

プラズマアクチュエータによる四角柱の後流制御にスケール変化が与える影響

Flow Scale Change Effect of Wake Flow Control on a Rectangular Cylinder Using Plasma Actuator

- 関希美, 農工大, 東京都小金井市中町 2-24-16, E-mail: s153511s@st.go.tuat.ac.jp
- 中井公美, 農工大, 東京都小金井市中町 2-24-16, E-mail: kumi-nakai@st.go.tuat.ac.jp
- 西田浩之, 農工大, 東京都小金井市中町 2-24-16, E-mail: hnishida@cc.tuat.ac.jp
- Nozomi SEKI, TUAT, 2-24-16 Naka-cho, Koganei-city, Tokyo, 184-8588, Japan
- Kumi NAKAI, TUAT, 2-24-16 Naka-cho, Koganei-city, Tokyo, 184-8588, Japan
- Hiroyuki NISHIDA, TUAT, 2-24-16 Naka-cho, Koganei-city, Tokyo, 184-8588, Japan

It's generally known that flow control effect of dielectric barrier discharge plasma actuator (DBDPA) decreases with increment of the Reynolds number, that's proportional to the product of main flow velocity and flow scale. Although the effect of main flow velocity change on the flow control would be different from that of the flow scale change, the latter hasn't been studied. In this study, we numerically investigate the effect of the scale change on wake flow control by the DBDPA. The numerical simulation of two-dimensional incompressible flow over rectangular cylinder is conducted and the Reynolds number effect by the flow velocity change and the flow scale change is compared. The result shows that the negative pressure on the back side of rectangular cylinder is decreased by the control of DBDPA and the drag is reduced. In addition, the Reynolds number effect by the main flow velocity is larger than that by the flow scale.

1. 序論

自動車やトラックなどの輸送車両の背面では後流が剥離することで圧力が低下し、大きな抗力が生じている¹⁾。後流剥離を抑制することで、圧力の低下によって生じる抗力を低減できれば、燃費の向上が可能である。近年、電気自動車やトラックの開発が進められており、大気圧放電によりジェットを誘起し電氣的に流れを制御できる誘電体バリア放電プラズマアクチュエータ（以下、DBDPA）は、電気車両の後流制御に適したデバイスとして期待できる²⁾。

DBDPA の典型的な構造を Fig. 1 に示す。DBDPA は 2 枚の電極と誘電体から構成され、機械的可動部を持たず、小型で簡単な構造が特徴の能動的流体制御デバイスである。上部電極に交流高電圧を印加することで誘電体バリア放電が発生する。誘電体バリア放電によって生成したプラズマが生み出す体積力によって壁面に沿ったジェットが誘起される。ジェットの強さは放電距離や誘電体の材質等に依存するが、数 m/s 程度のジェットを誘起できることが分かっている。

DBDPA の制御効果はレイノルズ数の増大に伴い減少することが知られている³⁾。レイノルズ数とは主流流速と物体スケールの積に比例するパラメータである。小型模型を用いた実験により、主流流速変化によってレイノルズ数が大きくなる場合には、主流に対して DBDPA のジェット流速が相対的に小さくなることで制御効果が小さくなることが報告されている³⁾。この時、制御効果は主流とジェットとの流速比によって評価できる。一方で、物体スケールの変化によってレイノルズ数が変化する場合、DBDPA の放電距離は変化しないため、物体に対する体積力の分布のサイズが小さくなることで制御効果が小さくなるかと予想されるが、この場合の制御効果は流速比によって評価できないと考えられる。しかし、物体のスケール変化による DBDPA の制御効果への影響はほとんど調査されていない。そこで本研究では、数値シミュレーションによって、主流流速変化によるレイノルズ数変化の場合と物体スケール変化によるレイノルズ数変化の場合の DBDPA の制御効果を比較する。簡単のため、2次元の四角柱に単純化したモデルを用い、モデル後端に DBDPA を設置した。

