

令和 4 年 6 月 6 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04171

研究課題名（和文）寿命イメージングに基づく圧力分布計測が拓く複雑流動場のEFD解析

研究課題名（英文）EFD Analysis of complex flow fields by measurement of pressure distribution based on lifetime imaging

研究代表者

森 英男（MORI, Hideo）

九州大学・工学研究院・准教授

研究者番号：70362275

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、感圧塗料および感温塗料の複合技術である重ね塗り感圧・感温塗料（DL-PTSP）に対し、寿命法に基づく較正法を適用することにより、圧力と温度の同時イメージング計測手法として確立させるため、DL-PTSPの発光画像取得における最適かつ効率的なカメラのシャッターゲート設定の提案を行うとともに、感圧塗料層と感温塗料層を物理的に隔離する中間層について、両者の塗料層の計測感度を損なわない必要最小限の膜厚条件を明らかにし、層間の温度差低減による計測精度向上を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果として実現した、重ね塗り感圧・感温塗料による圧力・温度同時イメージング計測手法は、複雑流動場を対象とした実験流体力学的解析に必要な不可欠な計測技術であり、本計測技術を適用した高度な実験解析の実現により、民生用ターボ機械まわりなどに見られる複雑流動場において、剥離や渦構造が形成する不均一な圧力分布を可視化することが可能となる。その結果、特にゲージ圧の低い民生用ターボ機械において性能低下や騒音の発生源となり得る異常流動現象の解析を進め、性能向上に必要な知見を得ることが可能となる。

研究成果の概要（英文）：Simultaneous measurement method of pressure and temperature distribution has been developed by applying lifetime-based method to dual-layer PSP/TSP (DL-PTSP), composite method of pressure-sensitive paint (PSP) and temperature-sensitive paint (TSP). Appropriate and efficient conditions of shutter gates of the high-speed camera are proposed to accomplish high pressure and temperature sensitivity and increase the number of data sets for simultaneous measurement of pressure and temperature. In addition, the minimum thickness of the required intermediate layers, isolating the PSP layer from the TSP layer physically not to spoil the sensitivity and the luminescence intensity of PSP and TSP, are clarified. It enables to decrease the temperature difference between the PSP layer and the TSP layer and to increase the accuracy of pressure measurement.

研究分野：流体工学，流体計測

キーワード：感圧塗料 寿命法 感圧・感温複合塗料

1. 研究開始当初の背景

近年における計算機の高性能化に伴い、計算流体力学 (Computational Fluid Dynamics: CFD) に基づく流動場の解析手法が飛躍的に高度化し、複雑流動場の精密な解析が可能になってきた。一方で、実験流体力学的 (Experimental Fluid Dynamics: EFD) 解析における重要な技術の一つである、固体表面上の圧力計測技術についても、連続的な圧力分布画像の取得を可能とする感圧塗料 (Pressure-Sensitive Paint: PSP) の技術革新が進みつつあり、その適用範囲が広がりつつある。長年の課題であった、PSP が有する温度感度をもたらす圧力計測誤差や、照射光強度分布の不均一性が圧力計測誤差をもたらす問題点についても、感温塗料 (Temperature-Sensitive Paint: TSP) を用いた温度計測の併用による PSP の温度補正、ならびに原理的に照射光強度分布の不均一性の影響を受けない「寿命法」の適用による解決を図るため、応募者は、先行研究において、寿命法に基づく重ね塗り PSP/TSP (Dual-Layer PSP/TSP: DL-PTSP) の技術確立に取り組んできた¹⁾。当該先行研究では、寿命法に基づく DL-PTSP の適用において、光学フィルタの使い分けによらず、DL-PTSP に用いられる色素の発光寿命の違いを利用した感圧色素と感温色素の発光分離を実現したが、この先行研究において使用していた画像取得法では、画像の取得におけるオーバーヘッドが非常に大きく、イメージング計測手法としての利用に難があった。

2. 研究の目的

本研究課題は、先行研究で基礎技術を確立した、寿命法に基づく DL-PTSP による圧力計測技術をさらに高度化し、イメージング計測手法として確立させることで、本手法に基づく低ゲージ圧流れ場の大面積領域における圧力場計測により、点計測であるプローブベースの計測手法では得られない詳細な圧力分布の取得を実現する。これまでは EFD 解析の高度化が遅れていたため、高度化した CFD 解析結果の検証や、計測データの同化による EFD と CFD の複合解析の実施に支障が生じており、特にゲージ圧の低い民生用ターボ機械における流動場解析における深刻な課題点となっていたが、剥離や渦構造が形成する不均一な圧力分布を可視化する高度な EFD 解析の実現により、特にゲージ圧の低い民生用ターボ機械において性能低下や騒音の発生源となり得る異常流動現象の解析を進め、性能向上に必要な知見を得ることを可能とする。そのため、寿命法に基づく較正法を DL-PTSP に適用することにより、PSP が有する温度感度および照射光強度分布の不均一性をもたらす誤差の低減を実現し、複雑流動場の EFD 解析における有用な解析手法とすることを実現させる。

