

令和 5 年 6 月 16 日現在

機関番号：33903

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04292

研究課題名（和文）回転体表面での微差圧計測を実現するための圧力変動検出PSP計測システムの開発

研究課題名（英文）Development of PSP measurement system for detecting fine differential pressure on the surface of rotating blade

研究代表者

江上 泰広（Egami, Yasuhiro）

愛知工業大学・工学部・教授

研究者番号：80292283

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）：感圧性塗料（PSP）を用いて微小な圧力変動を高精度に測定するために、差圧測定技術を開発した。PSPは絶対圧センサであるため大気圧付近の100Paの圧力変動による発光強度の変化は、0.1%以下であり、現在の高速度カメラの分解能が不十分である。光電子増倍管（PMT）のアナログ出力信号を信号フィルタで交流成分と直流成分を分離し、小さな交流成分を増幅し高分解能で測定することで精度を向上させた。その結果1300Hzで振幅20 Paの2次元圧力変動場を、ノイズ除去のための特別な信号後処理を行うことなく測定できることを実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

物体表面の微小な圧力変動を高い精度で計測するために光電子増倍管を用いて感圧塗料からの発光の変動成分だけを増幅して差分計測する方法を開発した。これにより高度な信号処理を用いずとも、圧力変動を点計測で155HzのP~5Pa、面計測で1300HzでP~20Paで計測できることを示した。これにより、従来の高速度カメラでは計測できなかった微小圧力変動を高精度で計測する手法を確立することができた。

研究成果の概要（英文）：A differential pressure measurement technique was developed to measure minute pressure fluctuations accurately using pressure-sensitive paint (PSP). Since PSP is an absolute pressure sensor, the change in luminescence intensity due to pressure fluctuations of 100 Pa near atmospheric pressure is less than 0.1%, which is an insufficient resolution for the current high-speed cameras. The analog output signal from the photomultiplier tube (PMT) is separated into AC and DC components by a signal filter, and the small AC component is amplified for high-resolution measurement to improve accuracy. As a result, it was demonstrated that a two-dimensional pressure fluctuation field with an amplitude of 20 Pa at 1300 Hz could be measured without any special signal post-processing to remove noise.

研究分野：流体力学，航空工学

キーワード：感圧塗料 差分計測 微小圧力変動 高精度計測 光電子増倍管 回転体 面計測

1. 研究開始当初の背景

プロペラなどの回転体の非定常な表面圧力分布の計測に、非接触で高空間分解能な計測が可能な感圧塗料(PSP)を適用する研究がなされている。しかし基準圧力(大気圧~100kPa)に対して圧力変動(<100 Pa)が0.1%以下と小さく、また回転移動するため十分な計測精度が得られていない。感圧塗料(PSP)はCMOSカメラなどを用いて光学的に圧力変動場を高い空間分解能で計測できる計測法である。近年、低速流れなどの微小な圧力変動の計測精度を向上させる試みが盛んになされてきている。PSPは絶対圧センサであるため大気圧付近(~100 kPa)での100 Paの圧力変動で0.1%程度の発光強度変化が生じる。この変化は12 bit (4096 階調)の高速度カメラで計測すると4階調程度の変化にしかならず、圧力分解能が不足している。これまでの研究では、計測後の様々な画像処理によってノイズを除去し、 $\Delta P \sim 100$ Pa程度の圧力変動は計測できるようになってきた。しかし数十Pa以下のさらに小さい変動の計測では、この高速度カメラの圧力分解能の低さがボトルネックとなっている。そのため微小圧力変動を高分解能で計測する新しい計測方法の開発が重要な課題となっていた。過去に高速度カメラを用いて微小圧力変動計測を行った研究では、計測画像を取得後に、特異値分解(SVD)、固有直交分解(POD)や動的モード分解(DMD)などの画像処理を行うことによってノイズを低減していた。これらの画像処理の精度は元の計測画像に大きく依存するため、ノイズの少ない元の計測画像が取得できれば、よりノイズの少ない結果が得られる。そこで、本研究では、非定常PSP計測の元の計測画像のS/N比を向上させるために、微小圧力変動を光電子増倍管(PMT)を用いてPSPの発光を捉え、PMTからのアナログ信号のフィルタ処理の方法や、データ取得後のデジタル信号フィルタ処理法によるノイズ除去効果を比較し、微小変動成分の高精度計測を目指した。

