

2021年7月9日

早稲田大学

科学技術振興機構 (JST)

東北大学

愛知工業大学

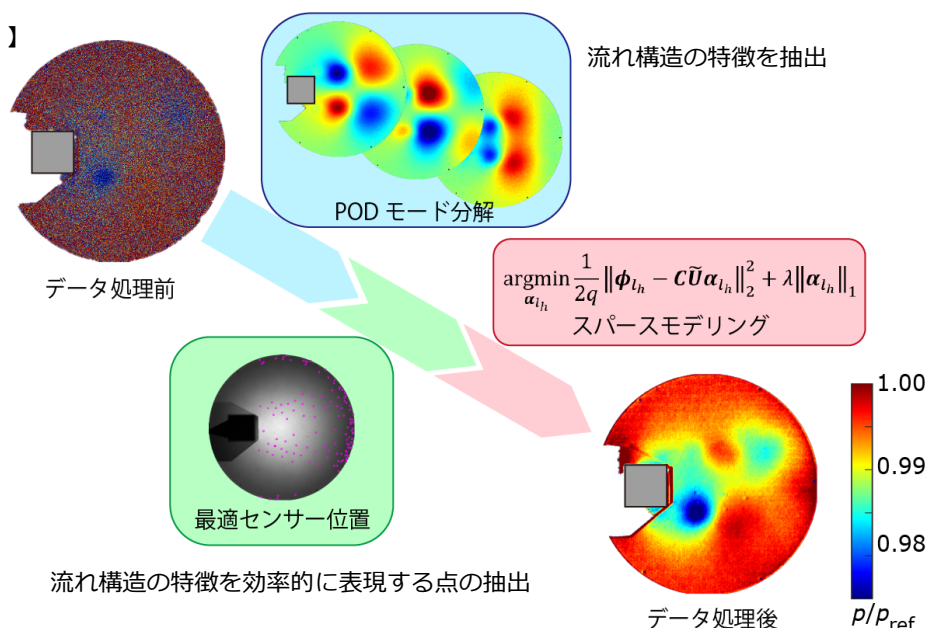
スパースモデリングを用いた高精度ノイズ除去法の開発に成功

発表のポイント

- 数理最適化手法を用い、感圧塗料法の後処理法として高精度のノイズ除去法を開発した。
- 微小な圧力変化の計測において、従来の感圧塗料計測法に比べ、半導体圧力センサーでの計測値とのずれを2%以内に抑える精度の高い手法を構築することができた。
- 新たな手法は、圧力変化が小さく計測が困難であった鉄道車両や家電製品などに対し適用可能な手法となり得る。

科学技術振興機構 (JST) 戦略的創造研究推進事業および東北大学流体科学研究所一般公募共同研究において、早稲田大学理工学術院の松田佑 (まつだゆう) 准教授、井上智輝 (いのうえともき) (同大学院創造理工学研究科修士課程1年)、東北大学大学院工学研究科の野々村拓 (ののむらたく) 准教授、東北大学流体科学研究所永井大樹 (ながいひろき) 教授、愛知工業大学の江上泰広 (えがみやすひろ) 教授らの研究グループは、周囲の圧力に応じて発光強度が変化する感圧塗料 (Pressure-Sensitive Paint; PSP) ^{*1} による機器表面の圧力分布計測 (PSP 計測法 ^{*2}) の後処理法として、圧力分布の再構成にスパースモデリング ^{*3} を用いたノイズ除去法を開発しました。航空機や鉄道車両の安全性や燃料消費率の改善を行う上で、機器表面での気体の流れ構造 (圧力分布) を詳細に把握することは非常に重要です。高速で圧力変化が大きなものにしか適用できなかった測定法が、少ない変数で効率的にデータをモデリングする新たな手法により、低速で圧力変化の小さなものにも適用可能となり得ます。これにより、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、今後大きく貢献することが期待されます。

【 新たな手法の概要 】



本研究成果は、2021年7月9日（金）（東部時間）に米国物理学会（AIP）によって設立された AIP Publishing 社『Physics of Fluids』で公開されます。

論文名：Data-Driven Approach for Noise Reduction in Pressure-Sensitive Paint Data Based on Modal Expansion and Time-Series Data at Optimally Placed Points

