

## [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

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

関本 諭志：東京農工大学工学部機械システム工学科

藤井 孝藏：東京理科大学工学部情報工学科

### 1. はじめに

流れの制御は古くから流体研究分野では流体機器の性能を向上するための重要なテーマとされてきた。これまで様々な流体制御手法が考案されてきたが、近年ではDBD (Dielectric Barrier Discharge: 誘電バリア放電)プラズマアクチュエータ (以下 PA) と呼ばれる流体制御デバイス[1, 2]が世界的に注目され、多くの研究がなされている。国内でも10年前に日本機械学会にプラズマアクチュエータ研究会が設けられて以来、学术界のみならず、産業界も実用化に向けて研究開発を進めている[3]。

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)。電極間に高周波・高電圧の交流電圧を印加することで露出電極周辺にプラズマが発生し、非定常な流体変動が誘起される。薄さは数百マイクロメートルと非常に薄く軽量で、取り付けによる流体機器形状への影響が極めて小さいために既存システムへの導入が容易であることが特徴である。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。

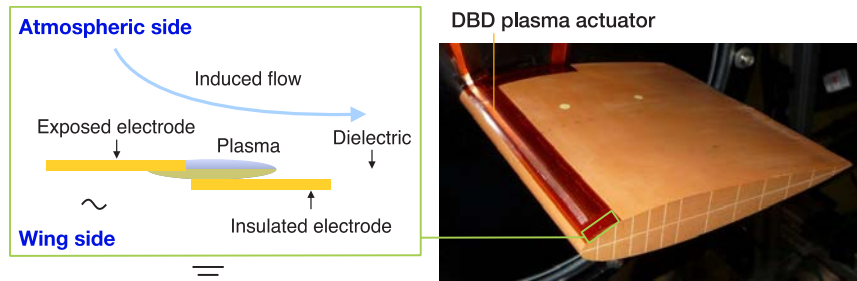


図1: DBD プラズマアクチュエータの構造と翼型への設置例

PAの研究は航空宇宙工学分野から広まったこともあり、航空機の翼[4-10]、風力発電タービン[11, 12]、ガスタービン[13]といったような流線型のような緩やかに形状変化する物体上に生じる剥離を対象とした研究が多い。近年では自動車[15-17]を対象とした研究もなされているが、90度折れ曲がった物体の角部などで剥離する流れに対してPAを適用した研究は少ない。そこで、我々のグループでは角部で強く剥離するような流れの剥離をPAで制御することに初期的検討として取り組んだが、翼型のように大きく剥離する流れの制御で得られるような明確な効果は得られないことがわかっている。本研究ではこのような物体角部で急激に剥離する流れを制御するためにPAに加えて物体角部の剥離を生じる部分に半円柱形状物体を付加することで、できるだけ流れを物体表面に沿うように変え、半円柱物体から緩やかに剥離する流れを更にPAによって制御することを狙う。具体的には図2aに示すような曲がり管内に生じる剥離を半円柱物体とPAを併用することで制御することを試みる(図2b)。

