

令和 5 年 6 月 25 日現在

機関番号：82723

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14959

研究課題名（和文）塗料法での励起光マッピングによる表面圧力・温度・変形が同時計測可能な風洞試験手法

研究課題名（英文）Simultaneous Measurement of Surface Pressure, Temperature and Deformation by Pressure Sensitive Paint with Mapped Excitation Light

研究代表者

田口 正人（Taguchi, Masato）

防衛大学校（総合教育学群、人文社会科学群、応用科学群、電気情報学群及びシステム工学群）・システム工学群・准教授

研究者番号：70806794

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：航空機等の空力特性を調べる手段として風洞試験があり、実験模型の表面圧力、表面温度、変形が重要なパラメータである。本研究では、これらのパラメータを同時に計測可能な、感圧塗料（塗料型の圧力センサ）に基づく新しい計測手法の開発に取り組んだ。結果として、3者の同時計測の実証には至らなかったものの、塗布後に塗料のセンサとしての性質を任意に変えることができる、当初想定していなかった新しい手法を確立した。これは風洞試験を進めながら臨機応変にセンサ感度を調整できる点でユニークかつ有用な機能である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で新たに得られた塗料型圧力センサの性質を任意に制御する技術は、風洞試験でこのセンサを使うユーザーにとって、試験の効率化やコスト削減を行う上でとても有用である。これまでは、センサとしての性質は塗料の組成で決まっていた。ゆえに実際に試験をして、その結果を受けてセンサを交換したい場合、時間と費用をかけて塗料を塗りなおす必要があった。本手法を使えばその必要はなく、塗料に照射する光（励起光）の波長帯を変えるだけでセンサの性質を変えることができる。この機能は、学術的にユニークであるに留まらず、将来的に航空機等の開発の効率化に貢献できる可能性があり、意義がある。

研究成果の概要（英文）：Wind tunnel tests are used to investigate aerodynamic characteristics of aircrafts. Surface pressure, surface temperature, and deformation of the models are important parameters. In this study, a new measurement scheme based on pressure sensitive paint (paint-type pressure sensor) was developed to simultaneously measure these parameters. As a result, although simultaneous measurement of all three parameters could not be demonstrated, a new method that can arbitrarily change the properties of the paint as a sensor after application was established, which was not initially expected. This is a unique and useful feature in that the sensitivity of the sensor can be modulated flexibly during the wind tunnel test.

研究分野：Aerodynamics

キーワード：Pressure Sensitive Paint

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

航空機等の空気力学的な特性を明らかにするために実施される風洞試験では、模型表面の圧力・温度の計測が重要である。この表面圧力・温度を計測するための最も従来の方法は、圧力変換器や熱電対などのセンサを用いる方法である。これらの方法は、センサが設置された箇所(点)でのデータを精度よく計測可能であるが、一方で、空間分解能は高くない。表面圧力(および温度)を計測する他の方法として、感圧(感温)塗料法がある。この方法は、圧力(酸素分圧)と温度に感度を有する塗料の塗膜の発光をカメラ等で計測する光学的計測手法であり、より高い空間分解能でデータの取得が可能であるが、空気力により模型が変形(または移動)する場合には、無視できない系統誤差が生じ、計測が難しいという問題がある。

2. 研究の目的

本研究の目的は、風洞試験における計測法のうち塗料法について新しい手法を開発することである。具体的には、励起光源の波長の切り替えにより性質が変わる塗料を開発し、模型変形が生じる模型で圧力・温度・模型変形が同時に計測できる塗料法を提案する。

3. 研究の方法

(1) 塗料の開発

本研究の目的を達成するために必要な機能を有する塗料の開発を行う。具体的には、励起光源の切り替えによりセンサとしての圧力及び温度感度を可変可能な感圧塗料を開発する。塗料は2つの異なる感圧(感温)色素を含有する複合塗料とし、適切な色素の組み合わせを実験的に調査する。

(2) 開発した手法の実証試験(変形計測を含まない場合)

励起光源の切り替えによって、開発した塗料が期待した感度可変機能を達成しているか、校正チャンバ(図1参照)内で雰囲気圧及び温度を段階的に変化させて塗料の発光の変化を評価する試験(校正試験)で実証する。

マッピングを含む励起光切り替え手法の検討

光源の切り替え方法として、プロジェクタ光源によるマッピング(空間的な切り替え)に加え、通常のLED光源を時間的に切り替える方法を検討する。

本手法で、変形を除く圧力と温度の2者同時計測を達成できるか、実証する。

風洞実験による実証を行う。

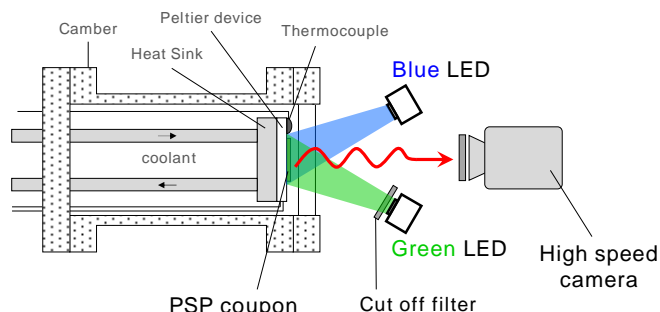


図1. 校正試験に用いたチャンバの概要 (LED光源を用いた場合)

