

## 論文の内容の要旨

論文題目 流れ場の最適制御に関する研究

A study on applying optimal control theory to an unsteady flow problem

氏 名 中村 昌道

近年、流体制御の技術は様々な分野で研究、実用化されてきた。航空宇宙の分野においては、航空機の翼の剥離抑制や抗力の低減などを目的として様々な技術が適用されている。しかしながら、これまでに実用化された流体制御手法の多くは、ワイヤーや突起などのデバイスを機体表面に設置するか、機体形状そのものを変更するものがほとんどである。これら従来手法は、設計点での条件では効果を発揮するが、流れ場が変化した非設計点での条件では想定した効果が得られない場合が多い。加えて、このようなデバイスの設置や形状の変更自体が難しい場合もある。

これら従来手法の問題点を解決するため、吹き出し／吸い込みを行うシンセティックジェットやプラズマアクチュエータなど、流体に対してエネルギーを投入するアクチュエータを用いた能動的な流体制御手法が現在積極的に研究されている。これらのアクチュエータを利用した能動的な流体制御に関して、現在までに行われている研究ではデバイスの入力による流れ場と空力特性の変化に注目したものが多く、デバイスによりエネルギーを投入された流体は複雑な挙動を示すために、どのような入力により空力特性が向上するか十分に分かっていないためである。そのため現在までの研究では流れ場の特徴的な構造を考慮し、その構造を変化させるようにあらかじめ決められた入力に従ってデバイスを作動させ、流体を制御するという手法が一般的である。しかし能動的な流体制御の利点の1つである、時間と共に変化する流れ場に対応して適切な制御を行うことが、このような入力の与え方では実現できない。そこで本研究では流れ場の情報を入力にフィードバックすることに注目した。

現在までに流体に対してのフィードバック制御の研究はあまり行われていない。流体のフィードバック制御を試みる際には制御器、観測器の双方に課題がある。まず制御器に関しては、フィードバックすべき適切な状態量を決定することが困難であることが挙げられる。そこで流れ場中の物体の空力特性改善には、流れ場の状態量から最適な入力を数値的に求められる手法が必要となる。次に観測器に関しては、制御対象の支配方程式であるナビエ-ストークス方程式を計算して流れ場の状態を推定する手法が必要とな

る。

流体のフィードバック制御の実現に対しては、これらの課題があるもののその制御には大きな効果が期待でき、様々な制御デバイスが研究されている現在、積極的に研究すべき課題の一つである。これらのことを踏まえて、本研究では流体に対する制御システムの成立性を検討することを目的とする。そのためには、上述した課題を解決するための流れ場の状態量から最適な入力を得るための最適制御手法、および流れ場の状態量を推定する状態観測器が必要となるため、観測器に計測融合シミュレーションを、制御器には最適制御を使用した制御システムを構築し、このシステムによる流体制御の性能を検討することを目的とする。

本研究では流体の制御システムの成立性を検討するため、対象となる流れ場は単純なものであることが望ましい。そこで円柱に発生するカルマン渦による横向きの力を抑制する制御を行う。この時、ジェットの数や設置場所、観測すべき物理量などは最適制御の結果として得られる最適入力を解析することで議論し、同様にこれらの最適化についても言及する。