2. 研究の目的

本研究はPSPからの発光強度変化を光電子増倍管(PMT)を用いて高時間分解で取得することで、アナログ信号をフィルタ処理することで変動成分のみを抽出・増幅して高分解能計測することで微小な圧力変動を高精度差分計測する手法を確立することを目的として、以下の研究を推進した。

- 1) PMTを用いた微小圧力変動の高精度計測法の開発。
- 2) PMTを用いた高精度面計測法の確立と回転体への適用

3. 研究の方法

本研究では、差分PSP計測法の開発を以下の順で実施した。

① PMTを用いた微小圧力変動の高精度計測法の開発

大気圧(100 kPa)付近の振幅100Paの圧力変動によるPSPの発光強度変化は0.1%程度と非常に小さい。そのため図1に示すように、PSPからの発光をPMTで計測したアナログ信号を直流成分と交流成分に信号フィルタを含む回路で分離・増幅することで高解像度での計測を可能にした。また、図2に示す共鳴管を用いて、音波の周波数や振幅を変化させながらPSPによる差分計測を行い、計測限界を調査した。

② 差分PSP計測法による高精度面計測法の確立と回転体への適用

①の差分PSPの計測系の点計測のデータより非定常の面情報に再構成する方法を検討した。図3の共鳴箱をもちいて2次元的な圧力変動場をつくりPMTと励起光源のレーザー光をトラバース装置で移動させることで面情報を得た。また、点データから面情報に再構築する際の基準信号として圧力センサの信号を用いた。

また、回転体(DCファン)に感圧塗料と感温塗料を塗布し(図4)、3000、4500、5700 rpmにおいて共鳴箱同様にPMTとレーザー光をトラバース装置で移動させて面計測を行った。

