhodamine B on anodized-aluminum for surface temperature measurement from 150 to 500 K, Sensor Actuat. B-Chem., Vol. 240 (2017), pp. 956-961.
- 16) Torimoto, T., et al: Facile synthesis of ZnS-AgInS₂ solid solution nanoparticles for a color-adjustable luminophore, J. Am. Chem. Soc. Vol. 37 (2007), pp. 12388-12389.
- 17) Matsuda, Y., et al: ZnS-AgInS₂ nanoparticles as a temperature sensor, Sensor Actuat. B-Chem. 176 (2013), pp. 505-508.
- 18) V Ondrus, V., Meier R., Klein, Ch., Henne, U., Schaeferling, M., Beifuss, U.: Europium 1,3-di(thienyl)propane-1,3-diones with outstanding properties for temperature sensing, Sensor Actuat. A-Phys., Vol. 233, (2015), pp. 434-441.
- 19) Allison, S.A., Gillies, G.T.: Remote thermometry with thermographic phosphors: instrumentation and applications, Rev. Sci. Instrum., Vol. 7 (68) (1997), pp. 2615-2650.
- 20) Asai, K., et al: Boundary-Layer Transition Detection in a Cryogenic Wind Tunnel Using Luminescent Paint, J. Aircraft, Vol. 34(1), (1997), pp. 34-42.
- 21) Egami, Y., Fey, U., Klein, Ch., Quest, J., Ondrus, V., Beifuss, U.: Development of new two-component temperature-sensitive paint (TSP) for cryogenic testing, Meas. Sci. Technol., Vol. 23 (11), (2012), 115301 (p.10).