

# 超音速飛翔体上の非定常圧力場計測を目指した 分子イメージング技術の開発

○沼田大樹（東海大学 工学部 航空宇宙学科 航空宇宙学専攻）  
大谷清伸（東北大学 流体科学研究所）  
浅井圭介（東北大学 大学院工学研究科 航空宇宙工学専攻）

Development of molecular-imaging technique for unsteady pressure measurement  
on supersonic projectiles

Daiju NUMATA (Tokai University)

Kiyonobu OHTANI (IFS, Tohoku University)

Keisuke ASAI (Tohoku University)

キーワード：感圧塗料，バリスティックレンジ

Keywords: Pressure-Sensitive Paint (PSP), Ballistic Range

In this study, we developed a bi-luminophore PSP (ultrafast-response bi-luminophore PSP) by improving the ultrafast-response PSP which had the fastest response time. We also established PSP measurement system using a special two-wavelength splitter optical system which can simultaneously capture images of two different wavelengths from the ultrafast-response bi-luminophore PSP. Using these system in ballistic range experiments, we successfully visualized pressure distribution on free-flight projectiles.

## 1. はじめに

近年、支持干渉の問題を解消し飛翔体の空力特性をより実飛行環境に近い形で推算する方法として、バリスティックレンジを用いた飛行体射出実験が注目されている。バリスティックレンジは試験模型を高圧ガスや火薬の燃焼ガスを用いて超音速まで加速して試験部内に射出する実験装置で、模型は試験部内で自由飛行するため各種の支持機構が不要である。そのため、模型周りに生じる流れ場は模型由来のものだけとなり、支持の影響を考慮しない形での空力特性評価が可能となる。

しかしながら、バリスティックレンジ実験においての空力特性評価は一般に困難であり、これは「模型が自由飛行する」というバリスティックレンジ実験の本質そのものに起因している。例えば模型上の圧力分布を取得したい場合、風洞試験模型では静圧孔や各種の圧力センサ等の利用によりそれが可能である。しかしながら、バリスティックレンジで同様のデータ取得を目指す場合、センサやそれに付随する計測系は飛翔体内に格納する必要があり、特に比較的小型な飛翔体への搭載は計測系の小型化も必要となり極めて困難である。

そのような中、近年感圧塗料 (Pressure-Sensitive paint, PSP) 技術が本問題の解決策として注目されている。PSP は酸素消光作用を受ける蛍光色素を用いた圧力センサの一種である。色素は酸素透過性を有するバインダを用いて模型上に固定された後に励起光で励起され、その際の色素の発光強度が周囲の酸素濃度に応じて変化する特性を用いて PSP 塗布面の表面圧力を面で計測することが可能である。PSP は物体表面からの発光検出が計測の主体となるため、従来法のように模型自体に複雑な細工や配線等を施す必要が無く、バリスティックレンジ実験に適用するには原理的に親和性が高い。

そこで本研究では、PSP をバリスティックレンジ実験へ適用する上での課題点を解消し、超音速で飛翔する物体上の PSP による非定常圧力場計測技術としての実用化を目指している。最終的には、バリスティックレンジ実験において、従来までの影写真法などの定性的な光学可視化手法に加え、新たな定量時系列非定常計測手法の選択肢となり得る PSP を開発することを目指す。

## 2. 原理

感圧塗料は無風状態の画像（参照画像）と通風状態の画像の比を取ることで得られる発光強度比画像から圧力場を求めるが、バリスティックレンジ実験では飛翔体を試験部に射出するという特性上、風洞実験の際には比較的容易に行うことが可能な事前・事後における参照画像取得が困難である。また、バリスティックレンジ実験では光源やカメラと飛翔体との相対的な位置関係が常に変化し続けるため、参照画像と実験画像の励起光照射条件もすべての撮影タイミングで異なる。これらの課題点を解消するコア技術となるのが 2 色 PSP を用いる方法である。これは、同一の励起光源で励起可能な、圧力感度を持つ第 1 色素（感圧色素）と圧力感度を持たない第 2 色素（基準色素）を混合した PSP を作成し、それらから発せられる 2 つの波長を同時計測するという方法である。圧力感度を持たない第 2 色素の発光を参照画像として用い、第 1 色素の発光との比を取ることで超音速飛翔体上の発光強度比分布画像を取得し、そこから圧力を求める。本研究ではバリスティックレンジ実験で本方式を用いるために、以下の課題に取り組んでいる。

### 2.1. 超高速応答型複合感圧塗料の開発

超音速で飛翔する物体の PSP 計測を行う場合、PSP の持つ時間応答性が現象に充分追従できるほど高速である必要があり、概ね数マイクロ秒程度の時間応答性が必要となる。これが実現できない場合、結果として PSP の発光変化は圧力変化に追従できず、現象を正しくかつ精度よく理解することも出来ないという問題が生じる。そこで本研究では、90 % 立ち上がり時間  $t_{90\%} = 0.81 \mu\text{s}$  という、世界で最も高速の時間応答性を持つ“超高速応答型 PSP” [1] について、上述した PSP の 2 色化（複合感圧塗料化）を行い問題の解決を図る。

### 2.2. PSP からの発光を検出するため二分岐光学系の開発

通常、計測対象からの 2 つの波長を捉える場合は多色カメラ等を用いるが、超音速飛翔体を充分な時間分解能で撮影可能な多色カメラは少ない。そこで、レンズと高速度カメラの間に設置し、撮影対象の光を分岐したうえでそれぞれをフィルタリングし任意の波長のみを取り出し、それらの像をカメラの撮像素子上に別々の像として結像可能とする二分岐光学系を開発する。これにより、一つのイメージセンサ上に別々の波長で捉えた計測対象を別々の像として鮮明に結像させることを可能とする。この光学系により、超高速応答型複合感圧塗料からの 2 つの異なる波長の像を任意の高速度カメラで同時撮影可能とする。

## 3. まとめ

2 で述べた超高速応答型複合感圧塗料と二分岐光学系を用い、超音速で射出された飛翔体上の非定常圧力分布を高速度カメラを用いて定量的かつ時系列的に可視化し、自由飛行過程にある飛翔体の空力特性を定量的に明らかにするのが本課題の最終目標である。本技術の確立により、超音速で飛翔する SST 模型や再突入カプセル模型等の表面に現れる非定常圧力場の定量的かつ時系列的な面計測が可能となり、従来までには不可能であった様々な計測が実施可能となると考えている。

## 参考文献

- [1] D. Numata, S. Fujii, H. Nagai, K. Asai, AIAA Journal, Vol.55, No.4, 1118—1125 (2017).