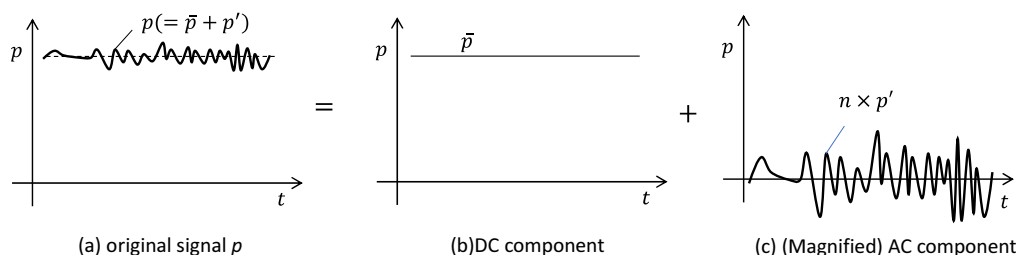


図1 差分PSP計測法の概念図

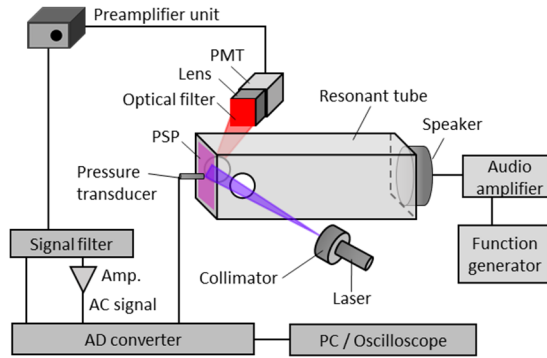


図2 共鳴管を用いた実験装置の模式図

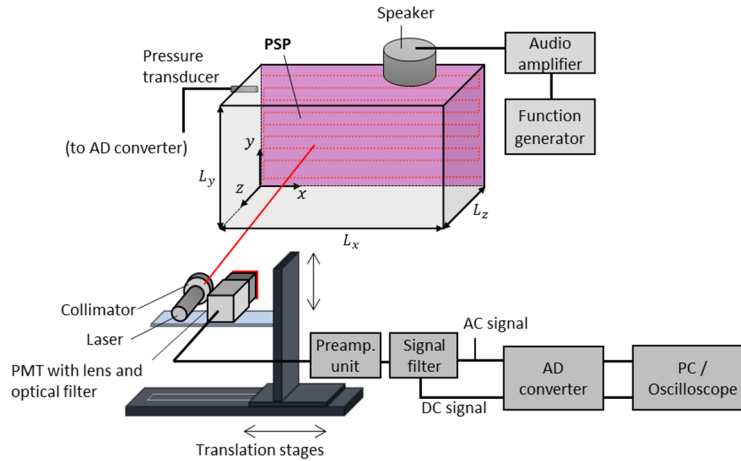


図3 共鳴箱を用いた2次元圧力変動場計測の模式図



図4 回転体を用いた圧力変動場計測

4. 研究成果

①PMT を用いた微小圧力変動の高精度計測法の開発.

PSP からの発光信号 p は図1に示すように DC (\bar{p}) 成分と AC (p') 成分に分解することができる. PMT で計測した PSP からの発光信号を信号フィルタで DC 成分と AC 成分に分離する. そして, 抽出した小さな交流成分を増幅し, 高分解能で記録する. この方法は, 直流成分と交流成分の両方を高分解能で測定することができ, 熱線式風速計などのアナログ信号の測定では標準的な方法である.

図5に, 得られた周波数 155Hz の圧力変動を示す. 圧力信号の AC 成分 p' は, オシロスコープに保存する前に, アナログ信号フィルタを用いて, 155Hz では 100~200Hz の間でバンドパスフィルタリングした. その結果振幅が $\Delta p = 47\text{Pa}$ の圧力変動が, 測定後に DMD などの高度な信号処理をしなくても, 高い S/N で測定することができていることがわかる. 最終的には 155Hz の圧力波で振幅 $\Delta p \sim 5\text{Pa}$ まで高い S/N で計測できることが実証された. 本研究のデータ取得可能なレートは 2~20 MHz と通常の高速度カメラによる PSP 計測と比較して非常に高い高い時間分解能でのデータ取得が可能である. この PMT を用いた差分 PSP 計測法さらに得られる信号の S/N も高く, 微小な圧力変動を PSP で計測する際の有効な手法であることが分かった.

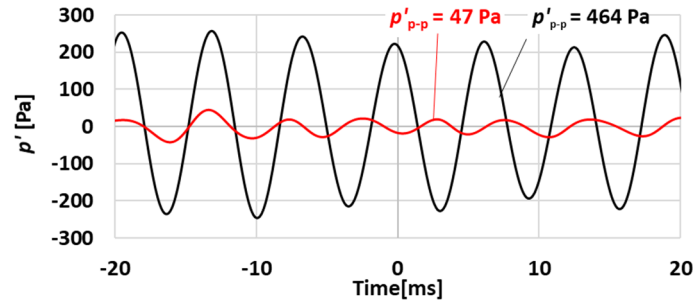


図 6 差分 PSP 法で得られた微小な圧力変動の計測結果¹⁾

② 差分 PSP 計測法による高精度面計測法の確立と回転体への適用

図 6 は図 4 の共鳴箱を用いて得られた圧力変動場の差分 PSP 法による計測結果である．共振周波数 1300Hz において，振幅が $\Delta p = 50\text{Pa}$ と小さいにもかかわらず，モード (1, 1, 0) に特徴的な四隅の圧力の周期的変動を測定することができる．このように，PMT を用いた差分 PSP 法は，データのサンプリング周波数を圧力変動の周波数に比べて十分に高くできるため，数十 kHz 以上の高い周波数の圧力変動を十分な時間分解能で測定できることが証明された．

