

〔小特集〕京による最新計算事例の紹介

DBD プラズマアクチュエータを用いた翼剥離制御の大規模パラメトリックスタディ

*宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所
株式会社 菱友システムズ
宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所
宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所
宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所
宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所

佐藤 允
岡田 浩一
青野 光
焼野 藍子
野々村 拓†
藤井 孝藏

Large-scale Parametric Study on Separation Control by DBD Plasma Actuator

Makoto Sato, Institute of Space and Astronautical Science, JAXA

Koichi Okada, Ryoyu Systems Co., Ltd.

Hikaru Aono, Institute of Space and Astronautical Science, JAXA

Aiko Yakeno, Institute of Space and Astronautical Science, JAXA

Taku Nonomura, Institute of Space and Astronautical Science, JAXA

Kozo Fujii, Institute of Space and Astronautical Science, JAXA

1 はじめに

「翼」に代表される様々な流体機器において生じる剥離流れを抑制することは、機器の性能向上、騒音の低減といった観点から極めて重要であり、多くの方策が発案・実用化されている。近年では DBD プラズマアクチュエータなどのマイクロデバイスを用いた剥離制御に大きな注目が集まっており^{1,2)}国内でも数多くの研究が行われている³⁻⁵⁾。図 1 は翼面上に配置された DBD プラズマアクチュエータと、アクチュエータによって剥離が抑制された翼周りの流れ場を示している。上記デバイスは、従来用いられてきた定常ジェットとは異なり、局所的に微小変動を剥離せん断層に加えることで剥離流れを制御する。特に、DBD プラズマアクチュエータは構造が単純、素早い応答性、少ない消

費エネルギーといった利点があり、近年その研究論文数は飛躍的に増加している¹⁻⁵⁾。しかしながら、剥離流れにおける DBD プラズマアクチュエータの設置位置や駆動条件に関する明確な制御指標は存在しておらず、試行錯誤的な手法に頼っているのが現状である。

例えば過去の研究⁶⁾から、DBD プラズマアクチュエータの on/off を周期的に切り替えるバーストモードを用いることでより効率的な剥離制御を行えることが明らかにされているが、提案されているバースト周波数の最適値は個々

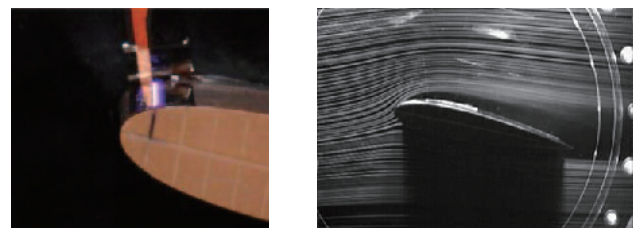


図 1 プラズマアクチュエータ (左: プラズマの放電の様子, 右: 翼剥離流れ制御への適用)

*〒252-5210 相模原市中央区由野台 3-1-1

† E-mail: nonomura@flab.isas.jaxa.jp

の研究グループによって異なっており、明確な値は得られていない。また、アクチュエータの設置位置や投入運動量等の様々な制御パラメータについても同様であり、DBDプラズマアクチュエータを用いた剥離制御の様々な分野における実用化に際しては、剥離流れ制御における流体现象の詳細な理解に立脚した設計指標を得ることが必要不可欠である。従って、1)流体制御における様々な設計パラメータを網羅的に調べ、かつその中から2)流体现象を詳細に理解し、流体制御の制御指針を得ることが必要となるが、これは一筋縄ではない。例えば、風洞試験では、設計パラメータを変化させた場合の流体力の一連のデータが容易に得られるが、速度場などの取得は限られたケースでしかできないため流体现象の詳細に迫ることが難しい。一方で実験室レベルでのレイノルズ数(10^4 - 10^5)であれば、近年の計算機の高速化と計算手法の発展から流体場の詳細がわかる Large-eddy simulation (LES)が可能であるが、現状の一般的なスーパーコンピュータでこれを行うと1年間に10ケース程度が限界⁶⁾であり、パラメータの効果を十分に議論できない。

こういった問題に対して、我々は「京」を用いて初めて実行可能になる160ケース超のLESによる超大規模パラメトリックスタディを行い、様々な設計パラメータの影響を網羅的に調べ、同時にケース毎の流体现象を詳細に理解することで、流体制御を活用した機器の設計に繋げていくことを狙っている⁷⁾。本稿では、「京」を用いたこの超大規模パラメトリックスタディより得られた、DBDプラズマアクチュエータによる剥離制御に関する様々な知見のうちのいくつかを紹介したい。

