262

PSP による衝突噴流の壁面静圧計測

友近 一善, 服部 直三 (東理大), 松本 尚之 (東北大),
坪井 伸幸, 藤松 信義, 藤井 孝藏 (宇宙研)

PSP Measurement of the Jet Impingement Flow Field over a Flat Plate.

Kazuyoshi TOMOCHIKA, Naozo HATTORI, Masashi MATSUMOTO

Nobuyuki TSUBOI, Nobuyosi FUJIMATSU and Kozo FUJII

ABSTRACT

The pressure sensitive paint (PSP) has recently received wide attention as a revolutionary new optical pressure measurement scheme. The objective of the present work is to show the feasibility of PSP as a measurement tool of jet impingement flow fields. The results show that the large difference of the wall static temperature leads to nonphysical results. The key points necessary for the reliable measurements is thermal diffusivity to keep uniform wall temperature.

Keywords: Pressure Sensitive Paint, Jet Impingement, Wall Static Pressure, Temperature Effect

1. 緒言

通常の流体力学実験において模型表面上の圧力分布を求めるためには、模型表面にいくつかの圧力孔を設け、圧力センサを用いて計測する方法が一般的であった。しかし、測定面に設置できる圧力孔の数には構造的にも限界があり、たとえば翼端のように形状が極端に薄くなる場所では圧力孔を加工できないなどといった問題点があった。また、従来の圧力孔を用いた計測では、あらかじめ模型に設置した圧力孔の位置以外に存在する衝撃波や剥離等の急激な圧力変化を計測することはできなかった。

一方、近年全く新しい圧力計測手法として注目されている、感圧塗料 (PSP : Pressure Sensitive Paint) は、面情報として詳細な圧力分布を計測することが可能である。さらに、PSPでは模型寸法・形状に制限はなく、光学系を設置できれば圧力を計測することができるため、航空工学の分野を中心に研究・開発が進められてきた。⁽¹⁾⁻⁽⁸⁾

また、PSPは衝撃波の干渉によって形成される複雑な流れ場においても面計測が可能である。そのため、ロケットの分離時等で問題になっている三次元衝突噴流における壁面圧力分布が詳細に計測できると期待される。しかしながら、これまでの計測手法とは異なる手法であるため、計測手法やデータ処理手法が十分確立されておらず、計測精度など不明な点も残されている。

そこで、衝突噴流によって生じる複雑な圧力分布のPSPによる計測を試み、その問題点の把握した。

2. 実験装置

実験には宇宙科学研究所の小型吸い込み式風洞を用いた。風洞はノズル、測定部、真空チャンバにより構成され

るが、ノズルは円錐型先細ノズルで、出口マッハ数を1とした。測定部は衝突平板およびその変角装置と可視化窓からなり、流れ場を確認するためのシュリーレン計測とPSP計測が同時に行える様になっている。衝突平板はノズル出口直径 ($\phi 5\text{mm}$) に比べて十分大きく ($\square 200 \times 200\text{mm}$)、

Fig. 1 Experimental setup inside the test section.

Fig. 2 Pressure distributions with Ru(bpy)+TLC plate at Ps/Pb=129.

衝突噴流が周辺部と干渉することはない。平板には数点の静圧孔が設けられ, PSP計測時のin situ校正用データを取得した。

PSP計測用の励起光源としては青色LED(日亜化学 NSPB300A: 中心波長460nm)を222個並べたものを2個, 108個並べたものを1個, 真空チャンバの中に設置し, 直接PSPを励起できるようにした。⁽⁹⁾⁻⁽¹⁰⁾

PSP色素には励起波長が青色LEDの発光波長に近いルテニウム錯体系(Ru(bpy)およびRu(bath-phen))のものを使用し, TLCシート(シリカゲル60)もしくはアルミ酸化皮膜を吸着層として用いた。PSP色素はメチルアルコールもしくはジクロロメタンを溶媒として, およそ1000ppm程度のPSP溶液を作成した。作成したPSP溶液に, 吸着層(TLCシートもしくはアルミ酸化皮膜)を浸し, その後自然乾燥した。

PSPから放射される信号光は, シャープカットフィルタを用い励起光を除去した後, CCDカメラ(浜松ホトニクス製C4742-95-12NR: 解像度1024×1024×12bit階調)で撮影した。

今回はPSP計測の課題を明らかにすることを目的としたので, 衝突平板角度 $\alpha=45^\circ$, ノズル出口-平板間距離 $X_{np}/R_n=4$ (X_{np} : ノズル-平板間距離, R_n : ノズル出口半径)に固定して実験を行った。また, 実験中に気流全圧を変更することにより圧力比Ps/Pb (Ps: ノズル出口静圧, Pb: 背

(a) Temperature change.

(b) Intensity ratio change.

Fig. 3 Intensity ratio and temperature change with Ru(bpy)+TLC plate at Ps/Pb=129.