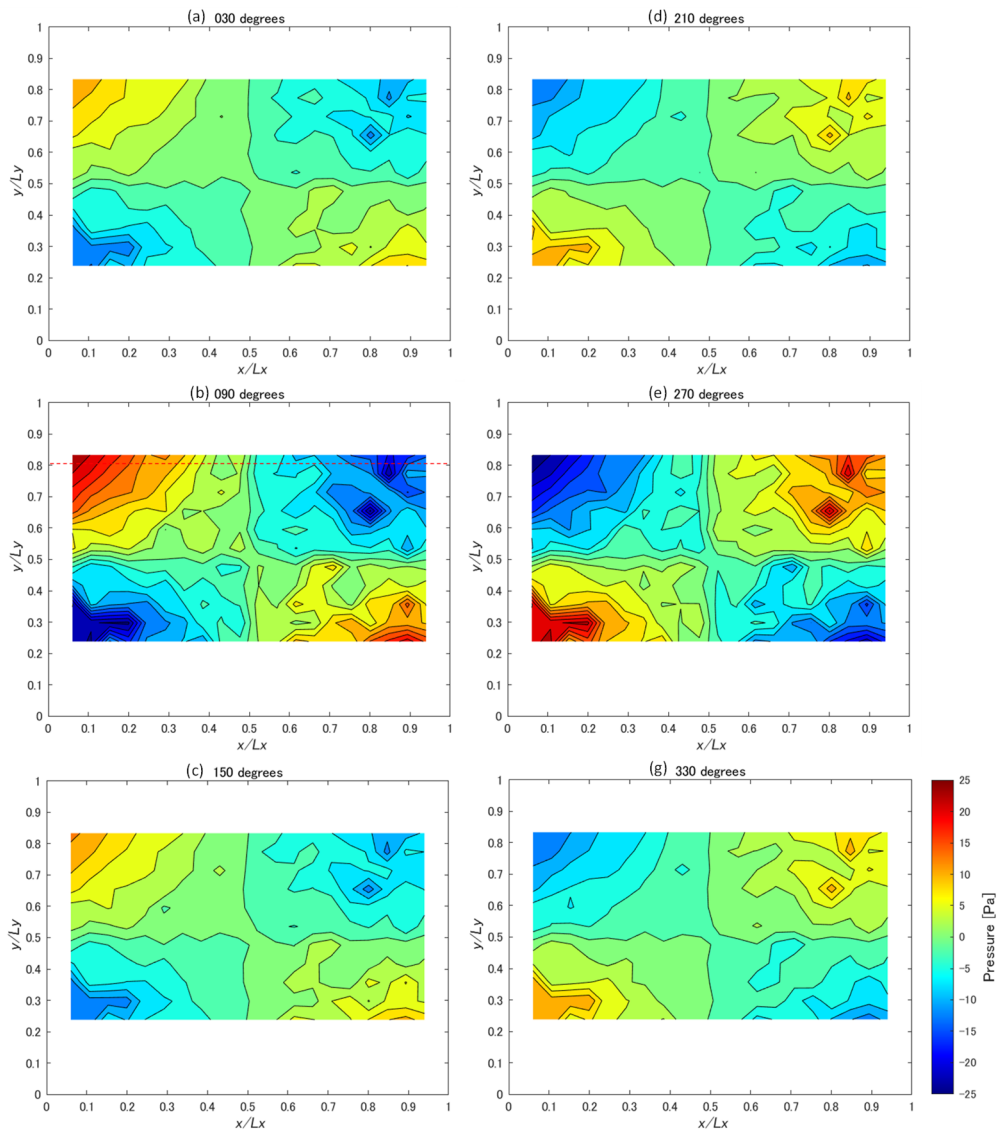


図 6 差分 PSP 法による共鳴箱の圧力変動場の時系列計測結果¹⁾

図7は、図6(c)の $y/Ly = 0.8$ の線に沿った圧力分布である。点は測定値、実線は解析解から得られた $y/Ly = 0.8$ の圧力分布である。実測値は解析で得られた圧力分布に非常に近いことがわかる。実測値と解析値の差の標準偏差は、 2.7Pa と非常に小さな値が得られた。