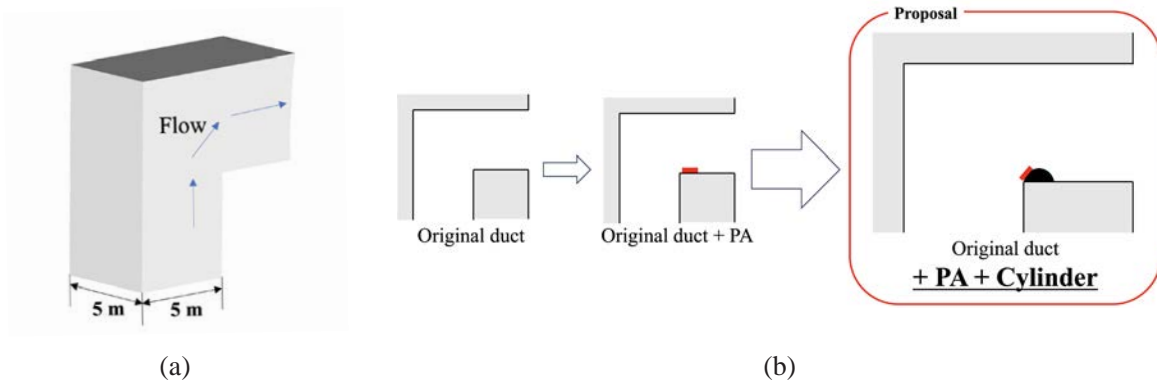


図 2: 曲がり管流れへの半円柱物体と PA の適用

## 2. 問題設定と計算条件

### 2.1 曲がり管流れの流れ条件, 計算条件

解析対象は図 2 のように L 字に折れ曲がったトンネルの換気に使われるような大型のダクトを対象とし、断面は 5.0 m × 5.0 m の正方形形状とする。内部を流れる流体は空気を想定し、流速 24 m/s で曲がり管下部から直角曲がり部を経て図中 (図 2a) 右側へと送風される。図 2b のように、内側の角から下流へ 5.0 m の位置で流路は急拡大しており、これは大気開放を想定したものである。角に設置する半円柱物体は半円柱とし、その直径はダクトの幅の 1/8 とした。半円柱物体は、円柱の端が曲がり管の角と一致するように設置する。代表長さを 0.1 m、代表速さを 24 m/s とし、レイノルズ数は 151,200 である。

表 1 に計算ケースを示す。それぞれの計算ケースに対応する半円柱物体と PA の設置位置の模式図を図 3 に示す。事前検討として、元々の曲がり管形状 (図 3a) である Original duct に対して、PA のみを貼り付けた数値計算を行い、効果的な設置位置を検討した (図 3b の PA1 から PA4)。その中で最も効果があった貼り付け位置のものを Original duct+UpstreamPA とする。半円柱を取り付けたケースを Cylinder、半円柱物体と PA を取り付けたケースを表 1 に示す通りに設定する。PA の位置として Upstream は剥離点より上流、Downstream は下流に設置したことを表している。具体的なそれぞれの位置は図 3d に示す通りである。

表 1: 計算ケース

	半円柱物体の有無	PA の位置	PA の強さ ( $D_c$ )
Original duct	No	N/A	N/A
Original duct+UpstreamPA (PA1)	No	Upstream	0.035
Cylinder	Yes	N/A	N/A
Cylinder+UpstreamPA	Yes	Upstream	0.035
Cylinder+UpstreamPA_Strong	Yes	Upstream	0.35
Cylinder+DownstreamPA	Yes	Downstream	0.035
Cylinder+DownstreamPA_Strong	Yes	Downstream	0.35

