

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年6月10日現在

機関番号：15501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22560169

研究課題名（和文）PSJAの誘起特性解析と極限值探索による適応遅延時間制御

研究課題名（英文）Flow induction Characteristics of PSJA and Adaptive Delayed Feedback Control using Extremum Seeking

研究代表者

小河原 加久治 (OGAWARA KAKUJI)

山口大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：70211125

研究成果の概要（和文）：プラズマシンセティックジェットアクチュエータ（PSJA）のNACA0012および0015翼に対する高迎角時剥離抑制特性を熱線風速計による計測により明らかにするとともに、極値探索手法によりPSJAのPWM変調周波数を適応制御することにより、PSJAの剥離抑制効果が堅固なものとなることを明らかにした。この手法を用いることにより、外乱により主流速度等が変動しても剥離抑制効果が維持できることが分かった。

研究成果の概要（英文）：Extremum Seeking Method is applied to control modulation frequency of Plasma Synthetic Jet Actuator (PSJA) in order to examine that effectiveness of separation control of PSJA for NACA 0012 and 0015 wings can be improved. We found that the proposed adaptive method is able to tune to optimal modulation frequency for suppressing flow separations.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2011年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：流体力学

科研費の分科・細目：機械工学、流体力学

キーワード：流れ制御、プラズマアクチュエーター、PSJA、EMI

1. 研究開始当初の背景

(1) PSJAの駆動交流電圧をパルス幅変調（PWM）すると剥離抑制効果が増すことが知られていたが、最適な変調条件が主流速等の流れ条件にどのように依存するかは明らかでなかった。

(2) 低乱れ風洞内での実験でPSJAの剥離抑制効果は多くの研究者により検証されてきたが、外乱の存在する環境下での実験は少なかった。

(3) 外乱環境下でもPSJAの効果を維持できる

適応制御手法に関する研究は無かった。

(4)PSJA 作動時の電磁気干渉 (EMI) 特性を調査した研究は無かった。

2. 研究の目的

(1) PSJA の PWM 時に、最適な変調条件の主流れ条件依存性を明らかにする。

(2) 外乱の存在する流れ環境下での PSJA の運用を想定し、主流速等が変動しても最適な PWM 条件を維持できる適応制御手法を開発する。

(3) PSJA の EMI 特性および伝熱制御特性を解明する。

(4) 迎え角が時間的に変化する翼の失速特性をダイナミックストール特性と呼ぶが、PSJA を作動させた際に、それが非作動時とどう違うのかを定量的に研究した例は少ない。特に円弧翼のダイナミックストール特性を計測した例は無いので、周期運動する円弧翼の PSJA による剥離抑制効果を検証する。

(5) PSJA の数値シミュレーションには大別すると 2 つのアプローチがある。一つは電磁気計算の時間スケールでプラズマ現象を計算し、PSJA による誘起流の発生メカニズムを解明し、より良い PSJA の開発に結びつけようとするものであり、いわば電磁気のダイレクトシミュレーションである。もう一つは、非定常流れ現象をシミュレーションするために計算は流れの時間スケールで行い、電磁気解析は準静的な取り扱いをするものである。筆者らは、これまで後者で数値解析を行い、実験結果とオーダー的には一致する数値モデルを提案してきた。しかし、より高精度のモデルを構築するためには、これら二つのアプローチの長所を互いに取り入れることが必要である。本研究では後者の数値流体力学 (CFD) の側から電磁気解析の長所を取り入れる手法を研究する。

3. 研究の方法

(1) NACA0012、NACA0015 翼および円弧翼を対象に、熱線風速計を用いた後流計測を行う。PSJA の作動により剥離特性がどのように変化するか定量的に評価する。PSJA はストリップストリップ型 (SS 型)、フィンガー型を用い、それぞれの特性を調べる。

(2) EMI 解析用スペクトラムアナライザーを

使い、PSJA 作動時の EIM を計測する。ダイポールアンテナを使った計測が業界の標準であるので、それに従った方法で検証するとともに、本研究で用いるスペクトラムアナライザーに対応するダイポールアンテナでは計測できない周波数に対しては、磁気プローブで計測する。PSJA を作動させるための高電圧交流の周波数は数 KHz から数十 KHz であり、その波長と PSJA の幾何学的スケールには大きな隔りがある。PSJA が実用上問題となる EMI を引き起こすとすると、PSJA のどの部位が発生源となっているかを時期プローブで探る。

(3) PSJA を PWM で作動させる際、デューティが PSJA の作動特性に及ぼす影響を調べる。

(4) 温度境界層を PSJA により制御し、熱伝達特性の制御が可能か調べる。

(5) 図 1 のような駆動周波数をステップ状に周期可変する極値探索 (Extremum Seeking) により、与えられた主流速において最適な PSJA 変調周波数が探索できるか調べる。