2 解析モデル

2.1 支配方程式及び計算手法

支配方程式として連続の式、運動量保存式、エネルギー保存式を用いた。運動量保存式とエネルギー保存式にはDBDプラズマアクチュエータによる効果をソース項として加えた。補助方程式として理想気体の状態方程式を用いた。計算方法の詳細については文献⁸⁾を参照されたい。

2.2 計算対象及び計算格子

計算対象はNACA0015, NACA0012, NACA0006翼であり、スパン方向が一様である2次元翼形状とした。レイノルズ数は63,000,マッハ数0.2で解析を行った。総格子点数は約2,000万点であり、壁単位を基にした乱流境界層を解像できる格子密度の条件を十分に満たすものとしている。計算領域として、翼弦 c をベースに、翼から離れる方向に $25c$ 、スパン方向に $0.2c$ をとっている。

2.3 プラズマアクチュエータの駆動パラメータ

通常、プラズマアクチュエータを交流電圧により作動させた場合、交流一周中に2回の放電が起こっていることが知られている。本研究では、体積力がその2回の放電の両方で起こっていると仮定し、さらに両者とも流れ方向（露出電極から被覆電極の方向）に同様の大きさの体積力が発生させていると仮定する。具体的には時間変動する体積力を時間平均した Suzen らのモデルを用いて体積力を加える⁸⁾。

付加する体積力の大きさは、支配方程式中のソース項に対して、無次元パラメータ D_c を乗ずることによって変化させる。 D_c はプラズマアクチュエータによる体積力項の無次元数であり、物理的な意味としては流れの運動エネルギーと電磁力からのエネルギーの比を表す。詳細は文献⁸⁾を参考にされたい。本研究では、 D_c の値は実験で達成できる程度の非常に小さなものとしており（一般的な運動量係数 C_μ に変換すると 1×10^{-5} 程度）、現実的な場を対象とした解析を心がけた。本モデルによる誘起流れは実験と同様の性質を持っていることを確認している⁹⁾。また、より高度なプラズマアクチュエータのモデル化も合わせて進めていることを記しておく¹⁰⁾。

本研究では過去の研究⁶⁾と同様に、アクチュエータを間欠的に駆動させるバーストモードと連続的に駆動させるノーマルモードを用いた様々な駆動条件に対して解析を行う。図2はバーストモードにおけるアクチュエータの動作ダイアグラムを示している。本研究では、アクチュエータの設計パラメータとして、アクチュエータ位置(前縁からの距離)、無次元バースト周波数(F^+)、投入運動量(D_c)、バースト比率(BR)、無次元ベース周波数(F_{base})を変化させた一連のLES解析を行った。ここで無次元バースト周波数 F^+ は図中のバースト波の周波数 f^* を翼コード長と一様流速で無次元化したものである。

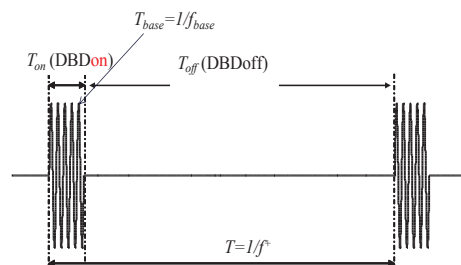


図2 バースト駆動の模式図

3 解析結果

図3に本研究で行った160ケースの大規模パラメトリックスタディで得られた瞬間場の可視化図を示す。制御パラメータによって制御効果は大きく異なり、ほぼ剥離が抑制されているケースがある一方、制御が効果的に働かず、流

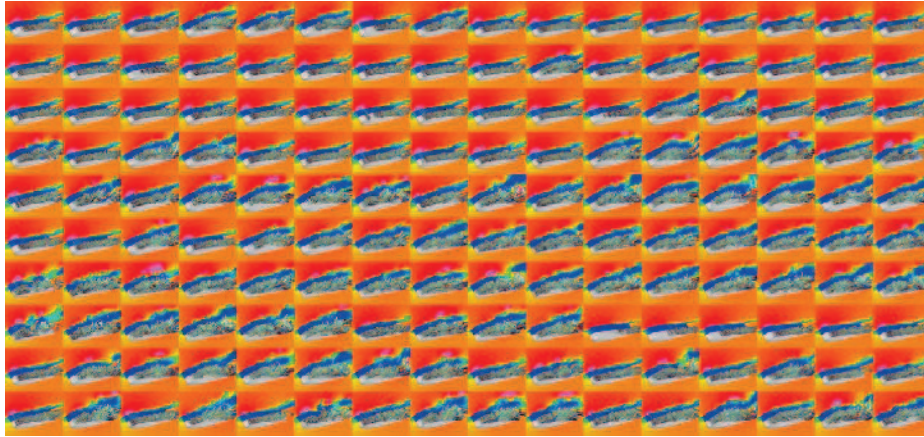


図3 パラメトリックスタディにより得られた各条件の流れ場 (160 ケース, 背景: 速度分布, 等値面: 渦構造)