3. 研究の方法

先行研究にて用いた手法 (Shift irradiation measurement method: SIM 法)¹⁾ では、DL-PTSP の光励起 1 周期の時間 (100.2 μ s) をハイスピードカメラ撮影の繰り返し周期 (10 μ s) の整数倍よりわずかにずらすことで、カメラ撮影の繰り返し周期より細かな時間幅 (0.2 μ s) でカメラのゲートタイミングを設定することを可能としていた。この手法により、寿命法に基づく DL-PTSP の適用における圧力・温度同時計測に最適なゲートタイミングを明らかにすることを可能としたが、一方で、圧力・温度同時計測に必要な画像 1 組の撮影にパルス光励起 50 周期分を要し、画像の取得におけるオーバーヘッドが非常に大きかった。そこで本研究では、先行研究にて明らかにした、圧力・温度同時計測に最適なゲートタイミングに関する知見を元に、パルス光励起 1 周期分で撮影可能なゲートタイミングの提案を行い、この新たなゲートタイミングを用いた寿命法による圧力・温度同時計測の感度を先行研究と比較することで、イメージング計測手法としての利用に適した、オーバーヘッドの小さい圧力・温度同時計測の妥当性を検証する。

なお、寿命法に基づく DL-PTSP の適用において、各層および中間層の構造は、

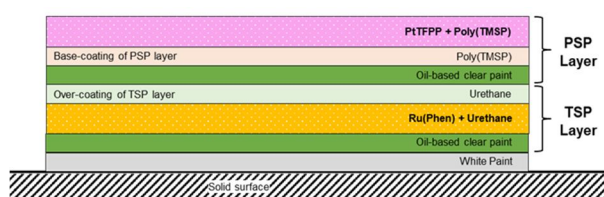


図 1 DL-PTSP の構造の模式図

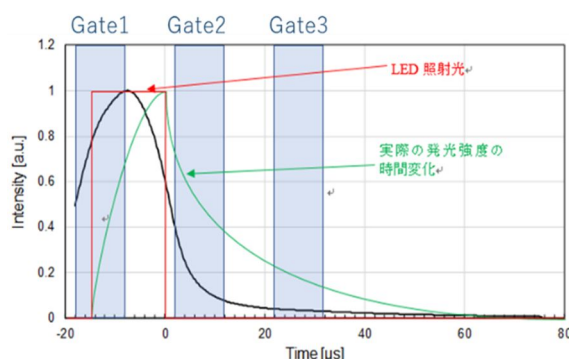
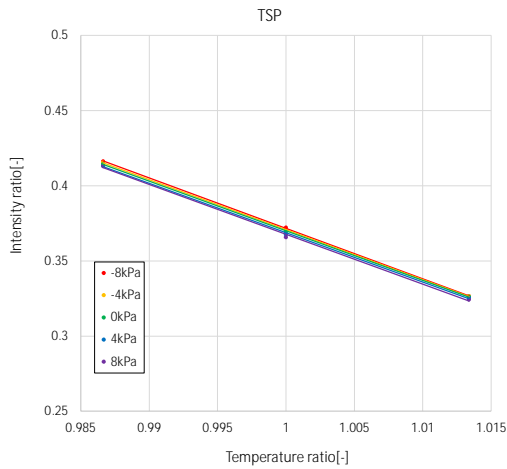
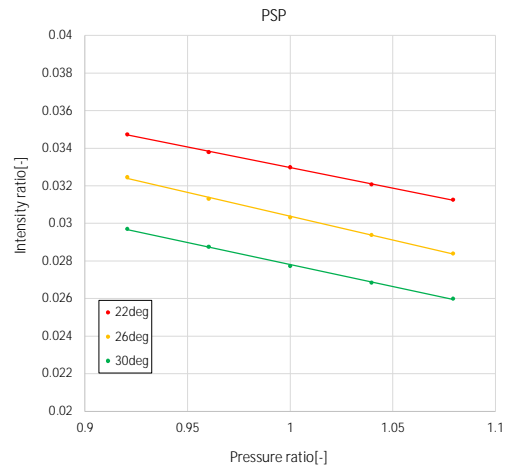