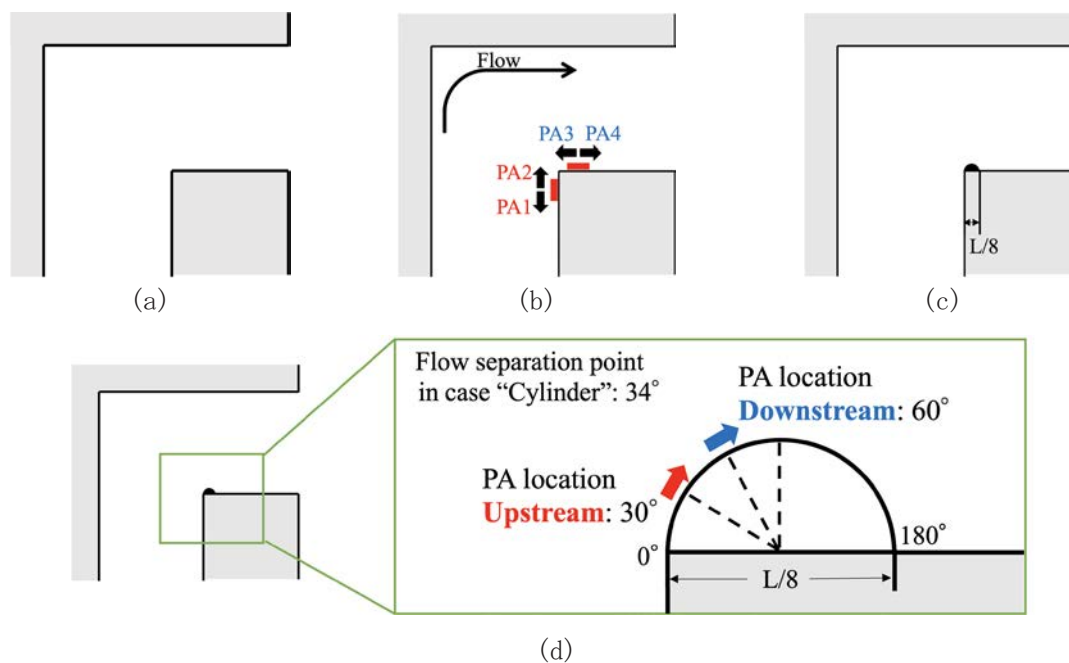


図 3: 計算対象概略図

## 2.2 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[18]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[19, 20]。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。アクチュエータの出力を決めるパラメータ  $Dc$  は表 1 に示したように、0.035 と 0.35 を用いる。 $Dc=0.35$  はこれまで行ってきた翼流れ制御[8]において一様流とアクチュエータの誘起流速の比が同程度となる現実的な値であり、いずれも実際の PA で出力可能な範囲の値となっている。

## 2.3 計算手法

3次元圧縮性 Navier-Stokes 方程式を支配方程式とし、空間の離散化方法として有限差分法を選択し、数値流束の評価には MUSCL 法[21]により高次精度化した SHUS (Simple High-resolution Upwind Scheme) [22]を用いた。時間積分は 2次精度 3点後退差分を 3回の内部反復を用いた ADI-SGS 陰解法[23]で解いた。内部反復の導入によって大きな時間ステップ幅でも時間精度が維持されるようにしている。代表速度と代表長さをを用いた無次元時間刻みは  $2.5 \times 10^{-4}$ とした。

## 2.4 計算格子と境界条件

図 4 に計算格子を示す。計算格子は曲がり管流れを解く Zone 1 (図 4b, 黒色) の格子と半円柱物体周りの流れを解く Zone 2 (図 4c, 4d, 青色), PA 近傍の流れを解く Zone 3 (図 4c, 4d, 赤色) の格子の計 3つのゾーンからなり、総格子点数は約 500 万点である。曲がり管出口から外部境界までの距離は  $12.5L$ とした。奥行き方向には周期境界条件を用い、それ以外の壁面は滑りなし壁条件を適用した。流入境界では圧力を外挿し、他の物理量を流入速度の条件で固定した。

