



小特集 プラズマアクチュエータの動向

3. 基礎的な流れ場に対する実験的・数値的研究

3. Experimental and Numerical Studies for Fundamental Flow Fields

深 湯 康 二¹⁾, 青 野 光^{2,3)}, 藤 井 孝 藏^{2,3)}, 山 田 俊 輔⁴⁾, 石 川 仁³⁾, 松 野 隆⁵⁾
 FUKAGATA Koji¹⁾, AONO Hikaru^{2,3)}, FUJII Kozo^{2,3)}, YAMADA Shunsuke⁴⁾,
 ISHIKAWA Hitoshi³⁾ and MATSUNO Takashi⁵⁾

¹⁾慶應義塾大学, ²⁾宇宙航空研究開発機構, ³⁾東京理科大学, ⁴⁾防衛大学校, ⁵⁾鳥取大学

(原稿受付: 2015年7月10日)

流れの制御手法の開発を効率的に進めるために必要な普遍的な知識を得るためには, 単一翼面や単一円柱の周りの流れ等の基礎的な流れ場に対して制御効果およびその物理を理解することが極めて重要である. 本章では, これらいくつかの基礎的な流れ場に対するプラズマアクチュエータを用いた制御に関する実験的研究および数値的研究について紹介する.

Keywords:

flow control, plasma actuator, airfoil, flat plate, circular cylinder, boundary layer, experiment, numerical simulation

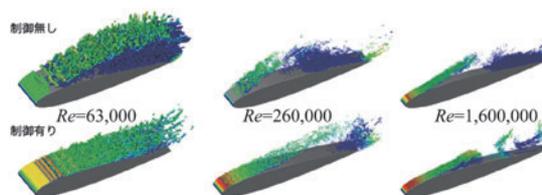
3.1 翼周り流れにおける剥離抑制

翼周りの流れは, 翼と気流がなす角度(迎え角)が大きくなると剥離する. 一定値以上の迎え角になると翼前縁から大規模な剥離が起き, 揚力が急激に低下し, 空気が振動する. このような状態は失速と呼ばれ, 流体・輸送機器が作動する上で好ましくない. この状態を改善するためにプラズマアクチュエータを用いた流体制御の取り組みを進めてきた. プラズマアクチュエータは, 定常型のジェット発生装置とは異なり, 局所的な流動を剥離せん断層に加えることで流れを制御する. 翼周り流れにおける剥離制御では流れ場の特性を上手く用いることでプラズマアクチュエータを連続的に駆動させた場合より間欠的な駆動(バースト駆動)をさせた場合に高い制御効果が得られると報告されている[1, 2]. ここでは, 前縁剥離した失速状態のNACA0015翼周り流れを制御対象とし, バースト駆動時のプラズマアクチュエータによる剥離抑制についての数値計算の結果[1, 3-6]について紹介する.

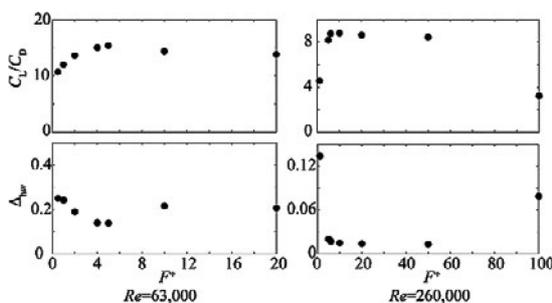
流れは翼弦長と一様流速に基づくレイノルズ数(Re数)で 10^4 の後半から 10^6 の前半までを対象とし, 駆動周波数は翼弦長と一様流速に基づくバースト周波数(F^+)で $O(10^0) \sim O(10^2)$ を選んだ. 数値解析の空間離散化には有限差分法, 計算手法としては6次精度のコンパクトスキームを適用し, 高精度・高解像度のラージ・エディ・シミュレーション(LES)を行う. 更に, プラズマアクチュエータの誘起する微小変動は体積力項として支配方程式に加える. このモデル化については, 一連の計算と実験の比較により一定の妥当性を確認している[1, 7]. 詳細な数値計算の手法などは文献を参考にいただきたい[1, 3-7].

