

令和 4 年 6 月 28 日現在

機関番号：82505

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K03962

研究課題名(和文)HDR処理を用いた感圧塗料による圧力計測の高分解能化

研究課題名(英文)Sensitivity Improvement of Pressure Sensitive Paint Combined with the HDR Image Processing

研究代表者

石井 将人(Ishii, Masato)

科学警察研究所・法科学第二部・主任研究官

研究者番号：70462752

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：空気中における物体表面の圧力分布を面情報として取得できる感圧塗料(PSP: Pressure Sensitive Paint)は、大気圧付近での圧力分解能の制約から、低速な流れ場においてその有効性が十分に示されているとは言えない。そこで、本研究では、低速な流れ場における圧力感度の向上を目指し、画像処理技術であるHDR(High Dynamic Range)処理を適用することによって圧力感度の向上を図った。その結果、従来法と比較して約2～3倍の圧力感度を示し、HDR処理を併用することによって圧力感度が向上することが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで、感圧塗料計測は航空機周りの流れ場のように比較的高速の流れ場が計測対象の中心であったが、HDR処理を用いることで大気圧付近における圧力感度の向上を図る可能性が示された。この結果から、これまでに困難であった、自動車や鉄道といった身の回りに存在する輸送機器を対象とした感圧塗料計測が可能となる可能性が示された。

研究成果の概要(英文)：The pressure sensitive paint technique has been applied for the surface state measurement in the high-speed flow field; however, it has been difficult to apply the measurement in the low-speed flow field because of the low-pressure sensitivity for the field. In this study, the HDR (High Dynamic Range) technique has been applied for the image processing state in the PSP measurement technique to improve the pressure sensitivity in the low-speed flow field. Consequently, the suggested method has given the 2-3 times improvement of the pressure sensitivity comparing to the conventional one.

研究分野：流体工学

キーワード：感圧塗料 画像計測 感温塗料 HDR処理

### 1. 研究開始当初の背景

感圧塗料を用いた物体表面の圧力計測法は、超音速域及び遷音速域といった圧縮性流れ場における計測法としての有効性が既に示されている状況にあったが、その一方で、非圧縮性流れ場に対する計測法としては、その有効性が十分に示されたとはいえない状況にあった。圧縮性流れ場における計測と比較すると、非圧縮性流れ場における圧力計測に際しては大気圧付近の微小な圧力変化を捉える必要があるものの、感圧塗料の圧力分解能の低いことがその理由と考えられていた。感圧塗料計測は、計測対象物表面からの発光強度変化を用いる画像計測法であることから、その圧力分解能は発光強度変化を記録する撮像素子の性能に左右されることとなる。一般的に科学計測で記録される画像の濃度階調は 12~16bit が多いが、その一方で撮像素子としてのダイナミックレンジは広く取られることが多く、計測対象物の発光強度変化を記録する感圧塗料計測においては、ダイナミックレンジと濃度階調との関係が圧力分解能の低い理由となっていた。

### 2. 研究の目的

感圧塗料計測における圧力分解能向上のため、実用化の進んでいる画像処理法の HDR (ハイダイナミックレンジ) 処理を導入する。HDR 処理を導入することによって S/N 比の向上が見込まれ、バックグラウンドノイズに埋もれた微小圧力変化を捉えることが可能になると共に、記録される数値データの分解能が向上するため、圧力分解能の向上に繋がると考えられる。そこで、本研究では、HDR 処理を適用することによって感圧塗料計測の圧力分解能向上を図り、その効果を実験的に検証すると共に、連続光を光源に用いた非定常計測を行うことによって、非定常計測に向けた露光条件を明らかにすることを目的とした。

### 3. 研究の方法

#### (1) 露出条件の異なる発光情報に基づく圧力感度の評価

HDR 処理に必要な露出条件の異なる発光情報は、分岐光学系を構築することによって取得した。一般的な HDR 処理では、露光時間 (シャッタースピード) を変化させることで露出条件の異なる画像を取得するが、感圧塗料計測のような画像計測法の場合、計測対象となる物理現象によっては露光時間の変化が移動ブレの原因となりえることから、本研究ではレンズ絞りを変化させることによって撮像素子に対する入射光量を調整し、露出条件の異なる発光強度情報を記録した。