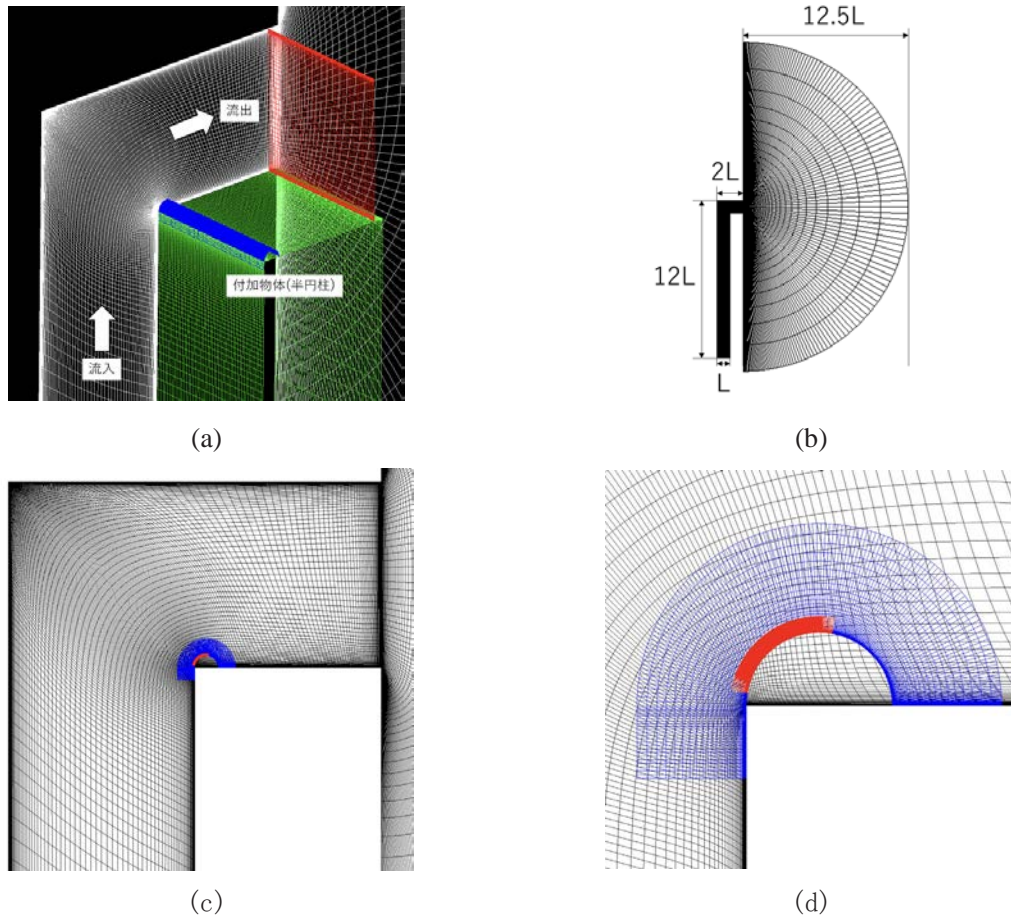


図 4: 計算格子

## 2.5 計算機に関して

計算には、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-A を利用した。16VE を利用し、分割した格子を各 VE に割当てて計算を実施した。各 VE 間の通信には MPI を用い、VE 内は自動並列を行うハイブリッド並列を用いた。1 ケース(200 万ステップ)の計算時間は約 22 時間である。

## 3. 計算結果

### 3.1 瞬間流れ場

図 5 に 500 万ステップ時点の瞬間速度場のうち代表的なものを示す。面塗りは速度の絶対値  $||u||$  を代表速度  $||u_{\infty}||$  で無次元化した値を示す。各図では左下から空気が流入し、直角な角部を通過して流れが 90 度折れ曲がった後に各図の右中央にある大気開放部へと流出する。いずれの図においても曲がり部直後から大気開放部までの間に青色の領域が存在しており、流れの剥離が生じているのがわかる。Original duct では角部において流れが特に強く剥離し、流路が狭まるために大気開放部付近で速度の増加がみられる。一方で Cylinder では、Original duct に比べて角に設置した半円柱物体表面に流れが付着し下流の剥離領域がやや小さくなっていることがわかる。

本研究では半円柱物体はPAの効果を補助するために取り付けたが、半円柱物体のみを取り付けた場合でも大きな剥離制御効果が得られた。CylinderとCylinder+UpstreamPAの瞬間場の比較では明確な違いは見受けられない。

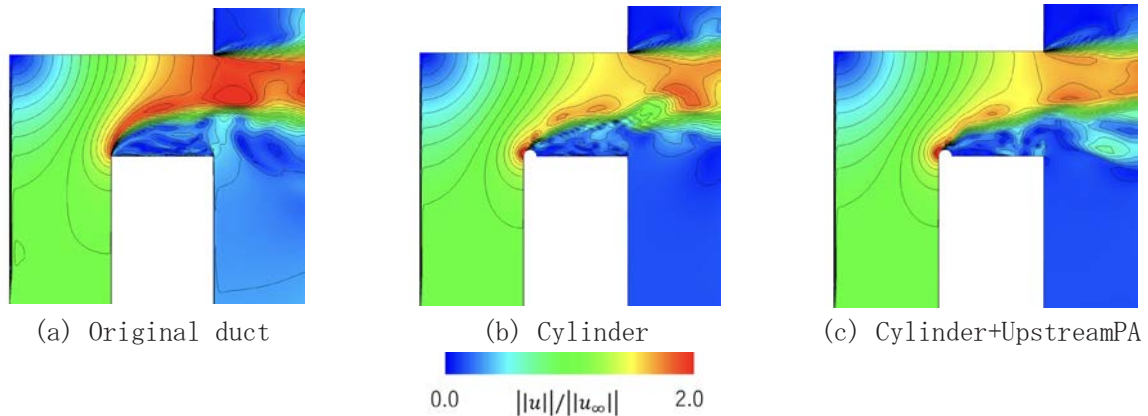


図 5: 瞬間速度場

### 3.2 平均流れ場

400万ステップから600万ステップの間の流れを時間平均し、さらに紙面奥行方向（周期境界条件を課した方向）に空間平均を行った平均速度流れを図6に示す。面塗りは速度の絶対値、黒い線は流線を表している。Original duct（図6a）では角から流れは剥離し、大気開放部付近で流速増加が生じている。半円柱物体を設置したCylinder（図6b）では、角に設置した半円柱物体表面に流れが付着することで剥離が抑えられており、流速の増加も抑制されている。一方で、半円柱物体による変化と比べるとPAを用いた場合の流れの変化は図6からはっきりとはわからない。そこで、半円柱物体付近の流れ場を拡大した流れ場を図7に示す。

