

研究終了報告書

「圧縮センシングを活用した高精度空力診断システムの構築」

研究期間：2018年10月～2022年3月

研究者：松田 佑

1. 研究のねらい

持続発展可能な社会の創出に向けて、各種機器の高効率化が進められている。航空機、鉄道、自動車さらには空調機などのエネルギー機械の高効率化や好環境化は、そのエネルギー消費量、普及率の高さから、非常に重要な課題である。これらの機器では、内・外部での熱流動が機器の性能に直結しており、その熱流動現象の正確な把握が重要となっている。例えば、航空機や高速鉄道の空力騒音の低減は、近隣住民の住環境を改善するだけでなく、燃費の向上に直結する。しかし、気体流れは非常に複雑で予測が難しいことが知られており、実験計測による現象の把握が重要である。このような流れの圧力計測法として、現在は一般に半導体圧力センサーによる点計測が用いられている。しかしこれでは予めセンサーを設置した点での計測に限定されるために、複雑な流れ場の構造を明らかにするにはデータが不足している。そこで本研究では、複雑な流れ場の圧力を「分布」計測可能な感圧塗料 (Pressure-Sensitive Paint; PSP) に着目した。しかしPSPは絶対圧センサーであり大気圧近傍での微小な圧力変化の検出は不得手であった。これは微小な圧力変化の検出には、微小な発光強度変化を検出する必要があり、カメラのショットノイズなどに信号が埋もれてしまうためである。これまでにノイズを低減して微小な圧力変化を検出するための様々な方法が提案されてきたが、これらの方法は経験に基づいたパラメータ設定や、PSP以外の他センサーでの計測が必要であったため汎用性の高い手法とは言えなかった。本研究では、PSP計測の結果として得られたデータから基底を計算し、やはりPSP計測データの時系列フィルタリングによって得られる時系列データをよく表現できるように、スパースモデリングによって基底から時系列の圧力分布データを復元することで、PSP計測データの大幅なノイズ除去を実現することを目指した。また外乱光下でのPSP計測法、PSPセンサー膜の塗布工程やノイズ除去以外のデータ処理手法に関しても研究を推進した。これにより、各種機器の設計開発においてPSP計測法を利用する上でボトルネックとなっている諸点を改善し、実験室レベルでの利用に留まっているPSP計測法を広く産業界に普及させるための基盤技術を構築することを目指した。

以上を通じて、機器の低騒音化やエネルギー効率の向上等、人間をとりまく環境における重要な課題への取り組みに大きく貢献することを目指す。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究では、各種エネルギー機器の高効率化に向けて必須となる熱流体现象の理解の深化に向け、感圧塗料(Pressure-Sensitive Paint; PSP)による圧力分布計測法に着目した研究を推進した。PSP 計測法では、PSP センサー膜内の感圧性色素分子の発するりん光の強度が圧力に応じて変化することを利用する。すなわち、PSP センサー膜の発する発光強度を計測することで圧力分布を計測することができる。PSP は複雑な流体现象の圧力の分布計測が可能なことから学術・産業両界から非常に大きな注目と期待を集めているものの、現在は航空工学の分野において実験室レベルでの使用例に留まっている。本研究では、PSP 計測法の実用化に向けて課題点を抽出し解決することで、広い学術・産業分野へ PSP 計測法が適用可能となるように研究を推進した。

(2) 詳細

研究テーマ A「スパースモデリングを用いたノイズ除去法の開発」

PSP 計測法は、その発光強度の変化から圧力分布を計測でき、従来の半導体圧力センサーなどの点計測法に対して高い優位性がある。一方で、PSP 計測法では大気圧近傍での微小な圧力の変化の計測が難しいという欠点があった。これは、微小な圧力変化の検出には、微小な発光強度変化を検出する必要があり、カメラのショットノイズなどに信号が埋もれてしまうためである。これまでにノイズを低減して微小な圧力変化を検出するための様々な方法が提案されてきたが、これらの方法は経験に基づいたパラメータ設定や、PSP 以外の他センサーでの計測が必要であったため、汎用性の高い手法とは言えなかった。

