430 感圧・感温塗料を用いた斜め平板衝突噴流の圧力計測 —流れ場に対する平板距離の影響—

中井 祐輔[○](東理大院、宇宙研特別共同利用研究員)、藤松 信義(宇宙研)

藤井 孝藏(宇宙研)、服部 直三(東理大)

Pressure Measurement of Jet Impinging on an Inclined Flat Plate with Pressure/Temperature Sensitive Paint

—The Effect of Various Nozzle-Plate Distances for Flow Fields—
Yusuke NAKAI, Nobuyoshi FUJIMATSU, Kozo FUJII and Naozo HATTORI

ABSTRACT

Flow fields of the supersonic jet impinging on a 45-degrees inclined flat plate are experimentally investigated using the Pressure Sensitive Paints [PSP] and Schlieren image visualization techniques. Temperature Sensitive Paints [TSP] are used to remove the effect of the temperature variation on the flat plate. The PSP and Schlieren result shows that the variation of the Nozzle-Plate Distance changes the shock wave configurations in the flow fields. Additional visualization using oilflow technique reveals that the stagnation bubbles generate two pressure peaks around the stagnation area on the flat plate at certain nozzle-plate distance.

Keywords: Pressure/Temperature Sensitive Paint, Jet Impingement, Compressible Flow

1. 緒 論

不足膨張噴流と平板との干渉流れは、噴流に対する平板の防御といった工業的応用だけでなく、流体工学的にも極めて興味深い現象である。Lamont らはマッハ数 2.2 の Jet が斜め平板に衝突する流れ場について、平板上圧力分布の計測及びシャドウグラフによる可視化を行ない、斜め平板上に発生する淀み点は再循環領域の有無やプレート衝撃波と平板との干渉により位置が変化し、ピーク圧力は平板角度、ノズル平板間距離及び圧力比(ノズル出口静圧/背圧)により変化することを報告している⁽¹⁾。しかし、静圧孔による平板上圧力計測であるため空間解像度及び情報量の不足から詳細な流れ場と共にその発生メカニズムは明らかにされておらず、特に圧力比をパラメータとした考察はほとんど行なわれていない。このような背景から、斜め平板に入射する Jet により形成される平板上圧力分布について、面圧力計測法である感圧塗料(Pressure Sensitive Paint[PSP])を用いて計測⁽²⁾を行い、現象の解明を目指した研究を行なっている。著者らはこれまでに Lamont らの行なっていない高い圧力比での実験を行い、圧力比の変化による衝撃波構造及び平板上圧力分布との関係を示した⁽³⁾。本報告では圧力比及びノズル平板間距離をパラメータとし、シュリーレン法による可視化写真及び平板上圧力との比較により流れ場の構造を明らかにすることを試みる。

PSP による圧力測定には誤差要因の 1 つとして発光強度の温度依存性が挙げられる⁽⁴⁾。著者らはこれまで較正に必要な表面温度の計測に感温塗料(Temperature Sensitive Paint[TSP])による高解像度の表面温度計測を行い、感圧・感温塗料を用いた温度較正法に関して評価を行なった⁽³⁾。本報告においても、感温塗料による表面温度計測から温度較正を行い、必要な精度の検証を行なった。

2. 感圧・感温塗料について

感圧・感温塗料の計測原理については他の文献を参照されたい^{(3),(4)}。ここでは本実験で使用した、較正式のみを示す。

(本報告では $n = 2$ とした)

$$\frac{I_{P,ref}}{I_P} = \sum_{k=0}^n A_k(T) \cdot \left(\frac{P}{P_{ref}} \right)^k \quad (1)$$

$$\frac{I_{T,ref}}{I_T} = \sum_{k=0}^n B_k \cdot \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^k \quad (2)$$

I は燐光強度、 P は圧力、 T は温度、添え字 ref は無風時の状態を表す。 A_k 、 B_k は係数で、予め較正試験によって求めておく。

3. 較正試験装置及び衝突噴流実験装置

較正試験装置及び衝突噴流実験装置の詳細に関しては前報⁽³⁾を参照されたい。

本実験では、感圧塗料として Bath-Phen Ru (励起波長 450nm 中心)、感温塗料として EuTTA (励起波長 350nm 中心) を使用した。PSP はジクロロメタンを溶媒として、シリカゲル TLC (薄膜クロマトグラフィ) プレートに Dipping により吸着させた。励起光源は比較的安価で入手でき、Bath-Phen Ru の励起波長域に近い発光波長を持つ青色 LED ($\lambda = 450 \pm 50\text{nm}$ 日亜科学工業 NSPB300A) を、TSP には市販の UV ランプ (中心発光波長 350nm) を用いた。尚、CCD カメラは浜松ホトニクス社製の解像度 1024*1024、12bit 分解能 (C4742-95-12NR) のものを使用した。