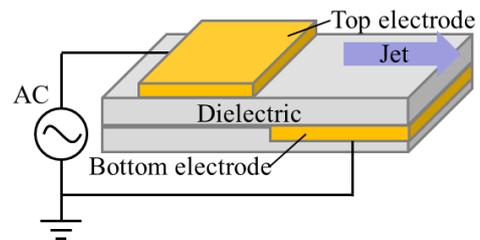


Fig. 1 Dielectric barrier discharge plasma actuator

2. 計算モデル

支配方程式である 2 次元非圧縮の Navier-Stokes 方程式と連続の式を SMAC 法によって連立して解く。支配方程式を以下に示す。

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}\mathbf{u}) = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{F} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2)$$

ここで \mathbf{u} は速度ベクトル、 ρ は密度、 p は圧力、 ν は動粘度、 \mathbf{F} は外力を表す。DBDPA の制御力は、流れを加速する体積力として外力項に入力する。動粘度は大気圧下 20°C の時と仮定し、 $\nu = 1.512 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ とする。

移流項の計算には 2 次精度中心差分に 3 次精度風上差分を 20% ブレンドして用い、圧力項と粘性項の計算には 2 次精度中心差分を用いる。時間積分には 2 次精度ルンゲクッタ法を用いる。

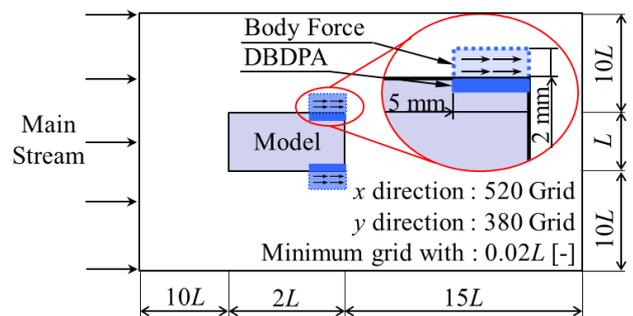


Fig. 2 Computational model

シミュレーションのセッティングを Fig. 2 に示す。代表長は物体スケール L とし、モデル短辺の長さとする。計算領域および最小格子幅は物体スケール L により決まり、計算格子は無次元空間上で一致する。Fig. 3 に 3 点ごとに表示した格子の様子を示す。DBDPA は物体下流端の上下 2 か所に設置し、幅 5 mm 高さ 2 mm の範囲に主流方向へと流れを加速する体積力を一様に分布させる。体積力の強度はジェット流速が 0.4 m/s 程度になるように設定する。

Table 1 に本研究で調査する Case 1–3 の計算条件を示す。Case 1 は $Re=661$ 、Case 2 は $Re=1322$ で主流流速を Case 1 の倍にした場合、Case 3 は $Re=1322$ で物体スケールを Case 1 の倍にした場合である。

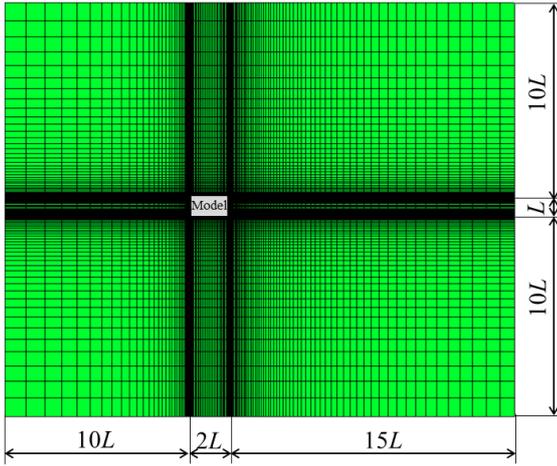


Fig. 3 Computational grid

Table 1 Calculation condition

	Reynolds number Re [-]	Mainstream velocity U [m/s]	Scale L [mm]	Minimum grid with a [mm]
Case 1	661	0.50	20	0.20
Case 2	1322	1.00	20	0.20
Case 3	1322	0.50	40	0.40