れが剥離したままのケースなどが見られる。

本記事では, 上記大規模パラメトリックスタディから得られた3つの重要な知見を述べたい。詳細に関しては文献⁷⁾を参考にされたい。

3.1 プラズマアクチュエータの位置に関する知見

従来から, 剥離制御には剥離点付近で流れに擾乱を与えることが最も効果的であるとの知見があるが, 本知見に関するデータは限られており, サンプル数が少ない試験から得られた定性的な結果があるのみである。本研究ではプラズマアクチュエータを翼前縁部から 0%, 2.5%, 5%, 10% の位置に設置し, それぞれの設置位置で駆動条件を変化させることで, 様々な駆動条件下における設置位置の影響を調べた。

図4は, NACA0015 翼の各迎角における最適なプラズマアクチュエータの設置位置と剥離位置を示している。ここで, プラズマアクチュエータの制御効果の指標には揚抗比 (C_L/C_D) を用い, 最適な設置位置は揚抗比と設置位置の関係を2次関数で近似することで求めた。また, この図において最適な設置位置を表す丸印が複数存在するのは, 設置位置以外の条件 (F^+ や Dc) が異なる場合でのそれぞれの最適な位置も同時に表示しているためである。図より, 剥離点と最適な設置位置は強い相関を持っていることがわかる。このような定量的な結果はこれまでの研究でほとんどなく, 信頼性の高い大規模パラメトリックスタディを行うことで初めて定量的に確認することができたといえる。

3.2 無次元バースト周波数の効果に関する知見

周波数に関しても, 多くの研究が $F^+=1$ が良いとする一方, $F^+=10$ 付近が良いとする研究も存在しており¹¹⁾, 十分な結論が得られていなかった。図5にアクチュエータを5%位置に設置した場合の揚抗比とバースト周波数の依存性を示す。本パラメトリックスタディでは, 従来の最適周波数に関する知見に反して, $F^+=6$ が最も効果的であるとの知

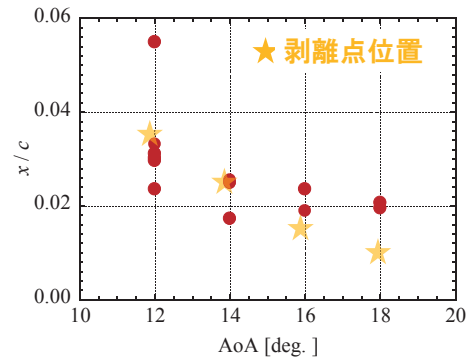


図4 NACA0015 翼の各迎角における剥離点 (星印) とプラズマアクチュエータの最適な位置 (丸印)

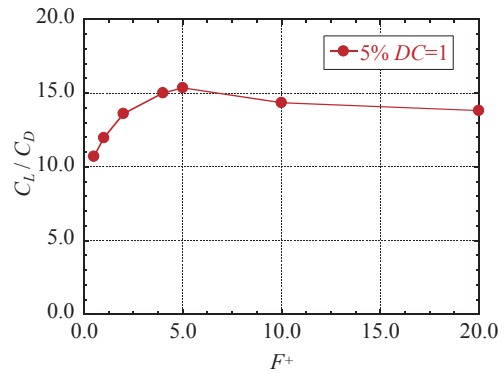


図5 周波数の効果(NACA0015, 5%位置 プラズマアクチュエータ, $Dc=1$)

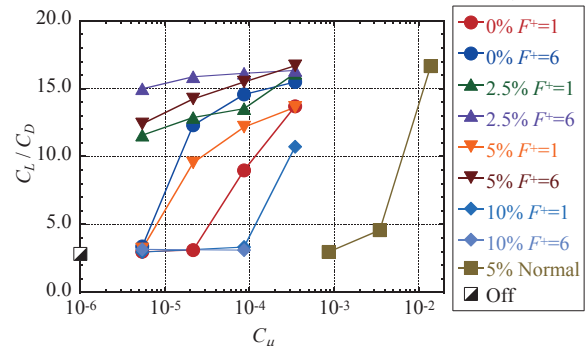


図6 投入運動量の変化に対する効果 (NACA0015)

見が得られた。上記の最適な周波数は、剥離剪断層の線形不安定周波数の 1/2 ないし 1/3 の周波数に相当する^{8,12)}。これは初期に制御入力周波数の 2-3 倍ハーモニクスを線形不安定で十分に成長させ、遷移位置付近で制御入力周波数の渦のペアリングを促進させることで、主流からの運動量を境界層内に引きこみ剥離を抑制するためである。

