427 PSPによるロケットノズル内壁面圧力計測法の開発(I)

富田 健夫[○](宇宙開発事業団) 高橋 守(航技研・角田) 満尾 和徳(航技研・本所)
田村 洋(航技研・角田) 浅井 圭介(航技研・本所)

Development of Pressure Distribution Measuring System by using PSP For Rocket Nozzle (I)

Takeo TOMITA, Mamoru TAKAHASHI, Kazuniri MITSUO,
Hiroshi TAMURA and Keisuke ASAI

abstract

Pressure distribution on a side-wall of a aerospike nozzle was measured by using a pressure sensitive paint. Observed pressure distribution was compared with that obtained by method of characteristics and pressure values measured by conventional pressure sensors. Those were showed reasonable agreement.

Keywords: PSP, Aerospike Nozzle

1. 序

PSP (Pressure Sensitive Paint; 感圧塗料)は機能性分子センサの一種であり、これを用いた圧力計測法は、適用する場の圧力分布を面で計測できるため、近年各国で盛んに研究が行われている。我が国でも研究が進められ、1999年からは文部科学省の知的基盤整備推進事業の一部として、航空宇宙技術研究所を中心とした MOSAIC (molecular sensors for aero-thermodynamic research) プロジェクトで、センサや計測法等の研究開発が行われている。PSP は色素が特定の波長の光を吸収し、蛍光を発する現象を利用する。蛍光強度は酸素分子との衝突失活により減少するため、蛍光強度は酸素の分圧と温度の関数となる。従って、酸素濃度と温度及び蛍光強度から圧力を求めることが出来る。

一方、エアロスパイクノズルは再使用型ロケットエンジンに適した高度補償型ノズルとして米国、欧州等で注目されており、航空宇宙技術研究所では、推力計測や圧力分布計測、流れの可視化等により、ノズル性能やノズル流れについて研究を進めてきた。エアロスパイクノズルの特徴は、環境圧力の変化に応じたノズル流れ変化による推力補償機構と、ベースとよばれるスパイクノズル切断面による圧力推力にある。従って、ノズル要素の推力寄与の詳細把握には表面圧力分布の取得が欠かせない。しかし、慣用的な圧力センサによる計測では、充分な数の圧力計測孔を設けられず、ノズル要素によっては不十分な情報が得られなかった。

PSP によるエアロスパイクノズルの圧力分布計測は、ノズル

ル要素の推力寄与を調べるために非常に有望な方法である。しかし、超音速ノズルではノズル内の流れの膨張に伴い、広範囲な圧力と温度の変化が生じる。例えば、空気を供試ガスに用いた場合、膨張比がただか 10 程度のノズルでも、ノズル出口圧力はスロートの 1/75、ノズル出口温度はスロートのおよそ 30%まで低下する。従って、PSP の適用にはそれらの問題に対応する必要がある。著者らが知る限り、超音速ノズルへの PSP の適用例は少ない[3]。

超音速ノズル流れへ PSP を適用するための問題点の抽出を目的として、流れ場が単純であり、既に充分な知見を有するエアロスパイクノズル側板に PSP を適用し、試験を行った。本報では PSP によるエアロスパイクノズル圧力分布計測結果について報告する。

2. 試験装置

供試体は理想的なセルノズルとフルスパイクノズルから

Fig. 1 An apparatus and a test model.

構成されるエアロスパイクノズルを用いた。セルノズルの膨張比は 2、エアロスパイクノズルの膨張比は 8 である。圧力測定孔の設けられている側板に PSP を塗布し、もう一方の側板は透明アクリル製のものを用いて可視化観察した。誌面の都合上、供試体の詳細は参考文献[4]等を参照されたい。試験装置は低圧容器とディフューザーから構成され、低圧容器内の圧力は供試体の排気のエゼクタ効果により減圧される。達成可能な最大 NPR(= 与えられた圧力/環境圧力)は今回使用した供試体でおよそ 200 である。試験装置の両側面は可視化のために透明アクリル板により製作されている。Fig. 1 に試験装置と供試体の写真を示す。

供試ガスは混合ガス製造装置により製造した。この装置は液体窒素と液体酸素を原料として酸素濃度 0%～22%までの混合ガスを 150 MPa までの貯気槽圧力で製造出来るものである。製造された混合ガスは試験前後にガスクロマトグラフィーにより酸素濃度を計測している。今回は約 16.5%の酸素濃度の試験のみを報告する。

PSP は色素として PtTFPP、バインダーとして Poly-IBM-co-TFEM を用いた。受光部は浜松ホトニクス社製の 14 bit の CCD カメラを用いた。励起光はキセノンランプを用い、カメラの左右から供試体側板へ照射した。蛍光強度-圧力の換算は、側板上の 14 点の圧力を測定し、In situ 法により行った。基準画像は試験前に通常の大気条件で取得した。基準画像、試験画像共に暗電流補正を行っている。また、温度の影響を調べるために、供試体側板の上流端と下流端に熱電対を設け、温度を観察した。