計測対象には、アルミニウム合金製の平板に陽極酸化処理を行い、ルテニウム錯体をディッピング法により定着させた陽極酸化被膜型感圧塗料 (AA-PSP) を試料として使用した。

#### (2) 高速飛翔体を用いた連続光光源による時間分解能評価

計測対象には小型の鈍頭型模型を使用し、模型は火薬による射出装置を用いて大気中に射出し、波長 405nm の CW レーザーによる励起エリアを通過する際の発光情報を高速度カメラにより記録した。ルテニウム錯体による感圧塗料計測では、高速飛翔時の発光情報取得に十分な発光強度の得られない可能性があったため、感圧塗料の発光色素に TCPP を用いたほか、感温塗料の発光色素として使用されるローダミン B を使用し、AA-PSP 及び AA-TSP (陽極酸化被膜型感温塗料) の双方を使用して連続光光源による時間分解能評価を行った。

### 4. 研究成果

#### (1) 露出条件の異なる発光情報に基づく圧力感度の評価

AA-PSP を施した平板試料を圧力校正チャンバー内に設置し、レンズ絞りを f2.8, f4.0, f5.6 のそれぞれに設定した光学系により 80 ~ 180kPa の範囲の圧力条件化で記録した発光強度情報を用いて圧力感度を評価した。圧力校正チャンバー中の発光強度を記録した画像の例を図 1 に示し、記録した発光強度情報に HDR 処理を施して得られた圧力感度の結果を図 2 に示す。

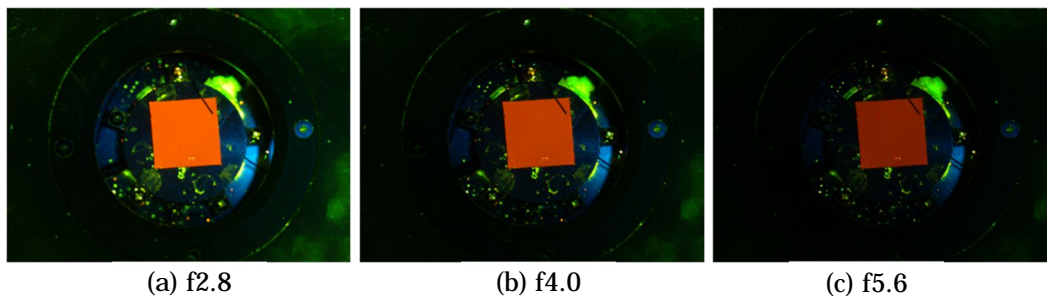


図 1 AA-PSP 試料の発光状況 (チャンバー内圧力 100kPa)

図2に示すとおり,単一の露出条件から得られた従来法によるAA-PSPの圧力感度は平均で0.098~0.186%/kPaであったことに対し,露出条件の異なる発光情報を記録した画像にHDR処理を施すことで得られた提案法による圧力感度は平均で0.316%/kPaであった.このことから,HDR処理を行うことによる圧力感度の向上に伴い,圧力分解能の向上することが示された.一方で,図2にエラーバーで併記した試料ごとのバラつきは,提案法の方が大きく,元の画像に含まれるノイズの影響がHDR処理によって増幅されている可能性が示唆された.

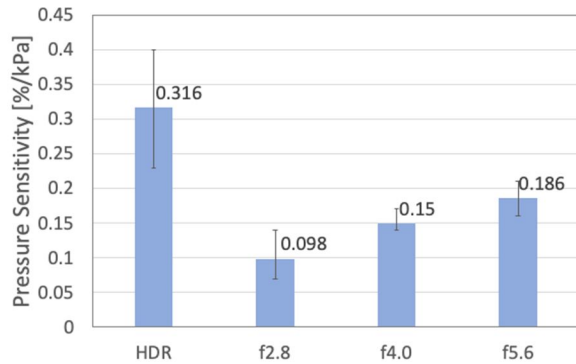


図2 提案法と従来法における圧力感度の比較

(2) 高速飛翔体を用いた連続光光源による時間分解能評価

AA-PSP及びAA-TSPを適用した鈍頭型模型を高速で飛翔させて表面の状態計測を試みた.発光画像は,高速度カラーカメラを使用し,撮影速度50,000fps,露光時間10 $\mu$ s,解像度512 $\times$ 320pixelの条件で撮影した.その結果,波長405nmの可視光レーザーを用いて励起したAA-PSPでは十分な発光強度を得ることができず,圧力分布を得ることはできなかったが,AA-TSPでは温度分布を得ることができた.図3にAA-TSPにより得られた模型の発光強度画像を示し,図4に模型表面の温度分布を示す.なお,この時の模型の飛翔速度は349.4m/sであった.

