

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 1 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26820368

研究課題名(和文) 感圧塗料を用いたマイクロ秒オーダーで変動する非定常圧力場の定量時系列計測法の確立

研究課題名(英文) Development of PSP techniques for measuring unsteady pressure field varying in the order of microseconds

研究代表者

沼田 大樹 (Numata, Daiju)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：20551534

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：非定常圧力場の面計測かつ定量計測という二つの目的を実現する方法として、感圧塗料技術がその候補として有効である。しかしながら、感圧塗料でその計測を実現するためには、十分な時間応答性と十分な発光強度を感圧塗料が備えている必要がある。本研究では、例えばソニックブーム現象のようなマイクロ秒オーダーで変動するような非定常圧力場を定量計測可能とするような感圧塗料の開発を目指した。この目的のため、本研究では超高速応答型感圧塗料の改良を目指し、新たな蛍光色素の候補を調査した。その結果、有力な蛍光色素の候補を見出すことができた。

研究成果の概要(英文)：To achieve unsteady pressure measurement with high spatial resolution quantitatively, Pressure-Sensitive Paint (PSP) is influential candidates. For applying PSP to high-speed and unsteady phenomena, the response time of PSP has to be much faster than the change rate of pressure caused by these phenomena, and luminescent intensity from PSP has to be enough. In this research, to investigate unsteady pressure field varying in the order of microseconds like sonic-boom phenomena, we conducted improvement of conventional PSP. For this purpose, we investigated new luminescent dye which can be applied to ultrafast-response PSP technique, and also tested it in ballistic range experiment. As a result, we were able to find candidates of fluorescent dye which can applying ultrafast PSP technique.

研究分野：高速空気力学

キーワード：感圧塗料 衝撃波

### 1. 研究開始当初の背景

移動衝撃波の伝播に伴う高速非定常現象の解明には、極めて高速で時間変動する非定常な圧力場を計測し、それを基に現象解明を行う必要がある。例えば衝撃波由来の非定常圧力場の計測には非定常圧力センサを用いた計測が有効であり、ソニックブーム過剰圧の計測などに積極的に用いられてきた。しかしながら、これら非定常センサはあくまで設置点の情報しか得られないという「点計測」が前提として存在し、圧力計測の空間解像度にはおのずと限界がある。そのような中、非定常圧力センサで行う計測の課題点を解決し、非定常圧力場を高い空間解像度で面計測する方法として、近年、感圧塗料 (Pressure-Sensitive Paint, PSP) が注目されている。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計測可能としている。また、PSP は光学計測手法の一種であるため非接触/非侵襲計測であり、流れ場に影響を及ぼさない。さらに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もなく、光学系も単純であるため、計測系全体の簡素化や模型制作コストの低減が可能であるというメリットもある。

感圧塗料を用いて高速非定常圧力場を計測する場合、課題点となる項目として、(1) 圧力が変化する速度に十分追従できるだけの時間応答性を有することや、(2) 短時間計測であるために十分な発光強度を有する必要があること、などがあげられる。従来までの PSP 技術を衝撃波のような高速非定常現象に適用しようとする場合、特に問題となるのは (1) に示す PSP の持つ時間応答性の問題であった。例えば移動衝撃波に起因する非定常現象を鮮明に捉えようとするためには、サブマイクロ秒オーダーの時間応答性が必要となる。PSP の応答性は、“バインダ内の酸素拡散時間” と “光化学反応時間” によって決定されるが、従来型のポリマーバインダを用いた PSP はバインダ内の酸素透過性が低く、酸素拡散時間によって応答性が大きく制約を受けていた。これに対して、バインダに多孔質材料を用いることで酸素透過性を改善した “高速応答型 PSP” が開発され、特に Asai らによって開発された陽極酸化アルミ皮膜型 PSP (Anodized Aluminum PSP, AA-PSP) は、 $O(10 \mu s)$  以下の時間応答性を実現可能である。近年研究代表者らは AA-PSP の皮膜特性を極限まで向上させ、90 パーセント立ち上がり時間  $t_{90\%} = 0.81 \mu s$  という、従来までに知られていた PSP の応答時間を 1 オーダー近く改善した “超高速応答型 PSP” の開発に成功している。これ