（1）これまでの研究で分かっていたこと（科学的・歴史的な背景など）

近年、機器表面での圧力分布を計測可能な手法として PSP 計測法が注目されています。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⁴に対して高い優位性があります。一方で、PSP 計測法における大気圧近傍での微小な圧力の変化の計測には大きな課題がありました。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す。そのために、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ましたが、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ませんでした。

（2）今回の研究で新たに実現しようとしたこと、明らかになったこと

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ました。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)⁵によるモード分解⁶を行いました。得られたモード分解データから、流体現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します。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説明できるように各モードの係数を決定します。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ます（図 1）。

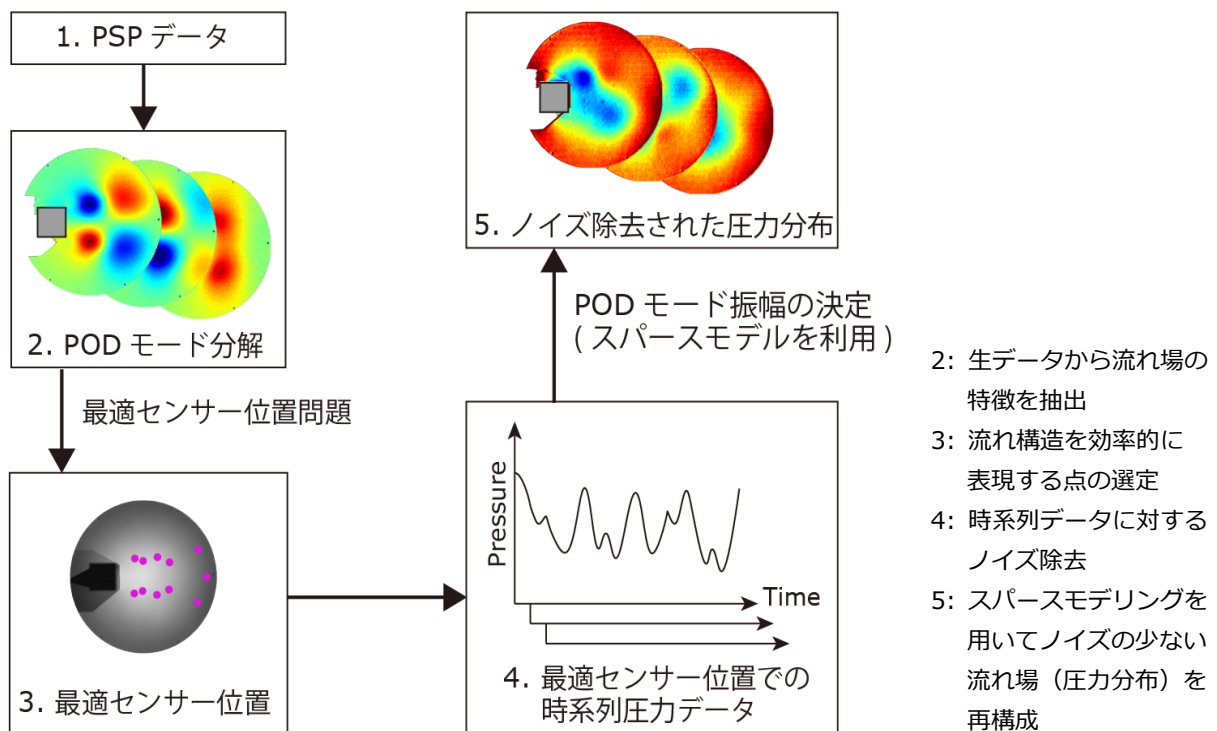


図 1 提案手法のフローチャート

本研究では、東北大学流体科学研究所の小型低乱風洞^{*7}において提案手法の妥当性を評価する実証実験を実施しました。角柱後方に生じるカルマン渦列^{*8}によって生じる圧力分布を、PSPによって計測を行いました（図2）。

