

令和 4 年 6 月 14 日現在

機関番号：82626

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2020～2021

課題番号：20K20978

研究課題名（和文）小型回転機翼周りの圧力分布評価手法の開発

研究課題名（英文）Development of visualization method of pressure distribution on a fin rotating at a slow-speed

研究代表者

染矢 聡（Someya, Satoshi）

国立研究開発法人産業技術総合研究所・エネルギー・環境領域・副研究部門長

研究者番号：00357336

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では大気圧近傍の圧力差の小さい条件における圧力分布の定量可視化計測を実現する従来にはない高感度検出法を開発した。従来から行われてきた塗膜の高度化等のPSP高感度化技術は全てそのまま活用でき、検出法の工夫により、大気圧近傍での圧力感度を高めた。酸素分圧に応答する燐光の寿命と最大発光強度の両方を併用することで、圧力感度の大幅な向上を実現した。参照画像を必要とする方法と必要としない方法の両方を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の高感度計測技術の良いところを全て享受でき、画像取得タイミングチャートのための改良によって大幅な高感度化を達成できた点は、同分野の他の技術にも波及しうる他、高感度解析を通じた流動現象の解明は様々な基礎科学研究の推進に貢献する。また、この手法によりファンの周りの騒音の低減など、従来は圧力分布計測が困難で必ずしも効率的な改善ができなかった実用機器の効率改善など高度化を期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this study, a novel high-sensitivity detection method was developed to realize quantitative visualization measurement of pressure distribution under conditions of small pressure difference near atmospheric pressure. All conventional PSP high-sensitivity technologies, such as the advancement of coating films, can be utilized without modification, and the pressure sensitivity in the vicinity of atmospheric pressure has been increased by devising the detection method. By combining both the lifetime of phosphorescence responsive to oxygen partial pressure and the maximum luminescence intensity, a significant improvement in pressure sensitivity was achieved. Methods requiring and not requiring reference images were developed.

研究分野：熱流動計測

キーワード：燐光 圧力 可視化 強度法 寿命法

1. 研究開始当初の背景

自動車をはじめとするモビリティの空力抵抗低減、回転機械の騒音低減などの問題では構造物表面の圧力分布の把握が重要である。固体表面の圧力分布計測法としては感圧塗料(PSP)と呼ばれる圧力分布計測法がある。PSPは構造物表面に金属錯体やポルフィリンを高分子バインダーとともに塗布して燐光を励起し、その燐光強度や燐光寿命の強い酸素消光性を利用して酸素濃度の既知な気流に晒された表面上の酸素分圧を測定し、全圧を評価する手法である。

この酸素分圧と燐光の関係は逆関数で表されるため、酸素分圧が大気圧に近い条件では感度が極端に低下する傾向にあり、比較的圧力変化が小さい中低速の移動体周りの圧力分布や小型回転機構造物周りの圧力分布を高感度に計測することが難しかった。そのため、毎秒数十メートル以上の高速で移動する物体周りの流れや衝撃波などの解析は高精度に行えるものの、小型のファンの効率や音などの改善のための活用が十分にできなかった。

この課題の解決に向けた多くの取り組みでは、より高感度なセンサ物質の合成、比表面積が大きく発光効率の良い塗膜の開発など、センサ物質自体の高性能化が追求されてきた。新しい金属錯体やバインダーとなる高分子の開発、ナノ粒子等を用いたセンサ膜構造の開発が進められてきたが、一部のセンサ分子は一般には入手が困難であったり、耐久性他の実用上の課題があり、課題の解決には至っていないかった。

2. 研究の目的

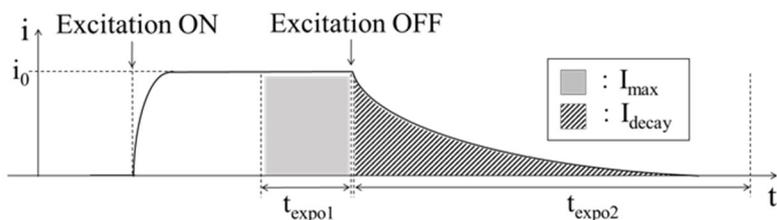
そこで本研究では大気圧近傍の圧力差の小さい条件における圧力分布の定量可視化計測を実現する従来にない高感度検出法を開発する。センサ物質の燐光の酸素分圧に対する応答を総合的に捉える。酸素分圧に応答する燐光の寿命と最大発光強度の両方を併用することで、圧力感度の大幅な向上を実現する。これによって従来から行われてきた、センサ物質やセンサ膜の高度化技術などの様々なPSP高感度化技術を全て活用可能しながら、プラスアルファで検出方法を工夫することによって、大気圧近傍での圧力感度を高める。励起のタイミング、撮影のタイミングなど、光源とカメラの制御を最適化することで高感度化を実現する。

