

[共同研究成果]

# プラズマアクチュエータによる角部剥離流れ制御の性能向上に向けて

## — 第 2 報 —

浅田 健吾：東京理科大学工学部情報工学科  
渡部 航太朗：東京理科大学工学部情報工学科  
藤井 孝藏：東京理科大学工学部情報工学科  
立川 智章：東京理科大学工学部情報工学科

### 1. はじめに

近年，流体制御デバイスとして誘電バリア放電（Dielectric Barrier Discharge, DBD）を利用した DBD プラズマアクチュエータ（以下 PA）[1, 2]が注目を集め，国内外で多くの研究が行われている．PA は，流れに局所的な流体変動を与えることで周囲の大きな流れを制御するマイクロ流体制御デバイスで，2 枚の電極とそれに挟まれた誘電体からなる単純な構造を持つ（図 1）．電極間に高電圧の交流電圧を印加することでプラズマを生成，非定常な流体変動を誘起する．数百マイクロメートルと非常に薄く，取り付けによる流体機器形状への影響が小さいために既存システムへの導入が容易である．また，印加電圧の ON/OFF に対して瞬時に応答する点，機械的な駆動部を持たない，消費電力が少ないなど多数の利点を有する．

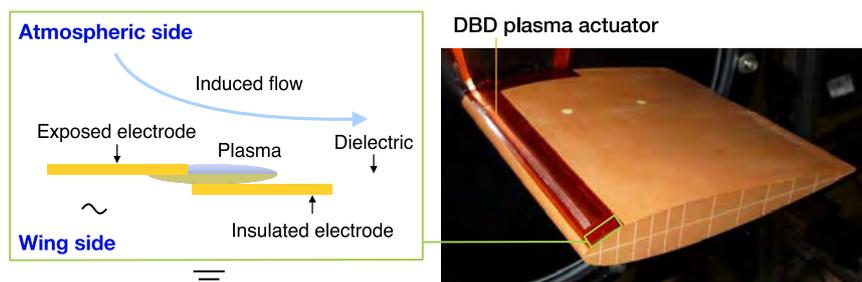


図 1: DBD プラズマアクチュエータの構造と翼型への設置例

これまで PA の研究は航空工学分野を中心に広まってきたことから，主に航空機の翼のような所謂流線型物体周りの流れを対象とするものが多く [3-12]，自動車 [13-15] を対象とした研究もなされているものの，直角な角部で発生する流れの剥離を制御する研究は多くはなかった．そこで筆者らはトンネルの換気に使われるような大型のダクトを想定した曲がり管流れを対象に，角部で大きく剥離する流れの制御を試みた [16]．この研究では PA 単体で剥離流れを制御することが難しかったために PA に加え半円柱形状物体を物体角部に付加する方法を提案し，その有効性を示した [17]．本研究では，ダクトのような内部流れで効果が得られた提案手法の適用範囲を拡大させ，外部流れにおいても有効であるかを検証する．具体的には簡易自動車モデルである Ahmed model [18] 周りの流れに提案手法を適用し，車体周りの剥離抑制および抵抗低減効果を評価する．

## 2. 問題設定と計算条件

### 2.1 簡易自動車モデル形状

図2に Ahmed model の形状を示す。Ahmed model は簡略化した自動車モデルであり、これまで多くの実験とシミュレーションが行われている。Ahmed model は丸まった先頭部分、長い胴体部分、斜めに切り落とされたスラント部分、垂直な後端部分からなる。自動車モデルとしては単純な構造であるが、その単純さに反して後流は図3に示されるように、スラント部前縁からの剥離流れ、C-pillar と呼ばれる側面とスラント部の境目から発生する C-pillar 渦、車と床の間から巻き上げる流れが混ざり合う複雑な流れとなることが知られている。

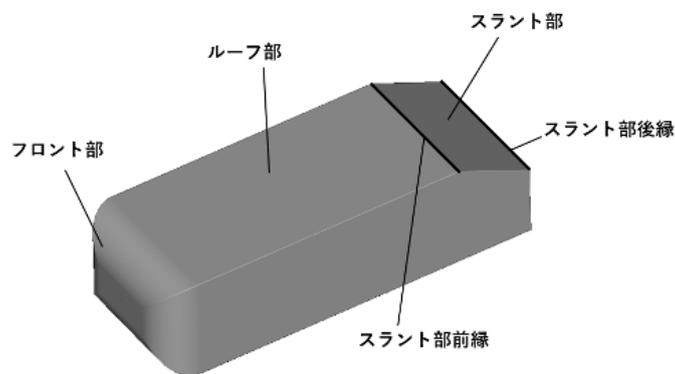


図2: Ahmed model の形状と各部の名称

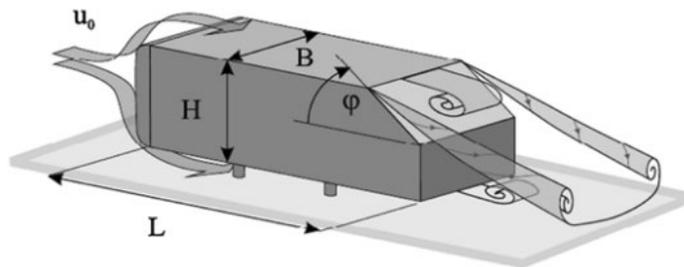


図3: Ahmed model 周りの流れ[18]