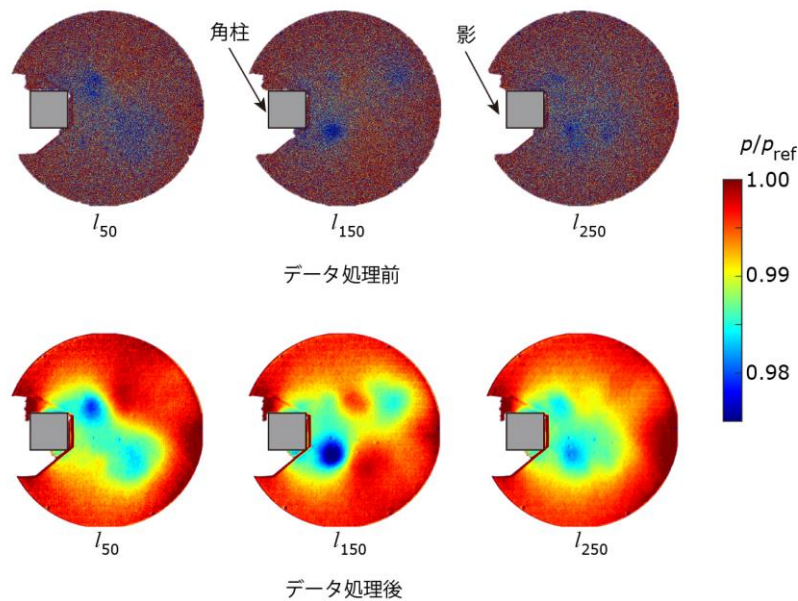
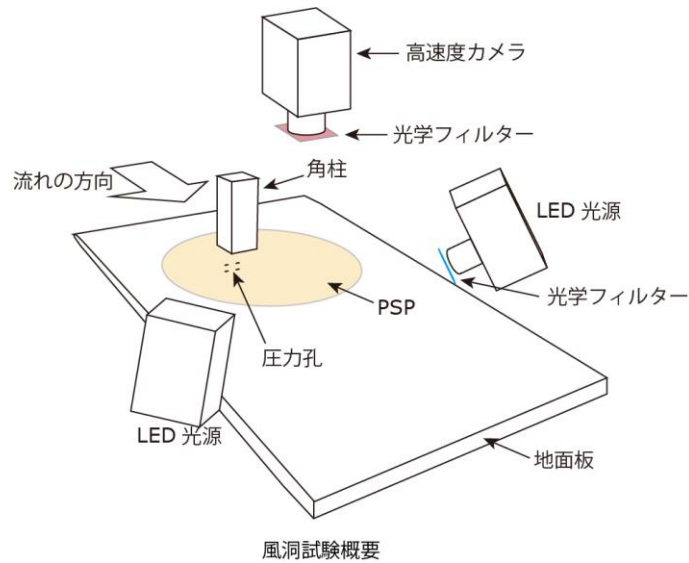


図2 実験装置および結果の概要図

上図：東北大流体研設置の風洞試験装置概要図。

下図：提案手法によるノイズ除去例。提案手法によってデータ処理前に対してノイズが大きく低減しており、流れ構造が明確に把握できるようになった。

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ました。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を設置した箇所で、従来データとの計測値のずれが2%以内と、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ました。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りました。このたびの成果により、本研究のスプ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ました。

(3) 研究の波及効果や社会的影響

現在 PSP 計測法の大きな欠点のひとつとされている微小な圧力の変化の計測が可能となることで、家電製品をはじめとする、広範な機器の流動の実験解析に PSP 計測法の適用が可能になると期待されます。また、半導体圧力センサーを使用する従来法では、配線をする必要があったため、回転体表面の圧力分布などには適用できませんでしたが、本手法は半導体圧力センサーなどのデータが不要であるため、それらへの適用が期待されます。

(4) 今後の課題

今後はより一層、微小な圧力変化の検出が可能な PSP 計測システムの構築を目指し、「PSP センサー」、「データ取得法」、「データ後処理法」の各段階において、継続的に研究を推進していきます。

(5) 研究者のコメント

各種機器表面での圧力分布の計測は、機器の低騒音化やエネルギー効率の向上など、人間をとりまく環境において依然として極めて重要な課題への取り組みに大きく貢献することができます。また気体の流れは肉眼では見ることはできませんが、これを可視化計測することは、現象の直観的理解を容易にするだけでなく、科学的な興味を喚起する上でも重要な技術と考えています。

(6) 用語解説

※1 感圧塗料 (Pressure-sensitive paint; PSP)