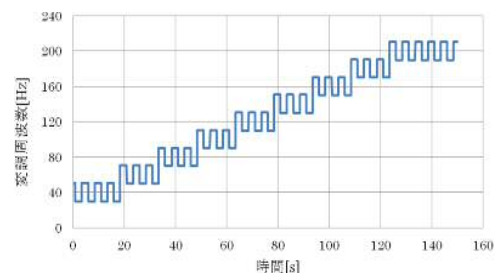


図 1. 駆動周波数時間推移極値探索の例

(6) 円弧翼のダイナミックストール特性を定量的に計測するために、ロードセルを設定した円弧翼および NACA0012 翼をサーボモータで周期的に迎え角を変化させ、揚力、効力、および空力モーメントを計測する。

4. 研究成果

(1) NACA0012 翼と比較して NACA0015 翼においては低迎え角で前縁失速するが、PSJA 作動により失速角を五度程度増加させることができる事がわかった。SS 型とフィンガー型 (図 2) との比較では、フィンガー型の方が失速角を増大させる効果は大きい、低迎え角で抗力を増大させる傾向があり、揚抗比特性では SS 型が有利であることが分かった。また、揚力は全般的にフィンガー型が高い値を示すことがわかった。

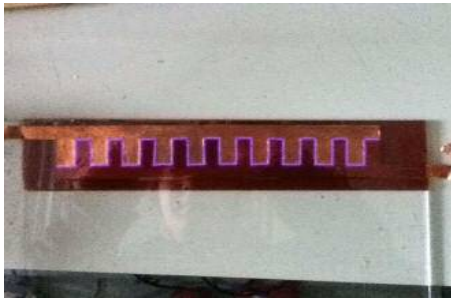


図2. フィンガー型 PSJA のグロー放電

また、円弧翼に対する PSJA の効果を検証するため、ロードセルで揚力、抗力を直接計測し、その統計学的妥当性を検証した。その結果、最大揚力を与える迎え角付近の揚力は分散が大きいが、PSJA の効果ははっきり確認できることが分かった(図3、図4)。

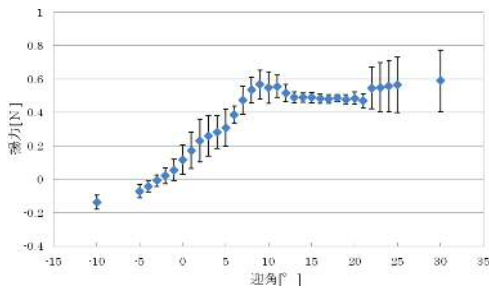


図3. PSJA 非作動時の円弧翼の揚力

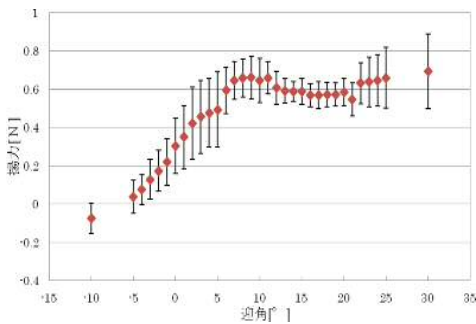


図4. PSJA 作動時の円弧翼の揚力

(2) PSJA 作動時に発生する電磁波は、駆動回路から PSJA 本体までの配線に十分注意すれば、コンピューター、携帯電話、電子レンジなどの家電製品と比べると微弱であり、電波法上問題が無いことが分かった。

(3) 従来の研究で指摘されているように、PWM のデューティー比を 0.1 程度に下げても剥離抑制効果は維持できることを本研究におい

ても確認した。

(4) PSJA 作動時には PSJA 自体も発熱するが、ペルチエ素子により冷却された空気を発熱体近くの温度境界層に誘導することにより、ある条件下では冷却装置として用いることができることがわかった。

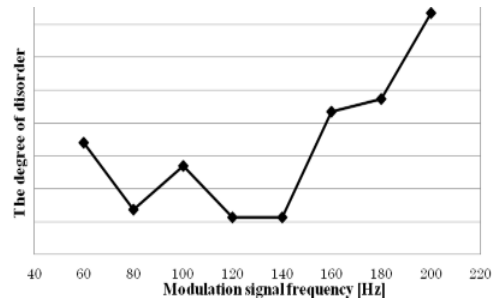


図5. 駆動周波数に対する乱れ度スケール

(5) 熱線風速計で計測した翼後流の乱れ度と PWM 変調周波数変化の相関を求めることによる局探索手法により、乱れ度を最小にする変調周波数を探索可能であることが明らかになった(図5)。この手法を用いれば、主流速が変動したような外乱環境下でも PSJA を適応的に最適な変調周波数で作動させることが可能となると考える。