図7は図6と同様に速度の絶対値の平均場と流線を示している。図7に描かれた矢印の位置はPAのおおよその設置位置を、矢印の太さはPAの強さの大小を示す。各ケースの間で半円柱物体からの剥離剪断層の角度に違いがあることが流線から見てとれる。Cylinderでは剥離剪断層がちょうど図右上の角付近へと伸びている。PAを用いたケースのうちCylinder+UpstreamPA, Cylinder+DownstreamPA, Cylinder+DownstreamPA\_Strongでは剥離剪断層はやや水平に近づいており、PAによって流れが付着し、剥離が抑えられているのがわかる。反対に、Cylinder+UpstreamPA\_Strongでは剥離剪断層が垂直に近づいており、PAによって流れの剥離が促進されているのがわかる。

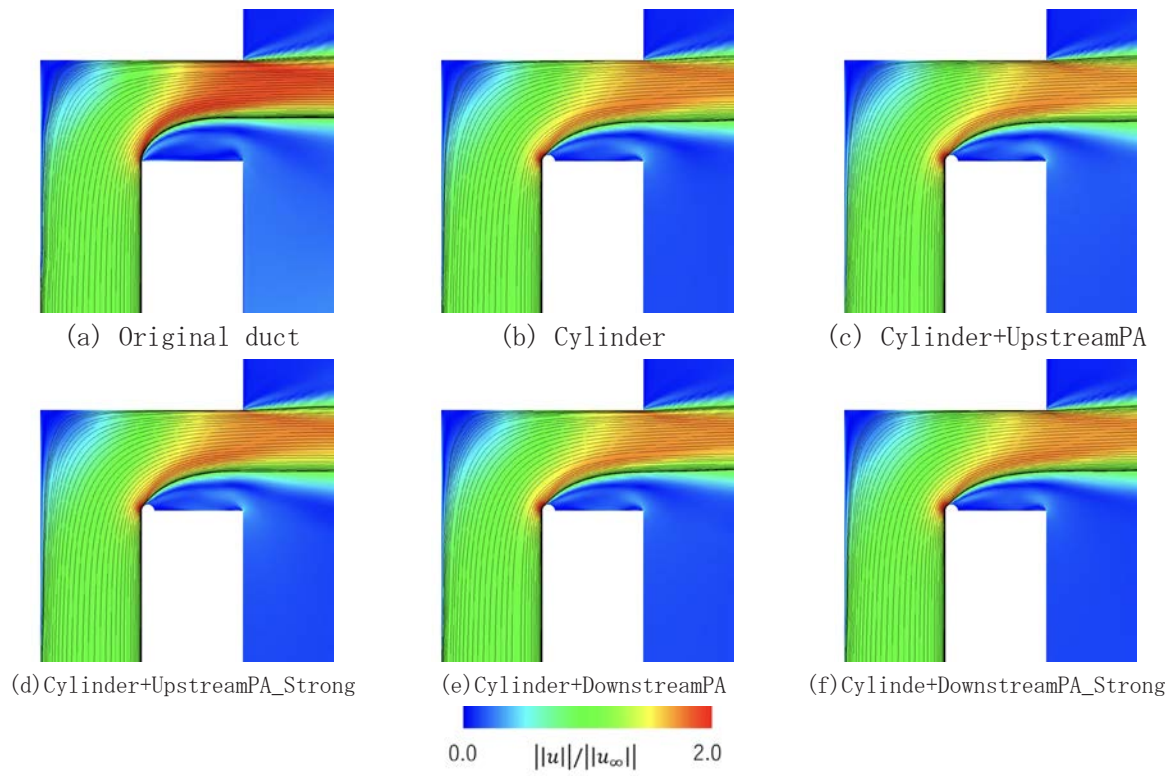


図 6: 平均速度場と流線

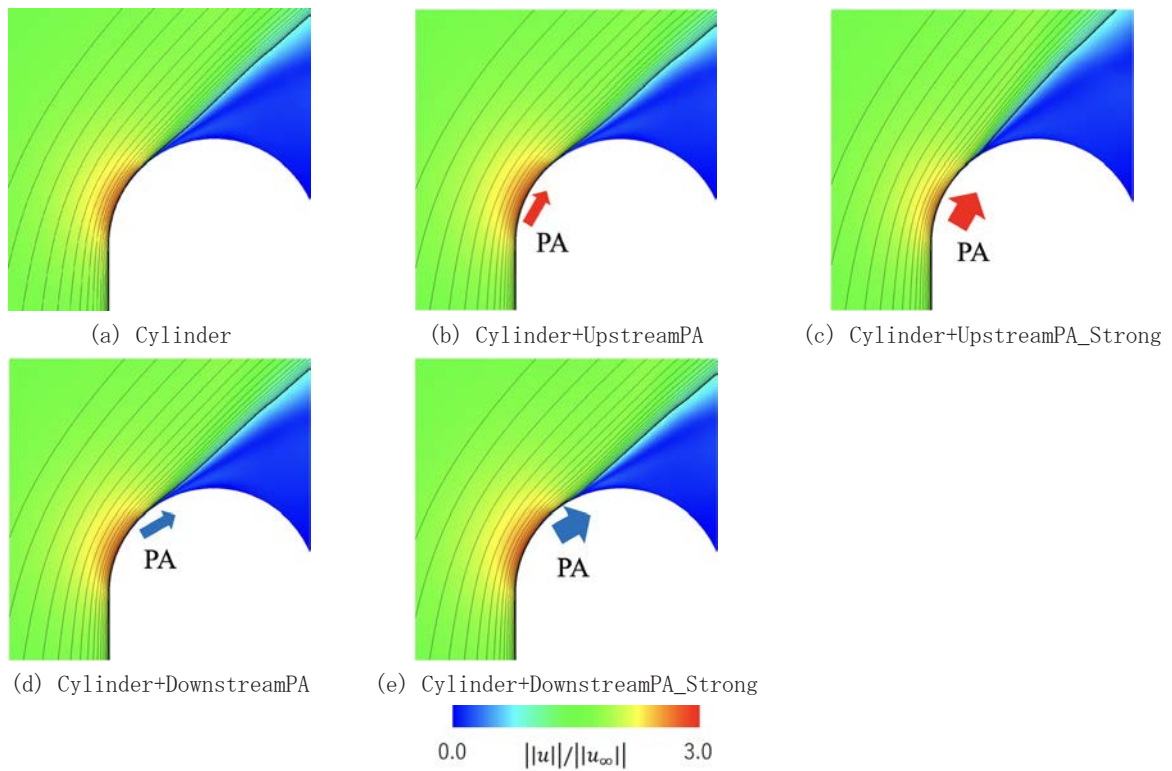


図 7: 半円柱物体表面付近の時間平均速度場と流線

各ケースの流れの剥離を定量的に評価するために半円柱物体表面付近の運動量厚さで比較する。図 8 の縦軸は半円柱物体表面の運動量厚さであり、横軸は半円柱物体表面における  $x$  座標をダクトの幅で無次元化した座標値である。灰色の点線はそれぞれおおよその PA の設置位置を示している。縦軸の運動量厚さの増加は剪断層が物体から離れることに対応する。運動量厚さの小ささから剥離の抑制で順位付けをすると以下ようになる。

1. Cylinder+DownstreamPA\_Strong
2. Cylinder+UpstreamPA
3. Cylinder+DownstreamPA
4. Cylinder
5. Cylinder+UpstreamPA\_Strong

