

令和 4 年 9 月 14 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04185

研究課題名(和文) ナノ秒パルス放電プラズマアクチュエータによる流体制御の機構解明と電極形状最適化

研究課題名(英文) Study for Mechanism of Flow Control by a Nanosecond Pulse Driven Plasma Actuator and Optimization of Its Electrodes Configuration

研究代表者

満尾 和徳 (MITSUO, KAZUNORI)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・航空技術部門・主幹研究開発員

研究者番号：10371105

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ナノ秒パルス放電型プラズマアクチュエータ(ns-PA)による2次元翼前縁剥離制御メカニズムを明らかにするため、先進光学計測を使って流れ場を診断した。PIV計測結果からns-PAによって誘起される渦が剥離を抑制することがわかった。また、BOSによる可視化結果からns-PAの放電部から圧縮波が発生することが確認された。さらに、実験結果をもとに効果的な剥離制御を可能にする電極形状を考案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地球温暖化に対処するため世界的にCO₂削減に資する高効率化技術の研究開発が推進されている。近年、プラズマアクチュエータ(Plasma Actuator: PA)と呼ばれる空力制御デバイスが注目されており、航空や流体機械の分野において空力性能を改善する技術として期待されている。しかし、ナノ秒パルス放電型プラズマアクチュエータ(ns-PA)による空力制御メカニズムはよくわかっておらず、高性能なns-PAを開発するためにはメカニズムを詳細に把握する必要がある。

研究成果の概要(英文)：In this study, the flow visualizations of the particle image velocimetry (PIV) and the background-oriented-Schlieren (BOS) have done to understand the mechanism for separation flow control of the two-dimensional airfoil by nanosecond pulse driven plasma actuators (ns-PA). The pressure distributions on the airfoil were also measured to evaluate the flow separation control. The experimental results showed that the vortices induced by the ns-PA suppressed the separation flow on the airfoil, and the compression wave were emitted from the discharge region of the ns-PA. From these results, the configuration of electrodes for the ns-PA was newly designed.

研究分野：空気力学

キーワード：空気力学 流体制御 プラズマアクチュエータ 可視化技術

様式 C-19, F-19-1, Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

地球温暖化に対処するため世界的に CO₂ 削減に資する高効率化技術の研究開発が推進されている。航空や流体機械の分野では空力性能を改善するために空力制御デバイスが研究されており、なかでもアクティブ制御デバイスはベースライン形状を変えずに必要となしにのみ制御できる有効な技術として注目されている。

近年、プラズマアクチュエータ (Plasma Actuator: PA) と呼ばれる流体制御デバイスが注目されている。薄膜電極間に kV オーダの高周波電圧を印加し、放電により発生する誘起流により流れを制御するデバイスである。印加電圧によって ON/OFF デジタル制御や誘起流速を自由に制御でき、翼前縁に PA を取付けると剥離抑制に効果的であることが実証されている。

低速での剥離制御の有効性を受けて、高速回転のタービンブレードや航空機の翼への適用などの多様なニーズへの適用が期待されている。しかし、誘起流速は小さいため現状の PA 性能では高速流れの制御に用いるのは困難である。近年、この課題を解決するために、ナノ秒パルス放電を利用したプラズマアクチュエータ (Nanosecond Pulse Driven Plasma Actuator: ns-PA) が注目されている。大電力化 (ピーク時の放電電圧 (V_p) は ~10kV 前後、放電電流は ~100A) が可能なため高速流れへの適用が期待されるが、ns-PA による流体制御メカニズムはよくわかっていないのが現状である。

2. 研究の目的

本研究では、2次元翼前縁剥離流に対する ns-PA による制御メカニズムを PIV (Particle Image Velocimetry) 計測、BOS (Background-Oriented Schlieren: 背景画像シュリーレン) 計測を使って実験的に明らかにするとともに、その結果をもとに剥離制御性能が高い ns-PA 電極形状を考案し、その性能を風洞実験で実証する。