(6) ダイナミックストール特性を調べるため、周期的に迎え角を変化させながら揚力・抗力を計測する実験システムを構築し、迎え角に対する揚力のヒステリシス特性を計測した(図6)。その結果、S-S 型が周期ごとの失速特性がばらつくのに対し、フィンガー型は剥離抑制効果が安定しており、周期ごとのヒステリシス曲線が良く一致することがわかった。

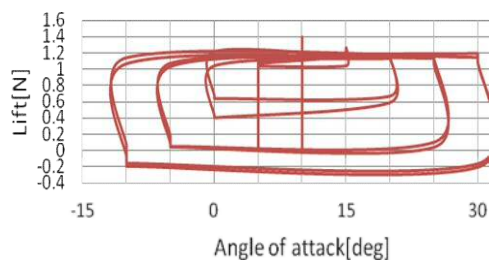


図6. 迎え角に対する揚力のヒステリシス

(7) PSJA の効果を数値シミュレーションする際の誘電力モデルの精度を向上させるために、マックスウェル応力のモデル化手法を

再検討した。新モデルは筆者らが従来用いていたモデルと比較して、より大きな体積力を与えることが分かった。つまり、従来は数値シミュレーションの結果と実験結果はオーダー的に同じであったが、新モデルでは1以下のモデル定数を導入しないとシミュレーション結果と実験結果が一致しないこととなった。このモデルを使って NACA0012 翼、および NACA0015 翼まわりの流れを幾つかの迎角について流れシミュレーションを行った(図 7)。その結果、いずれの翼に対してもシミュレーション結果は実験結果と定性的に良く一致し、定量的にも抗力のオーダーは一致することが分かった。尚、NACA0015 翼まわりの熱線流速計による流れ計測は本研究で新たに行ったものである。

このモデルを使って極値探索による遅延フィードバックによる適応剥離制御シミュレーションを行った結果、実機実験と同様に所期の効果が得られることがわかった。

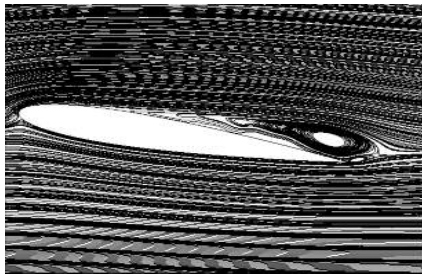


図 7. PSJA による剥離抑制シミュレーション

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

① Kakuji Ogawara, Ryota Kojima, Shoji Matsumoto, Hidenori Shingin, Extreme Seeking Adaptive Separation Control on a Wing with Plasma Synthetic Jet Actuator, Journal of Fluid Science and Technology, 査読付き, Vol. 7, 2012, pp. 88-99, DOI:10.1299/jfst.7.89

[学会発表] (計 4 件)

① 古島康平, 小河原加久治, 新銀秀徳, 極値検出を用いた PSJA による NACA0015 翼周りの流れ制御, 日本航空宇宙学会西部支部講演会, 2012 年 11 月 1 日. 九州大学西新プラザ (福岡市)

② 長井斗志仁, 小河原加久治, 新銀秀徳, 古

島康平, 坂本崇, 稲田洋也, PSJA 作動時の電磁干渉特性の解析, 日本機械学会 2012 年度年次大会, 2012 年 9 月 11 日. 金沢大学 (金沢市)

③ 庄司亮彦, 小河原加久治, 新銀秀徳, プラズマシンセティックジェットアクチュエータ (PSJA) を用いた境界層制御による熱伝達促進, 日本航空宇宙学会西部支部講演会, pp. 163-166, 2010 年 11 月 12 日. 九州大学 (福岡市)

④ 中島洋平, 小河原加久治, 新銀秀徳, PSJA を用いた円弧翼の揚抗比及び EMI 特性計測, 日本航空宇宙学会西部支部講演会, pp. 159-162, 2010 年 11 月 12 日. 九州大学 (福岡市)

○取得状況 (計 1 件)

名称: プラズマシンセティックジェットを用いた冷却装置

発明者: 小河原加久治

権利者: 国立大学法人山口大学

種類: 特許

番号: 特許第 5263701 号

取得年月日: 平成 25 年 5 月 10 日

国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小河原 加久治 (OGAWARA KAKUJI)

山口大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号: 70211125

(2) 研究分担者

新銀 秀徳 (SHINGIN HIDENORI)

山口大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号: 60535243

(3) 連携研究者

()
研究者番号: