B 3 1 1

低温風洞への Lifetime Imaging 法の適用可能性

小嶋 俊之[○], 永井 大樹, 浅井 圭介(東北大学)

満尾 和徳, 飯島 由美, 坂上 博隆(宇宙航空研究開発機構)

Application of Lifetime PSP Imaging Method to a Cryogenic Wind Tunnel

Toshiyuki KOJIMA, Hiroki NAGAI and Keisuke ASAI
Kazunori MITSUO, Yoshimi IJIMA and Hirotaka SAKAUE

ABSTRACT

The intensity-based method is a most common technique by which Pressure-Sensitive Paint images can be converted to the surface pressure. However, this method cannot be applied to a cryogenic wind tunnel because the thermal equilibrium condition cannot be achieved when stopping the tunnel to take the wind-off reference image. In the present experiment, we applied the lifetime-based method to a cryogenic wind tunnel to calculate surface pressure from two images obtained during the wind-on condition. In this experiment, the circular-arc bump model sprayed with PtTFPP/PTMSP paint was tested at the JAXA 0.1m Cryogenic Transonic Wind Tunnel using a UV-LED pulse illuminator and a multi-gated CCD camera. As a result, we could succeed in visualizing surface pressure distribution induced by a shock wave on the model by using lifetime PSP imaging method. This result has demonstrated a feasibility of using lifetime imaging method to a cryogenic wind tunnel.

Keywords: Pressure Sensitive Paint, Cryogenic Wind Tunnel, Lifetime Imaging Method

1. 結 論

新型航空機を開発する上で、実際のレイノルズ数を模擬した風洞試験を行うことは重要になる。そのような環境を模擬するため、一般的に低温風洞が用いられている。この風洞では気流温度を 100K に下げて動粘性係数を小さくすることで、高レイノルズ数を達成することができる。

低温風洞での試験において模型表面上の圧力分布を計測することは重要な項目になる。そこで近年、分子センサの一種で、物体表面上の圧力を面分布で捉えることが可能な感圧塗料 (PSP: Pressure Sensitive Paint) を用いた圧力計測法を低温風洞に適用させる研究が精力的に進められてきている¹⁾。従来、PSP を使う計測法の中では強度法と呼ばれる計測法が主流であった。これは通風時画像と無風時画像の2つを必要とし、それら2つの発光強度比から圧力を算出する。しかし気流中に液体窒素を噴霧することで気流温度を低温に維持している低温風洞では無風時画像を取得することができないので、この方法は使えない。

そこで注目されるのが Lifetime Imaging(寿命計測)法

である。この計測法は強度法とは違い、圧力を算出する際に無風時画像を必要としないため、低温風洞での使用に適していると考えられる。

本研究では寿命計測法を低温風洞に適用し、その有用性を証明するために PtTFPP/PTMSP を塗装した2次元円弧翼模型を JAXA0.1m 遷音速低温風洞に入れて実験を行った。その際、寿命計測法によって算出された圧力を従来の静圧孔による計測値との比較を行った。本論では実験から得られた結果と、低温風洞への寿命計測法の適用可能性について述べる。

2. 寿命計測法

PSP の発光寿命は基礎式である以下の Stern-Volmer 関係式

$$\frac{\tau_{ref}}{\tau} = A(T) + B(T) \cdot \frac{P}{P_{ref}} \quad (2.1)$$

に従う。ただし、 τ は寿命、 T は温度、 P は圧力をそれぞれ表す。さらに、添え字の ref は参照状態を意味する。 $A(T)$ 、 $B(T)$ は塗料に固有の係数 (Stern-Volmer 係数) で、温度の関数で表される。この式から、寿命は圧力 P と温

度 T の関数となっていることが分かる。

$$\tau = f(P, T) \quad (2.2)$$

また、励起光 $E(t)$ を照射した際の塗料からの発光強度 $I(t)$ は(2.3)式のように表される。

$$\frac{dI}{dt} = -\frac{I}{\tau} + E(t) \quad (2.3)$$

励起光にパルス光を用いると(2.3)は

$$I(t) = I_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (2.4)$$

のような簡単な式で表すことができる²⁾。ここで、 I_0 は $t=0$ における塗料の発光強度を意味する。(2.4)は塗料の発光減衰過程は $\exp$ の関数として表すことができることを示している。

CCD カメラを用いたイメージング法で発光減衰の寿命を計測するには PSP からの発光強度と圧力を関連付けることが可能な、gated intensity method を使用する (Fig.1)²⁾。この方法では塗料の発光減衰過程に異なる

