B308 斜め平板に衝突する円形多孔ジェットのPSP解析

岩田 博[○](鳥取大学・工), 長尾 宜宗(鳥取大学・院), 川添 博光(鳥取大学・工)

PSP Analysis of Circular Jets Impinging on an Oblique plate

Hiroshi Iwata and Yoshimune Nagao and Hiromitsu Kawazoe

ABSTRACT

This study was conducted for an aerospike nozzle and to analyze the phenomena of the jet impingement, which was spout out from a circular nozzle with four or eight holes to a flat plate. The impingement was undertaken to be perpendicular and oblique to the plate. If the distance between the flat plate and the nozzle becomes close, an usual PSP analysis is difficult because the source of light, a camera and the nozzle can not be set up for the PSP measurements. Therefore, the pressure on the plate was observed from the back side of the a flat plate. Furthermore, the visualization of the impingement jet flow was studied by the oil film method.

Keywords : PSP, Aerospike nozzle, Jet, Impingement, Compressible flow, Oblique plate

1. 結 論

近年、空気流中の物体表面の圧力を光学的に計測する技術が注目されている。この技術は感圧塗料 (Pressure Sensitivity Paint : PSP) と呼ばれる機能性分子センサの一種である。この特徴は、適用する場の圧力分布をこれまでの圧力孔による点計測に代わり、一度に表面全域の面計測ができることである。PSP はその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しており、この蛍光強度は酸素分子との衝突失活により減少する。この現象は酸素消光と呼ばれ、このとき蛍光強度は酸素分圧と温度の関数となる。PSP を用いた流れ場の圧力分布測定は、各方面で多くの研究が進められてきている例えば⁽¹⁾⁻⁽³⁾。

本研究では、エアロスパイクノズルに関連する基礎研究として、単純化した環状配置の4もしくは8個の噴出孔から圧縮空気を噴出させた。これを水平および傾斜する平板に衝突させ、平板上の圧力場をPSP解析した。通常のPSP解析では、ノズル本体と平板の距離が近くなると励起光源、カメラ、ノズルの位置関係から撮影が困難となる。このため本研究では平板の裏側から撮影を行ない、各実験装置が接近した状態での撮影を可能にした。また、油膜法により衝突噴流の流れの可視化を行い、PSPで得られた解析結果と比較検討した。

2. 感圧塗料による圧力測定

PSPによる圧力測定の原理は、色素が特定の波長の光を吸収して電子励起され、これが基底状態に戻る際に蛍光を発する現象を利用したものである。その蛍光強度は酸素分子との衝突失活により減少するため、周囲空気の圧力によって発光強度が変わることから圧力が求められ

る⁽⁴⁾。このため蛍光強度と酸素分圧、したがって気流圧力との間には以下に示す Stern-Volmer の関係式が成り立つ。

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

ここで、 I_{ref} 、 I はそれぞれ基準画像の蛍光強度、試験画像の蛍光強度を表し、 P_{ref} 、 P は基準画像の圧力および試験画像の圧力を示す。また A 、 B は定数である。ここで計測に伴う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すると次式のように表すことができる⁽⁵⁾。

$$P = P_{ref} \sum_n A_n \left(\frac{I_{ref}}{I} \right)^n \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (2)$$

ここで、 A_n は定数である。

3. 実験装置および方法

本実験に使用した PSP 色素は、Sol-Gel-Based PSP で、カメラは 16bit 高分解能 CCD カメラ (ANDOR 製 DU434-BV, 西華産業) を使用した。励起光の光源は青色発光ダイオードを 9×19 個配列したものを4セット配置し、カメラ撮影する際には励起光をカットするためにハイパスフィルターを用いた。

実験に使用した環状配置の4孔および8孔のノズルは真鍮製で、4孔の概略図を図1に示す。噴流衝突平板は励起光および蛍光に対し透光性のある厚さ 5mm のアクリル製で、その大きさは $200 \times 200 \text{ mm}$ の正方形である。なお測定される圧力の定量化は、流れの対称性を考慮して、噴流衝突部の約 1/4 の領域に検定用圧力孔 60 点設置した。これをマノメータで検出し、対応する点の蛍光強

Fig. 1 Four holes annular jet nozzle.

度を比較して(2)式の An を決定し求めた. このアクリル板に酸素透過性をもつベースコートを描り, さらにその上から PSP 塗料を塗布した.

光学系の配置と4孔の環状ノズルによる実験装置の概略を図2に示す. コンプレッサーから高圧空気を貯気槽に供給し, 背圧制御弁を通してこのノズルにつなげた. また, 本研究の実験パラメータとして, 図3に示すようにノズル出口から平板までの距離 L_1 , ノズル中央部の突き出し量 L_2 , 平板とノズルのなす角度 θ の3つを採用した. そして L_1 , L_2 , および θ を変化させた場合についてPSP解析を行った.

4. 実験結果および考察

図4(a)(b)は4孔および8孔の各ノズルについてジェットを $\theta = 60^\circ$ で左から右方向へ衝突させた場合の圧

Fig. 2 Experimentai apparatus.

Fig. 3 Experimentai parameter of the nozzle.