これらの数値解析は京コンピュータの3,000から16,000コアを用いて実施した.

図1(a)は数値計算で得た各Re数における流れの瞬時場を示す. 等値面は速度勾配テンソルの第二不変量であり, 翼弦方向速度によって色付けした. 上段は無制御時, 下段は制御時の流れである. 制御時の結果は制御効果が最も高かった条件のものである[1, 3-5]. 無制御時, Re数が 10^4



(a) 各レイノルズ数領域での翼周りの瞬時流れ場の比較: 左図($Re = 63,000, \alpha = 12^\circ$), 中図($Re = 260,000, \alpha = 18.8^\circ$), 右図($Re = 1,600,000, \alpha = 20.11^\circ$) [1, 3-6].



(b) 揚抗比(上段), 半値幅(下段), 駆動周波数(F^+)の関係 [1-3].

図1 プラズマアクチュエータを用いた, 翼周りの流れにおける剥離抑制の数値シミュレーション [1, 3-6].

と 10^5 では前縁付近から大規模剥離するが、Re 数が 10^6 では前縁からでなく約14%翼弦位置において大規模剥離する。Re 数が 10^4 と 10^5 では剥離せん断層で流れが層流から乱流へと遷移するため、より下流側で乱流剥離せん断層が形成される。一方、Re 数が 10^6 では大規模剥離前に既に乱流遷移しているため乱流状態で剥離する。制御時、Re 数が 10^4 と 10^5 ではスパン方向に軸をもつ渦の放出とその渦の崩壊が翼上面付近でみられる。流れが乱流に遷移した後、細かな渦が生成され、これらが流れの再付着とその維持に寄与する。Re 数 10^5 では再付着後再び剥離するのに対して、Re 数 10^4 では後縁付近まで翼に沿って流れており、制御によって剥離がほぼ抑制されていることがわかる。一方、Re 数が 10^6 では制御により乱流剥離位置が下流側へ移動するが、剥離後の明確な再付着はみられない。このように Re 数によって制御後の流れ場が変化するため、空力性能への効果も Re 数によって異なる。シミュレーション結果から揚抗比でいえば無制御時に比べて数パーセントから最大で8倍の増加を達成できることがわかった。それらは複数の剥離制御メカニズムが同時に存在するプラズマアクチュエータの長所に寄るところが大きい。本章では、その中から低・中 Re 数領域、高 Re 数で効果的な流体制御メカニズムを取り上げる。今までの成果より、低・中 Re 数では比較的高周波のバースト駆動により乱流遷移を促すことが剥離制御に効果的であると明らかになっている。図1(b)の揚抗比(上段)とせん断層内での乱流運動エネルギー(TKE)の分布のピークの半値幅(下段)のバースト周波数に対する関係より、高い揚抗比のケースではTKEのピークの半値幅は小さくなる。このピークの半値幅が小さいことは迅速な乱流遷移を促すことに一致すると考えられ、迅速な乱流遷移を促すことが高い制御効果を得るために最も効果的とわかった。ただし、他の剥離制御メカニズムも同時に存在しており、議論には注意が必要である[1,6]。一方で、高 Re 数領域における効果的な制御には、低・中 Re 数とは異なり、乱流剥離せん断層における大規模な渦構造を利用する低周波のバースト駆動が有効であるとわかっており、このように幅広い Re 数に対する流体制御デバイス設計に活きる知見が得られている。

以上、翼周りの剥離制御について、特にその性能向上と関連する流体现象を紹介した。現在、プラズマアクチュエータによる流体制御技術は性能を向上させるだけでなく、今後の流体・輸送機器設計の概念を変える可能性を示す取り組みも進めている[8]。(青野 光, 藤井孝藏)

