

# 複数の分岐・合流部を有するチャンネル流れ制御における プラズマアクチュエータ設置位置の効果

Location effects of Plasma Actuator for control in multiple-passage channel flow

- 焼野 藍子, ISAS/JAXA, 神奈川県相模原市中央区由野台 3-1-1, E-mail: yakeno@flab.isas.jaxa.jp
- 佐野 正利, 千葉工大, 千葉県習志野市津田沼 2-17-1, E-mail: sano.masatoshi@it-chiba.ac.jp
- 野々村 拓, ISAS/JAXA, 神奈川県相模原市中央区由野台 3-1-1, E-mail: nonomura@flab.isas.jaxa.jp
- 阿部 圭晃, 東大院, 神奈川県相模原市中央区由野台 3-1-1, E-mail: abe@flab.isas.jaxa.jp
- 藤井 孝藏, 東理大, 東京都新宿区神楽坂 1-3, E-mail: fujii@flab.isas.jaxa.jp
- Aiko Yakeno, ISAS/JAXA, 3-1-1 Yoshinodai, Chuo-ku, Sagamihara-shi, Kanagawa
- Masatoshi Sano, Chiba Institute of Technology, 2-17-1 Tsudanuma, Narashino-shi, Chiba
- Taku Nonomura, ISAS/JAXA, 3-1-1 Yoshinodai, Chuo-ku, Sagamihara-shi, Kanagawa
- Yoshiaki Abe, The University of Tokyo, 3-1-1 Yoshinodai, Chuo-ku, Sagamihara-shi, Kanagawa
- Kozo Fujii, Tokyo University of Science, 1-3 Kagurazaka, Shinjuku-ku, Tokyo

We conducted two-dimensional numerical simulation of multiple-passage channel flow to analyze location effects of the control body-force of DBD plasma actuator, in order to reduce the energy loss and gain its distribution-performance. As a result, an effective actuator-location depends on its relative size and strength. When the effect of the control body-force is relatively small, the flow quantity increases the most with the actuator installed near the entrance in the upstream of the channel. When the effect of the control body-force is large and induces stronger velocity than that of the mainstream, the flow distribution-performance decreases and the total flow quantity reduces. On the other hand, the control body-force installed near the exit in the downstream of the channel resolves the problem. The control body-force at the junction of multiple-passage in the downstream increases the flow quantity with keeping good distribution-performance.

## 1. 背景

エネルギー有効利用のため、熱交換器性能の向上は緊急課題である。空調機やカーエアコンなどに用いられる熱交換器内部の流れは、レイノルズ数が 100 程度の層流状態であり、伝熱性能向上のため、従来、形状変更に基づく受動的な制御として、前縁効果を利用したルーバフィンやスリットフィンが広く用いられてきた。計算機性能の向上に伴い、随伴解析による形状最適化計算によって、斜交波面<sup>(1, 2)</sup>なども提案されている。このように、熱流体機器性能の向上を目的とした開発研究において、数値計算は今後も有効な手段の一つと考えられる。

一方、流体制御デバイスとして、プラズマアクチュエータが注目を集めている<sup>(3, 4, 5)</sup>。プラズマアクチュエータは、機械的駆動部がなく仕組みが比較的単純で、実用化に近いと考えられる。そのため流体制御デバイスとしてプラズマアクチュエータを想定した研究例が多く報告されている。これまでに、特に航空機などの翼周り外部流の剥離制御において効果が確認され、実験や数値計算による制御機構の解明や解析が進められてきた<sup>(6, 7)</sup>。本研究で対象とするチャンネル流など内部流における制御については、佐野ら<sup>(8)</sup>が、低レイノルズ数域でのマイクロ熱交換器性能の向上を目的として、DBD プラズマアクチュエータを用いたチャンネル流の制御効果を実証してい

る。複数の分岐、合流部を有するチャンネル流れでは、流路での圧力損失を低減し、各流路に流量を等分配させることが、制御性能の指標となる。佐野らは DBD プラズマアクチュエータを上流の分岐部に設置し、制御性能を比較した。その結果、上流の最も入り口に近い分岐部に設置した場合に、流量分配率を高く維持したまま、圧力損失を最も低減できることを示した。本研究では、数値計算を用いて佐野らの示したチャンネル内部流れでの制御効果の詳細を解析するとともに、さらにより優れた効果をもたらすアクチュエータ配置位置を見出すことを目的とする。