最終的な結果として、抑制することのできた横力の最小値を図1に示す。この最小値は円柱表面に30個のジェットを等間隔に設置し、最適制御を行った結果得られた解である。

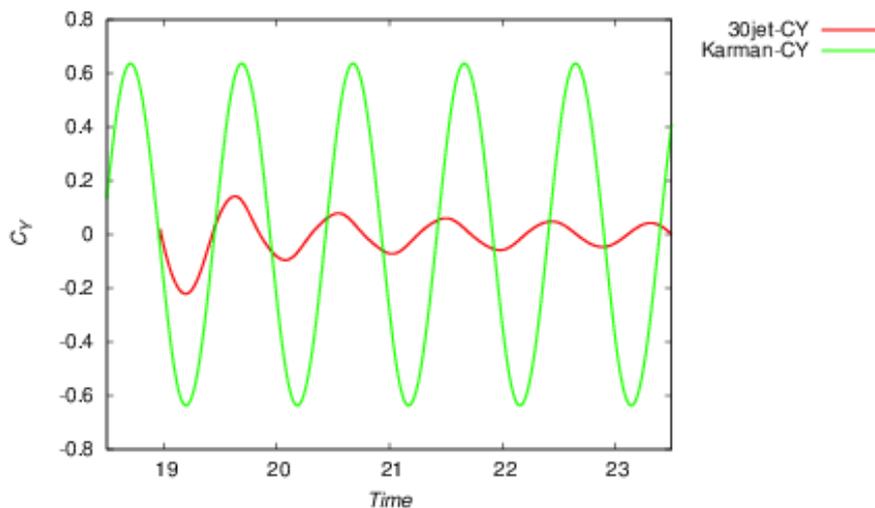


図1. 最適制御による横力の抑制

図1において、緑色の線が制御なしのカルマン渦による円柱の横力を示している。カルマン渦によって周期的な横力が発生していることがわかる。これに対して、最適制御により抑制された横力が赤色の線で示してある。最適制御により横力を10%まで減少させることができた。この時の流れ場を解析することで、この横力の減少は円柱周りの流れ場の非対称性を抑制することで達成できるということがわかった。これに加えて、円柱

表面のジェットにはその設置場所によって適切な制御入力も変化することも明らかにした。

一方で図2に計測融合シミュレーションを用いた流れ場の推定結果を示す。この図は推定対象となる流れ場の横力と、推定により得られた横力を示している。今回の研究では推定対象となる流れ場も数値計算を使用して求めた。この状態推定では、推定対象となる流れ場の円柱表面の圧力のみを計測可能とした。結果として、初期値の違う二つの流れ場が最終的に一致することが図からわかる。本研究ではこの時の収束までの時間やパラメータによる変化などを詳細に議論した。さらに入力が存在する場合の状態推定も行い、入力がない場合に比べて収束までの特性が変化することも確認した。この時、円柱後方の速度を観測可能であるとした場合には、円柱表面の圧力のみを観測した場合よりも精度が高くなることを明らかにした。

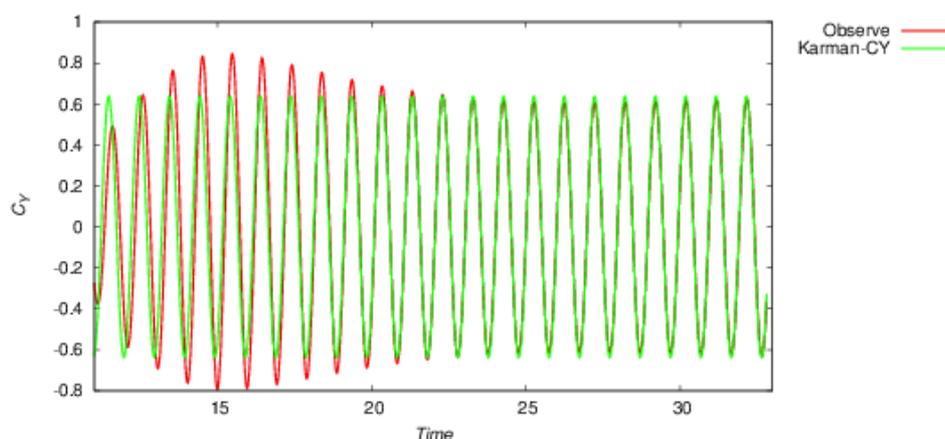


図2. 計測融合シミュレーションによる流れ場の推定

これらの最適制御と状態推定の結果を踏まえて、二つの手法を組み合わせることで円柱周りの流れ場を制御した。このとき推定による誤差によって、最適入力による制御の性能がどこまで悪化するのかわかるようにした。最終的には円柱後方の速度を観測可能とした場合に本研究で構築した最適制御システムにより、円柱の横力を物理的に実行可能な条件下でカルマン渦の20%程度まで減少させることができた。加えてモデル予測制御のパラメータを変化させることで、制御性能が向上することを示した。また、この制御システムを実現する上で計算機に要求される能力についても一例を示した。