Ahmed model の形状と各種パラメータの関係を図4に、形状パラメータを表1に示す。Ahmed model の高さや幅、長さについてのパラメータは、盛んに研究されている形状[19]で使われた値とした。スラント部の角度は35度とする。このスラント角度は、流れがスラント部で再付着することなく剥離する条件である。スラント部の角度が30度より大きい場合、C-pillar 渦は発生せず、大規模な剥離領域が形成される。

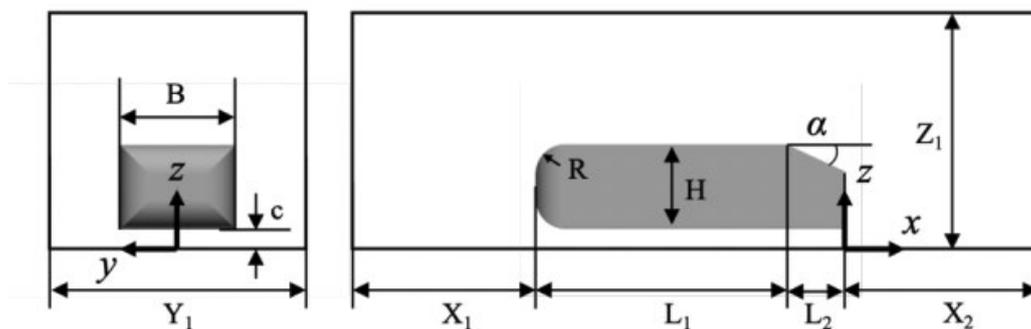


図 4: Ahmed model の形状と各種パラメータ

表 1: Ahmed model の形状パラメータ

$H$	288[mm]
$\alpha$	35 度
$L_1/H$	2.994
$L_2/H$	0.631
$(L_1 + L_2)/H$	3.625
$B/H$	1.35
$R/H$	0.347
$c/H$	0.174

本研究では PA の制御効果強化を狙い、円柱を切り落とした形状の半円柱物体をスラント部前縁に設置した。設置する前の自動車モデルの形状を図 5 に、半円柱物体を設置後の形状を図 6 に示す。半円柱物体の車に接する斜辺の長さは  $0.075H$  とした。



図 5: スラント部形状



図 6: 半円柱物体が設置されたスラント部形状

## 2.2 計算条件

自動車モデルに半円柱物体を取り付け、更なるその表面に PA を設置した際の位置関係を図 7 に

示す. PA はスラント部前縁( $x = 2.994$ )からやや下流の位置に設置した. 半円柱物体を設置しないケースでは, PA の設置位置を $x = 3.003$ (“Base+DownstreamPA”)とした. 半円柱物体を設置したケース (“Cylinder”) では剥離点の位置が $x = 3.008$ であることから, その少し上流の位置( $x = 3.004$ )に PA を設置したケース (“Cylinder+UpstreamPA”) と, 少し下流の位置( $x = 3.018$ )に PA を設置したケース (“Cylinder+DownstreamPA”)を考えた. PA による誘起流の方向は主流方向とし, 誘起流の強さは, 実験で容易に再現可能な $Dc = 0.035$ と, PA の影響が顕著に現れる強力な $Dc = 0.35$ の2通りとした. 後者の強さは現実の PA よりも強力だが, PA の影響が顕著に現れるケースとして設定した.

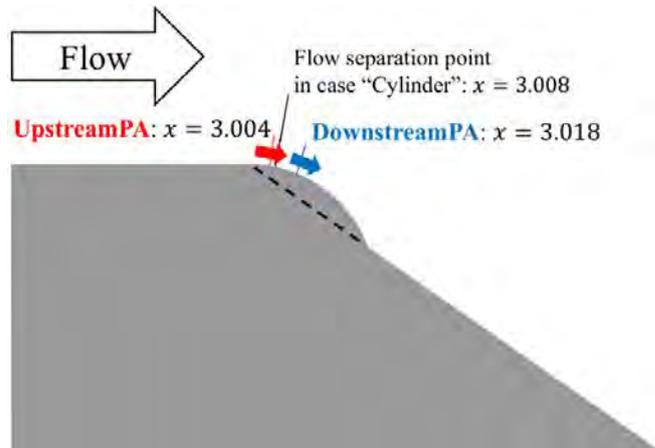


図 7: 簡易自動車モデルに設置された半円柱物体と PA

表 2 に計算ケースを示す. Ahmed model の元形状を”Base”, そこに半円柱物体を設置した形状を”Cylinder”と呼ぶ. PA を設置しないケースの剥離点位置を基準に, PA の設置位置を”Upstream”または”Downstream”とする. ただし, ”Base”と”Cylinder”で剥離点位置がそれぞれ異なるため, ”Base+DownstreamPA”と”Cylinder+DownstreamPA”における PA の設置位置が異なることに注意が必要である. PA の駆動方法は連続駆動とした.

