

博士論文（要約）

Wind Tunnel Testing Using Multi-Objective
Design Exploration and Its Application to DBD
Plasma Actuator

(多目的設計探索を用いた風洞実験とプラズマアクチュエータへの適用)

Taufik Sulaiman

スレイマン タオフィク

近年、数値シミュレーションを用いた空力設計が普及しつつあるが、現在の数値シミュレーション技術では精度良く評価することが難しい、または、計算コストが非常に高いものも多く、現在も風洞実験を用いた設計は欠かせない。マイクロ流体制御デバイスの1つであるプラズマアクチュエータの設計はその一例であり、流れの剥離・乱流遷移・流れの付着を正しく評価する必要があることから、ラージエディシミュレーションまたは直接数値計算が必要とされる。そのため、数値シミュレーションを使ってプラズマアクチュエータの最適な設計パラメータ値を求めることは難しい。

一方、風洞実験に関してはコンピュータやソフトウェアの発達により実験の自動化が可能になり、多数の実験ケースを短期間に取得することが可能になっている。しかしながら、実験計画は試行錯誤的であることが多く、効率的な実験方法が確立されていない。

以上を背景に、本研究は多目的設計探査手法を用いた効率的な実験方法を提案し、プラズマアクチュエータ設計に適用してその有効性を実証するとともに、プラズマアクチュエータ設計に関する知見を得ることを目的としている。

第1章は序論であり、本研究の背景と先行研究、関連文献についてまとめた上で、本研究の位置づけと目的、本論文の構成を述べている。

第2章は、本論文の研究対象とする翼周り流れ場やプラズマアクチュエータの設定、多目的設計探査に用いる風洞や流れ場の計測方法、風洞実験の自動化方法、多目的設計最適化手法、データマイニング手法について述べている。

第3章では、多目的設計探査を用いた風洞実験方法を提案し、プラズマアクチュエータ設計を題材として、提案手法と全探索空間を等間隔に分割し評価するグリッドサーチによる設計の比較検討を行っている。設計探査の目的関数は揚力係数（最大化）および抵抗係数（最小化）の2つ、設計変数は入力電源電圧、入力電源周波数、1バースト周期あたりの電源がオンになる波数およびオフになる波数の4つであり、実験試行回数はそれぞれ約100としている。その結果、多目的設計探査を風洞実験に導入することにより、より優れたプラズマアクチュエータ設計が得られること、目的関数間のトレードオフ情報が得られることを示している。

第4章では、提案した手法を用いて、失速直後の迎角（12度）における翼周り流れ制御のためのプラズマアクチュエータ設計について多目的設計探査を実施した。ここでは消費電力の最小化を目的関数として追加し、風洞実験回数を470回とした。多目的設計探査の結果、すべての設計が揚力係数および抵抗

係数を改善すること，揚力係数最大化，抵抗係数最小化，消費電力最小化の間にはトレードオフがあるが，揚力係数最大化と抵抗係数最小化の間のトレードオフは弱いことなどを明らかにした．また，ここで実施した条件では，揚力係数や抵抗係数を改善するためには入力電源電圧を大きくする必要があるが，5kVを超える入力電圧を加えても性能の向上が見られないこと，プラズマアクチュエータのバースト比が 10 付近に最適値があること，バースト周波数が高い値（6～12 程度）の時に抵抗係数がもっとも小さくなること，なども示している．

第 5 章では，考案した手法を用いて大規模剥離を伴う迎角(16 度)における翼型周り流れ制御のためのプラズマアクチュエータ設計問題の多目的設計探索を行った．その結果，迎角 16 度でのパレート最適なプラズマアクチュエータ設計の分布は迎角 12 度でのパレート最適設計の分布とは大きく異なり，揚力係数と抵抗係数を同時に改善する設計（高揚力低抵抗設計）の他に，抵抗係数は増加してしまうが揚力係数を大きく向上する設計（高揚力高抵抗設計）があることを明らかにした．また，バースト周波数 F^+ の影響が強く，バースト周波数が大きいとき（6 程度）に高揚力低抵抗設計になり，小さいとき(1 程度)に高揚力高抵抗設計になることなどを明らかにした．代表的なパレート最適解の PIV 計測により，高揚力低抵抗設計は剥離領域が小さく，高揚力高抵抗設計は比較的剥離領域が大きいことを示した．このことは高揚力低抵抗設計は乱流遷移・再付着を促しており，高揚力高抵抗設計は大規模渦構造が揚力を向上させていることを示唆している．

第 6 章は結論であり，多目的設計探索を用いた効率的な風洞実験方法とプラズマアクチュエータの最適な設計パラメータ値について得られた知見をまとめている．