

バリステックレンジ実験に適用可能な非定常感圧塗料の開発

沼田大樹¹⁾、和田光司¹⁾、中嶋一樹¹⁾

¹⁾ 東海大学 工学部 航空宇宙学科 航空宇宙学専攻

1. はじめに

非定常衝撃波現象の理解・解明を目指す実験研究の場においては、衝撃波管やバリステックレンジ等に代表される衝撃波発生装置がよく用いられる。このような装置を用いて形成された非定常衝撃波の観察過程においては、影写真法やシュリーレン法などに代表される可視化技術が良く用いられ、その可視化結果から現象が理解されることが多い。しかしながら、可視化結果は流れ場の定性的な理解の助けにはなるが、観察された流れ場に起因する非定常圧力場を可視化結果から定量的に理解するのは、一般的に難しい。非定常圧力場の定量的理解は主に非定常圧力センサによる計測で行われるが、設置点の圧力のみしか得られない離散点計測であるため、空間解像度の観点で言えば必要十分な圧力場の情報が得られない。そのため、上述の定性的光学可視化手法に代わる、高速変動する非定常圧力場を時系列的かつ定量的に直接面計測可能な計測手法の開発が強く求められている。

このような可能性を持つ計測手法として、感圧塗料 (Pressure-Sensitive Paint, PSP) がある⁽¹⁾。これは、光化学反応を利用した圧力センサの一種であり、PSP を塗布した物体表面の圧力場を面で計測可能な手法である。計測時には、PSP を塗布した物体に対して色素に応じた波長の励起光を照射するが、この際に色素が発する特定の波長の光をカメラで検出することになる。感圧色素の発光強度は、周囲の酸素濃度に応じて変化する (酸素消光) ため、発光強度を検出することにより物体表面圧力を算出することが可能となる⁽²⁾。

PSP を上述した非定常衝撃波現象に適用する場合、マイクロ秒オーダーで変動する圧力場に対して発光強度変化が追従する必要があり、時間応答性に優れた非定常 PSP が必要となる。非定常衝撃波現象を可視化可能な非定常 PSP としては、超高速応答型 PSP⁽³⁾ があり、200 nm オーダーの多孔性を有する陽極酸化皮膜に対して感圧色素を吸着することで、サブマイクロ秒オーダーの時間応答性を達成し、衝撃波現象の可視化に成功している。しかしながら、二段式軽ガス銃で射出される極超音速飛翔体に起因する衝撃波など、極めて高速で変動する非定常圧力場に対して本計測技術を適用する場合、時間応答性の更なる向上が必要となる。また、現象の高速化することによる撮影露光時間の短時間化に伴う検出發光量の減少を補うための PSP 発光強度の向上もまた必要となる等、解決すべき課題も多い。

そこで本研究では、極めて高速で変動する非定常圧力場の定量面計測技術の確立を目指し、超高速応答型 PSP をベースとした非定常 PSP を開発することを目指すものである。本稿では、その初期段階として行った非定常 PSP を用いた飛翔体由来の衝撃波

可視化実験の結果を報告する

2. 実験装置・実験方法

本研究で用いた PSP は、超高速応答型 PSP⁽³⁾ の皮膜作成条件を改良⁽⁴⁾ したリン酸型陽極酸化皮膜 PSP である。感圧色素としてはバソフェニルテニウムを用いた。色素は最適化したディッピング条件のもと陽極酸化皮膜に吸着させた。PSP 皮膜はアルミニウム板上の 60 mm × 60 mm の領域に形成した。

サンプルは、ISAS 超高速衝突実験施設に設置されたバリスティックレンジの大チャンバー後方に設置した試験チャンバーの内部に固定した。試験部内に光学ロッド等を用いて試験片を垂直に設置し、サンプル表面が上流から射出された飛行体から 70 mm 離れた位置になるように固定した。バリスティックレンジは一段式ガス銃モードで使用し、7 mm ポリカーボネート球をおよそ 700 m/s 程度の速度で射出した。試験部内圧力は 30 kPa 以下の複数条件とし、PSP の応答性に及ぼす周囲圧力環境の影響も併せて評価した。

PSP の励起光源としては、キセノンフラッシュ光源 SA-200F (日進電子工業株式会社) を用いた。撮像装置は Phantom v1612 ((株) ノビテック) であり、先端にカメラレンズを取り付けている。光源とカメラには、励起スペクトルと発光スペクトルに合わせた光学フィルタを取り付けている。撮影時の露光時間は 2 μs とし、100,000 frames/s の条件で撮影を行った。

