

令和 5 年 6 月 14 日現在

機関番号：17401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04287

研究課題名（和文）周波数領域の寿命法を用いた低速場での圧力および温度の高精度計測法の開発

研究課題名（英文）High-Accuracy Measurement of Pressure and Temperature Using Frequency-Domain Lifetime Imaging Technique

研究代表者

宗像 瑞恵（Munekata, Mizue）

熊本大学・大学院先端科学研究部（工）・准教授

研究者番号：30264279

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：励起光の強度をkHzオーダーの正弦波に変調させて発光強度の位相や振幅比を得るFLIM法(位相法)では、独立した複数の発光パラメータを得ることに着目し、別センサで計測した温度データを用いた補正することなく、圧力と温度を同時に計測する手法の開発を行った。撮影には、高速度カメラ（CMOSカメラ）を用い、その露光タイミングを信号発生器によって制御することにより、半周期幅の4つの露光ゲートに分けて正弦波状の発光強度の変化を撮影し、圧力と温度を原理的にも物理的にも同時計測可能なシステムを構築して圧力・温度の同時計測法の高精度化を実現し、壁面への衝突噴流による検証実験により、その有効性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では変調励起光を用いることによって、従来のパルス励起光を利用する時間領域の寿命法と異なり、発光強度の変調深度や位相など複数の特性値を得るため、それらと圧力や温度の関数式を連立して解くことにより、複数のシステムや温度センサデータによる温度補正なしで圧力分布と温度分布を同時に計測できることは、学術的にも意義深く、また、同時に温度分布や圧力分布が2次的に得られるため、時間的にもコスト的にも縮小化可能となり、各種空力設計や流れ現象解明に広く貢献する。

研究成果の概要（英文）：In the FLIM (fluorescence lifetime imaging) technique (phase method), which obtains the phase and amplitude ratio of the luminescence intensity by modulating the intensity of the excitation light to a sine wave of kHz order, we focused on obtaining multiple independent luminescence parameters, and measured the temperature with a separate sensor. We developed a method to simultaneously measure pressure and temperature without correction using data. For photography, a high-speed camera (CMOS camera) was used, and the exposure timing was controlled by a signal generator. We constructed a system that can simultaneously measure both theoretically and physically both pressure and temperature, and achieved high precision simultaneous measurement of pressure and temperature.

研究分野：流体工学

キーワード：感圧塗料 圧力分布計測 温度分布計測 蛍光寿命法 位相法 分子イメージング

1. 研究開始当初の背景

大気圧環境下における低速流れ場での微差圧域の PSP 計測の高精度化は重要な課題である。そこで、本研究では周期的なサイン波や矩形波など kHz ~ MHz オーダーの変調励起光を照射してその発光強度の変化をカメラで撮影して圧力分布をイメージングする周波数領域の寿命法に着目し、大気圧環境下における低速流れ場での微差圧域の高精度 PSP 計測を実現することは必要とされている。また、この手法は従来のパルス励起光を利用する時間領域の寿命法と異なり、発光強度の変調深度や位相など複数の特性値を得るため、それらと圧力や温度の関数式を連立して解くことにより、複数のシステムや温度センサデータによる温度補正なしで圧力分布と温度分布を同時に計測する新たな技術を導入し、圧力・温度の同時計測を実現し、その高精度化を図ることは各種物理現象の解明や各種空力設計等への貢献のために有意義なことである。

2. 研究の目的

図 1 に示すように、従来の PSP 計測では、強度法でも寿命法でも高精度な圧力分布計測のためには別の温度センサで温度の情報を取得し、温度補正する必要があったが、本研究では周期的なサイン波や矩形波など kHz ~ MHz オーダーの変調励起光を照射してその発光強度の変化をカメラで撮影して圧力分布をイメージングする周波数領域の寿命法に着目し、大気圧環境下における低速流れ場での微差圧域の高精度 PSP 計測を CMOS カメラで実現する方法を開発するとともに温度分布も同時に計測し、実用レベルまで高精度化を図ることを目的とする。