3.2 厚みのある平板翼後流の制御

前述のような流線型の翼形状に対し、翼の先端(前縁)から下流の後端(後縁)まで厚みをもった平板翼形状の流れに対し、プラズマアクチュエータによる流れの制御を実施した。端板で支持した平板翼を制御した場合、翼後流での三次元的な渦構造の形成が報告されている[9]。そこで平板翼後流にプラズマアクチュエータを連続的に駆動させて渦を誘起し、平板翼後流の逆流域の縮小を試みた。

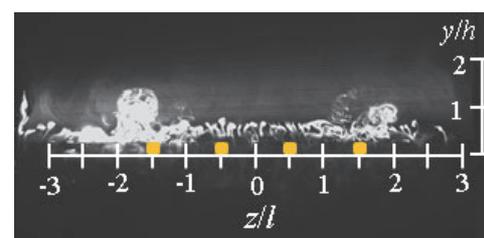
プラズマアクチュエータ(PA)は3.1節とは異なり、電

極を主流に対し流れ方向に平行に配置し、平板翼上面のスパン方向(z 軸方向)に4つのプラズマアクチュエータを配置した。これにより、図2((a)PA off, (b)PA on)のような縦渦(主流方向を回転軸とした渦)を発生させた($Re=2.0 \times 10^3$) [10]。この縦渦は、主流の運動量を平板翼中心方向へ輸送させ、平板翼後流の流れ構造を変化させる。図2(b)よりPA onの縦渦は、互いに回転方向が異なる縦渦が対となり、 $z/l=0, \pm 1.0, \pm 2.0$ の電極間を中心に形成される。縦渦対から誘起される流れを考えると、 $z/l=0, \pm 1.0, \pm 2.0$ では y 軸の正方向へ向かう流れ(Upwash)が、並びに $z/l=\pm 0.5, \pm 1.5, \pm 2.5$ では y 軸の負方向へ向かう流れ(Downwash)が誘起される[11]。過去の三角翼を用いて縦渦対を誘起させた研究(Vortex Generator)では、境界層厚さの2.4倍程度に離してVortex Generatorをスパン方向に配置した場合に、はく離の抑制に最も効果的であることが報告されている[12]。本手法のPAの間隔は、2.7倍(PA間隔 l が25mm)の時に、後流における逆流域の縮小効果が最も高く、上記の数値と概ね一致する[13]。したがって、後流の縮小効果には最適な電極間距離が存在し、プラズマアクチュエータ配置の重要なパラメータと考えられる。また、プラズマアクチュエータによるはく離制御では、周期的な吹き出しによりPA offに対し、全圧損失係数を50%改善させた[14]。周期的な吹き出しは、プラズマアクチュエータの消費電力を低減でき、はく離により形成される周期的な流れの挙動と対応したジェットを誘起すれば、平板翼後流に対してプラズマアクチュエータの駆動効率を向上させた流れの制御が可能と考えられる。

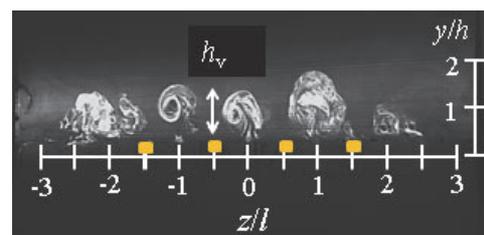
(山田俊輔, 石川 仁)