表 2 簡易自動車モデルの計算ケース

Case	半円柱物体の有無	PA の位置	PA の強さ( $D_c$ )
Base	No	-	-
Base+DownstreamPA	No	Downstream ( $x = 3.003$ )	0.035
Base+DownstreamPA_Strong	No	Downstream ( $x = 3.003$ )	0.35
Cylinder	Yes	-	-
Cylinder+UpstreamPA	Yes	Upstream ( $x = 3.004$ )	0.035
Cylinder+UpstreamPA_Strong	Yes	Upstream ( $x = 3.004$ )	0.35
Cylinder+DownstreamPA	Yes	Downstream ( $x = 3.018$ )	0.035

### 2.3 プラズマアクチュエータのモデル化

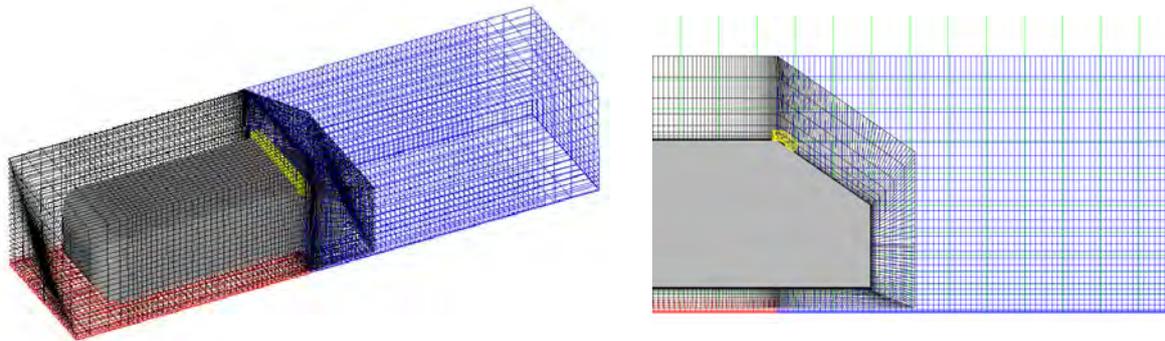
PA の流体計算への導入は支配方程式に PA を模擬した体積力項を導入することで行う. PA の体積力モデルはいくつか提案されているが, ここでは Suzen と Huang ら[20]の定常体積モデル (以下 Suzen モデル) を非定常に拡張した体積モデルを用いる. モデルの数値計算への導入方法の詳細, その信頼性, および数値計算の妥当性については既出論文を参照されたい[21, 22]. PA の駆動は連続駆動とし, 周波数は代表速度と代表長さを基準とした無次元周波数で 60 である.

## 2.4 計算手法

3次元圧縮性 Navier-Stokes 方程式を支配方程式とし、空間の離散化には6次精度コンパクト差分法を用いた。フィルター係数は $\alpha_f = 0.48$ とした。時間積分には内部反復を5回行う ADI-SGS 陰解法を用いた。一様流とモデル高さ $H$ 基準のレイノルズ数は文献[23, 24]に合わせ、 $Re_H = 2.0 \times 10^5$ とした。マッハ数は計算効率を考慮し実際よりも高い0.2とした。比熱比は $\gamma = 1.4$ 、プラントル数は $Pr = 0.72$ 、計算に用いた無次元時間刻み幅は $5.0 \times 10^{-4}$ とした。また、本研究では陽的なサブグリッドスケールモデルを用いない Implicit LES を採用した。

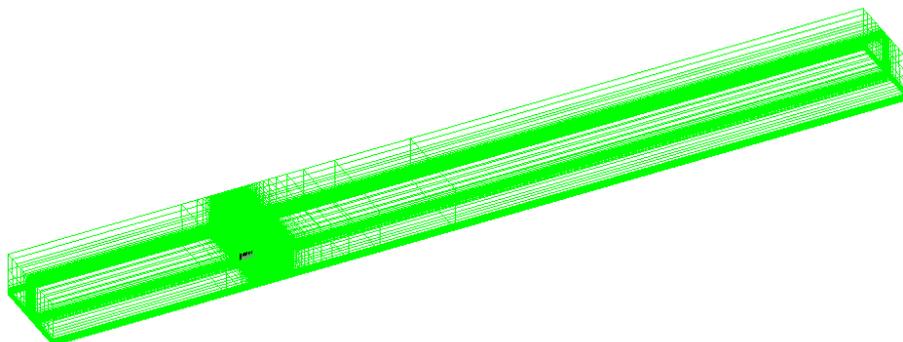
## 2.5 計算格子と境界条件

図8に計算格子を示す。計算格子は車周りの境界層を解像する Zone1 (黒色)、車と床の間の領域の Zone2 (赤色)、後流を解像する Zone3 (青色)、外部領域の Zone4 (緑色)、半円柱物体近傍の境界層を解像する Zone5 (黄色) の計5ゾーンから構成される総格子点数は約6億点である。計算領域の大きさはMenterら[24]の計算領域を参考とした。物体表面および計算領域の底面は滑りなし壁面条件、計算領域上面は滑り条件とした。計算領域側面はほぼ一様流であるため、格子点数を削減するために周期境界条件とした。初期条件はインパルススタートとした。



(a) 車周辺 (20点毎)

(b) 中央断面 (10点毎)



(c) 計算領域 (5点毎)

図8: 計算格子

## 2.6 計算機に関して

計算機として、東北大サイバーサイエンスセンターのスーパーコンピュータ AOBA のサブシステム AOBA-S を利用した。AOBA-S の1ノードは1個のベクトルホスト (VH) と8個のベクトルエンジン (VE) で構成されており、本計算では24VEを用いた。計算実施のために計算領域を分割し、各VEに割り当てて並列計算を行った。VE内はスレッド並列 (自動並列) とし、各VE間にはMPI通信を行うハイブリッド並列を用いた。1ケース (12万ステップ) の計算時間は約52時間である。