図 2 パルス光励起 1 周期分での撮影可能な圧力・温度同時計測のゲートタイミング

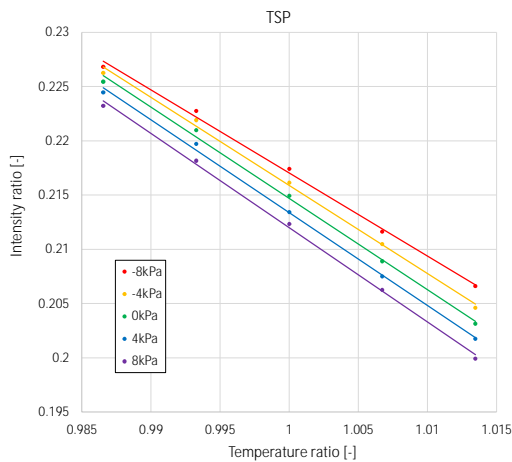


(a) TSP 層の温度感度

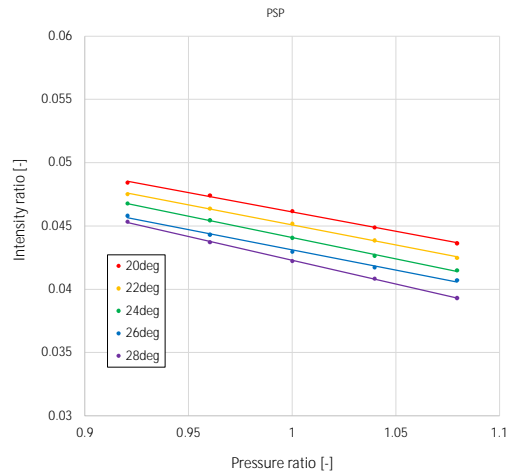


(b) PSP 層の圧力感度

図 3 DL-PTSP における PSP 層と TSP 層の圧力および温度感度



(a) TSP 層の温度感度



(b) PSP 層の圧力感度

図 4 中間層のうち poly(TMSP)層厚さを低減させた DL-PTSP における PSP 層と TSP 層の圧力および温度感度

PSP 層や TSP 層の発光強度や計測感度，および各層の温度差に影響を及ぼす．図 1 に，中間層を含む DL-PTSP の構造の模式図を示す．DL-PTSP における中間層の役割は，PSP 層と TSP 層の物理的接触を防ぐことで，両者の層に含まれる発光色素の発光強度低下および圧力・温度感度の低下を防ぐことおよび，塗布時におけるポリマーバインダーの混合による酸素透過性の変化をもたらす PSP 層の変質防止にあるが，一方で PSP 層と TSP 層の温度の差異や温度変化に対する時間遅れをもたらす要因となり，膜厚が大きいほどこれらの要因が大きくなるため，中間層の膜厚は可能な限り低減させることが望ましい．そこで本研究では，DL-PTSP による圧力・温度場の同時計測精度向上を念頭に，PSP および TSP 層や中間層の構造が DL-PTSP の特性に及ぼす影響を検証する．

4. 研究成果

本研究課題にて提案した，パルス光励起 1 周期分で撮影可能な圧力・温度同時計測のゲートタイミング²⁾を図 2 に示す．Gate1 は PSP および TSP 双方に共通な第 1 ゲート，Gate2 は TSP の第 2 ゲート，Gate3 は PSP の第 2 ゲートを示す．図 2 に示す 3 つのゲートは，幅および間隔とも $10\mu\text{s}$ であるので，パルス光励起を $100\mu\text{s}$ ，カメラのシャッターゲート幅および撮影周期をともに $10\mu\text{s}$ に設定することで，パルス光励起 1 周期において全てのゲートにおける輝度値画像を取得することが可能である．

図 2 のゲートタイミングを利用した DL-PTSP の解析手法を適用した場合における，(a) TSP の温度感度 および (b) PSP の圧力感度を図 3 に示す³⁾．ここで，基準温度は 297.15 K ，基準圧力は 100.6 kPa としており，横軸の温度および圧力はいずれも基準値で除した無次元値としている．

図 3(a)に示す通り、図 1 の Gate1 および Gate2 を利用した TSP 成分の解析において、PSP 層が有する圧力依存性は現れておらず、また図 3(a)の温度感度および図 3(b)の圧力感度とも、SIM 法を利用した先行研究¹⁾における温度・圧力感度とほぼ同等であり、本研究で提案するゲートタイミングの利用により、先行研究で有していたオーバーヘッドを有さない、DL-PTSP の圧力・温度同時計測を実現できることを示した。

