低温風洞における感圧塗料のヒステリシスに関する研究*

江上 泰広^{*1}, 飯島 由美^{*2}, 浅井 圭介^{*3}Hysteresis of Pressure-Sensitive Paint
in Cryogenic Wind TunnelsYasuhiro EGAMI^{*4}, Yoshimi IJIMA and Keisuke ASAI^{*4}Department of Micro-Nano Systems Engineering, Nagoya University,
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi, 464-8603 Japan

The causes of disagreement between *a priori* and *in situ* results of Pressure-Sensitive Paint (PSP) measurements in cryogenic wind tunnels have been investigated. Systematic experiments were conducted in the JAXA 0.1-m cryogenic wind tunnel to clarify the factors of the disagreement. In the experiments, the influence of total and static temperatures, and oxygen concentrations in the cryogenic wind tunnel on PSP results were evaluated. Consequently, it was detected that this disagreement originates in the difference between a total pressure-change calibration and a partial oxygen pressure-change calibration, and the hysteresis of luminescent intensity during pressurization and depressurization process at low temperatures less than 110 K.

Key Words: Pressure-Sensitive Paint, Pressure Measurements, Cryogenic Wind Tunnel, Hysteresis

1. 結 言

低温風洞は液体窒素を風洞中に噴射し気流温度を100 Kまで下げることでレイノルズ数を常温の約5倍に増加させ、さらに風洞内を加圧することで縮小模型を用いた実機レイノルズ数での風洞試験を可能にする。この低温風洞の試験において模型表面の圧力分布を測定することは大型航空機を開発するうえで重要な項目の一つである。近年、非接触の光学的面計測が可能な感圧塗料(PSP)計測法を低温風洞に適用する研究が精力的に進められてきている⁽¹⁾⁻⁽⁷⁾。

これまでPSP計測では、2つの較正方法により圧力の算出が行われてきている。1つは*in situ*較正法と呼ばれ、風洞実験中に取得した圧力孔データと感圧塗料の発光強度比とを対比し較正係数を求める方法である。他方は*a priori*較正法と呼ばれ、別途実施したサンプル校正試験で得られた圧力と発光強度の結果から較正係数を求める方法である。

通常、圧力 P と発光強度 I の関係はStem-Volmerの関係式で(1)式のように表される。

$$\begin{aligned}\frac{I_0}{I} &= 1 + K_{sv}[O_2] \\ &= 1 + K \cdot P_{O_2} \\ &= 1 + K \cdot (\phi \cdot P)\end{aligned}\quad (1)$$

ここで I_0 は酸素濃度ゼロにおける発光強度、 $[O_2]$ は酸素濃度、 P_{O_2} は酸素分圧、 ϕ は気流中の酸素モル分率、 K_{sv} 、 K は定数である。(1)式より、圧力 P を変化させても酸素モル分率 ϕ を変化させても同様の較正試験を行うことができることがわかる。従来低温風洞内での較正試験では、気流の総圧を一定に保ち酸素モル分率(酸素濃度)を変化させて*a priori*較正が行われてきた。これは風洞の総圧を変化させられる範囲が非常に限定されるためである。*a priori*較正法を用いると模型への圧力孔の設置が必要でなくなるため、最終的には*a priori*較正による圧力算出が望ましい。

しかし、これまで低温風洞PSP計測の研究において*a priori*較正法による結果は圧力孔データ(*in situ*較正法)と大きく異なった⁽¹⁾⁻⁽⁶⁾。その一例を図1に示す。これは14%円弧翼模型にPtTFPPを感圧色素、PTMSPをバインダとしたPSPを塗布し、マッハ数 $M=0.82$ 、総温 $Tt=100$ K、総圧 $Pt=190$ kPa、酸素濃度 $[O_2]=1000$ ppmにおいて行ったPSPによる流れ方向の圧力計測の結果である。図の横軸 x/C は無次元翼弦位置、縦軸 $-Cp$ は圧力係数を示す。*in situ*較正法(圧力孔)と*a priori*較正法による結果が大きく異なっていることが分か

* 原稿受付 2009年6月29日。

^{*1} 正員, 名古屋大学大学院工学研究科(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)。^{*2} (独)宇宙航空研究開発機構(〒182-8522 調布市深大寺東町7-44-1)。^{*3} 東北大学大学院工学研究科(〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉)。

E-mail: y.egami@coe.mech.nagoya-u.ac.jp

Fig. 1 Comparison of PSP-derived C_p distributions, *in situ* and *a priori* calibrations