を用いることで衝撃波管を用いた衝撃波反射現象の可視化実験において衝撃波面及び反射に伴う諸現象を鮮明に捉えることに成功している。しかしながら、計測の際の発光強度は十分でなく、(2) の観点からの改良が必要であった。また、PSP を励起する際の励起光源は、露光時間減少分の検出光量減少を補うために短時間で強い発光強度を期待できる瞬間パルス光源を用いていたが、パルス光源には一般的に発光強度の不安定性や分布の不均一性、そして発光強度の極めて短時間での経時変化の問題が存在し、これらの大きな誤差要因が非定常圧力場の時系列計測や定量可視化の実現を妨げていた。

### 2. 研究の目的

上記の背景を踏まえ、本研究の目的は、上述の問題点を解消することで、極めて速い速度で変動する高速非定常圧力場を、マイクロ秒間隔という極めて速いオーダーで時系列的にかつ定量的に面計測可能とするための計測手法を実現することである。具体的には、高速応答型感圧塗料技術と高速度カメラ技術を組み合わせ、衝撃波現象に代表される、音速を超えるような極めて高速で伝播する高速非定常現象を定量時系列計測可能とするための新たな可視化計測法の確立を目指すものである。この技術を実現することにより、最終的には影写真法やシュリーレン法などの定性的な光学可視化手法に代わり、新たな定量時系列可視化手法として、感圧塗料技術を利用可能とすることを目指すものである。

本目的の達成に向け、本研究では、バリスティックレンジを用いて射出される超音速飛行体から生じる衝撃波が物体上に形成する非定常圧力場の感圧塗料計測を実施し、研究目的を実現する上での課題点抽出を目指した。具体的には、研究背景で述べた、時間応答性を大幅に改善した超高速応答型感圧塗料を用い、上述した非定常圧力場に起因する非定常圧力変動を高速度カメラを用いて光学的に面計測した。また、非定常圧力センサによる計測を同時に実施し、感圧塗料計測結果と非定常圧力センサ計測結果の比較を行った。これらにより抽出した課題点より感圧塗料の改良、計測方法の改良、そしてデータ処理方法等の改善を行い、目的の達成を目指した。

### 3. 研究の方法

本研究では、東北大学流体科学研究所に設置されているバリスティックレンジ装置を飛行体射出装置として用いた。本装置は一段式ガス銃、一段式火薬銃、そして二段式軽ガス銃の三つのモードでの運用が可能である。加速管の内径は 15 mm のものと 51 mm のものの 2 パターンが選択可能であり、飛行体を亜音速から極超音速までの幅広い速度域で射出可能である。試験部は直径 1.66 m、

全長 12 m であり、目的に応じた各種の試験装置を設置可能で、様々な実験が実施できる。試験部には 3 対の可視化窓、6 チャンネルのフラッシュ X 線装置が設置され、目的に応じた最適な可視化法を選択できる。

塗料性能抽出用の試験片としては、本研究では図 1 に示す 90 mm × 120 mm × 5 mm に切断した A1050 板を試験片として用いた。試験片は超高速応答型感圧塗料の条件に従い、その表面をリン酸電解液を用いて陽極酸化処理した。また、陽極酸化はサンプル上の 90 mm × 110 mm の範囲に対して行った。陽極酸化した試験片には、感圧色素として PBA を吸着した。また、サンプルには非定常圧力センサ (Kistlar 603B) を取り付けるためのポートを設けた。本研究で用いた PSP 試験片は、0 (1 μs) の時間応答性を有するサンプルである。