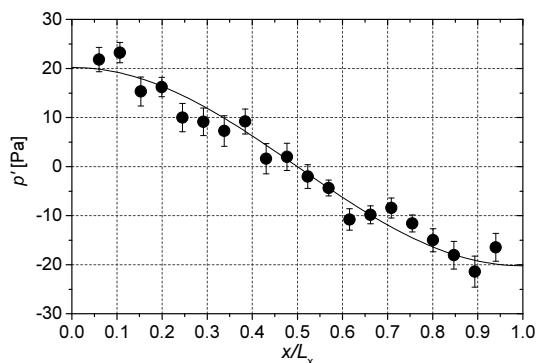


図7 差分PSP法による共鳴箱の圧力変動場の時系列計測結果¹⁾

一方、PMTを用いたこの差分PSP計測法は、高速度カメラとは違い点計測である。そのため点データを面データに再構築する際の計測データ間の僅かな位相のずれが、信号のノイズよりも大きな誤差要因になってしまうことが分かった。この位相のずれは、信号の周波数の僅かな揺らぎにも影響される。そのため、より位相のずれによりロバストな参照信号の選択や解析方法の開発が必要であることも分かった。一方、得られる信号データのS/Nは非常に高くサンプリングレートも非常に高く設定することができる。そのため、SVD(POD)やDMDなどの高度な後信号処理と組み合わせることで、より小さな圧力変動も高精度に測定することができることが示された。さらに、高速度カメラでの計測時の参照信号源としても有用であると考えられる。

回転体の結果については現在解析中であり、結果は査読論文への投稿を予定している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 10件／うち国際共著 2件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Egami Yasuhiro, Yamazaki Yuya, Hori Naoto, Sugioka Yosuke, Nakakita Kazuyuki	4. 巻 21
2. 論文標題 Investigation of Factors Causing Nonuniformity in Luminescence Lifetime of Fast-Responding Pressure-Sensitive Paints	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 6076 ~ 6076
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/s21186076	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Hasegawa Mitsugu, Kurihara Daiki, Egami Yasuhiro, Sakaue Hirotaka, Jemcov Aleksandar	4. 巻 21
2. 論文標題 Predicting Pressure Sensitivity to Luminophore Content and Paint Thickness of Pressure-Sensitive Paint Using Artificial Neural Network	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 5188 ~ 5188
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/s21155188	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 IKAMI Tsubasa, FUJITA Koji, NAGAI Hiroki, MATSUDA Yu, EGAMI Yasuhiro	4. 巻 41
2. 論文標題 Investigation of Data Acquisition Conditions for Dynamic Mode Decomposition in Unsteady PSP Measurement	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Transactions of the Visualization Society of Japan	6. 最初と最後の頁 11 ~ 20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3154/tvsj.41.11	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 -
1. 著者名 Inoue Tomoki, Matsuda Yu, Ikami Tsubasa, Nonomura Taku, Egami Yasuhiro, Nagai Hiroki	4. 巻 33
2. 論文標題 Data-driven approach for noise reduction in pressure-sensitive paint data based on modal expansion and time-series data at optimally placed points	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics of Fluids	6. 最初と最後の頁 077105 ~ 077105
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0049071	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 -