る。異なる種類のPSPを用いた試験でもこの不一致は同様に観測されている⁽¹⁾⁽²⁾⁽⁴⁾。Erasquin Jr.⁽⁵⁾は総温100 Kと150 Kにおいて酸素濃度を100 ppmから21%まで変化させた較正試験を行った。感圧塗料にはRu(dpp)₃をTLCプレートに吸着させたものが使用した。その結果、試験に用いた気体の酸素濃度に関わらず酸素分圧で整理した圧力-発光強度較正曲線(Stern-Volmer曲線)は150 Kでは全て一致したのに対し、100 Kでは異なる結果になることを示した。これは100 Kにおいては、酸素分圧のみならず酸素濃度もStern-Volmer曲線に影響を与えていることを示している。

この*a priori*較正法と*in-situ*較正法の結果の乖離は、PSPの代表的な計測法である画像の発光強度比から圧力を算出する強度法のみならず、発光寿命の変化に基づく位相法計測においても確認されている⁽⁶⁾。

以上より、この圧力孔データと*a priori*較正法による結果の不一致は、計測法ではなく、低温におけるPSPで生じる物理的現象に由来すると推測される。

本研究では*a priori*較正法による結果と圧力孔データ(*in situ*較正法)の結果の不一致の原因を調べるため、PSPに対する総温、静温、酸素濃度の影響を評価するための系統的な試験をJAXA 0.1m遷音速低温風洞において行った。またそれらの結果から代替となる方法を提案する。

2. 低温風洞実験の概要

2.1 低温風洞用感圧塗料 本実験では、バインダに酸素透過性の非常に高い高分子(PTMSP: Poly[1-(trimethylsilyl)-1-propyne])、感圧色素に白金ポルフィリン PtTFPPを用いたポリマーベースPSP(PtTFPP/PTMSP)を使用し、模型のアルミ基板にエアブラシを用いて塗布した。

2.2 模型 本実験で使用した模型を図2に示す。模型上の全ての点で温度・圧力が等しくなるように平板模型(アルミニウム製)を用いた。この平板模

型の流れ方向の長さは $C=50$ mmであり、風洞側壁の一部をなしている。

2.3 実験装置^{(1)~(3)} 低温実験はJAXA 0.1 m遷音速低温風洞で行った(図3)。この風洞は回流連続式風洞であり、内部に液体窒素を噴射することによって気流温度を90 Kまで下げることができる。低温風洞の作動気体はほぼ純粋な窒素であり感圧塗料に必要な酸素が存在しない。そこで、本実験では測定部下流のストラットから風路に乾燥空気を送り込み、その流量を制御することで測定に必要な酸素濃度を得た。酸素濃度は0~2000 ppmの範囲で変化させることができ、風洞の排出ガスの一部をジルコニア式酸素センサに導くことによって酸素濃度を測定した。また、この風洞は加圧式風洞のため総圧を110~190 kPaまで変化させることができる。このように温度、酸素濃度、総圧を独立したパラメータとして変化させることができる。また、測定部断面における総温と総圧変動はそれぞれ1.5 Kおよび0.1%以内であり、壁面近傍においても総温、酸素濃度の均一性は保たれている⁽⁷⁾。

図4に光学計測系の模式図を示す。風洞の測定部の断面は10 cm角の正方形で、側壁には長さ50 mmの平板模型(図2)が取り付けられ、もう一方の側壁の光学窓から観測できるようになっている。

模型に塗布されたPSPはキセノンランプによって励起され、PSPの発光強度の測定には浜松ホトニクス製の高感度CCDカメラ(解像度14 bit,有効画素数1000×1018ピクセル)を用いた。励起光源には400±50 nm, CCDカメラには650±50 nmの干渉フィルタを取り付けた。励起光とPSPからの発光はダイクロイックミラーを用いて分離した。

2.4 試験条件 本実験ではPSPに対する総温、静温、酸素濃度の影響を評価するために、以下の三条件で試験を行った。これらの試験条件では酸素分圧が低いので酸素の液化は生じない。

試験1: 総温の影響の評価 総圧 $P_t = 190$ kPa, $M = 0.4$ 一定条件で、総温 T_t を140 Kから90 Kまで10 K刻みで変化させて較正試験を行った。酸素分圧は酸素濃度によって変化させた。

試験2: 模型近傍の気流温度(静温)の影響の評価 総温 $T_t = 100$ K一定で $M = 0.4$ (静温 $T_s = 96.9$ K)と $M = 0.9$ ($T_s = 86.1$ K)の模型近傍の2つの異なる気流温度で較正試験を行い、結果を比較した。

試験3: 酸素濃度の影響の評価 総温 $T_t = 140$, 100 K, $M = 0.4$ において、3つの総圧条件($P_t = 110$, 150, 190 kPa)のもと酸素濃度を変化させて較正試