3.3 円柱周り流れにおける渦放出抑制

円柱周りの流れは、流線形ではない「鈍頭物体」の周り



(a) PA off



(b) PA on

図2 ボルテックス・ジェネレータ型プラズマアクチュエータによって厚みのある平板翼後流に誘起される流れの構造[10]。

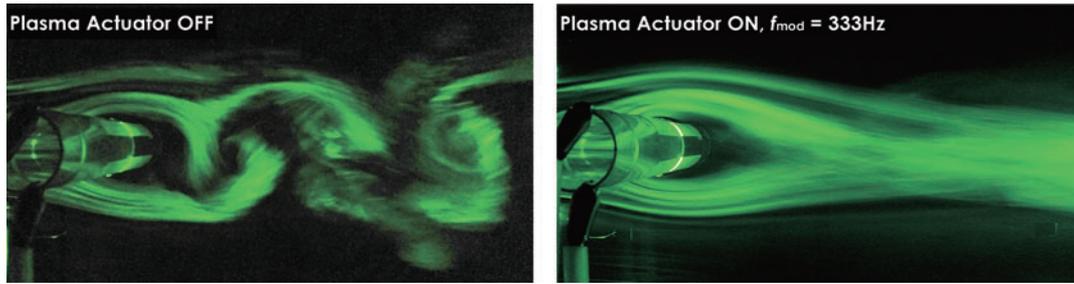


図3 円柱周り流れの渦放出抑制の実験的研究[17].

の流れのうち最も基本的な流れである。円柱の直径を D 、流速を U 、動粘性係数を ν として Re 数 $Re = UD/\nu$ を定義すると、 Re 数が約50を超えると、円柱の上下で流れが交互に剥離し規則的に渦が放出される、二次元的な渦放出が始まり、円柱の後方にはいわゆるカルマン渦列が生成される。また Re 数が約200を超えると、渦放出が三次元的となり、さらに 10^5 のオーダーを超えると円柱上に形成される境界層が乱流に遷移する[15]。このカルマン渦放出は産業機器の振動や騒音の原因となっており、さらに流体構造連成も考えた場合にはカルマン渦とは異なる渦放出も大きな問題となることがあり、いわゆるインライン自励振動が原因とされている高速増殖炉「もんじゅ」の事故も記憶に新しい[16]。このような背景から、プラズマアクチュエータを用いた渦放出抑制の研究がなされている。

図3は一樣流速 $U = 10$ m/s の流れの中にある $D = 60$ mm の円柱の上下の前方よどみ点から85度および120度の位置にDBDプラズマアクチュエータ(PA)を取り付け、PAを動作させない場合(Plasma Actuator OFF)とさせた場合(ON)の、煙を用いた可視化の比較である[17]。このときの Re 数は $Re = 4.0 \times 10^4$ であり、PAが誘起する速度は主流の15%程度である。なお、本実験では、プラズマアクチュエータ動作時には流れに対して高速(333 Hz)でON/OFFのスイッチングを行う間欠駆動を与えた。図から、Plasma OFFの場合には剥離領域が広く、円柱後方の上下に渦放出が観察されるが、Plasma ONの場合に剥離領域が狭くなり、渦放出も抑制されることがわかる。

図4は直接数値シミュレーション(DNS)によって得られた、 $Re = 1000$ の場合の円柱後方の渦の可視化である[18]。プラズマアクチュエータによる制御が無い場合(図4(a))には、円柱表面における剥離によって発生した二次元的な横渦がすぐに三次元化し、縦渦を伴って非常に複雑に発達する様子が見られる。しかし、円柱表面での剥離は二次元性の強いものであり、これによって大きな揚力の変動が起こる。これにプラズマアクチュエータを適用した場合(図4(b))には、円柱の直下流における渦放出が弱められ、可視化では認識できない。

図5には同じDNSで得られた、平均抗力係数 $\overline{C_D}$ および揚力係数変動 C'_L の、プラズマアクチュエータ強度の依存性を示している。ここに k_3 は、プラズマアクチュエータ強度のパラメータであり、 $k_3 = 1.0$ で主流速度の約30%の誘起流速が得られる。これより、制御無しの場合と比べ、スパン方向(円柱の長手方向)に一樣にプラズマアクチュエ