定常的な現象を対象とする場合に使いやすい、参照画像を必要とするアプローチについて開発し、その後、非定常現象に有用な、参照画像を必要としない方法についても開発する。

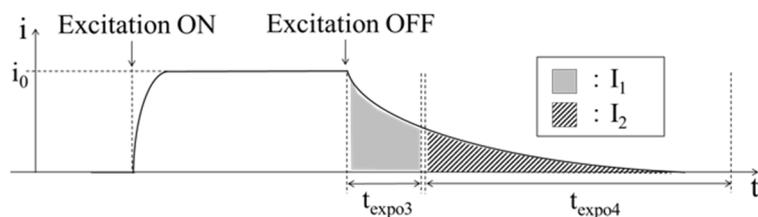
3. 研究の方法

本研究では強度法と寿命法の要素を併せ持つ計測法を提案し、較正実験及び簡単な流れ場におけるデモンストレーション実験によって、提案手法の有効性を検討する。提案手法のコンセプトと、励起および撮影のタイミングを図1(a)に示す。

従来の強度法では励起光を連続的に照射しながら、燐光強度が一定な状況で画像を取得する。一定強度の励起下における燐光強度(i_0)は、その圧力・励起条件における最大の燐光強度である。従来の強度法(以下、 IR_{Std})では画像として取得した最大発光強度(I_{max})を、同一の励起条件かつ既知の圧力条件下にて取得した参照強度($I_{max,ref}$)で規格化し、その強度比($I_{max,ref}/I_{max}$)を用いて圧力を評価する。励起光の消灯後、燐光強度は時間の経過とともに最大強度から指数関数的に減衰する。従来の寿命法では図1(b)に示すように、励起光が消えた後で燐光強度が時々刻々と減衰する間に2つの強度(I_1 および I_2)を取得し、その減衰率(I_1/I_2)を用いる。



(a) The proposed imaging method



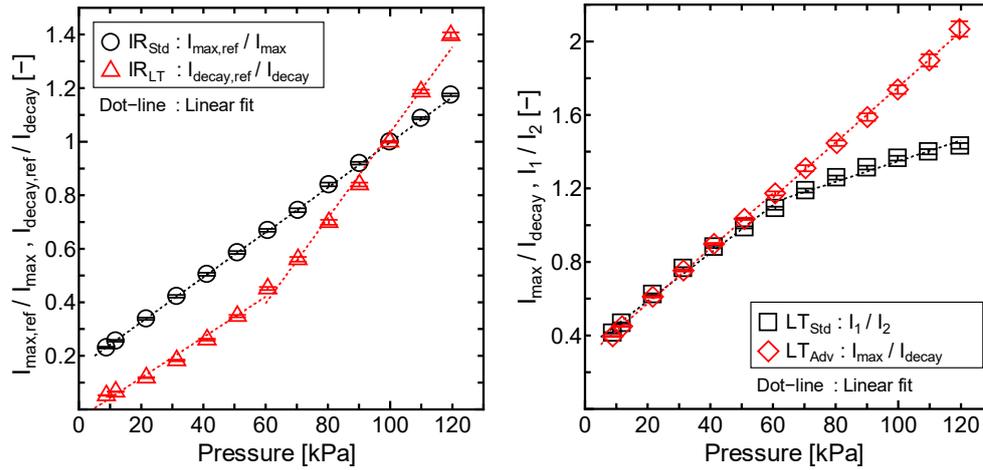
(b) The conventional lifetime-based method

図1 Timing diagrams of an excitation and imaging

本研究では、図 1 (a)に示すように励起光消灯前後に二枚の画像を取得する。つまり、パルス的な励起を 1 回行い、励起中の I_{max} と減衰過程の総燐光強度 (I_{decay}) を取得する。これまで I_{decay} を強度法に用いた例は無いが、 I_{decay} は I_{max} 同様の強度情報に加え、寿命の情報も合わせ持つ。 IR_{Std} と同様に、既知の圧力、同一の励起・撮影条件で得た参照強度 ($I_{decay,ref}$) により I_{decay} を規格化 ($I_{decay,ref}/I_{decay}$) することで、強度法 (以下、 IR_{LT}) として利用できる。 IR_{LT} は寿命の圧力依存性の影響も含むため、 IR_{Std} より強度の変化率が大きく、高い圧力感度を得られる。

一方、 I_{decay} を I_{max} で規格化 (I_{max}/I_{decay}) することにより、寿命法 (以下、 LT_{Adv}) による解析が可能である。この場合、図 1 (b)に示す従来の寿命法 (以下、 LT_{Std}) に対して、 LT_{Adv} における一枚目の画像は減衰過程の初期強度 i_0 を減衰開始直後に極めて短い露光時間で撮影することと同じ意味を持つ。