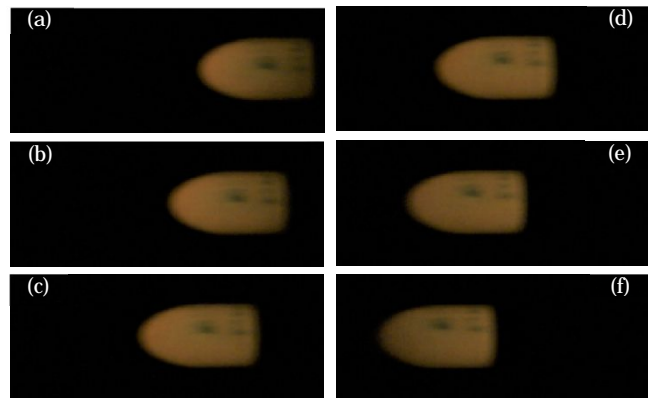


図3 AA-TSPの発光強度画像

図4に示すとおり,温度分布を求めた結果のいずれでも,模型先端付近で表面温度は高く,模型中央に向けて表面温度が低下した後,模型後端に向けて表面温度がわずかに上昇している様子が捉えられている.この結果の妥当性を評価するため,数値計算を行って得られた温度分布を用いて比較した結果を図5に示す.図5から,数値計算結果と比較すると実験結果は全体的な傾向は一致しているといえるものの,全体として温度が低いことがわかる.この結果から,定性的には概ね妥当な計測結果が得られているといえる.これらの結果から,連続光を用いることによって,50kHzの時間分解能での計測が可能であることが示された.

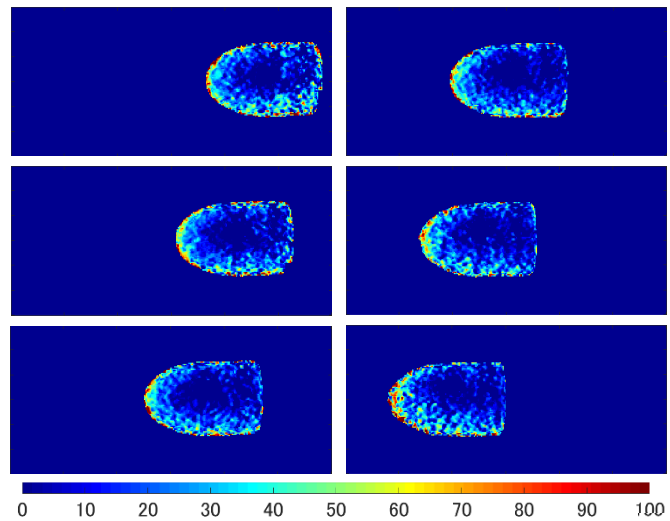


図4 飛翔体表面の温度分布(飛翔速度349.4m/s)

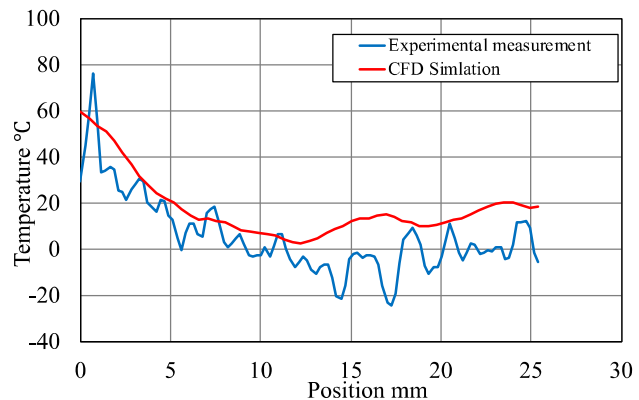


図5 AA-TSPによる実験結果と数値計算結果の比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 石井 将人
2. 発表標題 PSP/TSPを用いた実飛翔体の表面状態計測
3. 学会等名 日本流体力学会年会2019
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
---------	---------