

氏名（本籍） お ^おがわ ^{たく}と ^と（福島県）
学位の種類 博士（工学）
学位記番号 甲第 1154 号
学位授与の日付 2023 年 3 月 19 日
学位授与の要件 学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題目 **Study of the Enhanced Flow Control
Authority of a DBD Plasma Actuator
attached to an Airfoil Surface**
(DBD プラズマアクチュエータによる翼周り流
れ制御の高度化に関する研究)

論文審査委員 (主査) 嘱託教授 藤井 孝藏
教授 谷口 行信 准教授 立川 智章
教授 山本 誠 教授 石川 仁

論文内容の要旨

In the present study, the enhanced flow Control authority and its underlying mechanism of a dielectric barrier discharge (DBD) plasma actuator attached to an airfoil surface was studied. The discussion consists mainly of the results of two studies.

The first study is the enhanced flow control authority of the plasma actuators at the post-stall angle of attack. Large-eddy simulations of the flows over an NACA0015 airfoil with the DBD plasma actuator were conducted. The separated flows were controlled by a DBD plasma actuator installed at the 5% chord position from the leading edge, where operated AC voltage was modulated with the duty cycle not given a priori but dynamically changed based on the flow fluctuations over the airfoil surface. A single-point pressure sensor was installed at the 40% chord position of the airfoil surface and the DBD plasma actuator was activated and deactivated based on the strength of the measured pressure fluctuations. The Reynolds number was set to 63,000 and flows at angles of attack of 12 and 16 degrees were considered. The three-dimensional compressible Navier-Stokes equations including the DBD plasma actuator body force were

solved using an implicit large-eddy simulation. Good flow control was observed, and the burst frequency proven to be effective in previous fixed burst frequency studies is automatically realized by this approach. The burst frequency is related to the characteristic pressure fluctuation; our approach was improved based on the findings. This improved approach realizes the effective burst frequency with a lower control cost and is robust to changing the angle of attack.

The second study is the analysis of the flow control mechanism by plasma actuators at the pre-stall angle of attack. The conditions except the angle of attack and the drive condition for the plasma actuator were set to same values as the first study. The angles of attack were set to 4, 6, 8, and 10 degrees. The operated AC voltage was modulated with the static duty cycle. Good flow control authority was confirmed in terms of lift-to-drag ratio increase and drag reduction. These improvements mainly result from the reduction of the pressure drag, which is due to the change in pressure distribution accompanying the movement and shrink of the laminar separation bubble on the airfoil surface. Additionally, although flow control using a burst drive with a nondimensional burst frequency of six improves the lift-to-drag ratio at all angles of attack, the phenomena leading to the improvement differ between near-stall angles (10 and 12 degrees) and the other lower angles. At near-stall angles, the turbulent transition is rapidly promoted by PA, and the flow is reattached. Whereas, at the lower angles, the transport of two-dimensional vortex structures, which maintain their structures up to downstream and suppress the turbulent transition, makes the flow reattachment.

論文審査の結果の要旨

本論文では、学長からの審査付託を受けて、標記5名の審査委員で構成する審査委員会を組織し、提出された学位論文について審査を行った。

審査委員会においては、学位申請者から、学位論文の内容や前回審査における指摘事項の対応結果について説明させ、その後、質疑応答を実施することで、博士論文として満たすべき条件や必要な修正点を確認するという形式で進めた。

本論文は、効果的な流体现象制御を実現する小型軽量の将来型デバイス「プラズマアクチュエータ」の性能向上とその背景現象を数値シミュレーションによって明らかにするもので、航空機の翼の失速現象の前後の気流状態を具体的な対象としている。プラズマアクチュエータによる翼周り流れの制御については多くの研究があり、失速後については背景となる流れ現象がある程度明らかにされた結果、流れ条件に応じてデバイスの駆動パラメータを適切に選ぶ必要があることが指摘されている。一方、失速前について

は限られたケースについて性能向上が示されただけで包括的な理解には至っていない。これを踏まえて、本論文では、まず失速後を対象とし、デバイスの設計パラメータが自動的に決まる仕組みを新たに提案し、数値シミュレーションを実施することでその効果を評価した。失速前については、複数の気流状態に対する数値シミュレーションを実施し、プラズマアクチュエータによる性能向上を評価した。その結果、失速後については、効果的と指摘されている駆動パラメータが自動的に選ばれ、優れた制御が再現できること、加えて更なる空力特性の向上が達成できることを明らかにした。失速前については、幅広い条件下でプラズマアクチュエータによる空力特性の向上が可能であることを明らかにした。失速後、失速前のいずれの場合についても、さまざまなデータ分析手法を利用することで、制御の背景となる誘起流れ現象を明らかにした。

第1回審査では、学位申請者から学位論文の概要について説明があり、以下の点について審査委員から指摘があった。

- (1) スパン方向電極で横渦を作る意義を明確にすること。
- (2) 本研究成果のレイノルズ数依存性に関して言及すること。
- (3) 主体となる2つの章の位置づけをよりわかりやすく提示すること。
- (4) 本研究で開発した制御手法DTMで利用するパラメータの影響を議論すること。
- (5) 本流れ制御手法の将来展望について記載すること。

第2回審査では、第1回審査における指摘事項に対する回答を中心に説明があり、以下の点について審査委員から指摘があった。

- (1) 制御手法DTMの考え方に至る経緯を説明すること。
- (2) 異なるレイノルズ数条件下における提案手法の有効性について記載すること。
- (3) 参考文献の書式を統一すること。

第3回審査では、公聴会を兼ねて実施、これまでの審査での指摘事項を踏まえて修正した内容の口頭発表があった。発表後、主に以下のような質問があった。

- (1) 動的な制御で流れが翼面に付着後にオフ状態が起きるのは何故か。
- (2) 平板翼に対する効果的な制御方法は考えられるか。
- (3) より制御効果を高めるための機械学習の有効利用は考えられるか。

学位論文申請者は、これらの質問に対して全て適切に回答し、質問者及び審査委員からの了解が得られた。

以上により、本論文は、博士（工学）の学位論文として十分に価値あるものと認められる。