



2025 年 6 月 17 日

高速流体をリアルタイム制御するシステムを構築 自動車や航空機、医療機器まで幅広い分野への応用に期待

【本研究のポイント】

- ・これまで不可能だった、高速流体のリアルタイムな計測と制御に成功。
- ・感度の高い観測点の最適な組み合わせを選択して計測する手法「疎点解析粒子画像流速計測法(スパースプロセッシング PIV)」^{注 1)}とプラズマアクチュエータ^{注 2)}を利用したシステムを構築。
- ・2000 ヘルツ(Hz)で高速な空気の流れをリアルタイム画像計測して行った流体制御の成功は世界初。
- ・本技術を利用して、流体力学に限らずさまざまな分野でのリアルタイム観測とフィードバック制御への応用に期待。

【研究概要】

空気や水など流体の速度場(速度分布)の計測は、現象の理解やその制御のために重要です。特に流体の中でリアルタイムに何が生じているかを把握し、制御することが期待されています。流体の流速の計測によく用いられる方法として、流速の面情報が得られる粒子画像流速計測法(PIV)^{注 3)}がありますが、画像解析技術を基にした計測のため、高速な空気の流れでは解析に時間がかかり、リアルタイムな計測と制御ができませんでした。

名古屋大学大学院工学研究科の野々村 拓 教授らの研究グループは、この課題を解決するため、2023 年に「低次元モデル」^{注 4)}と「センサー位置最適化技術」^{注 5)}を組み合わせた疎点解析粒子画像流速計測法(スパースプロセッシング PIV)を実証しました。

本研究ではこのシステムに、電気的な入力で遅れなく反応して誘起流れを生成するプラズマアクチュエータを組み合わせ、機械学習によるモデル化と先端の制御アルゴリズムを利用することで、2000Hz でのリアルタイム流体制御を実現しました。

本研究で利用したスパースプロセッシング PIV には汎用性があります。低次元モデルと最適化を組み合わせることで、画像解析などを伴う時間がかかる計測手法に対し解析データの量を減らして処理時間を短縮できることから、流体力学に留まらずさまざまな分野でのリアルタイム計測とそれに基づく制御が可能になると期待されます。

本研究成果は、2025 年 6 月 16 日付国際学術論文誌『Experiments in Fluids』に掲載されました。

【研究背景と内容】

空気や水などの流体はさまざまな機器で利用されており、その流れの制御による機器の効率化は今後の低炭素社会の実現に向けて非常に重要であると考えられています。流れ場(流れの速度と向き)の制御は、素材や形状の変化による受動的なものから、アクチュエータを利用した能動的なものまであり、特にプラズマアクチュエータなど入力信号に対してすぐに動作できる能動的なアクチュエータを用いて、流れ場の時々刻々の変化に応じて入力を切り替えながら、効率的な制御を実現するフィードバック制御が大きく期待されています。

流れ場の様子はセンサーなどでも把握できますが、センサーが反応する流れ場の変化は局所的で全体像が見えづらく、フィードバック制御に必ずしも適していません。流れの速度全体の計測方法として、面情報が得られる PIV はよく用いられる手法です。しかし PIV は画像解析技術を基にした計測方法のため、高速な空気の流れでは画像解析に多くの時間がとられ、リアルタイム計測ができていませんでした。

これまで名古屋大学大学院工学研究科の野々村拓教授らの研究グループは、この PIV に対して、センサー最適化を利用した圧縮センシングにより流れ場の大きな構造を表現する低次元モデルを導入し、全体場の再構成に適した画像の一部のみを解析、低次元モデルのパラメータを推定することで、全体場を再構成するスパースプロセッシング PIV を実証してきました。

今回、本研究グループは、この技術と電氣的に即座に応答し誘起流れを発生させることのできるプラズマアクチュエータを組み合わせ、リアルタイム流体制御を実現しました。この際に、事前に流れの挙動を機械学習によりモデル化しておき、先進の制御アルゴリズムを利用することで高速に最適化して、プラズマアクチュエータの駆動をリアルタイムに制御することに成功しました(図1)。このリアルタイム流体制御により、物体の後流側で発生するカルマン渦^{注 6)}による流れの非対称性を有意に抑えられることを示しました(図2)。図3に実験のセットアップ図を示します。



図1 本研究で実現したリアルタイム流体制御。スパースプロセッシング PIV とプラズマアクチュエータを組み合わせ、機械学習によるモデル化と制御アルゴリズムを利用することでフィードバック制御を実現した。