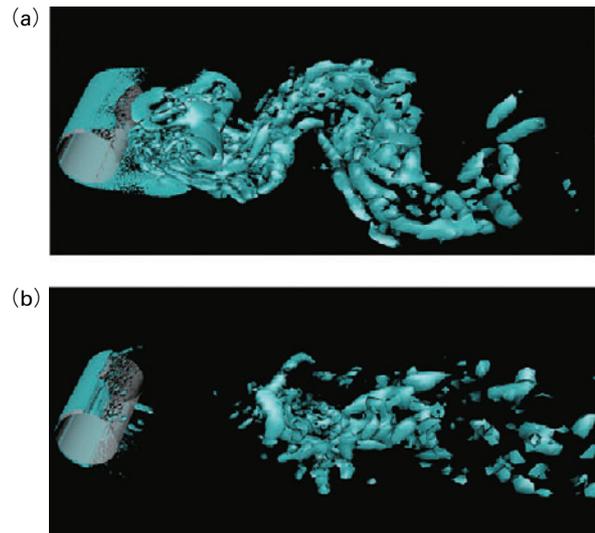
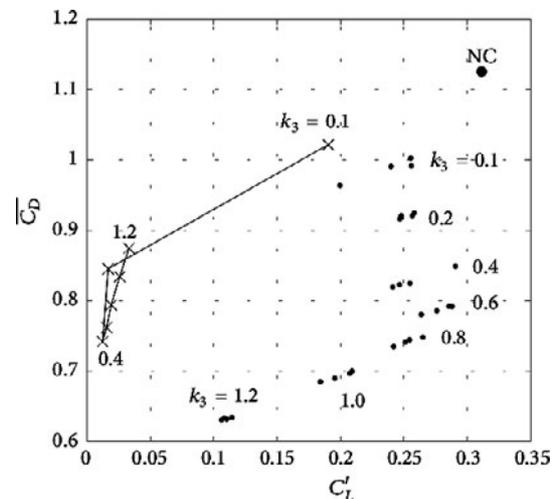


図4 円柱周り流れの直接数値シミュレーション(DNS)による渦の可視化[18]。(a)制御なし、(b)スパン方向に間隔を空けたプラズマアクチュエータによる制御。

図5 円柱周り流れのDNSによる平均抗力係数 $\overline{C_D}$ および揚力係数変動 C'_L のPA強度 (k_3) 依存性[18]。NC:制御なし、●:スパン方向に一樣なプラズマアクチュエータの場合、×:スパン方向に間隔を空けたプラズマアクチュエータの場合。

ータを適用した場合には、流れが円柱表面上に押し付けられて剥離が遅延することによってまず抗力が、次いで揚力変動が低下する。逆に、スパン方向に一定の間隔を空けたプラズマアクチュエータを適用した場合には、渦放出の三次元化を促進することによって揚力変動が激減し、抗力も低

下する。このように、プラズマアクチュエータを一様に配置した場合とスパン方向に間隔を空けて配置した場合には、異なるメカニズムによって平均揚力および揚力変動の低減が達成されることがわかった。(深湯康二, 松野 隆)

3.4 乱流境界層における摩擦抵抗低減

乱流境界層の摩擦抵抗は航空機や高速鉄道車両では全空力抵抗のうち約半分を占めており、これを低減させることができれば大きな省エネルギー効果が期待できる。今までに様々なアクティブ制御手法が考案され、理論的あるいは実験室レベルでの乱流摩擦抵抗低減は確認されているが、微細かつ効率的なアクチュエータの開発が実用化に向けての大きな課題である[19]。