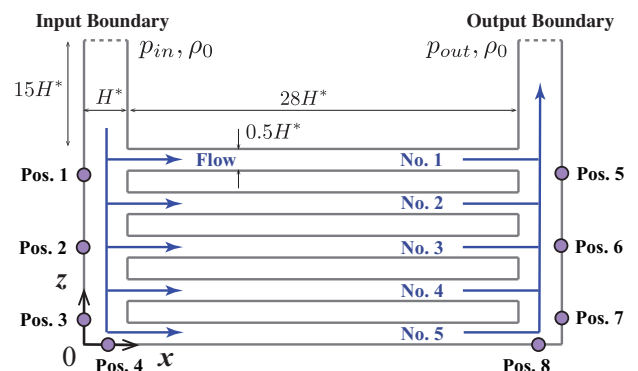


Fig. 1: Schematic of the multiple-passage channel and the actuator locations.

## 2. 解析手法

### 2.1 問題設定

解析対象となる複数の分岐，合流部を有するチャンネルは佐野ら<sup>(8)</sup>と同様のものを用いる．解析対象のチャンネルの模式図を図 1 に示す．

流体制御に用いる DBD プラズマアクチュエータの効果として，Suzen らによって提案されたモデル<sup>(9)</sup>に基づく体積力分布を用いる．本研究では，体積力分布の空間サイズとして，Sc10 と Sc50 の二種類を検証した．図 2(a)(b) に，Sc10, Sc50 と名付けた二種類の体積力分布をそれぞれ示す．なお，図 2 に示す Suzen モデルは，いずれも以下のように正規化してあり，青野<sup>(15)</sup>の値の定義と異なる．

$$S_{Suzen,i}(x,z) = \frac{S_{Suzen,i}^*}{\max_{x,z}\{S_{Suzen,i}^*\}} \quad (1)$$

このとき，支配方程式中の体積力項  $S_i$  は，Suzen 体積力モデル  $S_{Suzen,i}$ ，強度  $D_c$ ，ベース周波数  $f_{base}$  を用いて，以下のように表される．

$$S_i = D_c S_{Suzen,i}(x,z) \sin^2(f_{base}t) \quad (2)$$

ここで，ベース周波数は十分高く  $f_{base} (= f_{base}^* h^* / u_\infty^*) = 240$  である．本研究では，強度  $D_c$  は 1.0 と固定し，体積力分布のみを変更した．

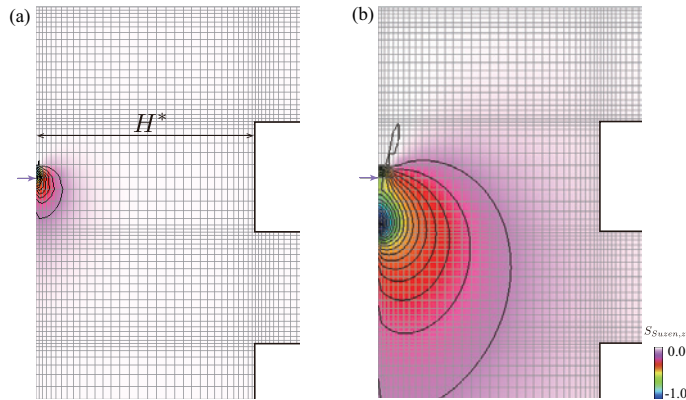


Fig. 2: Control body-force model of the DBD plasma actuator in the wall-normal direction,  $S_{Suzen,z}(x,z)$ : (a) Sc10 and (b) Sc50.

### 2.2 計算手法

流体の高解像度非定常計算には，ISAS/JAXA で開発された圧縮性流体解析ソルバー LANS3D<sup>(10, 11, 12)</sup>を用いる．

支配方程式は無次元体積力  $S_i$  を含めた二次元の圧縮性 Navier-Stokes 方程式である．変数は，流路幅  $H^*$ ，流入密度  $\rho_0^*$ ，速度  $U^*$  で無次元化している．上付き \* で示した値は有次元数である．無次元数として，マッハ数  $M$  は非圧

縮性条件を満たす 0.2 としている．また，数値計算上のレイノルズ数は  $Re_{CFD} = U^* H^* / \nu^*$  と定義される．そのため，バルク流量を基にしたレイノルズ数  $Re (= W_b^* H^* / \nu^*)$  は，式 (3) のように算出される．

$$\begin{aligned} Re &= Re_{CFD} \frac{W_b^*}{U^*} \\ &= Re_{CFD} W_b \end{aligned} \quad (3)$$