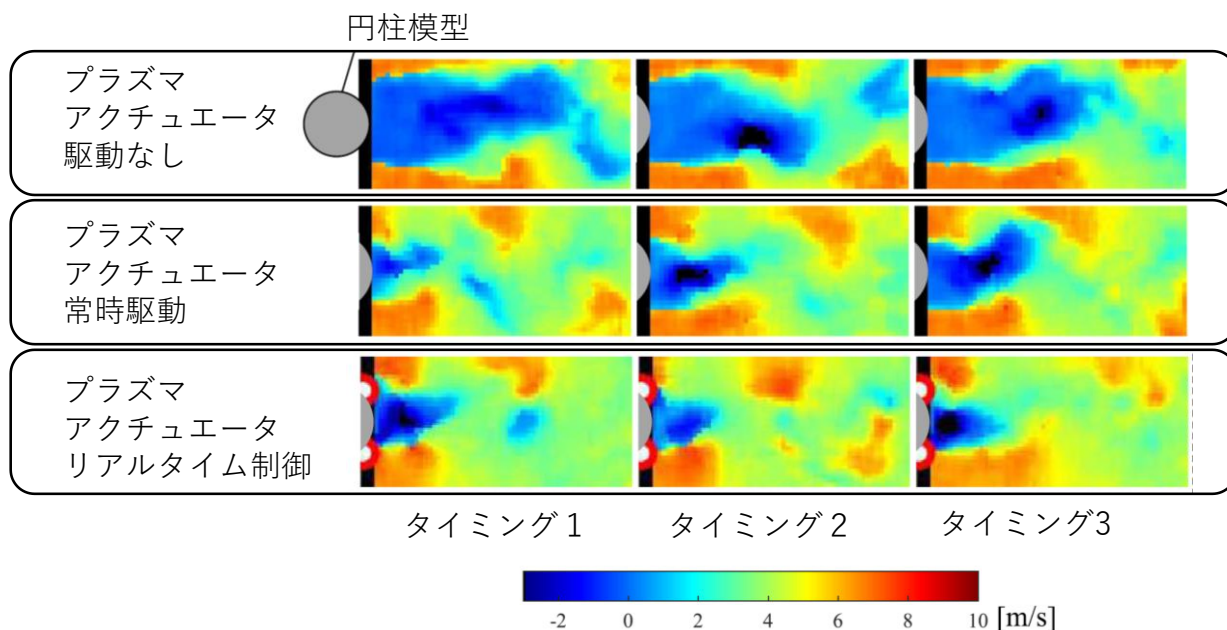


図2 リアルタイム流体制御によってカルマン渦の非対称性を抑えている様子。図は右向き velocity の分布を示す。プラズマアクチュエータ駆動なしおよび常時駆動ではカルマン渦の存在により上下方向に強い変動がみられる。リアルタイム制御では速度分布の上下方向の変動が抑えられている。
 (上: プラズマアクチュエータを駆動しない場合、中央: プラズマアクチュエータを常に駆動する場合、
 下: プラズマアクチュエータをリアルタイム制御により最適に駆動した場合)