### 3. 計算結果

#### 3.1 計算結果の信頼性

計算結果の信頼性を確認するために、時間平均流れ場から求めた抵抗係数値を先行研究[18, 25, 26]の値と比較する。表 3 に結果をまとめた。表の抵抗係数は全てスラント角度が 35 度の結果である。本計算での抵抗係数の評価は流れ場が十分収束したとみなせる 30 万ステップから 42 万ステップまでの区間を用いて行った。本研究の半円柱物体や PA を設置しない Ahmed model 単体のケース (Base ケース) の抵抗係数は 0.307 であった。この値は Guilmineau と Liu らの値の間に収まっており、本研究の計算結果は妥当であると考えられる。

表 3 先行研究の抵抗係数との比較 (スラント角度 35 度)

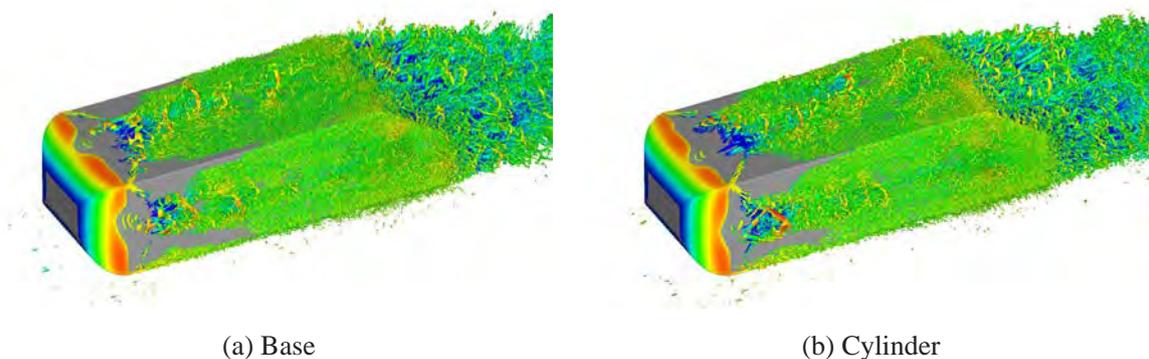
Case	Method	$Re_H$	$C_d$
Ahmed et al. [18]	Exp.	$1.20 \times 10^6$	0.26
Guilmineau [25]	Sim.	$7.68 \times 10^5$	0.27
<b>Present study (“Base” case)</b>	Sim.	$2.00 \times 10^5$	0.307
Liu et al. [26]	Exp.	$1.44 \times 10^5$	0.32

#### 3.2 瞬間流れ場

図 9 に代表的な計算ケースの瞬間場を示す。等値面は速度勾配テンソルの第二不変量で、主流速度成分で色付けしている。何れのケースもフロント部から胴体部までの流れに大きな違いはない。図中左下から流入した流れは、フロント部の丸みが終わる付近で側面・上面共に剥離する。そして、胴体の途中で再付着後乱流へと遷移し、次第に乱流境界層が発達していく。

スラント部より後ろの領域に着目すると、(a)Base, (b)Cylinder, (c)Cylinder+UpstreamPA ではいずれもスラント部前縁で流れが大きく剥離しており、スラント部より後ろの流れ場に大きな違いは見られない。この傾向は Base+DownStreamPA, Cylinder+DownstreamPA でも同様である。

一方、(d)Cylinder+UpstreamPA\_Strong は PA の強い誘起流れの影響により、スラント部前縁で流れが加速されており、流れが比較的スラント部に沿って流れるようになっている。剥離領域は縮小し、スラント部後方の流れ場が他のケースと大きく異なっていることがわかる。また、スラント部前縁と側面の間からのびる C-pillar 渦のような縦渦が確認できる。このような現象は、スラント角度 35 度の Ahmed model にシンセティックジェットを適用した Brunn ら[27]でも報告されている。このような流れは Cylinder+DownstreamPA\_Strong にも見られた。