力分布を示す. ジェットから遠い側 (図の右側) の平板上ではノズルからの距離が遠くなるため, 噴流衝突部澱点の圧力上昇が左側に比べ低いことが分かる. 4孔の場合, 左側の高い圧力の噴流衝突部から右側方向に圧力の低い領域 (図中 A) が形成されている. さらに, 右側の2つの噴流間には圧力の高い領域 (図中 B) が観察される. この原因は噴流が平板に衝突して放射状に広がり, これが隣のジェットの噴流と衝突する. 行き場の無くなった流れがノズル下面に向かって上昇し, ノズルと平板との間でジェット気流を中心に4組もしくは8組の渦流を形成しているものと考えられる. この噴流の衝突部でこのような圧力上昇を伴ったものと思われる. なおこの流れのイメージを図5に示す. この現象は図4(b)の突き出し量を増すことにより顕著に現れる. 8孔の場合は孔間隔が狭いためこの渦の大きさが抑制された流れになると思われる.

次に油膜法による流れの可視化結果を図6(a)(b)に示す. それぞれ4孔, 8孔について, 上述と同様に, 斜め 60° からジェットを平板に衝突させた場合の結果である. 4孔の場合については, ジェットが衝突する4点から放射状に細かな筋状の模様が確認される. また, 左側の衝突面は右側に比べて大きく現れており, ジェットが強く衝突していることを示す. この強く衝突している左側の孔の間に白抜きの筋が観測され, 一方, 右側では黒く太い筋となって現れる. これはジェットの強い左側から右方向に流れが生じるため, 太く黒いカーボンブラックの筋が形成されたためである.

Fig. 4 Pressure distributions measured by the PSP method.

Fig. 5 Flow-image between the nozzle and the flat plate.

(a) Four-hole

(b) Eight-hole

Fig. 6 Oil film pattern on the inclined plate impinged by multi jets, $\theta=60^\circ$.

8孔の場合については、ジェットが衝突する8点からそれぞれ放射状に広がっているが、全体的にはノズル中心軸の延長線に向かって流れ、その後、全体として右方向に流れている。一方、部分的には放射状に外側へ向かう流れも確認できる。ノズルと平板間の最も離れた右側孔からのジェット衝突は弱い、一方中央では右方向への流れが強いため、衝突面は消滅し黒い筋が残ると考えられる。

図7は平板からノズルまでの距離を図4の半分の $L_1=10$ mmにしたときの圧力分布である。(a)(b)はそれぞれ4孔および8孔のノズルで、噴流衝突角 $\theta=90^\circ$ である。4孔の場合は、ジェットが正面から衝突するよどみ点付近で特に圧力が高くなっている。このよどみ点付近の圧力分布は、円形になるものと推測されるが、衝突部は円周方向に延びる楕円形状になっている。また、ジェットとジェットの間に高圧部分が筋状に形成されている(図中A)。これは前述のように、図5のような流れによる結果である。また、ジェットが壁面に衝突する位置とノズル本体中心との間には低圧力部分が形成されていることが図

4に比べより明確に現れている(図中B)。

8孔の場合については、円周上のノズル孔の間隔が狭いためジェット間の流れの干渉が強く起こり、上述の結果より顕著なものとなっている。特に圧力の高いジェットの衝突部は環状につながるように形成されている。また、これに対応するようにその外側に円形の低圧領域(図中C)が存在する。

図8(a)(b)は油膜法による流れの可視化結果である。(a)(b)はそれぞれ4孔および8孔ノズルで $\theta=90^\circ$ である。それぞれのジェット中心から放射状に流れが広がっていることが観察できる。また、ノズル本体中心方向にカーボンブラックが蓄積している。

4孔の場合は、PSPによる解析で見られた隣接するジェット間に形成されたできた高圧力における流れの様子が対称に現れている。これはジェットからの流れがそれぞれ衝突し、衝突部分から上方向、さらに中心および外方向に向かう流れによるものである(図中A)。

8孔の場合については、PSP解析で現れていた高圧力部の環状につながる領域は、当然のことながら観測できないが、PSPで形成されたノズル外側で円形の低圧領域は存在する(図中B)。これは図8の流れを考慮すれば、流れの剥離によるものと考えられる。

(a) Four-hole nozzle, $\theta=90^\circ$

(b) Eight-hole nozzle, $\theta=90^\circ$

Fig. 7 Pressure distribution measured by the PSP method.

(a) Four-hole nozzle, $\theta=90^\circ$

(b) Eight-hole nozzle, $\theta=90^\circ$

Fig. 8 Oil film pattern on the normal plate impinged by multi jets, $\theta=60^\circ$.

5. 結論

PSPによる環状ジェットの解析から次の結論を得た。

平板に対しノズルを傾斜させた場合、ジェット出口に近い側では円形の高圧部が存在し、下流域では圧力が低くなる。また平板に衝突したジェットは噴流の数に対応する渦をノズルとの間に形成する。

油膜法による可視化結果では、これらの結果を裏付けるように、ジェットの衝突位置からそれぞれ放射状の流れが観測され、また、隣り合うジェットによる干渉により、圧力の高い筋と低圧力領域の黒く太い筋が出現した。

参考文献

- (1) Crites, R. C., :Pressure Sensitive Paint Technique, Von Karman Institute for Fluid Dynamics Lecture Series, April 1993, pp. 19-23.
- (2) 浅井敬介, :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, 1998, pp. 97-103.
- (3) 松本尚之他, :PSPによる変動圧力計測, 第38回伝熱シンポジウム講演論文集, 2001, pp. 483-484
- (4) 浅井敬介, :感圧塗料技術の現状と展望, 可視化情報, Vol. 21, No. 83, 2001, pp. 3-8.
- (5) 新美智秀他, :PSPの低圧力域における基礎特性に関する研究, 機械論(B編), 68巻, 676号, 2002, pp. 3360-3368.