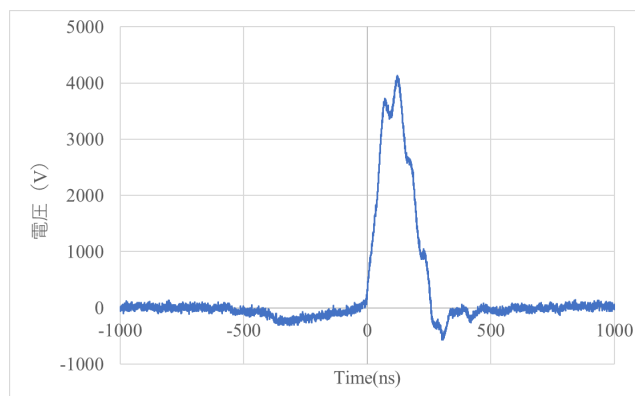
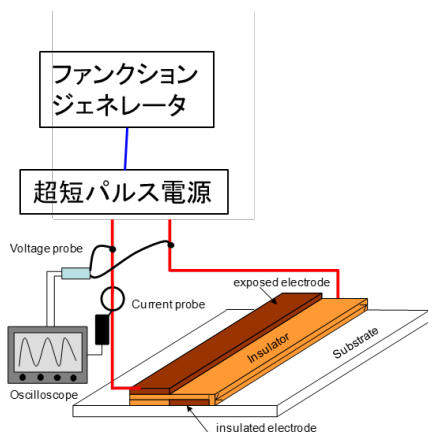
3. 研究の方法

(1) 剥離制御メカニズムの解明

ns-PA による剥離制御メカニズムを調べるために 2次元翼模型を使用し、静圧孔の圧力データにより剥離の有無を評価した。風洞試験は小型低騒音風洞 (低速風洞) で実施した。風洞模型はコード長 150mm の NACA0012 模型を使用した。模型には静圧孔がコード方向センター上に配置されており、多点圧力スキャナ (NetScanner 9116) を用いて計測した。PA はカプトンテープ®と薄膜銅テープを使って製作し、2次元翼前縁 (x/c=0) に貼り付けた。電源は超短パルス電源 (PPM1000S-1KESP, 末松電子製作所) を使用し、ファンクションジェネレータから外部信号を送り、PA の放電周期をコントロールした。放電電圧と放電電流は、電圧プローブ (日本テクトロニクス, P6015A) と電流プローブ (日本テクトロニクス, TCP312 (プローブ), TCPA300 (増幅器)) を用いて計測した。ns-PA の電源システムと放電電圧分布をそれぞれ図 1, 図 2 に示す。本実験システムの放電電圧のパルス幅は、4kV の放電時に数百 ns であった。

また、ns-PA による剥離制御時の流れ場の変化を可視化するため高速度カメラを利用した時系列 PIV 計測を行った。レーザーと高速度カメラはそれぞれ、Lee Laser, LDP-200MQG DUAL DIODE PUMPED LASER, Phantom V710 を使い、計測ソフトには LaVision Davis10 を使用した。レーザーシートを風洞の上部から模型に照射して 2次元速度場計測を行った。

さらに、ns-PA 近傍で発生する圧縮波を可視化するために BOS 法を用いた。BOS 法は流体中の密度変化を可視化する手法の一つであり、光学機材、厳密な光学調整が必要なく、設置の自由度が高く、光学系が簡便であることが特長である。無風時の画像と通風時の背景画像を用い、2枚の画像の背景パターンの変化量の分布を計測することで、流体中の圧縮波、膨張波を捉えることが可能である。



(2) ns-PA 電極形状の検討

ns-PA による剥離制御効果はその電極形状に強く依存するものと考えられる。本研究では、ns-PA の風洞実験によって得られた情報をもとに最適電極形状を検討し、風洞において実証実験を行った。

4. 研究成果

(1) 剥離制御メカニズムの解明

放電電圧 4kV ($F^+=0.1\sim 4.5$)、風速 10m/s、模型迎角 17deg (失速迎角) の実験条件において、多点圧力スキャナを使用して計測した翼面上の圧力分布を図 4 に示す ($F^+=f\times c/U_\infty$ (f : ns-PA 放電周波数, c : 模型コード長, U_∞ : 気流の一樣流速)。計測結果から ns-PA による剥離制御は有効であり、その特性は F^+ に依存することがわかった。

次に、ns-PA 制御によって変化する流れ構造を PIV 計測で可視化した。平均速度場から ns-PA によって 2 次元翼前縁剥離流が抑制されることを確認した (図 5)。また、時系列 PIV 計測を利用して、ns-PA によって誘起された渦が 2 次元翼の前縁から後縁に向かって移動する様子を捉えた。圧力計測結果と PIV 計測結果から、渦によって主流が翼面付近に移流し、翼面の負圧を回復させると考えられる。また、BOS 計測による可視化結果 (図 6) が示すように、ns-PA の放電領域から圧縮波の発生が確認された。