本計算で検証したレイノルズ数は，式 (3) に基づき，表 1 に示すように変換できる．実験では流量を常に一定としているのに対し，数値計算では入り口と出口の圧力をそれぞれ固定しているため，制御によって損失が低減した効果は，流量が増加することとして表れるという違いがある．

Tab. 1: Conversion of the Reynolds number

Case num.	$Re_{CFD}$	$W_b (= W_b^* / U^*)$	$Re$
Case 1.	1000	0.104	104
Case 2.	2000	0.170	340

移流項と粘性項，座標変換に伴うメトリック<sup>(13)</sup>，ヤコビアン空間差分は，6 次精度コンパクト差分スキーム<sup>(14)</sup>を用いている．また，計算の安定化の為に 6 次精度 3 重対角フィルター<sup>(14)</sup>を用いている．なお，流路外にあたる壁内部の格子点を差分及びフィルターのステンシルに含めないよう，壁境界付近では，差分は 2 次精度中心差分に，フィルターは 4 次精度・2 次精度にそれぞれ切り替え，さらに壁面には粘着条件を毎ステップ課している．時間積分は，三段階の TVD Runge Kutta 法を用い，CFL 条件を満たすよう，クーラン数は最大で 1.0 以下となるように，時間刻み幅は 0.01 とした．計算格子は三種類の格子解像度での統計量を比較し，解析には流れ方向，高さ方向にそれぞれ (168, 171) としているものを用いている．チャンネルの流入，流出部では，密度と圧力をそれぞれ，

$$(\rho_0, p_{in}) = (1.0, 1.005) \quad (4)$$

$$(\rho_0, p_{out}) = (1.0, 1.0) \quad (5)$$

のように一定値として与え，速度は，チャンネル内部点の値を用いて自由流出条件とした．

## 3. 結果

### 3.1 制御体積力による誘起流速について

異なる二つの体積力分布によって誘起された時間平均の速度分布のコンターを，二つのレイノルズ数 Case 1. と Case 2. について，それぞれ図 3，図 4 に示す．図におい

て、コンターは速度の絶対値  $\sqrt{u^2 + w^2}$  を各場合のバルク流量  $W_b$  で正規化している。図中左がわの矢印は、その時のそれぞれの体積力分布を示す図 2(a)(b) での左側の矢印と同じ位置を表している。制御体積力による誘起流速は、同じ強度  $D_c=1.0$  を与えても、空間サイズやレイノルズ数が変わると大きく異なることがわかる。

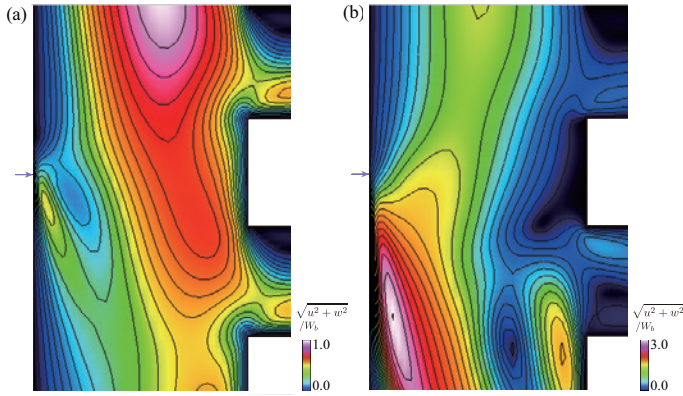


Fig. 3: Contours of the velocity amplitude  $\sqrt{u^2 + w^2}/W_b$  with a control body-force for Case 1: (a) Sc10 and (b) Sc50.

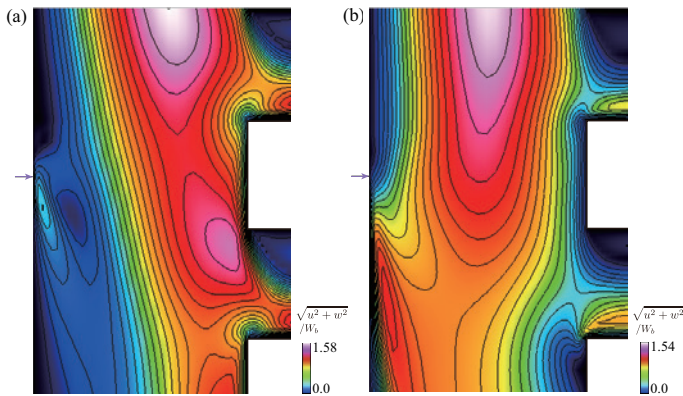


Fig. 4: Contours of the velocity amplitude  $\sqrt{u^2 + w^2}/W_b$  with a control body-force for Case 2: (a) Sc10 and (b) Sc50.