本研究では、PSP 計測の後処理法としてスパースモデリングを用いたノイズ除去法を開発した。手順として、まずはノイズを多く含む原画像を、固有直交分解(Proper Orthogonal Decomposition; POD)によるモード分解を行うことで基底(POD 基底)を算出する。得られた POD 基底から、流体现象を効率的に表現できる空間位置、すなわち最適センサー位置を特定する。この空間位置において、得られている時系列データをフィルタリングし、フィルタリングされた時系列データを上手く説明できるように各モードの係数を決定する。このときなるべく簡単なモデルで表現できるように、スパースモデリングを用いた(図 1)。本研究では、東北大学流体科学研究所小型低乱風洞において提案手法の妥当性を評価する実証実験を行った。角柱後方に生じるカルマン渦列によって生じる圧力分布の PSP 計測を行った。その結果、今回新たに提案した手法(以下、本手法)によって、PSP 計測データのみから、ノイズの影響を大幅に低減した計測データの再構成を行うことに成功した。また、本手法により再構成された圧力データは、半導体圧力センサーとの計測値のずれが最小で 0.01%(10 Pa)、最大で 0.3%(300 Pa)、平均で 0.18%(180 Pa)と、極めて高い一致を示すことから、精度も十分に高いことが実証された(図 2)。従来は、POD モードのうち、エネルギーの大きい上位の 6,7 のモードから、流れ場の構造を議論されることが多くあった。本研究成果により、本研究のスパースモデリングの観点に基づくと、細かい流れ構造を表現するためにはより下位のモードも必要であることを明らかにした。なお、本項目はセンサー位置最適化に関して、さきがけ情報計測 1 期生の野々村拓氏と共同研究を実施した。