3.3 投入運動量の大きさに関する知見

図 6 にノーマルモードとバーストモードの 2 つの特徴的な駆動方法に対して、投入運動量の大きさを変化させた場合の揚抗比の変化を示す。図より、適切なパラメータを用いたバースト波による制御を行うことで、実に一桁以上程度小さい投入運動量でも同様の制御効果を得られることがわかる。本知見は、パラメータを適切に選択することで投入運動量を一桁以上低減可能であることを示している。これは、より制御困難である高動圧、高レイノルズ数、高マッハ数の流れを扱う際に、適切なパラメータを選ぶことが非常に重要であることを示唆している。

4 終わりに

「京」を用いた大規模パラメトリックスタディによって明らかになった知見を簡単に紹介させていただいた。より詳細な議論は、文献^{7,8,12)}を参考にされたい。

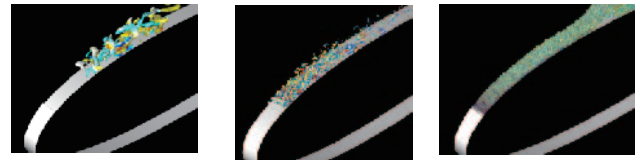
本記事では、低レイノルズ数のパラメトリックスタディを中心に議論させて頂いたが、より高いレイノルズ数の解析 (1-20 億格子点規模の解析) も同時に行ってレイノルズ数効果を調べている (図 7)。これらの解析を現在様々な研究者によって精力的に行われている一連の研究¹⁻⁵⁾に活かすことで、より低速から高速まで、小型から大型までの幅広い流体機器の流体制御の指針を明らかにしていきたい。本分野に関する他の研究は参考文献¹⁻⁵⁾を参照されたい。

謝辞

本研究は HPCI 戦略プログラムの支援を受けた。本論文の一部に東京大学の浅田健吾氏の解析結果を用いた。東京大学の寺本進准教授、宇宙航空研究開発機構の河合宗司博士に貴重なコメントを頂いた。ここに記して謝意を表する。

引用文献

1) 藤井孝藏, 松野 隆: DBD プラズマアクチュエータ - バリア放電を利用した新しい流体制御技術, 日本機械学会流体工学部門ニューズレター流れ 2007 年 12 月号 (2007), 1-12.



低レイノルズ数: (10)⁴ 中レイノルズ数: (10)⁵ 高レイノルズ数: (10)⁶

図 7 レイノルズ数の変化による流れ場 (渦構造) の変化 (NACA0015)

- 2) Corke, T. C., Enloe, C. L., Wilkinson, SP: Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators for Flow Control, Annual Review of Fluid Mechanics, 42 (2010), 505-529.
- 3) 深淵康二, 山田俊輔, 石川仁: プラズマアクチュエータの基礎と研究動向, ながれ, 29(2010), 243-250.
- 4) 瀬川武彦, 小方聡, 武川信也: DBD プラズマアクチュエータへの入力電圧波形が誘起噴流の流動特性に与える影響, ながれ, 29 (2010), 251-258.
- 5) 松野隆: プラズマアクチュエータを用いた剥離制御, 日本機械学会誌, 115(2012), 692-696.
- 6) 藤井孝藏, 浅田健吾: DBD プラズマアクチュエータによる翼剥離制御メカニズム - バースト波解析が語るもの -, ながれ, 29 (2010), 259-270.
- 7) 佐藤允, 岡田浩一, 青野光, 野々村拓, 藤井孝藏: DBD プラズマアクチュエータを用いた翼剥離制御に関する大規模パラメトリックスタディ, 第 26 回数値流体力学シンポジウム, D10-1, (2012).
- 8) 佐藤允, 岡田浩一, 阿部圭晃, 青野光, 野々村拓, 藤井孝藏: DBD プラズマアクチュエータを用いた翼剥離流れ制御の非定常流れ場解析, 第 26 回数値流体力学シンポジウム, D10-3, (2012).
- 9) 青野光, 野々村拓, 藤井孝藏: DBD プラズマアクチュエータモデルを用いた静止気体中における誘起流れの数値解析, 第 90 回日本機械学会流体工学部門会講演集, 252, (2012).
- 10) Nishida, H., Nonomura T. and Abe, T.: Numerical Analysis on Three-dimensional Body Force Field of DBD Plasma Actuator, AIAA paper 2012-3092, (2012).
- 11) Greenblatt, D. and Wygnanski, I. J.: The Control of Flow Separation by Periodic Excitation, Progress in Aerospace Sciences, 36 (2000), 487-545.
- 12) Nonomura, T., Aono, H., Sato, M., Yakeno, A., Okada, K., Abe Y. and Fujii, K.: Control Mechanism of Plasma Actuator for Separated Flow around NACA0015 at Reynolds Number 63,000 - Separation Bubble Related Mechanisms -, AIAA Paper 2013-0853, (2013).