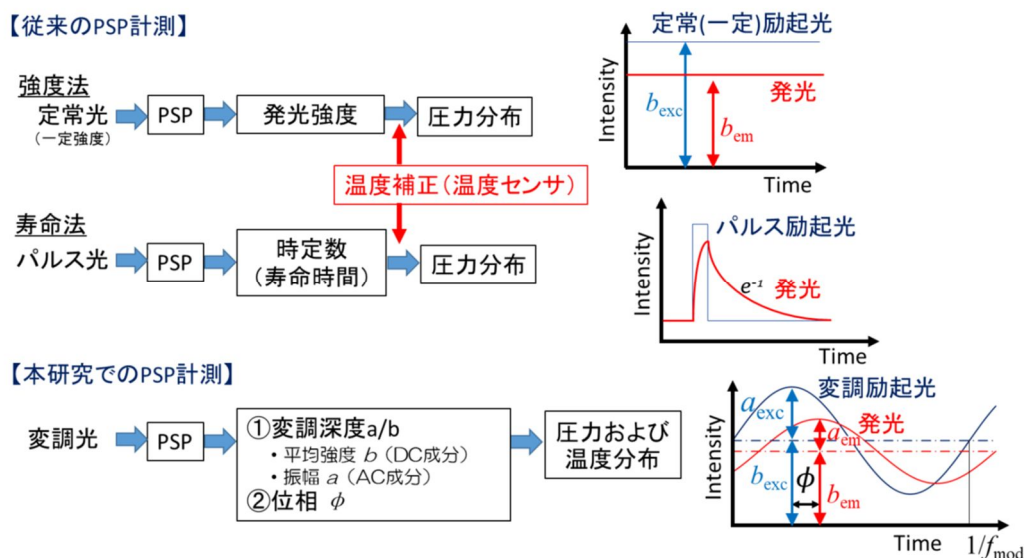


図 1 変調励起光を用いた圧力および温度分布の計測 (FLIM-PTSP)

3. 研究の方法

(1) FLIM 法に同時計測システム構築

本研究では感圧塗料 (PSP) を塗布したサンプルに変調励起光を用いることによって、従来のパルス励起光を利用する時間領域の寿命法と異なり、発光強度の変調深度や位相など複数の特性値を得るため、それらと圧力や温度の関数式を連立して解くことにより、複数のシステムや温度センサデータによる温度補正なしで圧力分布と温度分布を同時計測する図 2 のような高速度カメラを用いた 4 つのゲート画像取得システムを構築し、さらに、時間短縮して計測できる図 3 に示す逆サイクルで撮影するシステムを構築した。

(2) 曲面較正式 (2 変数関数)

4 つのゲート画像の輝度値から発光強度の変調深度 m (平均強度に対する振幅割合) と位相を以下の式により計算するプログラムを構築し、FLIM 法による圧力・温度同時計測 (FLIM-PTSP) を実現するために、変調深度 m と位相 ϕ について、参照条件時のそれらとの比を取ることで、圧力特性と温度特性を 2 変数で近似し、曲面較正式を作成する。

$$\text{変調深度 } m = 2 \cdot \frac{\sqrt{(I_1 - I_3)^2 + (I_4 - I_2)^2}}{I_1 + I_2 + I_3 + I_4}$$

$$\text{位相 } \tan \phi = \frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3}$$

$$\text{圧力 } \frac{P}{P_{\text{ref}}} = \sum_{i=0}^{n_i} \sum_{j=0}^{n_j} A_{i,j} \left(\frac{m}{m_{\text{ref}}} \right)^i \left(\frac{\tan(\phi_{\text{ref}})}{\tan \phi} \right)^j$$

$$\text{温度 } \frac{T}{T_{\text{ref}}} = \sum_{i=0}^{n_i} \sum_{j=0}^{n_j} B_{i,j} \left(\frac{m}{m_{\text{ref}}} \right)^i \left(\frac{\tan(\phi_{\text{ref}})}{\tan \phi} \right)^j$$