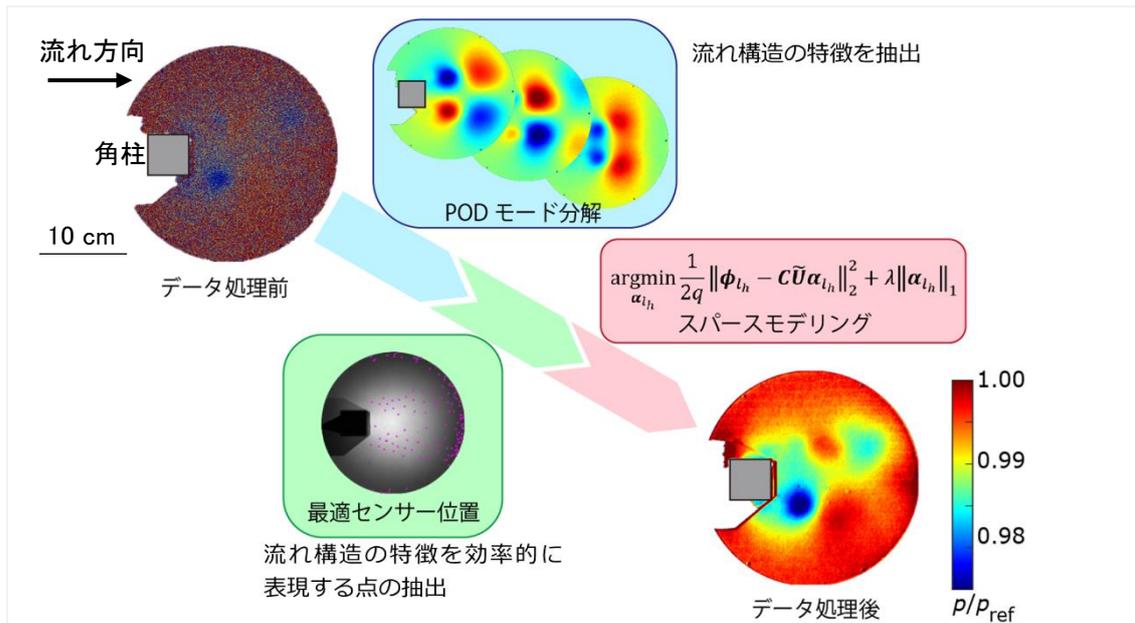


図 1 提案手法の概要。ここで p は圧力、 p_{ref} は大気圧を表す。

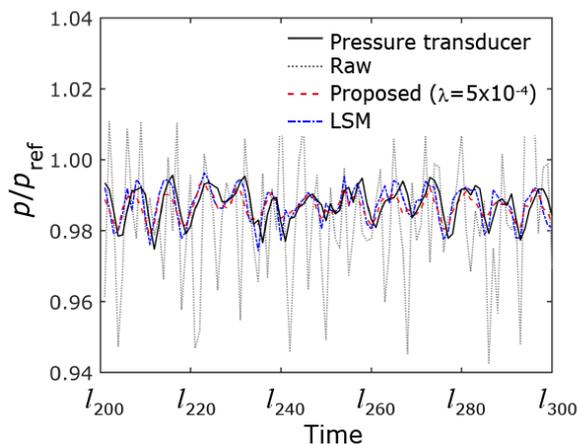


図 2 提案手法(Proposed、LSM(Least-squared method))と半導体圧力センサーとの計測値の比較。ここで p は圧力、 p_{ref} は大気圧を表す。また、 l_n は取得した PSP 時系列画像データのインデックスを表す (n は 200~300)。画像は 1 ms 毎に取得しており、このグラフでは 0.1 s 分のデータを表示している。

研究テーマ B「構造化光を用いた PSP 計測における圧力分解能の向上」

PSP 計測では、表面に生じる圧力分布に応じて局所の PSP 発光強度が変化する。そのために、この発光強度変化を高精度に検出することが重要となる。本研究では、PSP 励起光を構造化照明し、空間に対してロックイン検出を適用することで、PSP 発光強度の空間変化を高感度に検出することを目指した。このときに構造化照明としては空間周波数を変化させながら余弦波状の強度分布を有したパターンを用い、これを PSP 励起光とする。このときの計測条件を 1 次元シミュレーションした。この結果、提案手法によってノイズが抑えられた信号復元が可能であることが分かった。提案手法では、加算平均に対して設定値に対する残差が半分以下となることが分かった。また残差はデータ取得数の $-1/2$ 乗で低下していくために、提案手法では加算

平均に対して優位であることが分かった。しかし、実際の実験データにおいては構造化光の暗部となる箇所で SN 比が低下し、これらの箇所においては加算平均に比べ大幅に計測誤差が大きくなることが確認された。

研究テーマ C「構造化光を用いた外乱光下での PSP 計測法の開発」

PSP 計測法では、PSP 発光と同じ波長帯の外乱光(迷光)がある場合、この外乱光は光学フィルターによって分離することができず、圧力の計測誤差につながる。一般に PSP 計測は暗室内で実施されるが、実機試験時には、夜間に実施する場合でも月明かりや街灯・安全灯など外乱光の影響を避けることができない。これが PSP 計測法の適用範囲を拡大する上での妨げのひとつとなっている。そこで本研究では、構造化光を励起光とする耐外乱光 PSP 計測システムを提案した。PSP の励起光には、一般には一様な光が用いられるが、これを空間的にパターン状の光(構造化光)を用いる。複数のパターンを PSP に照明して計測を行うことで、構造化光のパターンに同期しない信号を外乱光として数値的に除去することができる。以上のようにして、実際の外乱光の影響下での PSP 計測の実証実験を行った結果を図 3 に示す。図 3(b)に示すように、従来手法では外乱光の影響下では、計測誤差が大きく圧力分布の計測が行えないことが分かる。一方、提案手法では外乱光の影響下においても、その影響を取り除き、半導体圧力センサーと一致する計測が実現できることが示された。