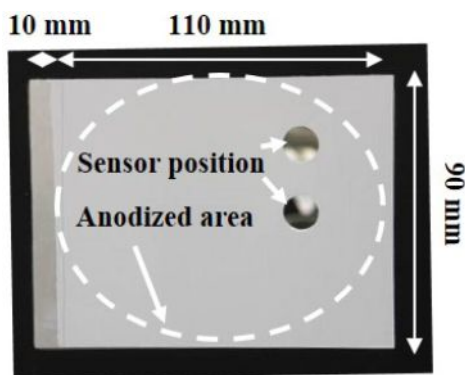


図 1 陽極酸化試験片

また、本研究では、黒色のポリカーボネート円柱を飛行体として用いた。図 2 に写真を示す。円柱直径は 15 mm であり、長さは 70 mm である。本研究では、本飛行体を一段式火薬銃モードのバリスティックレンジを用いて、可視化領域での速度 571 m/s (マッハ数 1.68) の条件で射出した。



図 2 円柱飛行体

試験時には、図 1 で示した PSP 試験片をバリスティックレンジの試験部内に配置したプレートホルダに設置する。図 3 にプレートホルダの写真を示す。PSP の励起光源としてはキセノンフラッシュランプ (SA-200F、日進電子工業) を用いた。また、励起光源に

は 340 ± 50 nm の波長帯を透過するバンドパスフィルタ (朝日分光) を取り付けている。PSP からの発光を計測するための検出器としては、100 万コマ/s の撮影が可能な 10 bit 島津ハイスピードカメラ (HPV-1、島津製作所) を主に用いた。ハイスピードカメラのコマ間隔は 4 μs、露光時間を 1 μs とし、100 コマの画像を取得している。1 コマあたりの画像サイズは 312 × 260 ピクセルである。ハイスピードカメラにはイメージインテンシファイア (C9547-01MOD、浜松ホトニクス) を取り付けた。イメージインテンシファイアの先端にはカメラレンズを取り付け、さらにシャープカットフィルタ (W-L420、HOYA CANDED OPTICS CO.) を取り付けた。計測時はバリスティックレンジ上流側に設置した半導体レーザ上を飛行体が通過した際のカット信号をトリガ信号として用い、飛行体から生じる衝撃波がサンプル上を通過するタイミングに合わせて、すべての計測機器を同期することで撮影を行った。

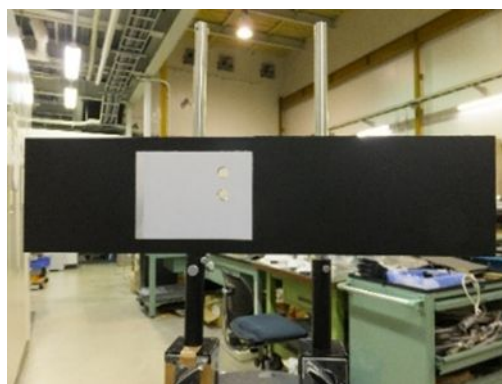


図 3 サンプルホルダ

#### 4. 研究成果

図 4 に非定常圧力センサによるサンプル上圧力の時系列計測結果を示す。また、図 5 に PSP 計測の結果を示す。図 5 (a) は撮影開始時のサンプル上の圧力分布を示し、(b) は (a) より 176 μs 後の圧力分布である。飛行体の移動方向は図の左から右の方向である。図の色はその位置における圧力値に対応している。

図 4 より、センサへの衝撃波の到達に伴い圧力が急激に上昇しているのがわかる。圧力はその後緩やかに減少し、二度のステップ的な圧力上昇の後に大気圧付近の値を示している。

図 5 (a) より、衝撃波の到達 (T1) に伴い、サンプル上の圧力が急激に上昇しているのがわかる。また、図の左側 (下流側) によく従い圧力が徐々に低下した後、T2 にて圧力の減少率が急に大きくなっているのがわかる。図 5 (b) より、T1 に示された衝撃波の到達後に徐々に低下していた圧力が圧力波 (T3) の到達で上昇に転じている。その後、別の圧力波 (T4) の到達後に圧力が大気圧近傍 (T5) の値に戻っているのがわかる。

図4と図5を比較すると、それぞれの圧力計測結果から抽出された特徴的な傾向 (T1から T5) が、非定常圧力センサの場合とPSP 計測の場合とで定性的に一致していることがわかる。