図 7 で示した様に、Cylinder+UpstreamPA\_Strong では剥離が促進され、他の PA を設置したケースでは剥離が抑制されていることがわかる。PA による誘起流が比較的弱いケースである Cylinder+UpstreamPA と Cylinder+DownstreamPA の結果を比較すると、Cylinder+UpstreamPA の方が運動量厚さは小さく、剥離が抑制できている。UpstreamPA と DownstreamPA は PA の設置位置が剥離点位置の上流か下流という違いに加えて剥離点位置と PA の体積力が最大になる位置の違いがある。UpstreamPA は剥離点位置より 4 度ほど上流の位置であるが、DownstreamPA の場合は剥離点位置より 26 度ほど下流の位置である。従って、PA による誘起流が主流と比べて弱い場合は、剥離点と近い位置に PA を設置することが効果的であったと考えられる。一方で、PA による誘起流が強い場合の Cylinder+UpstreamPA\_Strong と Cylinder+DownstreamPA\_Strong の結果を比較すると、Cylinder+UpstreamPA\_Strong は Cylinder+DownstreamPA\_Strong よりも運動量厚さは大きく、更に PA を設置していない Cylinder よりも剥離は大きくなっている。その理由はいくつが考えられるが、ひとつは Cylinder+UpstreamPA\_Strong では半円柱表面に設置された PA から接線方向に強く流れが誘起されるため、慣性力が強すぎて剥離した可能性、もう一つは PA が誘起する壁面方向への誘起速度が強く、流れが壁に衝突することで圧力が上昇し、逆圧力勾配を生じて流れが剥離した可能性などである。このように、PA による誘起流が強力な場合、元の流れの剥離点位置に加えて、PA による誘起流の方向についても考慮して設置位置を決める必要がある可能性がある。