図 3 風洞に設置した 2 次元翼模型

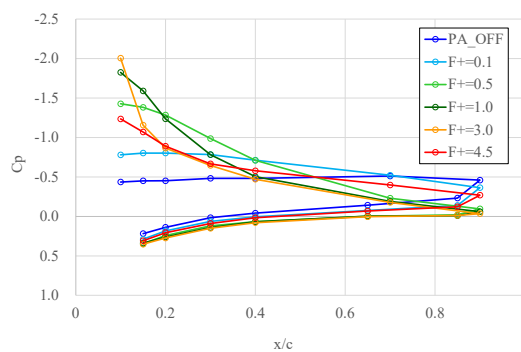
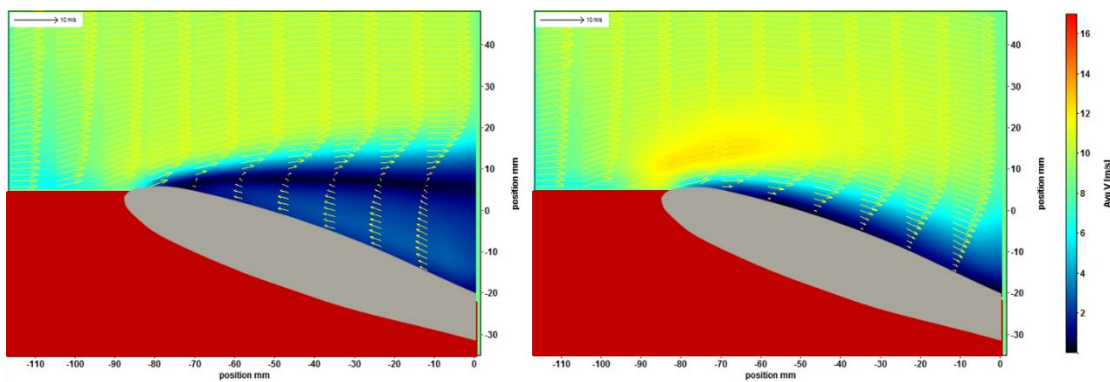


図 4 圧力計測結果 ($V_p=4kV$)



(a) PA-OFF

(b) PA-ON

図 5 PIV 計測結果 (平均流れ場) ($U_\infty=10m/s$, $AoA=17deg$)

(灰色は模型断面形状、茶色は PIV 計測できなかった範囲。気流は左から右方向。)

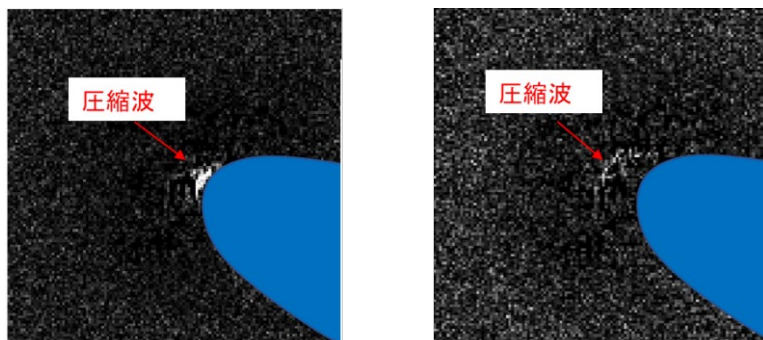


図 6 BOS による計測結果 (2 次元翼前縁に ns-PA を設置 (無風時における画像))

(2) ns-PA 電極形状の検討

風洞実験結果より ns-PA から発生する圧縮波が剥離抑制に寄与していることが考えられる。そこで、波の重ね合わせ原理を参考に、より強い圧縮波を形成すると推定される電極形状を考案した。電極形状は基本形状のシングル形状と合わせて、ダブル形状、鋸刃形状、丸穴形状の4種類作製した。

表 1. ns-PA 電極形状

番号	電極形状	説明
①	シングル形状	従来型電極.
②	ダブル形状	放電による圧縮波の干渉が向かい合わせとなるように、シングル形状の上部電極を平行に設置
③	鋸刃形状	放電による複数の圧縮波の干渉が角度をもって合成されるように、上部電極を鋸刃状にした電極.
④	丸穴形状	円形の放電によって圧縮波が円中心に集中するように、上部電極に丸穴を複数設置した電極.