なお、詳細は割愛するが、図 1 に示した撮像方法を実現するため、LED を大電流でパルス発光させることを可能とする電源、制御回路を新規に開発して実装した。



(a) The intensity-based methods (b) The lifetime-based methods

図 2 Relations between the intensity ratio and the absolute pressure

4. 研究成果

今回の圧力計測方法の性能、特性を評価するため、真空容器内の基準圧力を絶対圧力 20kPa から大気圧の範囲で 10 kPa ずつ変化させ、時系列燐光画像 (I_{max} , I_{decay} , I_1 , I_2) をそれぞれ取得した。露光時間は、取得される 1 枚目と 2 枚目の画像の輝度値が絶対圧力 50kPa の条件下で同等になるよう、図 1 において $t_{expo1} = 17\mu s$, $t_{expo3} = 16\mu s$, t_{expo2} , t_{expo4} はカメラ仕様により制御できずいずれも 33ms である。

図 2 は各評価法における強度比の圧力依存性を示す。ここで示す強度比は各圧力条件における時空間平均値であり、エラーバーはその標準偏差を示す。

本研究では便宜上、図 2 の近似直線の傾きを圧力感度として比較した。近似範囲は低圧側 (5~60 kPa) と高圧側 (60~120 kPa) の 2 区間とした。強度法における圧力感度は、高圧側では IR_{Std} で 0.86 %/kPa, IR_{LT} で 1.64 %/kPa となり、低圧側では IR_{Std} で 0.83 %/kPa, IR_{LT} で 0.72 %/kPa であった。 IR_{Std} では高圧側と低圧側で概ね一定の圧力感度を示し、従来報告されている強度法の感度 ($PtTFPP : 0.7 \sim 0.8$ %/kPa)¹⁾ と同等の値であった。 IR_{LT} の高圧側での圧力感度は IR_{Std} に比べ約 1.9 倍高い値となった。一般的に報告されている強度法の圧力感度が約 0.8%/kPa 以下であることを鑑みると、極めて高い値である。大気圧からの圧力変動が小さい低速流れを計測する上で、高圧側での圧力感度向上は PSP 計測の適用可能範囲を大きく広げる効果がある。

次に、寿命法における圧力感度は、高圧側では LT_{Std} で 0.62 %/kPa, LT_{Adv} で 1.60 %/kPa となり、低圧側では LT_{Std} で 1.3 %/kPa, LT_{Adv} で 1.50 %/kPa であった。 LT_{Std} では、低圧側から高圧側にかけて圧力感度が低下した。一般的に寿命法では、露光・励起条件によって圧力感度の特性が変化し、広い圧力範囲で高い感度を得ることは難しい。そのため、寿命法において目的の圧力近傍で高い圧力感度を得るためには、事前に露光・励起条件の最適化を行う必要がある。この最適化プロセスは多くの労力が必要となるため、寿命法の利便性を阻害する。本研究の方法は適化が不要で、5~120kPa の広い範囲を対象として適用できる。

LT_{Std} では寿命が短く 2 枚目の画像の発光強度が著しく低下する高圧側で圧力感度が低下する傾向となったと考えられる。一方、 LT_{Adv} では高圧側と低圧側で概ね一定の圧力感度を示し、低圧側の圧力感度は、 LT_{Std} と同等の感度であり、高圧側の圧力感度は、 LT_{Std} に比べ約 2.1 倍高い値となった。また、 LT_{Adv} の圧力感度 (約 1.6 %/kPa) は、近年 Yorita ら²⁾ によって報告された寿命法の

感度(1.31 %/kPa)と比較しても、良好な値であった。Yoritaらの研究における圧力感度は、露光・励起条件の厳密な最適化やPSP膜自体の高感度化など、総合的な側面から高感度化が図られた上での結果であることを鑑みると、 LT_{Adv} は十分に高感度な寿命法といえる。以上のことから、本研究で提案する、命法と強度法の要素を併せ持つ評価法の LT_{Adv} および IR_{LT} はいずれも従来法(IR_{Std} , LT_{Std})に比べ、圧力感度が向上することがわかった。