3. シミュレーション結果

Fig. 4 に x 方向流速分布、Fig. 5 に圧力係数分布の時間平均場を示す。(a)に Case 1、(b)に Case 2、(c)に Case 3 の結果をそれぞれ示しており、各 Case について DBDPA を駆動していない場合と駆動した場合の結果の比較を示している。Table 2 に抗力係数と、流れ場に対する制御力の大きさを示すパラメータとして Q 値を示す。抗力係数は動圧と代表面積との積と抗力の比で表される無次元パラメータで(3)式で、 Q 値は物体が受ける主流の運動量と体積力の積分値との比で表される無次元パラメータとして定義され、(4)式で表される。

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho U^2 S} \quad (3)$$

$$Q = \frac{F_{PA} S_{BF}}{\rho U^2 S} \quad (4)$$

ここで F_D は時間平均 x 方向抗力、 S は代表面積であり、2次元計算であるため、 L の値を用いる。また、 F_{PA} は体積力密度、 S_{BF} は体積力を入力している全体積である。

Table 2 Drag coefficient

	PA off [-]	PA on [-]	Reduction rate [%]	Q [-]
Case 1	1.521	1.090	28.27	0.025
Case 2	1.582	1.436	9.23	0.00625
Case 3	1.631	1.251	23.32	0.0125

Fig. 4 より、いずれの Case でも DBDPA の駆動により、流れ場が変化しており、DBDPA が物体周りの流れに作用していることが確認できる。抗力係数は DBDPA の駆動によって小さくなることが期待され、期待通りにいずれの Case でも抗力の低減が確認できた。その低減率の大きさは Q 値との相関がみられた。

最も抗力の低減率が大きかった Case 1 では、Fig. 4(a)より DBDPA の駆動によって、物体側面の DBDPA 設置位置において流れが完全に再付着した後流領域が大きく縮小している。また Fig. 5(a)より、物体背面の負圧が小さくなっていることが分かる。レイノルズ数が大きくなった Case 2 と Case 3 においては、いずれも抗力低減率が減少する。Case 1 の次に抗力の低減率が大きかった Case 3 では、