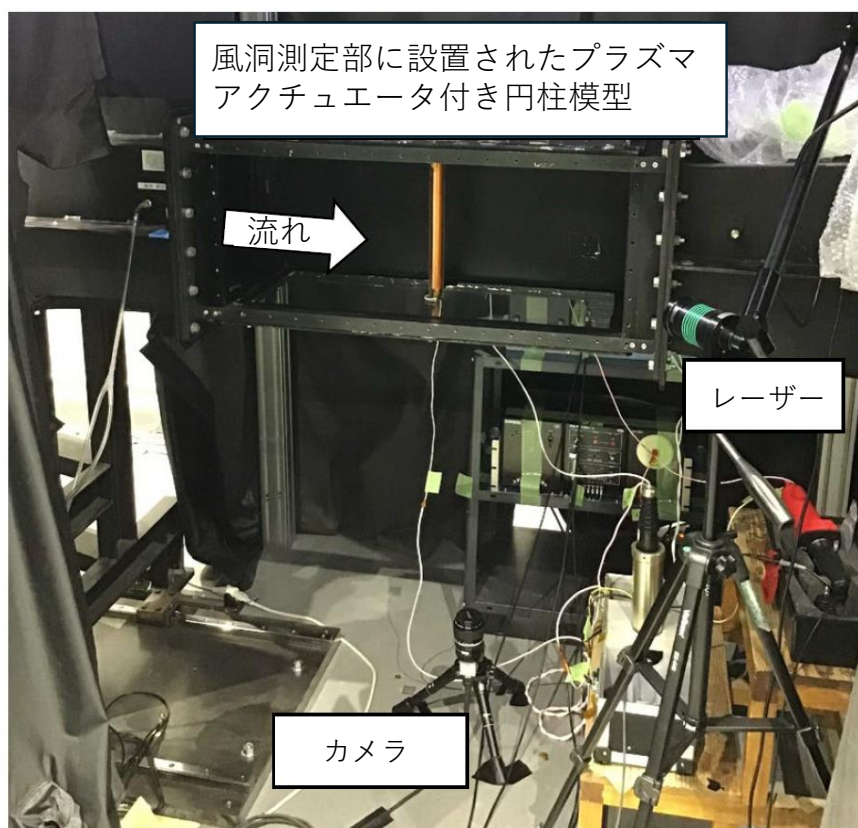


図3 実験セットアップ

【成果の意義】

本研究によりこれまで不可能と思われていた流れの画像計測に基づくリアルタイム流体制御が実現できました。今後、本技術を利用した流体制御のアプリケーションが増え、その理解を深めることで、将来の流体機器の性能向上に寄与できると期待できます。また、本研究で利用したスパースプロセッシング PIV には汎用性があり、画像相関解析などを伴う解析時間のかかる計測手法に対して低次元モデルと最適化を組み合わせることで、流体力学に限らずさまざまな分野で計測のリアルタイム化が実現でき、計測に基づく制御が可能になると期待されます。

本研究は、2021年度から始まった科学技術振興機構(JST)『創発的研究支援事業(JPMJFR202C)』の支援のもとで行われたものです。

【用語説明】

注 1)疎点解析粒子画像流速計測法(スパースプロセッシング PIV):

本技術は、データによく現れるパターンを抽出する固有直交分解(POD)モードの低次元モデルで速度場を表現し、センサー位置最適化技術を利用して選んだ低次元モデルに対して感度の高い点を解析し全体場の推定を行う。このように限られた点のみの解析とすることで、計算時間などがボトルネックとなってリアルタイム計測ができなかった粒子画像流速計測法 PIV のリアルタイム化を実現している(図 1)。この際に、研究グループが持つ感度の良い点を探すセンサー位置最適化技術のうち、一つのセンサー点で複数の情報が得られるベクトル型センサーのためのセンサー位置最適化技術を利用している。従来の PIV では画像解析にかかる時間から 100Hz 程度まででのリアルタイム流れ場計測が限度だったが、本研究で提案するスパースプロセッシング PIV では 2000Hz でのリアルタイム計測が可能となり、高速な空気の流れなどにも適用できる。

注 2)プラズマアクチュエータ:

イオン風を利用して流体機器周りの流れを制御する装置。通常は 2 枚の電極と誘電体で構成され、交流の高電圧を印加することによって空気をイオン化し、イオン風を発生させる。プラズマアクチュエータは航空機の翼周りの流れのはく離制御や摩擦抵抗の低減などへの応用が期待されている。

注 3)粒子画像流速計測法(PIV):

流体中に含まれる粒子を撮像した粒子画像により、非接触で 2 次元平面内の速度および方向を求める流体計測手法。一般的に画像相関解析を用いて粒子群の移動量を求めるため、解析に時間がかかる。

注 4)低次元モデル:

本来複雑な現象をその大まかな特徴に限定して表現するように簡略化したモデル。大勢に影響の小さい詳細な情報を切り捨てる代わりに、計算コストを下げることができる。

注 5)センサー位置最適化技術:

モデルに対して、感度の高い観測点の組み合わせを選択する方法。厳密には組み合わせ問題となり、計算量爆発を起こすため、問題を緩和して実用的な観測点の組み合わせを探す。

注6)カルマン渦:

鈍頭物体の周りの流れにおいて物体後方で生じる千鳥状の渦構造。

【論文情報】

雑誌名:Experiments in Fluids

論文タイトル:Real-time feedback control of flow velocity field using sparse processing particle image velocimetry and plasma actuators

著者:Taku Nonomura, Chihaya Abe, Ryo Naramura, Yasuo Sasaki

DOI:10.1007/s00348-025-04039-4

【研究者連絡先】

名古屋大学大学院工学研究科

教授 野々村 拓(ののむら たく)

TEL:052-789-3395 FAX:052-789-3395

E-mail:nonomura[at]nagoya-u.jp

【報道連絡先】

名古屋大学総務部広報課

TEL:052-558-9735 FAX:052-788-6272

E-mail:nu_research[at]t.mail.nagoya-u.ac.jp

科学技術振興機構広報課

TEL:03-5214-8404 FAX:03-5214-8432

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

【JST 事業に関する問い合わせ】

科学技術振興機構創発的研究推進部

加藤 豪(かとう ごう)

TEL:03-5214-7276 FAX:03-6268-9413

E-mail:souhatsu-inquiry[at]jst.go.jp