実験は宇宙科学研究所の小型吸い込み式風洞で行なった。ノズルの形状はスロート径 $d = 5.00(\text{mm})$ 、出口径 $D = 7.07(\text{mm})$ 、広がり角 15° の円形コニカルノズルで出口マッハ数は $M = 2.2$ である。

発光強度は通風前の基準状態及び通風中でそれぞれ 10 枚撮影した。圧力及び温度分布はそれらの画像をピクセル毎に平均し、式(1)または式(2)に基づき a priori 法によって求めた。

4. 結果及び考察

4.1 精度の検証

Fig. 1 に平板角度 $\theta = 45^\circ$ 、 $L/D = 2.0$ (ノズル平板間距離/ノズル出口直径)、 $PR = 1.2$ (ノズル出口静圧/背圧) の条件での PSP による圧力分布を左側に、TSP による温度分布を右側に示す。図の上端に見える陰がノズル先端で、PSP 画像からはノズル中心軸と平板の交点より上流側に高圧部が三日月状に生じており、下流側には円形の圧力分布を発生していることがわかる。これらの圧力分布と流れ場との対応は、後にシュリーレン写真と共に議論する。TSP 画像では、淀み点で最も温度が高く温度分布が圧力変化と概ね一致している様子がわかる。また、基準温度と比較して $0 \sim 10[\text{K}]$ 程度低い計測結果を示しており、PSP の温度依存性が $0.5 \sim 1\%/K$ 程度であることを考慮すると、温度による誤差が無視できない為、温度較正の必要がある。

Fig. 2 に平板に沿って対称軸方向の距離 s をノズル出口半径 R_n で、圧力 P をチャンバー圧 P_c で無次元化したときの圧力分布を示す。グラフには、過去に行われた Lamont らの実験の結果及び、TSP から得られた温度分布を元に PSP の温度較正を行った結果も示している。PSP の温度較正法に関しては文献(5)を参照されたい。較正前の PSP 結果 (PSP before: 点線) と Lamont らの結果 (Lamont: 一点鎖線) とを比較すると、 $s/R_n = 1.0$ での淀み点による圧力ピークや、 $s/R_n = -5$ 付近のピークの位置を正しく捉えており、定性的に良く一致していると言える。更に温度較正後の結果 (PSP after: 実線) では、

Fig. 1 Pressure and Temperature Maps ($\theta = 45^\circ$, $L/D = 2.0$, $PR = 1.2$)

Fig. 2 Pressure Distributions in the s/R_n axis

淀み点のピーク値は Lamont らの結果より低く見積もっているものの、原点付近において大幅な精度向上がみられ、PSP による計測でもほぼ静圧孔レベルの定量的計測が可能であることが示されたと共に定量的な議論をする際には温度較正の必要があることがわかる。

4.2 流れ場の考察

Fig. 3 に $\theta = 45^\circ$ 、 $PR = 8.6$ 、 $L/d = 1.0 \sim 3.0$ におけるシュリーレン写真及び平板上の圧力分布を、Fig. 4 には s/R_n 軸上の圧力を各距離ごとに間隔をあけて並べて表示したグラフを示す。また、 $\theta = 45^\circ$ 、 $PR = 8.6$ 、 $L/d = 3.0$ の状態における流れ場の概要を Fig. 5 に模式的に表した。

ノズルを出た Jet は不足膨張であるために出口直後で大きく広がるが、ノズルリップに発生する膨張波により、Jet Boundary、Jet Shock の広がり角は次第に小さくなる。Free Jet の場合、Mach Disk と呼ばれる衝撃波を生じセル構造を成す流れとなるが、平板に衝突することにより Stagnation を生じ、平板に沿うように衝撃波が発生する。この衝撃波は Plate Shock と呼ばれ、平板衝突噴流に典型的に見られる現象である。 $L/d = 3.0$ の時の平板上圧力分布を見ると、Stagnation によって生じる

Fig. 3 Schlieren Flow Visualization and Pressure map on the Flat Plate obtained by PSP

Fig. 4 Pressure Distributions in the s/Rn axis for each Nozzle-Plate Distance

Fig. 5 Schematic Flow Structure ($\theta=45^\circ$, PR8.6, $L/d=3.0$)

Fig. 6 Oilflow Visualization
($\theta=45^\circ$, PR8.6, $L/d=2.0$)