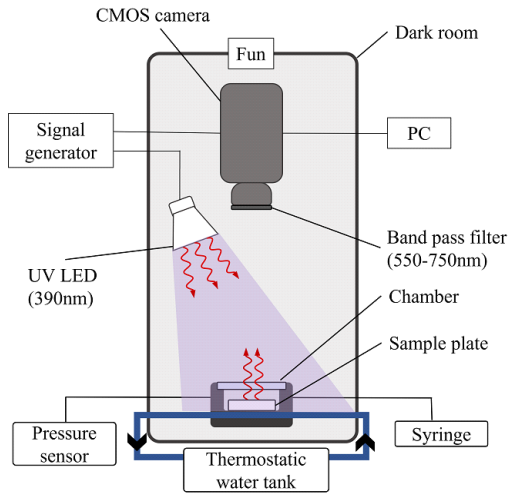


図2 FLIM法による較正実験システム

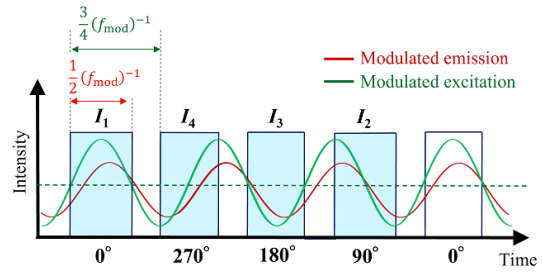
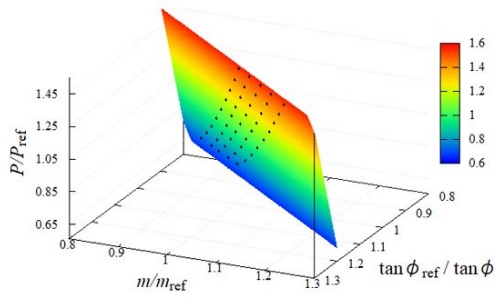
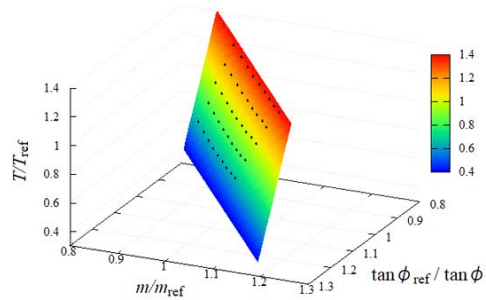


図3 高速度カメラによる逆サイクル撮影手法



(a) 圧力



(b) 温度

図4 変調深度 m と振幅比 ϕ を用いた曲面近似 (2変数関数)

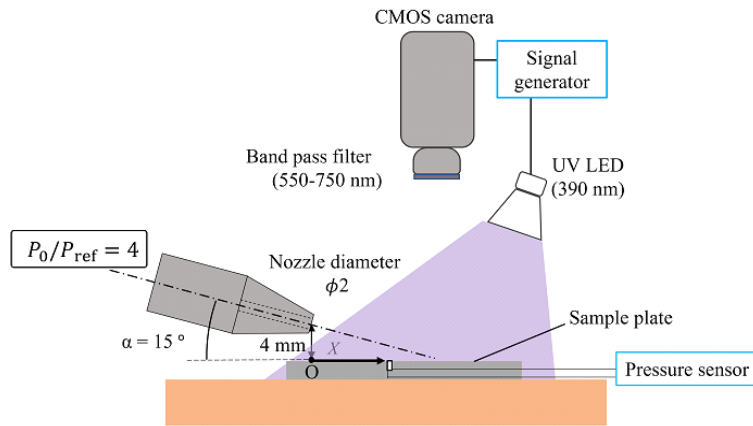
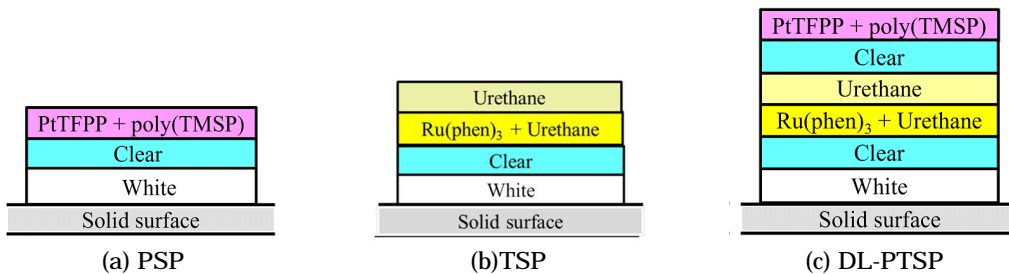


図5 実証試験装置 (壁面衝突噴流装置)



(a) PSP

(b) TSP

(c) DL-PTSP

図6 感圧塗料のみ、感温塗料のみおよび感圧塗料と感温塗料の重ね合わせサンプル

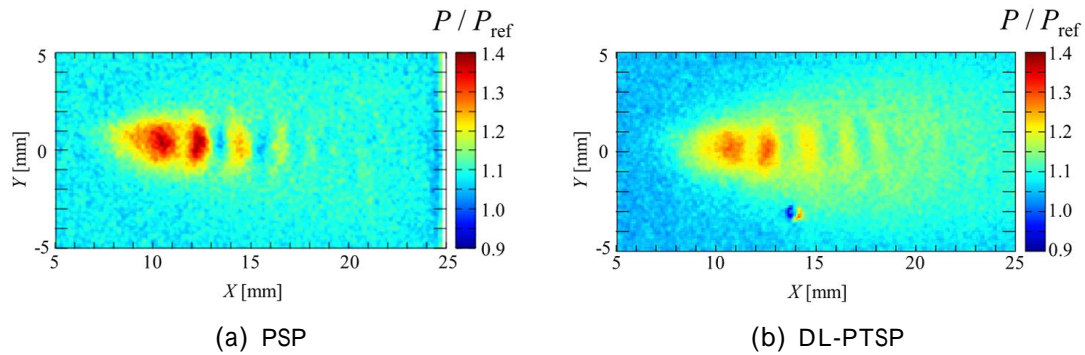


図7 常温壁面への衝突噴流により形成される壁面上の圧力分布 ($P_0/P_\infty = 4$)