DL-PTSP の中間層のうち、PSP 層の変質防止を目的とする、PSP 層バインダーと同一成分の poly(TMSP)層の厚さを、図 3 の解析で使用したサンプルに対して 1/5 の量に低減させた場合における、(a) TSP の温度感度 および (b) PSP の圧力感度を図 4 に示す³⁾。図 4(b) に示すとおり、PSP の解析結果において十分な圧力感度が得られているが、一方で図 3(a) に示す TSP の解析結果において、若干の圧力感度が見られている。これは、TSP 層と PSP 層の発光強度のバランスにより、時刻 2.0 μ s から始まる第 2 ゲートで撮影した発光画像において、PSP 層の発光減衰の影響が現れていると考えられる。これは、TSP の発光寿命の温度依存性解析において、PSP 層が有する圧力依存性の影響が現れていることを意味し、望ましくないことである。そのため、poly(TMSP)層の低減にあたっては、TSP および PSP の両者の発光を解析するにあたっての相互の独立性を保つため、TSP 層と PSP 層の発光強度のバランスにも注意する必要がある。

また、DL-PTSP の中間層全体の膜厚条件は、前述の通り、PSP と TSP の圧力・温度感度の保持および、両者の層の温度の差異や温度変化に対する時間遅れに影響する。本研究では、PSP と TSP の計測感度を損なわない必要最小限の中間透明層の膜厚条件として、12 μ m 程度まで低減できることを明らかにした。なおこの際、PSP 層と TSP 層の非正常温度変化の時間遅れを ms オーダーに収めている。

あわせて、将来的な非正常計測への適用を念頭に、時間応答性が高いシリカナノ粒子 PSP を PSP 層として適用した DL-PTSP の開発に着手した。透明性の高いポリマーベース PSP と異なり、時間応答性が高い PSP は半透明または不透明性を有するため、下層の TSP の光励起や発光を遮断する問題点がある。この遮蔽の影響が当初の想定より深刻であったため、上層の PSP、特に不透明性の原因となるシリカナノ粒子の量を低減させることで本問題を解決した。ただし現状では強度法ベースの較正法であれば十分な圧力・温度感度を有するが、寿命法の適用に必要なレベルの TSP の発光強度を得られていないため、今後さらなる改良を行う必要がある。

以上に述べた本研究の成果により、民生用ターボ機械まわりの複雑流動場を対象とした EFD 解析に必要な不可欠な計測技術として、DL-PTSP を利用した圧力・温度の同時イメージング計測を実現させた。一方で、現状では本手法の非正常計測への適用に難があるため、今後必要となる改良の方策を明らかにしたところである。

< 引用文献 >

- 1) K. J. Moon, H. Mori and M. Furukawa: Simultaneous measurement method of pressure and temperature using dual-layer PSP/TSP with lifetime-based method, Meas. Sci. Technol., DOI: 10.1088/1361-6501/aae408 (2018).
- 2) 小浦悠太郎, 太田貴文, 森英男: 二次元計測へ向けた DL-PTSP の圧力・温度場の同時計測, 第 48 回可視化情報シンポジウム, 057 (2020).
- 3) 森英男, 黒木崇光, 小浦悠太郎: 寿命法を適用した DL-PTSP における塗膜層の構造に関する検討, 第 49 回可視化情報シンポジウム, 094 (2021).
- 4) H. Mori, Y. Koura and T. Kuroki, Development of lifetime-based method of dual-layer PSP/TSP for simultaneous imaging measurement of pressure and temperature, ISFV19 (2021).

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 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Hideo Mori, Yutaro Koura and Takamitsu Kuroki
2. 発表標題 Development of Lifetime-based Method of dual-layer PSP/TSP for Simultaneous Imaging Measurement of Pressure and Temperature
3. 学会等名 19th International Symposium on Flow Visualization (ISFV19) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 森英男, 黒木崇光, 小浦悠太郎
2. 発表標題 寿命法を適用したDL-PTSPにおける塗膜層の構造に関する検討
3. 学会等名 第49回可視化情報シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小浦悠太郎, 太田貴文, 森英男
2. 発表標題 二次元計測へ向けたDL-PTSPの圧力・温度場の同時計測
3. 学会等名 第48回可視化情報シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 森英男, 小浦悠太郎, 黒木崇光
2. 発表標題 寿命法を適用したDL-PTSPによる圧力・温度分布の同時計測における課題検証
3. 学会等名 第16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 2020年

1. 発表者名 森英男、文吉周、小浦悠太郎
2. 発表標題 DL-PTSPによる低速・低ゲージ圧流れ場の圧力・温度分布計測
3. 学会等名 第15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 2019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