

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 2 日現在

機関番号：12605

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2015

課題番号：24760659

研究課題名(和文) 能動的多点流体制御による細長物体の先進的空力特性制御技術の研究

研究課題名(英文) Study on Advanced Aerodynamic Control Technique for Slender Body Using Multipoint Flow Control

研究代表者

西田 浩之(Nishida, Hiroyuki)

東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：60545945

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：ロケットや航空機のような細長い形状の物体が機首を上げて飛行する場合、空気の流れが非対称となり、それによって機体に横力が働いて姿勢が不安定になってしまう。この問題を解決するため、プラズマアクチュエータと呼ばれる先進デバイスを用いて、空気の流れを直接コントロールすることを試みた。結果、機体先端に設置したプラズマアクチュエータを、周期的にオンオフすることで、気体に加わる横力を連続的に変化させ、かつゼロにまで抑えることに成功した。

研究成果の概要(英文)：When a slender body, which is typical body shape of a rocket and an air plane, flies at high angle of attack, separation flow over the body becomes asymmetric and the attitude stability is significantly lost due to the side force caused by the asymmetric separation flow. To overcome this difficulty, the plasma actuator, which is one of advanced flow control devices, was applied to the high-angle-of-attack slender body for suppressing the asymmetry in the separation flow. As a result, this study successfully showed that the side force can be continuously changed to zero by burst-mode actuation of plasma actuators installed to the apex of the body.

研究分野：航空宇宙流体力学

キーワード：流体制御 細長物体 大迎角空力

1. 研究開始当初の背景

細長物体の飛行に際し、古くから深刻な課題であるのが大迎角飛行時におけるものである。流れに対する迎角がある一定以上になると、後流に非対称剥離渦が形成され大きな横力が加わり(図1)、姿勢安定性が著しく損なわれる。そこで、剥離渦を直接コントロールすること(流体制御)が有効な手段であり、能動的に制御できれば、任意な姿勢制御も可能である。しかしながら、従来の能動的流体制御デバイスは構造が複雑な上、設置場所の自由度が限られるため効果が小さく、実用化はされていない。

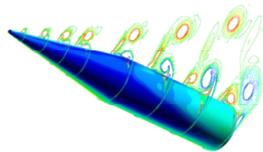


図1 大迎角剥離流れ

近年、DBDプラズマアクチュエータが能動的流体制御デバイスとして注目されている。薄い誘電体を挟んだ電極間に交流高電圧を印加することで流れを誘起するデバイスで(図2左)、シンプルな構造かつ軽量であり、制御入力への応答も速い。機体表面の複数の地点へ容易に設置でき、また、応答性の速さを利用した非定常なオンオフ駆動(バースト駆動; 図2右)により、従来のデバイスには不可能な制御力を流れに加えることが可能である。

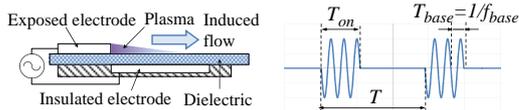


図2 プラズマアクチュエータ 左: 模式図, 右: オンオフ波(バースト波)

2. 研究の目的

プラズマアクチュエータを飛翔体表面の多地点に設置し駆動することを想定し、細長物体の横方向の空力特性を幅広い迎角において制御する技術を開発する。

3. 研究の方法

本研究では、数値流体シミュレーションと風洞実験、双方のアプローチから研究を行った。流れ場を解析し特性を解明するために、PIV計測による可視化実験と数値シミュレーションを用いた。また、プラズマアクチュエータによる空力制御効果の解析には、空力特性取得実験と数値シミュレーションを用いた。

4. 研究成果

(1) 大迎角細長物体周りの流れ場

数値流体シミュレーションとPIV法を用いた流れの可視化実験により、幅広い迎角範囲における細長物体周りの流れ場を詳細に解析し、その特性を明らかにした(図3)。

渦構造は迎角が上がるに伴い、その非対称

性を増し、また、物体の軸方向位置によってもその構造を大きく変化させる。特に、迎角が60度を超えてくると、物体前胴と後胴で、剥離渦の構造が左右反転するような複雑な流れ場となる。