Fig. 1 Lifetime Method Based on Two Gated Intensity Images

いくつかの区間で積分し、その比をとる。すなわち n 番目のゲートにおける発光強度は以下ようになる。

$$I_n = \int_{a_{n1}}^{a_{n2}} I dt = I_0 \int_{a_{n1}}^{a_{n2}} e^{-\frac{t}{\tau}} dt = -\tau I_0 \left(e^{-\frac{a_{n2}}{\tau}} - e^{-\frac{a_{n1}}{\tau}} \right) \quad (2.5)$$

ただし、積分区間は a_{n1} から a_{n2} である。この時 a_{n1} を “gate delay”, 積分区間 $\Delta t_{na} (= a_{n2} - a_{n1})$ を “gate width” とそれぞれよぶ。従って 2 ゲートの際の発光強度比は

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{e^{-\frac{a_{12}}{\tau}} - e^{-\frac{a_{11}}{\tau}}}{e^{-\frac{a_{22}}{\tau}} - e^{-\frac{a_{21}}{\tau}}} = g(\tau) \quad (2.6)$$

となる。(2.6)より、発光強度比は寿命と対応付けることができる。故に、(2.2)を(2.6)に代入すると

$$\frac{I_1}{I_2} = F(P, T) \quad (2.7)$$

(2.7)は、2 ゲートの発光強度比が圧力と温度の関数となることを表している。

本試験で使用する低温風洞では層流領域と乱流領域における断熱壁面温度の差が極めて小さいため、模型表面上の温度分布は無視することができる³⁾。つまり(2.7)は(2.8)のように書き換えることができる。

$$\frac{I_1}{I_2} = F(P) \quad (2.8)$$

実際には塗料の発光減衰は(2.4)で示した単純な指数関数では表現できない。しかし、較正係数を実験的に求めればここで展開した議論が成立する。

3. 感圧塗料

今回の風洞試験で使用した PSP は、PtTFPP(色素)、PTMSP(ポリマー)をトルエン(溶媒)に溶かした溶液である。PtTFPP の励起波長は 400nm、発光波長は 650nm でそれぞれピーク値をとる。PTMSP は低酸素領域で非常に高い酸素透過性を有するポリマーである⁴⁾。低温風洞は作動流体が窒素ベースであるため、非常に酸素透過性が良いとされるこのポリマーを選定した。この 2 つをトルエンに溶かした溶液をエアガンでスプレー塗装した。また、この塗料は事前に行った低温風洞と同じ環境下におけるサンプル試験で、寿命法・強度法ともに圧力感度を有することを確認した。

4. 低温風洞

4.1 実験装置⁴⁾

Fig.2 に今回の実験で使用した JAXA 0.1m 遷音速低温風洞(測定部断面 0.1m, TCWT)の模式図を示す。この風洞は連続式回流風洞で、気流中に液体窒素を噴霧することで気流温度を 90K まで下げることができる。作動流体はほぼ純粋の窒素であり、感圧塗料に必要な酸素が存在しない。そこで、本実験では外部から乾燥空気を測定部下流に設けたストラットから送り込み、その流量を制御することで必要な酸素濃度を得た。酸素濃度は、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で

Fig. 2 Diagram of the JAXA 0.1m TCWT

モニタした。今回の試験の条件を Table1 にまとめる。

Fig.3 に本試験で用いた、翼弦長 50mm、厚み比 14% の 2 次元円弧翼模型(アルミニウム製)の概略図を示す。JAXA 0.1m TCWT は同型の模型を 5 つ並べることで 1 セットになる。中央の模型には、PSP の *in-situ* 校正用に 16 点の静圧孔が設けられている。また、PSP の膜厚による影響も同時に調べるために 2 つの模型を用意し、スプレー回数 50 回のを Model A、26 回のを Model B とした。残りの 2 つは同じ形状で、何も塗装していない模型を取り付けた。

Fig. 3 14% Circular Arc-Bump Model

Fig.4 は光学計測系の模式図を表している。試験模型は測定部の側壁に取り付けられ、反対側の側壁に直径 70mm の観測窓がある。計測には満尾等が開発した寿命計測システム(LIS) ^{5),6)}を用いた。励起光として色ガラスフィルタ(400±50nm)を取り付けた UV-LED、検出器としてバンドパスフィルタ(650±20nm)を取り付けたマルチゲート CCD カメラを用いた。また、励起光と塗料からの発光はダイクロイックミラーで分離した。今回の試験で、寿命計測を行った際のカメラの設定条件を Table2 にまとめる。

Fig. 4 Lifetime Imaging System Set-up for the JAXA 0.1-m TCWT

また今回の試験では、寿命計測法との比較のため強度法による計測も行った。ただし、強度法による計測の際には励起光に YAG レーザー(532nm)を用いた。通常、強度法では無風時画像と通風時画像の 2 つのデータが必要である。しかし低温風洞では低温を維持したまま風洞を停止させることができない。そのため、今回は衝撃波を

発生しない $M=0.4$ における低速画像を無風時画像として代用した ⁴⁾。

Table 1 Experimental Condition

Total temperature	100[K]
Total pressure	110[kPa]
Oxygen concentration	1000[ppm]
Mach number	0.82
Reynolds number	5.94×10^6

Table 2 CCD Camera Condition

	gate delay[μs]	gate width[μs]
gate 1	3	2
gate 2	80	40

5. 試験結果

Fig.5 に寿命計測法における各モデルの *in-situ* 校正結果を表したグラフを示す。この校正法は通風時における塗料からの発光強度と静圧孔データとを関連させて行う。このグラフより、Model A と Model B における校正式が大きく異なることが確認できる。つまり今回の試験において、寿命計測法は膜厚の影響を受けていると言える。

Fig. 5 *in-situ* Calibration (Lifetime Method)

Fig.6 に Model A の *in-situ* 校正結果より求まる表面圧力分布を示す。次に Fig.7 には模型中央付近の翼弦方向への圧力プロファイルを示す。これらの図より、模型の前縁部分から徐々に圧力が減少していき、前縁から 60% の付近で急激に圧力が大きくなっているのがわかる。これは遷音速における典型的な圧力分布であり、急激な圧力上昇は、衝撃波であると考えられる。このことは模型の形状および風洞の設定条件により、予想された結果であり、寿命計測法の低温風洞の適用が妥当であることを示している。

しかしノイズ成分が大きい、模型のエッジにおいて圧力感度の無い領域がある、ということの問題点も明らかになった。前者の理由としては、gate1 でのゲート幅が非常に短いため、塗料からの発光を十分に捉えることができなかったことが考えられる。後者に関しては、原因はまだ特定できていない。そのため今後、その原因を深く

調べていく必要がある。

Fig. 6 Pressure Field
(Lifetime Method : Model A)

Fig. 7 Pressure Distribution : Model A
(Lifetime Method / *in-situ* Calibration)

次に強度法データとの比較を行う。まず Fig.8 に強度法での各モデルにおける *in-situ* 較正結果のグラフを示す。本法では寿命法のと看に見られたような Model A と Model B における較正式に大きな違ひは見られなかつた。このことから、強度法では寿命法で見られたような膜厚依存性が見られなかつたといえる。

Fig. 8 *in-situ* Calibration (Intensity Method)

そこで、Fig.9 に求めた較正式を使つて Model A の模型表面上の発光強度比分布から圧力分布へ変換した図を、Fig.10 に模型中央付近の翼弦方向への圧力プロファイルをそれぞれ示す。強度法での結果は Fig.6 に示した寿命計測法の結果と比較して、衝撃波が鮮明に捉えることができる。さらに寿命計測法の時と比べて、はるかに S/N 比が良いのが分かる。また、強度法では寿命計測法のと看に見られたような模型のエッジにおいて圧力感度が無くなる領域は見られなかつた。このことから強度法は寿命法に比べ、非常に良好な結果が得られたといえる。しかしこれは励起光に LED より出力の高いレーザーを用いたためと考えられるため、公平な比較を行うには今後さらに詳しい調査を行う必要がある。

Fig. 9 Pressure Field
(Intensity Method : Model A)

Fig. 10 Pressure Distribution : Model A
(Intensity Method / *in-situ* Calibration)

6. 結論

低温風洞への寿命計測法の適用可能性について調べた。以下に得られた結論をまとめる。

- 寿命計測法により 2 次元円弧翼模型上の表面圧力分布を計測可能であることを示した。
- 寿命計測法による結果は、強度法の結果と比べ S/N 比が悪く、さらに、模型のエッジにおいて圧力が実際の値に比べ異常に低い領域がみられた。
- 寿命計測法では、低温・低酸素環境下においても膜厚依存性が見られた。

参考文献

- 江上康広,他,“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”,可視化情報,2002
- T.Liu, and J.P.Sullivan,“Pressure and Temperature Sensitive Paints”,Springer Berlin Heidelberg New York, 2004
- K.Asai, et al,“Detection of Boundary-Layer Transition in a Cryogenic Wind Tunnel by Using Luminescent Paint”, AIAA Paper, 96-2185
- Yasuhiro Egami, et al.,“Optimization of Polymer-Based PSP For Cryogenic Wind Tunnels”, ICIASF RECORD, 2001
- Kazunori Mitsuo, et al,“Development of Lifetime Imaging System for Pressure-Sensitive Paint”,AIAA Paper, 2002-2909
- Kazunori Mitsuo, et al,“Advanced Lifetime PSP Imaging System for Simultaneous Pressure and Temperature Measurement”,AIAA Paper, 2004-2188