1. 著者名 Matsuda Yu, Kawanami Osamu, Orimo Riki, Uete Keigo, Watanabe Atsufumi, Egami Yasuhiro, Yamaguchi Hiroki, Niimi Tomohide	4. 巻 153
2. 論文標題 Simultaneous measurement of gas-liquid interface motion and temperature distribution on heated surface using temperature-sensitive paint	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Heat and Mass Transfer	6. 最初と最後の頁 119567 ~ 119567
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119567	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 -

1. 著者名 Kurihara Daiki, Egami Yasuhiro, Sakaue Hiroataka	4. 巻 112
2. 論文標題 Luminescent intensity enhancement of pressure-sensitive paint by optimization of mole fraction of oxygen	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Aerospace Science and Technology	6. 最初と最後の頁 106627 ~ 106627
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ast.2021.106627	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 該当する

1. 著者名 Egami Y, Hasegawa Y, Matsuda Y, Ikami T, Nagai H	4. 巻 32
2. 論文標題 Ruthenium-based fast-responding pressure-sensitive paint for measuring small pressure fluctuation in low-speed flow field	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Measurement Science and Technology	6. 最初と最後の頁 024003 ~ 024003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6501/abb916	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 -

1. 著者名 Inoue Tomoki, Ikami Tsubasa, Egami Yasuhiro, Nagai Hiroki, Naganuma Yasuo, Kimura Koichi, Matsuda Yu	4. 巻 188
2. 論文標題 Data-driven optimal sensor placement for high-dimensional system using annealing machine	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Mechanical Systems and Signal Processing	6. 最初と最後の頁 109957 ~ 109957
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ymsp.2022.109957	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 -

1. 著者名 Kasai Miku, Suzuki Aritoshi, Egami Yasuhiro, Nonomura Taku, Asai Keisuke	4. 巻 350
2. 論文標題 A platinum-based fast-response pressure-sensitive paint containing hydrophobic titanium dioxide	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Sensors and Actuators A: Physical	6. 最初と最後の頁 114140 ~ 114140
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.sna.2022.114140	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 -

1. 著者名 Egami Yasuhiro, Takizawa Masaki, Watanabe Saki, Matsuda Yu	4. 巻 60
2. 論文標題 Development of Differential Pressure-Sensitive Paint Technique for Detecting Small Pressure Fluctuations	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 AIAA Journal	6. 最初と最後の頁 6478 ~ 6482
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2514/1.J061856	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 -

1. 著者名 Matsuda Yu, Katayama Satoshi, Ikami Tsubasa, Egami Yasuhiro, Nagai Hiroki	4. 巻 93
2. 論文標題 Structured light illumination for pressure-sensitive paint measurement under ambient light	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 055101 ~ 055101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0089000	査読の有無 無
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21件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 9件)

1. 発表者名 M. Hasegawa, D. Kurihara, Y. Egami, H. Sakaue, and A. Jencov
2. 発表標題 Pressure sensitivity prediction for pressure-sensitive paint development using artificial neural network
3. 学会等名 AIAA SciTech 2022 Forum (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Egami, M. Takizawa, S. Watanabe, and Y. Matsuda
2. 発表標題 Development of differential PSP technique for detecting small pressure fluctuations
3. 学会等名 AIAA SciTech 2022 Forum (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Ikami, K. Fujita, H. Nagai, Y. Matsuda, Y. Egami
2. 発表標題 Dynamic mode decomposition analysis of Karman vortex structure measured by unsteady PSP
3. 学会等名 19th International Symposium on Flow Visualization (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 堀江 広夢, 寺坂 雄大, 松田 佑, 江上 泰広
2. 発表標題 光電子増倍管を用いた微小変動圧力のPSP 差分計測
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 2021年

1. 発表者名 江上泰広, 瀧澤匡, 渡邊早紀, 松田佑
2. 発表標題 光電子増倍管を用いた微小圧力変動の高分解能PSP計測
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 Y. Egami, Y. Yamazaki, N. Hori, Y. Sugioka, K. Nakakita
2. 発表標題 Investigation on Non-Uniformity of Luminescence Lifetime of Fast-Responding Pressure-Sensitive Paint
3. 学会等名 AIAA Scitech 2021 Forum (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 D. Kurihara, Y. Egami, H. Sakaue
2. 発表標題 Optimum Oxygen Concentration in Test Gas for Pressure-Sensitive Paint Applications
3. 学会等名 AIAA Scitech 2021 Forum (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S. Katayama, Y. Matsuda, Y. Egami, T. Ikami, H. Nagai
2. 発表標題 Development of PSP Measurement Technique using Structured Illumination
3. 学会等名 17th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 折茂里樹, 河南治, 江上泰広, 松田佑
2. 発表標題 強制対流沸騰場における寿命法を用いた感温塗料計測
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 伊神翼, 藤田昂志, 永井大樹, 松田佑, 江上泰広
2. 発表標題 非定常PSP計測でのデータ取得条件が動的モード分解に与える影響の調査
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 江上泰広, 長谷川敦也, 松田佑, 伊神翼, 永井大樹
2. 発表標題 ルテニウム型高速応答感圧塗料を用いた低速流れ場の微小圧力変動計測
3. 学会等名 流体力学講演会 / 航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム 2020 オンライン
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 森重聡一郎, 山崎遊野, 松田佑, 伊神翼, 永井大樹, 江上泰広
2. 発表標題 非定常PSP計測における固有直交分解と動的モード分解のノイズ除去効果
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 伊神翼, 藤田昂志, 永井大樹, 松田佑, 山崎遊野, 江上 泰広
2. 発表標題 非定常PSP計測における動的モード分解のデータ取得条件の調査
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 堀尚人, 山崎遊野, 中北和之, 杉岡洋介, 江上泰広
2. 発表標題 高速応答感圧塗料の寿命法計測における誤差要因の解明
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 鈴木有敏, 今枝祐貴, 江上 泰広
2. 発表標題 特性の異なる粒子とポリマの組合せが高速応答PSPのバインダ構造に与える影響
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 Y. Egami, Y. Matsumura, A. Shibata, and Hirotaka Sakaue
2. 発表標題 Investigation of Thermographic Phosphors Properties for High-Speed Aerodynamics
3. 学会等名 AIAA SciTech 2023 Forum (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Y. Egami, M. Yamazaki, H. Horie, and Y. Matsumura
2. 発表標題 Investigation of White Basecoats for Fast-Responding Pressure-Sensitive Paints
3. 学会等名 AIAA SciTech 2023 Forum
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 H. Horie, T. Inayoshi, Y. Ishida, Y. Matsumura, and Y. Egami
2. 発表標題 Development of dual-layer PSP/TSP based on a new concept
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 Y. Matsumura, K. Ojika, S. Fujino, H. Horie, and Y. Egami
2. 発表標題 Change in interference degree with dye combination of two-color fast responding PSP
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 堀江 広夢, 山崎 美紅, 松村 優志, 江上 泰広
2. 発表標題 高速応答感圧塗料に適した水溶性ポリマを用いた白下地の開発
3. 学会等名 第50回 可視化情報シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松村 優志, 石田 佑樹, 稲吉 拓実, 堀江 広夢, 江上 泰広
2. 発表標題 混合型2色PSPにおける色素間干渉による特性変化の定量的調査に関する研究
3. 学会等名 第50回 可視化情報シンポジウム
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 T. Liu, J. P. Sullivan, K. Asai, C. Klein, Y. Egami	4. 発行年 2021年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 542
3. 書名 Pressure and Temperature Sensitive Paints	

〔産業財産権〕

〔その他〕

愛知工業大学機械学科流体工学研究室 https://aitech.ac.jp/~egami/
--

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	松田 佑 (Matsuda Yu) (20402513)	早稲田大学・理工学術院・教授 (32689)	

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