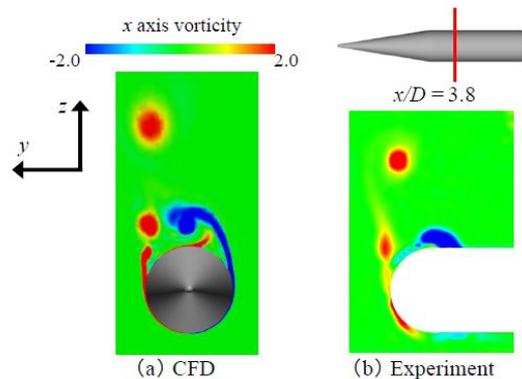


図3 大迎角細長物体周りの非対称渦構造(迎角45度)

(2) アクチュエータの制御効果(連続駆動)

空力特性取得実験と数値シミュレーションにより、プラズマアクチュエータを連続駆動(数kHzの正弦波電圧を連続的に印加)した場合について、横力の制御効果を解析した。

結果、物体後胴における駆動で、アクチュエータへ印加する電圧の大きさに比例して横力の大きさを変化させられることを示した(図4)。一方で、主流流速の運動量に応じてアクチュエータの出力を上げる必要がある、現状可能なアクチュエータ出力では、30m/s以上の主流中では有意な制御効果を得られないことも明らかとなった。

アクチュエータの設置位置を軸方向と周方向に変化させた解析から、高い制御効果を得るためには、流れの剥離位置の直後に設置すること、及び、物体の先端に近い位置に設置すること、が必要であることを示した。

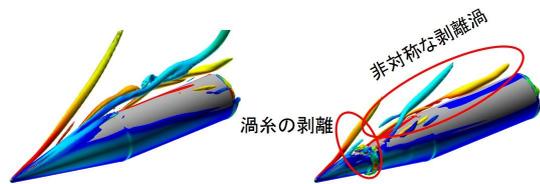


図4 後胴のプラズマアクチュエータ(連続駆動)による剥離渦の制御

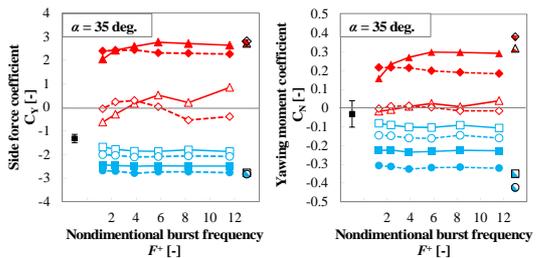
(3) バースト駆動による制御効果

(2)の結果を踏まえ、物体先端にアクチュエータを設置し、また、バースト駆動(図2左)を行うことで、高い制御効果と横力の連続的な制御を両立させることを試みた。解析は空力特性取得実験により行った。

結果、迎角35~55度の広い範囲において、バースト駆動のパラメータ(バースト比とバースト周波数)を変化させることで、横力とヨーイングモーメントを連続的に変化でき、

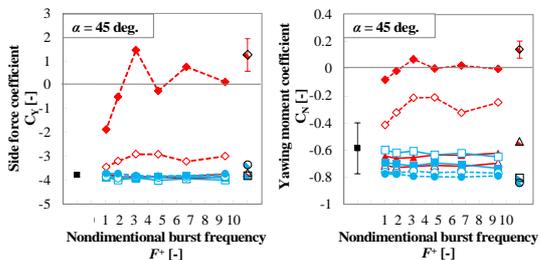
また横力はゼロにまで抑えることにも成功した(図5)。50度以下の比較的低い迎角においてはバースト比を変化させることが効果的であり、それ以上の高い迎角ではバースト周波数を変化させることが有効である。

- S at 80deg(BR=10)    - S at 80deg(BR=50)    △ S at 80deg(Const)  
 - P at 80deg(BR=10)    - P at 80deg(BR=50)    □ P at 80deg(Const)  
 - S at 100deg(BR=10)    - S at 100deg(BR=50)    ◇ S at 100deg(Const)  
 - P at 100deg(BR=10)    - P at 100deg(BR=50)    ○ P at 100deg(Const)  
 ■ OFF



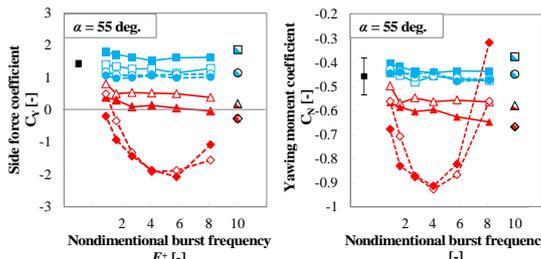
(a)  $\alpha = 35$ deg.

(b)  $\alpha = 35$ deg.