①～④の電極形状に対し、BOS 法によって圧縮波の形成状況を評価した。結果として、②の電極形状で最も強い圧縮波が形成されることがわかった。また、その形成される圧縮波は陽電極間隔に強く依存することが確認された。

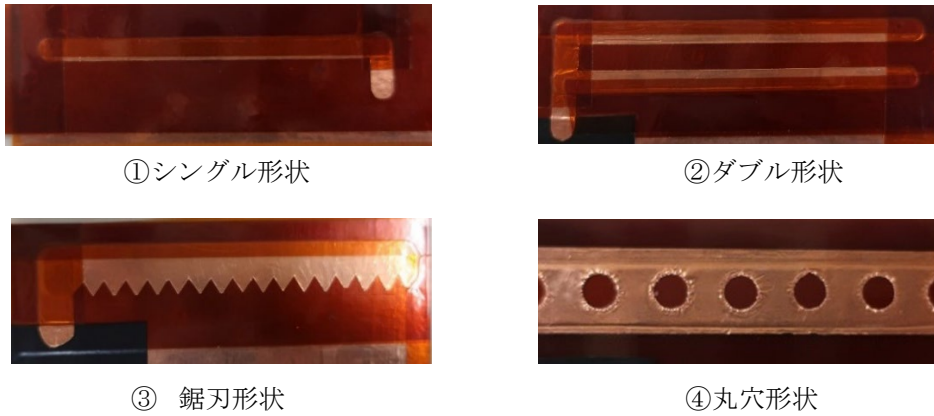


図 7 電極形状写真

次に、2次元翼を用いて電極形状①（シングル形状（従来型 ns-PA））と電極形状②（ダブル形状）の剥離抑制効果を評価した。低速風洞での圧力計測による比較実験を行ったところ、従来型 ns-PA よりも効果的に剥離制御ができることを実証した（従来型 ns-PA では制御できなかった速い風速域での剥離制御が可能になった）。

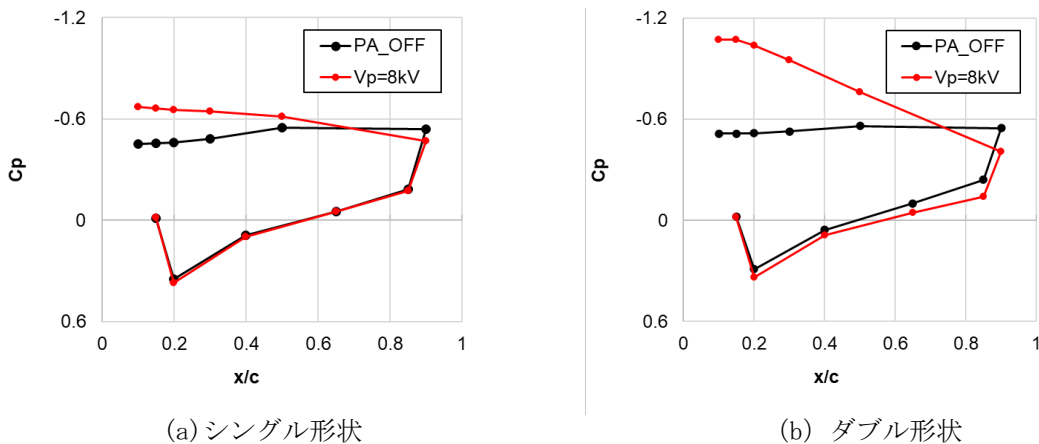


図 8 圧力計測結果 ($U_{\infty}=40\text{m/s}$, $V_p = 8\text{kV}$, $F+=0.5$)

以上

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 満尾和徳、飯島秀俊、青木良尚
2. 発表標題 ナノ秒パルス放電型プラズマアクチュエータによる2次元翼剥離制御の研究
3. 学会等名 日本機械学会2021年度年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 飯島秀俊、満尾和徳、青木良尚
2. 発表標題 ナノ秒パルス放電型プラズマアクチュエータ による2次元翼剥離制御の可視化実験について
3. 学会等名 日本機械学会流体工学部門 A-TS 05-24 研究会「プラズマアクチュエータ研究会」第8回シンポジウム
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 プラズマアクチュエータ	発明者 飯島秀俊、満尾和徳	権利者 宇宙航空研究開発機構
産業財産権の種類、番号 特許、特願2022-115448	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	青木 良尚 (Aoki Yoshihisa) (90371103)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・航空技術部門・研究開発員 (82645)	
研究分担者	飯島 秀俊 (Iijima Hidetoshi) (70358620)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・航空技術部門・主任研究開発員 (82645)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------