計測システムは上流側のトリガシステムから出力されるトリガ信号を実験条件に合わせて遅延させ、飛行体のサンプル上通過タイミングに合わせてカメラと光源を同期させた。

3. 実験結果

Fig.1 に、飛行体がサンプルプレート上に形成した非定常圧力場の瞬間場の一例を示す。この画像を撮影した際の飛行体周囲圧力は 30 kPa である。また、飛行体は図の右から左の方向に進行している。なお、画像は撮影時の発光強度画像から圧力画像に変換済みである。図は圧力値をカラー表示しているが、この場合、図の赤い部分は圧力が高く、青い部分は圧力が低い領域を示している。なお、飛行体速度は、上流の速度計測部で計測された値は 700 m/s 程度であったが、空気抵抗の影響で下流に行くほど減速しており、30 kPa の試験部圧力条件下では、観察部では飛行体速度が 500 m/s 台と大幅な減速を示している。

図を左から見ると、圧力がフラットな状態が続いており、その後急に赤色の弧状の領域が現れている。これは、飛行体前面から発生した離脱衝撃波がサンプルプレート上に到達し、その結果として圧力が急激に上昇した状態を意味している。その後、圧力は徐々に減少し、計測時の周囲圧力より低い圧力となる。その圧力の下降傾向はしばらく続くが、その後再び圧力は急激な増加を示しており、最終的には計測時の圧力と同様の圧力値を示すようになる。この際の圧力の変化傾向を纏めると、いわゆる N 型の圧力履歴

を示すことになるが、これは飛翔体から発生した衝撃波等の波動現象が遠方場に形成する典型的な圧力波形（N 波）である。そのため、この条件においては、飛翔体が形成する非定常圧力場を PSP が捉えることが出来ていることがわかる。周囲圧力をより低く変化させた場合も同様の計測結果が得られており、比較的広範囲の圧力環境下において本非定常 PSP が使用可能であることも分かった。しかしながら、周囲圧力の極めて低い条件下では、衝撃波通過に伴う急峻な圧力上昇を十分に捉えられず、周囲圧力が相対的に高い条件下で見られた N 型の圧力推移はのこぎり状の圧力波形に変化しており、時間応答性の低下が認められた。そのため、極端に圧力の低い環境下では、更なる時間応答性の向上が必要であることがわかった。

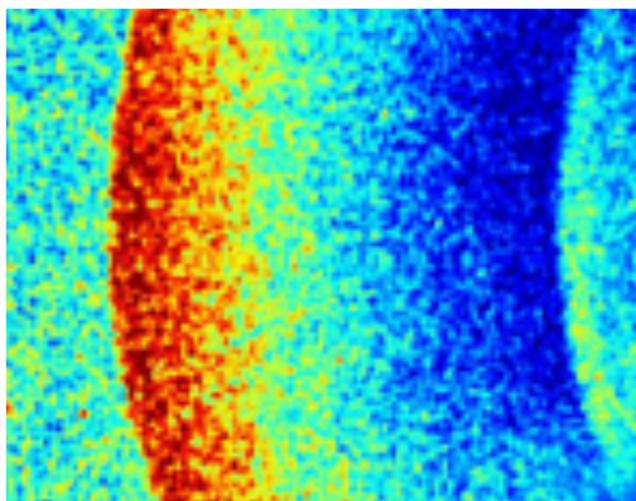


Fig.1 飛翔体がサンプル上に形成した非定常圧力場（周囲圧力：30 kPa）

4. まとめ

従来型の超高速応答型 PSP を改良した非定常 PSP を用い、現状における性能評価として飛翔体由来の圧力場を可視化した。30 kPa 程度の周囲圧力では飛翔体由来の圧力波形を十分に捉えることが出来たが、極端に圧力の低い場合には時間応答性の低下も見られた。今後はこの結果を踏まえ、PSP をさらに改良して時間応答特性の改善を目指す。

5. 謝辞

本実験の遂行にあたり、宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所の 長谷川直 研究員には、実験に対するご助言と多大なるご支援を頂きました。ここに付記して篤く謝意を表します。

参考文献：

- [1] T. Liu and J. P. Sullivan: Pressure and Temperature Sensitive Paints, Springer-Verlag (2004)
- [2] 沼田大樹, 森英男, 松田佑, 坂村芳孝：PSP/TSP 計測における強度法の基礎, 可視

化情報, Vol.37, No.147 (2017)

- [3] Numata, D., Fujii, S., Nagai, H. and Asai, K., Ultrafast-Response Anodized-Aluminum Pressure-Sensitive Paints for Unsteady Flow Measurement, AIAA Journal, Vol. 55, No. 4 (2017), pp.1118-1125.
- [4] Numata, D., Microsecond Time-resolved Measurement of Unsteady Pressure Field Using Phosphoric Acid-based AA-PSP, 6th German-Japanese Joint Seminar - High-speed Molecular Imaging Technology for Interdisciplinary Research (2017).