(c)  $\alpha = 45$ deg.

(d)  $\alpha = 45$ deg.



(e)  $\alpha = 55$ deg.

(f)  $\alpha = 55$

図5 バースト駆動による横力とヨーイングモーメントの制御

### 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7件)

Nishida, H., Nonomura, T. and Abe, T., Numerical Study of Plasma Dynamics and Electrohydrodynamic Effect in DBD Plasma Actuator, International Journal of Plasma Environmental Science and Technology, 査読有, Vol.10, pp.70-75, 2016,

URL:[http://www.iesj.org/html/service/ijpest/vol10\\_no1\\_2016/ijpest\\_vol10\\_no1\\_2016\\_p070-075.html](http://www.iesj.org/html/service/ijpest/vol10_no1_2016/ijpest_vol10_no1_2016_p070-075.html)

Nishida, H. and Nonomura, T. and Abe, T., Numerical Study on Spanwise

Nonuniformity in Body-Force Field of Dielectric-Barrier-Discharge Plasma Actuator, AIAA Journal, 査読有, Vol.54, pp. 659-669, 2016,

DOI:10.2514/1.J054315

Nishida, H. and Shiraishi, T., Experimental Characterization of Dual-grounded Tri-electrode Plasma Actuator, AIAA Journal, 査読有, Vol.53, pp. 3483-3487, 2015,

DOI:10.2514/1.J053784

Nishida, H., Nonomura, T. and Abe, T., Three-dimensional Simulation of Discharge Plasma Evolution on a Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuator, Journal of Applied Physics, 査読有, Vol.115, p.133301, 2014,

DOI:10.1063/1.4870384

Sato, M., Nishida, H. and Nonomura, T., Numerical Study of Vortex Flow Control on High-Angle-of-Attack Slender Body, Transaction of JSASS, Aerospace Technology Japan, 査読有, Vol.12, pp. 43-49, 2014,

DOI:10.2322/tastj.12.Pe\_43

Nishida, H., Mizuki, S., Miyazaki, I., Nonaka, S., Nonomura, T. and Inatani, Y., Preliminary Experimental Study on Aerodynamic Characteristics Control of Slender Body Using DBD Plasma Actuator, Transaction of JSASS, Aerospace Technology Japan, 査読有, Vol.10, pp. 97-103, 2012,

DOI:10.2322/tastj.10.Pe\_97

Inaba, R., Nishida, H., Nonomura, T., Asada, K. and Fujii, K., Numerical Investigation of Asymmetric Separation Vortices over Slender Body by RANS/LES Hybrid Simulation, Transaction of JSASS, Aerospace Technology Japan, 査読有, Vol.10, pp. 89-96, 2012,

DOI: 10.2322/tastj.10.Pe\_89

[学会発表](計20件)

鈴木那孟, 森川耀介, 西田浩之, 大迎角細長物体の横力制御におけるプラズマアクチュエータの効果的な駆動パラメータの検討, 2016年4月14日, 東京大学 山上会館(東京都文京区)

Morikawa, Y. and Nishida, H., Experimental Study of Side Force Control Using Multipoint Plasma Actuators for High-Angle-of-Attack Slender-Body, The 2015 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology, 2015年11月26日, Cairns (Australia)