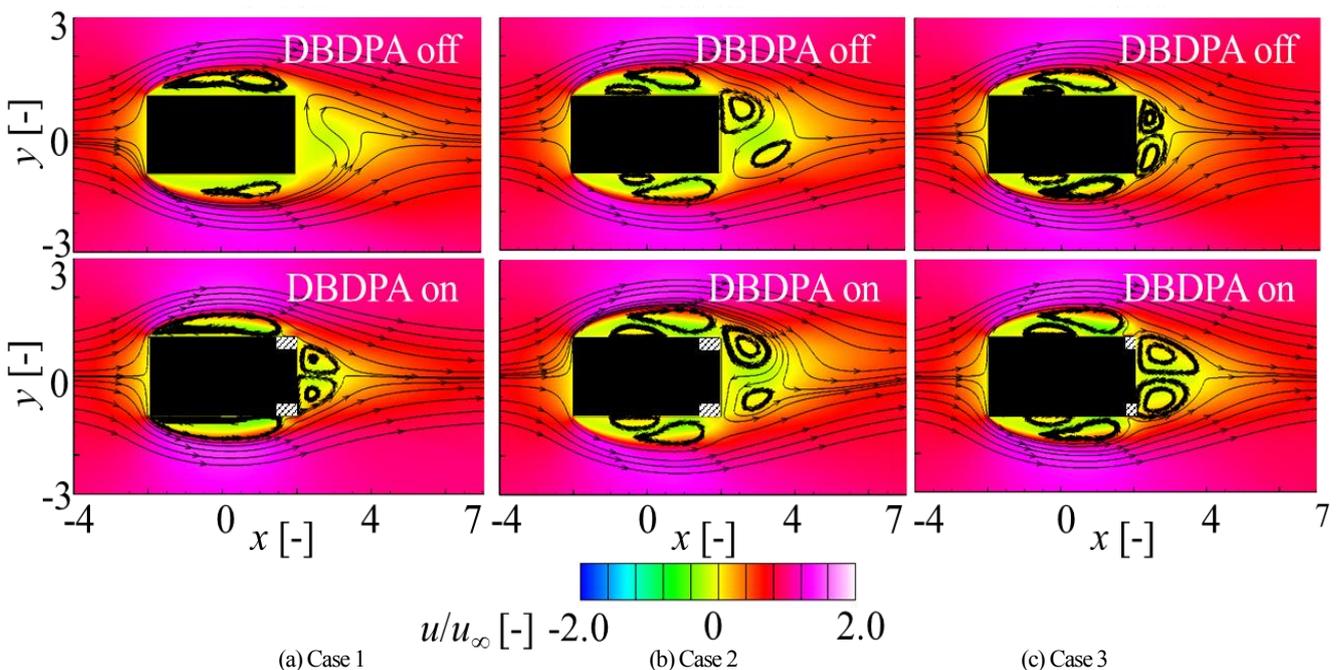


Fig. 4 Time-averaged horizontal direction velocity field

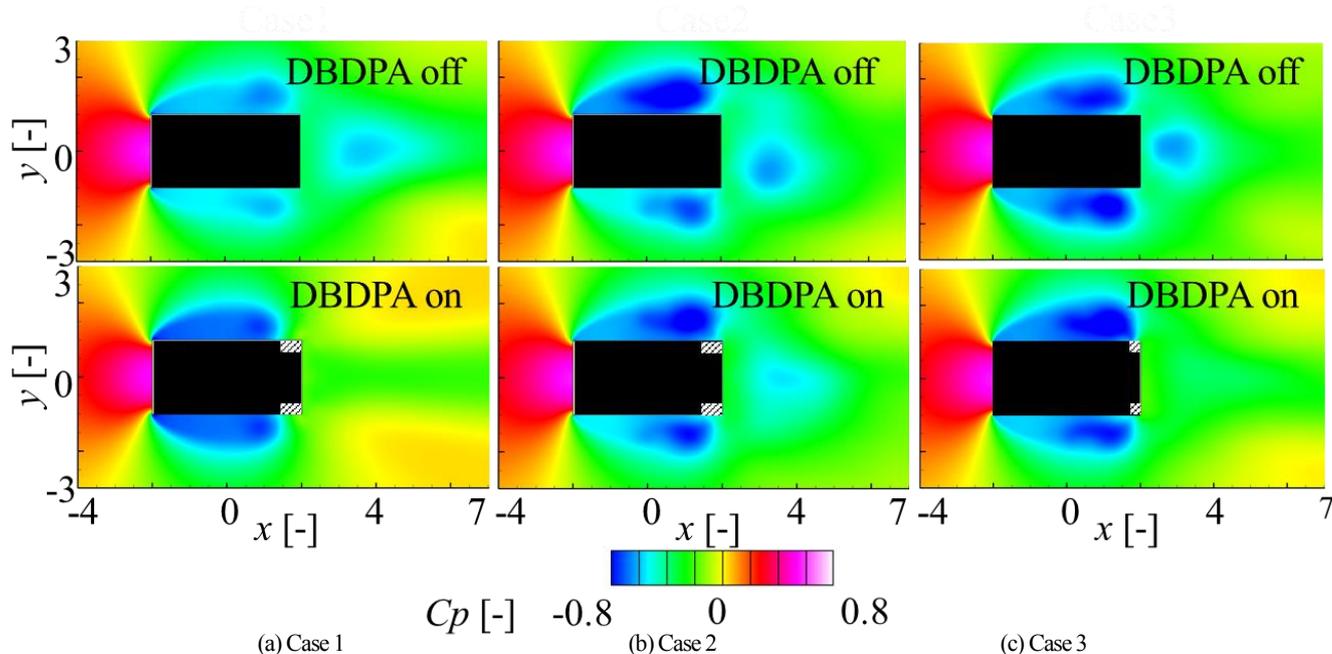


Fig. 5 Time-averaged pressure distribution

Fig. 4(c)より, Case 1 と同様に DBDPA 設置位置で流れが再付着しているが, その一方で後流領域は増大している. しかしながら, Fig. 5(c)より, 物体背面の負圧は小さくなり, これにより抗力は減少する. 最後に抗力の低減率が最も小さかった Case 2 では, Fig. 4(b)より, DBDPA 設置位置での流れの再付着は見られず, 後流領域の顕著な減少も見受けられない. Fig. 5(b)より, 物体背面の負圧が小さくなっていることが確認できるが, Case 1, Case 3 ほど小さくはなっていない. 以上より, 今回の計算では, レイノルズ数が同一でも主流流速が大きくなった場合の方が DBDPA の制御効果が大きく減ずる結果となった. このことから, 主流流速の変化と物体スケールの変化は DBDPA の制御効果に異なった影響を与えると考えられる. Q 値の観点から考察すると, Q 値が減少するにつれて抵抗低減率が減少していることが分かる. DBDPA の制御効果は, レイノルズ数や主流流速とジェット流速比ではなく, Q 値によって整理できることが期待できる.

本シミュレーションの問題点として, Case2 と Case3 はレイノルズ数が等しく, DBDPA が駆動していない場合には流れ場は相似になるはずであるが, Fig. 4(b), (c)より異なった流れ場が得られていることが確認できる. この要因として, レイノルズ数に応じて最小格子幅を変化させていないことが考えられ, 格子収束性を今後確認する必要がある.

4. 結論

本研究では, 物体スケール変化が DBDPA の制御効果へ与える影響を調査するため, DBDPA を四角柱後流の制御に用いる 2 次元数値シミュレーションを行った. 低いレイノルズ数の場合と, 主流流速変化と物体スケール変化によってレイノルズ数を増加させた場合について, DBDPA を駆動しない時と駆動した時の時間平均流れ場, 時間平均圧力係数分布, 抗力係数を比較することで, DBDPA の流れへの影響を調査した. その結果, 以下の知見が得られた.

DBDPA の駆動は物体周りの流れに作用し, 抗力係数が, レイノルズ数が 661 の時に最大で 28% 小さくなることが分かった. 抗力の低減率は Q 値が大きい時に大きく, DBDPA の駆動によって主流が物体側面に再付着し, 物体背面の負圧が小さくなることで,

抗力が小さくなる.

レイノルズ数が等しい場合においても, DBDPA 駆動時の流れ場, 圧力係数分布, 抗力の低減率は相似にならず, 主流流速変化と物体スケール変化によるレイノルズ数の変化は, DBDPA の制御効果に異なった影響を与えると考えられる.

今後は, 格子収束性を確認し, 格子の影響を無視できる計算モデルにて, 主流流速と物体スケールをパラメトリックに変化させたシミュレーションを行い, 物体スケール変化によるレイノルズ数変化が DBDPA の制御効果へ与える影響を調査する.

参考文献

- (1) 么, 川端, 円能寺, "自動車形状物体の空気抵抗軽減化," 東海大学紀要工学部, vol.52, No2 (2012), pp. 287-294.
- (2) S. Roy, P. Zhao, A. D. Gupta, and J. Soni, "Dielectric barrier discharge actuator for vehicle drag reduction at highway speeds," AIP ADVANCES 6 (2016).
- (3) 佐野, 須藤, 遠藤, 杉山, 鈴木, "プラズマアクチュエータによる後ろ向きステップ流れの損失低減" 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 78, No. 785 (2012), pp.49-59.