3. 蛍光強度-圧力の換算

蛍光強度と圧力の間に成立する Stern-Volmer の関係式については参考文献[1,2]等を参照されたい。基準画像取得時と試験画像取得時の酸素濃度が異なる場合の Stern-Volmer の関係式は、基準画像取得時の酸素濃度を α_{ref} 、試験画像取得時の酸素濃度を α 、基準画像取得時の蛍光強度を I_{ref} 、基準画像取得時の圧力を P_{ref} 、 I を試験画像の蛍光強度、 P を試験時の圧力として(1)式の様に表される。 K は比例定数である。

非線形性を考慮して蛍光強度から圧力を求める形に変形

$$\frac{I_{ref}}{I} = \frac{1 + \alpha K P}{1 + \alpha_{ref} K P_{ref}} = \frac{1}{1 + \alpha_{ref} K P_{ref}} + \frac{\alpha_{ref} K P_{ref}}{1 + \alpha_{ref} K P_{ref}} \left(\frac{\alpha}{\alpha_{ref}} \right) \left(\frac{P}{P_{ref}} \right) \\ = A + B \left(\frac{\alpha}{\alpha_{ref}} \right) \left(\frac{P}{P_{ref}} \right) \quad (1)$$

すると、次のように表せる。

$$P = \left(\frac{\alpha_{ref}}{\alpha} \right) \times P_{ref} \times \left(A + B \times \left(\frac{I_{ref}}{I} \right) + C \times \left(\frac{I_{ref}}{I} \right)^2 \dots \right) \quad (2)$$

本試験では、2 次の圧力換算式を求めた。また、 $\alpha_{ref} = 21$ とし、 P_{ref} は試験前の基準画像取得時に計測した大気圧とした。

4. 試験結果

Fig. 2 A shadowgraph image of a full-spike nozzle at design condition of the nozzle of NPR = 100.

Fig. 3 A mesh of characteristic lines and a pressure distribution map obtained at NPR = 115 of 16.5% oxygen.

Fig. 4 Relation of pressure ratio and ratio of emission intensity.

4.1 単純な膨張流れ

Fig. 2 に対象とするエアロスパイクノズルの設計条件 (NPR = 100) のシャドウグラフ可視化像を示す。セルノズルからおよそマッハ 2.2 の流れが平行に出ており、スパイクはセルノズル上端からの特性線が反射しない条件で設計されている。Fig. 3 に酸素濃度 16.5%、NPR = 115 の PSP による圧力分布を示す。流れ場の把握のため、ほぼ同 NPR の特性線の格子を併せて示す。Fig. 4 には測定圧力比と、平均蛍光強度比から求めた Stern-Volmer の関係を示す。Fig. 5(a)～5(c) には、スパイクノズルの推力軸方向を X、それに垂直な方向を Y として、Y = 20, 15, 5 mm の特性曲線法による計算圧力(Theory)、PSP による計測

Fig. 5(a) Theoretical pressure, pressure measured by PSP and measured by conventional way at $Y = 20$.

Fig. 5(b) Theoretical pressure, pressure measured by PSP and measured by conventional way at $Y = 15$.

Fig. 5(c) Theoretical pressure, pressure measured by PSP and measured by conventional way at $Y = 5$.

圧力及び圧力計での測定圧力を示した。この時、側板上流端と下流端の温度は 275.9 K で同一であった。

Fig. 3の圧力分布ではセルノズル上端から広がる膨張波

Fig. 6 A mesh of characteristic lines and a pressure distribution map obtained at $\text{NPR} = 17$ of 16.5% oxygen.

Fig. 7 Relation of pressure ratio and ratio of emission intensity.

に応じて側板上の圧力が低下している様子が観察された。また、最初の膨張波よりも上流では壁圧は理論通りほぼ一様に見えた。圧力分布中に格子状に見える点は圧力測定孔である。Fig. 5から、PSP 計測圧力は理論値、圧力計の測定値双方と概ね一致した。ただし、Fig. 5(a)の $X < 6\text{ mm}$ の範囲では大きな変動が観察された。

圧力測定孔が見えるのは基準画像と試験画像間の位置調整が正確でないことが原因と考えられる。本試験の処理では単純化のため、平行移動のみを考慮し、圧力測定孔の移動量の平均値を用いた。変化量は $0.1 \sim 0.2\text{ mm}$ 程度であった。変化量はロードセルの撓みと同レベルであるが、圧力測定孔の位置のずれ方の傾向が試験条件により異なることから、試験装置のアクリル板の撓みによるレンズ効果や気流の影響を受けたカメラの移動も原因と考えている。アフィン変換を用いた位置調整法により精度向上が図れると考えられる。側板上流端と下流端の温度は同一であり、側板の温度は、熱伝導によりほぼ均一であると推定される。Fig. 5(a)の $X < 6\text{ mm}$ の範囲で観察される変動は、下流の流れが理論値にほぼ一致することから、ノイズと推察される。この領域は励起光の照射光量が少なく圧力が高いことから、最も暗い領域であり、ノイズが生じやすい条件であ

Fig. 8 Theoretical pressure, pressure measured by PSP and measured by conventional way at Y = 5, 15 and 20.