そのアクチュエータとしてプラズマアクチュエータの利用も検討されている。図6は壁垂直方向に噴流を誘起するような対向型のプラズマアクチュエータを用いたチャンネル乱流の摩擦抵抗低減のDNSにおける渦構造である[20]。制御なしの場合には壁面近傍にいわゆる縦渦構造が密集しており、これが乱流における摩擦抵抗増大の原因となっている。対向型プラズマアクチュエータを用いて制御を行った場合にはこの縦渦が減少し、代わりに壁面近傍に横渦が発生する。この横渦がローラーの役割をすることで、最大37%の摩擦抵抗低減効果が得られた。しかしながらこの制御では、アクチュエータ効率を100%と仮定した場合でも正味の動力削減は得られないという結果が得られており、今後より効率の高い制御手法の開発が望まれる。(深湯康二)

参考文献

- [1] M. Sato *et al.*, AIAA J. **53**, 9 (2015).
- [2] T.C. Corke *et al.*, AIAA Paper 2004-2127 (2004).
- [3] T. Nonomura *et al.*, AIAA Paper 2013-0853 (2013).
- [4] H. Aono *et al.*, AIAA Paper 2014-0766 (2014).
- [5] M. Sato *et al.*, AIAA Paper 2014-2663 (2014).
- [6] K. Fujii, Phil. Trans. R. Soc. A. **2014** 372 (2014).
- [7] H. Aono *et al.*, Mech. Eng. J. **2**, 4 (2014).
- [8] 藤井孝藏：輸送機器・流体機器の流体制御による革新的高効率化・低騒音化の実現, <http://flab.eng.isas.jaxa.jp/fddi/>
- [9] 佐々木荘一他：ながれ **22**, 325 (2003).

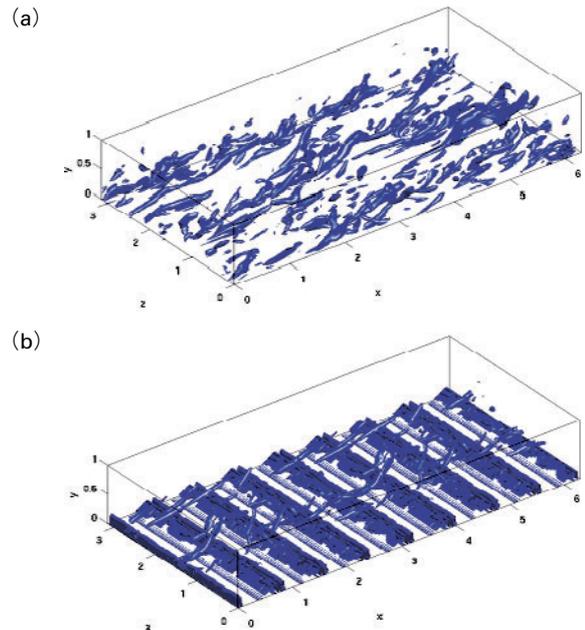


図6 対向型PAを用いたチャンネル乱流の摩擦抵抗低減のDNSにおける渦構造[20] (a)制御なし, (b)制御あり。

- [10] 山田俊輔他：ながれ **31**, 517 (2012).
- [11] R.D. Mehta and P. Bradshaw, J. Fluid Mech. **188**, 529 (1988).
- [12] G. Gorard and M. Stanislas, Aerosp. Sci. Technol. **10**, 181 (2006).
- [13] 山田俊輔他：ながれ **32**, 383-390 (2013).
- [14] P.D. Rizzetta and R.M. Visbal, J. Fluids Eng. **130**, 041104 (2008).
- [15] M.M. Zdravkovich, Flow Around a Circular Cylinders: Fundamentals (Oxford University Press, Oxford, 1997), Vol. 1.
- [16] 岩田耕司他：動力炉・核燃料開発事業団公開資料, PNC TN9410 97-017 (1997).
- [17] 松野隆：日本機械学会誌 **115**, 692 (2012).
- [18] T. Igarashi *et al.*, Math. Probl. Eng. **2014**, 591807 (2014).
- [19] N. Kasagi *et al.*, Annu. Rev. Fluid Mech. **41**, 231 (2009).
- [20] Y. Murai and K. Fukagata, Proc. AJK2011, Paper AJK 2011-25008 (2011).