Fig.2 Schematic of a flat plate model

Fig.3 Schematic of the JAXA 0.1m-transonic cryogenic wind tunnel

Fig.4 Optical setup for Schematic of a flat plate model

験を行い、酸素濃度を増減させた場合と、総圧を変化させた場合の結果を比較した。

3 実験結果

3-1 試験1：総温の影響 $M=0.4$, 総圧 $P_t=190$ kPa一定条件のもと総温 T_t を 140 K から 90 K まで 10 K 刻みで下げて行き較正試験を行った。図 5 (a)-(d) にその内 $T_t = 140, 110, 100, 90$ K で行った較試験の Stern-Volmer 曲線を示す。実験では酸素濃度を増減させることで酸素分圧の昇圧・降圧を行っている。試験ではまず昇圧試験を行い、次に減圧試験を行った。図 5 では昇圧時の酸素分圧 $P_{O_2} = 100$ Pa における発光強度 I を参照発光強度 I_{ref} としている。図から分かるよう

Fig.5 Calibration results of PtTFPP/PTMSP at $M=0.4$ and $P_t=190$ kPa; (a) $T_t=140$ K, (b) 110 K, (c) 100 K, and (d) 90 K. The reference intensities were taken at $P_{O_2}=100$ Pa in the first pressurization process at each condition.

に $T_t=140, 110$ K では昇圧時と降圧時でグラフが一致しているのに対し、 $T_t=100, 90$ K では昇圧時と比較して降圧時に上に凸になり一致していない。この差は

測定誤差に対して充分大きく、再現性もある有意な差である。このヒステリシス現象は $T_t = 100\text{ K}$ 以下でのみ見られた。これは酸素の模型表面への吸着と脱着に差があるためだと推測される。

図5(d)は $M=0.4$, $T_t=90\text{ K}$ において昇圧降圧を繰り返した結果である。二度目の昇圧の終点(点B)が一度目の昇圧の終点(点A)と比較して上方へシフトしていることがわかる。これは昇圧の曲線上にない降圧時の点が次の昇圧時の始点となるためである。このように $T_t=100\text{ K}$ 以下ではPSPの発光強度は試験時の昇降圧の全ての履歴に影響されて変化するため、*a priori* 較正の誤差要因となることが分かった。

3・2 試験2：模型近傍の気流温度(静温)の影響

図6に $M=0.9$, $P_t=190\text{ kPa}$, $T_t=100\text{ K}$ における較正試験の結果を示す。これは、図5(c)と模型温度(総温)はほぼ等しく、模型表面近傍の気流温度(静温)のみ異なる条件となっている。試験1同様、まず昇圧試験を行い、次に減圧試験を行っている。図より、 $M=0.9$ ($T_s=86.1\text{ K}$)では $M=0.4$ ($T_s=96.9\text{ K}$)の場合と比較して、降圧時により大きなヒステリシスが生じていることが分かる。従来、模型温度が等しければPSPは同じ振る舞いをすると言われていたが、低温・低酸素環境ではPSPは模型表面近傍の気流温度からも影響を受けることが分かった。

3・3 試験3：酸素濃度の影響

次に酸素モル分率のStern-Volmer曲線への影響を調べるために $M=0.4$ において3つの酸素濃度のもと、総圧の影響を調べた。図7(a), (b)はそれぞれ $T_t=140\text{ K}$ と 100 K の結果を示している。参照発光強度 I_{ref} には、 $P_t=190\text{ kPa}$, 酸素分圧 $P_{O_2}=100\text{ Pa}$ における発光強度を用いている。

図より Stern-Volmer 曲線の軌跡が総圧により異なることが分かる。同じ酸素分圧でも総圧が小さくなると発光強度比 I_{ref}/I の値が大きく(発光強度 I が小さく)なっていることが分かる。気流中の酸素モル分率が大きくなると模型表面に吸着する窒素と酸素のうち酸素の割合が大きくなる。そのため発光強度が減少したものと推測される。その傾向は総温が低くなるとより顕著になった(図7(b))。

またグラフには、酸素濃度一定で、圧力を変化させた場合を併せて示している(太実線)。図より、総圧を変化させた較正試験の結果と、酸素濃度(酸素分圧)のみを変化させた較正試験の結果が大きく異なることが分かる。従来の研究で *a priori* 較正に用いられてきた酸素濃度を変化させて得られた較正試験の結果(図7(b)の $P_t=190\text{ kPa}$ のグラフ)と比較して、酸素濃

度一定のもと総圧を変化させた場合のグラフは傾きが小さくなっていることが分かる。前述の通り、常温で行われる通常の較正試験では両者は一致することが知られている。しかし低温・低酸素環境では気体の拡散よりも吸着が支配的になるため、このような差が現れたものと考えられる。よって、この酸素分圧を変化させた較正試験と総圧を変化させた較正試験の Stern-Volmer 曲線の差が、従来の *a priori* 較正法と圧力孔データの不一致の大きな要因になっていると推測される。

Fig. 6 Calibrations of PtTFPP/PTMSP at $M=0.9$, $P_t=190\text{ kPa}$ and $T_t=100\text{ K}$. The reference is the intensity at $P_{O_2}=100\text{ Pa}$ during the pressurization.