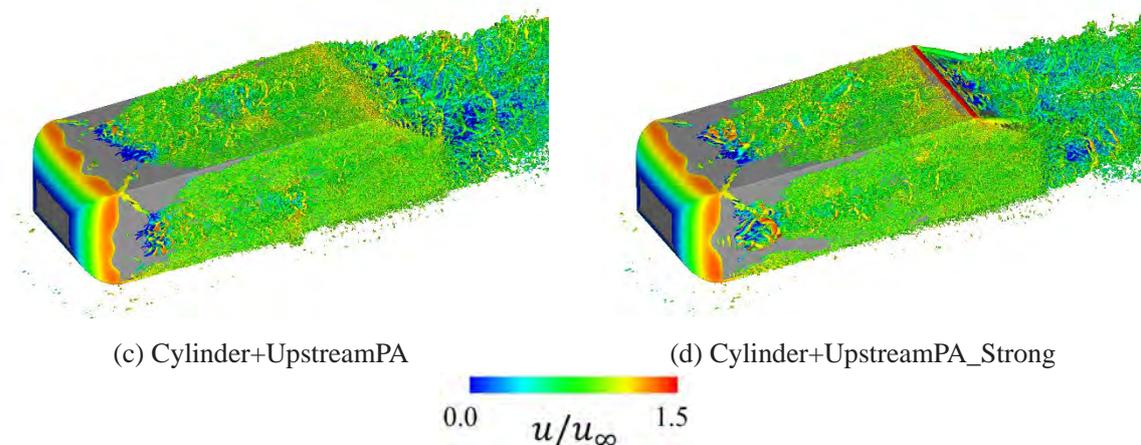


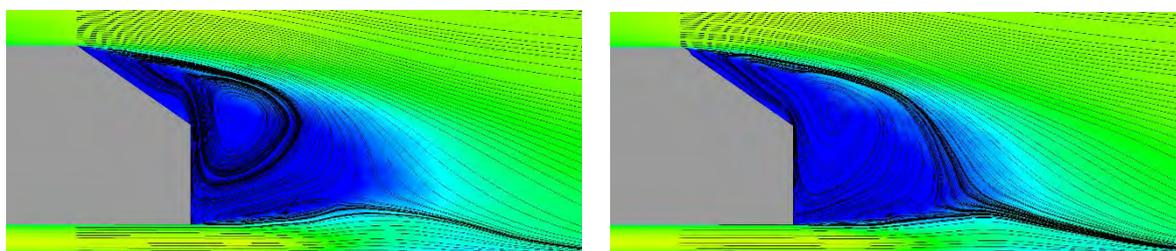
図9 代表的な計算ケースの瞬間場

### 3.3 平均流れ場

半円柱物体の有無，PA の位置，および強さの効果をより詳細に評価するために，図 10 にスラント部中央断面における平均速度場と流線を示す．(a)Base と(b)Cylinder を比較すると，両ケースともに大きな剥離領域が確認されるが，(b)Cylinder では(a)Base に比べて剥離領域がわずかに小さくなっている．

(c)Cylinder+UpstreamPA，(e)Cylinder+DownstreamPA では，(b)Cylinder に比べて剥離領域がさらに縮小していることがわかる．これは，半円柱物体に加え PA を適用したことで，剥離がさらに遅れたためと考えられる．(c)Cylinder+UpstreamPA と(e)Cylinder+DownstreamPA を比較すると半円柱物体のみのケースにおける剥離点よりやや前方に PA を設置する(c)Cylinder+UpstreamPA の剥離領域の方がわずかに小さくなっているが，いずれのケースでも PA を追加することで剥離抑制に一定の効果が生じていると考えられる．

強い誘起流が生じる(d) Cylinder+UpstreamPA\_Strong および(f) Cylinder+DownstreamPA\_Strong では，スラント部前縁で流れが加速されるとともに，スラント部の流れが付着し，剥離領域が非常に小さくなっている．両者を比較すると，(d) Cylinder+UpstreamPA\_Strong ではスラント部の剥離領域が(f) Cylinder+DownstreamPA\_Strong と比較してやや大きくなっている．



