

令和 5 年 6 月 23 日現在

機関番号：32644

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02358

研究課題名（和文）自由飛行物体にかかる非定常空気を明らかにする非定常マルチカラーPSP技術の実現

研究課題名（英文）Development of unsteady multicolor PSP technique to clarify unsteady aerodynamic forces around free flight objects

研究代表者

沼田 大樹 (Numata, Daiju)

東海大学・工学部・講師

研究者番号：20551534

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、自由飛行する物体上の圧力場を非接触計測する手法として、感圧塗料計測技術に着目した。複数の波長帯で発光する感圧塗料を新規開発し、かつ複数の発光波長を同時検出可能となる計測系を確立することによりこの目的の実現を目指し、いわゆる複合感圧塗料技術を発展させることにより、自由飛行物体上の非定常空力現象の解明を可能とする基盤技術の確立を目指した。結果として、開発した計測系および新規感圧塗料を用いることで、自由飛行体を射出するバリスティックレンジ装置にて射出された、開発した感圧塗料を適用した飛行体上における圧力場を可視化することに成功し、計測基盤技術の確立に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、従来までは計測が著しく困難、もしくは不可能であった自由飛行体上の圧力場計測について、光による非接触計測手法によるアプローチが可能であることを実証した。これにより、本研究で開発した基盤技術をさらに発展させることで、幅広い飛翔体を対象とした空力計測を、さまざまな飛翔速度において実現可能となる、また、今後社会的にますます重要度の増していくと考えられるドローン技術等の高度化などに、実験的な観点から寄与することができるものと考えている。

研究成果の概要（英文）：In this study, we focused on pressure-sensitive paint measurement technique as a method for non-contact measurement of pressure fields on free-flight objects. We developed a new pressure-sensitive paint that emits light in multiple wavelength bands and established a measurement system that enables simultaneous detection of multiple emission wavelengths, aiming to realize this objective. As a result, by using the developed measurement system and the new pressure-sensitive paint, we succeeded in visualizing the pressure field on the free-flight objects with the developed pressure-sensitive paint, which was ejected by a ballistic range.

研究分野：実験空気力学

キーワード：流体計測 感圧塗料 バリスティックレンジ 空気力学

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 航空宇宙分野において航空機や宇宙機の空力特性を評価するために用いられる代表的な試験装置として、風洞がある。風洞試験においては特性評価対象の試験模型をその試験部に設置し、各種の計測装置やセンサ類をそれに取り付け、定量的かつ様々なデータ取得を可能としている。しかしながら、風洞試験においては試験模型を試験部内に固定する必要があるため、その結果生じる支持干渉と呼ばれる支持部からの影響を排除することができず、支持干渉のない空力データの取得には様々な困難が伴うこともまた知られている。

そのような支持干渉の影響を排除した形での空力試験の実施を可能とする試験装置として、バリスティックレンジがある。バリスティックレンジは高圧空気や火薬の燃焼ガス等で飛翔体を試験部内に高速で射出可能な装置であり、自由飛行する飛翔体を計測することで支持干渉の影響を排除した空力データの取得を可能としている。しかしながら、バリスティックレンジで射出される飛行体に適用可能な計測手法は風洞試験と比べ限られており、特に風洞試験で用いられてきた有線型のセンサ類などは、計測対象が自由飛行するという特徴からほぼすべて適用できない。例えば自由飛行する計測対象物にセンサを埋め込み、テレメトリ等によりデータ取得を試みることも不可能ではないが、一般的にそれほど大きくはない飛翔体に対してそれを適用するのは相当の困難性がある。

(2) 上記のような中、飛翔体に適用可能な計測手法の一つとして、感圧塗料 (Pressure-Sensitive Paint, PSP) に着目している。PSP は蛍光分子を利用した機能性分子センサの一種であり、酸素消光作用を用いて適用対象上の圧力の計測を可能としている。PSP はスプレーガンなどを用いて計測対象上に塗布・固定されたうえで励起光により励起され発光するが、周囲圧力により変化するその発光の強度を撮像装置等により取得することで、計測対象上の圧力計測を実現している。そのような特徴を有し、かつ模型に対して特段の加工を実施する必要もないため、PSP 計測手法は飛翔体計測手法としてバリスティックレンジ試験との親和性が極めて高く、バリスティックレンジ試験に適用可能な光学的非接触計測手法の一種としての利用の期待が高まっている。