(3) 開発した手法の実証試験(変形計測を含む場合)

模型変形する場合のデータ処理アルゴリズムを確立する。

風洞実験による実証を行う。

4. 研究成果

(1) 塗料の開発

複合塗料の組成として複数の色素の組み合わせを検討し、最終的に2種類の複合塗料を開発した。

感圧色素：ルテニウム錯体、感温色素：ローダミン

この複合塗料は、青色波長帯及び緑色波長帯の光で励起可能である。

感圧色素：白金ポルフィリン、感温色素：ルテニウム錯体

この複合塗料は、近紫外波長帯、青色波長帯および緑色波長帯の光で励起可能である。

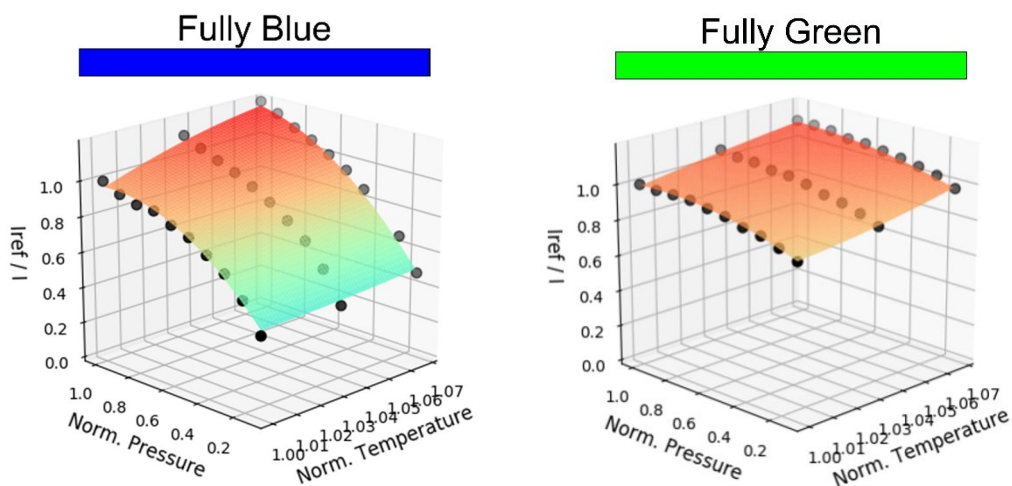
本研究では、この塗料に着目し、その性能を詳しく調べた。

(2) 開発した手法の実証試験(変形計測を含まない場合)

校正試験結果と塗料性能

- LED光源を用いた校正試験の結果、当初計画していた単色の励起光源(特定の波長

帯により構成される光)の切り替え(例えば、青色励起光と緑色励起光の切り替え)によって、塗料の圧力感度及び温度感度を変調可能であることが確認された。その実験結果を図2に示す。縦軸が塗膜の発光強度、水平軸が較正試験で設定された圧力及び温度である。青色励起光下と比較して緑色励起光下では圧力及び温度に対する発光強度の変化が緩和していることがわかる。これは、励起光の切り替えのみによって塗料のセンサとしての感度を変調される機能を有することを示している。

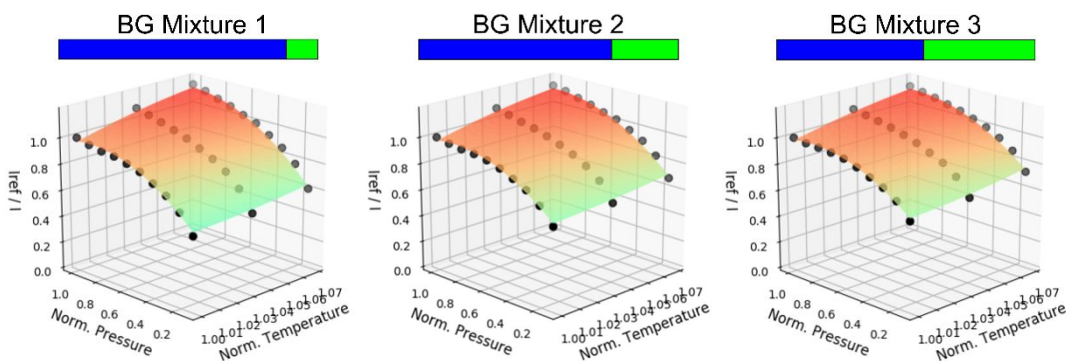


(a) 青色励起光の場合

(b) 緑色励起光の場合

図2. 単色光源の切り替えによる塗料特性の変化

- 塗料の性質を調査する過程で、単に単色の励起光源を切り替えるだけでなく、それらを混合することで塗料特性を連続的に変調可能であることを発見した。これは当初計画では想定しなかった塗料の機能であり、本手法の有用性を向上するものである。そのため、当初予定していた風洞実験による実証を延期し、塗料の性質をより詳しく調査することにした。その結果を図3に示す。励起光の混合により感圧塗料の圧力・温度感度が図2に示す各単色励起光による感度特性の中間を示している。これにより青色と緑色波長帯の光源をベースに両者の光源強度の混合比を制御することで、塗料の圧力・温度感度を連続的かつ任意に調整可能であることが明らかになった。通常の感圧塗料の感度は塗料の組成等で決定され、塗布後の感度変調はできない。一方で、本研究で得た機能は、塗料塗布後にユーザーの意図に合わせてセンサ感度を変調する機能を提供するものであり、風洞試験を進めながら状況に合わせて任意の感度に後から調整できることを意味している。これは、試験の柔軟性に寄与する極めて有用な機能である。