高圧領域(ピーク A)は非常に薄く円弧状の分布をしており、 s/Rn 軸上の圧力分布から、そのピーク値は他と比べ非常に高い値を持つことが分かる。ピーク A はノズル平板間距離が小さくなるにつれて急激に減衰し、 $L/d=2.0$ ではピーク A と共にピーク B が発生し、2つのピークが存在するようになる。シュリーレン写真を見ると、 $L/d=2.0$ の Stagnation 付近には Plate Shock に小さな突起が見られ、この突起が圧力分布に何らかの影響を及ぼしていると考えられる。これまでの他者の研究では、比較的小さい圧力比で、特に平板角度が垂直に近い場合には、Stagnation Bubble といわれる再循環領域が形成され圧力分布に影響を与えることが知られてきた⁽⁶⁾。本実験でも $L/d=2.0$ の条件では平板に対してほぼ垂直に Jet が入射してくる為、Stagnation Bubble の存在が十分に考えられる。そこで、その存在を調べるために、Oilflow による表面せん断力の可視化を試みた。Fig.6 にその可視化写真を示す。Fig.6 からは Stagnation 付近での剥離に伴う剥離線がはっきりと見て取ることができ、Stagnation Bubble が存在することを示唆している。 $L/d=1.5$ のシュリーレン写真では $L/d=2.0$ の時に見られる突起はほとんど確認できなくなる。圧力分布を見てみると、 $L/d=1.5$ ではピーク B が大きな値を持つようになり、ピーク A はほとんど消滅する。 L/d が小さくなるにつれてピーク B の値が高くなるのは、単純に Plate Shock と平板との距離が近くなる為であると考えられ、その結果、ピーク A は円弧状の形状をしているのに対して、ピーク B は、ほぼ点の状態で存在するようになると考えられる。Stagnation から下流 (s/Rn 軸の負方向)の流れ場に関して議論する。Jet は Plate Shock によって曲げられ、平板に沿った流れとなる。シュリーレン写真からは Plate Shock 中に三重点を生じ、そこから平板に向かって衝撃波 (Intermediate Tail Shock) を発生しており、更に三重点から伸びるすべり流と平板との間で反射し、圧縮膨張を繰り返しながら減衰していく様子がわかる。この Intermediate Tail Shock によって平板上には圧力ピーク C が発生する。ピーク C は L/d が大き

くなるになるにつれてより下流側に位置するようになり、平板に対する入射角が浅くなる為、その強さは徐々に弱くなる。また、ピーク C の形状は $L/d=3.0$ では直線に近いが、ノズルに近づくにつれ、丸くなってくる様子が見て取れる。これは Plate Shock の 3 次元的な形状の違いによって三重点に起因するものと予想しているが、はっきりとそれを示すには今後 CFD 等による解析が期待される。

5. 結 言

斜め平板に衝突する超音速 Jet により生ずる流れ場に関して、平板上の圧力分布を感圧・感温塗料を用いて測定し、シュリーレン法による流れ場の可視化から流れ構造の解明を試み、以下の結果を得た。

- ・ 感圧塗料の温度依存性を、感温塗料によって測定した表面温度分布により除去し、過去の実験と比較して、流れ場を議論するのに十分な定量的結果を得た。
- ・ ノズル平板間距離をパラメータとした実験を行い、圧力分布の最大値は、距離が近づくにつれて、円弧状の高圧領域ピーク A から点状のピーク B へと移り変わることが明らかになった。また、 L/d によっては Stagnation 付近に二つのピークが存在し、Oilflow の結果によって、それらが Stagnation Bubble の存在に起因するものであることを明らかにした。

6. 謝辞

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)」の元におこなわれた。

7. 参考文献

- (1) Lamont P.J. and Hunt B.L. (1980), The impingement of underexpanded, axisymmetric jets on perpendicular and inclined flat plates, J.of Fluid Mech., Vol.100, Part3, pp.471-511
- (2) 浅井圭介, (1998), 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, pp97-103
- (3) 中井祐輔, 藤松信義, 藤井孝蔵, 服部直三, (2002), 感圧・感温塗料を用いた斜め平板衝突噴流の圧力計測, 第 33 回航空宇宙学会年会講演集, pp85-88
- (4) Tianshu Liu, M.Guille, and J. P. Sullivan, (1999), Accuracy of Pressure Sensitive Paint, AIAA Paper 99-3785
- (5) 中井祐輔, 藤松信義, 服部直三, 藤井孝蔵, (2001), 感圧塗料を用いた斜め平板衝突噴流の圧力計測, 第 33 回流体力学講演会講演集, pp193-196
- (6) 坪井伸幸, 林光一, 藤原俊隆, 嵐和夫, 児玉優, “平板に衝突する超音速噴流に関する数値解析及び実験”, 日本航空宇宙学会誌, Vol.46, Vol.536, pp485-496, 1998