### 3.2 流量増加割合

はじめに、制御を付与した場合の流量増加割合について議論する。図 1 に模式的に示している設置位置 Pos. 1~8 は、それぞれ流路幅で無次元化した距離  $(x, z) = (0.0, 3.9), (0.0, 2.2), (0.0, 0.6), (0.6, 0.0), (30.0, 3.9), (30.0, 2.2), (30.0, 0.6), (29.4, 0.0)$  である。それぞれの位置で体積力を付与した場合に、流出部のバルク流量が非制御時のものに比べてどの程度の割合変化するかを示した棒グラフを、図 5(a), (b) に示す。

まず、二つのレイノルズ数、並びに Sc10 と Sc50 のいずれの体積力分布によっても、入り口と出口に近い Pos.

1 と Pos. 5 に置いた場合に、その他の場合と比べて流量増加割合が大きい傾向があることがわかる。また、レイノルズ数が低く、特に大きな体積力分布 Sc50 を用いるとき、上流の分岐部にあたる Pos. 1 よりも、下流の合流部にあたる Pos. 5 においた場合に、流量増加割合は大きく異なる傾向がある。

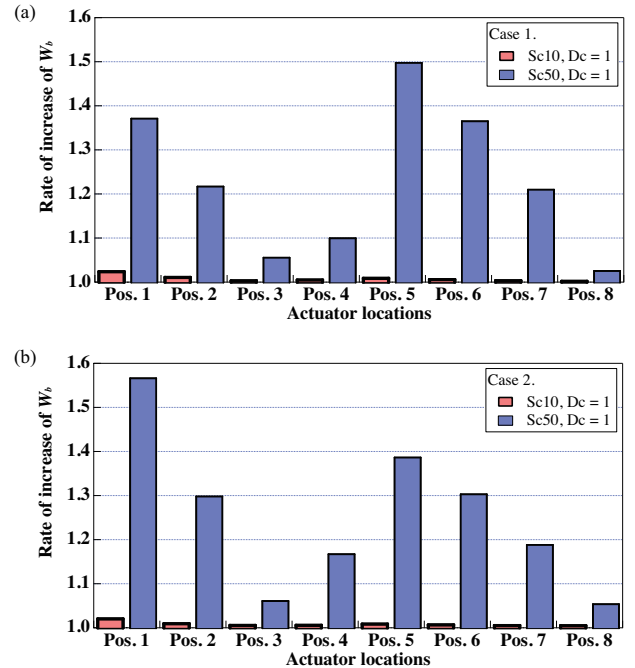


Fig. 5: Rates of increase of bulk velocity  $W_b$  under the control at two Reynolds numbers: Case 1. and 2.

### 3.3 流量分配性能

次に、それぞれの位置で体積力を付与した場合の流量分配性能について、二つのレイノルズ数について、図 6, 図 7 に示す。図中、(a) は体積力分布が Sc10, (b) は Sc50 の場合を、それぞれ示している。体積力分布が Sc10 の場合は、体積力位置による流量分配性能の違いがあまり見られない。Sc50 の場合は、上流の分岐部においた場合と、下流の合流部においた場合で大きく異なっている。Sc50 の大きな体積力分布を用いる場合は、いずれのレイノルズ数においても、上流の分岐部に体積力を付与した場合に、各枝管での流量差が著しく異なり、流量分配性能が低下する。一方、下流の合流部、特に出口に最も近い Pos. 5 に付与した場合は、非制御時に比べ各枝管での流量差が抑えられ、流量分配性能が向上するという結果が得られた。

### 3.4 速度分布

前節において、流量増加、流量分配の二つの観点で、異なる体積力位置による制御性能の違いについて考察した。中でも、大きな体積力分布 Sc50 を用いるときは、いずれのレイノルズ数においても、流量分配性能は上流の分岐

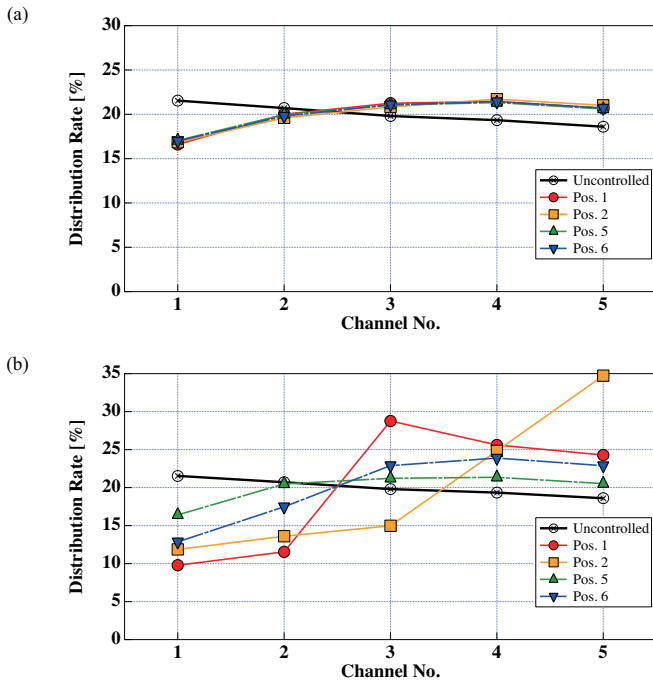


Fig. 6: Distribution rates of a multiple channel for Case 1. with the control body-force of (a) Sc10 and (b) Sc50.

部と後流の合流部に付与した場合で違いが生じ、後流の合流部に体積力を付与した場合に、より優れた流量分配性能を得られることがわかった。特に低いレイノルズ数では、この場合に、さらに流量が増加するという結果を得た。

このように、上流部と下流部に設置した場合の違いが生じる理由を考察するため、上流の分岐部での流れの様子を観察した。

上流の分岐部に制御を施した四つの制御位置の場合の、速度の絶対値  $\sqrt{u^2 + w^2}$  について、二つのレイノルズ数 Case 1, 2 の場合を、図 8, 図 9 にコンターでそれぞれ示す。図中、(a) は体積力分布が Sc10, (b) は Sc50 の場合を示している。いずれのレイノルズ数においても、大きな体積力分布 Sc50 を用いると、チャンネル中心流速と同等かそれ以上の誘起速度を生じ、チャンネル幅スケールの二次的な渦運動を生成することがわかる (図 8(b), 図 9(b) を参照)。その結果、各枝管への流量が不均一になると思われる。

特に低いレイノルズ数 Case 1 では、大きな体積力分布 Sc50 による誘起流速が、主流速度に比べて著しく大きいため、流量分配性能を低下するだけでなく、チャンネル幅スケールの強い渦運動の作用で分岐部の損失を増大し、全体としての流量の低減を招いている可能性がある。一方、下流の合流部に設置した場合では、このような渦運動を生成しない。それにより、非制御時と同等かそれ以

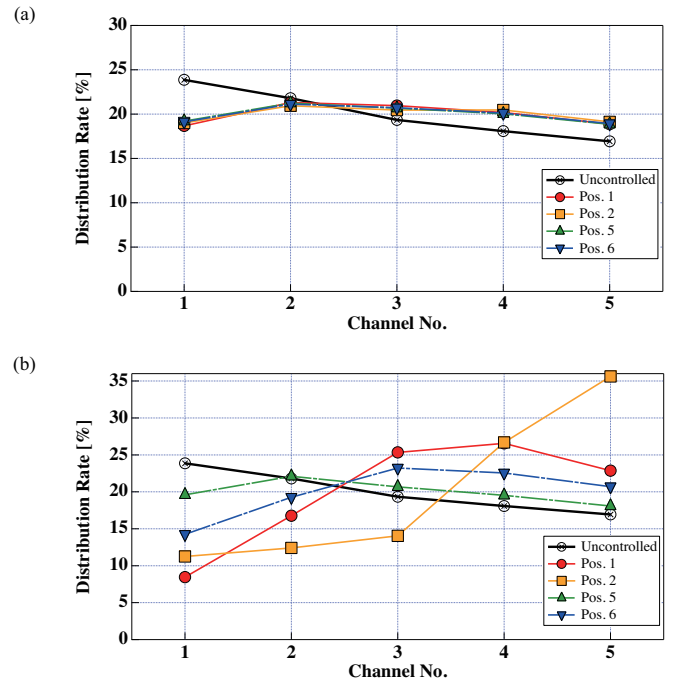


Fig. 7: Distribution rates of a multiple channel for Case 2. with the control body-force of (a) Sc10 and (b) Sc50.

上の流量分配性能を維持しつつ、流量が最も増加されることが考えられる。

#### 4. 結論

複数の分岐・合流部を有するチャンネル流れにおいて、損失低減、流量分配性能の向上を目的として、DBD プラズマアクチュエータを想定した体積力による制御設置位置の効果を調べるため、二次元数値計算による詳細解析を行った。その結果、体積力の相対的な空間サイズや強度によって、効果的なアクチュエータ設置位置が異なることがわかった。

- (1) 体積力が相対的に小さい場合は、上流の分岐部の入り口に最も近い位置に設置すると、非制御時の流量分配性能をおよそ維持したまま、流量を最も増加できる。この結果は、佐野らによる実験結果<sup>(8)</sup>と定性的に一致する。
- (2) 一方、体積力が相対的に大きく、主流速度に比べて誘起流速が大きい場合は、上流の分岐部に設置すると流路を塞ぐ流路幅スケールの強い渦運動が発生し、流量分配性能を低下するだけでなく、流量を低減する。
- (3) このとき、下流の合流部に設置すると、体積力が相対的に大きい場合でも、非制御時の流量分配性能を向上または維持したまま、全体としての流量を増加する。

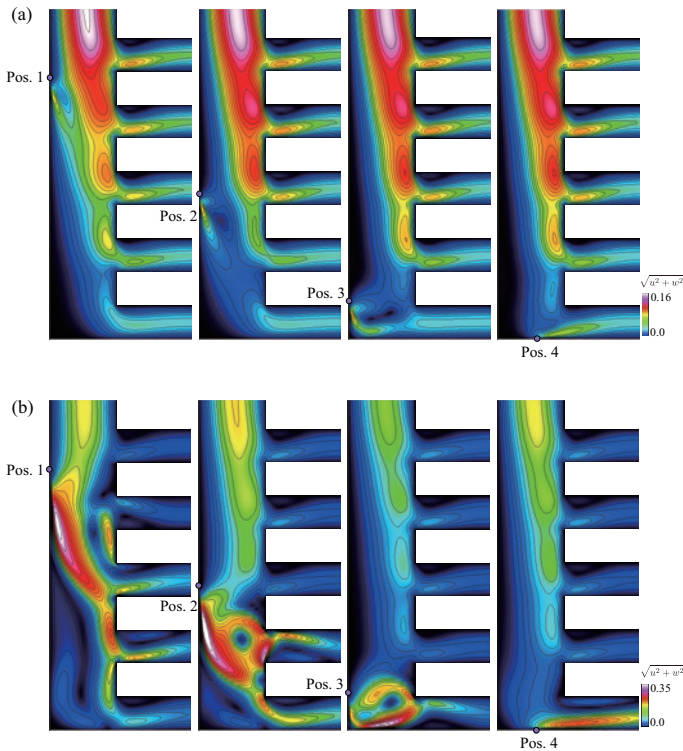


Fig. 8: Contours of the velocity amplitude  $\sqrt{u^2 + w^2}$  with a control body-force for Case 1: (a) Sc10 and (b) Sc50 for Case. 1.

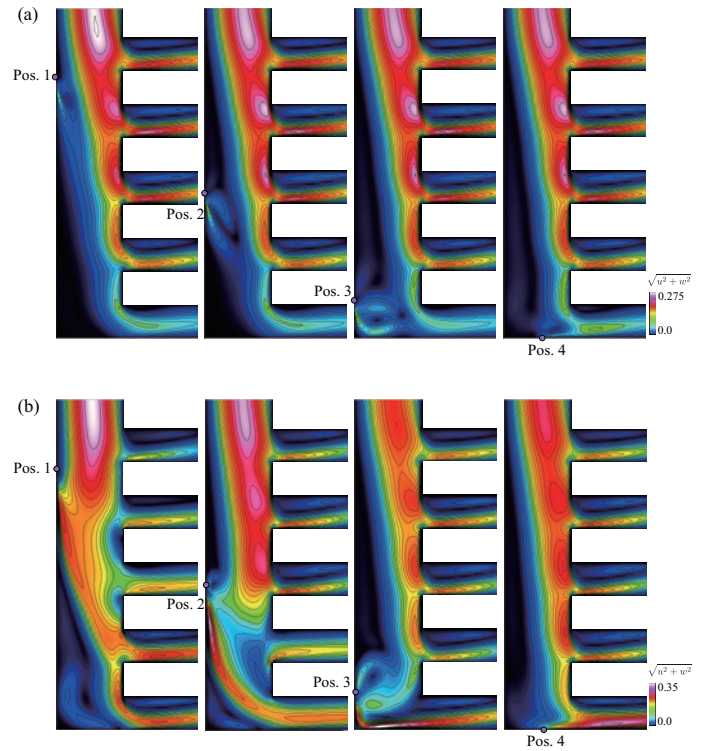


Fig. 9: Contours of the velocity amplitude  $\sqrt{u^2 + w^2}$  with a control body-force for Case 2: (a) Sc10 and (b) Sc50 for Case. 2.

## 謝辞

本研究は「HPCI戦略プログラム分野4次世代ものづくり課題1『輸送機器・流体機器の流体制御に依る革新的高効率化・低騒音化に関する研究開発』(課題番号 hp120296, hp130001, hp140207, hp150219)の枠組みとして、理化学研究所計算科学研究機構スーパーコンピュータ「京」の使用によるものである。ここに記して謝意を表する。

## 参考文献

- (1) K. Morimoto, Y. Suzuki and N. Kasagi, "Optimal shape design of compact heat exchangers based on adjoint analysis of momentum and heat transfer," *Journal of Thermal Science and Technology*, Vol. 5, No. 1 (2010), pp. 24-35.
- (2) 長谷川洋介, 鹿園直毅, "層流における伝熱促進のための壁面形状最適化," *日本機械学会熱工学コンファレンス*, 熊本 (2012), pp. 393-394.
- (3) 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 (2010), pp. 505-529.
- (4) 深湯康二, 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*, Vol. 29 (2010), pp. 243-250.

- (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*, Vol. 115, No. 1127 (2012), pp. 692-696.
- (6) M. L. Post, T. C. Corke, "Separation control on high angle of attack airfoil using plasma actuators," *AIAA Journal*, 42 (11) (2004), 2177-2184.
- (7) M. Sato, K. Okada, T. Nonomura, H. Aono, A. Yakeno, K. Asada, Y. Abe, K. Fujii, "Multifactorial effects of operating conditions of DBD plasma actuator on laminar-separated flow control," *AIAA Journal* 5 (4) (2015), 143-152.
- (8) 佐野 正利, 松本 康平, 本阿弥 眞治, "プラズマアクチュエータによる複数の分岐・合流部を有するチャンネル流れの制御," *日本機械学会論文集*, Vol. 81, No. 821 (2015).
- (9) Y. B. Suzen and P. G. Huang. Simulations of flow separation control using plasma actuators. *44th AIAA Aerospace Science Meeting and Exhibit, AIAA paper 877*, (2006).

- (10) S. Obayashi, K. Matsushima, K. Fujii, and K. Kuwahara, "Improvements in efficiency and reliability for navier-stokes computations using the lu-adi factorization algorithm," AIAA paper 338 (1986).
- (11) K. Fujii, "Developing an accurate and efficient method for compressible flow simulations - an example of cfd in aeronautics," 5th International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics (1989).
- (12) H. Aono, T. Nonomura, N. Iizuka, T. Ohsako, T. Inari, Y. Hashimoto, R. Takaki, and K. Fujii, "Scalar tuning of a fluid solver using compact scheme for a supercomputer with a distributed memory architecture," CFD Letters, 5(4) (2013), pp. 143–152.
- (13) Y. Abe, T. Nonomura, N. Iizuka, and K. Fujii, "Geometric interpretations and spatial symmetry property of metrics in the conservative form for high-order finite-difference schemes on moving and deforming grids," Journal of Computational Physics 260 (2014), pp. 163–203.
- (14) S. K. Lele, "Compact finite difference schemes with spectral-like resolution," Journal of Computational Physics, 103(1) (1992), pp. 16–42.
- (15) Hikaru Aono, Satoshi Sekimoto, Makoto Sato, Aiko Yakeno, Taku Nonomura and Kozo Fujii, "Computational and experimental analysis for flow structures induced by a plasma actuator with burst modulations in quiescent air," Mechanical Engineering Journal 2, No. 4 (2015), 15-00233.