(3) しかしながら、PSP を飛翔体計測に適用する上ではいくつか課題が存在する。特に重要なものとしては、PSP のデータ解析に必要な参照画像の取得が困難であることがあげられる。PSP 計測においては、解析時に試験中の発光画像とは別に、試験中と同姿勢の計測対象の無風状態 (試験前の状態) の発光強度画像 (参照画像) が必要であり、両画像の比を取り発光強度比を算出することで、発光強度が試験前後でどの程度の割合で変化したかという情報を知る必要がある。しかしながら、飛翔体計測においては試験前に参照画像を取得することは試験の性質上極めて困難であり、通常の方法では PSP 計測を実現できない。そのため、バリスティックレンジ試験における PSP 計測の適用には原理上の大きな壁が存在する状態となっている。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、自由飛行する飛翔体の PSP 計測を実現するため、複数の色素を用いたマルチカラー PSP の実現を目指す。通常のパSP では特定の 1 つの波長帯を用いて圧力計測を実現するが、マルチカラー PSP においては 2 つ以上の波長帯の発光を検出器で同時計測し、例えば圧力に応じて発光強度が変化する波長帯、発光強度が圧力に依存しない波長帯によるイメージ像等を試験中に同時取得し解析に用いることが可能である。本手法を用いれば試験前における参照画像の取得を必要としないため、原理上飛翔体の PSP 計測が実現可能となる。本研究では飛翔体計測に適したマルチカラー PSP の開発を行い、飛翔体上の圧力場の PSP による計測を目指した。

(2) また、マルチカラー PSP の開発と同時に、発光検出のための検出器についても開発を実施した。特に、高速度カメラ等の撮像装置での発光検出を想定し、計測対象からの発光における任意の波長帯イメージを複数同時検出可能となる検出器の開発も並行して実施した。

3. 研究の方法

(1) マルチカラー PSP の実現においては、使用する色素の組み合わせやバインダ、溶媒の種類等複数の検討要素が存在する。そのため、それらをパラメータとした複数の PSP を作成し、その特性を評価することで飛翔体計測に適したマルチカラー PSP の開発を目指すこととした。特性評価には幅広い温度及び圧力条件下でサンプルからの発光を検出可能である較正試験装置を用いた。サンプル周囲圧力の調整には圧力コントローラを用い、温度の調整にはペルチェ素子を用いた温度コントローラを用いた。較正試験装置は検出器の切り替えが可能であり、特定波長によるサンプルイメージの取得には 12 bit CCD カメラを用い、発光波長の検出時には分光蛍光光度計を用いている。また、作成したサンプルの時間応答特性の評価には、応答性評価試験用に

特別に設計した音響共鳴管およびステップ圧力発生器を用いた。

(2) 検出器については、株式会社フォトロンと共同で検討を実施した。特に、高速現象などで想定される短時間計測における発光強度不足を低減可能な光学系検討などを中心に実施し、作成した検出系の評価も併せて実施した。

(3) 作成したマルチカラー PSP、および検出系の検討には、各種の風洞試験装置や衝撃波管、バリステックレンズ等を用いた。開発の各段階における検討事項に合わせてそれぞれの空力試験装置を使い分け、各種の空力試験を実施した。いずれの試験においても、模型に対して作成したマルチカラー PSP を塗布し、特別に構成した検出系を用いて試験中におけるその発光を検出した。取得データは試験後解析を実施し評価した。

(4) 上記に加え、PSP 塗装時の人間由来の各種誤差を低減することを目的として、自動塗装装置の作成及び作成されたサンプルの特性評価を行い、その有効性を評価した。

4. 研究成果

(1) 代表的に知られているいくつかの感圧色素について、いくつかの蛍光色素を組み合わせ、計測に適した特性を有する複数波長の発光からなるマルチカラー PSP を実現した。その過程において、計測時に問題となる塗装面の発光の均一性に各種の検討要素が及ぼす影響、および色素間の発光の干渉等の問題を確認し、それらを踏まえて期待する特性を持つマルチカラー PSP を作成するための指針等の知見を得ることができた。また、人的要因、およびその他要因によるサンプル上の色素塗装ムラ等がマルチカラー PSP の特性に及ぼす影響、およびそれらが解析結果に及ぼす影響等を確認し、それを低減するための自動塗装装置の開発に成功した。自動塗装装置を用いることで、試験体や評価サンプルに対する均一な塗装を実現することが可能となり、塗装ムラに由来する各種の計測上のデメリットの解消に成功した。

(2) 検出器について、従来までの二分岐光学系を改良することで、取得光量を 2 倍以上に増強することに成功した。加えて高感度の検出器を導入することで、マルチカラー PSP からの発光検出系の性能を飛躍的に高めることに成功した。これにより、従来までは発光検出量が微弱であったために計測時に選択肢とすることができなかつたいくつかのマルチカラー PSP の利用が可能となり、かつ発光検出量が増加したためより高速で変動する、短時間露光条件における各種の現象へのマルチカラー PSP の適用可能性を拡げることになった。

(3) 開発したマルチカラー PSP と検出系を用いることで、各種の空力試験を実施した。まず、静的計測対象に対する試験として、デルタ翼模型や回転するフィン付き円柱等に対するマルチカラー PSP 計測を風洞にて実施した。露光時間がミリ秒オーダーとなる計測であったが、デルタ翼上の LEV 構造の可視化、および円柱側面のフィンにより偏向する流れ場の可視化に成功した。また、当該試験を通じ、光学像の補正手法やデータ解析手法に関する各種の方法論を確立し、マルチカラー PSP およびその検出系を用いて行う試験に対して汎用的に適用可能な解析環境の確立に成功した。また、短時間計測に対する開発手法の適用の実証試験として、風洞試験と同等の計測系にて衝撃波管を用いた検証試験を行い、平面衝撃波や三角柱を過ぎる衝撃波の可視化等、高速現象に対するマルチカラー PSP の有用性についても評価を行った。露光時間がマイクロ秒オーダーとなる計測であったが、衝撃波現象の観察に成功し、当該開発手法の高速現象に対する有用性を実証した。