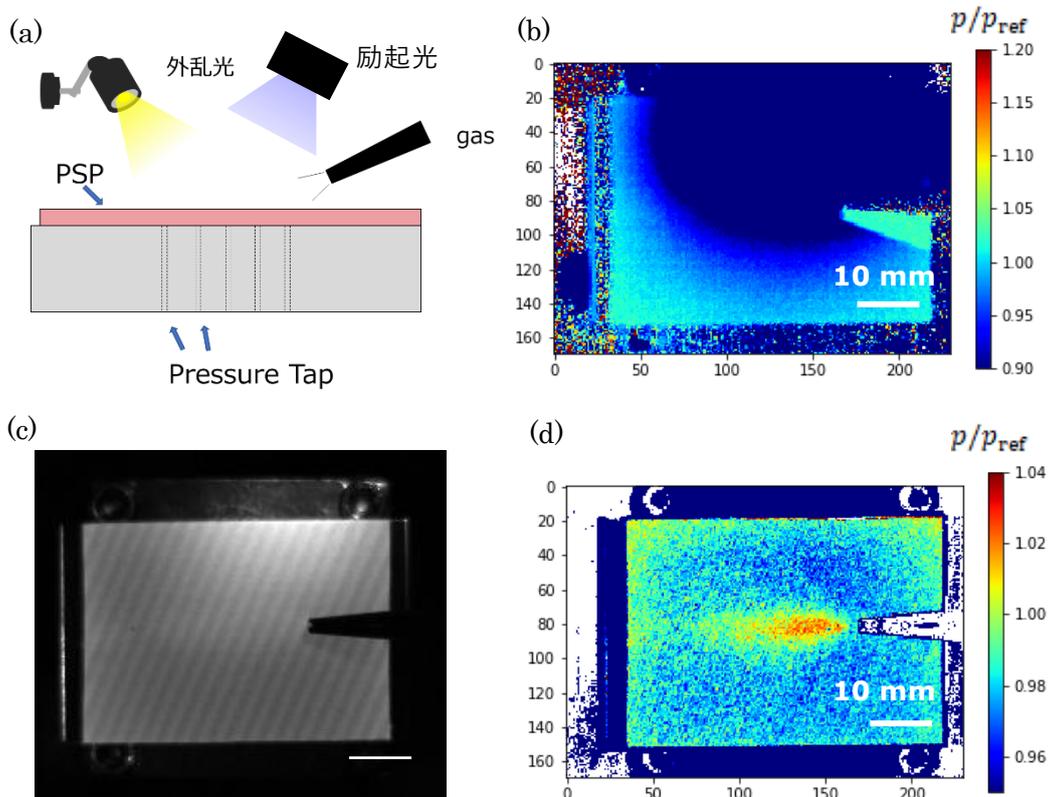


図 3 耐外乱光 PSP 計測システムの実証実験

(a) 実験装置の概要, (b)外乱光下での従来法による計測結果, (c)構造化照明による PSP 励起の様子, (d) 提案手法による計測結果. p は圧力を表し, p_{ref} は大気圧を表す

3. 今後の展開

本研究で得られた知見や技術の一層の深化を進める。特に流れに対して低侵襲に分布計測ができる PSP 技術は、複雑な流れを詳細に把握する手法として学術・産業の両界からの期待が大きい。PSP 技術の一層の高度化と普及は学術の進展のみならず産業応用に大きく貢献できる。本研究成果やこれをもとにした特許等をベースに、これらの一層のブラッシュアップと共に社会実装を見据えた研究を推進する。

4. 自己評価

本研究では、PSP 計測法を従来は困難であった鉄道・自動車・家電製品の空力設計に活用できる計測能を実現することを目標とし、10 Pa 程度の圧力分解能の達成を目指した研究を推進した。これは現状の PSP 計測技術の研究動向を踏まえるとかなり難しい目標設定ではあったが、本研究では限られた条件下ではあるが目標としていた 10 Pa の圧力分解能を達成できた。本研究成果を発表した論文により多くの研究者や企業から問い合わせをいただいております。客観的にも評価できる成果が得られたと考える。

5. 主な研究成果リスト

代表的な論文(原著論文)発表

(1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数: 8件

1. Y. Matsuda, R. Orimo, Y. Abe, Y. Hiraiwa, Y. Okamura, Y. Sunami “Pressure-Sensitive Nano-Sheet for Optical Pressure Measurement”, *Sensors*, (2021), 21, 7168.