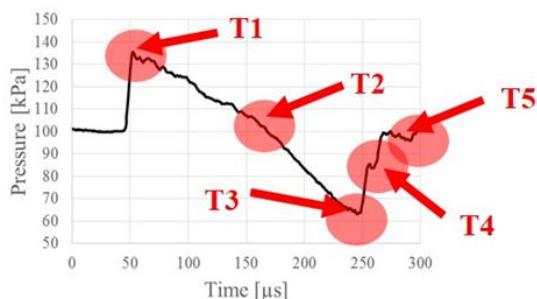
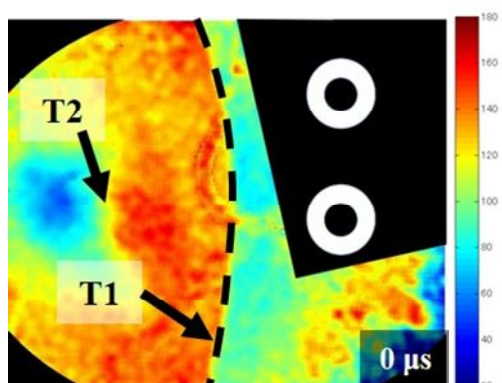
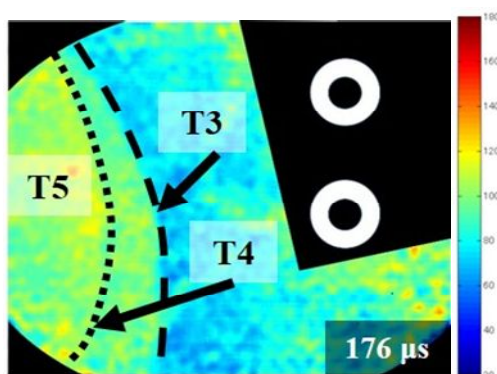


図4 圧力センサの圧力履歴



(a) 0 μs



(b) 176 μs

図5 試験板上に形成された非定常圧力場

上記の結果より、感圧塗料を用いたバリステックレンジ実験においては、飛行体から生じた衝撃波が作用して生じる非定常圧力場の計測が、定性的計測であれば可能であることが示された。また、上述の試験以外で高感度カメラを用いることで、イメージングインテンシファイアなどの増光装置がない状態でも現象を捉えることが可能であることもまた示すことができた。しかしながら、定量性においては課題点が残り、画像相関法を用いた参照画像抽出処理やフィルタ処理の最適化などの手法による改善は進んだものの、計

測手法としては改善が必要である。これらの解消に向け、従来型の高速応答型感圧塗料の改善を目指したサンプル評価試験もを行い、特性改善のための候補となる一定の色素候補を抽出することができた。今後はこれらの評価試験をさらに推し進め、感圧塗料の改善を行い、それを基に計測系の改修も進めていく計画である。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 4 件)

沼田大樹、浅井圭介、大谷清伸、"超高速応答型感圧塗料を用いたバリステックレンジ実験における非定常圧力場計測"、第93期 流体工学部門講演会、2015年11月7日、東京理科大学 葛飾キャンパス(東京都・新宿)

沼田大樹、浅井圭介、"高感度型高速度カメラを用いた非定常衝撃波現象の感圧塗料計測"、高速度イメージングとフォトリクスに関する総合シンポジウム2015、2015年11月5日、岩手県民情報交流センター(アイーナ)(岩手県・盛岡)

沼田大樹、浅井圭介、大谷清伸、"バリステックレンジ実験における自由飛行体が形成する非定常圧力場の感圧塗料計測"、平成26年度衝撃波シンポジウム、2015年3月9日、伊香保温泉 ホテル天坊(群馬県・伊香保町)

D. Numata, K. Asai and K. Ohtani, "Application of PSP Technique to Near-Field Sonic Boom Measurements in a Ballistic Range", The 2015 AIAA Science and Technology Forum and Exposition (SciTech2015), 5 January 2015, Kissimmee, FL (USA)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称:

発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況（計 0 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等  
特になし

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

沼田 大樹 (NUMATA, Daiju)  
東北大学・工学(系)研究科(研究院)・  
助教  
研究者番号：20551534