圧)を変更した。

3. 実験結果

Fig. 2にPSP (Ru(bpy)+TLCシート)で求めた衝突平板上の圧力分布を示す。通風時間は0~700秒である。Fig. 2では圧力を絶対圧で表しているが, 局所的に負の圧力を示すなど, 物理的におかしくなるほど計測誤差が含まれている。PSPの誤差を増大する原因として, 温度の影響で発光輝度が変化することが知られている。特にこれまでの研究からルテニウム錯体は温度依存性が強いことが報告されており⁽¹¹⁾, 1Kの温度変化で発光輝度が1~2%変化すると考えられる。

そこで, 温度の影響を確認するためにFig. 2に示すA点(左上), B点(右下)の温度変化とPSP信号光の輝度

比変化をFig. 3に示す。実験では常温の大気を真空チャンバに吸い込むことにより音速噴流を作り出しているため、気流は断熱膨張のため、きわめて低温となる。気流成立後、平板は低温の気流にさらされるため、温度が低下するが、衝突噴流の構造から場所により熱流束が異なる。

PSP色素の吸着層として用いているTLCシートは、吸着剤として多孔質のシリカゲルを用いており、熱伝導率はあまり高くない。しかし、母材はアルミであり、TLCシートをアルミ製の衝突平板に添付しているので、気流と平板の間の熱伝達よりアルミ内の熱伝導の方が大きいと考えて、温度分布は無視していた。しかし、今回の実験の様に、実験時間が数百秒と長時間にわたると温度伝導の問題から、平板内に温度分布が生じたものと思われ、それが計測誤差の原因となったと考えられる。

いま、A点とB点で実験開始後700秒での温度差は約3.9Kであるが、このときの輝度比差は約0.04であり、ほぼ温度差分の違いが誤差となっていると推定される。

そこで、衝突平板内に温度差が生じないように、衝突平板を厚さ10mmのアルミで製作し、表面を酸化皮膜処理することによって、直接PSP色素を吸着できるようにした。この場合のA点およびB点の温度低下の時間変化をFig. 4(a)に示す。通風時間は0～700秒である。TLCシートの場合と異なり温度伝導度が大きいので、平板上で温度差は最大でも約0.7Kであり、非常に小さい。発光輝度変化をFig. 4(b)に示す。熱流束を変化させるために圧力比を変化させても発光輝度比にほとんど差が生じていない。このことから、平板内で温度分布がつかない限り、in situ較正で正しい圧力分布が求められると考えられる。

この温度伝導度の大きなPSP色素吸着層を用いて計測した圧力分布をFig. 5に示す。TLCプレートを吸着剤として用いた場合と異なり、負の絶対圧を示す領域は現れていない。マッハディスクや噴流境界が壁面と干渉することによって生じる複雑な圧力場が可視化できており、画像中央部分には三日月状の高圧領域が確認された。

同条件におけるシュリーレン写真をFig. 6に示す。PSPにより可視化された高圧部はシュリーレン写真から計測された衝撃波の入射位置とほぼ一致しており、十分な精度で圧力分布が計測できていることがわかる。

これらの結果から、測定面における温度の均一性を保証すれば、ルテニウム錯体の様な温度依存性の高いPSP色素を用いても、精度よく圧力分布を計測できることがわかった。

(a) Temperature change at Ps/Pb=125.

(b) Intensity ratio change at Ps/Pb=125.

Fig. 4 Traces of Intensity ratio and temperature change with Ru(bath-phen)+anodized aluminum.

4. まとめ

三次元衝突噴流による衝突平板上の圧力分布をPSPを用いて可視化した。その結果次のことが明らかになった。

- (1) 数百秒にわたる様な長時間の計測を実施すると、圧力計測誤差が大きくなる。測定面に温度分布がついた場合、PSPの持つ温度依存性の影響が大きくなるためであると考えられる。
- (2) 測定面における温度の均一性を保証すれば、ルテニウム錯体の様な温度依存性の高いPSP色素を用いても、十分な精度で圧力分布を計測することが可能であると考えられる。

Fig.5 Pressure distribution with Ru(bath-phen)+anodized aluminium at Ps/Pb=125.

5. 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, 航空宇宙技術研究所からの受託研究として行われた。

参考文献

- (1) R. H. Engler et al., Description and assessment of a new optical pressure measurement system (OPMS) demonstrated in the high speed wind tunnel of DLR in Gottingen. DLR-FB 92-24 (1992)
- (2) R. C. Crites, Pressure sensitive paint technique. von Karman Institute for Fluid Dynamic Lecture Series 1993-05 (1993)
- (3) 宮里義昭他, ショックチューブを用いた感圧塗料の過渡応答に関する実験, 平成9年度衝撃波シンポジウム講演論文集(1998), pp. 19-22
- (4) Handa, T. et al., Experimental investigation on luminescent characteristics of fast responding pressure sensitive paint. Proceedings of the 2nd Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing. (1999) PF087
- (5) 坂村芳孝他, 感圧塗料による時間分解圧力計測, 第32回流体力学講演会
- (6) 松本尚之他, 感圧塗料による非定常圧力計測, 日本機械学会流体工学部門2000年講演会
- (7) Hallard, R. et al., Aerospoke nozzle tests. 3rd Sympos-

Fig.6 Schlieren photograph at Ps/Pb=125.

sium on Aerothermodynamics for Space Vehicles, TP 1998-220 (1998)

(8) Mebarki, Y. et al., PSP application of a supersonic aerospoke nozzle. PSP Workshop, TP 1999-41 (1998)

(9) Clinehens, G. A. Ultrastable blue-LED illumination sources for PSP Applications.

(10) 寺本進他, 発光ダイオードを用いた感圧塗料による壁面圧力測定を試み, 平成11年度宇宙輸送シンポジウム (2000)

(11) Gallery, J. M. Luminescence imaging for aerodynamic temperature and pressure measurements. Doctoral Thesis, University of Washington Chemistry Department (1993)