った。

4.2 膨張圧縮を繰り返す場合

Fig. 6に酸素濃度 16.5%、NPR = 17 の PSP の圧力分布を示す。Fig. 3同様、ほぼ同 NPR の特性線の格子を併せて示す。Fig. 7には Stern-Volmer の関係を示す。Fig. 8 には Y = 20, 15, 5 mm における理論圧力と、PSP による計測値及び圧力計による計測値を示す。この時、側板上流端の温度は 255.7 K、下流端の温度は 261.4 K であり、5.7 K もの違いが生じていたが、詳細な温度分布の情報が無いため、Fig. 7は温度を考慮せずに求めた。

セルノズルから出た流れはスパイク上で膨張・圧縮を繰り返す。Fig. 6で、膨張波や圧縮波等の特性線と、PSP 可視化像上の圧力増減は定性的に一致した。Stern-Volmer の関係は Fig. 4よりもばらついており、特に $(P/P_{ref}) \times (\alpha/\alpha_{ref}) = 0.7$ ($P = 90$ kPa)より上と下では異なる傾向を示すように見える。Fig. 8では 80 kPa 以下では PSP と圧力計の値は概ね一致するが、100 kPa 以上では PSP と圧力計の値に乖離が見られた。

参考文献[2]によれば、PSP 計測値に与える温度の影響は非常に大きい。Fig. 7の圧力比と蛍光強度比の関係のばらつき及びFig. 8の PSP と圧力計の値の乖離は、温度分布によると推測される。エアロスパイクノズルでは NPR の変化に伴いスパイクノズル上の膨張圧縮の構造は連続的に変化し、側板上の低圧・高圧域は移動する。従って、温度分布による測定誤差を無くするためには、圧縮・膨張により壁面に生じた温度分布を詳細に把握するか、より熱伝導性・熱容量の大きい材料による供試体の製作を検討する必要がある。

5. 結言

エアロスパイクノズル流れに PSP を適用し、排気が単純膨張する条件と、排気が膨張・圧縮を繰り返す条件で壁面圧力分布の計測を行った。どちらの条件でも壁圧分布は特性曲線法で計算された流れと定性的に良い一致を示した。単純膨張する流れでは、圧力が高く励起光量の少ない領域で、ノイズと思われる大きな圧力変動が観察されたが、それ以外の領域では概ね特性曲線法による計算値と圧力計による計測値、PSP による計測値が一致した。膨張圧縮を繰り返す条件では側板の上流端と下流端でおよそ 6 K もの温度差が観察された。温度差が原因と推測されるが、圧力比と蛍光強度比の関係はばらつき、PSP と圧力計の計測値が乖離する条件があった。

より高精度な計測を行うためには、基準画像と試験画像のずれの補正を高度化させることが必要である。また、ノイズ源を減らすためには、観察領域以外で励起光や蛍光が反射しないようにすること、均一な PSP の塗布、均一な励起光の照射に留意する必要がある。今回の試験では CCD カメラの bit 数に比べて信号レベルが小さかった。PtTFPP の吸収波長はアクリルが透過しにくい紫外域にあるので、励起光の損失を減らし、十分な光量を供給するために励起光の光路には石英ガラス等を使用する改良が必要である。計測対象に、20 mm の厚みの真鍮を使用しても、計測時には計測対象に温度分布が生じた。温度分布の生じにくい材料や構造の検討が必要である。

謝辞

本試験の実施に当たっては中北和之氏に多大な協力を頂いた。ここに謝意を表する。また、本研究の一部は、文部科学省科学技術振興調整費「機能性分子による熱流体センシング技術の研究開発(MOSAIC)」により行われた。

参考文献

1. 浅井 圭介, "感圧塗料による圧力分布の計測技術," 可視化情報 Vol. 18 No.69, pp.97-103, 1998
2. 浅井 圭介, "感圧塗料技術の現状と展望," 可視化情報 Vol. 21 No.83, pp.203-208, 2001
3. Mebarki, Y., et al, "PSP application on a supersonic aerospike nozzle," PSP workshop, 1998
4. 富田健夫 他, "リニアエアロスパイクノズルのコールドフロー試験", 日本航空宇宙学会北部支部 1999 年講演会, 1999