感圧塗料 (PSP) は、一般に酸素消光作用を有するりん光分子と、これを模型表面に保持固定するためのバインダーから構成される塗料。

※2 PSP 計測法

PSP に含まれるりん光分子の放つ発光の強度が圧力に応じて変化することから、PSP の発光強度分布を計測することで圧力分布を計測する手法。

※3 スパースモデリング

データを説明 (モデリング) する際に、なるべく少数の変数により効率的にデータを説明する手法。

※4 点計測法

半導体圧力センサーなどのようにセンサーを設置した箇所でのみデータ取得が可能な方法。

※5 固有直交分解 (Proper Orthogonal Decomposition; POD)

主成分分析 (Principal Component Analysis; PCA) や特異値分解 (singular value decomposition; SVD) とも呼ばれる。流体力学の分野では POD として知られる。多次元データからデータを効率的に展開できるような基底を求める手法。

※6 モード分解

現象を互いに独立な成分 (モード) に分離すること。ある現象は、いくつかのモードの重ね合わせで表現できるという考え方。

※7 小型低乱風洞

東北大学流体科学研究所に設置されている風洞設備。

(詳細 <http://www.ifs.tohoku.ac.jp/tech/windtunnel/index.html>)

※8 カルマン渦列

円柱や角柱の後方に生じる互い違いに並んだ渦の列。

(7) 論文情報

雑誌名 : Physics of Fluids

論文名 : Data-Driven Approach for Noise Reduction in Pressure-Sensitive Paint Data Based on Modal Expansion and Time-Series Data at Optimally Placed Points

執筆者名 (所属機関名) : 井上智輝 (早稲田大学)、松田佑 (早稲田大学)、伊神翼 (東北大学)、野々村拓 (東北大学)、江上泰広 (愛知工業大学)、永井大樹 (東北大学)

DOI : 10.1063/5.0049071

(8) 研究助成

研究費名 : JST さきがけ : JPMJPR187A

研究課題名 : 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

研究者名 (所属機関名) : 松田佑 (早稲田大学)

研究費名 : 東北大学流体科学研究所一般公募共同研究 : J20L106

研究課題名 : 構造化照明を用いた高精度 PSP 計測手法の開発

研究代表者名 (所属機関名) : 松田佑 (早稲田大学)、永井大樹 (東北大学)

研究費名 : スズキ財団一般科学技術研究助成金

研究課題名 : 感圧センサーシートの開発による空力画像計測の実用化

研究代表者名 (所属機関名) : 松田佑 (早稲田大学)

研究費名 : JST CREST : JPMJCR1763

研究課題名 : 次世代地震計測と最先端ベイズ統計学との融合によるインテリジェント地震波動解析

研究代表者名 (所属機関名) : 平田直 (東京大学地震研究所)

研究者名 (所属機関名) : 野々村拓 (東北大学)

【研究内容に関するお問い合わせ先】

早稲田大学理工学術院准教授 松田佑

Tel: 03-5286-3854

E-mail: y.matsuda[at]waseda.jp

東北大学流体科学研究所教授 永井大樹

Tel: 022-217-5227

E-mail: nagai.hiroki[at]tohoku.ac.jp

愛知工業大学機械学科教授 江上泰広

Tel: 0565-48-8121(代) 内線: 2306

E-mail: egami[at]aitech.ac.jp

【JST 事業に関すること】



WASEDA
University



東北大学
TOHOKU UNIVERSITY

AIT 愛知工業大学

科学技術振興機構戦略研究推進部グリーンイノベーショングループ 嶋林ゆう子

Tel: 03-3512-3526

E-mail: presto[at]jst.go.jp

【発信元】

早稲田大学広報室広報課 担当（志熊・猪俣）

Tel: 03-3202-5454

E-mail: koho[at]list.waseda.jp

科学技術振興機構広報課

Tel: 03-5214-8404

E-mail: jstkoho[at]jst.go.jp

東北大学流体科学研究所広報戦略室 担当（内村博子）

Tel: 022-217-5873

E-mail: ifs-koho[at]grp.tohoku.ac.jp

愛知工業大学法人事務局広報課

Tel: 0565-48-8177

E-mail: d-koho[at]aitech.ac.jp