従来の PSP は、PSP の材料であるりん光分子と高分子を有機溶剤に溶かした溶液を手作業でスプレー塗布していた。この PSP の作成法は、有機溶剤使用の法規制、さらには塗布者の塗布技能(塗布者によって性能が変化する)などの観点から PSP 計測の導入の妨げになっていた。そこで本研究ではナノシート作成法を用いることで、簡便に塗布可能で安定して高い性能を有する PSP センサーシートを開発した。これはシールのように計測対象に簡単に貼り付け可能である。また、一般のシールで用いる糊は PSP センサー特性を悪化させるが、ナノシートの高付着性を利用することで糊が不要なセンサー膜の開発を実現した。

2. T. Inoue(指導学生), Y. Matsuda*(ダブル筆頭著者, 責任著者), T. Ikami, T. Nonomura, Y. Egami, H. Nagai, “Data-driven approach for noise reduction in pressure-sensitive paint data based on modal expansion and time-series data at optimally placed points”, *Physics of Fluids*, (2021), 33, 077105.

PSP 計測データに対するノイズ除去法を開発した。原画像に固有直交分解(POD)によるモード分解を行うことで基底(POD 基底)を算出するとともに、現象を効率的に表現できる空間位置を特定する。この位置において時系列データをフィルタリングし、これに一致するように各モードの係数をスパースモデリングにより決定する。本手法により再構成されたデータは、半導体圧力センサーとの誤差が最小で 0.1%(10 Pa)、平均で 1.4%(140 Pa)と、極めて高い一致を示すことが実証された。

3. Y. Matsuda, O. Kawanami, R. Orimo, K. Uete, A. Watanabe, Y. Egami, H. Yamaguchi, T. Niimi, Simultaneous measurement of gas-liquid interface motion and temperature distribution on heated surface using temperature-sensitive paint, International Journal of Heat and Mass Transfer, (2020), 153, 1195967.

沸騰現象は料理や熱交換器(空調・冷却機器)において利用される身近な現象である。冷却器では液体の相変化(液体⇒気体)を利用し、その蒸発潜熱を用いて熱輸送を行う。しかし、この蒸発に伴う熱輸送量に関しては特殊な条件下で利用できる経験式があるのみで、熱デバイスの設計開発のボトルネックとなっている。そこで本研究では蛍光分子の温度消光作用を用いた温度分布計測手法である感温塗料法を世界で初めて気液 2 相流の計測に利用し、熱輸送現象と蒸発気泡の固気液界面の相関関係を詳細な時系列空間分布データとして取得する手法を提案した。

(2)特許出願

研究期間全出願件数:1 件(特許公開前のものも含む)

(3)その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

1. Y. Matsuda, PSP denoising method based on POD and LASSO regression for low-speed flows, 19th International Symposium on Flow Visualization, 2021, 招待講演.
2. Y. Matsuda, Microfluidic flow visualization, MicroTAS2021, workshop, 2021, 招待講演.
3. 松田佑, 蛍光・りん光分子を用いた熱流動現象の可視化計測法, 日本冷凍空調学会熱交換器 PJ, 2021, 招待講演.
4. 松田佑, 蛍光・りん光分子を用いた熱流体可視化計測, 日本機械学会 IIP 部門講演会, 2020, 招待講演.
5. 「スパースモデリングを用いた高精度ノイズ除去法の開発に成功」, 2021 年 7 月 9 日プレスリリース
6. さきがける科学人, JSTnews, 2022 年 1 月号