非定常計測における提案法の圧力感度向上の効果を評価するために、非定常な酸素分圧分布の可視化計測を行った。この実験では、大気圧条件で試料に対し、微小流量の窒素ガスを接触させることで、非定常な酸素分圧分布を作成した。窒素ガスは内径2.5mmの細管から流出し、実験時の平均流量は18.6mL/sであった。大気よりも僅かに酸素分圧の低い噴流が試料に接触するように、窒素ガスはサンプルに対し10mm高い位置で平行に流出させた。較正実験は、真空容器内の基準圧力を絶対圧力90kPaから100kPaの範囲で2kPaずつ変化させて行った。露光時間は、大気圧近傍でのPSP計測の研究事例を参考に、取得される1枚目と2枚目の画像の輝度値が大気圧条件下で同等になるよう、図1において $t_{expo1} = 10\mu s$, $t_{expo3} = 12\mu s$ とした。

較正実験における取得画像に基づいて算出した圧力感度(絶対圧力90kPaから大気圧)は IR_{Std} で0.86%/kPa, IR_{LT} で1.53%/kPaであり、 LT_{Std} で0.38%/kPa, LT_{Adv} で0.73%/kPaであった。強度法の感度は、図2で述べた感度の値とほぼ同程度であった。寿命法の感度は、前述の実験に対し、強度比を1とする圧力条件を変更したため、傾きとして評価される圧力感度の値が大きく変化した。本質的には寿命法の圧力感度が低下したわけではない。

非定常酸素分圧分布計測で得られた瞬時酸素分圧分布を図3に示す。なお、大気圧条件下における酸素分圧を21kPaと仮定して、解析圧力値を酸素分圧に換算した。ここでは、窒素ガス噴流衝突直後を0secとし、0.5secおよび1.0secの時の結果を並べて示す。噴流の流れ方向は、図中の左が上流で右が下流である。本実験における酸素分圧の変動幅は、19.5~21.3kPa程度であり、大気中の絶対圧力に換算すると92.9~101.4kPaに相当する。結果として、一般的に噴流は、上流から下流方向へ噴流幅を広げながら流れるが、その特徴を全ての評価法において計測できた。また、提案法(IR_{LT} , LT_{Adv})では、空間的に非定常な分布のディテールを従来法よりも鮮明に計測できた。これら提案法の特徴は、従来法では困難であった低速流れ場における非定常PSP計測の実現に寄与するものと考えられる。

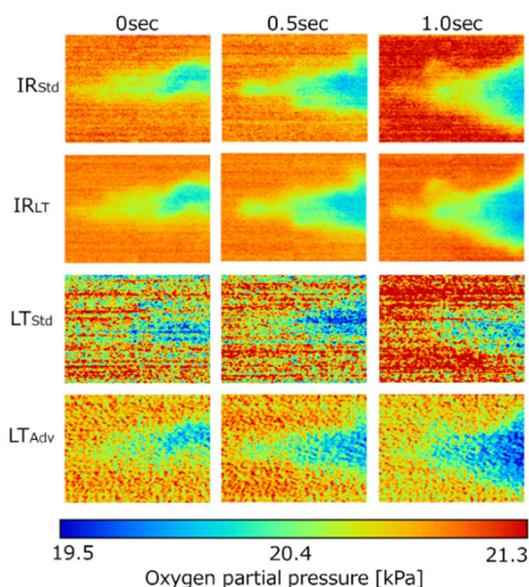


図3. Instantaneous oxygen partial pressure distributions in nitrogen gas jet flow

引用

- 1) T. Liu et al., Pressure and Temperature Sensitive Paints, Springer-Verlag, (2004).
- 2) D. Yorita et al., Improvement of Lifetime-based PSP Technique for Industrial Wind Tunnel Tests1, 55th AIAA Aerospace Sciences Meeting, Grapevine, Texas, (2017).

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 0件）

1. 著者名 Satoshi Someya	4. 巻 32
2. 論文標題 Particle-based temperature measurement coupled with velocity measurement	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Measurement Science and Technology	6. 最初と最後の頁 42001
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1361-6501/abc0b0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 石川紀彰, 大部葵, 李艶栄, 稲垣照美, 染矢聡
2. 発表標題 微小流路内におけるスラグ流の可視化計測
3. 学会等名 日本機械学会関東支部 講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 李艶栄, 中村優菜, 染矢聡, 稲垣照美
2. 発表標題 音圧変動に対する感圧塗料の周波数応答性評価
3. 学会等名 日本機械学会関東支部 講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小川恒星, 染矢聡, 李艶栄, 稲垣照美
2. 発表標題 PSP の低酸素分圧域における発光特性に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会関東支部 講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 堀本北斗, 橋本宏紀, 染矢聡, 李艶栄, 稲垣照美
2. 発表標題 ペンダントドロップ法を用いた界面張力とその温度係数計測
3. 学会等名 日本機械学会関東支部 講演会
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
研究分担者	李 艶栄 (Li Yanrong) (20712821)	茨城大学・理工学研究科(工学野)・准教授 (12101)	

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
---------	---------