(a) Base

(b) Cylinder

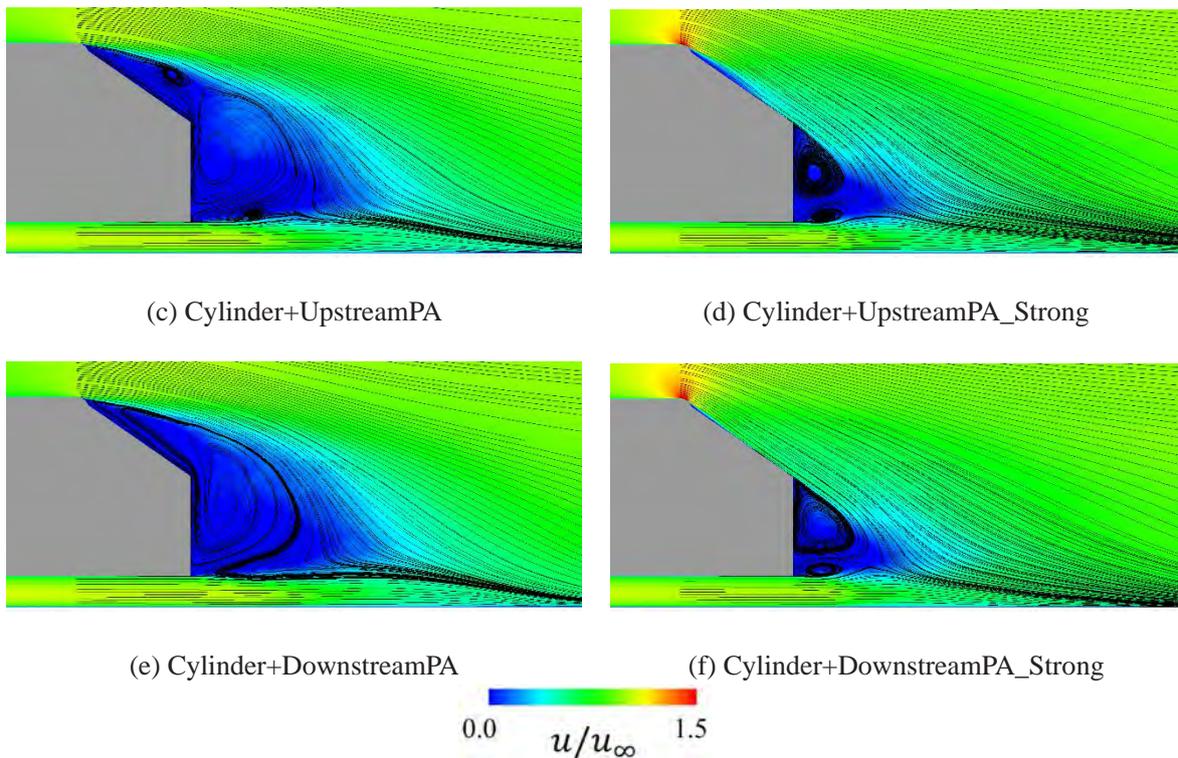
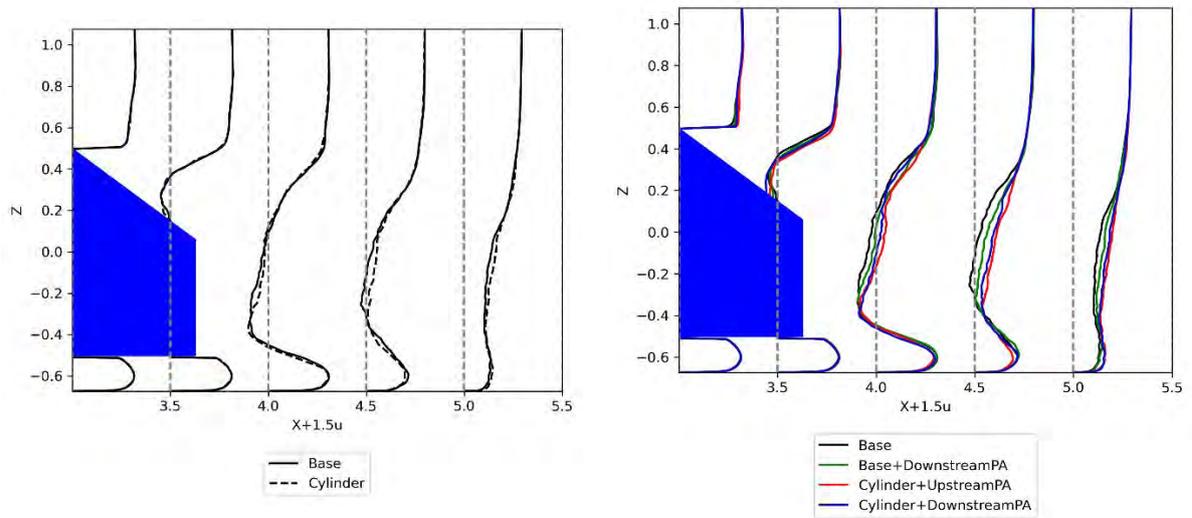


図 10 平均速度場と流線

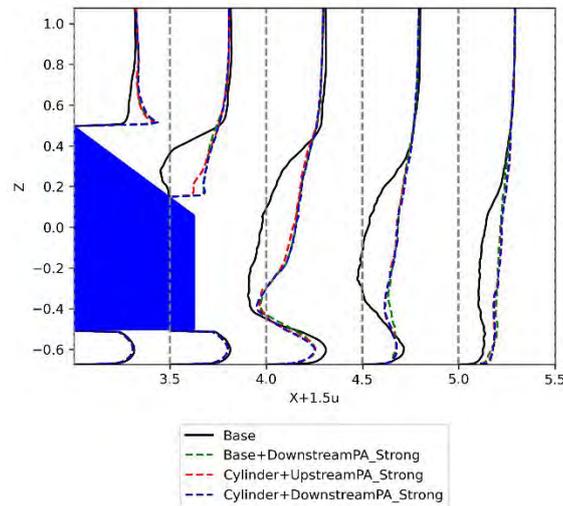
中央断面の各 $x$ 位置における主流方向速度分布を図 11 に示す. 図 11(a)では半円柱物体の設置によりスラント部ではほとんど速度分布の違いは見られないものの, スラント部より後ろの領域において剥離による減速が緩和され, 剥離がわずかに抑制されていることがわかる. 図 11(b)では PA を追加したことにより, 剥離領域は減少し, Base と比べて剥離による減速は緩やかである. また, 半円柱物体なしで PA を追加するだけでも効果が生じていることがわかる. 図 11(c)では PA の誘起流れが大きくなることで剥離による低速領域が減少しているのがわかる.

剥離領域の大きさを, 後流の中で初めて速度が正となる位置を基準として比較する. 各 $x$ 断面で最小の主流方向速度を求め, その値が初めて 0 以上となる $x$ 座標を計測し, モデルの後端からの距離に変換し $L_{sep}$ とする. 結果を表 4 に示す. 半円柱物体のみを設置した場合では剥離領域が 9.59% 減少し, PA のみを設置した場合では 9.97%減少した. 提案手法である半円柱物体と PA の組み合わせでは, 通常の PA で最大 24.9%, 強力な PA で 50.2%剥離領域が減少することが確認された. また, 強力な PA のみでも 55.2%剥離領域が減少していることがわかった.