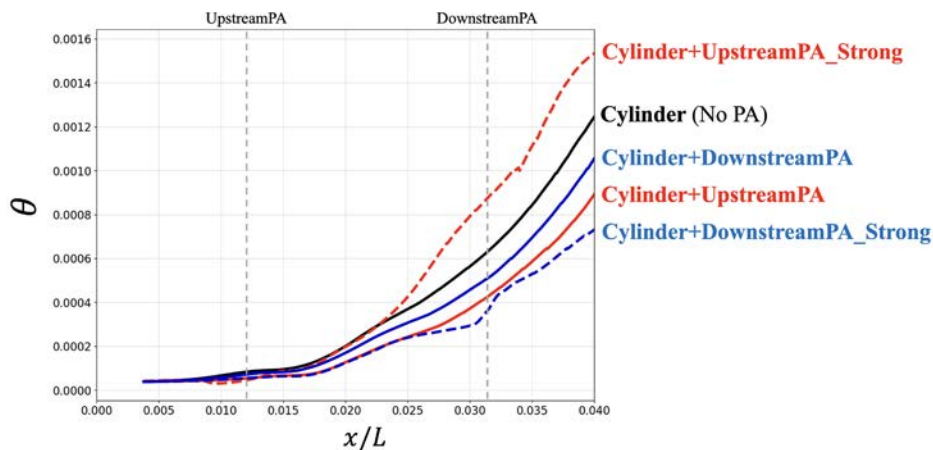


図 8: 半円柱物体表面における運動量厚さ

半円柱物体による PA の制御効果の増減を曲がり部前後の総圧損失で評価する。図 9 に各ケースの総圧損失を示す。総圧損失は流入部の平均総圧に対する流出部の平均総圧の差で求めた。曲が

り部内側の角から流路幅の長さだけ上流の位置を流入部の断面として用い、同様に角から流路幅だけ下流の位置を流出部の断面として用いた。また、流れ場の時間平均を行った後に奥行き方向にも平均処理を行った。Original duct と Cylinder を比較すると、半円柱物体の付加で総圧損失が 28.4%減少したことがわかる。また、Cylinder と半円柱物体に PA を設置した 4 ケースを比較すると、Cylinder+UpstreamPA\_Strong を除いて PA の設置によって更に総圧損失が減少したことがわかる。Cylinder+DownstreamPA\_Strong においては最も総圧損失が減少し、Cylinder に比べて 3.5%の減少である。一方で、Cylinder+UpstreamPA\_Strong では Cylinder に比べて総圧損失が 3.5%増加した。総圧損失の小ささで順位付けをすると以下ようになる。

1. Cylinder+DownstreamPA\_Strong
2. Cylinder+UpstreamPA
3. Cylinder+DownstreamPA
4. Cylinder
5. Cylinder+UpstreamPA\_Strong

この順位は運動量厚さから評価した剥離抑制効果の順位と一致しており、本研究の条件下では、曲がり部前後の総圧損失と半円柱物体表面における剥離の様子との間に相関関係が見られることがわかる。

最後に、総圧損失の減少度を用いて PA 単体を流路に設置した場合と半円柱物体と PA を併せて設置した場合を比較する。元の曲がり管形状に PA 単体を設置した場合の最良ケースは Original duct+UpstreamPA であり、総圧損失の減少は 0.1%である。半円柱物体と PA の両方を流路に設置した場合、最良ケースは Cylinder+DownstreamPA\_Strong であり、半円柱物体のみの取り付けに比べて総圧損失の減少は 3.5%である。PA 出力の弱い Cylinder+UpstreamPA であっても、総圧損失は 2.8%減少する。元の直角な流路に PA のみを設置した場合の総圧損失の減少が 0.1%であることに比べると、半円柱物体と PA を併用した場合に PA の効果はその誘起流の強さに関わらず増強されていると言える。従って、PA の設置条件や駆動条件にはよるが、PA による制御効果を得にくい流路に対し、半円柱物体と PA を併用することで PA の効果を増幅できる可能性があることが本研究でわかった。