Fig. 7 Calibrations of PtTFPP/PTMSP at $M=0.4$, and three total pressures; (a) $T_t=140\text{ K}$ and (b) 100 K . The reference is the intensity at $P_{O_2}=100\text{ Pa}$, $P_t=190\text{ kPa}$.

Fig.8 Comparison of PSP-derived C_p distributions, *in situ*, *a priori* and modified *a priori* results at $T_t=100\text{K}$, $P_t=190\text{ kPa}$ and $[O_2]=1000\text{ppm}$.

3・4 修正 *a priori* 較正法 図 7(b) の $M=0.4$, $T_t=100\text{ K}$, $[O_2]=1000\text{ ppm}$ 一定条件下で得られた総圧変化の *a priori* 曲線 (図 7(b) の 1) を用いて図 1 の円弧翼上の圧力分布を再計算した結果を図 8 に示す。従来の総圧一定下で酸素濃度を変化させた *a priori* 較正と比較して圧力孔データに近い値になり、誤差が大きく減少していることが分かる。これにより低温・低酸素環境下では酸素濃度を一定で総圧を変化させた *a priori* 較正法を行う必要があることがわかった。

修正 *a priori* 較正と圧力孔のデータとの差は、昇圧・降圧のヒステリシスによる発光強度の変化によるものと考えられる。今後は圧力孔の参照データを使用することで、ヒステリシスが生じる 100K 以下で試験を行う際のこれらの誤差要因を補正する方法を調査する予定である。

4 結 言

低温風洞 PSP 計測における *a priori* 較正法による結果と圧力孔データが一致しない問題の要因を明らかにするために、系統的試験を JAXA 0.1m 低温風洞で行った。

- 1) 総温が 100K 以下になると酸素分圧の昇降時にヒステリシス現象が現れた。これより PSP の発光強度は試験時の圧力変化全ての履歴に影響されて変化し、誤差要因となることが分かった。
- 2) 模型温度が等しくても模型近傍の気流温度が低くなると、PSP はその影響を受けて 100K 以下ではヒステリシスが大きくなることが分かった。

- 3) 低温・低酸素環境では、総圧を変化させて行った較正試験と酸素分圧のみを変化させて行った較正試験の結果が異なることが分かった。
- 4) 酸素濃度を一定で総圧を変化させた較正試験の結果に基づく *a priori* 較正法の較正式を用いて円弧模型上の圧力分布を再計算したところ、圧力孔データとの誤差は大幅に減少した。よって低温・低酸素環境下で圧力値を正しく算出するためには、この修正 *a priori* 較正法が有効であることがわかった。

文 献

- (1) Asai, K., Kanda, H., Cunningham, C.T., Erausquin, R., and Sullivan, J.P., Surface Pressure Measurement in a Cryogenic Wind Tunnel by using luminescent coating", *17th International Congress on Instrumentation in Aerospace Simulation Facilities*, ICIASF RECORD'97, (1997), pp.105-114.
- (2) Sakaue, H., Sullivan, J. P., Asai, K., Iijima, Y., and Kunimasu, T., Anodized Aluminum Pressure Sensitive Paint in a Cryogenic Wind Tunnel, *ISA 45th International Instrumentation Symposium*, (1999), pp.345-354.
- (3) Asai, K., Amao, Y., Iijima Y., Okura I., and Nishide, H., Novel Pressure Sensitive Paint for Cryogenic and Unsteady Wind Tunnel Testing, *Journal of thermophysics and heat transfer*, 16(1) (2002), pp.109-115.
- (4) Erausquin, R., Cunningham, C., Sullivan, J.P., Asai, K., Kanda, H., and Kunimasu, T., Cryogenic Pressure Sensitive Fluorescent Paint Systems, *36th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, (1998), AIAA Paper-98-0588.
- (5) Erausquin Jr. R., Cryogenic Temperature- and Pressure- Sensitive Fluorescent Paints, *A Master Thesis of Purdue University*, (1998).
- (6) Egami, Y., Iijima, Y., Asai, K., and Sullivan J.P., Application of Phase-Based Technique to PSP Measurements in a Cryogenic Wind Tunnel, *22nd Visualization Sympo., Journal of Visualization*, Suppl. 22. No.1, (2002), pp313-316.
- (7) Aoki, T., Sawada, H. Measurement of free-stream properties in the NAL $0.1\text{ m} \times 0.1\text{ m}$ transonic cryogenic wind tunnel, *Technical Report of National Aerospace Laboratory*, TR-1221, (1993)
- (8) Egami, Y., Fey, U., Engler R. H., Appropriate Selection of Pressure-Sensitive Paint for Cryogenic Wind Tunnels, *44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, (2006), AIAA-2006-1045.