(a) PA なし

(b) PA あり



(c) PA あり (Strong)

図 11 主流方向速度分布

表 4 剥離領域の後端までの距離

Case	$L_{sep}$	$\Delta L_{sep}$ [%]
Base	0.951	N/A
Base+DownstreamPA	0.860	-9.59
Base+DownstreamPA_Strong	0.426	-55.22
Cylinder	0.856	-9.97
Cylinder+UpstreamPA	0.725	-23.77
Cylinder+UpstreamPA_Strong	0.473	-50.23
Cylinder+DownstreamPA	0.714	-24.92

### 3.4 抵抗係数の比較

最後に各ケースの時間平均流れから求めた抵抗係数を表 5 に示す。 $|\Delta C_d|$  は Base に対する変化率の絶対値である。表から Base+DownstreamPA\_Strong, Cylinder+DownstreamPA\_Strong では抵抗係数が減少した一方で、その他のケースでは抵抗係数が増加していることがわかる。一般に、抵抗係数の減少はエネルギー効率の改善を意味し歓迎されるが、本研究では抵抗係数の変化量の大きさに注目する。強力な PA のケースでは、エネルギー投入量が大きくなるものの、より強い誘起流れが生じるため、抵抗係数の変化量も大きくなることが予想される。しかし、最も抵抗係数の変化量が大きかったケースは Cylinder+UpstreamPA となった。その一方で、Cylinder+UpstreamPA\_Strong は抵抗係数の変化は 0.03% であり、誘起流れは強さと抵抗係数の値の変化の大きさには単純な相関は見られない。この原因として、スラント部前縁と側面の間から生じている C-pillar 渦が影響していることが考えられる。

表 5 抵抗係数の変化

Case	$C_d$	$ \Delta C_d [\%]$
Base	0.3073	
Base+DownstreamPA	0.3124	1.65
Base+DownstreamPA_Strong	0.2945	4.18
Cylinder	0.3156	2.68
Cylinder+UpstreamPA	0.3293	7.15
Cylinder+UpstreamPA_Strong	0.3074	0.03
Cylinder+DownstreamPA	0.3192	3.85

## 4. まとめ

本研究では簡易自動車モデルである Ahmed model に対して、剥離を生じるスラント部前縁に半円柱物体を設置し、PA と併用することで流れの剥離を抑制することを考え、数値計算を用いて剥離制御効果の評価を行った。シミュレーションの結果、半円柱物体を設置しただけでも剥離領域を抑制することができ、PA を併用することでさらに剥離を抑えられることがわかった。特に強力な PA では強い誘起流れが生じることでスラント部の流れが付着し、剥離領域が非常に小さくなることがわかった。各ケースで剥離領域の後端までの距離を計測すると、半円柱物体のみを設置した場合では剥離領域が 9.59% 減少し、PA のみを設置した場合では 9.97% 減少した。半円柱物体と PA の組み合わせでは、通常の PA で最大 24.9%、強力な PA で 50.2% 剥離領域が減少することが確認された。一方、抵抗係数に関しては、抵抗係数の変化量の大きさは必ずしも PA の強さに比例しないことがわかった。

## 5. 今後の研究計画

本研究では外部流れにおいて半円柱物体と PA の組み合わせで流れ制御が一定の効果があることを簡易自動車モデルである Ahmed model を用いて示したが、抵抗係数の低減という観点では十分な成果を達成できていない。今後は、PA の設置位置や方向、強さを変化させた場合に、それらが抵抗係数の低減効果に与える影響を検証していく予定である。

## 謝辞

ここに記載させて頂いた成果は、東北大学サイバーサイエンスセンターのスーパーコンピュータを利用することで実現することができたものである。また、研究にあたっては同センター関係各位に有益なご指導とご協力を頂いた。センターの皆様はこの場を借りて謝意を示したい。