(4) バリステックレンズを用いて、開発したマルチカラー PSP および計測系を用いた飛翔体可視化計測を実施した。大気圧環境下における飛翔体射出実験を実施し、開発した検出系を用いた飛翔体からの発光検出に成功した。検出された発光量は検出系の改良前後で大幅に増加しており、大気圧環境下においてもマルチカラー PSP を用いた飛翔体表面圧力場の可視化計測が十分に可能であることを実証した。また、計測の際にはバリステックレンズ試験に特有の課題が生じることも判明し、それらに対応することでマルチカラー PSP の計測精度をさらに高めることが可能となることが判明した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Toshiharu Mizukaki, Fumihiko Iwasaki, Misato Mori, Akari Kato, Daiju Numata	4. 巻 Vol. 82, No. 4
2. 論文標題 Four-dimensional visualization of blast loading inside a detonation-driven shock tube using improved pressure-sensitive paint and digital image correlation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Science and Technology of Energetic Materials	6. 最初と最後の頁 95-102
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.34571/stem.82.4_95	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計15件（うち招待講演 0件/うち国際学会 11件）

1. 発表者名 齋地尊気、沼田大樹
2. 発表標題 衝撃波管による基礎空力試験実施のための感温塗料計測手法の開発
3. 学会等名 2021年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岡本和也、沼田大樹
2. 発表標題 超高速応答型感圧塗料を用いた衝撃波現象の可視化に関する研究
3. 学会等名 2021年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 沼田大樹
2. 発表標題 点回折干渉法による衝撃波現象の可視化に関する基礎研究
3. 学会等名 2021年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Daiju Numata and Kiyonobu Ohtani
2. 発表標題 Basic Research on the Surface Pressure Measurement Method for Hypersonic Projectiles Using Unsteady PSP
3. 学会等名 Eighteenth International Conference on Flow Dynamics (ICFD2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takki Saichi and Daiju Numata
2. 発表標題 Study on Coating Method to Control the Thickness of TSP Layer
3. 学会等名 Eighteenth International Conference on Flow Dynamics (ICFD2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. uchida, S. Suzuki and D. Numata
2. 発表標題 Experimental Investigation of Basic Characteristics of CNT Heater for Development of cnt-PSP
3. 学会等名 Eighteenth International Conference on Flow Dynamics (ICFD2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroki Harada and Daiju Numata
2. 発表標題 Development of Low-speed Wind-tunnel for Basic Aerodynamic Research
3. 学会等名 Eighteenth International Conference on Flow Dynamics (ICFD2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kazuya Okamoto and Daiju Numata
2. 発表標題 Development of an Aeroballistic Range with Reconfigurable Structures for Use in Studies on Projectile Aerodynamics
3. 学会等名 Eighteenth International Conference on Flow Dynamics (ICFD2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takaaki Uchida and Daiju Numata
2. 発表標題 Development of an Automatic Painting System for PSP/TSP Applying the 3D printer Technology
3. 学会等名 The 19th International Symposium on Flow Visualization (ISFV19) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S. Kawazoe and D. Numata
2. 発表標題 Visualization of Shock Wave Structures on Wedge Model Using Anodized-Titanium Pressure-Sensitive Paint
3. 学会等名 Seventeenth International Conference on Flow Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 A. Wakayama and D. Numata
2. 発表標題 Evaluation of Dynamic and Static Characteristics of PSP for Unsteady Measurement
3. 学会等名 Seventeenth International Conference on Flow Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 D. Numata and K. Ohtani
2. 発表標題 Development of Multi-Color Pressure-Sensitive Paint for Ballistic Range Experiment
3. 学会等名 Seventeenth International Conference on Flow Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岡本和也、川添颯一郎、沼田大樹
2. 発表標題 電気吸着法により色素吸着した陽極酸化チタン型感圧塗料の静特性評価
3. 学会等名 2020年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Okamoto and D. Numata
2. 発表標題 Basic Research of Two-color AA-PSP for the Application to the High-speed Fluid Phenomena
3. 学会等名 Nineteenth International Conference on Flow Dynamics (ICFD2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takki Saichi and Daiju Numata
2. 発表標題 Development of an Automatic Painting System to Support Stable Coating of PSP and TSP on Test Models
3. 学会等名 8th German-Japanese Joint Online Seminar - Molecular Imaging Technology for Interdisciplinary Research (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	菊池 崇将 (Kikuchi Takamasa) (50625291)	日本大学・理工学部・助教 (32665)	
研究分担者	水書 稔治 (Mizukaki Toshiharu) (80433910)	東海大学・工学部・教授 (32644)	
研究分担者	大谷 清伸 (Ohtani Kiyonobu) (80536748)	東北大学・流体科学研究所・特任准教授 (11301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------