森川耀介, 西田浩之, 鈴木那孟, プラズマアクチュエータのバースト駆動による大迎角細長物体の横力制御, 第59回宇宙科学技術連合後援会, 2015年10月

8日,かごしま県民交流センター(鹿児島県鹿児島市)  
Nishida, H., Nonomura, T. and Abe, T., Numerical Study of Three-dimensional Effects of Plasma Structure on Flow Field around DBD Plasma Actuator, 53<sup>rd</sup> AIAA Aerospace Science Meeting, 2015年1月8日, Kissimmee (USA)  
Shiraishi, T. and Nishida, H., Development and Performance Investigation of Dual-Grounded Tri-Electrode Plasma Actuator, 17<sup>th</sup> International Congress on Plasma Physics, 2014年9月15日, Lisboa (Portugal)  
Morikawa, Y., Nishida, H. and Sato, M., Matsubara, A. and Nonaka, S., Experimental Study of Side Force Control for High-Angle-of-Attack Slender Body Using Various Plasma Actuator Arrangements, 14<sup>th</sup> International Space Conference of Pacific-basin Societies, 2014年5月29日, Xi'an (China)  
Sato, M., Nishida, H., Matsubara, A. and Nonomura, T., Numerical Study of Separation Flow Control over High-Angle-of-Attack Slender-Body Using Plasma Actuator at Aft-Body, The 12<sup>th</sup> International Symposium on Fluid Control, Measurement and Visualization, 2013年11月19日, Nara Prefecture New Public Hall (奈良県奈良市)  
Koizumi, T. and Nishida, H., Numerical Investigation of Plasma Structure and Flow Induction Process on DBD Plasma Actuator, The 12<sup>th</sup> International Symposium on Fluid Control, Measurement and Visualization, 2013年11月19日, Nara Prefecture New Public Hall (奈良県奈良市)  
佐藤雅幸, 西田浩之, 松原暁良, 野々村拓, 大迎角細長物体の横力制御におけるDBD プラズマアクチュエータ設置位置の検討, 第45回流体力学講演会, 2013年7月4日, タワーホール船堀(東京都江戸川区)  
古泉卓也, 西田浩之, DBD プラズマアクチュエータにおける放電プラズマと誘起流れのカップリングシミュレーション, 日本航空宇宙学会 第44期年回講演会, 2013年4月18日, 東京大学 山上会館(東京都文京区)  
佐藤雅幸, 西田浩之, 松原暁良, 野々村拓, 野中聡, 鈴木幸一, 加藤裕之, プラズマアクチュエータを用いた大迎角細長物体の非対称剥離渦制御におけるPIV可視化実験と数値解析, 日本航空宇宙学会 第44期年回講演会, 2013年4月18日, 東京大学 山上会館(東京都文京区)  
Miyake, D., Nishida, H. and Abe, Takashi, High-Speed Optical Observation of Discharge Plasma Structure on DBD Plasma

Actuator in Argon Gas, 51st AIAA Aerospace Science Meeting, 2013年1月9日, Grapevine (USA)  
佐藤雅幸, 西田浩之, 松原暁良, 野々村拓, 鈴木幸一, 加藤裕之, 大迎角細長物体におけるプラズマアクチュエータを用いた非対称剥離渦制御のPIV可視化実験と数値シミュレーション, 平成24年度宇宙航行の力学シンポジウム, 2012年12月13日, JAXA 宇宙科学研究所(神奈川県相模原市)  
Nishida, H., Nonomura, T. and Abe, T., Characterization of Electrohydrodynamic Force on Dielectric-Barrier-Discharge Plasma Actuator Using Fluid Simulation, International Conference on Plasma Physics 2012, 2012年11月14日, Venice (Italy)  
西田浩之, 野々村拓, 安部隆士, DBD プラズマアクチュエータにおける放電プラズマと体積力場の数値解析, 日本機械学会 2012年度年次大会, 2012年9月10日, 金沢大学 角間キャンパス(石川県金沢市)  
佐藤雅幸, 稲葉亮司, 西田浩之, 野々村拓, 藤井幸蔵, DBD プラズマアクチュエータを用いた大迎角細長物体の非対称剥離制御における周方向駆動位置の影響の数値解析, 第44回流体力学講演会, 2012年7月6日, 富山国際会議場大手町フォーラム(富山県富山市)  
西田浩之, 三宅大介, 野々村拓, 安部隆士, DBD プラズマアクチュエータにおける体積力場の放電プラズマシミュレーションによる解析, 第44回流体力学講演会, 2012年7月5日, 富山国際会議場大手町フォーラム(富山県富山市)  
Nishida, H., Nonomura, T. and Abe, T., Numerical Analysis on Three-dimensional Body Force Field of DBD Plasma Actuator, 43<sup>rd</sup> AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, 2012年6月26日, New Orleans (USA)  
Nishida, H., Nonomura, T., Inaba, R., Sato, M. and Nonaka, S., Study on Application of DBD Plasma Actuator for Side Force Control of High-Angle-of-Attack Slender Body, 13th International Space Conference of Pacific-basin Societies, 2012年5月17日, 京都国際交流会館(京都府京都市)  
西田浩之, 稲葉亮司, 佐藤雅幸, 野々村拓, 後胴に設置したプラズマアクチュエータによる大迎角細長物体の剥離流れ制御の数値解析, 日本航空宇宙学会 第43期年回講演会, 2012年4月12日, 東京大学 山上会館(東京都文京区)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕

ホームページ等

<http://web.tuat.ac.jp/~nishida/>

## 6 . 研究組織

### (1)研究代表者

西田 浩之 (NISHIDA, Hiroyuki)

東京農工大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：60545945