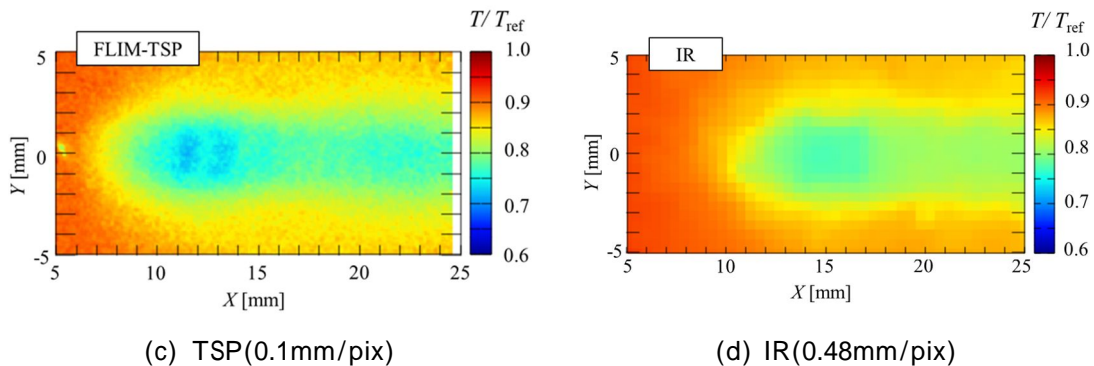
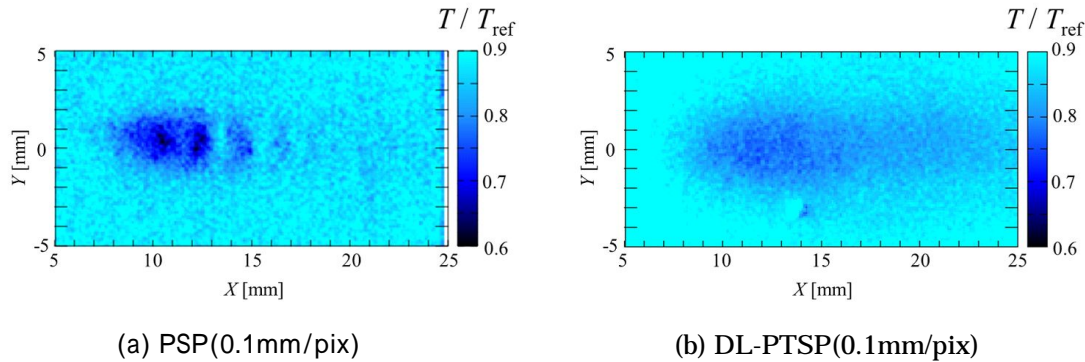


図8 常温壁面への衝突噴流により形成される壁面上の温度分布 ($P_0/P_\infty = 4$)

(3) FLIM-PTSP 法の実証試験

図5のような高温または常温壁面への圧縮空気の噴射実験装置により、本研究で開発するFLIM-PTSP法の実証試験を行う。計測精度の比較には、圧力センサとサーモカメラ(IR)による計測結果を利用した。

(4) 発光塗料の比較

感圧塗料として用いられているPSPのみを塗布したサンプルに加え、温度依存性が高いとされるTSP(Temperature Sensitive Paint)のみ、およびTSPにPSPを重ね塗りしたサンプル(Dual-Layer PSP / TSP (DL-PTSP))にFLIM-PTSP計測を適用し(図6参照)FLIM-PTSP計測システムによる較正実験により、各塗料の圧力感度と温度感度の比較を行い、計測精度の検証には、各塗料を塗布した平板への衝突噴流実験を行った。

4. 研究成果

本研究で開発してきたFLIM-PTSP法による圧力・温度の同時計測手法での時間分解能を向上させて高精度化を図るため、逆位相の順に撮影する逆周期ゲート撮影による圧力・温度の同時計測を試み、これまで適用してきた位相を固定して撮影する場合に比べて、時間分解能を25%向上することができ、照射時間のみならず、計測時間を大幅に短縮することができた。この逆周期ゲート撮影を用いたFLIM-PTSP計測を高温壁面(50°C)への衝突噴流による検証実験に適用した結果、圧力センサでの計測結果との比較により、圧力分布に関しては平均誤差4.9%で計測できた。一方、温度分布に関してはサーモカメラでの計測結果との比較では平均誤差6.8%となったが、温度分布は本計測での結果のほうが不足膨張噴流の特徴を表す温度変化を捕らえていて、サーモカメラ(IR)よりも時間分解能も空間分解能も高い計測が実現できていると考えられる。

また、常温壁面への衝突噴流による検証実験に適用し、高温壁面に比べて温度変化が小さい条件となるが、図 7(a)にみられるように、不足膨張噴流による圧力と温度の分布パターンを同時に定量的に捉えた。圧力センサーによる計測結果との平均誤差は 2.7 %となった。また、感温塗料 TSP でも FLIM 計測で高精度な温度計測が可能であることを示したが、感温塗料の上層に塗布したウレタン層による断熱効果により、PSP を用いた FLIM-PTSP による温度分布計測のほうが不足膨張噴流による圧縮膨張による温度変化のパターンを捉えていると思われる。サーモカメラ (IR) は空間分解能が高速度カメラによる FLIM 計測で得られたものより 5 倍ほど低いため、平滑化された温度分布 (図 8(d)) となっていて、比較にはより空間分解能が高い IR が必要となる。

TSP 層に PSP 層を重ね塗りしたサンプルは九州大学の森英男教授により考案されたサンプルであり、パルス光を照射して 2 つのゲート画像から寿命法により温度と圧力を同時に計測する手法として開発されているものである。圧力感度および温度感度については、PSP のみのサンプルと DL-PTSP ではほぼ同程度であった。DL-PTSP のサンプルを FLIM-PTSP 法に適用して、圧力と温度を同時に計測した結果、圧力分布については図 7(b)にみられるように、PSP のみと同様に高精度に計測できた。しかしながら、図 8(b)の温度分布については IR での温度分布と同様に壁面噴流による温度分布が平滑化された分布が得られた。これは、TSP 層の上部に塗布された PSP 層が厚過ぎたため断熱され、TSP のみの場合よりも増して圧縮膨張による温度変化のパターンが捉えられなかったと考えられ、DL-PTSP を用いる場合は TSP 層の上層に重ねた PSP 層の厚みによる断熱効果が温度計測精度に影響を与えることを明らかにした。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 守屋拓真, 堤広志郎, 神脇直仁, 宗像瑞恵, 吉川浩行
2. 発表標題 FLIM法による圧力および温度分布計測に関する研究
3. 学会等名 第49回可視化情報シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宗像瑞恵, 小林義典, 道内大貴, 中妻啓, 宮地計二, 益本和祐, 吉川浩行
2. 発表標題 自動塗布装置による感圧塗料コーティング
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

1. 発表者名 守屋拓真, 神脇直仁, 藤田位朔, 宗像瑞恵, 吉川浩行, 安木政史
2. 発表標題 正弦波光を用いた蛍光寿命イメージングによる PSP計測技術の開発
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 Mizue MUNEKATA, Maito KANEHIRO, Takumi OGAWA, Koshiro TSUTSUMI, Hiroyuki YOSHIKAWA
2. 発表標題 Simultaneous Measurements of Pressure and Temperature by Frequency-Domain Lifetime Imaging (FLIM) Technique using PSP
3. 学会等名 ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 兼廣茉弦, 堤広志郎, 宗像瑞恵, 吉川浩行, 森英男
2. 発表標題 FLIM法による圧力・温度の同時計測 単一発光塗料と重ね塗り発光塗料での計測精度の比較
3. 学会等名 第50回可視化情報シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Koshiro Tsutsumi, Maito Kanehiro, Takumi Ogawa, Mizue Munekata, Hiroyuki Yoshikawa
2. 発表標題 PSP measurement by fluorescence lifetime imaging (FLIM) technique using a high-speed camera
3. 学会等名 The 8th German-Japanese Joint online Seminar (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 塗布装置及び塗布方法	発明者 中妻啓, 道内大貴, 宗像瑞恵, 小林義典, 宮地計二	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2022-007423	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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
研究協力者	吉川 浩行 (Yoshikawa Hiroyuki)	熊本大学	
研究協力者	森 英男 (Mori Hideo)	九州大学	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	中妻 啓 (Nakatsuma Kei)	熊本大学	
研究協力者	小林 義典 (Kobayashi Yoshinori)		
研究協力者	宮地 計二 (Miyachi Keiji)		

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