(a) 混合強度比 1

(b) 混合強度比 2

(c) 混合強度比 3

図3. 青色及び緑色励起光源の混合による塗料特性の変化

励起光源の切り替え手法の確立

上述の実験結果は、LEDを時間的に切り替えて得た。これに加え、励起光をプロジェクタ光源でマッピングし、空間的に切り替えることが可能か検討した。その結果、較正実験において、市販のプロジェクタ光源を用いて塗料特性の変調が可能であることがわかった。また、励起光の混合についても、プロジェクタ光源の色を変化させることで、LEDと同様に可能であることを確認した。

圧力と温度の同時計測

青色及び緑色励起光下で得られた較正曲面を使用して、それぞれの条件下で得られた2つの塗膜輝度値から圧力と温度を計算した。その結果、図4に示すように、圧力・温度条件により一定の誤差があるものの、真値と概ねよい一致を示した。この誤差の要因は、較正曲面を内挿する際の多項式によるフィッティングの不完全性にあると考えられており、内挿のアルゴリズムを今後改善していく予定である。

図5は、圧力の計測結果について、温度補償の有無の比較を示したプロットである。本手法により温度補償をした（圧力と温度を同時計測した）場合、温度変化に起因する誤差が低減され、計測値が真値と概ね一致していることがわかる。このことから、本手法の妥当性が確認できる。

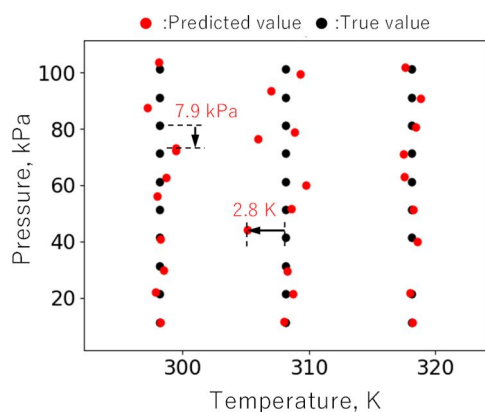


図4．圧力及び温度の計測値と真値の比較

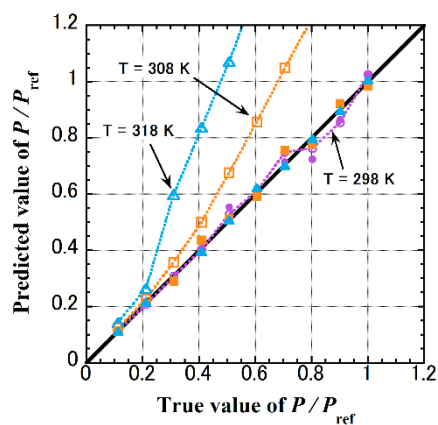


図5．圧力の計測値における温度補償の効果
中実：温度補償あり，中空：温度補償なし

風洞実験による本手法の実証

当初予定から計画を変更したため、風洞実験による実証には至らなかった。研究期間終了後に引き続き実施する予定である。

(3) 開発した手法の実証試験（変形計測を含む場合）

圧力、温度、変形の3者同時計測については、当初予定からの計画変更のため研究期間内に実施するに至らなかった。アルゴリズムについては検討が済みであり、今後解析コードへの実装、及び風洞実験による実証を推進していく予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Masato Taguchi, Masashi Kashitani
2. 発表標題 Preliminary Study on Temperature Compensation Technique of Pressure Sensitive Paint based on Excitation-light Switching
3. 学会等名 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masato Taguchi, Masashi Kashitani
2. 発表標題 Sensitivity Control of Intensity-based Pressure Sensitive Paint by Switching Excitation-Light Wavelength
3. 学会等名 8th German-Japanese Joint online Seminar (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田口正人, 櫻谷賢士
2. 発表標題 2色の光源の混合により感度変調が可能な感圧塗料
3. 学会等名 第18回 学際領域における分子イメージングフォーラム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田口 正人, 櫻谷 賢士
2. 発表標題 励起光源波長の切り替えによる感圧塗料の 特性制御に関する基礎研究
3. 学会等名 日本航空宇宙学会 第59回飛行機シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田口 正 人, 榎谷 賢士
2. 発表標題 励起光源波長の切り替えによる感圧塗料特性の変調に関する基礎的研究
3. 学会等名 第17回 学際領域における分子イメージングフォーラム
4. 発表年 2021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

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