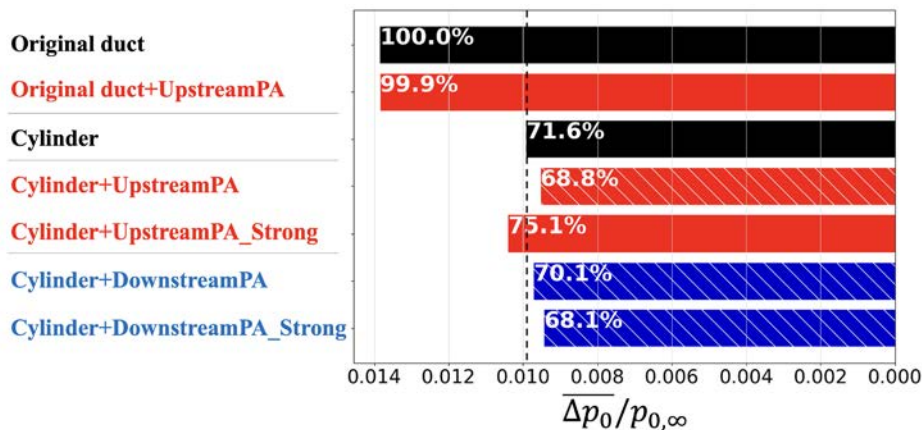


図 9：総圧損失変化の変化



### 3.4 今後の研究計画

本研究では3次元計算を行ったものの、比較的粗い計算格子を用いた低次精度の数値計算であるために、乱流のような複雑な流体现象は捉えられていない。より詳細に流れ場の議論を行うために、今後高忠実なシミュレーションを実施したいと考えている。また、今回は曲がり管内の流れ、すなわち内部流を対象としたが、外部流に対しても半円柱とPAの組み合わせで流れ制御が効果的に行えるかどうかの検証を現在行っている。

## 4. まとめ

本研究では曲がり管内の流れに対して、剥離を生じる角部付近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角部の剥離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ることがわかった。総圧損失による評価では半円柱の設置によって総圧損失は28.4%減少し、さらに半円柱にPAを駆動することで半円柱物体のみを設置した場合に比べて最大3.5%現象することがわかった。PAの設置位置に関する検討も行った結果、PAの出力が比較的弱い場合は剥離に対して上流側にPAを取り付けた場合が効果的であったが、PAの出力が強い場合は剥離点より下流にPAを設置した方が剥離を抑えられることがわかった。ただし、今回の計算では、PAを上流に設置したケースの方がPAの体積力が最大となる位置が剥離点に近いことに留意したい。また、壁面方向に向かう方向の流れの誘起についても注意が必要である。PAの強さと設置位置が剥離制御効果に与える影響に関しては今後、高忠実なシミュレーションの実施によってより詳細な議論を行いたいと考えている。

## 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] 日本機械学会, プラズマアクチュエータ研究会, <http://plasma-actuators.jp/>
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.

- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 浅田健吾, 藤井孝藏, “DBDプラズマアクチュエータを用いた自動車後流制御による抵抗低減,” *SENAC*, Vol. 53, No. 1, Jan. 2020.
- [18] 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.
- [19] K. Asada, T. Nonomura, H. Aono, M. Sato, K. Okada, K. Fujii, “LES of Transient Flows Controlled by DBD Plasma Actuator over a Stalled Airfoil,” *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, Vol. 29, 2015.
- [20] 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.
- [21] Bram van Leer. Towards the ultimate conservation difference scheme. iv. a new approach to numerical convection. *Journal of Computational Physics*, Vol. 23, No. 3, pp. 276–299, 1977.
- [22] E. Shima and T. Jounouchi. Role of cfd in aeronautical engineering (no.14) -ausm type upwind schemes-. In *Proceedings of the 14th NAL Symposium on Aircraft Computational Aerodynamics*, pp. 7–12. NAL, 1997.
- [23] K. Fujii, “Simple Ideas for the Accuracy and Efficiency Improvement of the Compressible Flow Simulation Methods.” Paper presented at *International CFD Workshop for Super-sonic Transport Design*, Tokyo, March, 1998.