## 参考文献

- [1] T. C. Corke, C. L. Enloe, and S. P. Wilkinson, “Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators for Flow Control,” *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 42, pp. 505–529, 2010.
- [2] T. C. Corke, M. L. Post, and D. M. Orlov, “Single Dielectric Barrier Discharge Plasma Enhanced Aerodynamics: Physics, Modeling and Applications,” *Experiments in Fluids*, Vol. 46, No. 1, pp. 1–26, 2009.
- [3] M. L. Post and T. C. Corke, “Separation Control on High Angle of Attack Airfoil Using Plasma Actuators,” *AIAA Journal*, Vol. 42 No.11,2004.
- [4] N. Benard, J. Jolibois, and E. Moreau, “Lift and Drag Performances of an Axisymmetric Airfoil Controlled by Plasma Actuator,” *Journal of Electrostatics*, Vol. 67, No. 2-3, pp. 133–139, 2009.
- [5] K. Asada, Y. Ninomiya, A. Oyama, and K. Fujii, “Airfoil Flow Experiment on the Duty Cycle of DBD Plasma Actuator,” 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting, The New Horizons Forum and Aerospace Exposition, Orlando, Florida, January 2009.
- [6] K. Fujii, “High-Performance Computing Based Exploration of Flow Control with Micro Devices” *Philosophical Transaction A, The Royal Society*, Vol. 372, Article ID 20130326, 2014.
- [7] M. Sato, H. Aono, A. Yakeno, T. Nonomura, K. Fujii, K. Okada, and K. Asada, “Multifactorial Effects of Operating Conditions of Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuator on Laminar Separated Flow Control,” *AIAA Journal*, Vol. 53, No. 9, 2015.
- [8] H. Aono, S. Kawai, T. Nonomura, M. Sato, K. Fujii and K. Okada, “Plasma-Actuator Burst-Mode Frequency Effects on Leading-Edge Flow-Separation Control at Reynolds Number  $2.6 \times 10^5$ ,” *AIAA Journal* Vol. 55, pp. 3789-3806, 2017.
- [9] K. Fujii, “Three Flow Features behind the Flow Control Authority of DBD Plasma Actuator: Result of High-Fidelity Simulations and the Related Experiments,” *Applied Science* 2018, Vol. 8, Issue 4, 2018.
- [10] H. Matsuda, M. Tanaka, S. Goshima, K. Amemori, M. Nomura and T. Osako, “Experimental Study on Plasma Aerodynamic Control for Improving Wind Turbine Performance,” *Asian Congress on Gas Turbines* 2012, Shanghai, P. R. China, August 2012.
- [11] D. Greenblatt, A. B. Harav, and H. M. Vahl, “Dynamic Stall Control on a Vertical Axis Wind Turbine Using Plasma Actuators,” *AIAA Journal*, Vol. 52, No. 2, pp. 456–461, 2014.
- [12] D. P. Rizzetta and M. R. Visbal, “Simulation of Plasma-based Flow Control Strategies for Transitional Highly Loaded Low-Pressure Turbines,” 37th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit, Fluid Dynamics and Co-located Conferences, Miami, Florida, June 2007.
- [13] K. Shimizu, T. Nakajima, S. Sekimoto, K. Fujii, T. Hiraoka, Y. Nakamura, T. Nouzawa, J. Ikeda and M. Tsubokura, “Aerodynamic drag reduction of a simplified vehicle model by promoting flow separation using plasma actuator,” *JSME Mechanical Engineering Letters, Bulletin of the JSME*, Vol.5, No. 19-00354,2019.
- [14] Z. Hui, X. Hu, P. Guo, Z. Wang and J. Wang, “Separation Flow Control of a Generic Ground Vehicle Using an SDBD Plasma Actuator,” *MDPI, Open Access Journal*, vol. 12, issue 20, pp. 1-14, 2019.
- [15] S. Shadmani, S. M. Mousavi Nainiyan, M. Mirzaei, R. Ghasemiasl and S. G. Pouryousefi, “Experimental Investigation of Flow Control over an Ahmed Body using DBD Plasma Actuator,” *Journal of Applied Fluid Mechanics*, Vol. 11, No. 5, pp. 1267-1276, 2018.

- [16] K. Watanabe, K. Asada, S. Sekimoto, and K. Fujii, “One Proposal to Enhance the Flow Control Authority of a Plasma Actuator in a Curved Duct”, *AJK Fluids 2023*, Osaka, Japan, July 2023.
- [17] 浅田健吾, 渡部航太郎, 関本諭志, 藤井孝藏, “プラズマアクチュエータによる角部剥離流れ制御の性能向上に向けて,” *大規模科学計算システム広報SENAC*, Vol. 57, No. 2, pp.5-14, 2024.
- [18] S. R. Ahmed, G. Ramm, and G. Faltin, “Some Salient Features of the Time -Averaged Ground Vehicle Wake,” *SAE Transactions*, Vol. 93, pp. 473–503, 1984.
- [19] H. Lienhart, and S. Becker, “Flow and Turbulence Structure In the Wake of a Simplified Car Model,” *SAE Transactions*, Vol. 112, pp. 785–796, 2003.
- [20] Y. B. Suzen and P. G. Huang, “Simulations of Flow Separation Control using Plasma Actuators,” 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Aerospace Sciences Meetings, Reno, Nevada, January 2006.
- [21] K. Asada, T. Nonomura, H. Aono, M. Sato, K. Okada, and K. Fujii, “LES of Transient Flows Controlled by DBD Plasma Actuator over a Stalled Airfoil,” *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, Vol. 29, 2015.
- [22] H. Aono, S. Sekimoto, M. Sato, A. Yakeno, T. Nonomura, and K. Fujii, “Computational and Experimental Analysis of Flow Structures Induced by a Plasma Actuator with Burst Modulations in Quiescent Air,” *Bulletin of the JSME Mechanical Engineering Journal* Vol. 2, No. 4, 2015.
- [23] S. Krajnović, and L. Davidson, “Flow Around a Simplified Car, Part 1: Large Eddy Simulation,” *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 127, No. 5, pp. 907–918, May 2005.
- [24] F. R. Menter, A. Hüppe, D. Flad, A. V. Garbaruk, A. A. Matyushenko, and A. S. Stabnikov, “Large Eddy Simulations for the Ahmed Car at 25° Slant Angle at Different Reynolds Numbers,” *Flow, Turbulence and Combustion*, September 2023.
- [25] E. Guilmineau, “Computational study of flow around a simplified car body,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 96, no. 6, pp. 1207–1217, Jun. 2008.
- [26] K. Liu, B. F. Zhang, Y. C. Zhang, and Y. Zhou, “Flow structure around a low-drag Ahmed body,” *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 913, p. A21, April 2021
- [27] A. Brunn, E. Wassen, D. Sperber, W. Nitsche, and F. Thiele, “Active Drag Control for a Generic Car Model,” *Active Flow Control*, R. King, Ed., Berlin, Heidelberg: Springer, 2007, pp. 247–259.